

# 长江中下游夏季旱涝并存及其异常年海气特征分析

吴志伟<sup>1,3</sup> 何金海<sup>1,2</sup> 李建平<sup>3</sup> 江志红<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 南京信息工程大学气象灾害重点实验室, 南京 210044

<sup>2</sup> 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080

<sup>3</sup> 中国科学院大气物理研究所大气科学与地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

**摘 要** 利用国家气候中心提供的 1957~2000 年中国 720 站夏季 (5~8 月) 逐日降水资料, 对长江中下游地区夏季旱涝并存现象进行研究, 并定义了一个季时间尺度的旱涝并存指数 ( $I_{DFC}$ ), 再结合 NCEP/NCAR 的 500 hPa 高度场、850 hPa 风场等再分析资料以及 Reynolds 海温资料, 对该地区旱涝并存异常年的海气背景特征进行了统计分析。结果表明: 近 50 年长江中下游夏季旱涝并存异常的发生频率呈现上升趋势; 夏季旱涝并存异常年, 西太平洋副高空间活动范围较大, 同期东亚夏季风偏弱; 在其前期 6 个月中, 阿拉伯海、孟加拉湾和中国南海海温显著偏高, 另外赤道东太平洋海温呈现上升趋势, 对应着 El Niño 的成熟阶段或发展阶段。所有这些为长江中下游夏季旱涝并存现象的预测, 提供了有参考意义的前兆信号。

**关键词** 长江中下游 旱涝并存 海气背景

**文章编号** 1006-9895(2006)04-0570-08

**中图分类号** P463

**文献标识码** A

## 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

WU Zhi-Wei<sup>1,3</sup>, HE Jin-Hai<sup>1,2</sup>, LI Jian-Ping<sup>3</sup>, and Jiang Zhi-Hong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Meteorological Disaster, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

<sup>2</sup> Guangzhou Institute of Tropical Oceanic Meteorology, China Meteorological Administration, Guangzhou 510080

<sup>3</sup> State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

**Abstract** Based on the 1957~2000 summer daily precipitation of 720 Chinese stations supplied by the National Climatic Center, the drought-flood coexistence phenomenon has been investigated and a season time-scale Drought-Flood Coexistence Index ( $I_{DFC}$ ) in the middle and lower reaches of the Yangtze River has been defined. Background features of atmospheric circulation and sea surface temperature (SST) in drought-flood coexistence anomaly years have been studied statistically using 850 hPa wind field, 500 hPa height field from NCEP/NCAR reanalysis datasets with resolution  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  and Reynolds SST data with resolution  $2.0^\circ \times 2.0^\circ$ . Results show that: the occurrence frequency of DFC (Drought-Flood Coexistence) has increased remarkably in the past 50 years, especially since 1980s; there exists a significant correlation between drought-flood coexistence phenomenon and the intensity of East Asian Summer Monsoon (EASM), high  $I_{DFC}$  summers associated with weak EASM; the Western Pacific Subtropical High (WPSH) is very active in high  $I_{DFC}$  summers associated with its position a bit southward in May, a remarkable westward and northward shift in June and July and flashback southward in August, which implies WPSH

**收稿日期** 2005-04-05, 2005-07-04 收修定稿

**资助项目** 国家重点基础研究发展规划项目 2004CB418303, 国家自然科学基金资助项目 40221503、40233037 和 40375032

**作者简介** 吴志伟, 男, 1971 年出生, 硕士, 高级工程师, 主要从事东亚季风、短期气候预测研究。E-mail: wzw@lasg.iap.ac.cn

plays an important role in resulting in summer DFC phenomenon in the middle and lower reaches of the Yangtze River; the SST from the Arabian Sea, across the Bay of Bengal, the South China Sea to the equatorial western Pacific is of high correlation with summer  $I_{DFC}$  in the middle and lower reaches of the Yangtze River, which means a smaller land-sea thermal difference in high  $I_{DFC}$  summers and the equatorial eastern Pacific also exhibits a warmer SST phase in the preceding months of high  $I_{DFC}$  summers, which corresponds to the mature phase or the developing phase of El Niño. All these offer some predictive signals for the DFC phenomenon forecasting in summer in the middle and lower reaches of the Yangtze River.

The emphasis of this paper is concentrated on the long time scale, season scale, investigation to DFC phenomenon. However, DFC is a very complicated problem, especially when the time scale gets shorter. Short-range anomaly (such as one flood and one drought and so on) and medium-range anomaly (such as floods and droughts) etc. come out, which need different studies according to different situations. This is still an open question and needs further investigation.

**Key words** the middle and lower reaches of the Yangtze River, drought-flood coexistence, air-sea background

## 1 引言

在过去的 70 年里, 关于长江中下游夏季降水的气候特征和环流形势方面已有许多研究成果。早在 20 世纪 30、40 年代, 竺可桢<sup>[1]</sup>和涂长望等<sup>[2]</sup>就指出, 长江中下游夏季降水是东亚夏季风推进的产物, 其季节内变化与东亚夏季风的进退紧密相关。陶诗言等<sup>[3]</sup>对夏季江淮持久性旱涝现象的环流特征进行了研究, 发现持久性旱涝在 500 hPa 高度场表现有一定的流型。吴国雄等<sup>[4]</sup>和张琼等<sup>[5]</sup>的研究表明长江中下游的旱涝与中国近海海温(如南海、印度洋等)关系密切。黄荣辉等<sup>[6]</sup>提出, 东亚夏季风雨带的季节内变化还与西太平洋暖池的热状态关系密切。He 等<sup>[7]</sup>的统计分析结果显示, 夏季西太平洋副高的 3 个参数(面积、强度和脊线纬度)与长江中下游夏季降水存在很高的相关。

综观前人对旱涝的研究, 多集中于空间的非均衡性, 即偏重于区域性的旱灾或涝灾, 对旱涝的时间非均匀分布情形考虑较少, 而“旱涝并存、旱涝急转”等现象正属于后者。什么是“旱涝并存”, 目前尚无一个明确的定义。旱涝并存现象是指一段时间特别旱, 而另一段时间又特别涝, 旱涝交替出现的情形, 多发生于夏季, 反映了旱涝极端事件在短期内的共存。通常, 降水的短期气候预测只能针对未来一段时期内的总降水量进行预报, 例如预测夏季总雨量正常, 通常人们一定会认为“风调雨顺”, 但如果发生了“旱涝并存”异常, 则意味这期间既发生了旱灾又发生了涝灾, 其带来的危害是可想而知的。

到目前为止, 对于“旱涝并存”的研究尚不多见。对其进行探讨, 不仅可以更深入反映长江中下游夏季降水与东亚季风的联系, 而且有利于该地区降水的气候预测, 尤其是可为夏季防汛抗旱工作提供具有参考意义的结果, 这也是本文的出发点。由于前人对长江流域重旱(涝)已有较多研究, 故本文研究重点立足于夏季总降水正常或正常略偏多(少)的情形。

## 2 资料和方法

本文所用逐日降水资料是由国家气候中心提供的 1957~2000 年中国 720 站地面观测资料, 高度场、风场(水平分辨率为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ )取自 NCEP/NCAR 再分析资料, 海温场使用了 Reynolds 海温资料 ( $2^\circ \times 2^\circ$ )。

这里选取 5~8 月累积降水量来表征夏季降水。首先, 参考 Ting 和 Wang<sup>[8]</sup>划分降水区的方法, 先计算全国 720 站 1957~2000 年夏季降水标准差, 得到长江中下游地区降水变率最大的测站为高邮, 然后以高邮站为基点, 计算其与全国 720 个站夏季降水的单点相关, 得到空间相关图(如图 1 所示), 相关系数在基点处为 1, 然后向周围逐渐减小, 阴影所覆盖的区域为显著相关的区域(通过 95% 水平的置信度检验), 该区域反映较为一致的降水变率, 使用该区域内的测站(共 42 个测站)的降水平均值来表征长江中下游地区夏季降水。

为更好地研究夏季“旱涝并存”现象的科学内涵和基本特征, 本文首先对其作如下定义: 发生于 5~8 月的旱涝交替出现的现象, 其累积降水量在

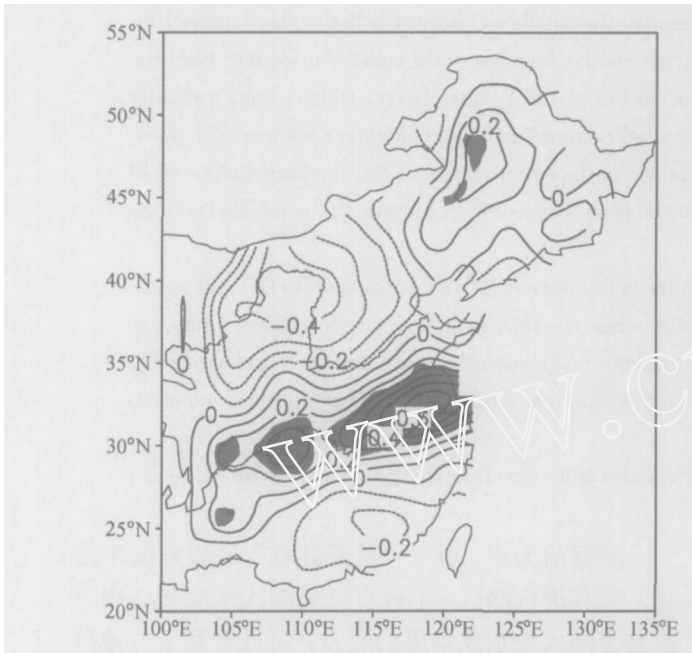


图1 全国 720 站夏季(5~8 月)降水与高邮的站点相关图(阴影表示置信度达 95 %)

Fig. 1 Correlation between Gaoyou's and 720 stations' precipitation during May~Aug in China (The areas which are significant at the 95 % confidence level are shaded)

正常水平(降水距平在 - 0.5 ~ 0.5 个标准差范围内)波动。为能定量反映“旱涝并存”的强度,我们定义了一个季时间尺度的旱涝并存指数  $I_{DFC}$  (Drought - Flood Coexistence Index):

$$I_{DFC} = S_{STD} \cdot 10^{(0.5 - |R_{STD}|)},$$

其中,  $S_{STD}$  为夏季标准化无雨日数,  $R_{STD}$  为夏季标准化累积降水量。  $S_{STD}$  反映了降水的集中程度,  $S_{STD}$  越大,表明降雨的集中程度越大,旱和涝的强

度也越大。  $10^{(0.5 - |R_{STD}|)}$  为权重系数,作用是增大雨量正常夏季所占权重,减小重旱(涝)夏季所占权重。  $I_{DFC}$  值越大,则表明雨量分布越不均匀,旱和涝的强度也越大;反之表明雨量分布越均匀,旱和涝的强度也就越小,即越“风调雨顺”。具体数值见表 1。

### 3 “旱涝并存”年和“风调雨顺”年的划分及结果对比

上面所定义的  $I_{DFC}$  究竟能不能与本文定义的“旱涝并存”相吻合,即能否反映夏季降水总体正常但在时间分布上不均匀这一特征?

表 2 给出了 1957~2000 年  $I_{DFC}$  最大(小)前 10 位的  $R/R$  值和  $S/S$  ( $R$  和  $S$  分别为夏季降水距平和无雨日数距平,  $R$  和  $S$  分别为对应的标准差)。

从表 2 可以看到,夏季  $I_{DFC}$  值最高前 10 年中有 5 年的降水距平绝对值在 0.5 以内,根据前面的定义,认为这 5 年夏季总降水量属于基本正常[即排除了重旱(涝)的情形],而对应的无雨日数距平有 4 年超过 0.5,即无雨日数偏多;另 5 年的降水距平虽然都小于 - 0.5 (表明该 5 年总体偏旱),但其对应的无雨日数距平有 4 年在 1.5 个标准差以上,即无雨日数偏多异常程度大于夏季累积降水量距平偏少的程度。以上这些均说明在较少的雨日里降了更多的雨,高  $I_{DFC}$  指数前 10 年夏季降水的确存在时间分布上的非均匀性。  $I_{DFC}$  值越大,累积降水距平越趋于 0,而降水在时间分布上的非均匀程度也越大。

表 1 1957~2000 年长江中下游夏季旱涝并存指数 ( $I_{DFC}$ )

Table 1 The Summer Drought - Flood Coexistence Index ( $I_{DFC}$ ) for the middle and lower reaches of the Yangtze River from 1957 to 2000

年份 Year	$I_{DFC}$	年份 Year	$I_{DFC}$	年份 Year	$I_{DFC}$	年份 Year	$I_{DFC}$	年份 Year	$I_{DFC}$
1957	- 0.85	1966	0.15	1975	- 1.50	1984	- 0.04	1993	- 1.49
1958	- 0.42	1967	0.16	1976	0.18	1985	0.16	1994	0.25
1959	0.24	1968	0.20	1977	- 3.21	1986	2.27	1995	1.83
1960	0.13	1969	- 0.02	1978	0.18	1987	- 0.12	1996	0.04
1961	0.18	1970	- 1.44	1979	0.02	1988	0.84	1997	0.94
1962	- 0.45	1971	0.67	1980	0.05	1989	- 0.66	1998	0.03
1963	- 0.69	1972	0.41	1981	0.73	1990	1.30	1999	- 0.16
1964	0.05	1973	- 1.04	1982	0.07	1991	0.08	2000	2.70
1965	- 1.31	1974	- 0.71	1983	- 0.01	1992	0.37		

表 2 1957~2000 年夏季最高(低)前 10 位  $I_{DFC}$  年的降水量和无雨日数  
Table 2 The precipitation and no raining days for the first 10 highest(lowest)  $I_{DFC}$  summers from 1957 to 2000

高 $I_{DFC}$ 年 High $I_{DFC}$ year	$R/ R$	$S/ S$	低 $I_{DFC}$ 年 Low $I_{DFC}$ year	$R/ R$	$S/ S$
2000	- 0. 02	0. 91	1977	0. 05	- 1. 23
1986	0. 08	0. 88	1975	0. 29	- 1. 03
1995	0. 01	0. 60	1993	0. 51	- 1. 70
1990	- 0. 59	1. 58	1970	0. 15	- 0. 72
1997	- 0. 72	1. 50	1965	0. 16	- 0. 67
1988	- 0. 44	0. 69	1973	- 0. 38	- 0. 90
1981	- 0. 93	1. 84	1957	0. 38	- 0. 75
1971	- 0. 28	0. 37	1974	0. 41	- 0. 68
1972	- 0. 59	0. 42	1963	0. 8	- 1. 63
1992	- 1. 11	1. 21	1989	0. 1	- 0. 31

在  $I_{DFC}$  值最低前 10 年中, 有 8 年降水距平绝对值在 0. 5 以内, 表明这些年夏季总降水量基本正常, 而无雨日数距平 10 年中有 9 年小于 - 0. 5 , 即无雨日数偏少, 降水日数偏多。这些说明  $I_{DFC}$  值越小, 在总降水量越趋正常的同时, 降水分布越趋均匀, 即更为“风调雨顺”。

综上所述, 旱涝并存强度指数  $I_{DFC}$  可以作为反映夏季总降水量正常而在时间分布上不均匀程度的定量指标。 $I_{DFC}$  值大, 则“旱涝并存”异常强度也越大, 降水分布越不均匀;  $I_{DFC}$  值越小, 则降水越趋于均匀分布。

4 长江中下游夏季旱涝并存的年际变化

图 2 为 1957~2000 年长江中下游地区夏季 5~8 月的旱涝并存指数  $I_{DFC}$  的演变, 图中粗实线为二阶多项式回归趋势线。

由图 2 的回归趋势线可以清楚看到, 近 50 年长江中下游地区“旱涝并存”异常呈现出增加的趋势。在 20 世纪 80 年代初以前, 特别是 60 年代末至 70 年代末,  $I_{DFC}$  指数较小, 即较为“风调雨顺”, 而从 80 年代中期开始,  $I_{DFC}$  值呈现显著增大的趋势, 说明长江中下游地区夏季近 20 年“旱涝并存”异常的强度加大, 旱涝极端事件更为频发。

从表 2 中也可清楚地看到这一点, 在  $I_{DFC}$  最高值前 10 年中, 有 8 年发生在 20 世纪 80、90 年代; 而  $I_{DFC}$  最低前 10 年中有 8 年发生在 1980 年以前, 这与图 2 得到的结论相一致。

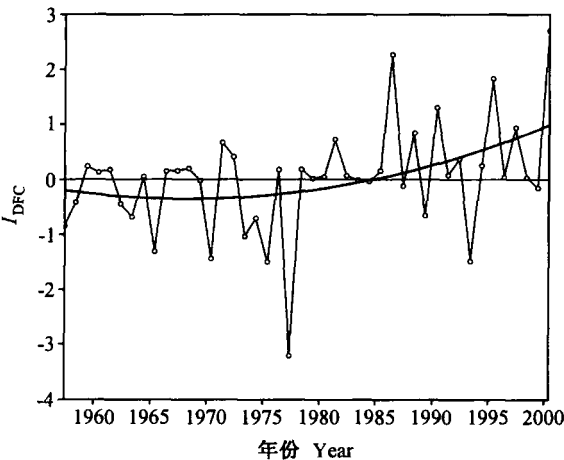


图 2 1957~2000 年长江中下游夏季 (5~8 月)  $I_{DFC}$  (标准化) 的演变 (粗实线为二阶多项式回归趋势线)  
Fig. 2 Variation of the summer  $I_{DFC}$  (normalized) in the middle and lower reaches of the Yangtze River from 1957 to 2000 (The bold line represents the variation trend)

5 长江中下游旱涝并存年同期大气环流的基本特征

为便于合成分析, 从表 1 中选取  $I_{DFC}$  值最大的 10 年: 2000、1986、1995、1990、1997、1988、1981、1971、1972 和 1992 年来表征“旱涝并存”年, 选取最小的 10 年: 1977、1975、1993、1970、1965、1973、1957、1974、1963 和 1989 年来表征“风调雨顺”年。

图 3 给出了长江中下游地区夏季“旱涝并存”

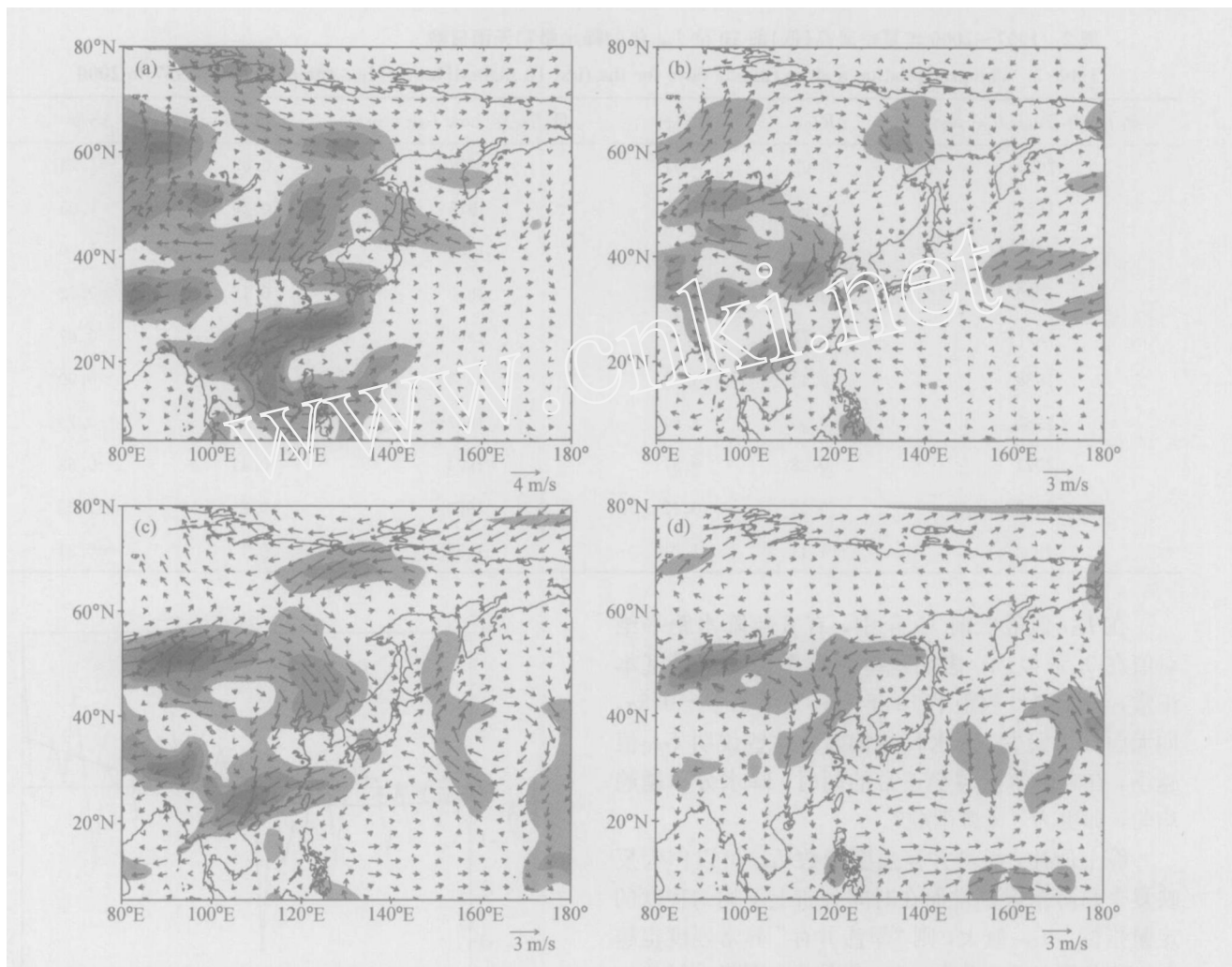


图3 高 $IDFC$ 年与低 $IDFC$ 年850 hPa合成风差值场(高 $IDFC$ -低 $IDFC$ ): (a) 5月; (b) 6月; (c) 7月; (d) 8月。阴影: 显著性检验达95%

Fig. 3 The composite difference of 850 hPa wind field between high  $IDFC$  years and low  $IDFC$  years (The shaded area is at 95 % significant level):

(a) May; (b) Jun; (c) Jul; (d) Aug

高指数年与低指数年850 hPa合成风差值场, 阴影区显著性检验达95%。从图3可以清楚地看到, 我国大陆东部夏季5月、6月、7月和8月基本为阴影区所覆盖, 都存在着显著的北风差值环流异常, 这些均表明旱涝并存高指数年东亚夏季风偏弱, 而低指数年东亚夏季风偏强。

图4为旱涝并存年( $IDFC$ 高指数年)500 hPa合成高度场, 阴影区为高指数年与低指数年500 hPa合成高度差值通过95%置信度显著性检验的区域。由图4可见, 5月份(图4a)显著的正差值区主要有两个, 一个是位于从蒙古至河套的华北地区, 另一个位于 $0^{\circ}\sim 10^{\circ}N$ 的热带地区, 西太平洋副高的西部和北部边缘线不明显, 这些特征表明旱涝并存异常年5月份大陆冷高压势力较强, 西太平洋副高位置偏南。

到了6月份和7月份(图4b和c), 我国东部大陆出现大范围显著的位势高度正差值区, 副高边缘线北抬至长江流域, 表明旱涝并存年西太平洋副高显著加强西伸北抬。进入8月后(图4d), 我国东部大陆的位势高度显著正差值区减弱, 热带西太平洋上的显著正差值区加强, 副高边缘线变得不明显, 表明副高迅速东撤南退至南海及热带西太平洋上。

从上述分析可以看出, 旱涝并存异常年西太平洋副高北抬南落的空间范围非常大, 活动频繁。副高的每一次北抬和南撤常常伴随着长江中下游地区的雨涝过程<sup>[7]</sup>, 因此, 西太平洋副高季节内振荡的异常很可能是导致该地区“旱涝并存, 旱涝急转”的主要因素之一。

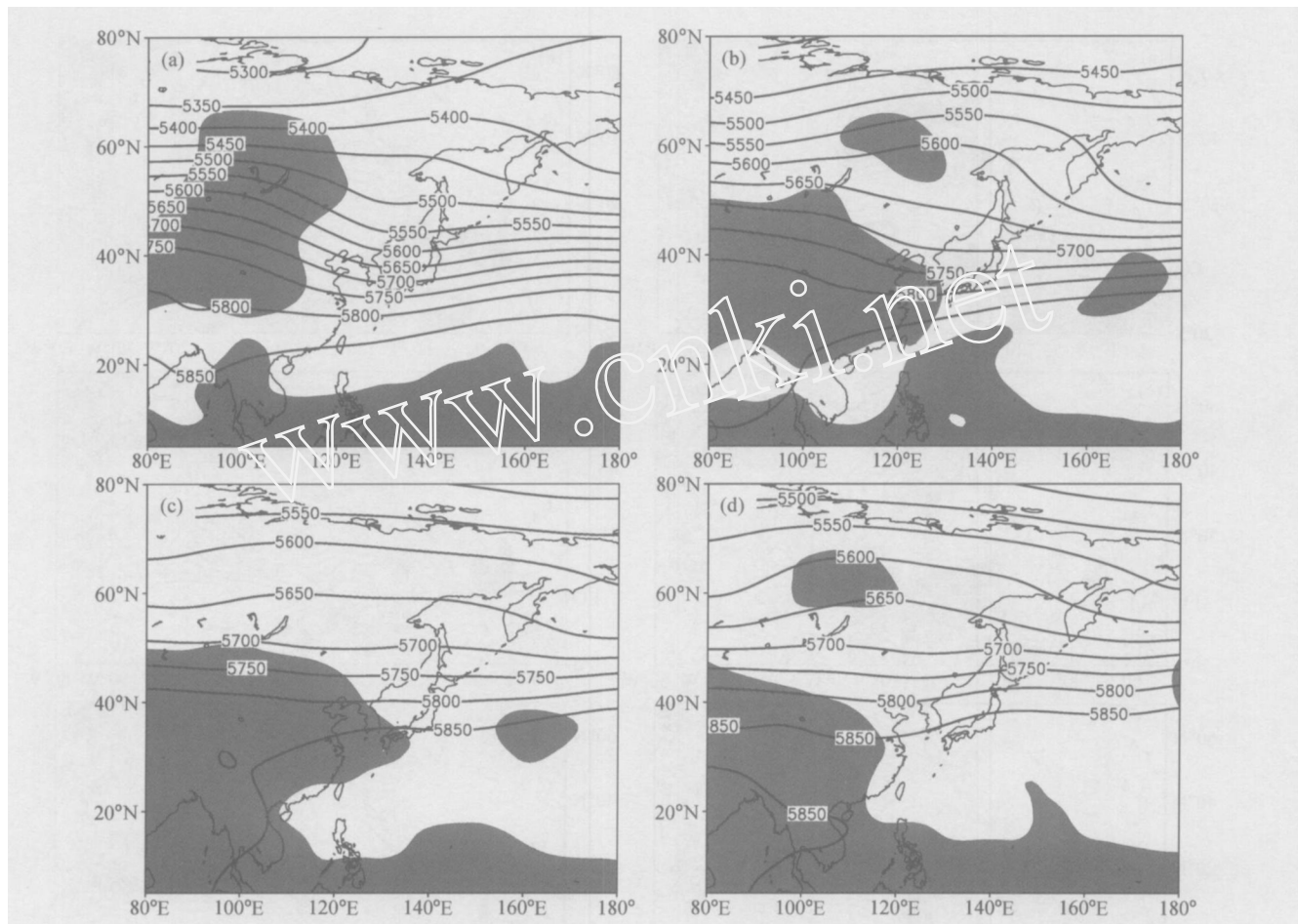


图4 旱涝并存年 500 hPa 合成高度场(单位: dagpm): (a) 5月; (b) 6月; (c) 7月; (d) 8月。阴影区为高  $I_{DFC}$  年与低  $I_{DFC}$  年 500 hPa 合成高度差值场通过 95 % 置信度水平显著性检验的区域

Fig. 4 The composite 500 hPa height field (dagpm) for drought-flood coexistence years: (a) May; (b) Jun; (c) Jul; (d) Aug. The shaded area is the composite difference between high  $I_{DFC}$  years and low  $I_{DFC}$  years, which passes 95 % level significant test

## 6 长江中下游旱涝并存年前期海温场的特征

本文还计算了夏季  $I_{DFC}$  指数与其前期 1 ~ 6 个月全球 SST 的相关系数(如图 5 所示, 阴影为置信度检验达 95 % 的区域)。从前一年 11 月开始到当年 4 月份, 可以看到从南中国海到西太平洋、孟加拉湾、阿拉伯海以及印度洋北部均为显著正相关区, 就是说长江中下游地区夏季旱涝并存高指数年前期, 上述海区的 SST 也偏高, 我们知道海陆热力差异是产生季风的驱动力之一<sup>[9]</sup>, 南海夏季风爆发前期当海温偏高时, 则海陆温度差异变小, 导致夏季风爆发推迟且强度偏弱; 反之, 夏季风偏强。因此, 高  $I_{DFC}$  指数年(旱涝并存异常年), 其东亚夏季风偏弱, 这与前面 850 hPa 差值风场分析所得到的

结论相吻合。可以认为, 中国近海海温的偏高是导致后期长江中下游地区旱涝并存的可能原因之一。

另外, 我们还注意到在前一年 11 月份(图 5a)赤道中太平洋有显著的 SST 正相关区向东发展, 并逐月向东推进(图 5b ~ e), 至当年 4 月在北美沿岸至赤道地区出现大范围显著正相关区, 表明高  $I_{DFC}$  指数年, 赤道东太平洋海温呈现升高的趋势。事实上, 在高  $I_{DFC}$  指数的前 10 年中, 有 6 年为 El Niño 年, 因此, 旱涝并存异常年前期对应着 El Niño 的成熟或发展阶段。

## 7 结论

“旱涝并存”是我国夏季常见的气象灾害之一, 长期以来对之研究不多。本文重点分析了长江中下游地区夏季的“旱涝并存”异常年同期大气环流和

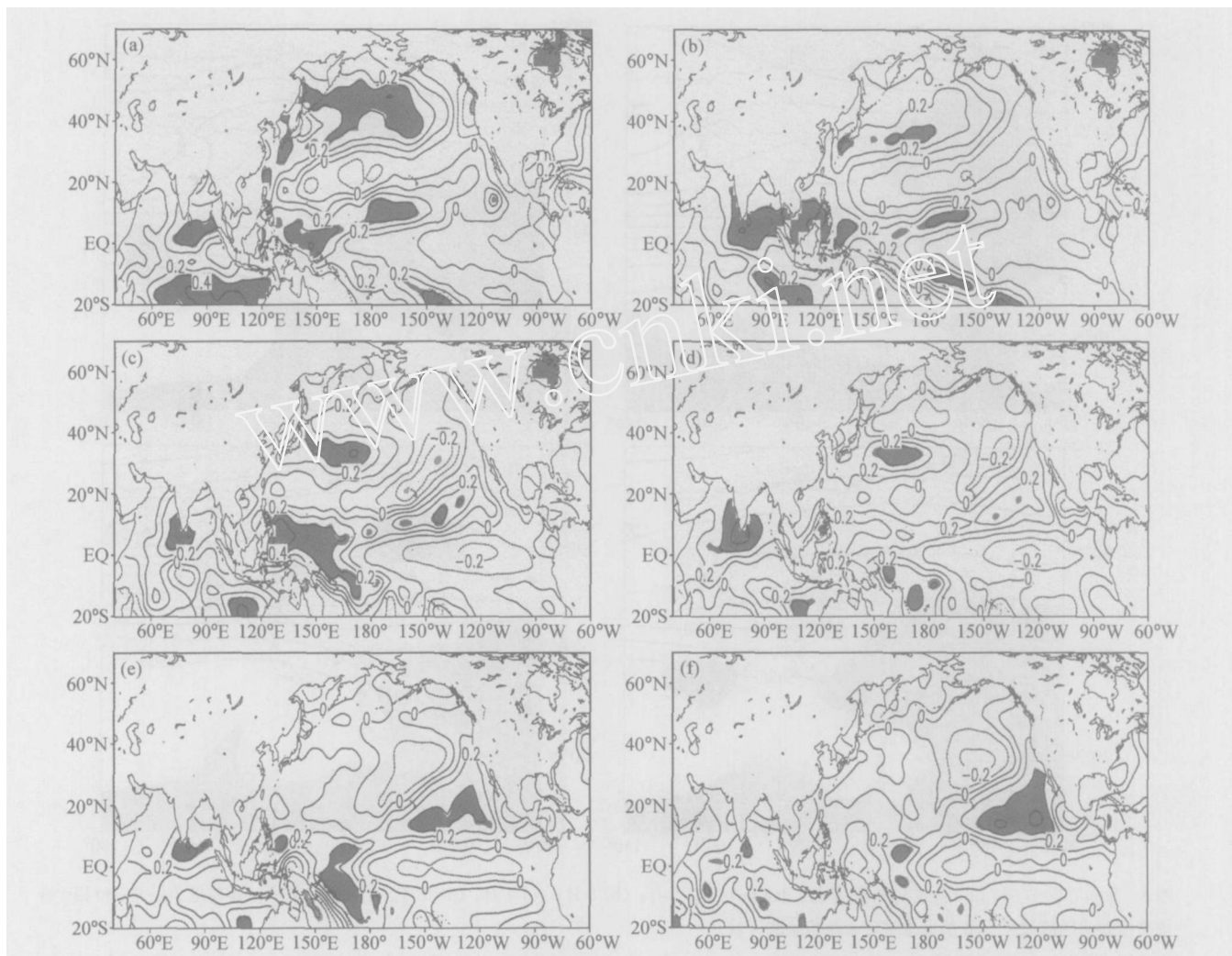


图5 夏季  $IDFC$  指数与其前期海表温度的相关系数分布: (a) 前一年 11 月; (b) 前一年 12 月; (c) 当年 1 月; (d) 2 月; (e) 3 月; (f) 4 月。阴影为置信度检验达 95 % 水平的区域

Fig. 5 The correlation coefficient between summer  $IDFC$  and preceding SST field: (a) The preceding Nov; (b) the preceding Dec; (c) the preceding Jan; (d) the preceding Feb; (e) the preceding Mar; (f) the preceding Apr. The shadow area is at 95 % significance level

前期海温场的一些特征, 根据以上分析, 我们可以得出以下一些结论:

(1) 近 50 年, 尤其是从 20 世纪 80 年代以来, 长江中下游夏季旱涝并存异常的发生频率呈现上升趋势。

(2) 长江中下游地区旱涝并存与东亚夏季风的强度存在显著的相关关系, 夏季旱涝并存异常年, 其同期东亚夏季风偏弱。

(3) 西太平洋副高季节内振荡的异常可能是导致长江中下游地区“旱涝并存”异常的主要因素之一。

(4) 夏季旱涝并存异常年前期, 从阿拉伯海到

中国南海 SST 显著偏高, 并对应着 El Niño 的成熟或发展阶段。

本文主要从一个较长的时间尺度(季时间尺度)对“旱涝并存”异常的总体特征进行了分析。然而, “旱涝并存”是一个非常复杂的天气现象, 如果细分, 还存在短期异常(如 1 旱 1 涝 1 旱 1 涝)和中期异常(如旱旱 ..... 涝涝 .....), 对这些情形尚需进一步分类探讨, 这些工作还有待于进一步研究。

#### 参考文献 (References)

- [1] 竺可桢. 东南季风与中国之雨量. 地理学报, 1934, 1 (1): 1~27  
Zhu Kezheng. Southeastern monsoon and precipitation in Chi-



- na. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 1934, **1** (1): 1~27
- [2] 涂长望, 黄士松. 中国夏季风之进退. *气象学报*, 1944, **18**: 1~20  
Tu Changwang, Huang Shisong. The advance and withdraw of Chinese summer monsoon. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1944, **18**: 1~20
- [3] 陶诗言, 徐淑英. 夏季江淮流域持久性旱涝现象的环流特征. *气象学报*, 1962, **32**: 1~10  
Tao Shiyan, Xu Shuying. Some aspects of the circulation during the periods of the persistent drought and flood in Yangtze River and Huaihe River valleys in summer. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1962, **32**: 1~10
- [4] 吴国雄, 刘还珠. 降水对热带海表温度异常的邻域响应 I 数值模拟. *大气科学*, 1995, **19** (4): 422~434  
Wu Guoxiong, Liu Huanzhu. Neighborhood response of rainfall to tropical sea surface temperature anomalies, Part I Numerical experiment. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1995, **19** (4): 422~434
- [5] 张琼, 刘平, 吴国雄. 印度洋和南海海温与长江中下游旱涝. *大气科学*, 2003, **27** (6): 992~1006  
Zhang Qiong, Liu Ping, Wu Guoxiong. The relationship between the flood and drought over the lower reach of the Yangtze River valley and the SST over the Indian Ocean and the South China Sea. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (6): 992~1006
- [6] 黄荣辉, 孙凤英. 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响. *大气科学*, 1994, **18** (2): 141~151  
Huang Ronghui, Sun Fengying. Impacts of the thermal state and the convective activities in the tropical western warm pool on the summer climate anomalies in East Asia. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1994, **18** (2): 141~151
- [7] He Jinhai, Zhou Bing, Wen Min, et al. Vertical circulation structure, interannual variation features and variation mechanism of western Pacific subtropical high. *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18** (4): 497~510
- [8] Ting M F, Wang H. Summer time U. S. precipitation variability and its relation to Pacific sea surface temperature. *J. Climate*, 1997, **10**: 1853~1873
- [9] 陈隆勋, 朱乾根, 罗会邦, 等. 东亚季风. 北京: 气象出版社, 1991. 362pp  
Chen Longxun, Zhu Qiangen, Luo Huibang, et al. *East Asian Monsoon* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1991. 362pp