

我国大陆干旱指数及其年际变化

江 剑 民

(北京气象学院)

提 要

本文应用正交旋转主分量分析方法,计算分析了我国大陆 1952—1987 年间大气干旱指数 $s = \frac{\Delta T}{\sigma_T} - \frac{\Delta R}{\sigma_R}$ 的地域相关和年际变化特征.结果表明,可以将我国大陆上旱涝异常的变化大致按 43°N 和 30°N 为分界线划分成三个基本相关的纬带.1954—1957 年间和 1963、1969 年前后大部分地区相对湿润多雨.70 年代以来,长江以北相对少雨干旱,气候变化的大趋势与撒亥勒(Sahel),以及英格兰中部和威尔士等地区相类似.年度干旱指数年际变化的短周期大部分地区以 2—3 年为主,具有准两年振荡的特点.

关键词: 正交旋转主分量分析; 干旱指数; 地域相关; 年际变化.

一、引 言

关于我国旱涝的时空变化问题,王绍武和赵宗慈^[1],魏凤英和张先恭^[2]等,曾先后根据近五百年的旱涝史料和 1952—1985 年间的降水实测资料,综合应用经验正交函数(EOF)及经验分析方法,对我国大陆东部和夏季,作过比较系统的研究.同时,农业气候学的研究结果指出:我国的雨涝灾害主要集中在汛期 5—9 月和大陆的东部、南部;干旱灾害主要集中在北方大部分地区的冬春季节,长江流域的夏秋季,以及华南的秋冬连旱等^[3].

本文根据 1951—1987 年间月平均气温和月降水量实测资料,试图应用正交旋转主分量分析(Orthogonally Rotated Principal Component Analysis)方法,对我国大陆(除西藏高原外)年度(按前一年 10 月至当年 9 月计算)旱涝异常气候的地域相关分布及年际变化特征作一初步分析.

二、计算方法和资料

1. 干旱指数的计算

考虑到干旱反常气候通常具有高温少雨,即强的蒸发需求与水份补给不足这两个方

面的特点,这里采用 Д.А.Пель提出的大气干旱指数公式^[4]

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

先计算各站逐月的干旱指数 s 值. 式中 $\Delta T = T - \bar{T}$, 即对该站该月份多年平均值 $\bar{T}$ 的月平均气温距平; $\Delta R = R - \bar{R}$, 是月降水量距平值; σ_T 与 σ_R 分别代表该站该月份的平均气温、月降水量的标准差

$$\sigma_T = \left\{ \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (T_i - \bar{T})^2 \right\}^{1/2},$$

$$\sigma_R = \left\{ \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L (R_i - \bar{R})^2 \right\}^{1/2}, \quad (2)$$

其中 L 为资料的年数,这种大气干旱指数是相对于当地多年平均的气候状态而言的,适合于定量地描述月、季干旱或雨涝的反常气候情况.

年度干旱指数是取前一年 10 月至当年 9 月间 12 个月的干旱指数累计值. 采用这种年度的划分,是考虑到我国北方冬小麦播种期,以及前冬季节性积雪是当年春季地墒和农业水源的重要组成部分^[5].

2. 正交旋转主分量分析的计算

由于通常的主分量分析(或经验正交函数分解)方法,可以用前几项少数彼此正交的特征向量及其相应主分量的线性组合去拟合时空域中众多维数序列的原始资料场,具有减少分析工作量等优点,曾在气象要素场的分型研究中得到广泛的应用.然而在很多实践中发现了这一方法的局限性^[6]:例如,由于主分量荷载向量(或特征向量)间正交性的限制,使得高阶荷载向量的空间图形,随其特征值的减小而出现尺度依次减小的多个中心;同时,其间的零值线常常接近于其它某一特征向量的极大值轴线(参见图 1a 与 1c);其次,当分析计算的区域大小改变时,解的特征向量分布图形也随之改变,因而难以明确解释不同特征向量的物理意义.

本文引用一种改进的因子分析方法,即正交旋转主分量分析^[7,8].其主要优点在于:解的空间函数可与遥相关的计算结果图形相似;同时,解的空间图形不会因计算范围的大小改变而变化.它的基本思想是由原资料气象要素场

$${}_N S_L = (s_{jt}), \quad (j=1, 2, \dots, N, \quad t=1, 2, \dots, L), \quad (3)$$

的经验正交展开的主分量荷载矩阵

$${}_N A_M = (a_{jp}) = (V_{jp} \cdot \sqrt{\lambda_p} / \sqrt{r_{jj}}), \quad (4)$$

$$(j=1, 2, \dots, N, p=1, 2, \dots, M),$$

进行适当多次的正交旋转变换 T , 构成一个新的矩阵

$${}_N B_M = {}_N A_M \cdot {}_M T_M = (b_{jp}), \quad (5)$$

并使得由新矩阵 B 的元素平方的方差函数

$$F_{V_p} = N \cdot \sum_{p=1}^M \sum_{j=1}^N (b_{jp} / h_j)^4 - \sum_{p=1}^M \left(\sum_{j=1}^N b_{jp}^2 / h_j^2 \right)^2 \quad (6)$$

收敛于一个极大值,故也称方差极大判据(Varimax Criterion)方法.以上各式中, N 代表变量个数, L 为观测样本量, $M < N$,是所取主分量的个数; V_p 是经验正交展开的第 p 个特征向量对应第 j 个变量的元素值, λ_p 是第 p 个特征值, r_{ji} 为原资料要素场相关(或协方差)矩阵中对应第 j 个变量的对角线元素值; a_{jp} 也就是第 p 个主分量与第 j 个变量原序列的相关系数,亦称作因子荷载量(Factor Loadings).而

$$h_j = \sum_{p=1}^M a_{jp}^2 = \sum_{p=1}^M b_{jp}^2$$

代表第 j 个变量的公因子方差(Communality).

正交旋转变换矩阵 T 可按下列运算构成:对于选定的一对主分量 p 和 q , ($p=1, 2, \dots, M-1, q=p+1, p+2, \dots, M$),取

$$\begin{aligned} u_j &= (a_{jp}^2 - a_{jq}^2) / h_j^2, \quad w_j = 2a_{jp} \cdot a_{jq} / h_j^2, \\ e &= 2 \sum_{j=1}^N u_j w_j - \frac{2}{N} \left(\sum_{j=1}^N u_j \right) \cdot \left(\sum_{j=1}^N w_j \right), \\ f &= \sum_{j=1}^N (u_j^2 - w_j^2) - \frac{1}{N} \left[\left(\sum_{j=1}^N u_j \right)^2 - \left(\sum_{j=1}^N w_j \right)^2 \right]. \end{aligned}$$

而所要求的旋转角度 φ ,由下式解得:

$$\tan 4\varphi = e/f, \quad (-45^\circ \leq \varphi \leq 45^\circ), \quad (7)$$

相应的正交旋转变换矩阵为

$$T_{pq} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \cos\varphi & \cdots & -\sin\varphi & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \sin\varphi & \cdots & \cos\varphi & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} p, \\ q, \end{matrix}$$

由 $p=1, 2, \dots, M-1, q=p+1, p+2, \dots, M$,共 $M(M-1)/2$ 对,依次作旋转变换,即取

$$\begin{aligned} B &= AT \\ &= AT_{12} \cdot T_{13} \cdots T_{pq} \cdots T_{(M-1),M} \end{aligned} \quad (8)$$

为一个循环.若干次循环之后,上述 F_V 值的增量渐渐减小,并收敛达到其极大值.

最后取

$${}_N G_M = (g_{jp}) = (b_{jp} \cdot h_j), \quad (9)$$

为正交旋转因子荷载量的解.其中 g_{jp} 是与第 p 个旋转主分量相对应的荷载向量(相当于特征向量)在第 j 个变量上的元素值.

Horel.J.D^[6]曾应用这种方法,计算出了北半球 500hPa 冬、夏季的低频振荡,结果与 Wallace 和 Gutzler^[9]用相关普查法算得的几个著名的遥相关型,如太平洋西部(WP)型、太平洋北美(PNA)型、大西洋东部(EA)型,以及欧亚(Eu)型等相当一致.

3. 资料

本文所用的资料,取自国家气象局中央气象台长期预报科所编辑的中国 160 站历年逐月月平均气温降水资料库.选取其中 100 个站点(参见图 3)的读数,时间从 1951 年 10 月至 1987 年 9 月共 36 个年度.少数缺测的记录,用该站多年月平均值填补代替.

三、地域相关的分布特征

从上述资料出发,先计算出各站 36 年的逐年干旱指数,作为原资料要素场 ${}_N S_L$,

表 1 旋转前、后各分量的方差贡献(%)

序号	旋 转 前		旋 转 后	
	方差贡献	累积方差贡献	方差贡献	累积方差贡献
1	20.1	20.1	9.3	9.3
2	15.7	35.8	8.8	18.0
3	9.2	45.0	8.6	26.7
4	6.6	51.6	8.4	35.1
5	6.3	57.9	7.4	42.5
6	3.9	61.8	6.0	48.5
7	3.7	65.5	5.9	54.4
8	3.7	69.2	5.2	59.6
9	3.1	72.3	4.8	64.4
10	2.9	75.2	3.3	67.7
11	2.4	77.6	3.2	70.9
12	2.3	79.9	3.2	74.1
13	2.2	82.0	3.1	77.2
14	1.9	84.0	2.9	80.1
15	1.6	85.5	2.4	82.5
16	1.5	87.0	2.4	84.9
17	1.5	88.5	2.3	87.1
18	1.3	89.9	2.1	89.3
19	1.2	91.1	1.8	91.1

($N=100, L=36$), 进行经验正交展开, 取前 19 项特征向量(即 $M=19$, 其中各特征值的方差贡献均大于 1.0%, 累积方差贡献达 91.1%), 按(2)式换算成主分量荷载向量矩阵 ${}_N A_M$, 解得正交旋转后的荷载向量矩阵 ${}_N G_M$. 表 1 分别列出了旋转前、后各分量的方差贡献.一般旋转后的各分量方差贡献比旋转前的要均匀分散一些, 同时, 某些分量方差贡献大小的顺序也会有改变.这是因为旋转后各分量的物理含义是着重表现空间的相关性分布特征, 其方差贡献只集中于某一较小的区域, 使其它区域的方差贡献尽量减小.经验正交函数特征向量却着重于把整个计算范围的方差贡献之和集中到前几项分量上.

前述旋转主分量与未旋转的主分量之间物理含义的差别, 也可以从实际计算结果比较出来.图 1 绘出了未作旋转变换的第 3 (图 1a)、5(图 1b)分量荷载向量及其相应的

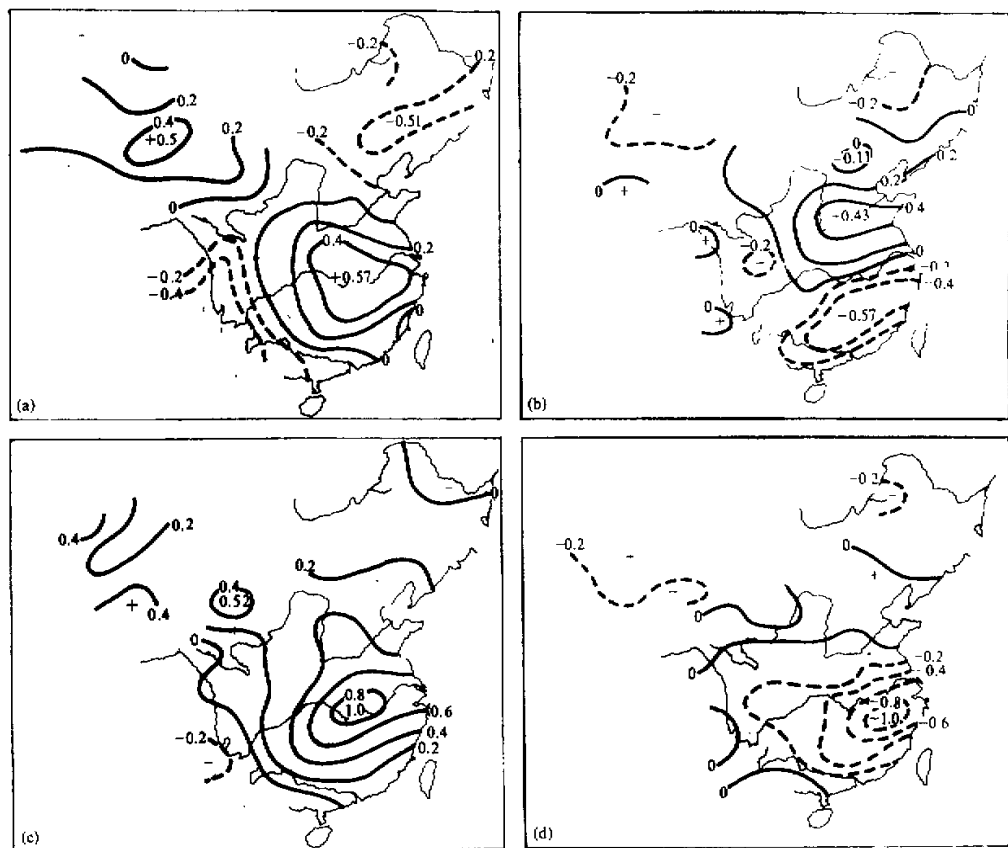


图1 未旋转变换前主分量荷载向量与遥相关图形的比较

a: 第3, b: 第5分量的荷载向量, c: 与第3, d: 与第5分量荷载向量相对应的遥相关.

遥相关图形. 遥相关图的相关出发点是与荷载向量的极大值相对应的. 比较图 1c 与图 1a 可见, 除华中及西北两个中心区接近一致外, 荷载向量图 1a 上的另两个负值中心, 即东北和西南地区, 在遥相关图 1c 上却不显著 (相关中心的 $r < r_{0.05} = 0.33$). 图 1b 类似于通常所说的“南涝北旱”纬向带状分布特征, 但在与之相对应的遥相关图 1d 上, 华北等其它中心也不明显. 它表明对于年度干旱指数来说, 纬向带状的旱涝对比如图 1b 这样强烈的分布特点, 可能是并不常见的.

图 2 则表明旋转后荷载向量的“简单结构”(simple structure)特征, 如第 2 分量(图 2a)上, 东北与新疆北部两个正值中心区域, 以及黄河上游的弱负值区; 第 6 分量(图 2b)上, 长江中上游与黄河河套地区的一对负值中心区域, 与对应的遥相关图(图 2c, d)分布特征相当一致. 这里仅是两个成对遥相关明显的图例, 其它各分量也都类似, 不再一一例举. 这里只将前 9 项分量各中心区域(取荷载值大于 0.60, 并对应相关系数高于 0.35 的)

位置,综合绘在一张图(图3)上.

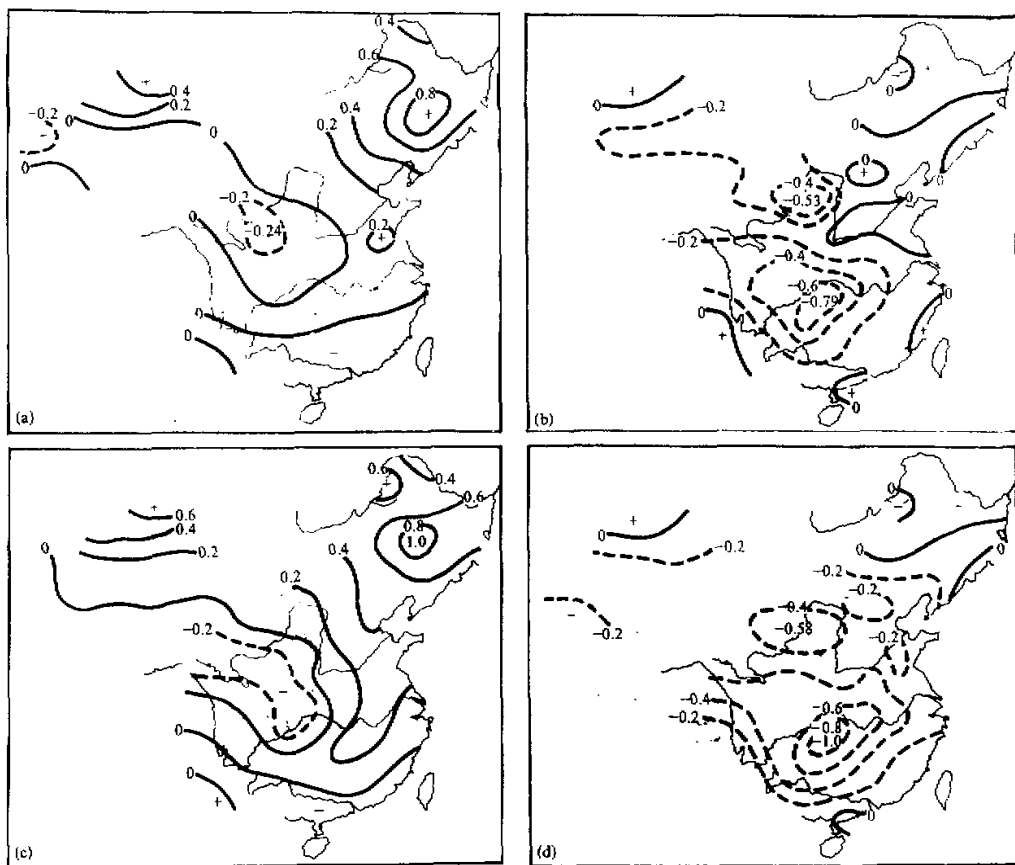


图2 旋转主分量荷载向量与遥相关图的一致性

d, b: 第2, 5分量旋转主分量的荷载向量, c, d: 分别与a, b相对应的遥相关图

从图3容易看出,我国大陆年度干旱指数的地理分布,除东部以长江、黄河中下游为界的纬向带状分布特点与已有的结果^[1,2]基本一致外,还有如下一些特征:(1)方差贡献最大的第1分量,极大值中心区域在黄河与长江中下游之间,表明这里是我国旱涝异常最突出的地区,过去关于淮河流域旱涝问题的研究,也曾指出其旱涝灾害频繁的特点^[10]。(2)排列位于我国东北、华北和西北的第2, 5, 7, 8, 9分量的中心区域都是正值,即各旋转主分量时间系数与实际干旱指数呈正相关,时间系数的正(负)值大,表示该区域内干旱(雨涝)程度重,同时,顺便指出,新疆南部塔里木盆地与北部准噶尔盆地的干旱或多雨的年际变化并不同步,塔里木盆地属典型的干旱气候,降水量的年际变化对农业及人类生活的影响,也不如准噶尔盆地半干旱气候区那样明显。(3)位于长江上、中游及下游以南的第3, 6, 4分量中心区域都是负值,与上述相反。



图3 前9项旋转主分量荷载向量中心区域的综合分布图

粗实线包围的中心数字表示分量的序号,正、负号表示该中心区域荷载量的符号;虚号表示相应的伴随(遥相关)中心区域;圆点表示100个测站的地理位置。

四、旱涝异常年际变化特点

对旋转主分量时间系数的求解,有几种不同的估计方法,都是对全部变量而言的^[7]。但本节希望能直观地分析上述9个分量区域里旱涝异常的时间变化特点及其关系。这里仅采用各区域内站点上,干旱指数的加权平均来表示该区域的干旱指数,即

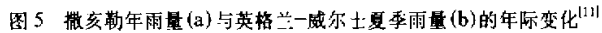
$$\tilde{s}_{pi} = \sum_{j=1}^{n_p} \left(g_{jp} / \sum_{k=1}^{n_p} g_{kp} \right) \cdot s_{ji}, \quad (10)$$

这里 n_p 代表第 p 分量区域内的站点数目(参见图3)。

计算结果表明,各区域干旱指数间还表现出某些相关关系,表2列出了各区域干旱指数间的相关系数矩阵。若取相关系数 $r > 0.42$ (置信度 0.01) 作为界值,可将9个分量区域划分成三组: A组是第2、9分量区域相关密切,即我国东北部与新疆北部的年际变化



人、科、子、ヲ、ハ、ハ、ヲ、



标准化值,负值在上表示干旱少雨.

基本同步; B 组是第 1、5、7、8 分量区域相关密切, 表明长江以北至东北和西南部广大地区年际变化基本类似; C 组为第 6、4、3 分量区域相关较好(其中第 3 与 4 区域间相关较差), 反映南方纬带上年际变化比较一致。由此, 大致可以用 43°N 和 30°N 为界, 将我国大陆划分为三个旱涝年际变化基本同步的纬带区域。仅黄河上游与长江上游基本同步, 金沙江流域属第 9 分量区的反相变化。这些特点还可从它们的年际变化曲线(图 4)上得到进一步的证实。

表 2 九个分量区域干旱指数间的相关矩阵

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1.00	0.26	-0.09	0.38	0.56	0.39	0.44	0.42	0.30
2		1.00	-0.06	0.19	0.49	0.04	0.36	-0.09	0.53
3			1.00	0.30	0.05	0.42	0.14	-0.01	-0.30
4				1.00	0.20	0.45	0.21	0.33	0.21
5					1.00	0.31	0.61	0.42	0.38
6						1.00	0.29	0.39	-0.04
7							1.00	0.43	0.29
8								1.00	0.22
9									1.00

图 4 是按上述三组分别绘出的各分量区域干旱指数曲线。图中可见: (1) 1954—1957 年间, 我国大部分地区, 尤其是大陆东部湿润多雨; 第二个相对湿润的时期是 1963、1969 年前后。(2) 70 年代以来, 长江以北的大部分地区都相对干旱。这种气候变化的大趋势, 与非洲撒亥勒(Sahel)^[11]地区年雨量, 及英格兰中部—威尔士的夏季降水异常(见图 5)基本类似, 说明撒亥勒近十几年来持续干旱, 并不是孤立的现象。这里为便于比较, 将图 5 的纵坐标倒置, 负值在上, 表示少雨干旱, 正值在下表示多雨湿润。

另外, 图 4 中还表明各区域干旱指数年际变化的短周期不完全一致。应用最大熵谱方法检验^[12](取样本单元数 $N=36$, 最大波数 $m=12$), 结果表明(表 3), 除东北和新疆北部的两个中心区域的主分量变化短周期不显著外, 东部黄河、长江中下游之间 4 年周期明显, 并大多与 ENSO 现象同步, 36 年来的 9 次 ENSO 年中, 有 6 年对应该区域多雨湿润; 其它各区域里都以 2—3 年周期为主, 具有准两年振荡的特征。

表 3 各旋转主分量的最大熵谱中的主要短周期

	A 组				B 组		C 组		
分量序号	1	5	7	8	9	2	6	4	3
主要周期	4.0	3.0	2.67	3.0	不显著		3.0	2.67	2.0

五、结 论

(1) 正交旋转主分量方法, 可作为对气象要素场作区域相关分析的客观计算方法。它能够客观地给出主要的遥相关中心位置及相关场的分布, 可避免人为选取相关中心点的随意性。

(2) 根据各旋转主分量荷载向量的分布以及其间的相关性, 大致可以用 43°N 和 30°N 为界, 将我国大陆上旱涝变化, 划分成三个纬带。仅西部黄河上游与西南部长江上游的变化基本同步, 金沙江流域与新疆北部呈反相变化。

(3) 我国大陆近 36 年来, 1954—1957 年间和 1963、1969 年前后, 是大部分地区相对湿润多雨的时期。70 年代以来, 长江以北大多少雨干旱, 其气候变化的大趋势与撒亥勒, 以及英格兰中部—威尔士等地区相类似, 并非孤立的现象。

(4) 年度干旱指数年际变化的短周期, 除东北和新疆北部不明显外, 东部黄河、长江

中下游之间 4 年周期明显,而且多数 ENSO 年,对应该区域湿润多雨;其它各区域都以 2—3 年周期为主,具有准两年振荡的特征。

参 考 文 献

- [1] Wang Shaowu and Zhao Zongci, 1981, Droughts and floods in China, 1470—1979, Climate and History, Cambridge University Press, 271—288.
- [2] 魏凤英、张先恭, 1988, 我国东部夏季雨带类型的划分及预报, 气象, 14, No 8, 15—19.
- [3] 张家诚、林之光著, 1985, 中国气候, 上海科学技术出版社, 572—577.
- [4] Kruzhkova, T.S. 1982, On certain features of atmospheric circulations in periods of droughts, *Mausam*, 33, 325—328.
- [5] 江剑民, 1985, 准噶尔盆地‘水’旱问题的初步探讨, 北京气象学院学术论文集, 校庆三十周年论文集, 气象出版社, 132—139.
- [6] Horel, J.D., 1981, A rotated principal component analysis of the interannual variability of the Northern hemisphere 500hPa height field, *Mon. Wea. Rev.*, 109, 2080—2092.
- [7] Harman, H.H., 1976, Modern factor analysis, university of Chicago press, 487pp.
- [8] 黄嘉佑, 1988, 转动主分量分析在天气气候分析中的应用, 气象, 14, No. 9, 47—51.
- [9] Wallace, J.M. and D.G. Gutzler 1981, Tele connections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter, *Mon. Wea. Rev.*, 109, 784—812.
- [10] 中央气象局中央气象台长期组, 1976, 淮河流域夏季降水前期环流特征的初步分析及其长期预报, 长期天气预报技术经验总结, 气象出版社.
- [11] 江剑民等, 1990, 撒哈勒干旱与大西洋欧洲上空的环流异常, 长期天气预报论文集, 气象出版社, 1990, 3, 232—239.
- [12] 曹鸿兴、罗乔林, 1979, 气象历史序列的最大熵谱分析, 科学通报, 24, 351—355.

ATMOSPHERIC DRYNESS INDEX IN CHINA MAINLAND AND ITS INTERANNUAL VARIATION

Jiang Jianmin

(Beijing Institute of Meteorology)

Abstract

With the analysis method of the Orthogonally Rotated Principal Component (Varimax Criterion), the regional teleconnection and interannual variability of the atmospheric dryness index, $s = \Delta T / \sigma_T - \Delta R / \sigma_R$, in the period of 1951—1987 in China mainland were investigated. The results indicate that three correlative zones for the annual index of atmospheric dryness might be approximately partitioned by 43°N and 30°N in China, that the droughts in the north of 30°N of China lasted 1970—1986, and that the general trend of climatic variation was similar to that in the Sahel, the central England and the Wales areas, and the dryness index in most part of these regions has the feature of quasi biennial oscillation.

Key words: Orthogonally Rotated Principal Component Analysis, Atmospheric Dryness Index, Regionalization, Interannual Variation.