

# 中国西北地区降水的演变趋势和年际变化\*

韦志刚 董文杰 惠小英

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州, 730000)

## 摘 要

将 PCA 和 SSA 相结合, 分析了中国西北地区降水量的演变趋势和年际变化, 结果表明: 西北地区的降水变化的主要趋势是 1960 年代初多雨, 到 1970 年代初演变为少雨, 1980 年代又多雨, 1990 年代少雨。这种趋势在陇南和陕西中南部是最显著的, 天山北麓区也是相对显著区。西北地区降水主要存在准 8.5 a、准 3~4 a 和准 5.1 a 的甚低频振荡。甚低频振荡在降水中的重要性依次为准 8.5 a、准 3~4 a 和准 5.1 a。准 8.5 a 振荡的振幅要比准 3~4 a 和准 5.1 a 振荡的振幅变化大。振荡位相在空间的分布并不完全一致。

关键词: 演变趋势, 甚低频变化, 西北地区降水。

## 1 引 言

近年来, 随着国家经济建设重心的逐渐西移, 对西北干旱气候和水资源的研究愈来愈受到关注。目前, 对西北干旱的成因已有了基本统一的认识, 远离海洋和青藏高原的影响是主要缘由。但在干旱气候的背景下, 西北地区的降水存在着多种时空尺度的振荡, 构成了干旱气候的变化, 认清这些振荡变化的规律, 对于预测未来的气候变化有着十分重要的意义。中国科学院、西北地区各省市气象部门对本地区的降水变化都作了一些初步的研究工作<sup>[1,2]</sup>, 最近, 李栋梁等<sup>[3]</sup>对西北干旱区夏季降水的变化进行了研究。总的来讲, 这些研究工作局限于空间分区和对省地降水基本变化规律的研究。为进一步深化对西北干旱气候变化规律的认识, 文中将主分量分析(PCA)和奇异谱分析(SSA)相结合, 来系统分析 1960 年代以来西北地区降水的演变趋势和 1~10 a 的周期振荡。

## 2 资料和数学分析方法

从中国国家气候中心提供的全国 336 个站月降水资料中, 选取 112 E 以西, 32 N 以北的 92 个台站作为分析对象(见图 1), 除西北 5 省区外, 还包括了内蒙西部以及山西、四川的个别站点。资料长度从 1960 年 1 月到 1995 年 12 月, 共 432 个月, 对个别站月的缺测值采用简单方式插补, 即该站该月上一年和下一年的值平均。从图 1 可以看出, 西北东部地区和北疆地区的站点相对稠密, 沙漠和戈壁地区相对稀疏。

\* 初稿时间: 1998 年 1 月 21 日; 修改稿时间: 1998 年 6 月 26 日。

资助课题: 国家重点基础研究发展规划(G1998040904-2)和中国科学院 KZ952-81-418 项目。

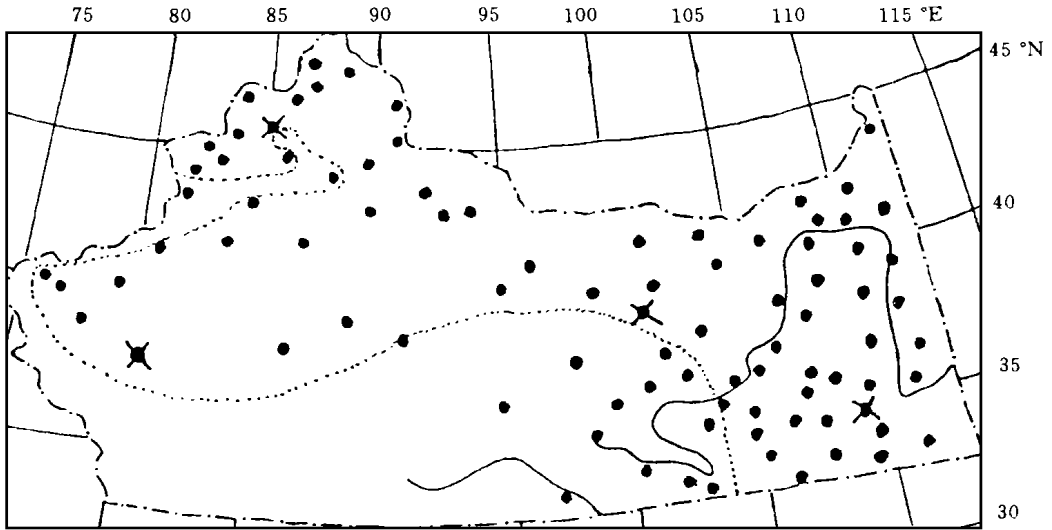


图1 中国西北地区及站点(图中小黑点)示意图  
(点线为青藏高原 3000 m 高度廓线)

应用最简单的频谱分析方法对各站降水序列或其平均值序列分析也可得到 1~10 a 的显著振荡周期。对各站分别进行分析, 计算量较大, 而由平均值分析出的结果却不能显现其显著区域, 用平均距平获取各地降水各周期振荡变化的差异, 需要先对原序列按周期段进行平均或平滑处理, 忽略了“准”周期性。这些都存在不能弄清各周期振荡在整个降水演变中的重要性的缺点。为此, 选用多通道的奇异谱分析(MSSA)作为分析手段。

直接对 92 个站的降水序列进行 MSSA 分析, 即选择通道数为 92, 这相当于对 92 个站的降水序列分别进行单通道奇异谱分析(USSA), 计算量太大, 分析步骤繁琐<sup>[4]</sup>, 由于需要弄清的是西北地区降水的主要特征和一般规律, 故可以对上述 432 个月, 92 个站的月降水资料序列( $X_{li}, l = 1, \dots, L, L = 92$ , 代表空间站点;  $i = 1, \dots, N, N = 432$ , 代表时间月序), 首先进行空间主分量分析(PCA), 即

$$X_{li} = \sum_{k=1}^L a_i^k E_i^k \quad (1)$$

PCA 分析实际上就是一般意义下的 EOF 分析,  $E^k$  是第  $k$  个特征向量场(记为  $S-EOF_k$ ), 系数  $a^k$  是第  $k$  个空间主成份(记为  $S-PC_k$ ), 首先的  $L_f$  个  $S-PC_k$  (它们所占的累积方差比至少近于 85%, 以保证能反映原降水序列的主要特征) 被保留做进一步的分析。

对于月降水序列, 其主要特征即周期为年的振荡, 为减少计算量, 同时也使分析目的更加明确, 在进行 MSSA 分析之前, 对被保留的  $L_f$  个  $S-PC_k$  逐一进行窗宽  $M$  为 13 个月的 USSA 分析, 记单个  $S-PC$  序列为  $X_i$ , USSA 分解即为

$$X_{i+j} = \sum_{k=1}^M a_i^k E_j^k = X_{ji} \quad (2)$$

式中  $X_{ji} = (X_{i+1}, X_{i+2}, \dots, X_{i+M})$ , 分解手段与 PCA 类似。这样分解得到的  $E^k$  是第  $k$  个时间特征向量场(记为  $T-EOF_k$ ), 它的长度为  $M$ ; 系数  $a^k$  是第  $k$  个时间主成份(记为

$T-PC_k$ ), 长度为  $(N - M + 1)$ 。窗宽为 13 个月的 USSA 的分析可以将每一个被分析对象中的周期大于年的信息成份和小于年的信息成份区分开来, 分存于不同的  $T-PC_k$  中, 要分析的周期大于年的成份在  $T-PC_k$  中的顺序与所占的方差比的大小有关, 占的方差比重大, 则排得前, 占的方差比重小, 则排得后, 这与 PCA 分析是一致的。对选用的每一个  $S-PC$ , 我们对分析得到的  $T-PC_k$  进行功率谱分析, 挑出含有大于年的周期的  $T-PC$ , 再同与之相对应的  $T-EOF$  按照文献[4]提供的重建公式

$$R_t = \begin{cases} \frac{1}{t} \sum_{j=1}^t (A_{t-j} E_j) & 1 \leq t \leq M-1 \\ \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M (A_{t-j} E_j) & M \leq t \leq N-M-1 \\ \frac{1}{N-t+1} \sum_{j=t-N+M}^M (A_{t-j} E_j) & N-M+2 \leq t \leq N \end{cases} \quad (3)$$

令  $E_j (j = 1, \dots, M)$  为  $T-EOF$ ,  $A_t (t = 1, \dots, N)$  为  $T-PC$ , 求得重建序列 RC, 对 RC 进行 MSSA 分解。

MSSA 的分解公式为

$$X_{l,i+j} = \sum_{k=1}^{L \times M} a_i^k E_{ij}^k \quad (4)$$

式中在时间  $i$  考虑的状态向量为  $(X_{1,i+1}, X_{1,i+2}, \dots, X_{1,i+M}, X_{2,i+1}, X_{2,i+2}, \dots, X_{2,i+M}, \dots, X_{L,i+1}, X_{L,i+2}, \dots, X_{L,i+M})$ ,  $L$  为通道数,  $l = 1, 2, \dots, L$ , 为通道号。分解过程也与 PCA 分解类似, 这样分解得到的  $E^k$  是第  $k$  个空间-时间特征向量场(记为  $ST-EOF_k$ ), 它的长度也为  $M$ , 描述了某一空间型的  $M$  步时间演化过程; 系数  $a^k$  是第  $k$  个时间主成份(记为  $ST-PC_k$ ), 长度为  $(N - M + 1)$ ,  $N$  为重建序列 RC 的长度。MSSA 的最大特点在于它能分解得到  $(M/5, M)$  范围内的振荡变化, 取  $M = 120$  月, 以便分析得到 2 ~ 10 a 间的周期震荡。

最后, 利用功率谱分析和相应的红噪声过程的功率谱值对得到的  $ST-PC_k$  和  $ST-EOF_k$  进行周期分析和显著性检验, 利用式(3) 将反映同一准周期的  $ST-PC_k$  和  $ST-EOF_k$  重建, 得出有关分析结果。

### 3 中国西北地区降水的主要空间类型

表 1 给出了 PCA 分析得到的前 5 个  $S-EOF$  和  $S-PC$  所占的方差比, 第一主分量就占了总方差的 78.0%, 图 2 显示的是前 3 个  $S-EOF$  的分布,  $S-EOF_1$  (图 2a) 均为正值, 两个正中心分别在西北地区的东南部和天山北麓, 它代表了西北地区月降水量的气候分布状况, 与 432 个月的月平均降水量的分布(图 2d) 基本一致, 由于  $S-PC_1$  (图略) 也全为正值, 西北地区降水的主要地域特征就是图 2a 所对应的两个正中心多雨, 其它地区相对少雨, 雨量最充沛的地区是陇南和陕南地区, 最干旱少雨的地区是吐鲁番盆地和塔里木盆地的沙漠戈壁区。每月的  $S-PC_1$  的大小则反映着西北地区总的降水量的强弱。  $S-EOF_2$  (图

表 1 前 5 个  $S-EOF$  和  $S-PC$  所占的方差比

主分量	1	2	3	4	5
方差比(%)	78.0	4.2	2.3	1.7	1.4
累积方差比(%)	78.0	82.2	84.5	86.2	87.6

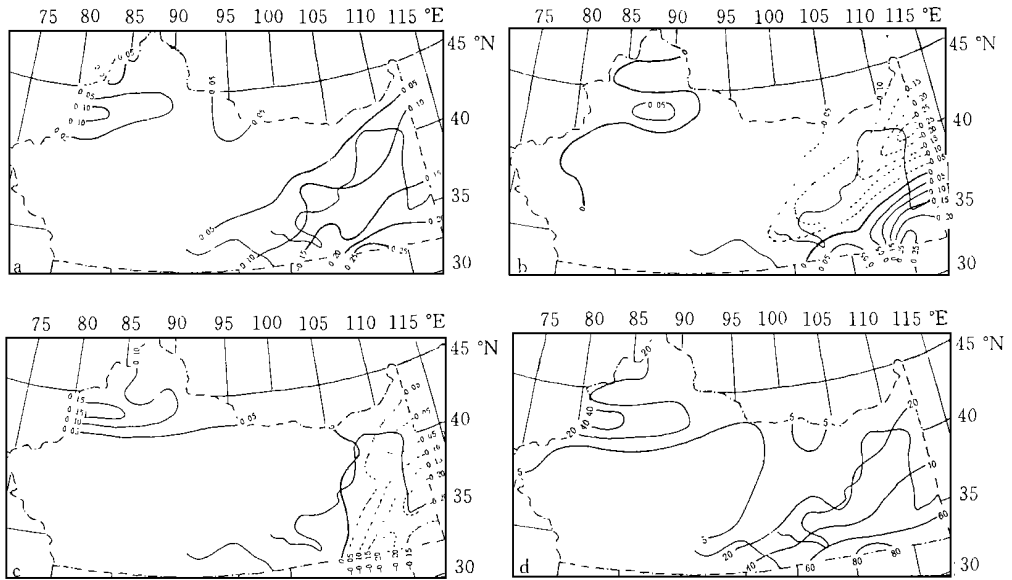


图2 前3个  $S-EOF$  和长期平均月降水量(d) 分布  
(a.  $S-EOF1$ ; b.  $S-EOF2$ ; c.  $S-EOF3$ , 长期平均月降水的单位为 mm)

2b) 除了东南(陇南和陕西中南部)和西北(天山北麓区)存在两个正值区外,其余广大地区均为负值,最大负值出现在陇东至陕北一带,反映了陇南、陕西中南部和天山北麓区的月降水变化和其余广大地区特别是陇东至陕北一带的月降水变化具有反相关系,  $S-PC2$  为正(负),  $S-EOF2$  的两个正值区多(少)雨,其余地区少(多)雨,反相的程度则由  $S-PC2$  的大小来表征。 $S-EOF3$  (图2c)反映的是  $105^{\circ}E$  以东(负值区)和以西地区(正值区)的月降水的反相关系,  $S-PC3$  为正(负),  $105^{\circ}E$  以西地区多(少)雨,  $105^{\circ}E$  以东地区少(多)雨,反相的程度则由  $S-PC3$  的大小来表征。由表1可知,前3个  $S-PC$  已占了总方差的84.5%,其余的任一个  $S-PC$  占不到总方差的2%,故选取前3个  $S-PC$  来做进一步的分析。

#### 4 中国西北地区降水的演变趋势和年际变化

对选定的前3个  $S-PC$ , 采用  $M = 13$  个月的USSA来分离出它的周期大于年的分量,对每一个  $S-PC$ , 利用功率谱分析检测了它的前10个  $T-PC$  和  $T-EOF$ , 发现前3个  $S-PC$  的周期大于年的振荡明显存在于  $S-PC1$  的  $T-PC1$  (占  $S-PC1$  总方差的57.9%) 和  $S-PC2$  的  $T-PC5$  (占  $S-PC2$  总方差的7.8%) 中。

按照式(3), 令  $E_j$  为  $S-PC1$  的  $T-EOF1$ ,  $A_i$  为  $S-PC1$  的  $T-PC1$ , 得到重建序列  $S-PC1$  的  $RC1$  (见图3a); 令  $E_i$  为  $S-PC2$  的  $T-EOF5$ ,  $A_i$  为  $S-PC2$  的  $T-PC5$ , 得到重建序列  $S-PC2$  的  $RC5$  (见图3b), 重建序列最初的和最后的  $M - 1$  个值会发生位相漂移<sup>[4]</sup>, 对重建序列我们还要进行分析, 因此舍弃了最初的和最后的  $M - 1$  ( $= 12$ ) 个月的值, 重建时间序列从1961年1月始至1994年12月止共408个月, 从图3可以看出其主要变化周期大于年的振荡。

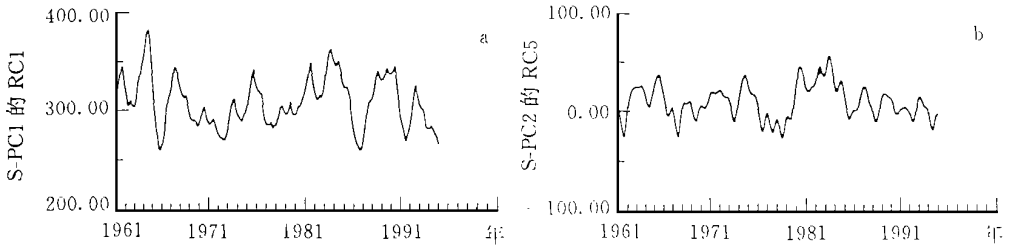


图3 前3个  $S-PC$  的周期大于年的分量  
(a.  $S-PC1$  的  $RC1$ ; b.  $S-PC2$  的  $RC5$ )

图3显示的两个RC序列包含了中国西北地区降水的主要的年际变化和趋势,这里分别称图3中的a、b两个序列为  $R_a$  和  $R_b$ , 选择窗宽为120个月(10 a)的MSSA再进行分析,这时序列长度为408个月,通道数为2。

对得到的  $ST-PC$  进行功率谱分析和利用相应的红噪声过程的功率谱值进行显著性检验(取置信度  $\alpha = 0.05$ , 图略), 结果表明, 第1时间-空间主分量( $ST-PC1$ )没有明显的振荡周期, 为趋势分量, 约占总方差的98.7%, 表明10 a以上的周期振荡在西北地区降水中占有很重要的份量, 保持降水的平稳变化。第2, 3时间-空间主分量( $ST-PC2, ST-PC3$ )存在的主要振荡周期约为102个月(准8.5 a), 共占除 $ST-PC1$ 方差之外的剩余方差(以下统称剩余方差)的22.3%。第4, 5时间-空间主分量( $ST-PC4, ST-PC5$ )存在的主要振荡周期约为61个月(准5.1 a), 共占剩余方差的14.6%。第6, 8时间-空间主分量( $ST-PC6, ST-PC8$ )存在的主要振荡周期约为43个月(准3.6 a), 第9, 10时间-空间主分量( $ST-PC9, ST-PC10$ )存在的主要振荡周期约为37个月(准3.1 a), 它们代表了准3~4 a的周期振荡, 共占剩余方差的18.5%。第7时间-空间主分量( $ST-PC7$ )存在的主要振荡周期约为12个月(1 a), 共占剩余方差的5.4%。第11, 12时间-空间主分量( $ST-PC11, ST-PC12$ )存在的主要振荡周期约为24个月(2 a), 共占剩余方差的4.6%。前面已经指出, 振荡的重要性随  $k$  值的增加而减弱, 第13, 14, 15, 16时间-空间主分量主要反映的是周期小于年的振荡周期, 所占方差均不足剩余方差的2.0%, 而且也不是感兴趣的周期振荡此之后的振荡, 即便有周期大于年的成份, 所占方差也是非常小, 不再予以分析。

以上分析表明, 西北地区降水的趋势分量(10 a以上的周期振荡)比年际变化要重要得多, 年际振荡按其重要性依次为准8.5 a(占剩余方差的22.3%)、准3~4 a(占剩余方差的18.5%)、准5.1 a(占剩余方差的14.6%)和准2 a变化(只占剩余方差的4.6%)。鉴于准2 a变化所占方差相对较小, 下面将主要分析前3种甚低频振荡。

#### 4.1 西北地区降水的演变趋势

$ST-PC1$  为趋势分量, 根据重建式(3), 令  $E_j$  为  $ST-EOF1$ ,  $A_i$  为  $R_a$  的  $ST-PC1$ , 得到重建序列  $R_a-RC1$  (见图4a); 令  $E_j$  为  $ST-EOF1$ ,  $A_i$  为  $R_b$  的  $ST-PC1$ , 得到重建序列  $R_b-RC1$  (见图4b), 它们分别表示  $S-PC1$  和  $S-PC2$  的趋势分量, 可以看出, 这种变化的趋势是1960年代初为高相位, 到1970年代初演变为低相位, 到1980年代又处于高相位,

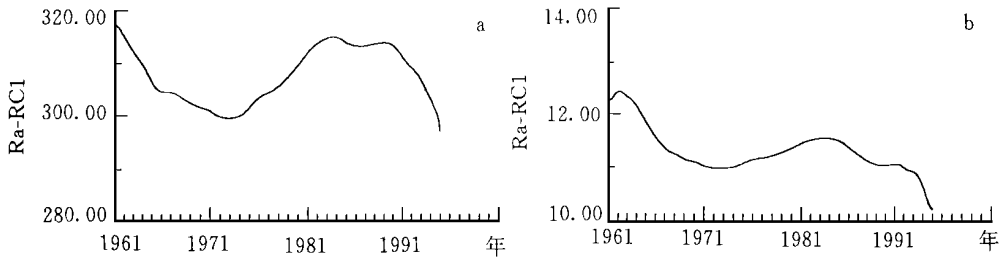


图4  $S-PC1$  的趋势分量  $Ra-RC1$  (a) 和  $S-PC2$  的趋势分量  $Rb-RC1$  (b)

1990年代到低相位,明显地存在着周期性。由于资料太短,对这种较长的周期变化还难以确认。

按照PCA的特性,每个站点的降水随时间的演变趋势可由下式估算<sup>[5]</sup>:

$$PT(l, i) = S-EOF1(l) \times TC1(i) + S-EOF2(l) \times TC2(i) \quad (5)$$

这里,  $S-EOF1$  和  $S-EOF2$  是由PCA分析得到的第1, 2特征向量场,  $TC1$  和  $TC2$  分别是上面的  $Ra-RC1$  和  $Rb-RC1$ 。  $l, i$  的意义与式(1)相同。通过计算,每个  $S-PC$  的上升(下降)的趋势如相应的  $S-EOF$  为正,则转化为降水量的增加(减少),如相应的  $S-EOF$  为负,则转化为降水量的减少(增加)。由于  $S-EOF1$  均为正(见图2a),  $Ra-RC1$  (图4a)所显示的上升(下降)的趋势表示的是中国西北地区特别是图1a中的高值区西北地区的东南部和天山北麓降水量的增加(减少)。由于  $S-EOF2$  (图2b)有正有负,  $Rb-RC1$  (图4b)所显示的上升(下降)的趋势表示天山北麓区、陇南和陕西中南部(图2b正值区)降水量的增加(减少),其余广大地区(图2b负值区)特别是陇东至陕北一带降水量的减少(增加)。因此图4所显示的上升(下降)趋势在陇南和陕西中南部是最显著的,天山北麓区也是相对显著区,其它地区的显著性则与其地  $S-EOF1$  值的大小和  $S-EOF2$  值的正负及大小有关。

由式(5)算出每个站诸月的趋势分量值后,又计算了高相位(1983年)的趋势分量的年降水量与低相位(1972年)的降水量的差值(见图5),可以看出,西北地区东南部特别是陇南和陕南地区的增量最大,天山北麓也是一个增量的相对高值区。增量最大值为53.2mm,相当于从1972年到1983年每年增加4.8mm,趋势分量保持着降水的相对平稳的发展变化。对4个代表站(西安、克拉玛依、和田和张掖)由实测月降水资料计算了这些站的年降水量,并对年降水量作了5阶多项式拟合(见图6),结果表明,西安、克拉玛依降水量的变化明显存在图4a所显示的趋势,而和田、张掖所显现的这种趋势较差,这和上面的分析结果是一致的。

## 4.2 西北地区降水量的年际振荡

通过MSSA分解,已经明白西北地区降水主要存在准8.5a、准3~4a和准5.1a的年际振荡。将  $ST-PC2, ST-PC3$  平均得到  $ST-PC2-3$ , 它代表准8.5a的振荡变化,与趋势分量  $ST-PC1$  的处理方法类似,按照重建式(4),将  $ST-PC2-3$  (取为  $A_i$ ) 与由  $ST-EOF2, ST-EOF3$  平均得到的  $ST-EOF2-3$  (取为  $E_j$ ) 联立,分别得到两个通道的重建序列  $Ra-RC2-3$  和  $Rb-RC2-3$  (见图7a, b); 类似地,得到代表准3~4a周期振荡的重建序列  $Ra-RC6, 8, 9-10$  和  $Rb-RC6, 8, 9-10$  (见图7c, d) 和代表准5.1a周期振荡的重建序列

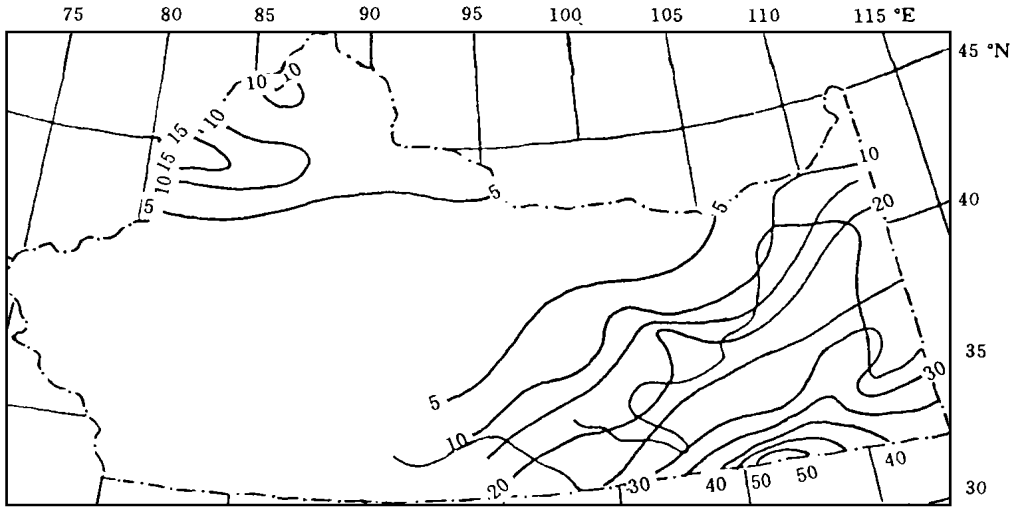


图5 由趋势分量算得的高相位(1983年)与低相位(1972年)时的年降水量的差值(单位:mm)

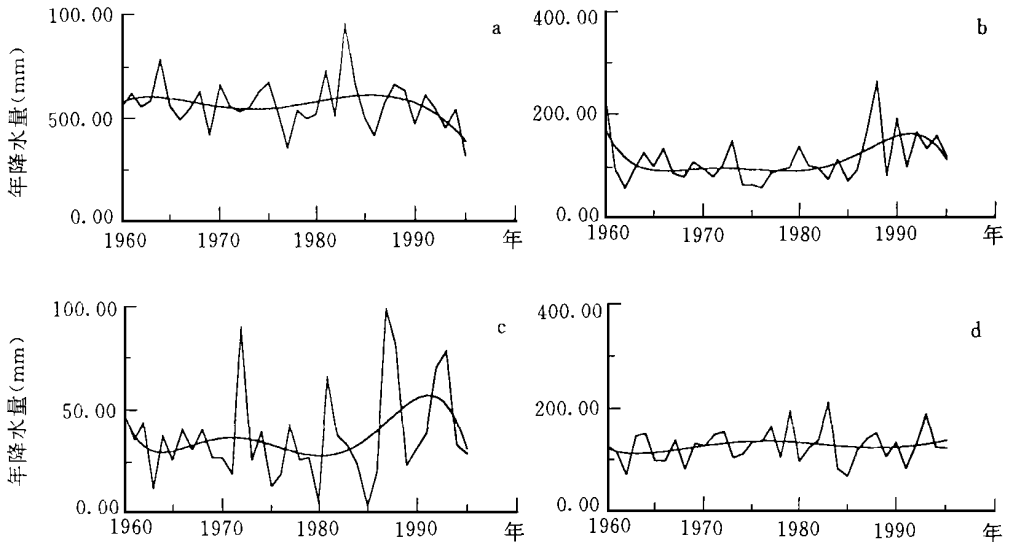


图6 代表站年降水量的变化(折线)和5阶多项式拟合(平滑曲线)

(a. 西安; b. 克拉玛依; c. 和田; d. 张掖)

$Ra-RC4-5$  和  $Rb-RC4-5$  (见图 7e, f)。这些  $Ra$  和  $Rb$  的序列分别表示  $S-PC1$  和  $S-PC2$  的 年际振荡分量。

由图 7 可以看出,  $S-PC1$  的准 8.5 a、准 3~4 a 和准 5.1 a 振荡的振幅比  $S-PC2$  的要大, 准 8.5 a 振荡的振幅要比准 3~4 a 和准 5.1 a 振荡的振幅的变化大。振荡变化也可由式(4)估算, 此时  $TC1$  和  $TC2$  分别是代表相应准周期的  $Ra-RC$  和  $Rb-RC$ 。分别计算了准 8.5 a、准 3~4 a 和准 5.1 a 振荡最高相位和最低相位时年降水量的差值(图略), 主要

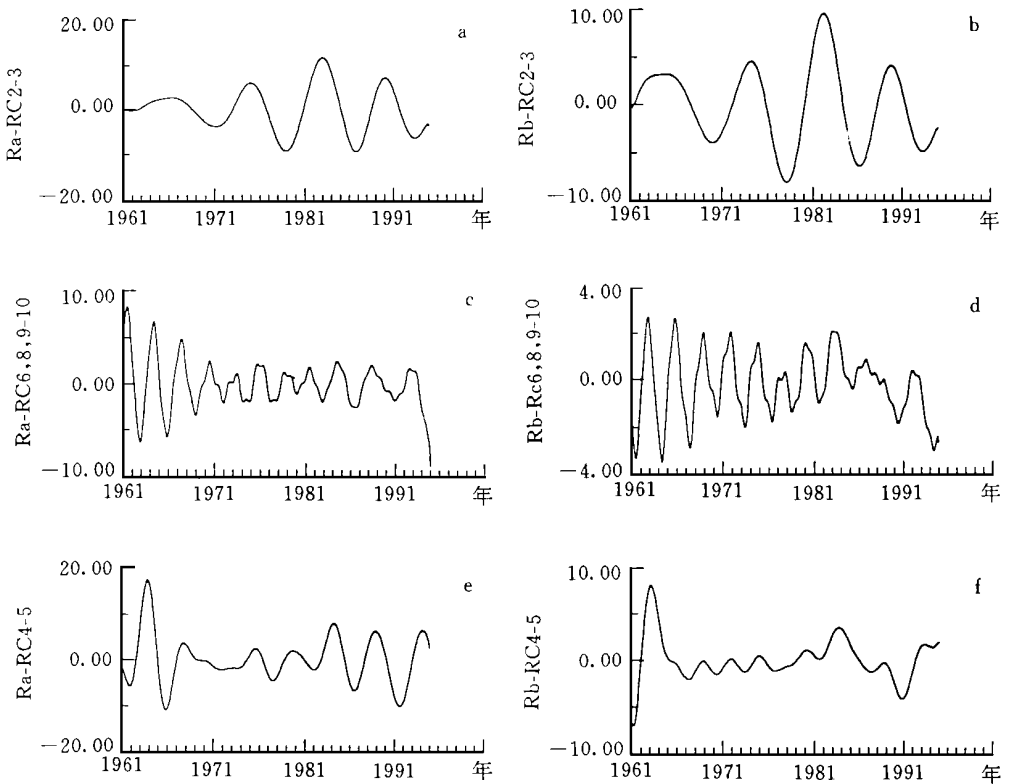


图7  $S-PC1$  的年际变化分量(a, c, e)和  $S-PC2$  的年际变化分量(b, d, f)

(a.  $Ra-RC2-3$ ; b.  $Rb-RC2-3$ ; c.  $Ra-RC6, 8, 9-10$ ; d.  $Rb-RC6, 8, 9-10$ ; e.  $Ra-RC4-5$ ; f.  $Rb-RC4-5$ )

特征都与图5相类似, 只是增值的大小不同而已。这里只给出4个代表站(图1中用“x”标出)月降水量的振荡变化(见图8), 西北地区东南部(代表站西安)的振荡明显强于西北其它地区(代表站和田、张掖、克拉玛依); 准8.5 a的振荡相位西安超前于张掖约18个月, 超前于克拉玛依约14个月, 超前于和田约4个月; 准5.1 a的振荡相位西安超前于其它3站约3个月; 准3~4 a的振荡相位的形式是西安的演变周期接近于4 a, 其它3站接近于3 a。对这些振荡的振幅和位相的时空分布, 有待进一步深入研究。

## 5 结 论

(1) 西北地区雨量最充沛的地区是陇南和陕南地区, 天山北麓也是一个相对多雨区, 最干旱少雨的地区是吐鲁番盆地和塔里木盆地的沙漠戈壁区。陇南、陕西中南部和天山北麓区的月降水变化和其余广大地区特别是陇东至陕北一带的月降水变化具有反相关系。105 E 以西地区的降水与105 E 以东地区存在反相关系。

(2) 西北地区降水变化的主要趋势是1960年代初多雨, 到1970年代初演变为少雨, 1980年代又多雨, 1990年代少雨。这种趋势在陇南和陕西中南部是最显著的, 天山北麓区也是相对显著区。



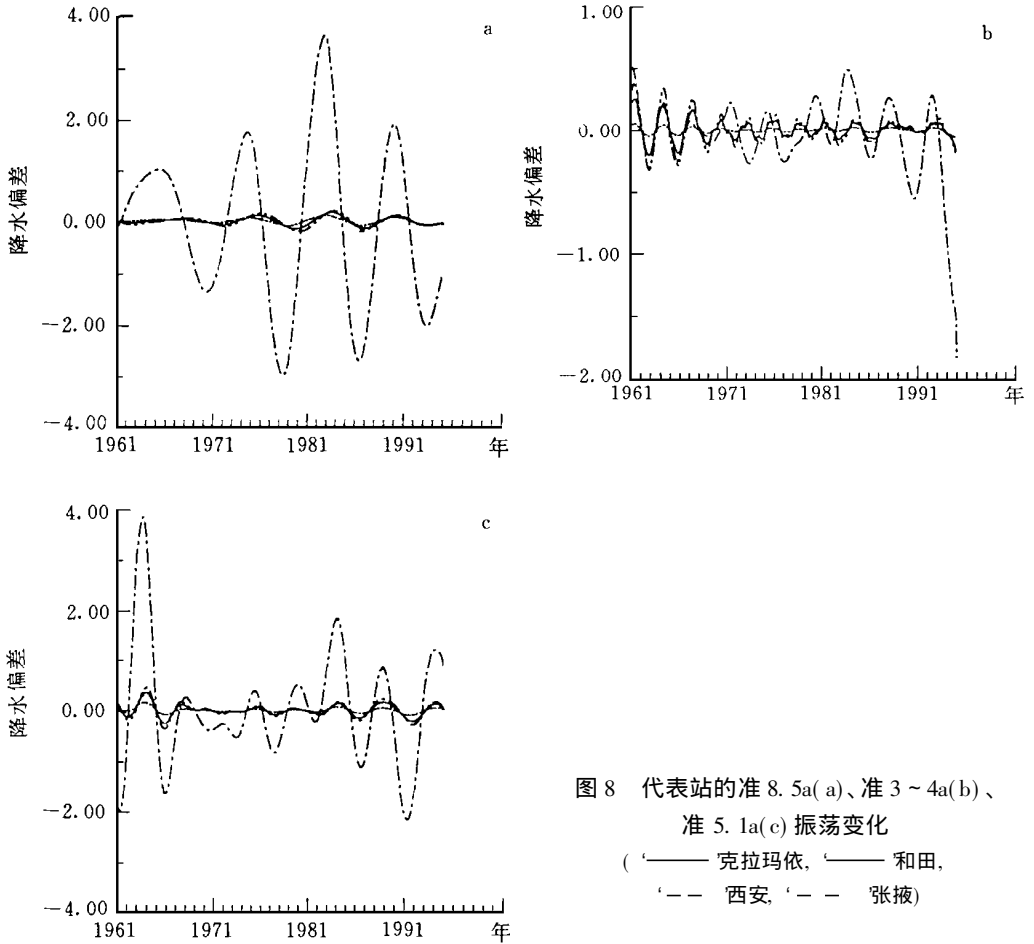


图8 代表站的准 8.5a(a)、准 3~4a(b)、  
准 5.1a(c) 振荡变化  
(—— 克拉玛依, - - - 和田,  
· · · 西安, - · - 张掖)

(3) 西北地区降水主要存在准 8.5 a、准 3~4 a 和准 5.1 a 的年际振荡。年际振荡在降水中的重要性依次为准 8.5 a、准 3~4 a 和准 5.1 a。准 8.5 a 振荡的振幅要比准 3~4 a 和准 5.1 a 振荡的振幅的变化大。振荡位相在空间的分布并不完全一致。

### 参考文献

- 1 刘晓东主编. 中国西部区域气候变化及其相关问题的研究. 兰州: 兰州大学出版社, 1995
- 2 孙国武主编. 中国西北干旱气候研究. 北京: 气象出版社, 1997
- 3 李栋梁, 谢金南, 王文. 中国西北夏季降水特征及其异常研究. 大气科学, 1997, 21, (3): 331~340
- 4 Plaut G, Vautard R. Spells of low-frequency oscillations and weather regimes in the Northern Hemisphere. J Atmos Sci, 1994, 51: 210-336
- 5 Wang Xiaolan, Han-Ru Cho. Spatial-temporal structures of trend and oscillatory variabilities of precipitation over Northern Eurasia. J Climate, 1997, 10: 2285-2298

# EVOLUTION OF TREND AND INTERANNUAL OSCILLATORY VARIABILITIES OF PRECIPITATION OVER NORTHWEST CHINA

Wei Zhigang Dong Wenjie Hui Xiaoying

(*Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute,  
Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, 730000*)

## Abstract

Combinations of statistical analyses including principal component analysis, and singular spectrum analyses, were carried out the evolution of trend and interannual oscillatory of precipitation over NW China. From the beginning of 1960s to the initial of 1970s, the monthly precipitation appeared a downward trend; From the initial of 1970s to the initial of 1980s, the monthly precipitation appeared an upward trend ; The monthly precipitation was much in 1980s and less in 1990s. This trend was the strongest in the south of Gansu province and the south and middle of Shanxi province, was stronger in the north of Tianshan ridge. On the interannual timescales, signals of quasi-8.5a oscillation, 3-4a oscillation and quasi-5.1a oscillation whose importance were weakened in turn were found in the space-time-dependent precipitation series. The amplitude of quasi-8.5a oscillation was stronger than one of any of the other two oscillations. On any of the three oscillations, the distribution of phase wasn't completely same in space.

**Key words:** Trend, Interannual oscillatory variability, Precipitation over NW China.