

郭玲, 何金海, 祝从文. 2012. 影响长江中下游夏季降水的前期潜在预报因子评估 [J]. 大气科学, 36 (2): 337 - 349, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11060. Guo Ling, He Jinhai, Zhu Congwen. 2012. Evaluations of Prior Potential Predictors for the Summer Rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (2): 337 - 349.

影响长江中下游夏季降水的前期潜在预报因子评估

郭玲^{1,2} 何金海¹ 祝从文²

1 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044

2 中国气象科学研究院, 北京 100081

摘要 利用 1951~2006 年美国 NOAA 海温资料、NCEP/NCAR 再分析资料和青藏高原雪深等资料, 根据前期海—陆—气因子对夏季长江流域降水的影响, 本文搜集并整理了影响长江中下游夏季降水的 40 个预报因子, 并讨论了前期因子与夏季降水在不同阶段的相关稳定性。通过相关和历史回报方法, 讨论了前期关键因子与东亚夏季大气环流之间的关系和对夏季长江中下游降水的潜在预报能力。分析发现, 冬季影响因子主要包括 Niño3 区海温、黑潮海温、青藏高原积雪等外源强迫因子, 而春季影响因子主要体现在北极涛动、极涡、西北太平洋副高等大气环流的异常。上述冬春影响因子与夏季长江中下游降水的相关呈现出年代际的变化特征, 其中冬季黑潮海温、青藏高原积雪和贝加尔湖地表气温通过影响东亚夏季风环流系统, 进而对夏季长江流域降水产生影响。综合考虑上述三个因子的权重时间变化, 对 1979 年之后的夏季长江中下游降水具有较好的预报能力。

关键词 潜在预报因子 长江中下游降水 预报能力

文章编号 1006-9895 (2012) 02-0337-13

中图分类号 P426

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11060

Evaluations of Prior Potential Predictors for the Summer Rainfall in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River

GUO Ling^{1, 2}, HE Jinhai¹, and ZHU Congwen²

1 *Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044*

2 *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*

Abstract In the framework of impacts of sea-land-atmosphere factors on the following summer rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River (MLYR), the authors reconstructed 40 factors on the basis of sea surface temperature (SST), snow depth in the Tibetan Plateau, and NCEP/NCAR reanalysis datasets, and evaluated their possible impacts on the summer rainfall in the MLYR. Firstly, the authors discussed the stability of relationships between these factors and the following summer rainfall in the MLYR before and after 1979. Secondly, the authors selected several important factors by correlation analysis, and discussed the relationship between these factors and East Asian summer monsoon (EASM). In addition, the potential forecast capability of these factors for the summer rainfall in the MLYR was discussed by historical hindcasts. The results suggest that the important winter predictors

收稿日期 2011-03-18, 2011-05-23 收修定稿

资助项目 中国气象科学研究院重点基础科研项目 2010Z001、2010Z003, 国家自然科学基金资助项目 40921003, 公益性行业 (气象) 科研专项 GY-HY200906017、GYHY200706005, 中国科学院战略性先导科技专项——应对气候变化的碳收支认证及相关问题 (XDA05090408)

作者简介 郭玲, 女, 1986 年出生, 硕士研究生, 研究方向为东亚季风和短期气候预测。E-mail: guoling1014@126.com

通讯作者 祝从文, E-mail: tomzhu@cma.cma.gov.cn

for the summer rainfall in the MLYR mainly come from the external forcing, such as the SST in Niño3 and Kuroshio Current regions, and the snow depth in Tibetan Plateau. In contrast, the potential spring predictors are almost the general circulation indices, such as Arctic Oscillation (AO), polar vortex, and the western North Pacific subtropical high (WNPSh). Running correlations between these potential predictors and the summer rainfall in the MLYR vary on interdecadal time scale, however, the SST in Kuroshio Current region, the snow depth in the Tibetan Plateau, and the surface air temperature near Lake Baikal show the significant antecedents for summer rainfall in the MLYR by affecting the EASM circulations, and jointly suggest the better forecast capability for the rainfall anomaly in the MLYR after 1979.

Key words potential predictor, summer rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River, forecast capability

1 引言

中国夏季降水的预测是短期气候预测的重点和难点。目前,我国平均汛期降水的短期气候预测业务水平,无论是基于统计模式还是动力模式,准确率大概为 60%~70% (范可等, 2007)。长江中下游位于东亚季风区,该地区降水的季节和年际变化均与东亚季风活动及其年际变化密切联系。海陆热力差异是季风的第一推动力,海洋的热力特征决定了其在气候变化中扮演着极其重要的角色。研究发现,南海前期海温与后期长江中下游夏季降水两者之间呈正相关 (罗绍华等, 1985; 闵锦忠等, 2000), 热带西太平洋暖池 (黄荣辉和孙凤英, 1994)、北太平洋海温 (张庆云等, 2007; 邓伟涛等, 2009) 的热状况对东亚夏季气候异常也有十分重要的作用。前期冬春季 Niño3.4 区 SSTA (张琼和吴国雄, 2001)、前冬 Niño3 区海温 (高辉和王永光, 2007) 与长江流域夏季降水呈正相关。春季黑潮海温与我国夏季降水也存在着较好的相关, 当春季黑潮海温偏高时, 我国东北及华北地区夏季降水减少, 而长江中下游及华南地区降水明显增多 (张天宇等, 2007)。诸多研究表明, 前期的海温异常对后期旱涝有较好的指示意义, 为预测长江中下游夏季降水和旱涝趋势提供了科学依据。

欧亚大陆雪盖以及海冰对我国夏季降水的影响也日益受到气象学者的关注。研究表明, 长江流域的夏季降水与北极海冰面积变化存在密切的联系 (武炳义等, 2004)。冬季南极海冰涛动指数和我国汛期降水距平百分比也存在较好的相关, 正相关主要在长江流域及其以南地区, 长江流域以北为负相关 (卞林根和林学椿, 2008)。青藏高原积雪异常直接导致了高原下垫面加热场热源的变化, 进而影响东亚大气环流, 研究表明青藏高原冬季积雪异常

与长江中下游流域的旱涝呈正相关 (陈乾金等, 2000; 陈兴芳和宋文玲, 2000; 朱玉祥等, 2007), 这也是汛期降水预测的一个重要信号。

大气环流异常是影响我国夏季旱涝的直接原因。环流因子主要包括北极涛动 (龚道溢, 2003)、亚洲—太平洋涛动 (赵平等, 2008)、西太平洋副热带高压 (陈兴芳和宋文玲, 1994; He et al., 2001)、极涡 (黄嘉佑等, 2004; 王遵娅和丁一汇, 2009)、南方涛动 (赵振国和廖荃荪, 1991)、南亚高压 (张琼和吴国雄, 2001)、印缅槽 (时珍玲, 1996) 等。近年来的研究发现, 南半球环流异常也能够影响东亚夏季风环流强弱进而影响长江中下游地区的旱涝。结果表明, 春季马斯克林高压和澳大利亚高压 (薛峰等, 2003)、春季南极涛动以及南半球副热带高压 (范可, 2006)、澳大利亚东侧位势高度 (刘舸等, 2008) 均与中国长江流域夏季降水存在显著的正相关。除此之外, 大气环流的遥相关型 (施能和鲁建军, 1995)、太阳黑子 (李可军等, 2000) 等也是在我国夏季汛期降水预测中需要考虑的因素。

针对夏季降水预报, 在我国实际业务预测中, 常选取冬、春季影响因子作为预测因子, 建立预测模型。夏季长江中下游降水是我国短期气候预测的关键, 然而, 在众多因子中对长江流域降水起关键作用的因子有哪些? 这些因子的影响在年代际尺度上又是否稳定? 从这些问题出发, 本文通过评估确定影响中国夏季降水的冬、春季关键因子, 并探讨因子与夏季大气环流的关系。本文以夏季长江中下游降水为例, 利用前期因子对降水的历史回报来检验关键因子及其对中国夏季降水的潜在预报能力。

2 资料和方法

本文所使用的主要资料包括:

(1) NCEP/NCAR (National Center for Envi-

ronmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) 提供的 1951~2006 年大气月平均再分析资料, 水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ (Kalnay et al., 1996)。

(2) NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 提供的 1951~2006 年延长重构的月平均海表温度场资料和多种气候指数, 其中海温资料分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ (Smith et al., 2008)。

(3) 国家气候中心提供的全国 160 个测站 1951~2006 年的逐月降水资料。

(4) 国家气候中心提供的 74 项环流特征量, 主要选取其中极涡、副高等相关资料。

(5) 国家气象信息中心提供的 1951~2006 年青藏高原逐月雪深序列。

文中主要采用相关分析、Mann-Kendall 方法、线性回归、交叉检验等统计方法, 显著性检验采用 t 检验方法。本文中夏季指 6~8 月 (JJA) 的平均值, 冬季指 12~2 月 (DJF) 的平均值, 春季是 3~5 月 (MAM) 的平均值。表 1 是本文选取的 40 个影响因子及其说明。

表 1 本文选取的影响长江中下游地区夏季降水的 40 个主要因子

Table 1 40 factors potentially affecting summer precipitation in the middle and lower reaches of the Yangtze River (MLYR) used in the present study

因子序号	因子	说明
1	Nino3 区海温 (高辉和王永光, 2007)	($5^{\circ}\text{S} \sim 5^{\circ}\text{N}$, $150^{\circ}\text{W} \sim 90^{\circ}\text{W}$) 区域平均海温
2	Nino3.4 区海温 (张琼和吴国雄, 2001)	($5^{\circ}\text{S} \sim 5^{\circ}\text{N}$, $170^{\circ}\text{W} \sim 120^{\circ}\text{W}$) 区域平均海温
3	南海海温 (罗绍华等, 1985)	($0^{\circ} \sim 25^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$) 区域平均海温
4	黑潮 (张天宇等, 2007)	($22^{\circ}\text{N} \sim 36^{\circ}\text{N}$, $122^{\circ}\text{E} \sim 150^{\circ}\text{E}$) 区域平均海温
5	热带西太平洋暖池 (黄荣辉和孙凤英, 1994)	($0^{\circ} \sim 15^{\circ}\text{N}$, $125^{\circ}\text{E} \sim 145^{\circ}\text{E}$) 区域平均海温
6	赤道印度洋 (张琼等, 2003)	($10^{\circ}\text{S} \sim 0^{\circ}$, $60^{\circ}\text{E} \sim 90^{\circ}\text{E}$) 区域 SSTA
7	印度洋偶极子 (唐卫亚等, 2008)	赤道印度洋西、东南部海表温度差
8	北极涛动 (龚道溢, 2003)	取自 NOAA
9	南极涛动 (Nan and Li, 2003)	取自李建平个人网页
10	南方涛动 (赵振国和廖荃荪, 1991)	取自 NOAA
11	北大西洋涛动 (符淙斌和曾昭美, 2005)	取自 NOAA
12	亚洲-太平洋涛动 (赵平等, 2008)	亚洲和太平洋对流层中上层 T' 之差
13	太平洋年代际振荡 (孙建奇和王会军, 2005)	http://jisao.washington.edu/ [2009-08-12]
14	西太平洋型 WP (施能和鲁建军, 1995)	取自 NOAA
15	南极海冰涛动 (卞林根和林学椿, 2008)	罗斯海外围和别林斯高晋海区区域平均海冰密集度差值
16	巴伦支海海冰密集度 (武炳义等, 2004)	($65^{\circ}\text{N} \sim 80^{\circ}\text{N}$, $20^{\circ}\text{E} \sim 60^{\circ}\text{E}$) 区域平均海冰密集度
17	白令海海冰密集度 (武炳义等, 2004)	($51^{\circ}\text{N} \sim 66^{\circ}\text{N}$, $165^{\circ}\text{E} \sim 165^{\circ}\text{W}$) 区域平均海冰密集度
18	西太平洋副高脊线 (陈兴芳和宋文玲, 1994)	74 项环流特征量
19	西太平洋副高面积 (陈兴芳和宋文玲, 1994)	74 项环流特征量
20	西太平洋副高西伸脊点 (陈兴芳和宋文玲, 1994)	74 项环流特征量
21	南海副热带高压面积 (罗绍华和金祖辉, 1986)	74 项环流特征量
22	亚洲地区纬向环流指数 (陈兴芳和宋文玲, 1994)	74 项环流特征量
23	亚洲极涡面积指数 (王遵娅和丁一汇, 2009)	74 项环流特征量
24	北半球极涡面积指数 (黄嘉佑等, 2004)	74 项环流特征量
25	北半球极涡强度指数 (黄嘉佑等, 2004)	74 项环流特征量
26	大西洋欧洲区极涡强度指数 (黄嘉佑等, 2004)	74 项环流特征量
27	北美区极涡强度指数 (黄嘉佑等, 2004)	74 项环流特征量
28	北半球副高强度指数 (黄嘉佑等, 2004)	74 项环流特征量
29	北非大西洋副高强度 (黄嘉佑等, 2004)	74 项环流特征量
30	马斯克林高压 (薛峰等, 2003)	($25^{\circ}\text{S} \sim 35^{\circ}\text{S}$, $40^{\circ}\text{E} \sim 90^{\circ}\text{E}$) 区域 SLP 平均值
31	澳大利亚高压 (薛峰等, 2003)	($25^{\circ}\text{S} \sim 35^{\circ}\text{S}$, $120^{\circ}\text{E} \sim 150^{\circ}\text{E}$) 区域 SLP 平均值

表 1 (续)

Table 1 (Continued)

因子序号	因子	说明
32	澳大利亚东侧位势高度(刘炯等, 2008)	(25°S~35°S, 150°E~170°E) 500 hPa 位势高度, 并标准化
33	鄂霍次克海高压(张庆云和陶诗言, 1998)	以(60°N, 140°E)为基准点 500 hPa 高度距平
34	南亚高压强度(张琼和吴国雄, 2001)	100 hPa (20°N~45°N, 95°E~125°E)区域内位势高度大于 16600 gpm 的所有格点上位势高度值与 16600 gpm 之差的总和
35	东亚副热带西风急流轴(况雪源和张耀存, 2006)	200 hPa 等压面上(30°N~50°N, 70°E~120°E)内最大西风所在纬度平均值
36	印缅槽(时珍玲, 1996)	74 项环流特征量
37	东亚海陆热力差指数(Sun et al., 2001)	由东西向、南北向海陆热力差计算得到
38	贝加尔湖气温指数(徐康等, 2011)	(40°N~60°N, 95°E~130°E) 地表气温平均
39	太阳黑子(李可军等, 2000)	74 项环流特征量
40	青藏高原雪深指数(朱玉祥等, 2007)	由国家气象信息中心提供

3 前期影响因子的统计分析

为研究方便, 我们定义了一个长江中下游夏季降水指数来反映该地区旱涝的变化, 以“九五”重中之重项目所规定的长江中下游地区 17 站(南京、合肥、上海、杭州、安庆、宁波、南昌、衢县、长沙、屯溪、常德、贵溪、汉口、岳阳、宜昌、钟祥、九江) 6~8 月降水量距平的平均值来表征。图 1b 给出 1951~2006 年长江中下游地区夏季降水指数的变化趋势。

由图 1a 可知, 降水指数与中国 160 个站的降水显著相关的区域涵盖了长江中下游地区, 因此该降水指数的正负能够表征长江中下游地区的旱涝情

况。此外, 夏季长江中下游降水具有非常明显的年际和年代际变化特征(图 1b), 近 60 年来, 该地区降水总体呈现出上升的变化趋势, 在 20 世纪 70 年代后期降水发生转折。其中, 在 1970 年代末之前降水以偏少为主, 1970 年代末之后降水显著偏多, 这与东亚夏季风在 1970 年代末之后减弱的年代际尺度变化规律一致(Wang, 2001; Zhou et al., 2009)。降水的年代际变化主要表现为 1960 年代的持续干旱和 1990 年代的多发型洪涝, 以及 20 世纪末之后降水的减少。

对长江中下游地区的降水指数采用 Mann-Kendall 法检验(图 2), 可知在 1970 年代中后期 UF 开始出现大于 0 的值, 表明降水指数由此开始

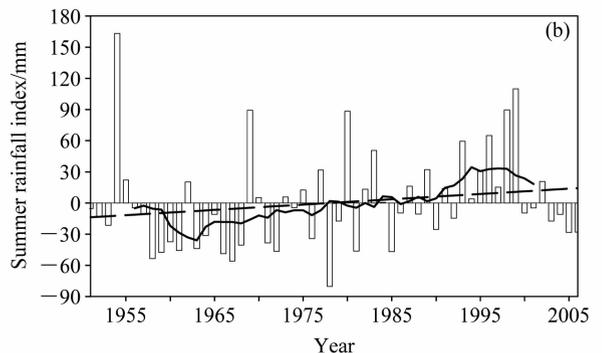
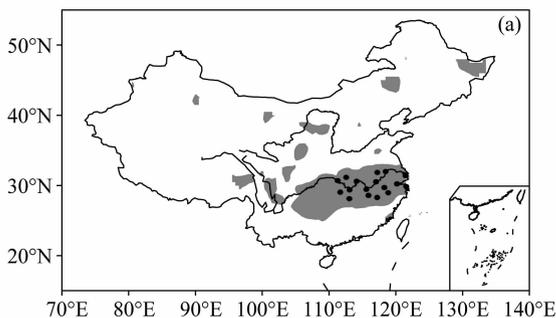


图 1 1951~2006 年长江中下游地区夏季降水指数与 160 站降水的相关 (a) 以及降水指数的变化趋势 (b)。(a) 圆点代表站点, 阴影表示显著相关的区域; (b) 虚线代表线性趋势, 曲线代表 11 年滑动平均(单位: mm)

Fig. 1 (a) Correlations between observed summer precipitation at 160 stations and the rainfall index averaged in the MLYR, and (b) the time series of summer rainfall index and its trend during 1951–2006. Dots indicate station sites, and the shaded areas indicate the correlation coefficient is exceeding 0.05 significance level in (a); the dashed line shows linear trend, and the curve shows 11-year running average in (b)

呈上升趋势,且在 1979 年前后降水指数产生突变,降水突变年份与全球大气海洋系统经历突变的时段较为一致。因此,本文将 1952~2006 年划分成 1952~1978 年和 1979~2006 年两个阶段,分析突变前后两个时期选取的冬春因子与随后夏季降水指数的关系。

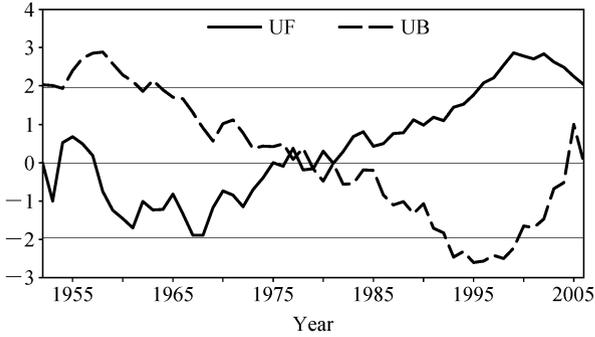


图 2 长江中下游降水指数 Mann-Kendall 统计量曲线
Fig. 2 Mann-Kendall statistics curve of summer rainfall index in the MLYR

图 3 分别表示了 1952~1978、1979~2006、1952~2006 年三个阶段降水指数与前期冬、春季因子的相关系数,从图中可以看出,大多数海区的海温(因子 1~7)冬季与夏季降水的相关符号比较稳定,其中以黑潮海温(因子 4)的相关最为显著,其次是 Niño3 区海温(因子 1),且 Niño3 区、Niño3.4 区和南海海温(因子 1~3)在第二阶段的冬季相关系数比第一阶段偏高。北极涛动(因子 8)、北半球极涡强度、大西洋欧洲区极涡强度、北美区极涡强度(因子 25~27)与降水指数的相关主要表现在春季,且第二阶段的相关程度也比第一阶段偏强。春季的北半球副高、马斯克林高压、鄂霍次克海高压、印缅槽(因子 28、30、33、36)是与夏季降水前后两个阶段相关符号一致的影响因子,且后一阶段偏强于前一阶段。由贝加尔湖气温指数(因子 38)的相关系数可知,前后两个阶段发生了显著变化,冬季因子与降水由负相关变成了显著正相关,春季的相关符号未改变,但相关程度明显降低。降水与

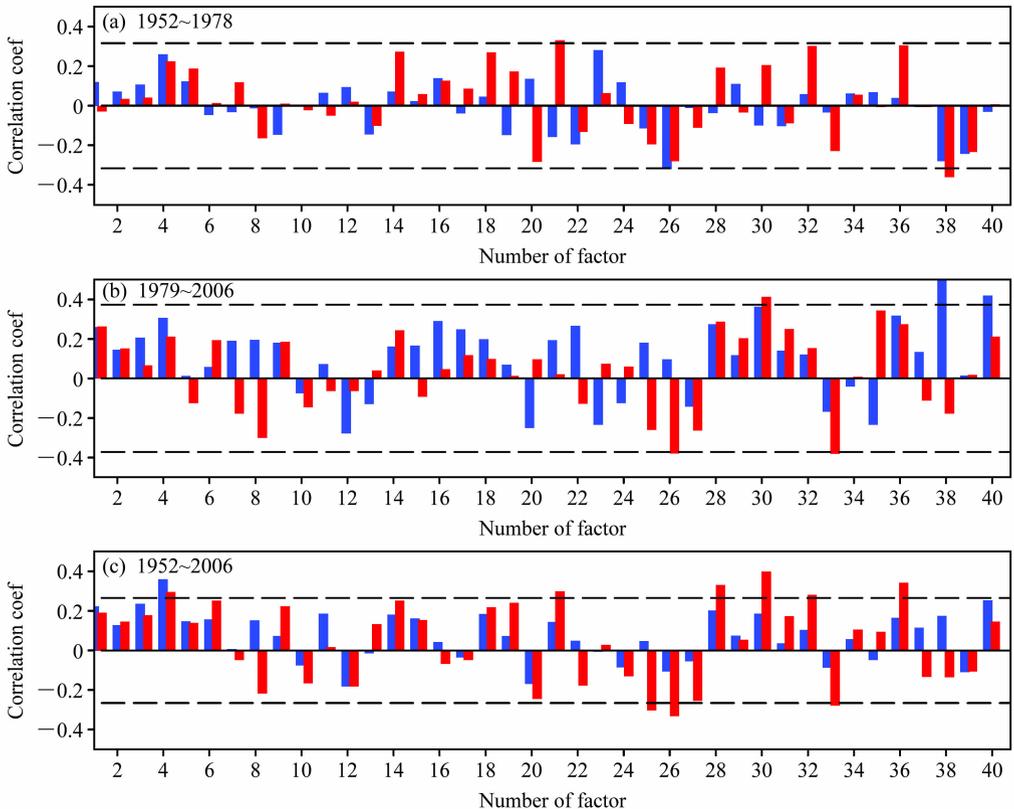


图 3 长江中下游降水指数与前期冬季、春季 40 种因子的相关。横坐标为因子序号;蓝色直方图:前冬因子与降水指数的相关;红色直方图:前春因子与降水指数的相关;虚线:0.05 显著性水平

Fig. 3 Correlation coefficients between summer rainfall index in the MLYR and pre-winter (blue column) and spring (red column) factors. The abscissa indicates the number of factors, and the dashed lines indicate the 0.05 significance level

冬季青藏高原雪深指数(因子 40)的相关在前后两个阶段的变化也较为突出,由第一阶段相关不明显转变为第二阶段的相关显著,表明积雪在近 30 年来对长江流域夏季旱涝的影响明显增强。

从表 2 列出的相关系数可以看出,在 1952~2006 年整个阶段显著相关、且突变前后两个阶段相关符号一致的因子有冬、春季黑潮海温,春季北半球极涡强度、大西洋欧洲区极涡强度、北半球副高强度、马斯克林高压、澳大利亚东侧位势高度、鄂霍次克海高压以及印缅槽。与长江中下游流域降水显著相关的因子在 1979 年前后阶段发生了变化,1952~1978 年显著相关的因子是冬季大西洋欧洲区极涡强度、春季南海副热带高压面积、春季贝加

表 2 与长江中下游降水指数显著相关的前期冬、春季因子
Table 2 Significant correlation coefficients between the summer rainfall index in the MLYR and pre-winter and spring factors during 1952 - 1978, 1979 - 2006, and 1952 - 2006, respectively

序号	因子	季节	相关系数		
			1952~1978 年	1979~2006 年	1952~2006 年
4	黑潮	冬季	0.31	0.31	0.36*
		春季	0.27	0.21	0.30*
21	南海副热带高压面积	冬季	-0.19	0.19	0.15
		春季	0.40*	0.02	0.29
25	北半球极涡强度	冬季	-0.14	0.18	0.05
		春季	-0.23	-0.26	-0.30*
26	大西洋欧洲区极涡强度	冬季	-0.38*	0.10	-0.11
		春季	-0.34	-0.38*	-0.33*
28	北半球副高强度	冬季	-0.04	0.28	0.20
		春季	0.23	0.29	0.33*
30	马斯克林高压	冬季	-0.12	0.36	0.19
		春季	0.25	0.41*	0.40*
32	澳大利亚东侧位势高度	冬季	0.07	0.12	0.11
		春季	0.36	0.15	0.28*
33	鄂霍次克海高压	冬季	-0.04	-0.17	-0.09
		春季	-0.27	-0.38*	-0.28*
36	印缅槽	冬季	0.05	0.32	0.17
		春季	0.37	0.28	0.34*
38	贝加尔湖气温	冬季	-0.34	0.54*	0.18
		春季	0.43*	-0.18	-0.13
40	青藏高原雪深	冬季	-0.04	0.42*	0.25
		春季	0.01	0.21	0.15

注: * 表示通过 0.05 显著性水平。

尔湖气温指数;1979~2006 年相关系数通过 t 显著性检验的因子有冬季贝加尔湖气温指数、青藏高原雪深指数以及春季大西洋欧洲区极涡强度、马斯克林高压、鄂霍次克海高压。由相关显著的因子可得知,海温、积雪等外强迫因素主要体现在冬季,而春季的主要因子则集中在大气环流的指数变化。

统计表明,前期影响因子与夏季长江流域降水之间的关系不稳定,表现为相关系数随着时间呈现出年代际的变化或正负的改变。其中,与长江流域汛期旱涝相关显著的冬季因子主要体现在黑潮海温、Niño3 区海温和青藏高原积雪等外源强迫方面,而大气环流因子与降水间的相关显著阶段主要表现在春季。我们从众多因子中选出在 1979~2006 年相关较高的前期影响因子,冬季因子有黑潮海温、青藏高原雪深以及贝加尔湖地表气温,春季因子有大西洋欧洲区极涡强度、马斯克林高压、鄂霍次克海高压,在下文中讨论因子异常对东亚夏季降水的指示意义及其预报能力。

4 前冬因子与夏季大气环流的关系

冬季的影响因子主要集中在海温、积雪和地表气温。为此,我们从海温中选择相关最大的黑潮区 SST,其次是 Niño3 区 SST,对因子与长江中下游夏季降水关系的年代际变化进行分析。图 4 给出四种前冬因子与长江中下游降水指数 21 年的滑动相关,可以发现,在 20 世纪 70 年代后期以后, Niño3 区 SST 与长江中下游降水指数二者之间的相关呈减弱趋势,即 ENSO 对汛期降水的指示意义减弱,

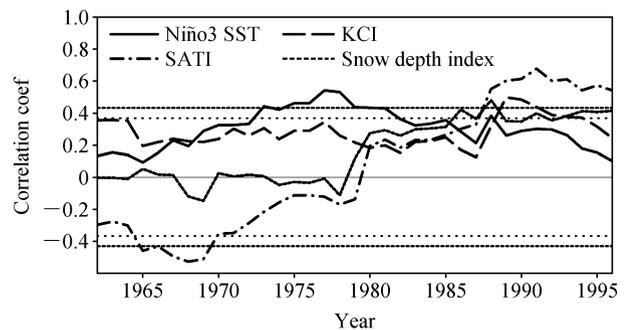


图 4 冬季因子与长江中下游降水指数的 21 年滑动相关。虚直线为 0.05 显著性水平,点线为 0.1 显著性水平

Fig. 4 21-year running correlation coefficients between pre-winter factors and summer rainfall index in the MLYR. Dashed and dotted lines indicate 0.05 and 0.1 significance levels, respectively

这与以往的研究结果一致。黑潮海温 (Kuroshio Current Index, 简称 KCI) 与降水之间的相关则相对比较平稳, 且从图 4 中我们可以清楚地看到在 1970 年代末青藏高原积雪、贝加尔湖地表气温指数 (Surface Air Temperature Index near Lake Baikal, 简称 SATI) 二者与降水指数的滑动相关都发生明显的转折, 在第二阶段相关程度显著增强。因此, 在汛期业务中我们必须充分考虑因子影响的年代际背景的差异。

图 5 表示 1979~2006 年冬季黑潮海温指数对夏季 500 hPa 位势高度和 850 hPa 水汽通量的回归场。如图 5a 所示, 贝加尔湖以南包含蒙古在内的地区、中国东南侧的西太平洋副热带地区的高度场与前冬黑潮海温呈显著正相关, 与长江流域降水指数的 500 hPa 位势回归场 (图 6a) 分布类似, 由高纬到低纬呈“+ - +”的分布形势, 这种形势类似于东亚-太平洋型 (简称 EAP 型) 遥相关波列。陆日宇和黄荣辉 (1998) 指出, 夏季东北亚阻塞高压和副热带高压通过 EAP 型遥相关波列联系在一起, 即东北亚阻塞高压日数多时, 副高位置偏南, 通过两者之间的这种关系进而可以影响到江淮地区的夏季降水。从 850 hPa 水汽通量回归场上也可得到对应的分布, 长江流域南侧有一西南气流, 与降水指数的气水汽通量回归场 (图 6b) 分布相似, 只是

通过显著性的面积偏小。即当前冬黑潮海温偏高时, 贝加尔湖南部为显著的反气旋环流, 能够引导北方冷空气的南下, 而西太平洋副热带高压也偏强, 导致长江流域以南的西南气流加强, 这种形势为该地区的降水提供了冷空气以及暖湿气流。为了进一步反映冬季黑潮海温与夏季平均 500 hPa 西太平洋副高环流特征的关系, 计算了 1952~2006 年冬季黑潮海温与副高面积、西伸脊点、强度的相关系数, 分别为 0.39、-0.34、0.38, 均通过了 0.05 水平的显著性检验, 这表明冬季黑潮海温对夏季西太平洋副高有较大影响。冬季黑潮海温偏高时, 西太平洋副高强度偏强, 面积偏大, 且西伸脊点偏西, 有利于长江中下游地区汛期降水的增多。

我们计算了 1979~2006 年夏季降水与前冬 12、1、2 月份积雪深度的相关分别是 0.47、0.40、0.11, 发现以前冬 12 月份雪深与降水的相关最为突出, 因此本文选取 12 月份的积雪来分析其对汛期降水的影响。图 7 为 12 月份青藏高原雪深指数对夏季环流场的回归分析, 图 7a 中高度场回归系数正值中心位于长江以南的大片副热带地区、巴尔喀什湖附近地区以及鄂霍次克海以西的东亚地区, 在我国华北和东北地区、朝鲜半岛、日本群岛附近回归系数为负, 东亚沿海地区从高纬到低纬呈现“+ - +”的波列分布, 与 EAP 遥相关型较为相

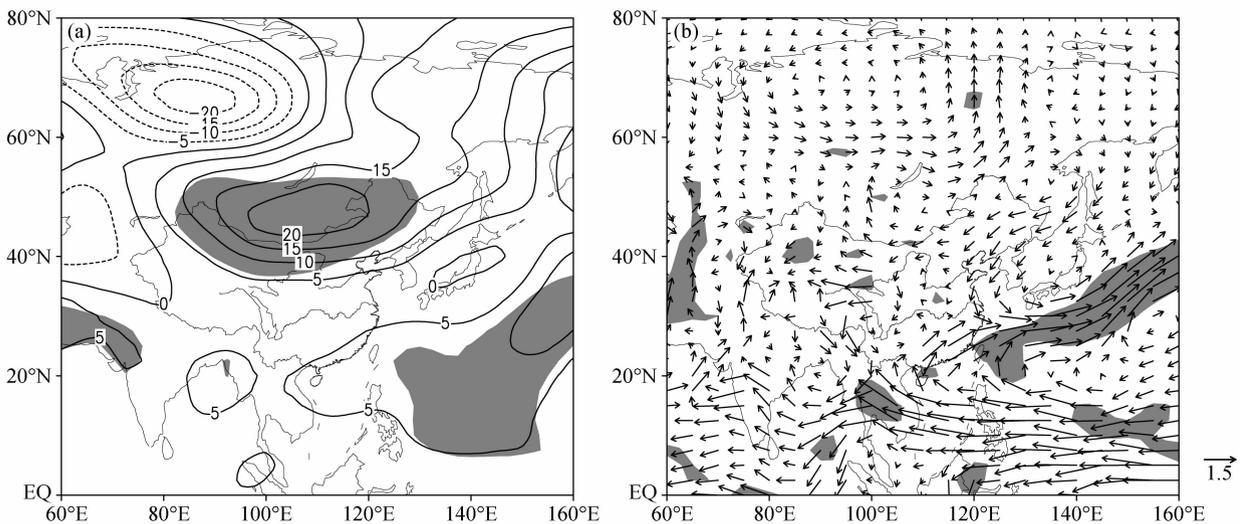


图 5 1979~2006 年冬季黑潮海温指数与夏季 500 hPa 位势高度场 (a, 单位: $\text{gpm}/^{\circ}\text{C}$) 和 850 hPa 水汽通量 (b, 单位: $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$) 的回归系数场。阴影: 通过 0.05 水平的显著性检验

Fig. 5 The regressed fields of summer (a) 500-hPa geopotential height and (b) 850-hPa water vapor flux against pre-winter KCI during 1979-2006. Units: $\text{gpm}/^{\circ}\text{C}$ in (a) and $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ in (b); the shaded areas indicate the correlation coefficients are exceeding 0.05 significance level

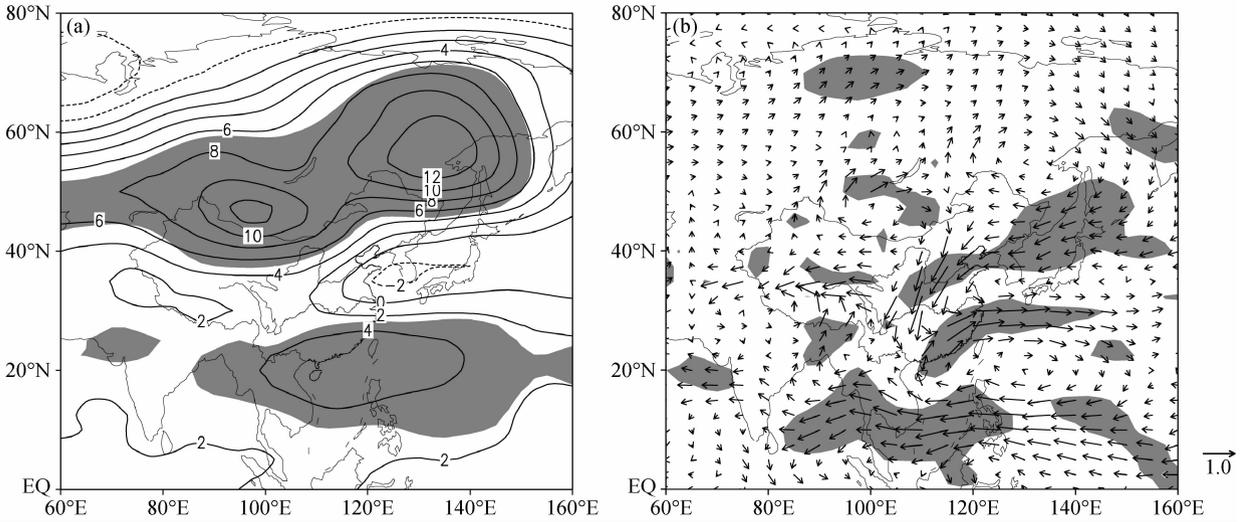


图 6 同图 5, 但为长江中下游夏季降水指数: (a) 单位: gpm/mm ; (b) 单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for precipitation index in the MLYR. Units: gpm/mm in (a) and $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ in (b)

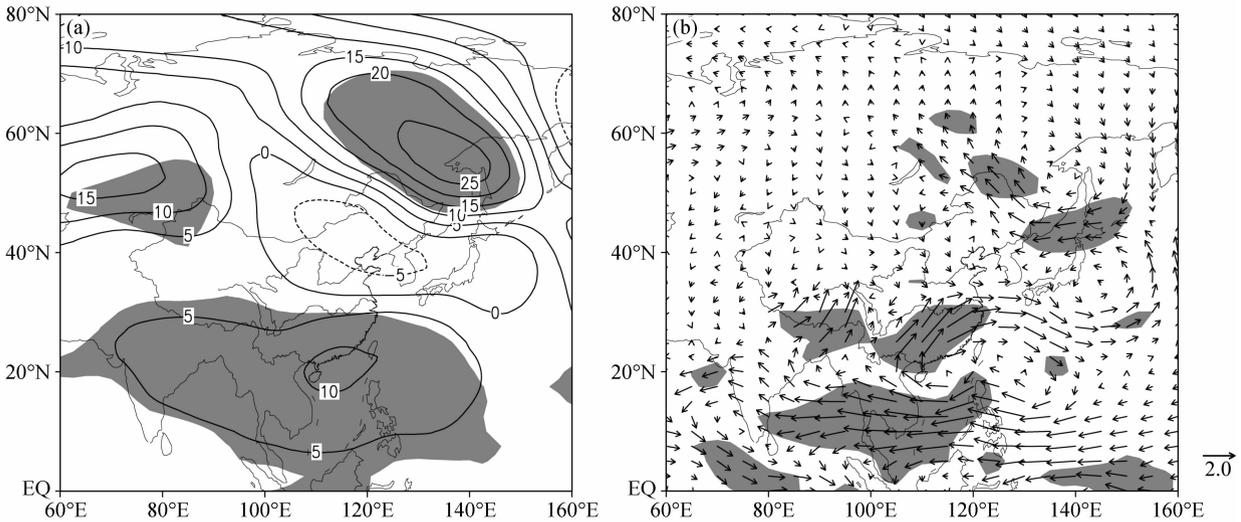


图 7 同图 5, 但为冬季高原雪深指数: (a) 单位: gpm/m ; (b) 单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$

Fig. 7 Same as Fig. 5, but for pre-winter snow depth index during 1979–2006. Units: gpm/m in (a) and $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ in (b)

似。即当前期冬季积雪偏多时, 夏季中高纬阻塞形势发展, 西太平洋副热带高压偏强偏南, 不利于我国夏季雨带北上。由图 7b 回归场可以看到相应的水汽通量分布, 长江以南有相关显著的西南暖湿气流, 表明冬季青藏高原积雪偏多时, 后期夏季到达长江中下游的水汽通量增多, 为该地区降水提供充足的水汽。

亚洲中高纬度的气温变暖势必通过影响大尺度季风环流, 进而影响中国区域气候变化。由图 4 中的滑动相关系数可知, 前冬贝加尔湖气温与夏季降

水存在着一定的相关, 但是在 1979 年左右相关发生突变, 从负相关转变为正相关。图 8 给出了 1979~2006 年冬季贝加尔湖地表气温指数与夏季位势场、水汽通量场的回归分析, 位势回归场的正负中心与图 6a 的正负分布一致, 亚洲中高纬和长江以南的副热带地区为正值区, 东部的日本海、朝鲜半岛地区为负值中心, 即前冬贝加尔湖气温升高, 夏季中高纬阻塞高压、西太平洋副高和东亚大槽加强。从水汽通量回归场 (图 8b) 上也出现利于长江流域降水增多的西南气流输送, 且有北方冷空气与之交汇

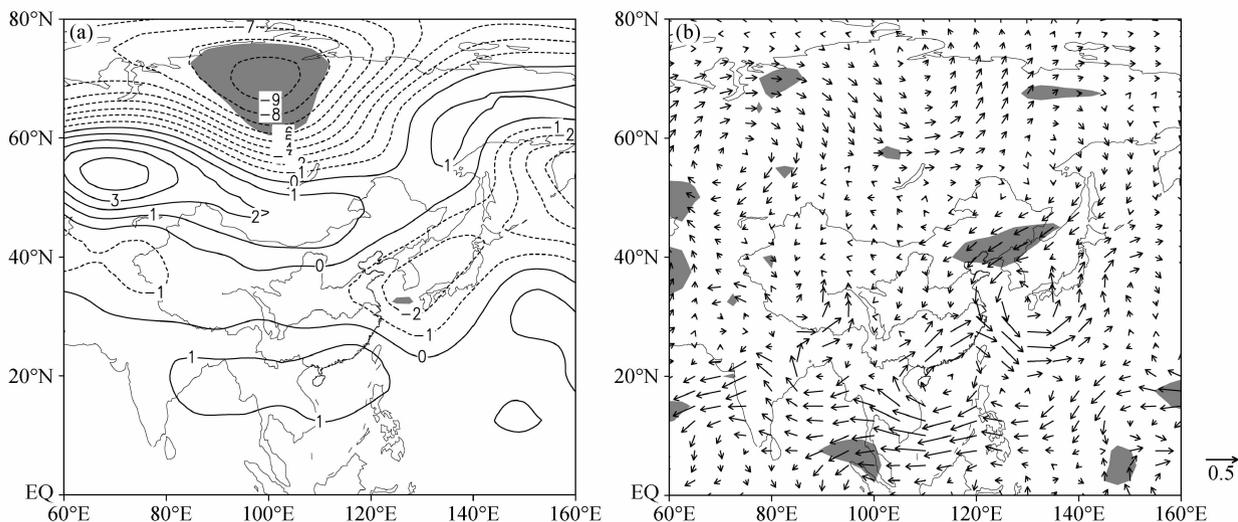


图 8 同图 5, 但为冬季贝加尔湖气温指数: (a) 单位: $\text{gpm}/^{\circ}\text{C}$; (b) 单位: $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$
 Fig. 8 Same as Fig. 5, but for pre-winter SATI during 1979–2006. Units: $\text{gpm}/^{\circ}\text{C}$ in (a) and $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ in (b)

在长江流域。由此我们推测, 冬季贝加尔湖气温对夏季长江中下游地区的旱涝也有一定的预测意义。

图 9 给出了春季大西洋欧洲区极涡强度、马斯克林高压以及鄂霍次克海高压与长江中下游降水指数的 21 年滑动相关系数, 由图可见, 除了 20 世纪 60 年代相关较小之外, 近几十年来三种因子与降水的相关关系比较稳定, 但在 90 年代之后均出现不同程度的减弱。大西洋欧洲区极涡强度与降水指数的相关在 70 年代初期之后的大部分时段都超过了 0.1 显著性水平, 鄂霍次克海高压与降水指数在 70 年代和 90 年代前后相关显著。马斯克林高压从 70 年代初到 90 年代与降水的相关几乎都通过了 0.1 水平的显著性检验, 但在 90 年代之后相关程度有所降低。此外, 由三种春季因子对夏季位势场的回归分析 (图略), 也可得到从东亚高纬到低纬地区呈“+—+”或相反分布形势, 由此推测因子可能是通过 EAP 遥相关型来影响东亚季风环流, 同时在水汽通量回归场上也可看到对应的气流出现。

综上所述, 前冬海温、积雪和地表气温变化对亚洲高低纬度地区的环流系统有明显的影 响, 在 500 hPa 高度场上表现在西太平洋副热带地区、巴尔喀什湖附近地区和亚洲东北部, 从 850 hPa 水汽通量场上则表现为副高西北侧的西南暖湿气流和来自中高纬的冷空气, 冷暖气流在我国长江流域交汇, 有利于该地区降水偏多。因此, 前冬黑潮海

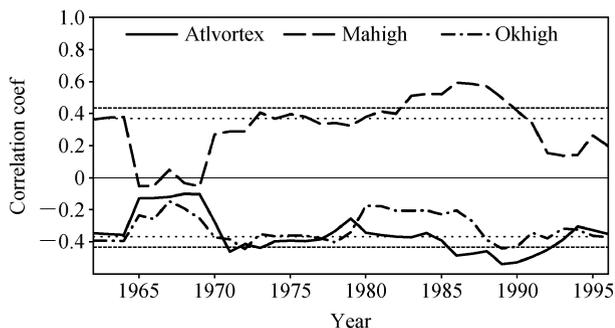


图 9 春季因子与长江中下游降水指数的 21 年滑动相关 (虚直线为 0.05 显著性水平, 点线为 0.1 显著性水平)。实线、长虚线、长短虚线分别为降水指数与大西洋欧洲区极涡强度指数 (Atlvortex), 马斯克林高压 (Mahigh), 鄂霍次克海高压指数 (Okhigh) 之间的滑动相关

Fig. 9 21-year running correlation coefficients between three pre-spring factors and precipitation index. Dashed and dotted lines indicate 0.05 and 0.1 significance levels, respectively; the three pre-spring factors are Atlantic-Europe polar vortex (Atlvortex) index, Mascarene high (Mahigh) index, and Okhotsk high (Okhigh) index, respectively

温、青藏高原积雪异常以及贝加尔湖气温在 1970 年代末之后对我国长江中下游夏季旱涝的预测具有一定的指示意义。此外, 前春大西洋欧洲区极涡强度、马斯克林高压以及鄂霍次克海高压对该地区夏季降水也有一定的影响。

5 历史回报检验

根据上文选出的冬季三个主要因子: 黑潮海

温、12 月份青藏高原雪深、贝加尔湖地表气温指数, 我们建立 1979~2006 年(共 28 年)长江中下游夏季降水指数的预报模型, 检验因子的预报效果。选取如下 3 个预报方案, 采用交叉检验进行历史回报试验:

方案 a: 多元线性回归方法(简称 MLR): 首先利用 27 年的因子和降水指数的观测值建立多元线性方程, 然后根据剩余一年的冬季因子预报该年份的降水。

方案 b: 对三种冬季因子进行经验正交函数(EOF)分解, 提取出各个模态的时间系数 PC, 采用 PC1(第一模态的时间系数)对降水指数进行交叉预报。EOF 方法是把原变量场分解为正交函数的线性组合, 构成互不相关的典型模态, 时间系数则代表对应典型模态的权重。

三种冬季因子提取的第一模态的解释方差为 43%, 时间系数 PC1 与降水指数的相关是 0.66, 我们根据该时间系数对降水指数进行一元交叉检验预报。两个预报方案得到的结果由图 10 和表 3 给出。

从表 3 中可见, 方案 a、b 预测值与实际值的相

表 3 长江中下游降水指数历史回报与观测值的相关系数和均方根误差

Table 3 Correlation coefficients and root mean square errors between the hindcasts and the observed summer rainfall index in the MLYR

预报方案	相关系数	均方根误差/mm
MLR	0.56	34.0
PC1 回归	0.60	32.3

关分别为 0.56、0.60, 两种预测值与实际值的同号率分别是 75%、61%, 图 10 中两种预测结果与实际值的变化趋势有较好的一致性, 模型能够很好地模拟出 90 年代降水偏多及 21 世纪初期降水的减少, 其中成功预测出 1981、1985 年的干旱和 1998 年的洪涝。

方案 c: 增加春季的影响因子试验: 夏季降水的变化不仅受冬季因子的隔季影响, 春季因子对其也有重要作用。我们从相关程度选出显著影响的春季因子, 分别是春季大西洋欧洲区极涡强度、马斯克林高压、鄂霍次克海高压, 与冬季因子组合成自变量, 同样按方案 a、b 对降水指数进行回报(图 11)。

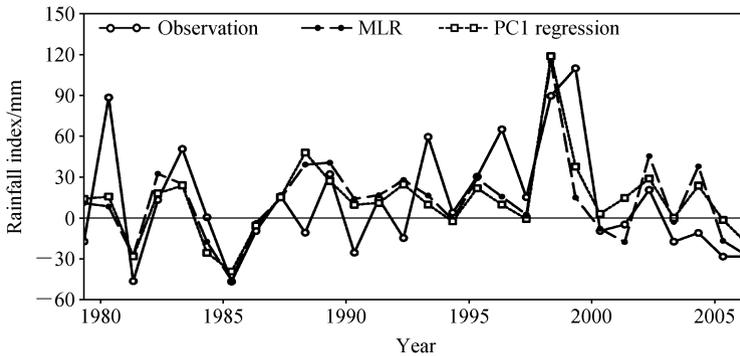


图 10 1979~2006 年长江中下游夏季降水指数回报值与实际值的对比(单位: mm)

Fig. 10 Comparisons of observation and hindcast of summer rainfall index during 1979-2006

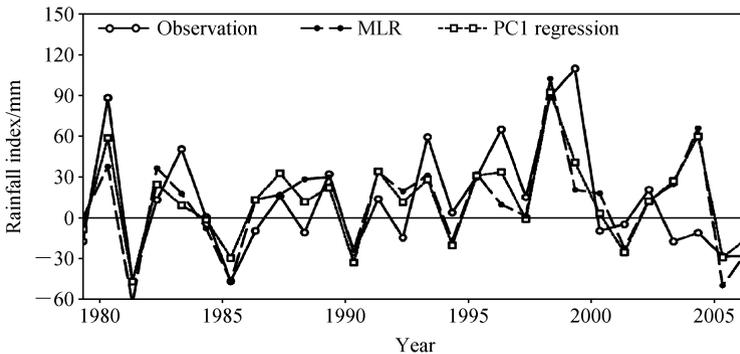


图 11 前冬、前春因子对夏季降水指数回报值与实际值的对比(单位: mm)

Fig. 11 Comparisons of observation and hindcast of summer rainfall index by use of pre-winter and pre-spring factors

由表 4 可知, 冬、春季六个因子多元线性回报值与实际值的相关为 0.62, 与采用冬季因子线性回报相比效果稍有提高。因子经 EOF 提取出的 PC1 与降水指数相关为 0.77, 采用 PC1 线性回归发现, 预测值与实际值的相关达到 0.73, 均方根误差相比之前的预测方案也有所减小。运用 PC1 得到的结果好于使用多元线性回归得到的结果。由图 11 可见, 方案 b 预测模型能够成功地模拟出降水的年际变化(除 2003、2004 年外), 即加入春季影响因子对降水的模拟效果有一定的改善, 但预测值的同号率为 68%。综合三种方案的结果得知, 在 20 世纪 70 年代末之后, 前冬黑潮海温、青藏高原积雪、贝加尔湖气温指数对夏季长江中下游降水具有较好的预报能力, 可以作为夏季降水的潜在预报因子。

表 4 前冬、前春因子回报值与实际值的相关系数和均方根误差

Table 4 Correlation coefficients and root mean square errors between observation and hindcast by use of both pre-winter and pre-spring factors

预报方案	相关系数	均方根误差/mm
MLR	0.62	32.9
PC1 回归	0.73	27.4

6 小结和讨论

东亚夏季风的异常直接导致中国东部夏季降水的异常, 而长江流域是夏季大范围旱涝灾害发生频繁且严重的地区。影响我国夏季降水的因子有很多, 由于气候本身是变化的, 降水与因子之间的关系一般是非平稳的, 需要考虑因子影响的年代际背景。本文从外源强迫和大气环流等多方面收集影响汛期降水的因子, 通过评估选出与降水相关显著的冬、春季因子, 并检验其对降水的预报能力。主要结论如下:

(1) 影响因子与夏季降水的相关随着时间呈现出年代际的变化或正负的改变。海温、积雪等外强迫因子与长江流域汛期旱涝相关显著体现在前冬, 而大气环流因子与降水的相关显著阶段主要集中在前期春季。

(2) 冬季黑潮海温、青藏高原积雪以及贝加尔湖地表气温通过影响高低纬度季风环流系统进而对长江流域降水起作用, 是影响该地区夏季旱涝气候

变化的主导因子。上述因子在 20 世纪 70 年代末气候突变之后与夏季的大气环流存在相关, 对长江中下游夏季旱涝的预测具有指示意义。

(3) 历史回报结果表明, 前冬黑潮海温、青藏高原积雪和贝加尔湖气温指数在 20 世纪 70 年代末之后对夏季长江中下游降水具有较好的预报能力, 可以作为该地区夏季降水的潜在预报因子。

本文从诸多因子中选出对降水起关键作用的冬季因子, 对长江中下游地区汛期的预测具有潜在的应用意义。值得注意的是, 虽然加入春季因子后的预测值与观测值相关系数有所提高, 但是同号率稍有下降, 其中对 21 世纪趋势预测相反, 我们推测可能是由于 20 世纪 90 年代之后春季因子与降水的相关减弱造成。对于前冬因子在春季和夏季是否具有连续影响及其物理过程、是否还存在其它重要因子等问题仍需更多的讨论。

参考文献 (References)

- 卞林根, 林学椿. 2008. 南极海冰涛动及其对东亚季风和我国夏季降水的可能影响 [J]. 冰川冻土, 30 (2): 196 - 203. Bian Lin'gen, Lin Xuechun. 2008. Antarctica Sea-Ice Oscillation and its possible impact on monsoon of South Sea and China summer rainfall [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 30 (2): 196 - 203.
- 陈乾金, 高波, 李维京, 等. 2000. 青藏高原冬季积雪异常和长江中下游主汛期旱涝及其与环流关系的研究 [J]. 气象学报, 58 (5): 582 - 595. Chen Qianjin, Gao Bo, Li Weijing, et al. 2000. Studies on relationships among snow cover winter over the Tibetan Plateau and droughts/floods during Meiyu season in the middle and lower reaches of the Yangtze River as well as atmosphere/ocean [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 58 (5): 582 - 595.
- 陈兴芳, 宋文玲. 1994. 我国初夏降水的短期气候变化和成因分析 [J]. 气象, 20 (10): 17 - 21. Chen Xingfang, Song Wenling. 1994. The short-term climatic change of precipitation and its formation cause in early summer in China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 20 (10): 17 - 21.
- 陈兴芳, 宋文玲. 2000. 欧亚和青藏高原冬春季积雪与我国夏季降水关系的分析和预测应用 [J]. 高原气象, 19 (2): 214 - 223. Chen Xingfang, Song Wenling. 2000. Analysis of relationship between snow cover on Eurasia and Qinghai-Xizang Plateau in winter and summer rainfall in China and application to prediction [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 19 (2): 214 - 223.
- 邓伟涛, 孙照渤, 曾刚, 等. 2009. 中国东部夏季降水型的年代际变化及其与北太平洋海温的关系 [J]. 大气科学, 33 (4): 835 - 846. Deng Weitao, Sun Zhaobo, Zeng Gang, et al. 2009. Inter-decadal variation of summer precipitation pattern over eastern Chi-

- na and its relationship with the North Pacific SST [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (4): 835–846.
- 范可. 2006. 南半球环流异常与长江中下游夏季旱涝的关系 [J]. 地球物理学报, 49 (3): 672–679. Fan Ke. 2006. Atmospheric circulation anomalies in the Southern Hemisphere and summer rainfall over Yangtze River valley [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 49 (3): 672–679.
- 范可, 王会军, Choi Y J. 2007. 一个长江中下游夏季降水的物理统计预测模型 [J]. 科学通报, 52 (24): 2900–2905. Fan Ke, Wang Huijun, Choi Y J. 2007. A physical statistics forecasting model of the Yangtze River summer precipitation [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 52 (24): 2900–2905.
- 符淙斌, 曾昭美. 2005. 最近 530 年冬季北大西洋涛动指数与中国东部夏季旱涝指数之联系 [J]. 科学通报, 50 (14): 1512–1522. Fu Congbin, Zeng Zhaomei. 2005. The relationship between winter North Atlantic Oscillation index and summer eastern China dryness/wetness index in recent 530a [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 50 (14): 1512–1522.
- 高辉, 王永光. 2007. ENSO 对中国夏季降水可预测性变化的研究 [J]. 气象学报, 65 (1): 131–137. Gao Hui, Wang Yongguang. 2007. On the weakening relationship between summer precipitation in China and ENSO [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 65 (1): 131–137.
- 龚道溢. 2003. 北极涛动对东亚夏季降水的预测意义 [J]. 气象, 29 (6): 3–6. Gong Daoyi. 2003. Arctic Oscillation's significance for prediction of East Asian summer monsoon rainfall [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 29 (6): 3–6.
- He Jinhai, Zhou Bing, Wen Min, et al. 2001. Vertical circulation structure, interannual variation features and variation mechanism of western Pacific subtropical high [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 18 (4): 497–510.
- 黄嘉佑, 刘炯, 赵昕奕. 2004. 副高、极涡因子对我国夏季降水的影响 [J]. 大气科学, 28 (4): 517–526. Huang Jiayou, Liu Ge, Zhao Xinyi. 2004. The influence of subtropical high indexes and polar vortex indexes on the summertime precipitation in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (4): 517–526.
- 黄荣辉, 孙凤英. 1994. 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 [J]. 大气科学, 18 (2): 141–151. Huang Ronghui, Sun Fengying. 1994. Impacts of the thermal state and the convective activities in the tropical western warm pool on the summer climate anomalies in East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 18 (2): 141–151.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77: 437–472.
- 况雪源, 张耀存. 2006. 东亚副热带西风急流位置异常对长江中下游夏季降水的影响 [J]. 高原气象, 25 (3): 382–389. Kuang Xueyuan, Zhang Yaocun. 2006. Impact of the position abnormalities of East Asian subtropical westerly jet on summer precipitation in middle–lower reaches of Yangtze River [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25 (3): 382–389.
- 李可军, 向福元, 李建勇, 等. 2000. 中纬度地区的洪水与太阳活动关系的研究 [J]. 云南天文台台刊, (2): 34–38. Li Kejun, Xiang Fuyuan, Li Jianyong, et al. 2000. Relationship between solar activities and large flood in the middle latitude regions of the earth [J]. Publications of the Yunnan Observatoty (in Chinese), (2): 34–38.
- 刘炯, 张庆云, 孙淑清. 2008. 澳大利亚东侧环流及海温异常与长江中下游夏季旱涝的关系 [J]. 大气科学, 32 (2): 231–241. Liu Ge, Zhang Qingyun, Sun Shuqing. 2008. The relationship between circulation and SST anomaly East of Australia and the summer rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (2): 231–241.
- 陆日宇, 黄荣辉. 1998. 东亚–太平洋遥相关型波列对夏季东北亚阻塞高压年际变化的影响 [J]. 大气科学, 22 (5): 727–734. Lu Riyu, Huang Ronghui. 1998. Influence of East Asia/Pacific teleconnection pattern on the interannual variations of the blocking highs over the northeastern Asia in summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 22 (5): 727–734.
- 罗绍华, 金祖辉. 1986. 南海海温变化与初夏西太平洋副高活动及长江中、下游汛期降水关系的分析 [J]. 大气科学, 10 (4): 409–418. Luo Shaohua, Jin Zuhui. 1986. Statistical analyses for sea surface temperature over the South China Sea, behavior of subtropical high over the west Pacific and monthly mean rainfall over the Changjiang middle and lower reaches [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 10 (4): 409–418.
- 罗绍华, 金祖辉, 陈烈庭. 1985. 印度洋和南海海温与长江中下游夏季降水的相关分析 [J]. 大气科学, 9 (3): 314–320. Luo Shaohua, Jin Zuhui, Chen Lieting. 1985. The correlation analysis of Indian Ocean and sea surface temperature in South China Sea with summer precipitation over Yangtze River [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 9 (3): 314–320.
- 闵绍忠, 孙照渤, 曾刚. 2000. 南海和印度洋海温异常对东亚大气环流及降水的影响 [J]. 南京气象学院学报, 23 (4): 542–548. Min Jinzhong, Sun Zhaobo, Zen Gang. 2000. Effect of South China Sea and Indian Ocean SSTA on East Asian circulation and precipitation [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 23 (4): 542–548.
- Nan Sulan, Li Jianping. 2003. The relationship between the summer precipitation in the Yangtze River valley and the boreal spring Southern Hemisphere annular mode [J]. Geophysical Research Letters, 30: 2266, doi: 10.1029/2003GL018381.
- 施能, 鲁建军. 1995. 北半球 4 月份 500 hPa 月平均场遥相关型及其与我国降水异常的关系 [J]. 南京气象学院学报, 18 (3): 324–

330. Shi Neng, Lu Jianjun. 1995. April Northern 500hPa mean field teleconnection patterns with their relation to rainfall in China [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 18 (3): 324 - 330.
- 时珍玲. 1996. 九十年代以来江淮流域夏季典型旱涝成因分析 [J]. *气象*, 22 (9): 35 - 38. Shi Zhenling. 1996. The cause analysis of the typical drought and flood years in the area between the Yangtze River and Huaihe River in summer since 1990 [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 22 (9): 35 - 38.
- Smith T M, Reynolds R W, Peterson T C, et al. 2008. Improvements to NOAA's historical merged land-ocean surface temperature analysis (1880 - 2006) [J]. *J. Climate*, 21: 2283 - 2296.
- 孙建奇, 王会军. 2005. 北极涛动与太平洋年代际振荡的关系 [J]. *科学通报*, 50 (15): 1648 - 1653. Sun Jianqi, Wang Huijun. 2005. The relationship between AO and Pacific Decadal Oscillation [J]. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 50 (15): 1648 - 1653.
- Sun Xiurong, Chen Longxun, He Jinhai. 2001. Interannual variation of index of East Asian land-sea thermal difference and its relation to monsoon circulation and rainfall over China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 15 (1): 71 - 85.
- 唐卫亚, 孙照渤, 谭桂容. 2008. 印度洋偶极子与中国南方夏季降水的可能联系 [J]. *南京气象学院学报*, 31 (6): 836 - 843. Tang Weiya, Sun Zhaobo, Tan Guirong. 2008. Effect of Indian Ocean dipole on rainfall anomaly in South of China [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 31 (6): 836 - 843.
- Wang Huijun. 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 18 (3): 376 - 386.
- 王遵娅, 丁一汇. 2009. 夏季亚洲极涡的长期变化对东亚环流和水汽收支的影响 [J]. *地球物理学报*, 52 (1): 20 - 29. Wang Zunya, Ding Yihui. 2001. Impacts of the long-term change of the summer Asian polar vortex on the circulation system and the water vapor transport in East Asia [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 52 (1): 20 - 29.
- 武炳义, 卞林根, 张人禾. 2004. 冬季北极涛动和北极海冰变化对东亚气候变化的影响 [J]. *极地研究*, 16 (3): 211 - 220. Wu Bingyi, Bian Lin'gen, Zhang Renhe. 2004. Effects of the winter AO and the Arctic sea ice variations on climate variation over East Asia [J]. *Chinese Journal of Polar Research* (in Chinese), 16 (3): 211 - 220.
- 徐康, 祝从文, 何金海. 2011. 近 50 年环贝加尔湖区变暖对中国华北夏季降水的影响机理 [J]. *高原气象*, 30 (2): 309 - 317. Xu Kang, Zhu Congwen, He Jinhai. 2011. Impact of the surface air temperature warming around Lake Baikal on trend of summer precipitation in North China in the past 50 years [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 30 (2): 309 - 317.
- 薛峰, 王会军, 何金海. 2003. 马斯克林高压和澳大利亚高压的年内变化及其对东亚夏季风降水的影响 [J]. *科学通报*, 48 (3): 287 - 291. Xue Feng, Wang Huijun, He Jinhai. 2003. Interannual variability of Mascarene high and Australian high and their influences on summer rainfall over East Asia [J]. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 48 (3): 287 - 291.
- 张庆云, 吕俊梅, 杨莲梅, 等. 2007. 夏季中国降水型的年代际变化与大气内部动力过程及外强迫因子关系 [J]. *大气科学*, 31 (6): 1290 - 1300. Zhang Qingyun, Lü Junmei, Yang Lianmei, et al. 2007. The interdecadal variation of precipitation pattern over China during summer and its relationship with the atmospheric internal dynamic processes and extra-forcing factors [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 31 (6): 1290 - 1300.
- 张庆云, 陶诗言. 1998. 亚洲中高纬度环流对东亚夏季降水的影响 [J]. *气象学报*, 56 (2): 199 - 211. Zhang Qingyun, Tao Shiyuan. 1998. Influence of Asian mid-high latitude circulation on East Asian summer rainfall [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 56 (2): 199 - 211.
- 张琼, 刘平, 吴国雄. 2003. 印度洋和南海海温与长江中下游旱涝 [J]. *大气科学*, 27 (6): 992 - 1006. Zhang Qiong, Liu Ping, Wu Guoxiong. 2003. 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 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 27 (6): 992 - 1006.
- 张琼, 吴国雄. 2001. 长江流域大范围旱涝与南亚高压的关系 [J]. *气象学报*, 59 (5): 569 - 577. Zhang Qiong, Wu Guoxiong. 2001. The large area flood and drought over Yangtze River valley and its relation to the South Asia high [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 59 (5): 569 - 577.
- 张天宇, 孙照渤, 李忠贤, 等. 2007. 春季黑潮区海温异常与我国夏季降水的关系 [J]. *热带气象学报*, 23 (2): 189 - 195. Zhang Tianyu, Sun Zhaobo, Li Zhongxian, et al. 2007. Relation between spring Kuroshio SSTA and summer rainfall in China [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 23 (2): 189 - 195.
- 赵平, 陈军明, 肖栋, 等. 2008. 夏季亚洲-太平洋涛动与大气环流和季风降水 [J]. *气象学报*, 66 (5): 716 - 729. Zhao Ping, Chen Junming, Xiao Dong, et al. 2008. Summer Asian-Pacific oscillation and its relationship with atmospheric circulation and monsoon rainfall [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 66 (5): 716 - 729.
- 赵振国, 廖荃荪. 1991. 南方涛动与我国夏季降水 [J]. *气象*, 17 (6): 33 - 37. Zhao Zhenguo, Liao Quansun. 1991. Southern Oscillation and summer rainfall in China [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 17 (6): 33 - 37.
- Zhou Tianjun, Gong Daoyi, Li Jian, et al. 2009. Detecting and understanding the multi-decadal variability of the East Asian Summer Monsoon—Recent progress and state of affairs [J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 18 (4): 455 - 467.
- 朱玉祥, 丁一汇, 徐怀刚. 2007. 青藏高原大气热源和冬春积雪与中国东部降水的年代际变化关系 [J]. *气象学报*, 65 (6): 946 - 958. Zhu Yuxiang, Ding Yihui, Xu Huaigang. 2007. The decadal relationship between atmospheric heat source of winter and spring snow over Tibetan Plateau and rainfall in East China [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 65 (6): 946 - 958.