

张玉琴,李栋梁. 2019. 华南汛期旱涝急转及其大气环流特征 [J]. 气候与环境研究, 24(4): 430–444. Zhang Yuqin, Li Dongliang. 2019. Drought-flood abrupt alternation and its atmospheric circulation characteristics during flood season in southern China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(4): 430–444. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18024

# 华南汛期旱涝急转及其大气环流特征

张玉琴 李栋梁

南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室,  
南京 210044

**摘要** 利用国家气象信息中心提供的1960~2015年中国753站汛期(4~9月)逐日降水资料,对华南地区汛期旱涝急转现象进行了分析,定义了一个旱涝急转评价指标,分析了旱涝急转事件的特点及其大气环流特征。结果表明:华南在56年汛期中共发生了17次旱涝急转事件,发生频率由1960年代的3次下降到1970年代、1980年代的1次,后迅速增加到1990年代的4次、21世纪初的8次。将其按急转时间分为春末初夏旱转涝事件和盛夏涝转旱事件。春末初夏旱转涝事件,旱期西太平洋副热带高压主体偏南,中国东部主要受干冷高压脊控制,华南低层负涡度发展伴随着辐散、下沉运动的加强和水汽输送的减弱,降水偏少;涝期西太平洋副热带高压北抬,孟加拉湾南支槽异常偏强,华南位于副热带高压西侧和南亚高压东南侧,低层正涡度发展伴随着辐合、上升运动和水汽输送的加强,降水偏多。盛夏涝转旱事件,涝期西太平洋副热带高压主体偏西,华南处于副热带高压西北侧和南亚高压东南侧,低层水汽输送、辐合和上升运动均加强,正涡度发展,降水增多;旱期西太平洋副热带高压显著北跳,南亚高压向东向北扩展至长江中下游地区,华南为西太平洋副热带高压和高空东风急流所控制,低层水汽输送减弱,辐散和下沉运动加强,负涡度发展,干旱少雨。

**关键词** 旱涝急转 华南 标准化降水指数 汛期

文章编号 1006-9585(2019)04-0430-15

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18024

## Drought-Flood Abrupt Alternation and Its Atmospheric Circulation Characteristics during Flood Season in Southern China

ZHANG Yuqin and LI Dongliang

Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

**Abstract** Based on the daily precipitation data of the 753 Chinese stations provided by the National Meteorological Information Center, the drought-flood abrupt alternation phenomenon during the 1960–2015 flood seasons (April to September) was investigated, an evaluation index of drought-flood abrupt alternation was defined, and the atmospheric circulation characteristics of the drought-flood abrupt alternation events were studied. The results show that the drought-flood abrupt alternation events happened 17 times in southern China during the flood seasons of 1960 to 2015, and the frequency of their occurrences declined from three times in the 1960s to once in the 1970s and the 1980s, and then

收稿日期 2018-02-02; 网络预出版日期 2018-04-11

作者简介 张玉琴,女,1992年出生,硕士研究生,主要从事气候变化和预测的研究。E-mail: nuist\_zyq@163.com

通讯作者 李栋梁, E-mail: lidl@nuist.edu.cn

资助项目 公益性行业(气象)科研专项GYHY(QX)201506001-1,国家重点研发计划项目2013CB430202

**Funded by** China Special Fund for Meteorological Research in the Public Interest [Grant GYHY(QX)201506001-1], National Key Research and Development Program of China (Grant 2013CB430202)

increased rapidly to four times in the 1990s and eight times in the early 21st century. According to the abrupt alternation time, the events are divided into two groups: Drought-to-flood events in late spring and early summer and flood-to-drought events in midsummer. During the drought period of drought-to-flood events in late spring and early summer, the location of the western Pacific subtropical high was more southerly; the eastern part of China was mainly affected by a dry and cold ridge, and the negative vorticity development in the lower-level southern China was accompanied by the strengthening of divergence and descending movement and the weakening of the water vapor transport, which caused less rainfall in southern China. During the flood period of drought-to-flood events in late spring and early summer, the western Pacific subtropical high stretched toward the north; the southern branch trough of the Bay of Bengal was abnormally stronger; southern China was located in the west side of the subtropical high and southeast side of the South Asia high; and the positive vorticity development in the lower-level southern China was accompanied by the strengthening of convergence, ascending movement, and water vapor transport, which caused more rainfall in southern China. During the flood period of drought-to-flood events in midsummer, the location of the western Pacific subtropical high was more westerly; southern China was located in the northwest side of the subtropical high and the southeast side of the South Asia high; and the positive vorticity developed in the lower-level southern China with the strengthening of convergence, ascending movement, and water vapor transport, which caused the precipitation in southern China to increase. During the drought period of drought-to-flood events in midsummer, the western Pacific subtropical high jumped significantly to the north; the South Asia high extended eastward and northward to the middle and lower reaches of the Yangtze River; southern China was controlled by the subtropical high and the upper east wind jets; negative vorticity developed in the lower-level southern China with the strengthening of divergence and descending movement and the weakening of the water vapor transport, which caused the precipitation in southern China to decrease.

**Keywords** Drought–flood abrupt alteration, Southern China, Standardized precipitation index, Flood season

## 1 引言

旱涝急转是指一段时间旱, 而接下来的一段时间涝, 旱、涝事件交替出现的情形, 反映了旱涝极端事件在短期内的共存, 与只发生干旱或洪涝相比, 通常会造成更大的经济损失和人员伤亡(吴志伟等, 2006a)。随着温室效应的不断加重, 全球气候明显增暖, 促使水循环进一步加剧, 从而引起水资源的时空分布变得更不均匀, 进而导致旱涝灾害发生频率以及强度均增大, 旱涝急转发生频率也在逐渐增加。“旱涝急转”多发生在华南、长江中下游和淮河流域等地区, 尤其在夏季发生的可能性较高(刘凤丽和黄国兵, 2012)。华南地处中国大陆最南端, 雨季发生最早且最持久, 是我国汛期雨量最多且气象灾害频发的区域(张旭斌和张熠, 2011; 李丽平等, 2012; 何编等, 2012)。华南汛期一般从4月开始到9月, 有时甚至到10月结束, 4~6月称为前汛期, 以极锋性质的降水为主; 7~9月称为后汛期, 以台风和热带辐合带(ITCZ)等热带天气系统影响的季风性质的降水为主, 年内降水呈双峰型变化, 旱涝急转发生频率高(高辉等, 2013; 白婷, 2014)。

旱涝异常一直以来都是一个国内外研究的热点问题, 在20世纪30年代, 许多学者就开始关注旱涝异常问题。涂长望(1936)分析了20世纪30年代初我国两次罕见的旱涝灾害与东亚大气活动中心之间的关系, 认为日本高压强度及其南下时间的早晚是影响我国夏季旱涝最主要的因子; 陈汉耀(1957)对1954年江淮流域洪水时期的环流特征进行研究, 指出鄂霍次克海高压的生成和持续促成东亚急流的分支, 是造成持久降水的主要原因; 陶诗言和徐淑英(1962)的研究表明我国夏季江淮流域持久性旱涝现象与中纬和副热带地区大气环流的异常有密切联系; Vogel and Huff(1978)研究了圣路易斯异常降水的天气原因, 认为自西南方向移至圣路易斯的飑线与该地区降水异常有关; Hirschboeck(1987)分析了灾难性洪水与大气环流异常的关系, 指出典型环流特征的异常位置、大气过程的异常组合和环流型罕见的持续性等大尺度异常行为都会导致极端区域洪水; Trenberth and Guillemot(1996)对美国北部1988年极端干旱及1993年极端洪水的物理成因进行研究, 发现热带太平洋海温异常是一个显著的外部强迫因子; Cavazos(1999)分析了导致墨西哥东北部和德克

萨斯东南部极端事件的大尺度环流异常，提出了一种新的降尺度气候诊断方法。

20世纪90年代以来，由于旱涝急转频发且造成的灾害日趋严重，该现象也越来越受到关注。吴志伟等（2006a, 2006b）发现长江中下游夏季旱涝急转的发生频率上升。吴志伟等（2007）提出华南强旱涝急转事件前期伴随着冬春季准两年振荡（QBO）的增强，秋、冬季中国近海至西北太平洋和春季东、西印度洋海温的增暖。张效武等（2007）、王胜等（2009）和程智等（2012）对淮河流域旱涝急转气候特征进行研究，认为淮河流域主汛期典型旱涝急转现象约为4年一遇，且2000年以来频次明显增多。沈柏竹等（2012），封国林等（2012）认为旱涝急转前后显著的水汽输送通量差异和大气环流场差异，以及冷暖空气的异常和交绥是造成2011年长江中下游地区旱涝急转的主要原因。Yang et al. (2013) 研究认为2011年长江中下游地区旱涝急转与东亚上空中高纬度地区经向环流的季节内振荡密切相关。徐敏等（2013）指出欧亚中高纬度高度场、经向风场低频位相的相反纬向分布是造成淮河流域夏季旱涝急转的环流成因。童金和徐海明（2014）的研究发现，2011年长江中下游旱涝急转的转折前后大气环流场存在显著差异，副热带高压短期活动、孟加拉湾低槽及中高纬度槽脊对旱涝急转具有重要影响。何慧等（2016）发现华南地区夏季长周期旱涝急转呈强度增强、频率增多的趋势。

回顾已有工作发现，前人对旱涝急转已有足够的认识，并从大气环流调整角度对其成因作了非常有针对性的分析，但研究通常是固定了旱、涝事件的转换时间节点和旱、涝事件持续的时间长度。然而，旱涝急转具有转折突发性和不同的持续时间长度，因此，本文定义了一个既考虑转折突发性（转折时间的随机），又考虑不同的持续时间长度（达到行业标准的干旱或者洪涝）的旱涝急转评价指标，利用该指标评价了1960~2015年华南地区汛期发生的旱涝急转事件，对其分布特征和环流特征进行研究，以期为华南地区的防汛抗旱提供参考。

## 2 资料和方法

### 2.1 资料选取

(1) 选自中国气象局国家气象信息中心提供的

1960~2015年中国753站中的中国东部412站逐日降水观测资料；(2) 中国气象局整编的《中国气象灾害大典（综合卷）》（丁一汇，2008）和《中国气象灾害年鉴》（中国气象局，2005~2015），该大典与年鉴中详细记载了历史气象灾情；(3) NCEP/NCAR逐日再分析资料（Kalnay et al., 1996），包括1960~2015年位势高度、比湿、风、垂直速度和地表气压场资料，水平分辨率均为 $2.5^{\circ}$ （纬度） $\times 2.5^{\circ}$ （经度），其中位势高度和风场的垂直分辨率为17层（1000、925、850、700、600、500、400、300、250、200、150、100、70、50、30、20和10 hPa），垂直速度为前12层，比湿为前8层。

### 2.2 方法介绍

华南地区汛期一般从4月开始直至9月，因此以4~9月累积降水量来表征华南地区汛期降水。4~6月为前汛期，7~9月为后汛期。参考Ting and Wang (1997) 划分降水区的方法，先计算412站1960~2015年汛期4~9月累积降水的标准差（如图1a所示），得到华南地区降水变率最大的测站为阳江站（ $21.50^{\circ}\text{N}, 111.58^{\circ}\text{E}$ ），以此为基点计算其与中国东部412个站1960~2015年汛期4~9月累积降水的单点相关（如图1b所示），相关系数在基点处为1，然后向周围逐渐减小，阴影所覆盖区域为显著相关区，35个站通过95%显著性水平的置信度检验（图1c），表明该区域降水量的年际变化较为一致。为了说明阳江代表站与华南35个站在汛期季节内降水量变化的一致性，计算了它们逐候降水量的相关系数（表略），发现其相关性均通过99%置信度水平的置信度检验，表明该区域降水量在季节内时间尺度上的变化也非常一致，故使用该区域内35站的平均降水量表征华南地区汛期降水。

为判断华南地区汛期旱涝急转事件中的旱涝时段，选择标准化降水指数（SPI）（McKee et al., 1993）作为诊断量。SPI指数是在计算出某个时段内降水量的 $\Gamma$ 分布概率后，再对其进行正态标准化处理，最终使用标准化降水累积频率分布来划分旱涝等级，指数的具体计算方法可参考《GB/T20481-2006 中华人民共和国国家标准》（张强等，2006），其旱涝等级划分标准如表1所示。

根据国家气象干旱等级标准，结合《中国气象

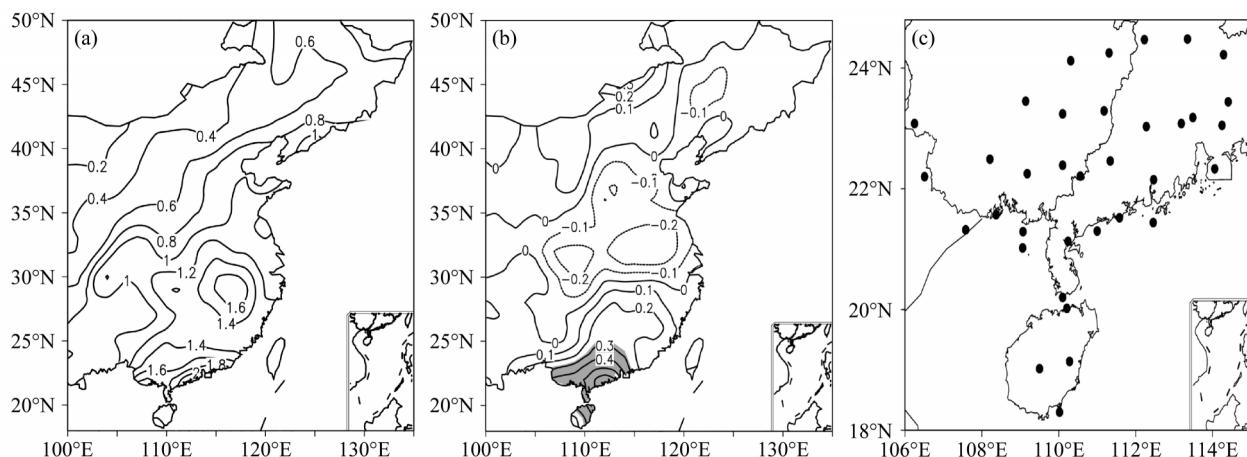


图1 1960~2015年 (a) 中国东部412站汛期(4~9月)降水量标准差(单位: mm), (b) 阳江站与逐站汛期降水单点相关(阴影表示置信度达95%)和(c) 华南地区35个代表站分布

Fig. 1 (a) Flood season (April to September) precipitation standard deviation (mm) of 412 stations; (b) correlation between the representative station's and 412 stations' precipitation during the flood season (the areas that are significant at the 95% confidence level are shaded) in eastern China 1960–2015; (c) the 35 sites distribution in southern China

表1 标准化降水指数组旱涝等级划分

Table 1 Drought classification by SPI (Standardized Precipitation Index)

等级	标准降水指数SPI范围	类型
1	$2 \leqslant \text{SPI}$	特涝
2	$1.5 \leqslant \text{SPI} < 2.0$	重涝
3	$1.0 \leqslant \text{SPI} < 1.5$	中涝
4	$0.5 \leqslant \text{SPI} < 1.0$	轻涝
5	$-0.5 < \text{SPI} \leqslant 0.5$	正常
6	$-1.0 < \text{SPI} \leqslant -0.5$	轻旱
7	$-1.5 < \text{SPI} \leqslant -1.0$	中旱
8	$-2.0 < \text{SPI} \leqslant -1.5$	重旱
9	$\text{SPI} \leqslant -2.0$	特旱

灾害大典(综合卷)》(丁一汇, 2008)和《中国气象灾害年鉴》(中国气象局, 2005–2015), 华南旱涝急转评价指标可定义为: 该区域平均汛期(4~9月)逐候SPI指数连续3个候以上(含3个候)小于或等于-0.5定义为气象干旱, 连续3个候以上(含3个候)大于或等于0.5定义为气象洪涝, 旱涝间隔期不超过2个候, 满足以上条件的过程定义为华南地区汛期旱涝急转事件。

文中涉及到的气候平均是指1960~2015年同期平均值, 并考虑到水汽主要集中在300 hPa以下

(Zhou, 2003; 张洁等, 2009), 在计算整层积分的水汽输送通量时, 积分上限 $P_t$ 取300 hPa, 根据Rasmusson方程(Rasmusson, 1967):

$$\begin{cases} Q_u = \frac{1}{g} \int_{P_s}^{P_t} q u d p \\ Q_v = \frac{1}{g} \int_{P_s}^{P_t} q v d p \end{cases}, \quad (1)$$

其中,  $Q_u$ 为纬向水汽输送通量,  $Q_v$ 为经向水汽输送通量, 单位是 $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ;  $P_s$ 表示地面气压,  $g$ 为重力加速度;  $u$ 、 $v$ 分别为纬向、经向风速;  $q$ 为比湿。水汽通量散度为

$$D = \frac{\partial Q_u}{\alpha \cos \phi \partial \lambda} + \frac{\partial Q_v}{\alpha \partial \phi}, \quad (2)$$

其中,  $D$ 的单位是 $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ,  $\alpha$ 为地球半径,  $\varphi$ 为纬度,  $\lambda$ 为经度。降水距平百分率为

$$P_a = \frac{P - \bar{P}}{\bar{P}} \times 100\%, \quad (3)$$

其中,  $P$ 为某个时段内的降水量,  $\bar{P}$ 为计算时段的同期气候平均降水量。

另外, 还应用了距平分析、合成分析和t检验方法(黄嘉佑, 2004; 魏凤英, 2007)。

### 3 华南地区汛期旱涝急转的特征

为考察华南地区降水随时间的演变, 分析了华南地区1960~2015年的平均候降水量及候降水标

准差(图2), 华南地区年内降水大致呈双峰型变化, 并主要集中在汛期(4~9月), 即在5月下旬(约第30候)至6月下旬(约第36候)为第一峰, 7月下旬(约第41候)至8月下旬(约第48候)为第二峰, 降水大值区对应着降水标准差大值区, 表明汛期内的降水年际变化大, 降水不稳定, 因此旱涝急转应该在汛期发生的可能性较高。

根据定义的旱涝急转评价指标, 挑选出了华南地区汛期的旱涝急转事件, 给出了旱涝急转事件中旱、涝时段及其降水距平百分率和SPI指数(表2和表3)。可以看出, 1960~2015年期间华南汛期共发生了17次旱涝急转事件, 其中11次旱转涝事

件, 6次涝转旱事件。在旱期, 降水距平百分率均偏少30%以上, 同时SPI小于-0.6; 在涝期, 降水距平百分率均偏多30%以上, 同时SPI大于0.5。可见, 根据该指标可准确监测旱涝急转事件。

图3为旱涝急转事件在各年代间发生的次数, 华南汛期旱涝急转的发生频率具有先减少后增加的年代际特征, 20世纪60年代发生了3次, 20世纪70年代和80年代最少, 各仅发生1次, 20世纪90年代开始迅速增加, 发展到21世纪初的16年中有8次旱涝急转事件。

从表2和表3中可以看到, 旱转涝事件多发生于5月中旬至6月初, 涝转旱事件多发生于7月初。

**表2 华南汛期旱转涝事件的旱、涝时段及其降水距平百分率和SPI指数**

**Table 2 The drought and flood periods of drought-to-flood events, percentages of precipitation anomalies, and SPI in southern China during the flood season**

年份	旱期时段	旱期降水距平百分率	旱期SPI	涝期时段	涝期降水距平百分率	涝期SPI
1962年	4月第1候至5月第1候	-30.2%	-0.69	5月第4候至6月第4候	31.3%	1.13
1964年	7月第2候至7月第6候	-71.0%	-0.83	8月第1候至8月第5候	48.4%	0.88
1967年	6月第3候至7月第4候	-63.8%	-0.93	8月第1候至8月第5候	76.1%	1.34
1971年	4月第2候至5月第2候	-62.3%	-1.19	5月第3候至6月第2候	45.9%	0.94
1991年	4月第1候至6月第1候	-59.7%	-0.65	6月第2候至6月第6候	41.2%	1.29
1994年	4月第1候至5月第5候	-37.1%	-1.00	6月第2候至6月第4候	60.9%	1.07
1995年	4月第3候至5月第5候	-58.1%	-0.73	6月第1候至6月第4候	56.7%	1.10
2004年	6月第1候至7月第1候	-53.4%	-0.63	7月第2候至7月第6候	40.5%	1.14
2006年	5月第2候至5月第4候	-69.3%	-0.83	5月第5候至6月第2候	56.1%	1.15
2009年	4月第6候至5月第3候	-83.1%	-1.60	5月第4候至6月第3候	40.0%	0.96
2014年	4月第3候至4月第5候	-81.4%	-1.92	4月第6候至5月第4候	44.4%	0.59

**表3 华南汛期涝转旱事件的旱、涝时段及其降水距平百分率和SPI指数**

**Table 3 The drought and flood periods of flood-to-drought events, percentages of precipitation anomalies, and SPI in southern China during the flood season**

年份	涝期时段	涝期降水距平百分率	涝期SPI	旱期时段	旱期降水距平百分率	旱期SPI
1988年	7月第6候至9月第1候	37.2%	0.90	9月第2候至9月第6候	-71.0%	-1.10
1998年	5月第4候至7月第2候	53.5%	0.88	7月第4候至8月第1候	-66.5%	-0.94
2003年	6月第2候至6月第6候	38.5%	1.04	7月第1候至8月第1候	-44.9%	-0.63
2005年	5月第6候至7月第1候	39.8%	1.07	7月第2候至7月第4候	-74.7%	-1.29
2009年	7月第6候至8月第3候	41.5%	0.90	8月第4候至9月第2候	-70.6%	-1.04
2010年	5月第6候至6月第6候	31.4%	0.72	7月第1候至7月第4候	-88.6%	-1.82

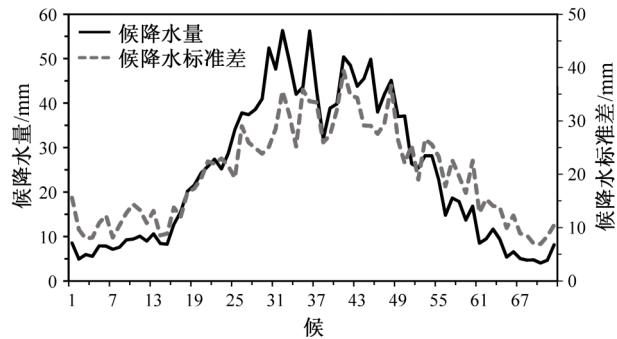


图2 华南地区1960~2015年平均候降水量(实线)及其标准差(虚线)  
Fig. 2 Average pentad precipitation (solid line) and its standard deviation (dotted line) in southern China during 1960–2015

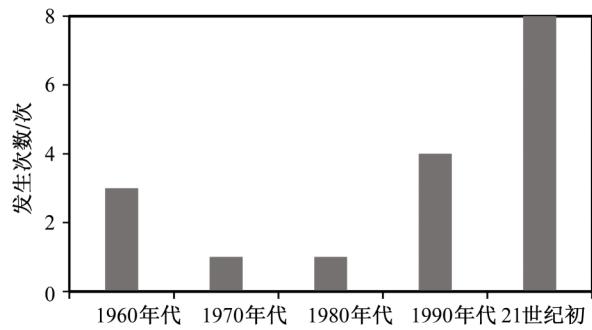


图3 华南汛期旱涝急转事件的年代际分布

Fig. 3 Decadal distribution of the drought–flood abrupt alternation events in the flood season of southern China

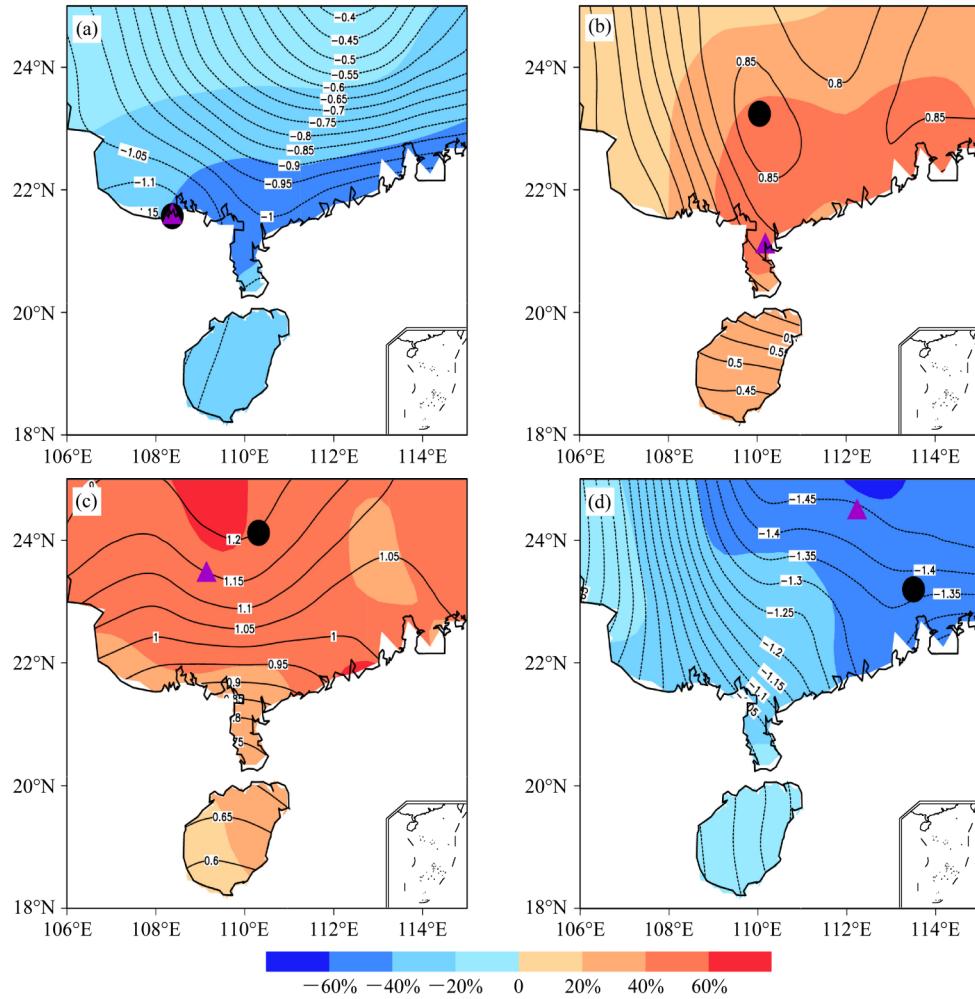


图4 华南汛期旱涝急转事件不同时段降水距平百分率(填色)和SPI(黑色等值线)空间分布(紫色三角形表示降水距平百分率最值站点, 黑色圆形表示SPI最值站点): (a) 春末初夏旱转涝事件旱期; (b) 春末初夏旱转涝事件涝期; (c) 盛夏涝转旱事件涝期; (d) 盛夏涝转旱事件旱期

Fig. 4 Spatial distribution of the percentages of precipitation anomalies (shaded) and SPI (black contour line) during the different periods of the drought–flood abrupt alternation events spatial distribution in the flood season of southern China (the purple triangle represents the maximum or minimum percentages of precipitation anomalies of the sites, and the black circle represents the site with the maximum or minimum SPI). (a) Drought period of drought-to-flood events in late spring and early summer; (b) flood period of drought-to-flood events in late spring and early summer; (c) flood period of flood-to-drought events in midsummer; (d) drought period of flood-to-drought events in midsummer

因此,将上述挑选的旱涝急转事件按急转时间进行分类,第一类为7个发生于5月中旬至6月初的旱转涝事件(1962年、1971年、1991年、1994年、1995年、2006年和2009年),称为春末初夏旱转涝事件;第二类为4个发生于7月初的涝转旱事件(1998年、2003年、2005年和2010年),称为盛夏涝转旱事件。

图4给出了华南汛期旱涝急转事件不同时段降水距平百分率和SPI的空间分布,两类旱涝急转事件的旱期降水距平百分率和SPI各地均为负值,降水异常偏少;涝期各地均为正值,降水异常偏多。两者的中心也都较为一致。在华南春末初夏旱转涝事件中,旱期(图4a)降水区域平均偏少40%~50%(降水距平百分率为-43.6%),干旱中心位于钦州站( $21.57^{\circ}\text{N}$ ,  $108.37^{\circ}\text{E}$ ),降水偏少70%~80%(降水距平百分率为-76.9%),华南沿海地区是干旱最显著的地区,降水量向北逐渐增加;涝期(图4b)降水区域平均偏多5成(降水距平百分率为50.0%),洪涝中心位于雷州半岛的湛江站( $21.09^{\circ}\text{N}$ ,  $110.18^{\circ}\text{E}$ ),降水偏多90%~100%(降水距平百分率为96.0%),华南东部地区洪涝最显著,降水量向西逐渐减少。在华南盛夏涝转旱事件中,降水空间差异较大,涝期(图4c)降水距平百分率在13.1%~82.6%,其中来宾站( $23.45^{\circ}\text{N}$ ,  $109.14^{\circ}\text{E}$ )最多,区域平均为41.1%,华南降水呈北多南少的分布特点;旱期(图4d)降水距平百分率在-67.6%~-5.69%,其中连县站( $24.47^{\circ}\text{N}$ ,  $112.23^{\circ}\text{E}$ )最少,区域平均为-34.2%,华南降水呈东少西多的分布特点。

在华南春末初夏旱转涝事件中,旱期(图4a)SPI区域平均为-1.02,最小为钦州站( $21.57^{\circ}\text{N}$ ,  $108.37^{\circ}\text{E}$ ),SPI为-1.34;涝期(图4b)SPI区域平均为0.99,最大为桂平站( $23.24^{\circ}\text{N}$ ,  $110.05^{\circ}\text{E}$ ),SPI为1.45。在华南盛夏涝转旱事件中,涝期(图4c)SPI区域平均为0.97,其中蒙山站( $24.12^{\circ}\text{N}$ ,  $110.31^{\circ}\text{E}$ )为1.23,干旱最显著;旱期(图4d)SPI区域平均为-1.17,其中增城站( $23.20^{\circ}\text{N}$ ,  $113.5^{\circ}\text{E}$ )为-1.57,洪涝最显著。在旱涝急转事件的不同时段中,SPI与降水距平百分率空间分布基本相同。

## 4 华南地区汛期旱涝急转事件大气环流特征

### 4.1 中低层环流异常分布特征

西太平洋副热带高压作为东亚季风环流系统的主要成员之一,制约着大气环流变化,对中国夏季雨带位置和旱涝趋势也有举足轻重的影响,它的强度、空间分布、时间分布等的差异都会导致我国夏季雨带的时空分布和降水强度产生较大的变化,并影响着其南侧太平洋上的水汽通过东南季风向大陆输送。在春末初夏旱转涝事件的旱期,从中层500 hPa上(图5a)可以看到,在孟加拉湾至西太平洋上存在大范围的高度显著负异常区域,与气候平均状态相比,584 dagpm等高线位置基本不变,位于孟加拉湾北部—中南半岛北部—台湾南部—西太平洋上空,无588 dagpm等高线,表明西太平洋副热带高压主体偏南、偏弱,中国东部主要受干冷高压脊控制;在低层850 hPa上(图6a),华南至华北为一个显著的涡度负异常中心所控制,低层负涡度中心常伴随着辐散和下沉运动的加强,这种环流形势导致华南地区干旱少雨。春末夏初旱转涝事件的涝期与旱期相比,孟加拉湾至西太平洋上空中层500 hPa大范围的显著高度负异常区域仍存在,副热带高压北抬,主体偏东、偏北、偏弱,低纬度的孟加拉湾南支槽异常增强,华南地区正好处于副热带高压西侧和孟加拉湾南支槽前,有利于孟加拉湾的西南水汽输送和源自西太平洋副热带高压南侧转向的偏南水汽输送(图5b);850 hPa上(图6b),从菲律宾群岛经南海至华南为一个显著的涡度正异常中心所控制,低层正涡度中心常伴随着辐合和上升运动的加强,这种环流形势有利于华南地区降水增多。

在盛夏涝转旱事件的涝期,500 hPa上(图5c),西太平洋上空存在大范围的显著高度正异常区域,副热带高压主体偏西、偏南、偏强,脊点已西伸到 $114^{\circ}\text{E}$ 附近,脊线位置较常年偏南3个纬度左右,位于 $18^{\circ}\text{N}$ ,华南地区位于副高西北侧,水汽输送充沛,存在上升运动;850 hPa上,从华南至东海为一个显著的涡度正异常中心所控制,导致华南地区降水增多(图6c)。在盛夏涝转旱事件的旱期,500 hPa上西太平洋上空大范围的高度正异

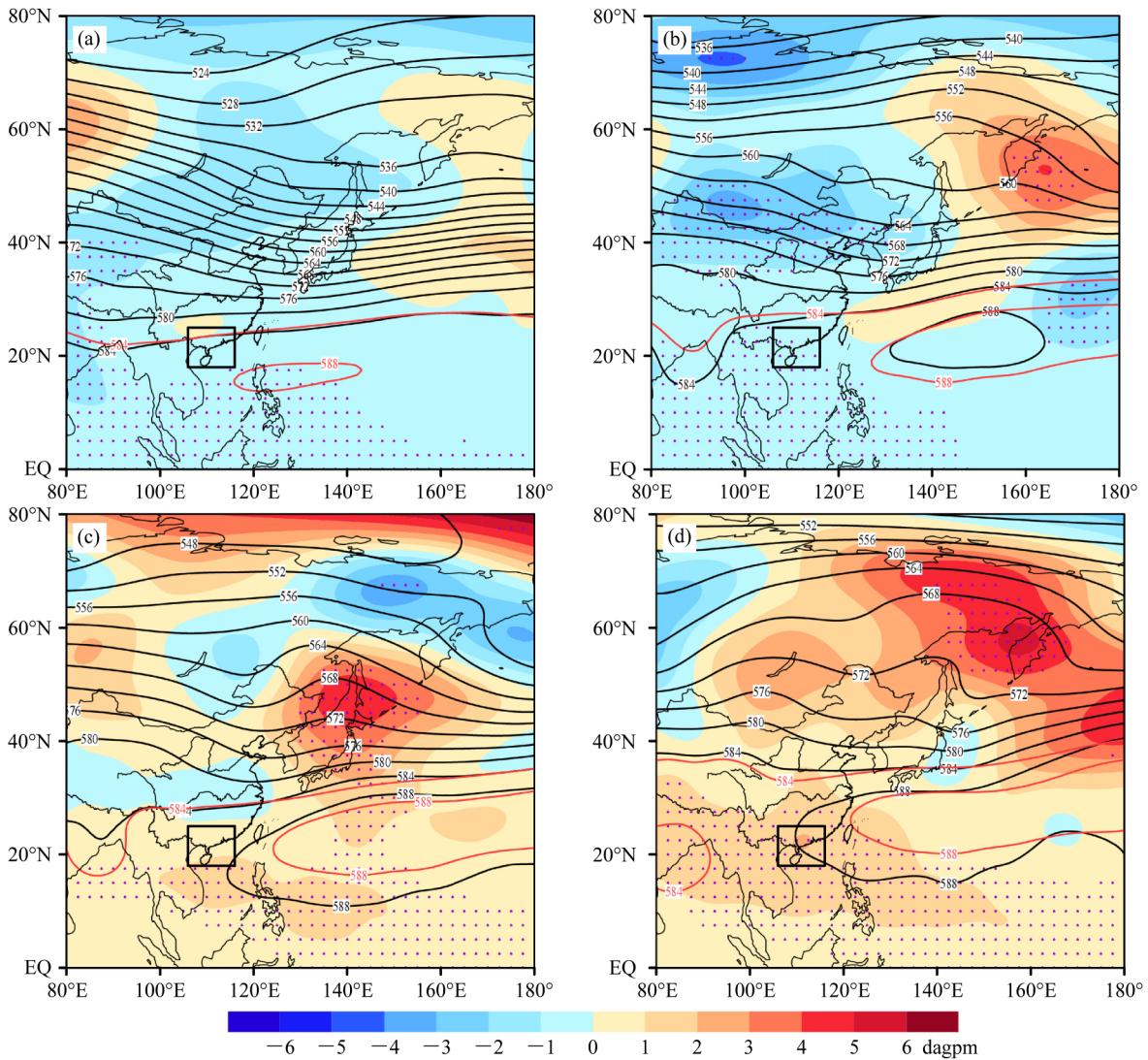


图5 华南汛期旱涝急转事件 500 hPa 合成高度场（黑色等值线，单位：dagpm）、高度距平场（阴影，单位：dagpm）和 584、588 dagpm 等高线气候态（红色等值线）分布（紫色圆点表示通过了 90% 水平的置信度检验，方框表示所研究的华南区域）：(a) 春末初夏旱转涝事件旱期；(b) 春末初夏旱转涝事件涝期；(c) 盛夏涝转旱事件涝期；(d) 盛夏涝转旱事件旱期

Fig. 5 Composite distribution of 500-hPa geopotential height field (black contour line, units: dagpm), 500-hPa geopotential height anomaly field (the shaded, units: dagpm) and 584 and 588-dagpm climate geopotential contours (red contour line) during the period of drought–flood abrupt alternation events in the flood season of southern China. The areas that are significant at the 90% confidence level are shaded with purple polka dots. The southern China area of study is framed by the black square. (a) Drought period of drought-to-flood events in late spring and early summer; (b) flood period of drought-to-flood events in late spring and early summer; (c) flood period of flood-to-drought events in midsummer; (d) drought period of flood-to-drought events in midsummer

常区域仍存在并向北加强，西太副高主体偏西、偏南、偏强，较涝期明显北跳，脊点已西伸到 110°E 附近，脊线位置较常年偏南 3 个纬度左右，位于 22°N，华南地区此时受西太平洋副热带高压控制，存在下沉运动（图 5d）；850 hPa 上（图 6d），从华南经菲律宾群岛北部至西太平洋上为

一个显著的涡度负异常中心所控制，导致华南地区干旱少雨。

#### 4.2 高层环流异常分布特征

南亚高压是位于北半球对流层上部最稳定的大型反气旋环流系统，同时也是气候变化的一个强信号，影响着我国广大地区夏季的旱涝分布（Mason

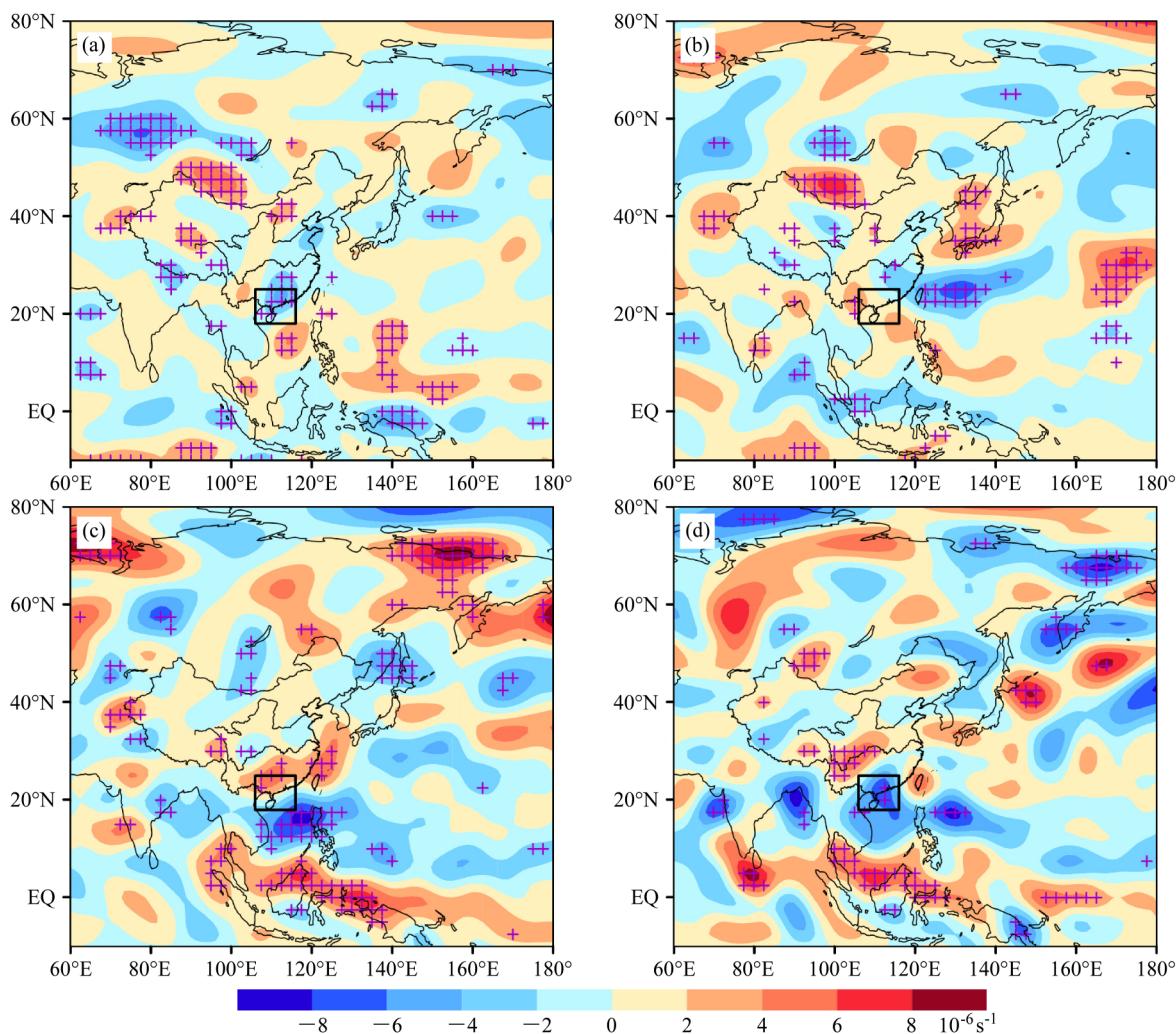


图6 华南汛期旱涝急转事件850 hPa涡度距平场（阴影，单位： $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ）（紫色十字表示通过了90%信度水平的置信度检验，方框表示所研究的华南区域）：(a) 春末初夏旱转涝事件旱期；(b) 春末初夏旱转涝事件涝期；(c) 盛夏涝转旱事件涝期；(d) 盛夏涝转旱事件旱期

Fig. 6 Composite distribution of 850-hPa vorticity anomaly field (shaded, units:  $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) during the period of drought–flood abrupt alternation events in the flood season of southern China. The areas that are significant at the 90% confidence level are shaded by purple crosses. (a) Drought period of drought-to-flood events in late spring and early summer; (b) flood period of drought-to-flood events in late spring and early summer; (c) flood period of flood-to-drought events in midsummer; (d) drought period of drought-to-drought events in midsummer

and Anderson, 1963; 丁一汇等, 2007)。在春末初夏旱转涝事件的旱期，在非洲北部至西太平洋上存在大范围的高度显著负异常区域，较气候态而言，南亚高压主体偏南、偏弱（图略），高压中心位于中南半岛上空，脊线位于 $19^{\circ}\text{N}$ ，中心值超过1664 dagpm，此时华南上空受平直的西风气流所控制（图7a）；转为涝期后，南亚高压发展加强，主体较常年偏北、偏强（图略），高压中心向北移动到青藏高原南部地区上空，脊线位于 $27^{\circ}\text{N}$ ，中心值超过1676 dagpm，此时华南地

区处于南亚高压东南侧，受反气旋性气流所控制，存在上升运动（图7b），有利于华南地区降水增多。

在盛夏涝转旱事件的涝期，在非洲北部至中国南部存在大范围的高度正异常区域，与气候态相比，南亚高压主体偏西、偏强（图略），脊线位于 $28^{\circ}\text{N}$ ，高压中心位于伊朗高原南部—青藏高原南部，中心超过1680 dagpm，此时华南地区南亚高压东南侧，受反气旋性气流所控制，存在上升运动（图7c），导致华南地区偏涝；旱期，非洲北部至

中国南部大范围的高度正异常区域仍存在,且更为显著,南亚高压主体较常年偏西、偏北、偏强(图略),此时南亚高压强度增强并向东向北扩展至长江中下游地区,高压中心位于伊朗高原上空,脊线位于 $35^{\circ}\text{N}$ ,中心值超过1688 dagpm,华南地区处于南亚高压东南侧,为高空东风急流所控制(图7d),中低层的副高同时发生了向西北方向的移动,这与陶诗言和朱福康(1964)指出的南亚高压和西太平洋副热带高压“相向而行”的观点相符合。

### 4.3 水汽输送特征

稳定和持续的水汽输送是持续性降水的必要条件,华南地区汛期降水的主要水汽输送通道有两只,一支是源自阿拉伯海—孟加拉湾的西南气流,

一支是源自西太平洋副热带高压南侧的偏南气流(林爱兰等,2007; 原文杰,2014)。图8分别给出了春末初夏和盛夏旱涝急转事件的整层水汽输送通量距平及其散度距平的空间分布。在两类旱涝急转事件的旱期,华南地区低层水汽输送均较弱,以西南水汽输送为主,并处在水汽的辐散大值区(图略),同时华南地区低层主要存在偏东、偏北水汽输送通量距平,并为显著水汽输送通量辐散异常区域所覆盖,因此,旱期华南地区低层水汽输送较弱,水汽辐散程度加强,水汽条件较差(图8a、8c);在涝期,华南地区低层水汽输送均较强,以西南水汽输送为主,并处在水汽的辐合大值区(图略),同时华南地区低层主要存在西

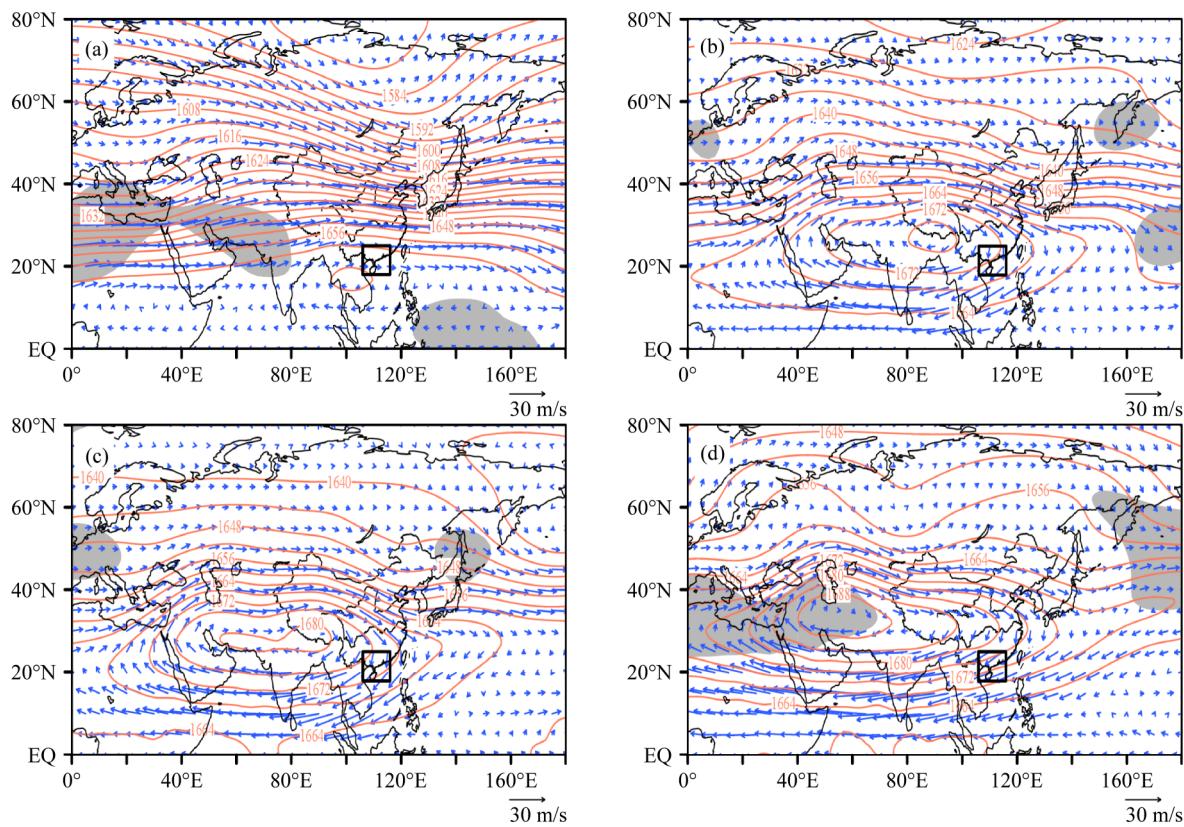


图7 华南汛期旱涝急转事件100 hPa合成高度场(红色等值线,单位: dagpm)和风场(矢量,单位:  $\text{m s}^{-1}$ )(阴影表示通过了90%信度水平的置信度检验,方框表示所研究的华南区域): (a) 春末初夏旱转涝事件旱期; (b) 春末初夏旱转涝事件涝期; (c) 盛夏涝转旱事件涝期; (d) 盛夏涝转旱事件旱期

Fig. 7 Composite of 100-hPa geopotential height field (red contour line, units: dagpm) and wind anomaly field (vector, units:  $\text{m s}^{-1}$ ) during the period of drought–flood abrupt alternation events in the flood season of southern China. The areas that are significant at the 90% confidence level are shaded, the southern China area of study is framed by the black square. (a) Drought period of drought-to-flood events in late spring and early summer; (b) flood period of drought-to-flood events in late spring and early summer; (c) flood period of flood-to-drought events in midsummer; (d) drought period of flood-to-drought events in midsummer

南或偏南水汽输送通量距平，并为水汽输送通量辐合异常区域所覆盖，因此，涝期华南地区低层水汽输送较强，水汽辐合程度加强，水汽条件较好（图8b、8d），强烈的辐合运动有利于水汽的动力抬升，为华南地区降水增多提供了必要的水汽条件与动力条件。

#### 4.4 垂直速度场特征

充沛的水汽供应和强烈的上升运动是大型降水的两个必要条件（丁一汇，1994）。在春末初夏

和盛夏旱涝急转事件的旱期，华南地区都处在垂直速度正值（下沉）区（图略），同时华南地区均处在显著的垂直速度正异常区，表明较常年华南地区的下沉运动增强（图9a、9c）；在涝期， $30^{\circ}\text{N}$ 以南地区均处于垂直速度负值（上升）区（图略），此时的华南地区均处在显著的垂直速度负异常区，表明较常年华南地区的上升运动加强（图9b、9d），这就为华南地区降水增多提供了必要的动力条件。

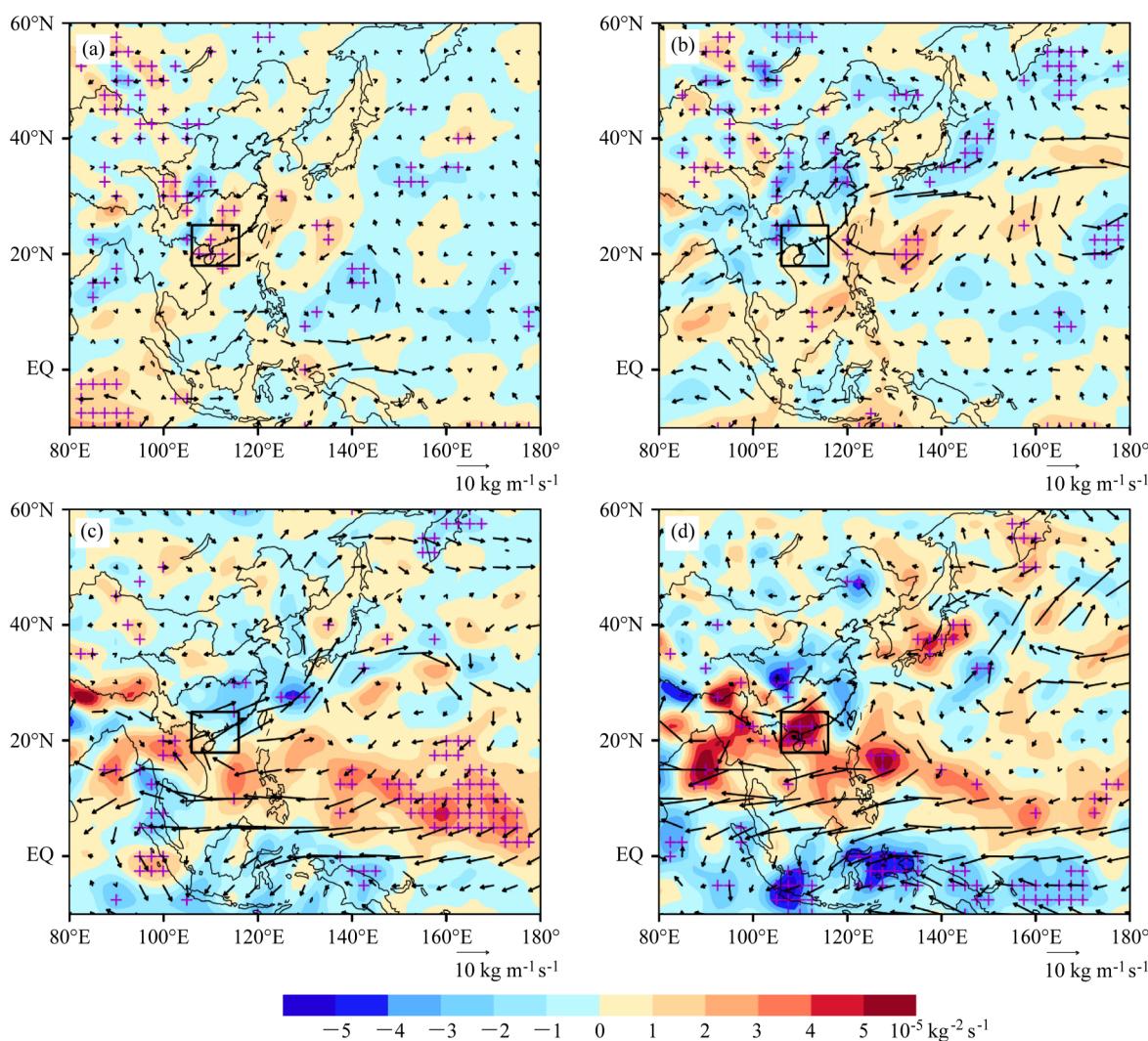


图8 华南汛期旱涝急转事件合成整层水汽输送通量距平场（矢量，单位： $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ）及其散度距平场（阴影，单位： $10^{-5} \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ）（紫色十字表示通过了90%信度水平的置信度检验，方框表示所研究的华南区域）：(a) 春末初夏旱转涝事件旱期；(b) 春末初夏旱转涝事件涝期；(c) 盛夏涝转旱事件涝期；(d) 盛夏涝转旱事件旱期

Fig. 8 Composite of the whole layer moisture transport flux anomaly field (vector, units:  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) and its divergence anomaly field (shaded, units:  $10^{-5} \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) during the period of drought–flood abrupt alternation events in the flood season of southern China. The areas that are significant at the 90% confidence level are shaded with purple crosses, the southern China area of study is framed by the black square. (a) Drought period of drought-to-flood events in late spring and early summer; (b) flood period of drought-to-flood events in late spring and early summer; (c) flood period of flood-to-drought events in midsummer; (d) drought period of flood-to-drought events in midsummer

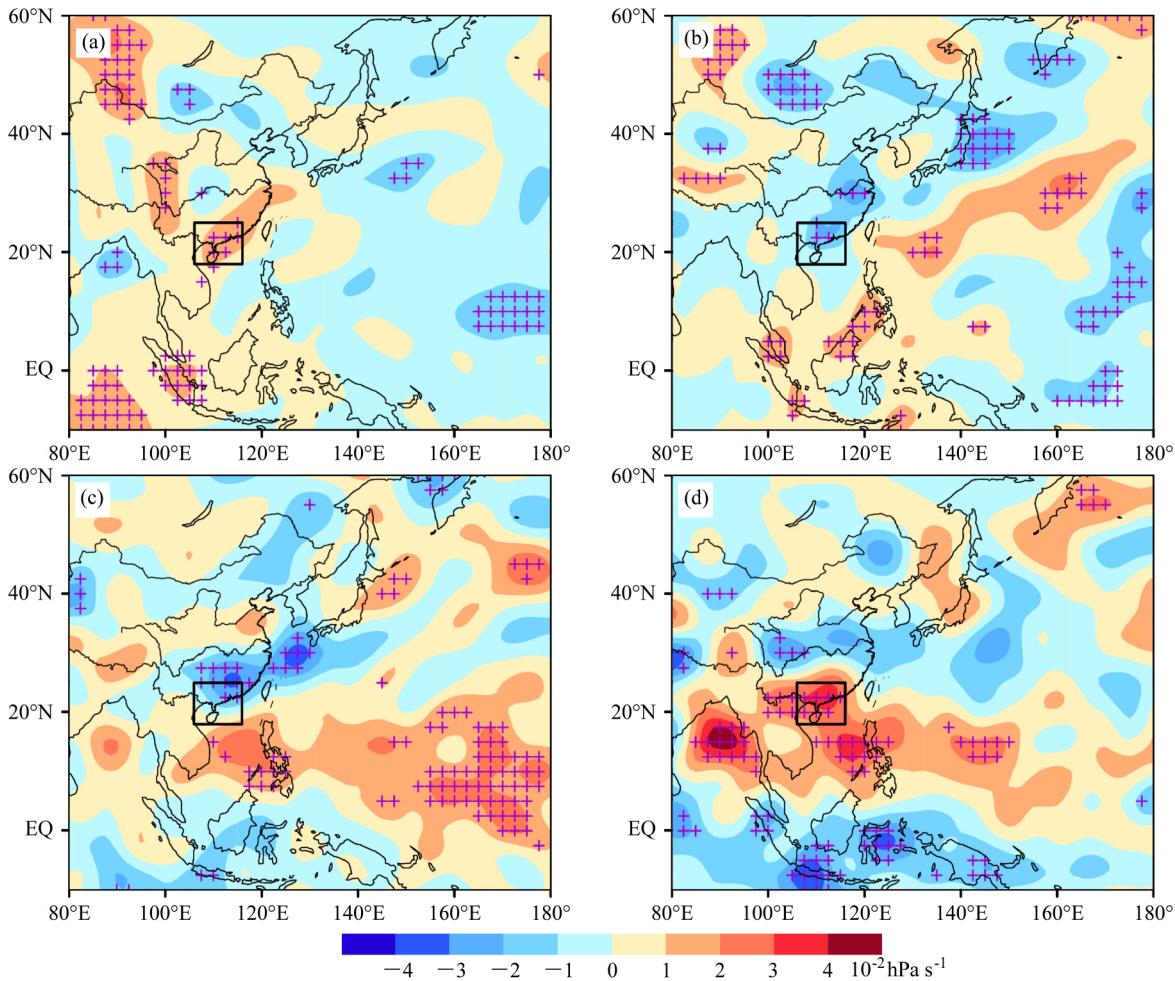


图9 华南汛期旱涝急转事件 500 hPa 垂直速度距平场 (阴影, 单位:  $10^{-2} \text{ hPa s}^{-1}$ ) (紫色十字表示通过了 90% 水平的置信度检验, 方框表示所研究的华南区域): (a) 春末初夏旱转涝事件旱期; (b) 春末初夏旱转涝事件涝期; (c) 盛夏涝转旱事件涝期; (d) 盛夏涝转旱事件旱期

Fig. 9 Composite of 500-hPa vertical velocity anomaly field (the shaded, units:  $10^{-2} \text{ hPa s}^{-1}$ ) during the period of drought–flood abrupt alteration events in the flood season of southern China. The areas that are significant at the 90% confidence level are shaded with purple crosses, the southern China area of study is framed by the black square. (a) Drought period of drought-to-flood events in late spring and early summer; (b) flood period of drought-to-flood events in late spring and early summer; (c) flood period of flood-to-drought events in midsummer; (d) drought period of flood-to-drought events in midsummer

## 5 结论与讨论

本文定义了一个旱涝急转评价指标, 利用该指标评价了1960~2015年华南地区汛期旱涝急转事件, 分析了旱涝急转事件的特点及其大气环流特征, 结果表明:

(1) 华南地区在近56年中共发生了17次旱涝急转事件, 其中11次旱转涝事件, 6次涝转旱事件, 旱涝急转的发生频率具有先减少后增加的年代际特征, 由1960年代的3次下降到1970年代、

1980年代的1次, 后迅速增加到1990年代的4次, 21世纪初的8次。将其按急转时间分为发生于5月中旬至6月初的春末初夏旱转涝事件和发生于7月初的盛夏涝转旱事件。旱涝急转事件的旱期降水距平百分率和SPI各地均为负值, 降水异常偏少; 涝期各地均为正值, 降水异常偏多。

(2) 在春末初夏旱转涝事件的旱期, 西太平洋副热带高压主体偏南, 中国东部主要受干冷高压脊控制, 华南上空为平直的西风气流, 低层负涡度发展, 伴随着辐散和下沉运动的加强, 水汽输送的减

弱，干旱少雨；在涝期，西太副高北抬，孟加拉湾南支槽异常偏强，华南处于西太副高西侧和南亚高压东南侧，低层正涡度发展，伴随着辐合和上升运动的加强，水汽输送的增强，导致降水增多。

(3) 在盛夏涝转旱事件的涝期，西太平洋副热带高压偏西、偏南，南亚高压中心位于伊朗高原南部—青藏高原南部，华南处于西太平洋副热带高压西北侧和南亚高压东南侧，低层水汽输送加强，辐合和上升运动加强，正涡度发展，降水增多；在旱期，西太平洋副热带高压显著北跳，南亚高压强度增强并向东向北扩展至长江中下游地区，华南为西太平洋副热带高压和高空东风急流所控制，低层水汽输送减弱，辐散和下沉运动加强，负涡度发展，干旱少雨。

本文主要对华南汛期旱涝急转前后的天气环流和水汽进行了分析，事实上，关于导致旱涝急转的更深层次的原因十分复杂；并且，除上述的两类旱涝急转事件外，华南汛期还发生了其他类型的旱涝急转事件，但发生时间无明显规律，有待进一步研究。

## 参考文献 (References)

- 白婷. 2014. 华南夏季降水低频特征及其与大气低频振荡关系研究[D]. 南京信息工程大学硕士学位论文, 4-5. Bai Ting. 2014. Study on the low-frequency oscillation features of precipitation in summer and its relationship with atmospheric low-frequency oscillation over South China[D]. M.S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology, 4-5.
- Cavazos T. 1999. Large-scale circulation anomalies conducive to extreme precipitation events and derivation of daily rainfall in northeastern Mexico and southeastern Texas[J]. *J. Climate*, 12(5): 1506–1523. doi: 10.1175/1520-0442(1999)012<1506:LSCACT>2.0.CO;2.
- 陈汉耀. 1957. 1954年长江淮河流域洪水时期的环流特征[J]. 气象学报, 28(1): 1–12. Chen Hanyao. 1957. Circulation characteristics during the flood period over Yangtze-Huaihe valleys in 1954[J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 28(1): 1–12. doi: 10.11676/qxxb1957.001.
- 程智, 徐敏, 罗连升, 等. 2012. 淮河流域旱涝急转气候特征研究[J]. 水文, 32(1): 73–79. Cheng Zhi, Xu Min, Luo Liansheng, et al. 2012. Climate characteristics of drought-flood abrupt change events in Huaihe River basin[J]. *Journal of China Hydrology* (in Chinese), 32(1): 73–79. doi:10.3969/j.issn.1000-0852.2012.01.015.
- 丁一汇. 1994. 暴雨和中尺度气象学问题[J]. 气象学报, 52(3): 274–284. Ding Yihui. 1994. Some aspects of rainstorm and meso-scale meteorology[J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 52(3): 274–284. doi:10.11676/qxxb1994.036.
- 丁一汇, 柳俊杰, 孙颖, 等. 2007. 东亚梅雨系统的天气—气候学研究[J]. 大气科学, 31(6): 1082–1101. Ding Yihui, Liu Junjie, Sun Ying, et al. 2007. A study of the synoptic-climatology of the Meiyu system in East Asia[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 31(6): 1082–1101. doi: 10.3878/j. issn. 1006-9895.2007.06.05.
- 丁一汇. 2008. 中国气象灾害大典 (综合卷) [M]. 北京: 气象出版社, 948pp. Ding Yihui. 2008. Editorial Committee of Chinese Meteorological Disaster Records. (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 948pp.
- 封国林, 杨涵洧, 张世轩, 等. 2012. 2011年春末夏初长江中下游地区旱涝急转成因初探[J]. 大气科学, 36(5): 1009–1026. Feng Guolin, Yang Hanwei, Zhang Shixuan, et al. 2012. 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[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36(5): 1009–1026. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11220.
- 高辉, 蒋薇, 李维京. 2013. 近20年华南降水季节循环由双峰型向单峰型的转变[J]. 科学通报, 58(15): 1438–1443. Gao Hui, Jiang Wei, Li Weijing. 2013. Transition of the annual cycle of precipitation from double-peak mode to single-peak mode in South China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(22): 3994–3999. doi: 10.1007/s11434-013-5905-0.
- 何编, 孙照渤, 李忠贤. 2012. 一次华南持续性暴雨的动力诊断分析和数值模拟[J]. 大气科学学报, 35(4): 466–476. He Bian, Sun Zhaobo, Li Zhongxian. 2012. Dynamic diagnosis and numerical simulation of a persistent torrential rain case in South China[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 35(4): 466–476. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2012.04.010.
- 何慧, 廖雪萍, 陆虹, 等. 2016. 华南地区1961~2014年夏季长周期旱涝急转特征[J]. 地理学报, 71(1): 130–141. He Hui, Liao Xueping, Lu Hong, et al. 2016. Features of long-cycle drought-flood abrupt alternation in South China during summer in 1961-2014[J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 71(1): 130–141. doi: 10.11821/dlxz201601010.
- Hirschboeck K. 1987. Catastrophic flooding and atmospheric circulation anomalies[M]//Mayer L, Nash D. *Catastrophic Flooding*. Boston, MA: Allen and Unwin.
- 黄嘉佑. 2004. 气象统计分析与预报方法[M]. 3版. 北京: 气象出版社, 10–28. Huang Jiayou. 2004. *Meteorological Statistical Analysis and Forecast Method* (in Chinese) [M]. 3rd ed. Beijing: China Meteorological Press, 10-28.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77(3): 437–472. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
- 李丽平, 许冠宇, 成丽萍, 等. 2012. 华南后汛期极端降水特征及变化趋势[J]. 大气科学学报, 35(5): 570–577. Li Liping, Xu Guanyu,

- Cheng Liping, et al. 2012. Characteristics of extreme precipitation and its variation trend in the post-flood of South China[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 35(5): 570–577. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2012.05.007.
- 林爱兰, 梁建茵, 李春晖, 等. 2007. “0506” 华南持续性暴雨的季风环流背景 [J]. 水科学进展, 18(3): 424–432. Lin Ailan, Liang Jianyin, Li Chunhui, et al. 2007. Monsoon circulation background of ‘0506’ continuous rainstorm in South China[J]. *Advances in Water Science* (in Chinese), 18(3): 424–432. doi:10.3321/j.issn:1001-6791. 2007.03.019.
- 刘凤丽, 黄国兵. 2012. 旱涝急转形成机理及城市防涝减灾体系研究进展 [J]. 长江科学院院报, 29(11): 28–32. Liu Fengli, Huang Guobing. 2012. Research progress in formation mechanism of urban drought–flood abrupt alternation and urban waterlog prevention system[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute* (in Chinese), 29(11): 28–32. doi:10.3969/j.issn.1001-5485.2012.11.006.
- Mason R B, Anderson C E. 1963. The development and decay of the 100-mb Summertime anticyclone over southern Asia[J]. *Mon. Wea. Rev.*, 91(1): 3–12. doi: 10.1175/1520-0493(1963)091<0003: TDADOT>2.3.CO;2.
- McKee T B, Doesken N J, Kleist J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]//Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Anaheim, USA: American Meteorological Society, 179–184.
- Rasmusson E M. 1967. Atmospheric water vapor transport and the water balance of North America: Part I. Characteristics of the water vapor flux field[J]. *Mon. Wea. Rev.*, 95(7): 403–426. doi: 10.1175/1520-0493(1967)095<0403:AWVTAT>2.3.CO;2.
- 沈柏竹, 张世轩, 杨涵洧, 等. 2012. 2011年春夏季长江中下游地区旱涝急转特征分析 [J]. 物理学报, 61(10): 109202. Shen Baizhu, Zhang Shixuan, Yang Hanwei, et al. 2012. 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[J]. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 61(10): 109202. doi: 10.7498/aps. 61. 109202.
- 陶诗言, 徐淑英. 1962. 夏季江淮流域持久性旱涝现象的环流特征 [J]. 气象学报, 32(1): 1–10. Dao S Y, Hsu S Y. 1962. Some aspects of the circulation during the periods of the persistent drought and flood in Yantze and Hwai-ho valleys in summer[J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 32(1): 1–10. doi: 10.11676/qxb1962.001.
- 陶诗言, 朱福康. 1964. 夏季亚洲南部100毫巴流型的变化及其与西太平洋副热带高压进退的关系 [J]. 气象学报, 34(4): 385–396. Dao S Y, Chu F K. 1964. The 100-mb flow patterns in southern Asia in summer and its relation to the advance and retreat of the West Pacific subtropical anticyclone[J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 34(4): 385–396. doi:10.11676/qxb1964.039.
- Ting M, Wang H. 1997. Summertime U.S. precipitation variability and its relation to pacific sea surface temperature[J]. *J. Climate*, 10(8): 1853–1873. doi: 10.1175/1520-0442(1997)010<1853: SUSPVA>2.0. CO;2.
- 童金, 徐海明. 2014. 长江中下游旱涝急转年多尺度低频振荡特征及其对旱涝急转的影响 [J]. 热带气象学报, 30(4): 707–718. Tong Jin, Xu Haiming. 2014. Effects of multi-scale low frequency oscillations on the drought–flood abrupt transition over the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 30(4): 707–718. 10.3969/j. issn. 1004-4965.2014.04.011.
- Trenberth K E, Guillemot C J. 1996. Physical processes involved in the 1988 drought and 1993 floods in North America[J]. *J. Climate*, 9(6): 1288–1298. doi: 10.1175/1520-0442(1996)009<1288: PPIITD>2.0. CO;2.
- 涂长望. 1936. 东亚活动中心与我国水旱灾的关系 [J]. 气象学报, 12(11): 600–619. Tu Changwang. 1936. Chinese floods and droughts and their relationship with the centers of action in East Asia[J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 12(11): 600–619. doi: 10.11676/qxb1936.080.
- Vogel J L, Huff F A. 1978. Relation between the St. Louis Urban precipitation anomaly and synoptic weather factors[J]. *J. Appl. Meteor.*, 17(8): 1141–1152. doi:10.1175/1520-0450(1978)017<1141: RBTSU>2.0.CO;2.
- 王胜, 田红, 丁小俊, 等. 2009. 淮河流域主汛期降水气候特征及“旱涝急转”现象 [J]. 中国农业气象, 30(1): 31–34. Wang Sheng, Tian Hong, Ding Xiaojun, et al. 2009. Climate characteristics of precipitation and phenomenon of drought–flood abrupt alternation during main flood season in Huaihe River basin[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology* (in Chinese), 30(1): 31–34. doi: 10.3969/j. issn. 1000-6362.2009.01.007.
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2版. 北京: 气象出版社, 10–28. Wei Fengying. 2007. Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Technology (in Chinese) [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 10–28.
- 吴志伟, 何金海, 李建平, 等. 2006a. 长江中下游夏季旱涝并存及其异常年海气特征分析 [J]. 大气科学, 30(4): 570–577. Wu Zhiwei, He Jinhai, Li Jianping, et al. 2006. The summer drought–flood coexistence in the middle and lower reaches of the Yangtze River and analysis of its air-sea background features in anomalous years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 30(4): 570–577. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.04.03.
- 吴志伟, 李建平, 何金海, 等. 2006b. 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, 51(14): 1717–1724. Wu Zhiwei, Li Jianping, He Jinhai, et al. 2006. Large-scale atmospheric singularities and summer long-cycle droughts–floods abrupt alternation in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Chinese Science Bulletin*, 51(16): 2027–2034. doi: 10.1007/s11434-006-2060-x.
- 吴志伟, 李建平, 何金海, 等. 2007. 正常季风年华南夏季“旱涝并存、旱涝急转”之气候统计特征 [J]. 自然科学进展, 17(12): 1665–

1671. Wu Zhiwei, Li Jianping, He Jinhai, et al. 2007. The statistical characteristics of summer droughts-floods coexistence and abrupt alternation of southern China in normal monsoon years[J]. *Progress in Natural Science (in Chinese)*, 17(12): 1665–1671. doi: 10.3321/j.issn:1002-008x.2007.12.009.
- 徐敏, 丁小俊, 罗连升, 等. 2013. 淮河流域夏季旱涝急转的低频环流成因[J]. *气象学报*, 71(1): 86–95. Xu Min, Ding Xiaojun, Luo Liansheng, et al. 2013. A possible cause of the low frequency circulation of summertime drought-flood abrupt alternation over the Huaihe River basin[J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 71 (1): 86–95. doi:10.11676/qxxb2013.007.
- Yang S Y, Wu B Y, Zhang R H, et al. 2013. Relationship between an abrupt drought-flood transition over mid-low reaches of the Yangtze River in 2011 and the intraseasonal oscillation over mid-high latitudes of East Asia[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 27(2): 129–143. doi:10.1007/s13351-013-0201-0.
- 原文杰. 2014. 华南前汛期降水及水汽输送特征研究[D]. 安徽农业大学硕士学位论文. Yuan Wenjie. 2014. Characteristics of precipitation and moisture transportation in the pre-flood season in South China[D]. M. S. thesis (in Chinese), Anhui Agricultural University.
- 张洁, 周天军, 宇如聪, 等. 2009. 中国春季典型降水异常及相联系的大气水汽输送[J]. *大气科学*, 33(1): 121–134. Zhang Jie, Zhou Tianjun, Yu Rucong, et al. 2009. Atmospheric water vapor transport and corresponding typical anomalous spring rainfall patterns in China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (1): 121–134. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.01.11.
- 张强, 邹旭恺, 肖风劲. 2006. GB/T 20481–2006 气象干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社: 12–17. Zhang Qiang, Zou Xukai, Xiao Fengjin. 2006. GB/T 20481–2006 Classification of meteorological drought category[S]. Beijing: Standards Press of China (in Chinese): 12–17.
- 张旭斌, 张熠. 2011. 一次华南暴雨过程的数值模拟——中尺度对流系统形成发展机制[J]. *气象科学*, 31(2): 145–152. Zhang Xubin, Zhang Yi. 2011. Numerical simulation of a heavy rainfall event in southern China: The mechanism of mesoscale convective system genesis and development[J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 31(2): 145–152. doi: 10.3969/j. issn. 1009-0827.2011.02.004.
- 张效武, 徐维国, 施宏江, 等. 2007. 安徽省旱涝急转规律的认识与研究[J]. *中国水利*, (5): 40–42. Zhang Xiaowu, Xu Weiguo, Shi Hongjiang, et al. 2007. Understanding and studies of law of sudden turn of drought and flood in Anhui Province[J]. *China Water Resources (in Chinese)*, (5): 40–42. doi: 10.3969/j. issn. 1000-1123. 2007.05.017.
- 中国气象局. 2005–2015. 中国气象灾害年鉴 (2006) [M]. 北京: 气象出版社, 236pp. Dong Wenjie. 2006. Chinese Meteorological Disaster Yearbook (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- Zhou T J. 2003. Comparison of the global air-sea freshwater exchange evaluated from independent datasets[J]. *Progress in Natural Science*, 13(8): 626–631.