

# 我国东南部夏季干旱指数研究\*

吴洪宝

(南京气象学院, 南京 210044)

## 提 要

根据中国东南部夏季降水与气温显著负相关的特点, 选用合适的干旱指数分析了旱涝的时空变率. 得到的 4 个空间型较之降水分型结构简单, 又综合反映气候异常状态. 时间演变没有显著的长期倾向. 干旱指数场与 850 hPa  $U$ 、 $V$  等场奇异值分解(SVD)分析得到, 南海至菲律宾西风偏强, 中国东部南风分量偏强, 副高南(北)侧东(西)风偏强时, 长江中下游偏旱, 反之则偏涝.

关键词: 夏季 干旱指数 东亚季风 奇异值分解

## 引 言

旱涝由于对社会和经济有重大影响一直受人们关注. 最直接反映旱涝强度的气候要素是降水量距平, 关于中国夏季降水的时空分布特点已进行了很多研究<sup>[1-5]</sup>. 然而, 由于降水的局地性强, 观测误差大, 时空结构复杂, 降水分型和预报依然不够完善, 甚至发生事后评价不一致的情况. 从气候异常成因看, 降水异常只是气候异常的一个表现方面, 它与其它要素特别是气温异常相联系, 而气温异常的时空结构要简单些, 因此, 可以通过气温或气温和降水量组成的指数反映旱涝. 国内外已有几种不同的干旱指数<sup>[5-8]</sup>, 它们的共同点是假设降水偏少(多)与气温偏高(低)相联系, 两者负相关, 干旱指数的大小对应着高温少雨和低温多雨两种异常状态. 然而, 在我国实际情况不完全如此. 我国是季风气候区, 夏季东部地区受副高影响的程度决定着气候异常状态, 降水和气温确为负相关, 但黄河上游和辽宁等地为正相关<sup>[5]</sup>. 冬季受冬季风影响, 气压系统的温度属性与夏季的相反, 蒙古高压偏强时, 北风凛冽, 天气低温少雨, 而偏弱的年份, 暖湿空气活跃, 容易形成多雨雪的暖冬, 两者正相关. 可见, 对全国范围全年使用以上干旱指数缺乏意义. 本工作先分析全国各月降水量与气温的相关, 再对负相关显著的东南部地区夏季分析干旱指数的时空结构, 最后用 SVD 方法分析它与东亚季风区环流异常的联系.

## 1 资料与方法

本文所用的资料为国家气候中心整理的中国 160 站 1951~1996 年逐月气温和降水

\* 本研究得到国家“九五”重中之重大项目 96-908 的资助.

1998-11-07 收到, 1999-09-07 收到再改稿.

资料, 以及美国 NCEP/NCAR 再分析的 1958~1996 年东亚地区 850 hPa  $U$  和  $V$ 、 $Z$  和 500 hPa  $Z$  月平均资料。

中国东部夏季气候异常状态采用  $\text{педтб}^{[6]}$  定义的干旱指数

$$S = \frac{\Delta T}{\sigma_T} - \frac{\Delta R}{\sigma_R} \quad (1)$$

其中  $\Delta T$ 、 $\Delta R$  和  $\sigma_T$ 、 $\sigma_R$  分别为月平均气温、月降水量的距平和均方差。

采用 SVD 方法<sup>[9-10]</sup>寻找  $S$  场与东亚夏季风之间的联系。被分析的两个场分别称为左场和右场。SVD 的原则是对左、右场分别确定一套正交归一化的向量(空间型), 使得左、右场展开的第 1 对、第 2 对、..., 展开系数间的协方差分别达最大、次大、..., 不同序号展开系数间的协方差为零。由此导得的空间型是左右场交叉协方差矩阵的左、右奇异向量, 同序号时间系数间的协方差是对应的奇异值。显然, 这一原则并不能说明两个场之间相关显著, 因此需要检验。由线性代数中矩阵奇异值分解的性质, 有

$$\|C\|_F^2 \equiv \sum_{i=1}^{N_S} \sum_{j=1}^{N_Z} C_{ij}^2 = \sum_{k=1}^R \sigma_k^2 \quad (2)$$

其中  $C_{ij}$  是左场的第  $i$  格点与右场的第  $j$  格点资料序列间的协方差,  $N_S$ 、 $N_Z$  是左场、右场的格点数,  $\sigma_k$  是第  $k$  个奇异值,  $R$  是不等于零的奇异值个数,  $R \leq \min(N_S, N_Z)$ 。由式(2), 第  $k$  对 SVD 模态解释两个场之间的总的协方差平方和( $\|C\|_F^2$ )的百分比为

$$SCF_k = \frac{\sigma_k^2}{\sum_{k=1}^R \sigma_k^2} \times 100\% \quad (3)$$

为了解干旱指数异常与哪些场的联系显著, 把左场固定为干旱指数, 右场由计算机程序产生的  $N_Z$  个独立的正态分布随机序列(长度同左场)代替(文献[10]是把右场随机排序), 做 SVD 分析。这种随机右场的 SVD 试验反复进行 100 次。对于固定的模态序号  $k$ , 把所得的 100 个  $SCF_k$  由大到小排列, 记最大的和第 10 个大的为  $SCF_k^1$  和  $SCF_k^{10}$ 。当用实际气象要素场作为右场与干旱指数 SVD 所得到的  $SCF_k$  大于  $SCF_k^{10}$  时, 则认为第  $k$  对 SVD 模态在 90% 置信水平上可信, 若大于  $SCF_k^1$  则更可信。

## 2 干旱指数和中国东南部夏季气候异常状态

式(1)定义的干旱指数, 绝对值大的正负值分别相应于高温少雨和低温多雨两种气候异常状态, 这意味着  $T$  与  $R$  必须负相关,  $S$  才有意义。表 1 是用 1951~1996 年资料计算出的中国 160 站各月气温与降水相关系数小于一定负值的站数。可见, 从 10 月至 4 月, 相关系数小于 -0.3 ( $\alpha=0.05$ ) 的站点数不到总站数的 1/4, 小于 -0.4 ( $\alpha=0.01$ ) 的站数仅 10 站左右。而在 6、7、8 月有 100 站左右小于 -0.3, 且  $T$  与  $R$  间的相关系数的地理分布(图略)与黄嘉佑<sup>[5]</sup>的结果相似(本文的资料略长些)。在黄河上游和东北地区,  $T$  和  $R$  正相关或负相关不显著。绝对值大的负相关集中在中国东南部, 7 月份沅溪相关达 -0.79。由表 1 和  $T$  与  $R$  相关系数的地理分布图得出, 对于我国, 式(1)中定义的  $S$  比较适用于描述东南部地区夏季气候异常状态, 对其它季节和地区则缺乏意义。这种情况的天气学意义

清楚, 夏季中国东南部主要受暖性副热带高压影响, 干旱少雨伴随气温偏高, 受其它系统影响时多雨伴随相对低温, 这是中国东南部夏季两种主要的气候异常状态. 而在秋、冬、早春季节, 造成少雨的高气压是冷性的, 产生降水的低气压是暖性的, 但另一方面, 辐射因素仍有利于晴天增温、雨天降温, 总的使气温与降水之间相关不够显著.

表 1 中国 160 站 1951~ 1996 年各月气温与降水相关系数小于一定值的站数

相关系数	月 份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
< 0.0	128	118	119	124	148	154	154	151	122	89	103	89
< - 0.1	99	79	91	98	134	146	141	140	104	63	80	58
< - 0.2	62	40	58	70	113	127	127	118	78	40	52	36
< - 0.3	29	17	27	37	87	100	107	101	51	16	19	19
< - 0.4	10	6	12	16	50	70	83	76	25	10	6	9
< - 0.5	2	3	3	9	23	40	55	53	6	0	2	3

### 3 中国东南部夏季干旱指数的时空特征

图 1 是  $41^{\circ}\text{N}$  以南  $99^{\circ}\text{E}$  以东 118 站 1951~ 1996 年的 6~ 8 月平均干旱指数距平主成分分析得到的前 4 个空间型. 图中的值是归一化的特征向量与对应特征值的均方根的乘积, 也是站点上干旱指数序列与对应主成分序列间的相关系数, 因此可以从相关系数显著性判断各空间型主要反映哪些地区的变率, 大致上绝对值大于 0.3 的地区有意义. 图上值的平方是该空间型对站点上原序列的方差贡献率. 前 4 个空间型解释原场总方差的百分比分别为 22.66%、13.67%、10.12%、6.93%. 第 1 型表示长江中下游广大地区有相同符号的距平, 是最大尺度的异常型, 在 0.6 等值线区域内, 有 36% 的局地方差被这一型表示出来, 在中游和下游地区达 64%, 由于这一型时间系数的方差最大, 所以也是旱与涝年际变化最频繁地区. 第 2 型表示陕西、山西南部、河南西部与华南地区符号相反的距平分布. 第 3 型表示长江下游小块地区与其它地区相反符号的距平分布. 第 4 型是鞍型场结构, 表示黄河下游及西南地区与东南沿海及河套地区间相反符号的距平分布. 与黄嘉佑<sup>[5]</sup>全国夏季气温荷载图相比, 前 3 个型比较相似. 与魏凤英、张先恭<sup>[1]</sup>的我国东部夏季降水距平 EOF 图相比较, 前 2 个型的形势也基本相似. 差别是本文第 2 型的中心位置比他们的略偏西. 产生差别一方面是由于资料年代、分析区域、空间点数不同, 但主要在于本文的分析对象综合地反映了高温少雨或低温多雨两种气候异常状态的空间分布. 它包含有降水异常空间结构的信息, 但充分利用了降水与气温间的显著相关, 使空间结构比文献<sup>[1~ 5]</sup>的简单.

图 2 是第 1~ 4 主成分曲线及拟合直线. 由图 2 可见, 第 1、2、4 主成分表现出下降倾向. 对线性倾向显著性做费歇检验<sup>[7]</sup>, 计算结果列于表 2. 依据文献<sup>[7]</sup>给出的判据, 只有第 4 主成分的线性倾向显著, 置信水平达 99%. 第 2 主成分包含年代际振荡, 60 和 70 年代以正值为主, 80 年代以负值为主, 说明在这两个时段第 2 空间型所反映的南北向梯度有一转变过程. 最强的时间变率是不规则的年际振荡. 前 4 个成分已能较好地反映中国东

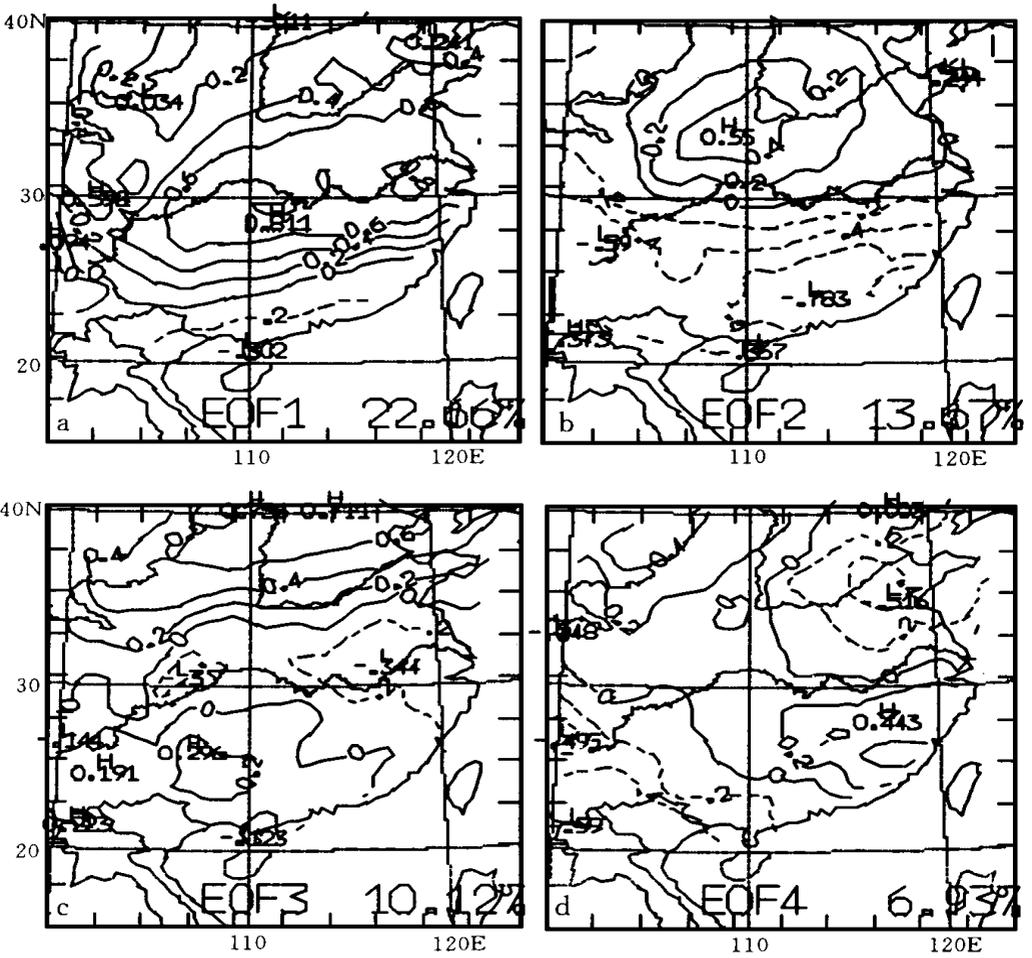


图1 中国东南部 118 站 1951~1996 年夏季平均干旱指数的前 4 个 EOF 空间分布图

(a) EOF1 (b) EOF2 (c) EOF3 (d) EOF4

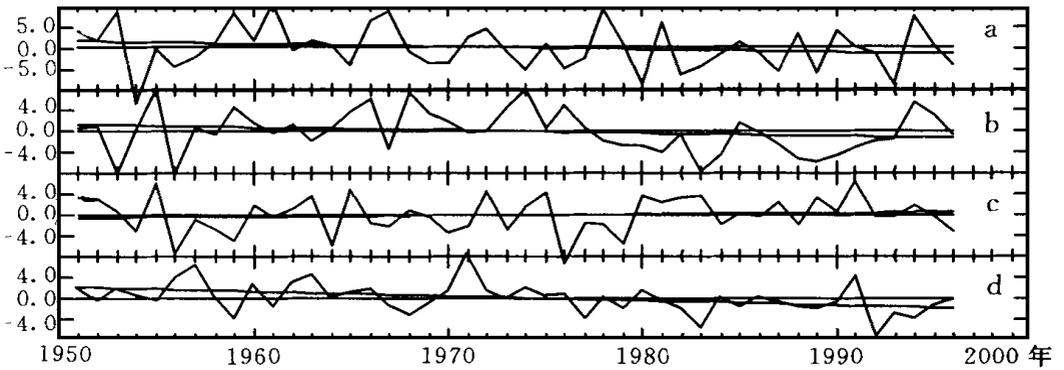


图2 中国东南部 118 站 1951~1996 年夏季平均干旱指数的前 4 个主成分时间演变

(a、b、c、d 分别为第 1、第 2、第 3、第 4 主成分)

南部夏季平均的旱涝特征, 例如, 1961、1978 年和 1954、1980 年分别是长江中下游旱和涝严重的夏季, 第 1 主成分分别是强的峰和谷, 1991 年夏季涝主要在下游安徽和江苏, 是由第 3 空间型和主成分表示的。

表 2 主成分的线性倾向系数和线性倾向解释的方差百分比

主成分序号	方差	线性倾向系数	线性倾向解释
		(1/年)	方差百分比(%)
1	26.74	- 0.0707	3.30
2	16.14	- 0.0596	3.88
3	11.94	0.0236	0.82
4	8.18	- 0.0883	16.78

#### 4 干旱指数场与东亚季风联系的空间结构

左场固定取中国东南部 118 站 1958~1996 年 6~8 月干旱指数, 分别以同期  $100^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$ ,  $0^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$  区  $5^{\circ}$  间距网格点的 850 hPa  $U$ 、 $V$ 、 $Z$ , 500 hPa  $Z$  为右场做 SVD。左右场的空间点数分别为 118 和 117, 时间是 117 个夏季月, 资料都取标准化距平。另外, 由计算机产生的标准正态分布随机数组成 100 个不同的  $117\times 117$  矩阵作为右场, 也与左场做同样的 SVD 计算。表 3 给出判断 SVD 模态显著性的指标。

表 3 干旱指数场与不同右场做 SVD 得到的  $\|C\|_F^2$  和  $SCF_k$  以及 100 次随机试验右场做 SVD 得到的最大, 第 10 大, 最小  $\|C\|_F^2$  和  $SCF_k$

右场	$\ C\ _F^2$	$SCF_k(\%)$				
		1	2	3	4	5
850 hPa $U$	257.15	43.22	17.34	13.90	7.40	4.01
850 hPa $V$	214.32	34.66	21.16	10.83	6.84	5.11
850 hPa $Z$	290.23	74.53	9.50	4.77	3.98	2.11
500 hPa $Z$	399.22	72.06	17.91	3.40	1.73	1.55
最大	132.80	32.50	19.60	9.30	6.48	5.88
第 10 大	130.33	31.00	19.30	9.15	6.34	5.75
最小	125.74	29.41	17.81	7.57	5.56	5.19

注: 表中 1、2、3、4、5 代表  $SCF_k$  中的  $k$ , 是 SVD 模态的序号。

表 4 显著的 SVD 模态表示的左、右场方差百分率及展开系数间的相关系数

	850 hPa $U$			850 hPa $V$				850 hPa $Z$	500 hPa $Z$
	1	3	4	1	2	3	4	1	1
表示左场方差百分率	15.9	9.7	4.2	12.9	13.0	6.5	5.0	13.8	12.9
表示右场方差百分率	13.5	7.7	11.9	13.5	8.8	6.2	6.2	50.3	53.1
相关系数	0.6	0.5	0.6	0.6	0.5	0.6	0.6	0.5	0.6

由表3可见,干旱指数场与4个实际气象要素场之间的总协方差平方和都大于与随机场之间的,因此,干旱指数场与这4个场之间总的相关是存在的,又以与500 hPa Z场的相关最强.从单个SVD模态解释总协方差平方和的贡献率看,以850 hPa U和V场为右场的第1、3、4和1、2、3、4模态显著.以850和500 hPa Z场为右场,只有第1模态显著,说明850 hPa风场区分干旱指数不同空间分布的潜力大些.

表4给出显著SVD模态表示出左、右场各自方差的百分率及左右场奇异向量展开系数间的相关系数.由表4可见,单个模态是以850 hPa U为右场的SVD第1模态表示出左场方差最多.以850 hPa V为右场,可区分出左场4种空间型,4个模态合起来表示了更多的左场方差.以850 hPa和500 hPa Z为右场的SVD,尽管总的协方差平方和以及第1模态解释的协方差平方和很大,但它们主要表示了右场的方差.总的来说,空间结构愈简单的场作为右场,所得的SVD模态表示右场方差的百分率愈高,而表示出左场方差的百分率愈低,左右对调亦然.因此,就上述4个右场而言,850 hPa U、V场能反映中国东南部夏季干旱指数时空分布的更多信息.以下集中分析850 hPa风场与干旱指数场联系的空间结构.

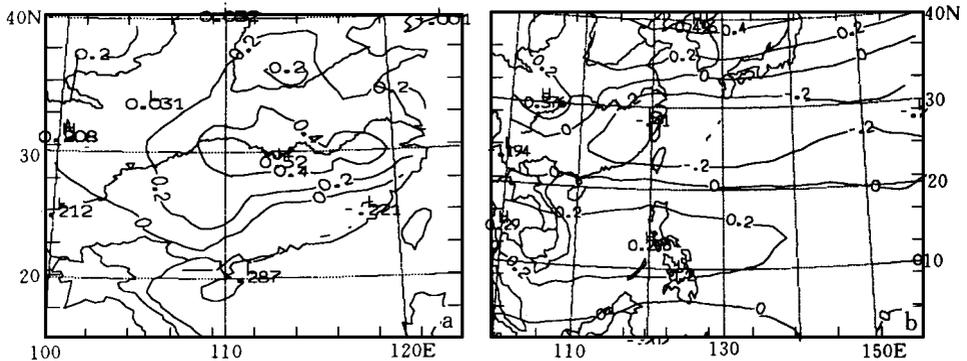


图3 干旱指数场与850 hPa U场SVD得到的第1模态(a)、右(b)异类相关图

图3a、b是干旱指数与850 hPa U场SVD第1模态的左、右异类相关图.左(右)异类相关图是左(右)场格点资料与右(左)场奇异向量展开系数间的相关系数分布图,它正比于左(右)奇异向量,所以分布形势与奇异向量图相同,但数量意义更明确<sup>[9]</sup>.本工作中,SVD分析的样本容量为117,相关图上绝对值大于0.2的地方信度已达0.05.由图3a可见,以长江中下游为中心的大范围地区的干旱指数异常都与850 hPa U场的第1奇异向量展开系数相关.图3b上,有意义的主要有3个带状区:南海至菲律宾以东洋面和35°N以北地区是大于0.2区,我国东南部及以东洋面为小于-0.2区.夏季850 hPa U场的气候分布大致是,南海至菲律宾以东是从印度季风延续过来的西风区,我国东南沿海及以东洋面是副高南侧的东风区,35°N以北是副高北侧的西风区.所以,在第1右奇异向量展开系数为正的月份,这3个区域季风的u分量都比常年偏强,这意味着副高也偏强.由于这一对左奇异向量的展开系数间相关系数为0.61,因此,干旱指数的异常将如图3a分布.这种联系的天气学意义是清楚的.

干旱指数与850 hPa V场SVD第1模态反映的相关结构是,当长江中下游干旱指数

是正距平时, 850 hPa  $V$  场在中国东南部至  $140^{\circ}\text{E}$  附近洋面是正距平,  $10^{\circ}\text{N}$  以南  $140^{\circ}\text{E}$  以东是负距平. 第 2 模态反映出类似于图 1b(EOF2) 所示的干旱指数距平型, 850 hPa  $V$  场相配合的距平型是在约  $15^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$  范围,  $130^{\circ}\text{E}$  以西正距平, 以东负距平的分布(图略).

在以 850 hPa  $U$ 、 $V$ 、 $Z$  和 500 hPa  $Z$  为右场的 4 个 SVD 中, 第 1 模态左场的分布都是在长江中下游为最大正值区, 相似于干旱指数 EOF1. 以 850 hPa  $V$  为右场 SVD 的第 2 模态左场的分布亦相似于干旱指数的 EOF2. 说明两个场之间的相关结构与场本身的变率结构是相联系的. Wallace 等<sup>[10]</sup>对 500 hPa  $Z$  场与 SST 场的 SVD 得到的异类相关图与各自的 EOF 图也较相似. 当然, 这并非 SVD 方法本身能得出如上结论, 关键在于分析的两个场的变化是否存在相联系的形成机制.

## 5 结 论

(1) 比较全国各月气温与降水量间的相关得出, 在中国东南部地区夏季两者存在很显著的负相关, 据此, 可由标准化气温距平减标准化降水量距平构成的干旱指数表示气候异常状态. 它包含的应用信息, 比气温或降水量更丰富, 时空结构比单独采用降水量表示旱涝简单. 反映的气候异常与大气环流异常关系的天气学意义清楚. 由于降水量局地性强, 时空结构复杂, 预报困难, 因此, 在中国东南部夏季, 可以尝试用干旱指数作为短期气候预报的对象.

(2) 中国东南部夏季干旱指数的变率可用 4 个型概括: 长江中下游具有一致的距平符号, 且年际变化强烈, 是时空变率的主要成分; 其次是南北向相反符号的距平分布; 第 3 是长江下游与其它地区反号距平分布; 第 4 是鞍型结构. 前 3 个型没有显著的时间变化倾向, 第 4 型时间系数有显著下降倾向, 但它表示原场的方差较小, 空间结构是准反对称的, 因此, 全区总的来说, 旱涝程度的时间变化在自然振荡范围内.

(3) 中国东南部夏季干旱指数场与东亚季风区 850 hPa  $U$ 、 $V$ 、 $Z$  和 500 hPa  $Z$  场之间总协方差平方和都明显超出随机水平, 表明这个区域夏季气候异常是与环流异常相联系的. 4 种 SVD 的第 1 模态都显著, 它们反映的干旱指数异常的分布都相似于干旱指数的 EOF1. 较之高度场, 风场解释干旱指数的方差更多些. 在 850 hPa 上, 南海至菲律宾西风偏强及副高环流偏强与长江中下游偏旱对应.

## 参 考 文 献

- 1 魏凤英, 张先恭. 我国东部夏季雨带类型的划分及预报. 气象, 1988, 14(8): 15~19.
- 2 王晓春, 吴国雄. 夏季降水异常空间模态与环流的关系. 见: 黄荣辉主编. 中国气候灾害的分布和变化. 北京: 气象出版社, 1996. 193~200.
- 3 李维京, 丑纪范. 中国月平均降水场的时空相关特征. 高原气象, 1990, 9(3): 284~292.
- 4 廖荃荪, 赵振国. 我国东部夏季降水的季度预报方法. 应用气象学报, 1992, 3(增刊): 1~9.
- 5 黄嘉佑. 我国夏季气温、降水场的时空特征分析. 大气科学, 1991, 15(3): 124~132.
- 6 Педь Д. А. О показате ле за сухи и избыточного увлажнения. Труды ГМЦ. 1975, 156: 19~38.
- 7 Ратькова Э Я, Груза Г В. Индикторы из менений климата росич. Метеорология и Гидрология. 1998, (1): 5~7.

- 8 Karl T R, Knight R W, Easterling D R. Indices of climate change for the United States. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77**(2): 279~ 292.
- 9 Bretherton C B, Smith C, Wallace J M. An intercomparison of methods for finding coupled patterns in climate data. *J. climate*, 1992, **5**(6): 541~ 559.
- 10 Wallace J M, Smith C, Bretherton C S. Singular value decomposition of wintertime sea surface temperature and 500mb height anomalies. *J. Climate*, 1992, **5**(6): 561~ 576.

## STUDY ON DROUGHT INDEX OVER THE SOUTHEASTERN CHINA IN SUMMER

Wu Hongbao

(Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044)

### Abstract

On the basis of the fact that there exists significant negative correlation between temperature and precipitation over the southeastern China in summer, a drought index is appropriately chosen to investigate the spatial and temporal variability of summer drought/flood while no long-term trend is found in the time evolution of drought/flood, structures of four spatial patterns based on the index are more signatures of similarity than precipitation patterns, and reflect the climate anomaly. In addition, singular value decomposition (SVD) is applied to analyze the index dataset and 850 hPa  $U$ ,  $V$  components and some other fields, respectively. It turns out that drought likely occurs in the middle and lower reaches of the Yangtze River when westerly over the South China Sea and the Philippines, southerly over eastern China, and westerly (easterly) over the north (south) of subtropical high increase. On the contrary, flood likely occurs.

**Key words:** Summer Drought index East Asian monsoon Singular value decomposition (SVD).