

长江中下游夏季降水异常变化与若干强迫因子的关系

魏凤英

中国气象科学研究院, 北京 100081

摘 要 首先, 利用三次样条函数方法对 1905~2000 年长江中下游夏季降水量和太阳黑子、地球自转速率、赤道东太平洋海温和北极涛动等强迫因子序列进行年代际和年际尺度的分离, 并分析了它们年代际尺度的位相变化特征。然后, 使用 30 年滑动相关的方法, 分析了长江中下游夏季降水量与上述各因子之间的相关随时间的变化。最后, 利用旋转因子分析方法, 对年代际及年际尺度因子的潜在结构对长江中下游夏季降水的影响进行了研究。结果表明, 长江中下游夏季降水量和强迫因子序列均存在显著的年代际变化特征, 它们之间的相关系数随时间变化呈现显著的阶段性, 甚至出现相关位相的改变。影响长江中下游夏季降水异常的因子潜在结构主要包括以年代际尺度因子和海气年际尺度因子两类。在第一类因子结构中, 太阳活动、地球自转速率和北极涛动的年代际变化贡献较大, 其中太阳黑子的贡献最显著。20 世纪 40 年代以后, 年代际尺度因子的作用明显增强。在第二类因子结构中, 前期秋季、同期夏季的赤道东太平洋海温及前期冬、春季北极涛动的年际变化对长江中下游夏季降水异常的贡献突出。

关键词 长江中下游夏季降水 滑动相关 年代际尺度因子 年际尺度因子 因子潜在结构

文章编号 1006-9895(2006)02-0202-10

中图分类号 P461

文献标识码 A

Relationships Between Precipitation Anomaly over the Middle and Lower Reaches of the Changjiang River in Summer and Several Forcing Factors

WEI Feng-Ying

Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract The interdecadal components and the interannual components of the precipitation over the middle and lower reaches of the Changjiang River in summer and forcing factors, such as the relative sunspot, earth's rotation speed, sea surface temperature in the equatorial eastern Pacific and arctic oscillation during 1905-2000, are separated by using the third splines firstly and then the characteristics of interdecadal variation are analyzed. By using the method of 30-year moving correlation, the temporal variation of relationships between the precipitation and the factors is studied. In addition, the effect of the potential structure of factors with interdecadal scale and interannual scale on the precipitation anomaly is analyzed by the rotated principal component analysis. The results show that the variation trends of the interdecadal scale of the precipitation over the middle and lower reaches of the Changjiang River in summer and the above factors are all obvious and the relationships between the precipitation and the factors are generally unstable, which the phase of correlation coefficients with temporal change were significant, even the signs of phase have changed. The precipitation anomaly in the middle and lower reaches of Changjiang River in summer is influenced by two kinds of potential factor structures that are composed of factors with interdecadal scales and interannual scales respectively. In the former the contribution of the interdecadal change of the relative sunspot, earth's rotation speed and arctic oscillation is greater to the abnormal precipitation, in which the action of the sun-

收稿日期 2005-01-24, 2005-06-06 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 4275020

作者简介 魏凤英, 女, 1951 年出生, 研究员, 主要从事气候诊断与预测研究。E-mail: weify@cams.cma.gov.cn

spot is the most significant. The influence of factors with the interdecadal scale on the precipitation anomaly have got a raise after the 1940s. In the latter the contributions of the interannual change of sea surface temperature in the equatorial eastern pacific in the previous autumn and present summer and arctic oscillation in the previous winter and spring are greater.

Key words precipitation in the middle and lower reaches of the Changjiang River in summer, moving correlation, factors with interdecadal scale, factors with interannual scale, potential structure of factors

1 引言

长江中下游地区夏季降水的预测是我国汛期旱涝预测的重要内容。对于影响这一地区降水异常的因子研究,许多学者做了大量的工作,得到了不少有意义的结果。研究表明,影响这一地区夏季降水异常的因子有很多,关系也很复杂。目前,在短期气候预测业务中主要考虑太阳活动、地球自转、北太平洋海温(特别是赤道东太平洋海温)、青藏高原积雪、西北太平洋副热带高压等因子^[1, 2],但对于造成这一地区夏季降水异常的关键因子以及影响的物理机制仍未完全搞清楚,使得短期气候预测仍处在不高的水平上。近几年有关研究不断深入,思路也在不断拓宽,气象工作者更注重对因子的综合分析及其相互作用的研究。黄嘉佑等^[3]利用条件相关矩信噪比的方法对影响长江地区夏季洪涝的大气环流因子进行了综合分析,发现上一年大气环流状况的不同,将影响这一地区降水的异常。黄嘉佑等^[4]的另一工作表明,前期冬季极涡的强弱,对夏季降水有明显影响。何金海等^[5]从西太平洋副热带高压的垂直结构及年际变化特征的角度发现,西太平洋副高面积、强度和脊线位置与长江中下游夏季降水有较好关系。近年来,国外学者特别关注北半球中、高纬度大尺度环状模态的北极涛动的研究^[6, 7],他们的研究表明,前期北极涛动对北半球许多地区的气候变化都有重要作用。龚道溢等^[8]的研究证明,春季北极涛动偏强的年份,夏季长江中下游降水偏少,反之亦然。

目前,有关长江中下游夏季降水影响因子分析的研究,大多使用近 40~50 年资料,因此很难涉及更长时间尺度的因子变化对降水异常的影响。然而,近年来人们愈来愈意识到,更长时间尺度的年代际变化是年际变化的重要背景,对年际尺度的异常变化会产生重要调制作用^[9]。因此,有必要加强研究因子的年代际变化对长江中下游夏季降水异常

的作用。本文的主要目的是探讨年代际尺度和年际尺度的因子与长江中下游夏季降水的关系。首先,应用三次样条函数分段拟合,将 1905~2000 年的降水量及各因子序列的年代际及年际尺度分量进行分离,讨论降水量与因子的年代际尺度的位相变化特征。然后,计算长江中下游地区的降水量与各因子序列之间的 30 年尺度的滑动相关,分析相关系数随时间变化的特性。进一步构造出一组影响长江中下游夏季降水异常的年代际及年际尺度的因子变量,利用旋转因子分析得到的潜在因子结构及因子得分,分析不同时间尺度的因子对长江中下游夏季降水异常的作用。

2 资料和方法

2.1 资料

本研究选用国家气象中心提供的 1905~2002 年长江中下游地区 10 站平均的 6~8 月降水总量(以下简记为 R)作为研究对象。10 个站点的分布见图 1。

选取影响因子时主要考虑两方面因素:一是要有长记录的因子,二是根据已有研究证明与长江中下游夏季降水关系密切的因子。所以,选用了在年代际气候变化机制中起重要作用的太阳黑子、地球自转速率^[10]以及海气相互作用中的重要成员——赤道东太平洋海温^[11]和北极涛动指数^[8]。因子的来源为:

(1) 北京天文台提供的 1700~2003 年年平均太阳黑子相对数(Relative Sunspot Number, RSN)。

(2) 国际地球自转参数服务中心提供的 1820~2003 年的地球自转速率(Earth's Rotation Speed, ERS)。

(3) 1871~2000 年逐月赤道东太平洋海温指数(Sea Surface Temperature Index, SSTI),这一指数是从 UKMO GISST 2.3 的全球月平均 $1^\circ \times 1^\circ$ 格点的海温资料中选取 $180^\circ \sim 90^\circ \text{W}$, $0^\circ \sim 10^\circ \text{S}$ 范

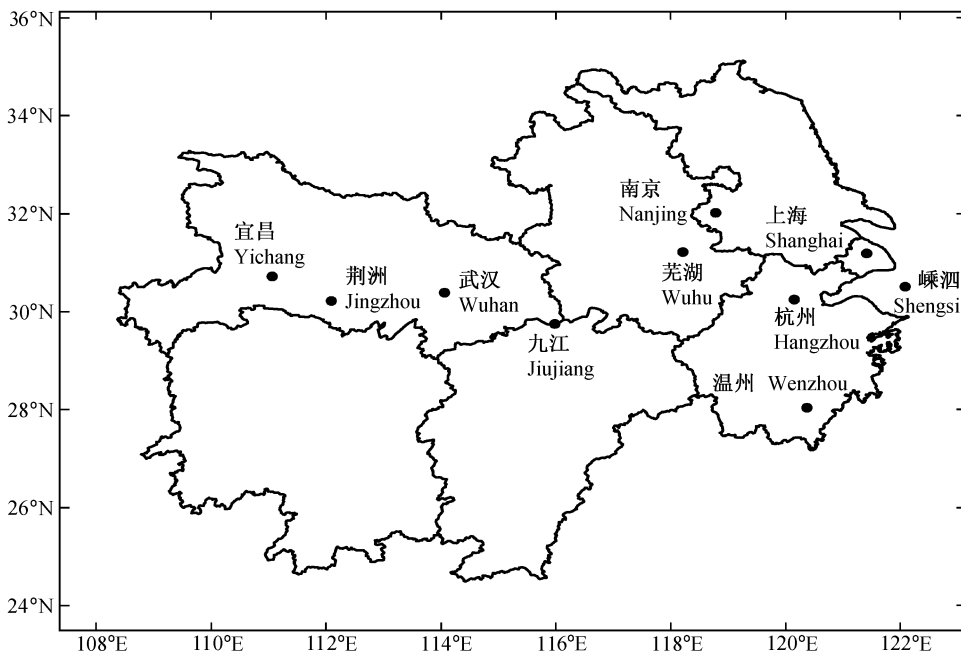


图1 站点分布

Fig. 1 Distribution of stations

围平均得到的。

(4) 1899~2001 年逐月北极涛动 (Arctic Oscillation, AO) 指数, 其中 1899~1957 年时段的指数由 Trenberth 和 Paolino^[12] 根据海平面气压资料定义的, 1958 年以后时段的指数是根据 NCEP/NCAR 再分析海平面气压资料计算的。

计算时长江中下游降水量和物理因子资料均取为 1905~2000 年时段。太阳黑子相对数和地球自转速率用年平均序列, 海温指数和北极涛动指数用秋季(前一年 9~11 月)、冬季(前一年 12 月至当年 2 月)、春季(当年 3~5 月)、夏季(当年 6~8 月)的平均序列。

2.2 分析方法

本文使用的主要分析方法有:

(1) 三次样条函数拟合 采用三次样条函数拟合的方法对长江中下游降水量及各因子序列进行年代际及年际尺度的分离^[13]。三次样条函数拟合的原理是在序列中插入 $M-1$ 个分点, 并在序列两端各引入一个新分点, 则函数 $f(x)$ 被分成 M 个分段多项式 $f_1(x), f_2(x), \dots, f_M(x)$, 其中

$$f_i(x) = \sum_{s=0}^3 V_{is} T_{is}(x), \quad i = 1, 2, \dots, M. \quad (1)$$

这里 $T_{is}(x)$ 是切比雪夫第一类多项式, 约束条件

是 $f_i(x)$ 及其二阶导数在 $M-1$ 个分点上连续的。用最小二乘估计确定 V_{is} , 分段多项式 $f_i(x)$ 为三次样条函数。

分段拟合的三次样条函数与其他低通滤波器相比, 得到的拟合曲线更光滑, 且保持两端数据完整。在本文中将长江中下游降水量及各因子序列插入长度为 10 a 的分点, 经过分段拟合将序列的长期趋势变化和 10 a 以上尺度变化分离出来, 将它们笼统视为年代际分量, 再用原序列减去年代际分量得到年际尺度分量。

(2) 滑动相关系数 利用滑动相关系数考察长江中下游夏季降水量与各个物理因子之间的相关性, 滑动年数取为 30 年, 这样可以得到 1905~1934 年段, 1906~1935 年段, …… , 1971~2000 年段的相关系数序列, 据此来分析长江中下游降水量与各因子间相关系数随时间的变化。

(3) 旋转因子分析和因子得分 旋转因子分析方法可以分析诸多因子的潜在结构与研究对象变量之间的关系^[14]。一个正交变换对应坐标系的旋转, 公共因子的任一解可由主成分分析求得的因子载荷矩阵经过旋转得到。这里采用极大方差的正交旋转, 将各因子轴旋转到某个位置, 使高载荷只出现在少数变量上, 这样更便于对因子物理意义的解

释。

找到公共因子后，我们可以进一步计算每一年的公共因子的得分。因子得分函数 s_{ij} 用因子变量 x_{ip} 及公共因子 f_{jp} 的线性组合来表示，即

$$s_{ij} = f_{j1}x_{i1} + f_{j2}x_{i2} + \cdots + f_{jp}x_{ip}, \quad (2)$$

其中, $i=1, 2, \cdots, n$, n 为样本量个数, $j=1, 2, \cdots$ 为所取公共因子个数, p 为因子变量数。

3 长江中下游夏季降水量和各因子的年代际变化特征

应用三次样条函数方法，将长江中下游夏季降

水量及各个因子序列进行年代际及年际尺度分离。图 2 中粗实线是用三次样条函数分段拟合分离出的长期趋势和 10 a 以上尺度的年代际变化。我们利用年代际分量曲线分析各因子与长江中下游夏季降水年代际尺度之间的位相变化。由于 SSTI 和 AO 的 4 个季节年代际变化趋势的差异很小，因此这里只选冬季的年代际变化进行分析。

对照图 2a 和 b 中粗实线的变化趋势，可以看出当 1905~1920 年长江中下游夏季降水呈现多雨的正位相时，太阳黑子数则处在偏低的负位相，两者趋势相反；在 1921~1942 年长江中下游夏季降

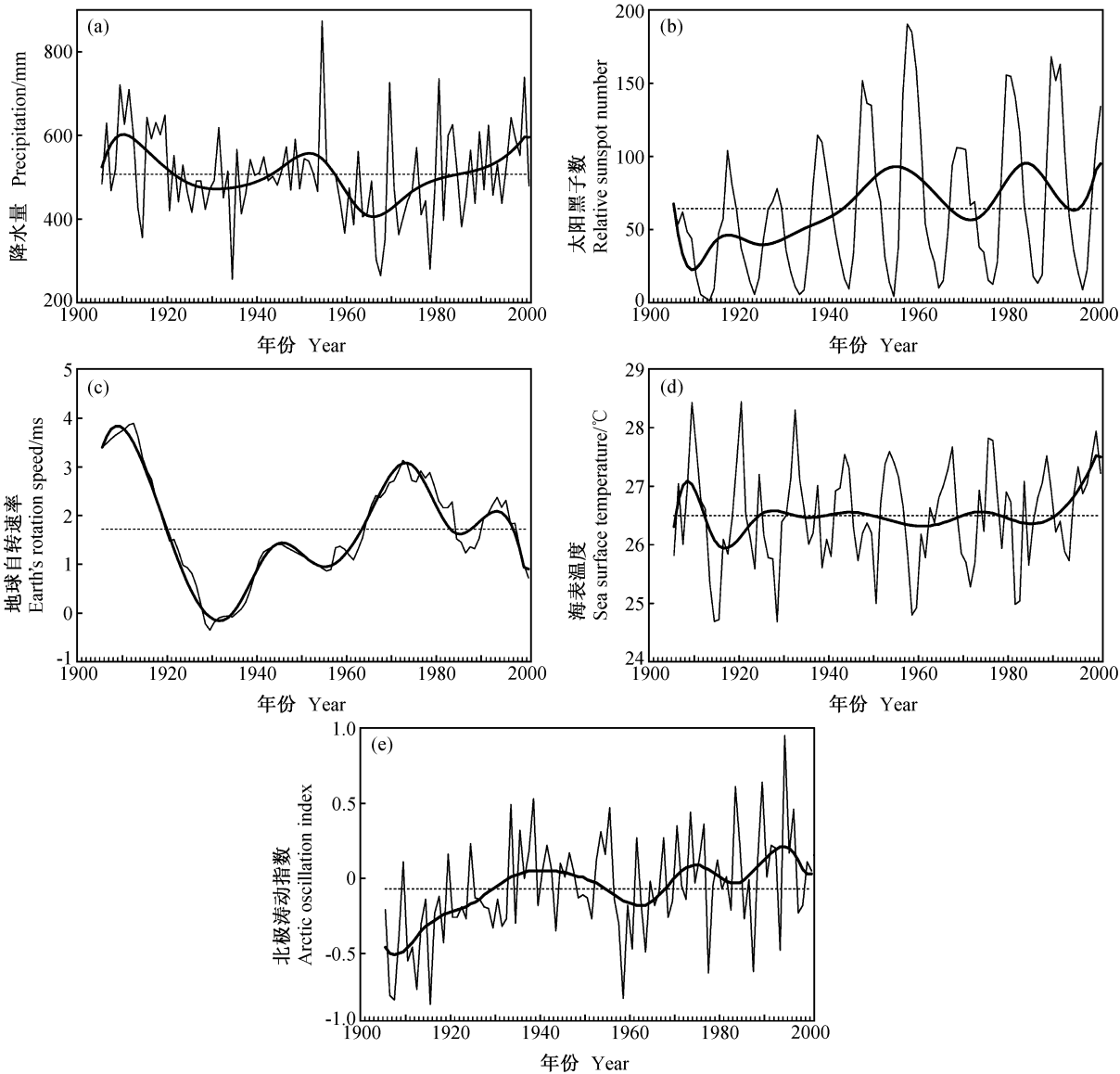


图2 长江中下游降水量及因子的年代际变化: (a) R; (b) RSN; (c) ERS; (d) 冬季 SSTI; (e) 冬季 AO

Fig. 2 Interdecadal change of precipitation over the middle and lower reaches of the Changjiang River in summer and factors: (a) RSN; (c) ERS; (d) SSTI in winter; (e) AO in winter

水处在少雨的负位相时,太阳黑子数仍处在偏低期,与降水的位相变化一致。进入 1943~1956 年时段,长江中下游夏季转为多雨,太阳黑子也转变为偏高期,位相变化趋于一致;1957~1984 年长江中下游夏季处于明显的少雨期,太阳黑子也经历了一个低值期,两者的位相同时出现转变;1985 以后至 2000 年长江中下游夏季又进入多雨期,但在此期间太阳黑子的位相出现过明显波动,位相关系变得不十分明朗。将图 2c 地球自转速率的年代际变化趋势与图 2a 进行对比,发现 1942 年以前两者位相基本一致,1943 年以后两者变化的位相完全相反。从图 2d 看出,冬季赤道东太平洋海温的年代际分量变化比较平缓,主要反映了海温的气候平均状态,阶段性变化不甚显著,但 20 世纪 90 年代以后的显著增温趋势,与长江中下游夏季降水趋势的位相一致。将图 2e 中展示的冬季北极涛动的年代际变化趋势曲线与图 2a 比较,可以看出 1942 年以前两者的位相变化基本相反,1943 年以后虽也有的时段两者位相相反,但大多时段两者的位相变化是一致的。

4 长江中下游夏季降水与各因子的相关随时间的变化

由上述分析可见,长江中下游夏季降水量及太阳活动、北极涛动等因子的年代际变化特征非常显

著。为了分析降水量与这些因子的年代际趋势变化之间的相关,我们分别计算了 1905~2000 年长江中下游夏季降水量与上述 4 种物理因子之间的 30 年滑动相关系数,以此来分析降水异常与各因子之间的相关随时间的变化特征。

图 3 中实线是长江中下游夏季降水量(R)与地球自转速率(ERS)的滑动相关系数,由图可以看出,两者的相关系数随时间的变化十分显著,甚至出现了相关符号的改变。从 1905~1934 年段至 1934~1963 年段期间两者为正相关,在 1919~1948 年段以前的时期两者正相关处于较高水平,超过了 0.10 ($\alpha_{0.10} = \pm 0.30$) 的显著性水平。1919~1948 年段之后正相关逐渐减弱,到 1935~1964 年段,两者的相关性质发生了转变,由正相关转变为负相关,且负相关随时间变化逐渐加强,1937~1966 年段至 1950~1979 年段的负相关超过了 0.10 的显著性水平。1950~1979 年段以后负相关有所减弱,但直至 1971~2000 年段一直维持着负相关,且到 1970~1999 年段以后两者的负相关加强,相关系数超过了 0.05 ($\alpha_{0.05} = \pm 0.35$) 的显著性水平。相关系数的这种转化,对应的两者关系即是 1934~1964 年段以前时期地球自转速率较快(慢)的年份,长江中下游夏季易出现降水偏多(少),而在其后的时期地球自转速率较快(慢)的年份,长江中下游夏季降水反而偏少(多)。

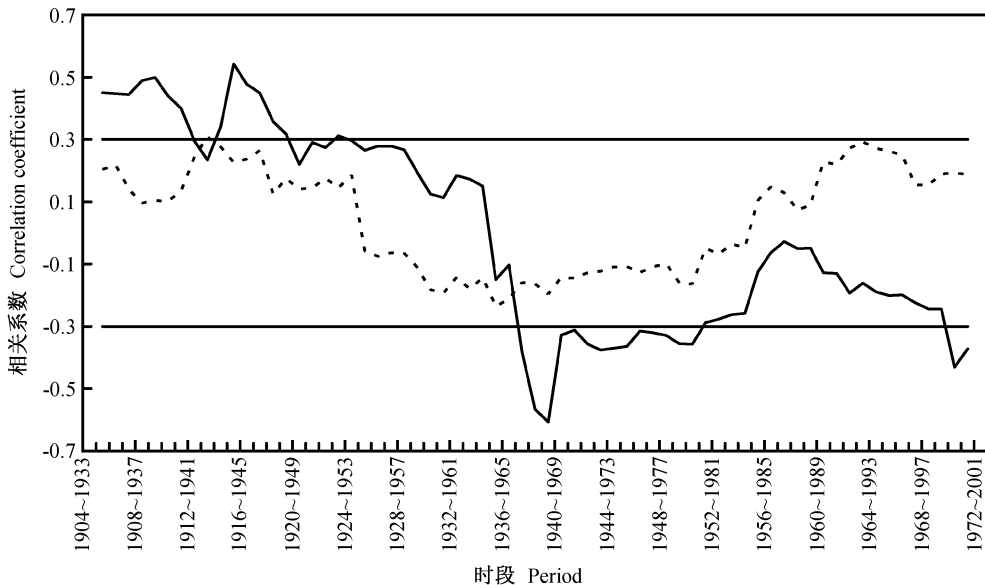


图 3 30 年滑动相关系数。实线: R 与 ERS 的相关; 虚线: R 与 RSN 的相关; 直线: $\alpha=0.10$ 的显著性水平

Fig. 3 The 30-year running correlation coefficients. Solid line: correlation between R and ERS, dotted line: correlation between R and RSN, straight lines: significance level $\alpha=0.10$

从图 3 中的虚线表示的长江中下游夏季降水量与太阳黑子相对数(RSN)的滑动相关系数, 我们可以看到, 大多时段的相关系数均未超过 0.10 的显著性水平, 但随时间的变化仍然是很显著的。1905~1934 年段至 1924~1953 年段两者呈正相关, 从 1925~1954 年段起, 相关位相由正转为负, 并持续到 1954~1983 年段, 1955~1984 年段相关符号又由负转为正。

为了与滑动相关系数进行比较, 我们还计算了 1905~2000 年整个时段长江中下游夏季降水与地球自转速率、太阳黑子相对数间的相关, 相关系数分别为 0.0018 和 0.098, 也就是说, 从 1905~2000 年 96 年平均而言, 这两个因子与长江中下游夏季降水关系不明显。但上述滑动相关结果显示, 长江中下游夏季降水与地球自转速率、太阳黑子相对数间的相关随时间呈现显著的阶段性变化。

为了便于下面的分析, 我们在表 1 中给出用 1905~2000 年 96 年样本计算的长江中下游夏季降水与四季的赤道东太平洋海温(SSTI)和北极涛动(AO)的相关系数。由表 1 可以看出, 长江中下游夏季降水与前一年秋季的赤道东太平洋海温和春季北极涛动的相关达到或超过了 0.05 的显著性水平, 其余季节的相关均不显著。图 4 是长江中下游夏季降水量分别与前期秋季、冬季、春季和同期夏季 SSTI(图 4a)和 AO(图 4b)的 30 年滑动相关系数。

从图 4a 长江中下游夏季降水量与前期秋季 SSTI 的滑动相关曲线可以看出, 除 1914~1943 年段至 1924~1953 年段及 1960~1989 年段至 1966~1995 年段两者呈弱相关外, 其余时段两者为正相关, 但各个时期的相关程度差别很大, 其中值得注意的是 1970 年以来两者呈现显著的正相关关系, 也就是说, 如果前一年秋季赤道东太平洋海温增

暖, 下一年夏季长江中下游降水可能偏多, 反之亦然。遗憾的是, 这种显著的正相关关系并不是稳定贯穿于我们所研究的整个时期。长江中下游夏季降水量与前期冬、春季 SSTI 的相关正、负状态交替频繁, 且只有少数时段的相关系数接近 0.10 显著性水平。夏季降水量与同期夏季 SST 的关系也不太稳定, 但在 1905~1934 年段至 1918~1947 年段的正相关非常显著, 超过 0.10 的显著性水平, 但这种关系没有持续下去。

图 4b 中长江中下游夏季降水与前期秋季 AO 滑动相关显示, 1905~1934 年段至 1942~1971 年段为正相关, 其中 1926~1955 年至 1939~1968 年段的正相关非常显著, 但从 1940 年起两者关系骤然下降, 到了 1943~1972 年段转变为负相关, 负相关随时间推移逐渐显著, 在 1967~1996 年段至 1971~2000 年段接近或超过 0.10 显著性水平。长江中下游夏季降水与前期冬季 AO 在 1905~1934 年段至 1919~1948 年段期间呈现非常显著的负相关关系, 大多时段超过 0.10 的显著性水平, 但到了 20 年代至 50 年代这种显著的负相关关系发生了变化, 从 1929~1958 年段起转为正相关, 并持续至今, 但相关不显著。长江中下游夏季降水与春季 AO 的相关是四季中最稳定、最显著的。除 1916~1945 年段至 1939~1968 年段的相关性质不稳定且相关较弱外, 其余时段均呈负相关, 特别是 50 年代以后的近 50 年一直保持着显著的负相关关系, 相关系数均超过或接近 0.10 显著性水平。这说明在前期春季 AO 偏强的年份, 长江中下游夏季降水容易出现偏少的情况, 当 AO 偏弱时, 降水则容易偏多。这一结果与龚道溢等^[8]的结论一致。有趣的是, 长江中下游夏季降水与同期夏季 AO 的关系与春季相反, 在夏季降水与春季 AO 相关不稳定的 1916~1945 年段至 1939~1968 年段时期, 同期两者却呈较明显的正相关, 在春季相关显著的时段, 同期相关反而不显著。

由上述分析可见, 长江中下游夏季降水量与大多数因子间的相关存在不稳定性, 其相关系数随时间变化呈现阶段性变化。这种现象表明长江中下游夏季降水异常与影响因子之间的关系错综复杂, 不是简单的线性关系。相关系数随时间呈现出的阶段性变化或相关性质的改变, 正是因子显著的年代际变化特性所致。

表 1 R 与四季 SSTI 和 AO 的相关系数(96 年样本, 显著性水平 $\alpha_{0.05} = \pm 0.19$)

Table 1 Correlation coefficients between R and SSTI in four seasons and between R and AO in four seasons (sample number is 96, and significance level $\alpha_{0.05} = \pm 0.19$)

	秋季 Autumn	冬季 Winter	春季 Spring	夏季 Summer
SSTI	0.19	0.04	0.03	0.11
AO	-0.09	0.04	-0.25	0.00

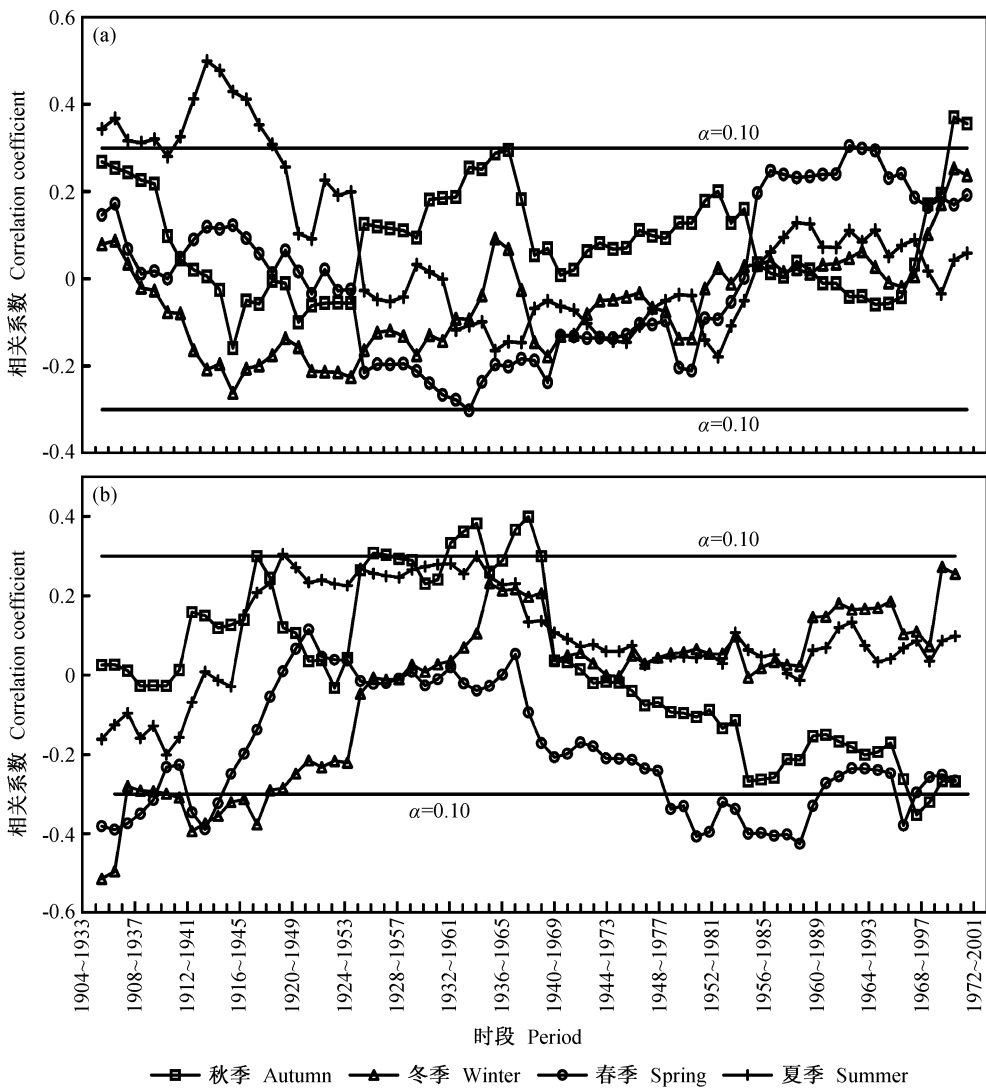


图 4 30 年滑动相关系数(直线为 $\alpha=0.10$ 的显著性水平): (a) R 与四季 SST 相关; (b) R 与四季 AO 相关
Fig. 4 The 30-year running correlation coefficients (the straight lines: significance level $\alpha=0.10$): (a) Correlations between R and SST in four seasons; (b) correlations between R and AO in four seasons

5 不同尺度因子潜在结构对长江中下游夏季降水的作用

为了进一步研究不同时间尺度因子对长江中下游夏季降水的作用,将影响长江中下游夏季降水异常的年代际及年际尺度的因子变量组成一组新的因子集,其中包括太阳黑子数、地球自转速率、海温和北极涛动 4 个年代际尺度变量,分别记为:RSN-ND、ERS-ND、SSTI-ND、AO-ND;还包括太阳黑子数、地球自转速率、四季海温和四季北极涛动共 10 个年际尺度变量,分别记为:RSN-NJ、ERS-NJ、SSTI-QNJ、SSTI-DNJ、SSTI-CNJ、SSTI-XNJ、AO-QNJ、AO-DNJ、AO-CNJ、AO-XNJ,共

计 14 个因子。

对上述因子集进行旋转因子分析,其中前 2 个旋转公共因子的累计方差为 73%,旋转公共因子的因子荷载值代表了因子变量与公共因子的密切程度,其方差的大小是解释降水异常物理意义和成因的重要依据。依据表 2 列出的 2 个公共因子的荷载方差来讨论不同尺度因子的潜在结构对长江中下游夏季降水异常形成的作用。由表 2 可以看出,公共因子 f_1 中高荷载方差集中在年代际尺度因子 RSN-ND、ERS-ND、SSTI-ND、AO-ND 上,其中太阳黑子、地球自转速率和北极涛动的年代际荷载方差等于或接近 1,赤道东太平洋海温的年代际因子荷载相对小些,说明它对此公共因子的贡献不如

其余 3 个显著。另外, 年际尺度因子 AO-QNJ、AO-XNJ 的荷载也较大。由此可见, f_1 主要是因子年代际变化的综合反映, 说明年代际尺度的气候背景对长江中下游夏季降水异常有非常重要影响, 这一综合指标占总方差的 41%。第 2 旋转公共因子 f_2 中的高荷载集中在赤道东太平洋海温和北极涛动年际尺度因子上, 其中前期秋季赤道东太平洋海温和前期冬季北极涛动的年际尺度变量对此公共因子的贡献最大, 同期夏季和前期冬季的海温及春季北极涛动的贡献也比较大。这一公共因子反映了海气异常年际变化对长江中下游夏季降水的重要作用, 这一综合指标占总方差的 32%。

表 2 前 2 个公共因子的载荷方差及共性方差
Table 2 Loading variances and common variances for the first two common factors

尺度变量	公共因子变量 Common factor		
Scale variable	f_1^2	f_2^2	h^2
RSN-ND	0.98	0.00	0.98
ERS-ND	0.98	0.00	0.98
SSTI-ND	0.65	0.19	0.84
AO-ND	1.00	0.00	1.00
RSN-NJ	0.00	0.14	0.14
ERS-NJ	0.19	0.04	0.23
SSTI-QNJ	0.00	1.00	1.00
SSTI-DNJ	0.00	0.56	0.56
SSTI-CNJ	0.00	0.03	0.03
SSTI-XNJ	0.00	0.81	0.81
AO-QNJ	0.96	0.00	0.96
AO-DNJ	0.12	0.88	1.00
AO-CNJ	0.00	0.58	0.58
AO-XNJ	0.81	0.15	0.96

根据因子得分函数的计算公式(2), 我们可以计算出前两个公共因子的逐年得分, 据此分析公共因子对长江中下游夏季降水的贡献在时间分布上的差异。同时, 我们还计算了公共因子相应的时间序列与各因子之间的相关系数, 以便了解它们变化的相似性。

图 5 给出了 1905~2000 年前两个公共因子的得分。由图 5a 可以看出, 以年代际尺度为主的第 1 公共因子的得分呈现出明显的阶段性。有意思的是, 第 1 公共因子得分的变化趋势与太阳黑子相对数的年代际变化趋势非常相似(图 2b), 即 20 世纪 40 年代以前的得分很低, 从 40 年代初开始得分明显提高, 其中出现 3 个得分的高值时期, 一个是 40 年代初至 60 年代初, 另一个是 1976 年至 90 年代初, 从 1997 年起又出现了较高的得分。这表明在长江中下游夏季降水异常变化中, 20 世纪 40 年代以前受年代际尺度因子的影响较小, 而 40 年代以后年代际尺度因子对降水异常的作用明显增强, 特别在 3 个得分高值时期, 因子年代际变化的作用更显突出。第 1 公共因子序列与太阳黑子数年代际序列之间的相关系数为 0.98, 这就进一步证实了两者变化的相似程度之高。另外, 第 1 公共因子与北极涛动年代际序列的相似程度也非常高, 其相关系数为 0.52。由图 5b 看到, 以海气年际尺度为主的第 2 公共因子的得分呈现出明显的年际周期变化, 也就是说长江中下游夏季降水受到海洋和大气年际尺度变化的显著影响。第 2 公共因子序列与秋季赤道东太平洋海温年际序列的相关系数为 0.43, 说明两者的变化有较高的相似性, 即前期海温的年际变化在年际综合指标中起重要作用。

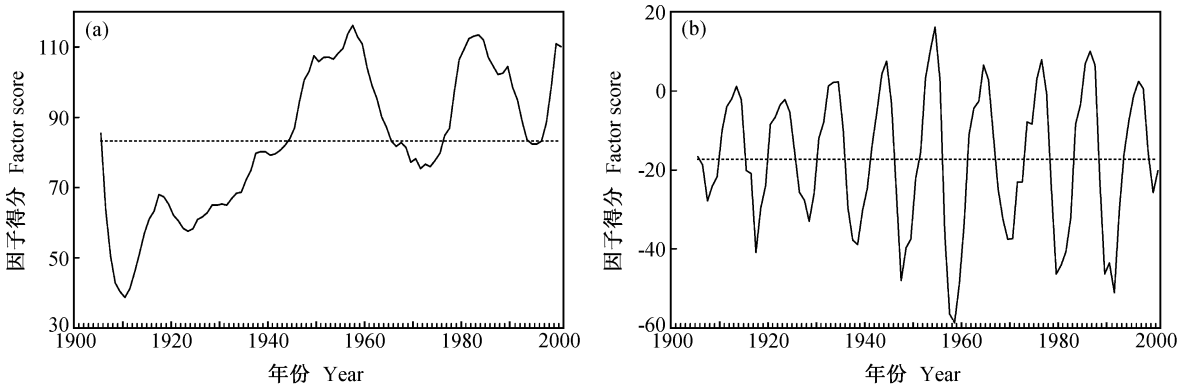


图 5 1905~2000 年前两个公共因子得分: (a) 第 1 公共因子; (b) 第 2 公共因子
Fig. 5 The scores of the first two common factors during 1905-2000: (a) The first common factor; (b) the second common factor

6 小结与讨论

(1) 长江中下游夏季降水量和所选取的强迫因子序列均存在显著的年代际变化特征。长江中下游夏季降水与各因子之间的相关普遍存在不稳定性,即相关系数随时间的变化呈现显著的阶段性,甚至出现相关性质的改变。而因子的年代际变化位相的改变可能是长江中下游夏季降水呈现年代际变化特征的重要原因,特别是太阳黑子几次位相的转变时间与长江中下游夏季降水位相转变的时间较接近,表明太阳黑子与长江中下游夏季降水的年代际变化关系十分密切。

(2) 影响长江中下游夏季降水异常的因子潜在结构主要有两类,一类以年代际尺度因子为主,另一类以海气年际尺度因子为主。在年代际尺度因子中,太阳黑子、地球自转速率和北极涛动的年代际变化的作用较大,它们为长江中下游夏季降水异常提供重要的气候背景。在年际尺度因子中,前期秋季和当年夏季赤道东太平洋海温和前期冬、春季北极涛动的年际变化对降水异常的影响显著。以年代际尺度为主的第 1 类公共因子在 20 世纪 40 年代初以后对长江中下游夏季降水的影响明显增强,其得分大小变化趋势与太阳黑子相对数年代际变化趋势一致,两者变化的相似性最好,这说明太阳活动的年代际变化在降水年代际变化中起主导作用。第 2 类公共因子的得分则呈现 3~5 年的周期变化,它体现了 ENSO 循环和北极涛动年际变化对长江中下游夏季降水异常的贡献。

(3) 赤道东太平洋海温的年代际变化特征不如其他强迫因子那么显著,它在年代际尺度组合因子结构中的作用也比其他因子稍显弱些。而在年际尺度组合因子的结构中,海温的年际变化作用非常突出,可见以赤道东太平洋海温异常变化为基础的 ENSO 现象虽然可以为长江中下游夏季降水异常提供一定的气候背景信息,但作用不十分显著。而 ENSO 年际尺度循环则是降水异常年际变化的强信号。

(4) 通过本研究可以得到这样一个初步概念,即年代际和年际尺度因子与长江中下游夏季降水可能存在如下关系:太阳活动及地球自转速率的年代际变化的共同作用影响大气和海洋的年代际变化,大气、海洋年代际过程的改变影响大气和海洋年际

变化的相互作用,而大气和海洋年际变化的相互作用影响大气环流的改变,最后通过如季风的强弱、副高的位置及强弱等影响长江中下游夏季降水的异常。当然,影响长江中下游夏季降水的因素十分复杂,其物理过程尚需进一步细致、深入地研究。

参考文献 (References)

- [1] 赵振国. 中国夏季旱涝及环境场. 北京: 气象出版社, 1999. 98~107
Zhao Zhenguo. *The Precipitation Anomaly over China and Its Environmental Fields in Summer* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1999. 98~107
- [2] 陈兴芳, 赵振国. 中国汛期降水预测研究及应用. 北京: 气象出版社, 2000. 65~99
Chen Xingfang, Zhao Zhenguo. *A Study on Forecasting Summer Time Precipitation in China and Its Application* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2000. 65~99
- [3] 黄嘉佑, 高守亭. 影响长江地区夏季洪涝的大气环流因子研究. 自然科学进展, 2003, **13** (2): 206~209
Huang Jiayou, Gao Shouting. A study on the effects of factors of atmosphere general circulation on the precipitation anomaly over the reaches of Changjiang River in summer. *Progress in Natural Sciences* (in Chinese), 2003, **13** (2): 206~209
- [4] 黄嘉佑, 刘舸, 赵昕奕. 副高、极涡因子对我国夏季降水的影响. 大气科学, 2004, **28**(4): 517~526
Huang Jiayou, Liu Ge, Zhao Xinyi. The Influence of subtropical high indexes and polar vortex indexes on the summertime precipitation in China. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2004, **28**(4): 517~526
- [5] 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
- [6] Thompson D W J, Wallace J M. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: month-to-month variability. *J. Climate*, 2000, **13** (5): 1000~1016
- [7] Thompson D W J, Wallace J M. Annular modes in the extratropical circulation. Part II: Trends. *J. Climate*, 2000, **13** (5): 1018~1036
- [8] 龚道溢, 朱锦红, 王绍武. 长江流域夏季降水与前期北极涛动的显著相关. 科学通报, 2000, **47** (7): 546~549
Gong Daoyi, Zhu Jinhong, Wang Shaowu. Relationship between the summertime precipitation over the reaches of Changjiang River and arctic oscillation of the previous season. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2000, **47** (7): 546~549
- [9] Gu D, Philander S G H. Interdecadal climate fluctuations

that depend on exchanges between the tropics and extratropics. *Science*, 1997, **275**: 805~807

[10] 李崇银. 年代际气候变化研究. 21 世纪初大气科学回顾与展望. 北京: 气象出版社, 2000. 68~72
Li Chongyin. Study on interdecadal climate change. *Review the Past and Look Forward to the Future on the Atmospheric Sciences in the Early 21th Century* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2000. 68~72

[11] 励申申, 寿绍文. 赤道东太平洋海温与我国江淮流域夏季旱涝的成因分析. 应用气象学报, 2000, **11** (3): 331~338
Li Shenshen, Shou Shaowen. Equatorial eastern Pacific SST and analysis on causes of summer floods/droughts in the Changjiang and Huaihe River basin. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2000, **11**(3): 331~338

[12] Trenberth K E, Paolino D. The Northern Hemisphere sea level pressure data set: Trend, errors, and discontinuities. *Mon. Wea. Rev.*, 1980, **108**: 855~872

[13] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 1999. 54~59
Wei Fengying. *Modern Climatic Statistical Diagnosis and Prediction* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1999. 54~59

[14] Richman M B. Rotation of principal components. *J. Climatol.*, 1986, **6**: 293~335