

张世轩, 支蓉, 封国林, 等. 2012. 中国东部地区前冬季节来临早晚与夏季降水的关系探究 [J]. 大气科学, 36 (3): 564–578, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11106. Zhang Shixuan, Zhi Rong, Feng Guolin, et al. 2012. The relationship between the onset date of preceding winter and following summer rainfall in eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (3): 564–578.

中国东部地区前冬季节来临早晚与夏季降水的关系探究

张世轩¹ 支蓉² 封国林² 沈柏竹^{1,3}

1 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

2 国家气候中心, 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081

3 吉林省气象科学研究所, 长春 130062

摘 要 利用 NCEP/NCAR1961~2010 年逐日平均再分析资料, 对中国东部地区前冬季节来临时间进行划分, 并探讨中国东部地区平均前冬季节来临时间偏早/偏晚与中国东部夏季降水之间的关系, 研究发现: (1) 中国东部前冬来临时间与中国东部夏季降水存在两个正相关带和两个负相关带, 且与其夏季雨带的位置大致吻合。正相关带分别位于华南、西南以及黄河以北的 39°N~42°N 一带、东北中南部等地区, 负相关带分别位于黄淮、江淮以及长江中下游一带和 42°N 以北的大部分地区。(2) 统计特征表明: 中国东部地区前冬季节来临时间偏早的年份, II 类雨型发生频率大于其气候发生频率, I 类和 III 类雨型发生频率则比气候频率偏小; 前冬季节来临偏晚的年份, I 类雨型发生的频率偏大, 而 II 类和 III 类雨型发生频率偏小, 典型年份的合成分析结果与雨带类型的统计结果相一致。反之, 从雨型与前冬来临时间的对应关系统计分析发现, I 类雨型年份, 中国东部地区前冬季节来临时间显著偏晚年份占优, 而 II 类雨型年份, 前冬季节来临显著偏早年份占优, III 类雨型年份对应关系不显著。总体而言, 季节来临早晚与雨带分布表现出一定的对应关系。(3) 前冬来临早晚对应了不同的前期和同期海温、水汽和环流型, 受海—气相互作用的影响, 造成降水空间分布的不同。

关键词 季节划分 夏季雨型 空间分布 大气环流 汛期降水

文章编号 1006-9895 (2012) 03-0564-15

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11106

The Relationship between the Onset Date of Preceding Winter and Following Summer Rainfall in Eastern China

ZHANG Shixuan¹, ZHI Rong², FENG Guolin², and SHEN Baizhu^{1,3}

1 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

2 Laboratory for Climate Studies of China Meteorological Administration, National Climate Center, Beijing 100081

3 Institute of Meteorological Sciences of Jilin Province, Changchun 130062

Abstract By using NCEP/NCAR reanalysis datasets, the starting dates of preceding winters in eastern China have

收稿日期 2011-06-07, 2011-11-29 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40875040、41105055, 全球变化重大研究计划 2012CB955902, 公益性行业 (气象) 科研专项 GY-HY201106016

作者简介 张世轩, 男, 1986 年出生, 硕士, 主要从事数值天气预报和气候预测等研究。E-mail: wanderzhangshiyu@163.com

通讯作者 支蓉, E-mail: z_rongphy@126.com

been divided from 1961 to 2010, the authors investigate the relationship between the onset date of preceding winter and the following summer precipitation in eastern China. Results indicate that there are two positive correlation bands and two negative correlation bands. The four bands are corresponding with the main rainbelts in eastern China in summer. The positive ones are located in South China, Southwest China, the region north of the Yellow River with latitudes between 39°N and 42°N , and central and southern Northeast China. The negative ones are in Huanghuai, Jianghuai, the middle and lower reaches of the Yangtze River, and most regions north of latitude 42°N . The statistical results show that the frequency of rainfall pattern II is larger than that of the climate state, those for both rainfall patterns I and III are less than that of the climate state when earlier preceding winters come. While for later winters, that for pattern I is larger than that of the climate state, those for both rainfall patterns II and III are much smaller than that of the climate state. The rainbelt outcomes from the statistics and composition analysis in the typical years are consistent with each other. The statistical results show that the later preceding winters are prime when it is pattern I, earlier winters for pattern II, and there is not significant relationship between the winter starting dates and pattern III. In a word, the patterns of precipitation are closely related to the starting dates of the seasons. The different starting dates of winters are corresponding to different air-sea interactions which result in different patterns of precipitation.

Key words season division, summer rainfall patterns, spatial distribution, atmospheric circulation, summer rainfall

1 引言

中国地处东亚季风区, 各种天气气候现象, 尤其是夏季旱涝的产生都与季风活动有着密切的联系(赵汉光和张先恭, 1996)。东亚季风对雨带影响的主要特征表现为: 随季风推进夏季雨带从南向北依次发展。受大气环流及季风等年际变化的影响, 雨型位置亦呈现明显的年际变化(廖荃荪等, 1981; 赵振国, 1996, 1999; 魏凤英, 2007)。

早在 20 世纪 30 年代, 中国气象学家竺可桢(1934)便提出东亚夏季风对中国降水的影响, 之后涂长望和黄仕松(1944)研究了东亚季风的进退与中国降水季节内变化的关系。20 世纪 80 年代以来, 随着观测资料的增加, 气象学者(郭其蕴, 1983; 徐淑爱, 1988; 孙淑清和孙柏民, 1995; 赵平和周自江, 2005; 蔡学湛等, 2009)对东亚季风及其与夏季降水的关系有了更为深入的研究; 也有学者(陈隽和孙淑清, 1999a, 1999b; 布和朝鲁和纪立人, 1999; 张庆云等, 2003; 高辉, 2007)发现冬季风异常对全球大气环流以及热带海温的变化有十分重要的影响。此外, Ji et al. (1997)、纪立人等(1998)、Chen et al. (2000)、陈文等(2008)通过数值模式等手段, 从海—气耦合等角度研究了季风系统的动力过程以及冬、夏季风之间的相互作用, 进一步加深了季风对中国夏季降水影响机理的认识。

上述研究表明, 季风的强弱变化对中国夏季降

水的多寡具有良好的表征作用, 但这种季风与夏季降水关系的探究, 主要是通过将季风指数异常变化“投影”到大气环流和海温的变化上, 间接地分析季风与夏季降水之间的关系。而季风的产生和爆发与大气环流的变化是密不可分的(Yeh et al., 1959), 正是由于大气环流的季节变化引起季风等改变, 进而对夏季雨带位置以及降水形势产生影响。那么能否从前期大气环流指标的变化入手, 直接将其与后期夏季降水以及雨带类型分布建立联系? 本文将基于这一问题, 通过选用季节来临时间这一表征大气环流短期气候变动的客观指标(曾庆存和张邦林, 1998), 采取多要素对这一指标进行描述, 使之能够包含大气环流和季风变化的相关信息, 然后分析其与中国东部夏季降水之间的联系, 为夏季汛期降水的预测提供参考。

2 资料和方法

2.1 资料

本文研究资料包括 NCEP/NCAR 提供的 1960~2010 年日平均再分析资料(Kalnay et al., 1996), 主要包括地面温度、气压、相对湿度、经向风和纬向风以及垂直方向 1000 hPa 到 10 hPa 共 17 层等压面位势高度和风速资料, 分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$; 中国气象局气象信息中心资料室提供的中国 160 站月平均降水资料以及国家气候中心预测室提供的中国东部降水分型资料(1961~2010 年)。

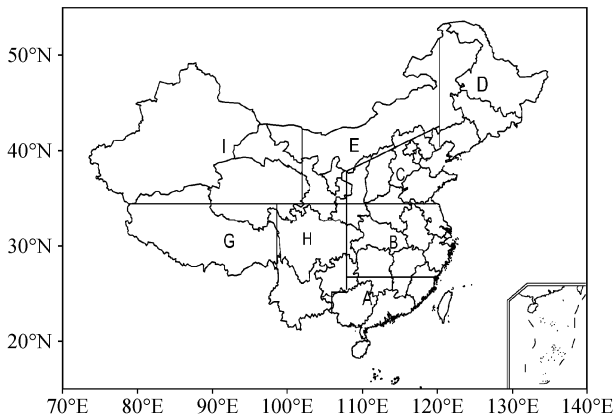


图1 中国气候分区

Fig. 1 The climatic zone of China

2.2 区域划分

为了对区域前冬季节来临时间的变化进行研究,采用王遵娅(2004)提出的分区方法,将中国分为8个区域(图1)。图1中斜线大致为干旱/半干旱区与湿润/半湿润区的分界线(施雅风,2003),上述斜线结合 107.5°E 和 120°E 的竖线可将中国划分为东、西两部分,东部按照季风雨带的推进又划分为A(华南)、B(长江中下游)、C(华北)、D(东北)四部分;西南部以 97.5°E 为界分为G(青藏高原)和H(西南)两部分,西北地区以 102.5°E 为界分为I(西北西)和E(西北东)。本文将A、B、C、D四个区作为研究区,从中国东部整体区域出发探讨其季节来临时间与夏季降水之间的关系。

2.3 区域平均计算方法

本文所使用的区域平均计算方法参考国际上公认的Jones网格面积加权平均法(Jones et al., 1990),如式(1)所示:

$$S_k = \sum_{i=1}^n \cos(W_i) S_{ik} / \sum_{i=1}^n \cos(W_i), \quad (1)$$

上式中 S_{ik} 表示第 i 个网格第 k 年的值; W_i 表示第 i 个网格上的纬度值; S_k 表示某区域第 k 年的区域平均值; n 为某区域包含的格点数目。

3 季节划分方法

传统的季节划分研究大都采用候平均气温划分方法(张宝堃,1934;朱炳海,1962;张家诚和林之光,1985;缪启龙和王勇,2007),这种划分方法虽

有实用价值,但单凭这样一个气候概略的数字还是不能具有预告意义(刘匡南和邬鸿勋,1956),因而具有一定的局限性。曾庆存和张邦林(1992)、张邦林和曾庆存(1998)、薛峰等(2002)提出一种相似性度量季节划分方法,它从环流转变角度去做季节划分,修正了传统方法存在的一些缺陷,使划分结果更加客观和定量化。近来,孙树鹏等(2011)和侯威等(2011)提出一种非线性相似度量方法,采用多要素构造气候状态变量进行季节划分,对比分析发现多要素季节划分比曾庆存和张邦林(1992)采用的单一要素季节划分更能准确地反映气候状态的季节变化特征,结果也更接近实际大气的变化。

基于以上研究,本文将孙树鹏等(2011)和侯威等(2011)提出的用多要素构造气候状态变量的观点应用于相似性度量季节划分方法上,选取气压、温度、相对湿度和风速这几个与季节变化联系密切的量来构造表征季节变化的气候态变量,提出一种多要素相似度量季节划分方法,具体操作步骤扼要介绍如下:

首先,对已有的日平均气压、温度、相对湿度和风速(分别用 p 、 T 、 R_H 、 U 、 V 表示)再分析资料进行候平均处理(以5天为一候,一年为73候),得到各个要素的候平均资料序列;然后,利用上述要素在空间(θ 、 λ 、 ρ 、 t)(θ 、 λ 、 ρ 为空间变量, t 为时间变量)上构造一个气候态变量 $\mathbf{F}(t)$,其表达式如下:

$$\mathbf{F}(t) = (p, T, R_H, U, V) \quad (2)$$

可见, $\mathbf{F}(t)$ 是包含多气象要素的随时间变化的矢量场。参照曾庆存和张邦林(1998)的研究,选取1月和7月的平均场作为冬季和夏季的典型场(分别记为 $\mathbf{F}_w$ 和 $\mathbf{F}_s$),消去其两者的公共部分 $\mathbf{F}^* = (\mathbf{F}_w + \mathbf{F}_s)/2$,得到典型场的偏差量 $\mathbf{F}'_w$ 和 $\mathbf{F}'_s$ 。此外,对逐年每一候的场 $\mathbf{F}(t)$ 亦计算其偏差量 $\mathbf{F}'(t)$ ($\mathbf{F}'(t) = \mathbf{F}(t) - \mathbf{F}^*$)。计算偏差的目的主要是消除 $\mathbf{F}(t)$ 、 $\mathbf{F}_w$ 及 $\mathbf{F}_s$ 之间存在的相似性,便于区分其两两间的差异,突出季节变化。

其次,计算各个时段的偏差量 $\mathbf{F}'(t)$ 与 $\mathbf{F}'_w$ (或 $\mathbf{F}'_s$)的相似系数 $R(t)$:

$$R(t) \equiv (\mathbf{F}'(t), \mathbf{F}'_w) / [\|\mathbf{F}'(t)\| \cdot \|\mathbf{F}'_w\|]. \quad (3)$$

(3) 式右端各变量均为矢量，内积 $(\mathbf{F}'(t), \mathbf{F}'_w)$ 即为矢量的标量积，范数 $\|\mathbf{F}'(t)\|^2 = (\mathbf{F}'(t), \mathbf{F}'(t))$ 。 $R(t)$ 表征某一时段（本文取候）实际场与典型的冬季（或夏季）场的相似程度，当实际场与典型场达到一定的相似度时（即 $R(t)$ 达到一定量值），便可将这一时间点 t 定义为季节的开始时间。从 $\mathbf{F}'_w$ 与 $\mathbf{F}'_s$ 的定义及计算可以看出， $\mathbf{F}'_w$ 与 $\mathbf{F}'_s$ 反相，其相似系数为 -1 ，因而只需用 $\mathbf{F}'(t)$ 与 $\mathbf{F}'_w$ 的相关序列便可划分出四季开始时间。

最后，选取划分标准进行四季划分。曾庆存和张邦林 (1992)、张邦林和曾庆存 (1998) 最初取 $R(t) > \delta_0$ 和 $R(t) < -\delta_0$ 分别对应于冬季和夏季，而以 $-\delta_0 \leq R(t) \leq \delta_0$ 划分春季和秋季（其中 $\delta_0 = 0.5$ ），这一标准划分的过渡季节（即春季和秋季）较短，不符合实际；薛峰等 (2002) 从实际应用出发，根据 $R(t)$ 的投影角 $\phi(t) = \arccos R(t)$ 给出另一划分标准，即当 $0 \leq \phi(t) < \pi/4$ 为冬季开始、 $3\pi/4 < \phi(t) \leq \pi$ 为夏季开始、 $\pi/4 \leq \phi(t) \leq 3\pi/4$ 为春季或秋季开始，这一标准与传统方法定义的季节比较接近。因此，本文采用该标准划分得到冬季来临时间序列，并进行相关分析。需要指出的是，从构造的气候态变量的定义 $\mathbf{F}(t) = (p, T, R_H, U, V)$ 可以看出，这一气候态变量综合考虑了气压、温度和风速，而这些量亦是表征季风变化的主要因素。因此，本文划分所得的季节来临时间序列可能对季风变化有一定的表征作用，对其两者间的关系将在下文中做相关探讨。

4 中国东部地区季节来临时间与夏季降水之间的联系

4.1 中国东部近 50 年前冬季节来临时间的变化

利用第 3 节的季节划分结果，采用式 (1) 计算中国东部地区（即 A、B、C、D 四个区域总和）1961~2010 年前冬季节来临时间的区域平均值，得到区域平均前冬来临时间序列。这里的 1961~2010 年前冬指的是 1960~2009 年的冬季。

图 2 是 1961~2010 年中国东部 4 个区域平均前冬季节来临时间的年际变化，图中天数自 1 月 1 日算起，如第 315 天=11 月 12 日，其中前冬季节来临的气候平均 (1971~2000) 日期是 11 月 12 日 (第 315 天)，标准差为 3.8 天，这一冬季起始时间与实际情况也较为相符，说明了本文季节划分方法

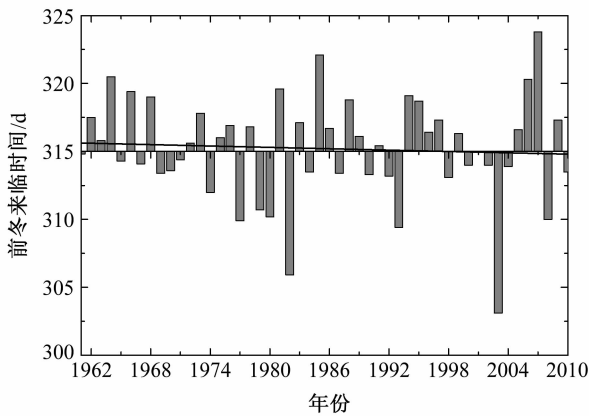


图 2 中国东部地区平均前冬来临时间序列的年际变化 (单位: d)。水平线: 气候 (1971~2000 年) 平均前冬来临时间 (11 月 12 日); 直线: 该序列的线性趋势; 柱状图: 1961~2010 年前冬来临时间

Fig. 2 Interannual variations of the onset dates of preceding winter over eastern China from 1961 to 2010 (bars). The horizontal line represents the climatological mean (1971–2000) onset dates of winters; the solid line represents the linear trend of the series

的合理性。由图 2 可见，中国东部前冬季节来临最早的年份是 2002 年 (10 月 30 日)，最晚的年份是 2006 年 (11 月 21 日)。最早与最晚年相差达到 20 多天，季节来临时间的年际变率较大。利用施能等 (1995) 的方法计算得到该序列趋势系数为 -0.064 ，表明中国东部平均前冬来临时间有弱的线性提前的趋势 (图 2 中直线所示)，这与中国近 50 年冬季来临时间变化趋势一致 (张世轩等, 2011)。

对 1961~2010 年中国东部地区平均前冬来临时间序列进行标准化。考虑到合成分析的统计显著性检验，本文以标准化值 $\sigma = \pm 1$ 为界挑选典型偏早和偏晚年进行分析，即 $\sigma \leq -1$ 的年份为典型偏早年，而 $\sigma \geq 1$ 的年份为典型偏晚年。统计可得表 1。

从表 1 中可以看出典型偏早年份有 7 年，典型偏晚年份有 9 年，在研究时段中 (1961~2010 年) 所占的比例分别为 7/50 和 9/50。

表 1 中国东部地区前冬季节来临时间典型变化年份
Table 1 The typical change years in the onset dates of preceding winters in eastern China

典型偏早年				典型偏晚年				
1977	1979	1980	1982	1964	1966	1968	1981	1985
1993	2003	2008		1988	1994	2006	2007	

4.2 前冬来临时间与季风的关系

理论上而言,冬季来临时间与季风强度及季风转换时间等存在一定的联系。但前冬来临早晚与冬季风强弱之间是否具有一致的变化,两者是否存在稳定的正(负)相关关系?本节针对这一问题,采用滑动相关分析方法(Bell, 1977; 施能等, 1996),选滑动窗(Parthasarathy et al., 1991) $m=11$,求取前冬来临早晚与东亚冬、夏季风指数的滑动相关系数,进一步探讨它们之间的相关关系在近 50 年的变化。本节所采用的东亚季风强度指数是根据李建平和曾庆存(2005)提出的标准计算所得。

图 3 为中国东部地区平均前冬季节来临时间序列与东亚季风指数的 11 年滑动相关系数的演变,可以看到前冬来临时间与冬季风及夏季风指数间主要以正相关为主,但相关关系随年代有较大变化,总体呈现强、弱相关交替的特征。前冬来临时间与冬季风指数在 20 世纪 70 年代以前、20 世纪 80 年代中后期及 20 世纪 90 年代中期三个时段相关关系总体较弱,而在 20 世纪 80 年代初、20 世纪 80 年代末至 90 年代初、20 世纪 90 年代末和 21 世纪初四个时段内为显著正相关关系,其中 21 世纪初正相关关系最为显著,且在这一时段内相关系数呈增大趋势。另外,在 20 世纪 70 年代中期以前,相关关系出现一次正、负、正交替变化的过程,但总体相关关系很弱(图 3a)。前冬来临时间与东亚夏季风指数间的相关系数亦呈现一种年代际强、弱交替的演变特征,在 20 世纪 60 年代、70 年代初、70 年代末、80 中期以及 90 年代初这几个时段内,前冬来临时间与夏季风强度之间总体相关关系较弱,且

有负相关关系出现,而在其余时段则呈现一种较为显著的正相关关系,最显著的时段为 20 世纪 70 年代中期。需要指出的是,从 20 世纪 90 年代中期至今,前冬来临时间与夏季风指数呈现出稳定的正相关关系(图 3b)。另外,前冬来临时间与冬季风指数的相关系数呈强、弱交替变化的时段和它与夏季风指数的相关系数呈强、弱交替变化的时段并不十分对应。

由以上分析可见,前冬来临时间与东亚冬(夏)季风指数之间存在一定的相关关系,但这种关系并不是稳定的显著正相关,而是随年代际相关系数呈强、弱交替变化,且在某些年代还存在正、负相关交替变化的特点。这种相关关系的年代际变化可能与天气气候的年代际变化相联系。另外,受地形的影响各地季节来临时间的早晚亦有所不同,而季风强弱对季节变化的影响无法包含地形因素的作用,这也可能导致两者相关关系变化。因此,尽管东亚冬季风对前冬来临时间有着重要的影响,但这种影响存在一定的不确定性,对于这种不确定性产生的原因可能需要进一步研究。

4.3 前冬季节来临早晚与夏季降水之间的相关分析

为了探究前冬季节来临早晚与夏季降水之间的联系,本文对图 2 中的时间序列与中国 160 站 1961~2010 年夏季降水做相关,得到如下的相关系数空间分布图。

图 4 中阴影部分是通过显著性水平 5% 的显著性检验的区域,图 4 显示有两个正相关带和两个负相关带,正相关带分别位于华南、西南一带以及

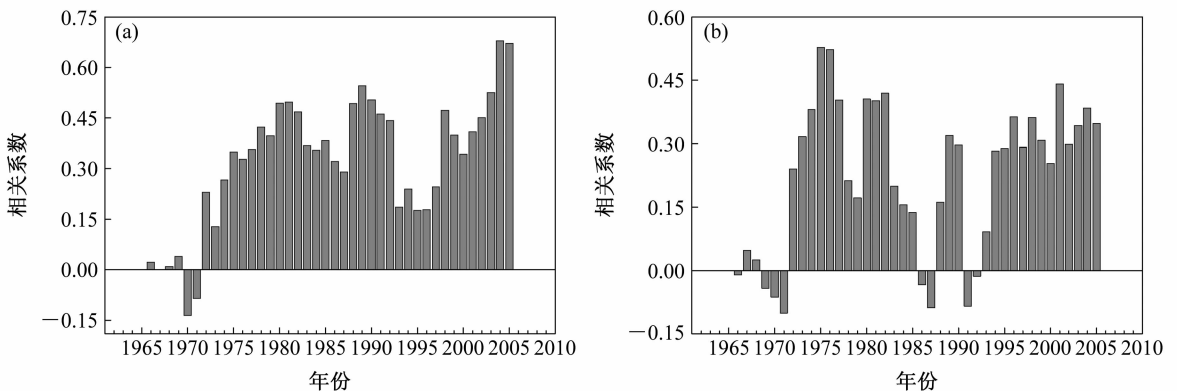


图 3 前冬来临时间序列与东亚 (a) 冬季风和 (b) 夏季风指数相关系数的变化 (滑动窗 11 年)

Fig. 3 Variation of correlation coefficients between the onset dates of preceding winters and (a) the East Asia winter monsoon index, (b) the East Asia summer monsoon index (with sliding windows of 11 years)

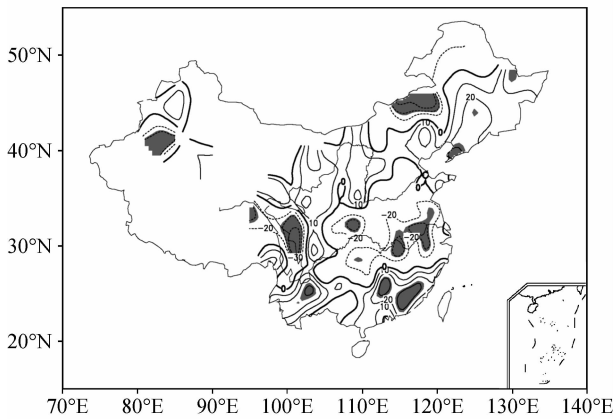


图 4 1961~2010 年前冬来临时间偏差与 160 站夏季（6~8 月）降水相关系数（ $\times 100$ ）。虚线：负值；阴影：通过了显著性水平 5% 的显著性检验的区域

Fig. 4 The correlation coefficients (values are amplified by 100 times) between the onset dates of preceding winters and summer rainfall at 160 stations for the period 1961–2010. Dotted lines represent negative values, and areas with significance level of 5% are shaded

黄河以北的 $39^{\circ}\text{N}\sim 42^{\circ}\text{N}$ 一带、东北中南部等地区，表明东部地区平均前冬季节来临偏晚时，这些地区降水偏多，反之则偏少；而负相关带分别位于黄淮、江淮以及长江中下游一带和 42°N 以北的大部分地区，表明东部地区平均前冬季节来临偏早时，这些地区降水偏多，反之则偏少。

此外，上述 4 个相关带的分布，其中一个典型的负相关区域位于江淮以及长江中下游地区，尤其是长江中下游地区，中心相关系数可达 -0.3 以上（通过了显著性水平 5% 的显著性检验），而这一显著负相关区域与 II 类雨带所在位置有着类似的分布形势。长江以南的华南地区为一个典型的正相关区域，中心值可达 0.3 以上（通过了显著性水平 5% 的显著性检验），与 III 类雨型的位置也正好吻合。另一个较为显著的正相关区域位于华北和东北地区，中心位置在华北中部以及东北南部，与 I 类雨型的位置也大致吻合，说明前冬季节来临早晚与中国东部夏季降水之间存在对应关系。

4.4 中国东部平均前冬季节来临早晚与雨带的关系

从上一节的相关分析发现，中国东部地区平均前冬季节来临早晚与夏季降水存在一定的联系，为进一步分析它们两者间的关系，对 4.1 节所挑选出的季节来临时间典型变化年份与廖荃荪等（1981）

提出的三类雨带类型的对应关系进行统计分析。而 1961~2010 年中 I 类雨型有 15 年，II 类雨型有 19 年，III 类雨型有 16 年（表 2），三种雨型发生的频率分别为 $p_{\text{I}}=0.3(15/50)$ 、 $p_{\text{II}}=0.38(19/50)$ 、 $p_{\text{III}}=0.32(16/50)$ 。

表 2 1961~2010 年中国东部夏季雨带类型

Table 2 The rainfall patterns in eastern China from 1961 to 2010

雨型	年份
I 类	1961 1964 1966 1967 1973 1976 1977 1978 1981 1985 1988
	1992 1994 1995 2004
II 类	1962 1963 1965 1971 1972 1975 1979 1982 1984 1989 1990
	1991 2000 2003 2005 2007 2008 2009 2010
III 类	1968 1969 1970 1974 1980 1983 1986 1987 1993 1996 1997
	1998 1999 2001 2002 2006

对 1961~2010 年中国东部前冬季节来临时间序列与夏季雨型序列做相关，其相关系数为 -0.23 （通过了显著性水平 10% 的显著性检验），说明季节来临时间序列与雨型也具有一定的相关性，据此对 4.1 节所选出的季节来临偏早和偏晚的典型年所对应的夏季雨带进行统计。

表 3 是对中国东部地区前冬来临时间偏早和偏晚的典型年对应的当年夏季雨带类型的统计。统计结果表明，中国东部地区前冬季节来临时间偏早的年份，II 类雨型发生频率为 $0.57(4/7)$ ，比 II 类雨型的气候发生频率（ p_{II} ）大 0.19 ，I 类和 III 类雨型发生频率分别为 $0.14(1/7)$ 和 $0.29(2/7)$ ，分别比气候发生频率（ p_{I} 与 p_{III} ）偏小 0.16 和 0.04 ，说明前冬季节来临偏早年份，雨带类型偏向于 II 类，其次是 III 类（接近于气候频率），而 I 类雨带偏少，也即前冬季节来临偏早的情况下，夏季降水主要集中在黄淮流域、长江中下游一带，长江以南的地区夏季降水也有偏多趋势，而黄河以北大部分地区降水偏少。前冬季节来临偏晚的年份，I 类雨型发生频率为 $0.67(6/9)$ ，比其气候发生频率（ p_{I} ）大 0.37 ，III 类雨型为 $0.22(2/9)$ ，小于其气候发生频率（ p_{III} ），II 类雨型发生频率为 $0.11(1/9)$ ，明显小于其气候频率（ p_{II} ），表明黄河以北大部分地区以及华南等地降水偏多的频率较大，而江淮地区和长江中下游地区降水偏少。此外，季节来临早晚与 I 类和 II 类雨型的对应要比 III 类雨型明显。

表 3 中国东部地区前冬来临早晚与夏季雨带类型的对应关系

Table 3 The years when the preceding winters start earlier/ later and the corresponding summer rainfall patterns

	典型偏早年				典型偏晚年			
I 类	1977				1964	1966	1981	1985 1988
					1994			
II 类	1979	1982	2003	2007				
	2008							
III 类	1980	1993			1968	2006		

为进一步说明季节来临时间与雨型之间的对应关系,反之从 3 类雨型与季节来临时间变化的关系进行分析。同样如表 3 所示,1961~2010 年中国东部夏季雨带类型所对应的前冬季节来临典型偏早和偏晚年份表明, I 类雨型年份,中国东部地区前冬季节来临时间典型偏早年份为 1 年,典型偏晚年份为 6 年,分别占季节来临典型变化年份的 1/16 和 6/16,可见偏晚年份占优;而 II 类雨型年份,前冬季节来临典型偏早年份为 4 年(所占比例为 4/16),典型偏晚年份为 1 年(所占比例为 1/16),偏早年份占优; III 类雨型年份典型偏早和偏晚年份都为 2 年(所占比例都为 2/16),对应关系不显著。上述统计结果从反面对前述前冬来临早晚与雨带类型间的对应关系进行了佐证,说明季节来临早晚与雨型之间有一定的对应关系:季节来临时间偏早年份 I 类雨型发生频率较大,而偏晚年份 II 类雨型的发生频率较大,反之,仍然有较好的对应关系,另外, III 类雨型对应没有 I 类和 II 类明显。

4.5 中国东部平均前冬季节来临早晚对应的夏季降水合成分析

为进一步表征季节来临时间与夏季降水的空间对应形势,本节将前冬季节来临时间偏早和偏晚年份的夏季降水(6~8 月)距平百分率进行合成(图 5)。由图 5a 可以看出前冬季节来临偏早的年份,雨带的位置主要在江淮和长江中下游大部分地区,长江中下游以南的少部分地区以及华北西北部、东北西北部等少部分地区降水也偏多,而华南大部分地区以及黄河以北大部分地区降水偏少,总体表现出 II 类雨型降水的特点。图 5b 显示前冬季节来临偏晚的年份,夏季降水偏多中心主要在黄河以北大部分地区以及华南大部分地区一带,江淮大部分地区偏早,中心位置位于长江中下游一带;另一个降

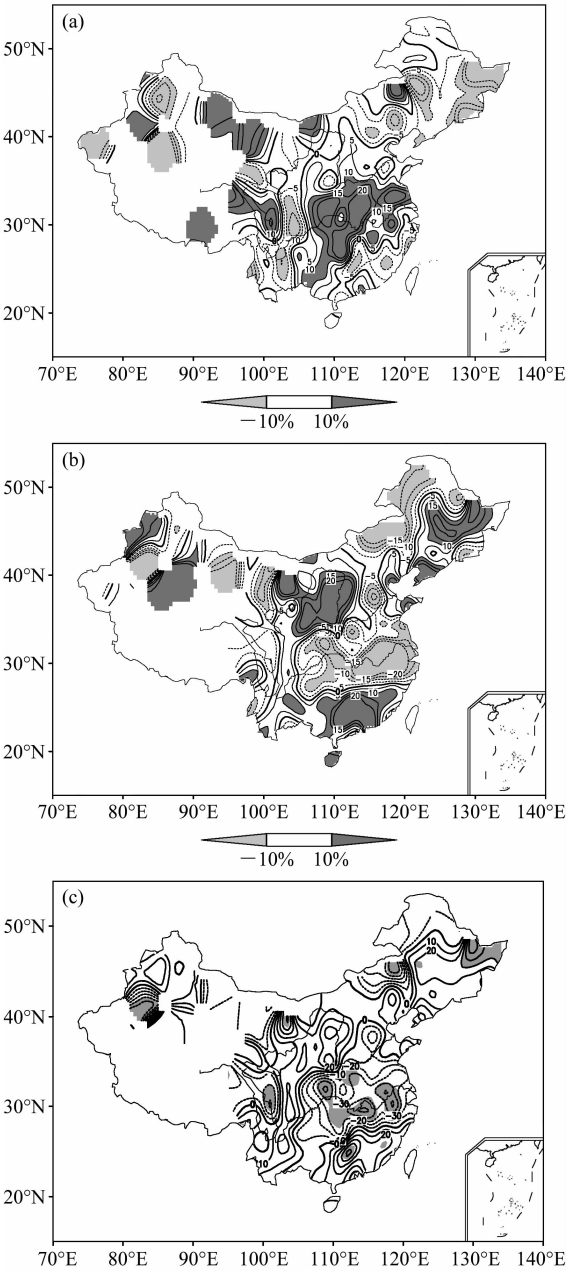


图 5 前冬季节来临时间 (a) 偏早和 (b) 偏晚夏季(6~8 月)降水百分率合成图和 (c) 偏晚—偏早年份差值图及其 t 统计分布检验(阴影:通过了显著性水平 5% 的显著性检验)。实、虚线:正、负距平; (a)、(b) 浅、深阴影:降水百分率小于 -10%、大于 10% 的地区

Fig. 5 The percentage anomalies of summer precipitation in the years when the preceding winters start (a) earlier and (b) later, (c) the difference between (b) and (a) and its t -type statistics distribution (shaded areas: with significance level of 5%). The solid (dashed) lines indicate the positive (negative) anomalies, and the dark (light) shaded areas denote the percentage anomalies of precipitation above 10% (under -10%) in (a) and (b)

水偏少中心位于 42°N 以北的内蒙东部和东北西北部, 总体表现出 I 类和 III 类雨型的特点。另外, 降水合成图与 4.3 节中的统计关系之间的对应并不十分吻合, 其原因主要可能是由于 3 类雨型的分类所致, 有些年份雨型的分布界限并不十分明显, 在 I 类雨型的情况下, III 类雨型区域的降水也可能偏多。

图 5c 给出了偏晚与偏早年份降水距平百分率的差值场, 由图 5c 通过显著性检验的区域(阴影区)可见, 除河套以北的部分地区外, 中国东部季节来临偏晚时, 降水分布表现为长江中下游、江淮地区以及 42°N 以北的华北和东北部分地区降水一致偏少, 而华南、河套以及东北中南部等地区降水一致偏多, 季节来临偏早时则呈现与上述形势近似相反的特征。

5 前冬季节来临早晚对应的环流、水汽输送及海温场形势

5.1 前冬季节来临早晚对应的环流特征

图 6a 和图 7a 分别为前冬来临偏早和偏晚年份合成的前冬(12 月、1 月、2 月) 500 hPa 高度距平场和 850 hPa 矢量风距平场, 从这两幅图的分布可以看出两类高度距平场和矢量风距平场呈现相反的配置。对于图 6a 前冬偏早年份来说, 500 hPa 高度距平场在 60°N 及以北的欧洲大部分地区为一正距平区, 说明欧洲浅槽偏弱, 而在 90°E 及以东的高纬地区为大片负距平区, 尤其在 60°N 以北负值更大, 说明偏早年份阻塞形势偏弱。另外, 在东亚大槽所在区域也为一正距平区, 其北界位于 50°N 附近, 表明东亚大槽强度偏小且向北收缩。850 hPa 的矢量风距平场中, 在 60°N 以北的欧洲区域和北美区域出现了反气旋性的差值环流, 而在高纬亚洲北部地区出现一个范围较大的气旋性差值环流。冷空气沿西伯利亚高原西部经贝加尔湖北部从东北地区入侵中国, 而西北地区的冷空气输送较弱, 此种冷空气的入侵特征可能是这些年份中国东部季节来临时间偏早的主要原因(图 6a)。前冬来临偏晚年份, 表现出近似与偏早年份相反的特征, 整个中高纬地区 500 hPa 高度距平场分布表现为两负一正, 其中一个负距平区域位于 135°E 的东亚大槽位置上, 表明大槽较气候平均形势强且深, 负值区域向南延伸到 30°N 附近, 另外一个负距平中心位于欧洲地区, 显示欧洲浅槽也较正常偏强, 在阻塞高压所处的

90°E 以西的中高纬度地区存在极强的正距平中心, 说明阻塞高压比正常偏强且位置略偏西, 这种中高纬度两槽一脊的形势, 有利于东亚大槽加深, 阻塞高压偏强并向北发展。850 hPa 的矢量风距平场表现出与高度场很好的配置关系, 高纬地区的欧洲和白令海峡一带都出现了气旋性的差值环流, 而 90°E 以西中高纬度地区出现了反气旋性的差值环流, 强冷空气从西伯利亚高原东北部沿着贝加尔湖西北经新疆西北入侵中国, 中国东部地区的冷空气输送较弱, 冷空气的这种入侵特征可能是这些年份中国东部季节来临时间偏晚的主要原因(图 7a)。

图 6b 和图 7b 分别为前冬来临偏早和偏晚年份合成的夏季(6 月、7 月、8 月) 500 hPa 高度距平场和 850 hPa 矢量风距平场, 两幅图的分布也表现出近似相反的特点。图 6b 前冬来临偏早年份夏季 500 hPa 位势高度距平场显示, 东亚 120°E 附近的高、中、低纬分别呈现经向的“+、-、+”形势, 同时在欧亚($0^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$)中高纬(60°N 附近)地区出现东、西纬向的“-、+”距平表现形势, 两者交汇的鄂霍次克海地区是正距平区, 表明该地区位势高度偏高, 有利于形成阻塞形势。850 hPa 矢量风距平场显示 30°N 以南的东亚热带地区呈反气旋性差值环流, 30°N 以北的东亚中纬度呈气旋性环流(图 6b), 总体而言东亚热带季风环流减弱、梅雨锋加强。而前冬季节来临偏晚年份, 夏季 500 hPa 位势高度距平场上(图 7b), 东亚地区高、中、低纬距平依次呈现经向的“-、+、-”形势, 欧亚($0^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$)中高纬度呈现纬向的“-、+、-”形势, 经向和纬向交汇地区为 $140^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$ 的鄂霍次克海附近, 该地区为负距平区, 说明鄂霍次克海地区的位势高度偏低, 不利于形成阻塞形势; 偏晚年份 850 hPa 矢量风距平场显示 30°N 以南的东亚西太平洋热带地区存在气旋性的差值环流(图 7b), 30°N 以北的东亚的中纬度为反气旋性的差值环流, 导致东亚热带季风环流加强, 梅雨锋减弱。

综上所述, 前冬季节来临偏早的年份, 前冬东亚大槽强度偏弱且向北收缩, 阻塞形势偏弱, 冷空气沿西伯利亚高原西部经贝加尔湖北部从东北地区入侵中国, 春季大气环流形势逐渐演变并进行调整(图略), 到夏季表现为东亚大槽和阻塞高压都偏强, 东亚热带季风环流减弱、梅雨锋加强; 前冬和夏季环流形势的这种配置有利于在江淮地区夏季降

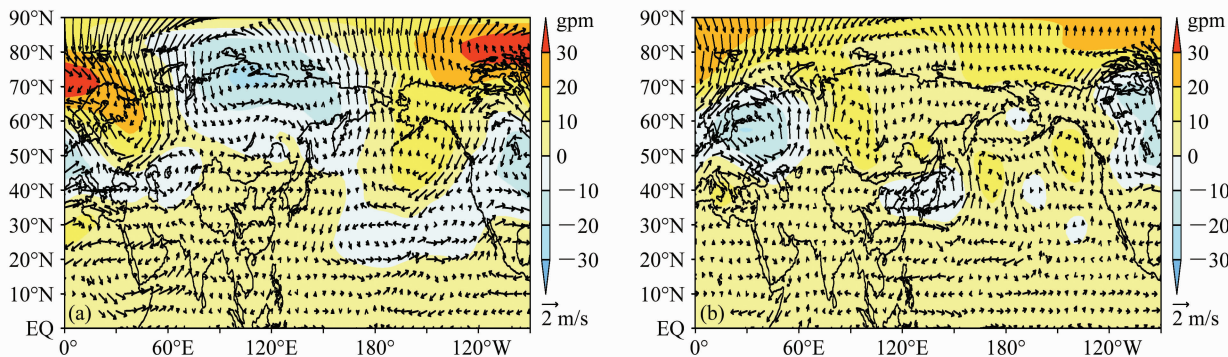


图 6 前冬来临时间偏早年份 500 hPa 位势高度 (单位: gpm) 和 850 hPa 矢量风距平场 (单位: m/s) 合成图: (a) 前冬; (b) 夏季

Fig. 6 The composites of 500-hPa geopotential height anomalies and 850-hPa wind anomalies in the years when the preceding winters start earlier: (a) Preceding winter; (b) simultaneous summer

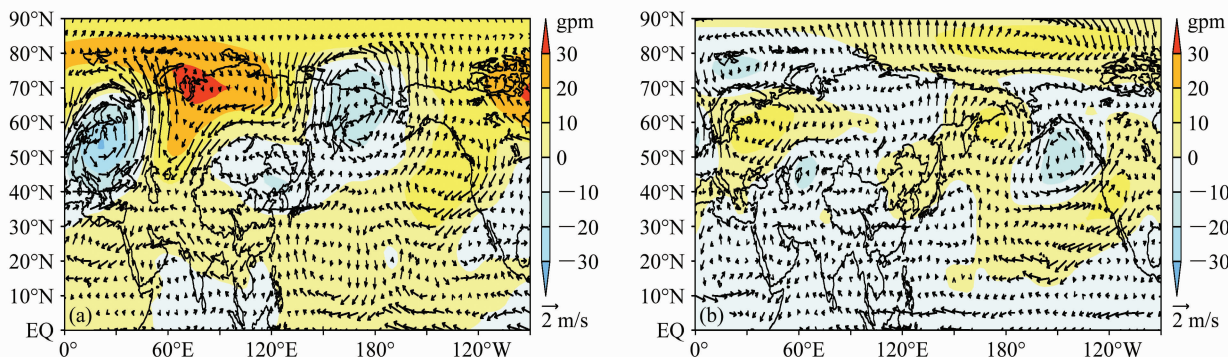


图 7 同图 6, 但为前冬来临时间偏晚年份

Fig. 7 Same as Fig. 6, but in the years when the preceding winters start later

水偏多, 形成如图 5a 所示的偏 II 类雨型的降水分布形势, 这与晏红明等 (2003)、谭桂容和孙照渤 (2004) 的相关研究结论相一致。而前冬来临时间偏晚年份, 前冬 500 hPa 高度距平场和 850 hPa 矢量风距平场表现出与偏早年份近似相反的形势, 冷空气从中国西北地区入侵, 阻塞高压偏强且向北发展, 东亚大槽偏强并向南压, 上述大气环流形势在春季进行调整 (图略), 发展到夏季, 整个 500 hPa 高度距平场和 850 hPa 矢量风距平场亦表现出与偏早年份相反的特点, 东亚大槽和阻塞形势都较弱, 东亚热带季风环流加强, 梅雨锋减弱; 降水呈南北涝、中部旱的特征, 表现为图 5b 所示的偏 I 类和 III 类雨带, 这一结论与陶诗言和徐淑英 (1962)、徐予红和陶诗言 (1996)、张庆云和陶诗言 (1998, 2003) 的相关分析一致。

5.2 中国东部前冬季节来临早晚对应的水汽通量场特征

图 8a 与图 8b 分别为前冬来临偏早和偏晚年份

合成的夏季水汽通量场, 两幅图的分布类型大体相似, 可以看出夏季中国东部地区主要的两个水汽源区, 一个位于 $30^{\circ}\text{E} \sim 60^{\circ}\text{E}$ 的孟加拉湾地区, 另一个位于 150°E 以东的热带太平洋地区。位于孟加拉湾地区的水汽通量较大, 孟加拉湾地区水汽沿西南—东北走向向中国东部输送, 而热带太平洋地区的水汽沿东南—东北走向输送。另外还可以看出, 偏早年份中国东部水汽输送带偏西, 最北只到达 35°N 左右的江淮地区; 而偏晚年份中国东部水汽输送较强, 输送带偏北偏东, 最北可以到达 45°N 的东北地区。

对图 8 中两种情况下的水汽通量场相对于气候态 (1971~2000 年平均) 做偏差可得图 9。图 9a 显示季节来临偏早的年份, 可清楚地看到中国江淮地区受气旋性的差值环流控制, 表明江淮地区水汽辐合, 中心位置位于长江下游一带, 而在黄河以北和华南大部分地区水汽输送较弱, 进而形成中国江淮地区多雨而南北少雨的偏 II 类雨型的降水形势; 而

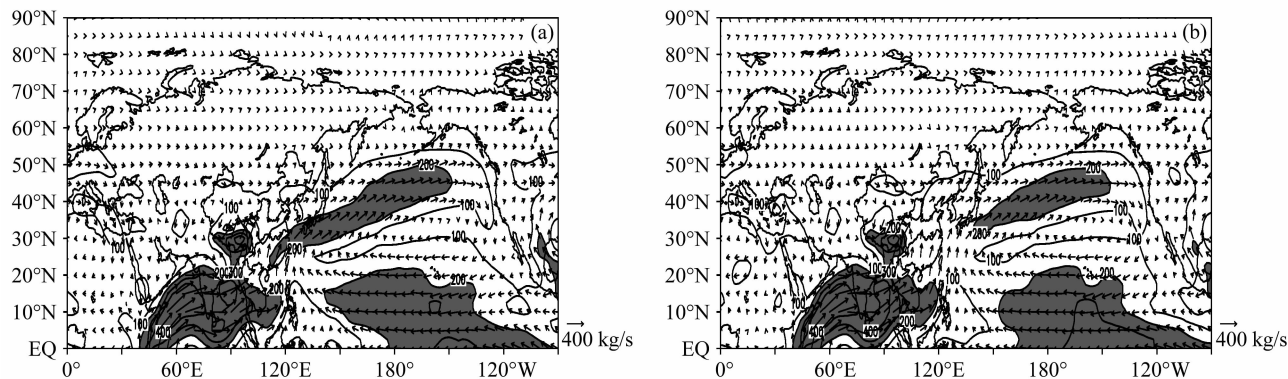


图 8 前冬来临 (a) 偏早和 (b) 偏晚年份水汽通量合成图 (垂直积分从 1000 hPa 到 300 hPa, 单位: kg/s)。阴影: 水汽通量大于 (或等于) 200 kg/s

Fig. 8 The composites of water-vapor fluxes (integrated from 1000 hPa to 300 hPa) in the years when (a) the preceding winters start earlier and (b) the preceding winters start later. The areas with water-vapor fluxes above 200 kg/s (including 200 kg/s) are shaded

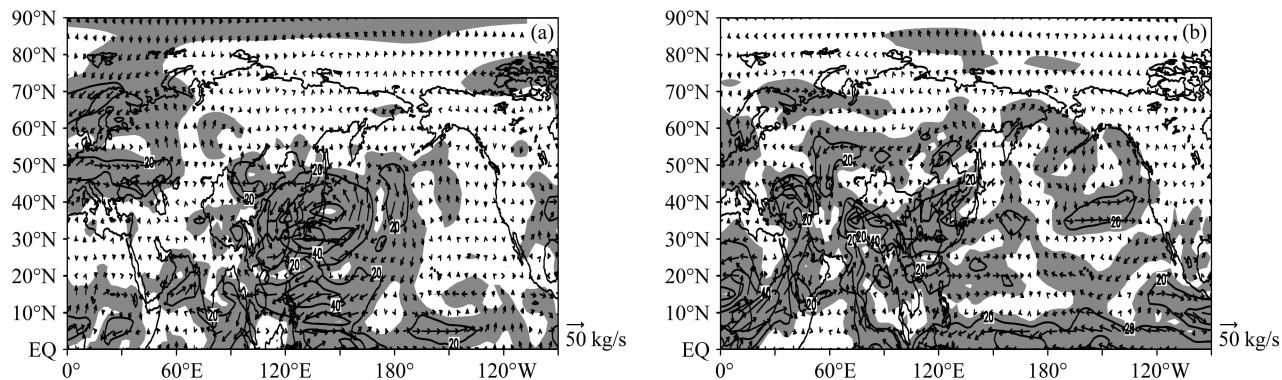


图 9 同图 8, 但为水汽通量相对于气候态的偏差场 (单位: kg/s)。阴影: 水汽通量距平大于 (或等于) 10 kg/s

Fig. 9 Same as Fig. 8, but for the water-vapor flux anomalies. The areas with water-vapor flux anomalies above 10 kg/s (including 10 kg/s) are shaded

季节偏晚年份中国江淮流域形成一个强的反气旋性的差值环流形势 (图 9b), 表明该处水汽发生辐散, 而在黄河以北和华南各出现一个气旋性的差值环流形势, 表明这两个地区水汽发生辐合。上述水汽输送特征使得江淮地区水汽变少, 而在黄河以北及华南等地水汽增多, 形成南北多雨而中间少雨的偏 I 类和 III 类降水形势。

5.3 中国东部前冬季节来临早晚对应的海温场特征

进一步分析前冬来临早晚所对应的海温场差异, 对偏早和偏晚年份的海温距平场进行合成分析 (图 10 和图 11 所示) 发现, 前冬季节来临偏早年份, 印度洋大部分地区的前冬海温距平场呈现正异常, 中心值最大 0.3°C (图 10a), 而到夏季时, 虽然正距平中心有所变化, 但总体仍然是大部分地区呈

现正异常 (图 10b), 表明季节来临偏早时, 印度洋地区出现暖海温异常, 亚洲夏季风环流减弱。而前冬来临时间偏晚年份, 印度洋地区前冬海温距平场呈现北正南负的形势, 在 $10^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 区域为一弱的正距平区, 而在 $10^{\circ}\text{S}\sim 60^{\circ}\text{S}$ 为一较强的负距平中心, 中心值最大可达 -0.3°C (图 11a); 夏季整个印度洋地区的海温几乎都为负距平, 但中心较冬季有所减小 (图 11b)。这表明季节来临偏晚年份, 印度洋地区出现冷海温异常, 亚洲夏季风环流加强。上述分析结果与晏红明和肖子牛 (2000)、李琰等 (2007) 的相关研究结果相一致。如第 5 节分析, 亚洲夏季风环流的加强有利于黄河以北及华南等地的夏季降水, 而江淮地区降水偏少, 反之, 亚洲夏季风环流的减弱将有利于江淮地区降水偏多, 而其余地区降水偏少。

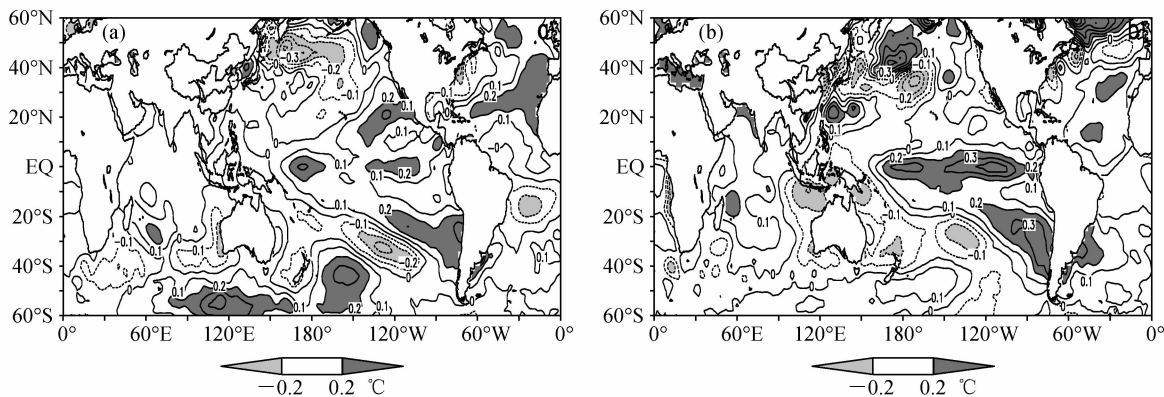


图 10 前冬来临偏早年份 (a) 前冬和 (b) 夏季海温距平合成图 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 10 The composites of SST anomalies ($^{\circ}\text{C}$) for (a) preceding winter and (b) simultaneous summer in the years when preceding winters start earlier

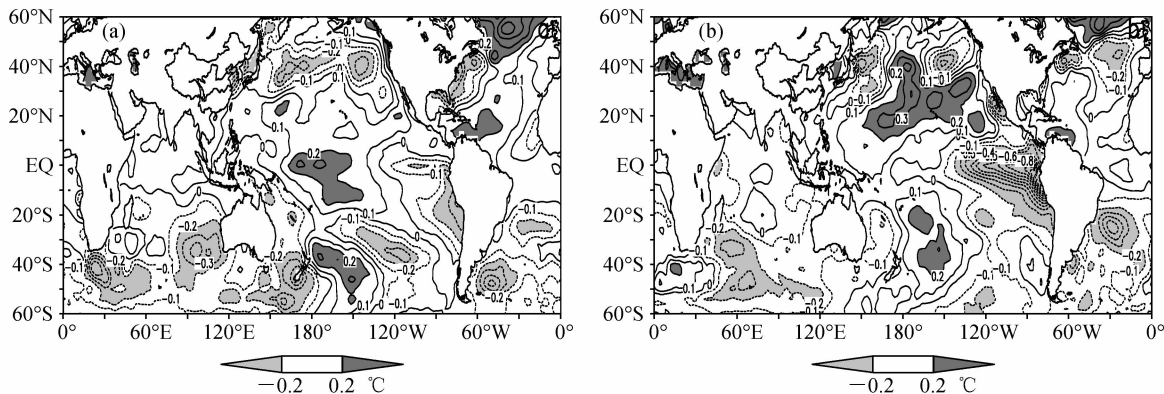


图 11 同图 10, 但为前冬来临偏晚年份

Fig. 11 Same as Fig. 10, but in the years when preceding winters start later

此外,从图 10 和图 11 还可以看到,前冬来临偏早年份,前冬热带中东太平洋的 SST 正常并略有偏高,中心偏高达 0.2°C 左右 (图 10a);夏季这种偏高的形势进一步加强,中心偏高达 0.3°C 以上 (图 10b),表明在热带中东太平洋 SST 的变化呈现出“类 El Niño 现象”。前冬来临偏晚年份,前冬赤道东太平洋地区海表温度偏低,中心位置比正常偏低约 0.3°C (图 11a);而到夏季,低中心向西北发展,整个赤道中、东太平洋海表温度比正常偏低,中心位置偏低达 0.5°C 以上 (图 11b),达到“La Niña 现象”发生的强度,表明前冬来临偏晚的年份,赤道中东太平洋呈现出“类 La Niña 现象”。当赤道中东太平洋呈现“La Niña 位相”并有所发展时,会使得中国江淮流域、长江中上游地区降水偏少并发生干旱,而黄河流域的河套地区和华北地区降水偏多。相反,赤道中东太平洋出现“El Niño 位相”并有所发展时,将使得中国江淮流域、长江

中下游地区降水偏多,而华北地区降水偏少 (Huang and Wu, 1989; 金祖辉和陶诗言, 1999; 周连童和黄荣辉, 2003)。这与季节来临偏晚和偏早年份所对应的形势相一致,说明前冬季节来临偏早与偏晚年份出现不同降水分布受到热带中东太平洋所发生的“ENSO 循环现象”的影响和控制。

6 前冬来临早晚影响夏季降水的机理模型

从上述分析可以看出,中国东部前冬季节来临早晚对应了不同的前期和同期大气环流、水汽输送及海温等特征,而这些对应关系与陈隽和孙淑清 (1999a, 1999b)、布和朝鲁和纪立人 (1999)、张庆云等 (2003)、高辉 (2007)、Ji and Sun (1997)、纪立人等 (1998)、Chen et al. (2000) 研究季风异常和大气环流及海温等之间的关系具有一定的相似性,这进一步说明本文所采用的季节来临时间指标

与季风之间具有一定的联系,能够在一定程度上表征季风变化的作用。

另外,海温作为一个热力驱动因子,是影响中国夏季旱涝的主要原因(黄荣辉,1990a,1990b)。前冬来临早晚作为一个大气环流的表征因子,其对夏季降水的影响必然是通过海—气相互作用的结果。根据以往对海—气相互作用的影响机制的研究(Horeal and Wallace, 1981; McCreay, 1983; 王绍武和赵宗慈, 1987; 李崇银, 1989, 黄荣辉, 1990a, 1990b), 结合本文前冬季节来临早晚对应的海温场的变化形势, 提出一个简单的前冬来临早晚与中国夏季旱涝之间互作用的概念模型。

前冬来临偏早年份,从前冬到夏季整个印度洋和赤道中东太平洋呈现一种正海温异常形势,在印度洋和赤道中东太平洋耦合作用下使得纬向的 Walker 环流减弱,进而影响到低纬度经向 Hadley 环流(王绍武和赵宗慈, 1987), Hadley 环流的异常使得中高纬度的环流发生变化,造成如第 5 节所述的中高纬度阻塞高压和东亚大槽冬弱夏强、冬季风和夏季风环流较弱的形势,进而使夏季梅雨锋加强,西太平洋副热带高压偏弱,水汽输送较弱,降水主要维持在江淮地区,形成图 5a 所示的降水形势。而前冬季节来临偏晚的年份,呈现出与上述偏早年份近似相反的海—气相互作用过程,形成图 5b 所示的降水形势。

不过,以上仅仅根据本文的相关结论与海—气相互作用过程给出了一个简单的影响机制的概念模型,具体的影响机制以及彼此间的相互作用还需要进一步研究,本文下一步工作将着重解决这一问题。

7 结果及讨论

本文利用 NCEP/NCAR 提供的日平均再分析资料对中国东部地区 1961~2010 年前冬季节来临时间进行划分,计算得到中国东部地区平均前冬季节来临时间序列,并按照前冬季节来临时间相对于气候平均态(1971~2000 年)的早晚进行分类,探讨了前冬季节来临时间偏早/偏晚与中国东部夏季降水之间的关系,结果表明:

(1) 对前冬来临时间与中国 160 站的夏季降水做相关发现,整个东部有两个正相关带和两个负相关带,正相关带分别位于华南、西南一带以及黄河以北的 $39^{\circ}\text{N}\sim 42^{\circ}\text{N}$ 一带、东北中南部等地区,表

明东部地区平均前冬季节来临偏晚时,这些地区降水偏多,反之则偏少,而负相关带分别位于黄淮、江淮以及长江中下游一带和 42°N 以北的大部分地区,表明东部地区平均前冬季节来临偏早时,这些地区降水偏多,反之则偏少。4 个相关带的分布与中国东部夏季雨带的位置也大致吻合。

(2) 中国东部地区前冬季节来临时间偏早的年份,II 类雨型发生频率为 0.57,比 II 类雨型的气候频率大 0.19, I 类和 III 类雨型发生频率分别为 0.14 和 0.29,分别比气候频率偏小 0.16 和 0.04。前冬季节来临偏晚的年份, I 类雨型发生的频率为 0.67,比其气候频率大 0.37, II 类和 III 类雨型的频率分别为 0.11 和 0.22,但均小于其气候频率。反过来,对 3 类雨型与季节来临时间变化的关系进行统计表明, I 类雨型年份显著偏晚的年份占优;而 II 类雨型年份,显著偏早的年份占优; III 类雨型年份显著对应关系不显著;合成分析与上述统计结果一致。

(3) 从前冬来临早晚所对应的海温、大气环流及水汽输送的变化特点以及差异,根据海—气相互作用机制,提出了一个简单的中国东部前冬来临早晚影响夏季降水的概念模型,即前冬来临偏早年份,从前冬到夏季整个印度洋和赤道中东太平洋呈现一种正海温异常形势,在印度洋和赤道中东太平洋耦合作用下使得纬向的 Walker 环流减弱,进而影响到低纬度经向 Hadley 环流, Hadley 环流的异常使得中高纬度的环流发生变化,造成如第 5 节所述的中高纬度阻塞高压和东亚大槽冬弱夏强、冬季风和夏季风环流较弱的形势,进而使夏季梅雨锋加强,加之西太平洋副热带高压偏弱,水汽输送较弱,降水主要维持在江淮地区,形成江淮地区大范围多雨,而黄河以北及华南大部分地区少雨的降水分布型。而前冬季节来临偏晚的年份,呈现出与上述偏早年份相反的海气相互作用过程,形成江淮流域夏季降水偏少,黄河以北大部分地区以及华南等地形成降水偏多的降水分布型。

需要指出的是,本文虽然找出了中国东部前冬季节来临早晚与夏季降水空间分布之间良好的对应关系和相关性,但实际过程中,由于大气变化的不确定性和非线性性,使各种天气过程变得十分复杂,单凭一个方面很难准确把握其变化规律并做出相对准确的预报。因此,若要用前冬季节来临时间

来对夏季降水分布进行预测, 还需要进一步探究其与冬、夏季风指数和西太平洋副热带高压指数等之间的关系及相互配置, 最终制定出一个比较完善的预测方案。对这方面的探索将是今后研究的重点。

参考文献 (References)

- Bell G J. 1977. Changes in sign of the relationship between sunspots and pressure, rainfall and the monsoon [J]. *Weather*, 32 (1): 26 – 32.
- 布和朝鲁, 纪立人. 1999. 东亚冬季风活动异常与热带太平洋海温异常 [J]. *科学通报*, 44 (3): 252 – 259. Bueh Cholaw, Ji Liren. 1999. Anomalous activity of East Asian winter monsoon and the tropical Pacific SSTA [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 44 (3): 252 – 259.
- 蔡学湛, 温珍治, 杨义文. 2009. 东亚夏季风异常大气环流遥相关及其对我国降水的影响 [J]. *气象科学*, 29 (1): 46 – 51. Cai Xue-zhan, Wen Zhenzhi, Yang Yiwen. 2009. Atmospheric teleconnection pattern of East Asian summer monsoon anomaly and its impact on summer rainfall in China [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 29 (1): 46 – 51.
- 陈隽, 孙淑清. 1999a. 东亚冬季风异常与全球大气环流变化 I. 强弱冬季风影响的对比研究 [J]. *大气科学*, 23 (1): 101 – 111. Chen Jun, Sun Shuqing. 1999a. Eastern Asian winter monsoon anomaly and variation of global circulation Part I: A comparison study on strong and weak winter monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 23 (1): 101 – 111.
- 陈隽, 孙淑清. 1999b. 东亚冬季风异常与全球大气环流变化 II. 冬季风异常对全球热带海温变化的影响 [J]. *大气科学*, 23 (3): 286 – 295. Chen Jun, Sun Shuqing. 1999b. Eastern Asian winter monsoon anomaly and variation of global circulation Part II: Influence on SST by winter monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 23 (3): 286 – 295.
- Chen W, Graf H F, Huang R H. 2000. The interannual variability of east Asian winter monsoon and its relation to the summer monsoon [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 17 (1): 48 – 60.
- 陈文, 顾雷, 魏科, 等. 2008. 东亚季风系统的动力过程和准定常行星波活动的研究进展 [J]. *大气科学*, 32 (4): 950 – 966. Chen Wen, Gu Lei, Wei Ke, et al. 2008. Studies of the dynamic processes of East Asian monsoon system and the quasi-stationary planetary wave activities [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (4): 950 – 966.
- 高辉. 2007. 东亚冬季风指数及其对东亚大气环流异常的表征 [J]. *气象学报*, 65 (2): 272 – 279. Gao Hui. 2007. Comparison of four East Asian winter monsoon indices [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 65 (2): 272 – 279.
- 郭其蕴. 1983. 东亚夏季风强度指数及其变化的分析 [J]. *地理学报*, 38 (3): 207 – 217. Guo Qiyun. 1983. The summer monsoon intensity index in East Asia and its variation [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 38 (3): 207 – 217.
- Horel J D, Wallace J M. 1981. Planetary-scale atmospheric phenomena associated with the Southern Oscillation [J]. *Mon. Wea. Rev.* 109, 813 – 829.
- 侯威, 孙树鹏, 张世轩, 等. 2011. 东亚地区大气环流的季节划分及其时空变化特征 [J]. *物理学报*, (10): 109201-1-109201-9. Hou Wei, Sun Shupeng, Zhang Shixuan, et al. 2011. Season division and its temporal and spatial variation features of general atmospheric circulation in East Asia [J]. *Acta Physica Sinica*, (10): 109201-1-109201-9.
- 黄荣辉. 1990a. 引起我国夏季旱涝的东亚大气环流异常遥相关及其物理机制的研究 [J]. *大气科学*, 14 (1): 108 – 117. Huang Ronghui. 1990a. Research on the summer floods and droughts in China caused by atmospheric teleconnection pattern of East Asian circulation anomalies and there mechanisms [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 14 (1): 108 – 117.
- 黄荣辉. 1990b. ENSO 及热带海一气相互作用动力学研究的新进展 [J]. *大气科学*, 14 (2): 234 – 241. Huang Ronghui. 1990b. The new progress of ENSO and air – sea interactions dynamics [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 14 (2): 234 – 241.
- Huang R H, Wu Y F. 1989. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 6 (1): 21 – 30.
- Ji L R, Sun S Q, Arpe K, et al. 1997. Model study on the interannual variability of Asian winter monsoon and its influence [J]. *Advances in Atmospheric Science*, 14 (1): 1 – 22.
- 纪立人, 布和朝鲁, 孙淑清. 1998. EAWM 流型域——一种与东亚冬季风异常相联的海一气耦合流型域 [J]. *大气科学*, 22 (4): 491 – 502. Ji Liren, Bueh Cholaw, Sun Shuqing. 1998. EAWM regime—An ocean – atmosphere coupled regime related to East Asian winter monsoon activity [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 22 (4): 491 – 502.
- 金祖辉, 陶诗言. 1999. ENSO 循环与中国东部地区夏季和冬季降水关系的研究 [J]. *大气科学*, 23 (6): 663 – 672. Jin Zuhui, Tao Shiyan. 1999. A study on the relationships between ENSO cycle and rainfalls during summer and winter in eastern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 23 (6): 663 – 672.
- Jones P D, Groisman P Y, Coughlan M, et al. 1990. Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperature over land [J]. *Nature*, 347 (6289): 169 – 172.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437 – 471.
- 李崇银. 1989. 中国东部地区的暖冬与厄尔尼诺 [J]. *科学通报*, 34 (4): 283 – 286. Li Chongyin. 1989. Warmer winter in eastern China and El Niño [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 34 (4): 283 – 286.
- 李建平, 曾庆存. 2005. 一个新的季风指数及其年际变化和与雨量

- 的关系 [J]. 气候与环境研究, 10 (3): 351–363. Li Jianping, Zeng Qingcun. 2005. A new monsoon index, its interannual variability and relation with monsoon precipitation [J]. Climate and Environment Research (in Chinese), 10 (3): 351–363.
- 李琰, 王亚非, 魏东. 2007. 前期热带太平洋、印度洋海温异常对长江流域及以南地区 6 月降水的影响 [J]. 气象学报, 65 (3): 393–405. Li Yan, Wang Yafei, Wei Dong. 2007. Effects of anomalous SST in tropical Indian Ocean and Pacific Ocean on next June rainfall over the Yangtze River basin and area south of the basin [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 65 (3): 393–405.
- 刘匡南, 邬鸿勋. 1956. 近五年东亚夏季自然天气季节的划分及夏季特征的初步探讨 [J]. 气象学报, 27 (3): 219–242. Liu Kuangnan, Wu Hongxun. 1956. A preliminary study on the determination of natural synoptic summer season over Asiatic natural synoptic region and the prevailing weather process in this season [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 27 (3): 219–242.
- McCreary J P. 1983. A model of tropical ocean–atmosphere interaction [J]. Mon. Wea. Rev., 111: 370–387.
- 廖荃荪, 陈桂英, 陈国珍. 1981. 长期天气预报文集 [M]. 北京: 气象出版社, 103–114. Liao Quansun, Chen Guiying, Chen Guozhen. 1981. Long-Term Prediction Proceedings (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 103–114.
- 缪启龙, 王勇. 2007. 中国四季的划分及其变化特征分析[C]//中国气象学会 2007 年年会气候变化分会场论文集, 693–701. Miu Qilong, Wang Yong. 2007. Study of season division and its variation features in China[C]//Chinese Meteorological Society Annual Meeting 2007 Proceedings Session on Climate Change (in Chinese), 693–701.
- Parthasarathy B, Kumar K R, Mounot A A. 1991. Evidence of secular variation in Indian monsoon rainfall–circulation relationships [J]. J. Climate, 4 (9): 927–938.
- 施能, 陈家其, 屠其璞. 1995. 中国近 100 年来 4 个年代际的气候变化特征 [J]. 气象学报, 5 (4): 431–439. Shi Neng, Chen Jiaqi, Tu Qipu. 1995. 4-phase climate change features in the last 100 years over China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 5 (4): 431–439.
- 施能, 鲁建军, 朱乾根. 1996. 东亚冬、夏季风百年强度指数及其气候变化 [J]. 南京气象学院学报, 19 (2): 168–177. Shi Neng, Lu Jianjun, Zhu Qian'gen. 1996. East Asian winter/summer monsoon intensity indices with their climatic change in 1873–1989 [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 19 (2): 168–177.
- 施雅风. 2003. 中国西北气候由暖干向暖湿转型问题评估 [M]. 北京: 气象出版社, 21. Shi Yafeng. 2003. The Evaluation on Climate Change from Warm-Dry to Warm-Wet in Northwest China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 21.
- 孙淑清, 孙柏民. 1995. 东亚冬季风环流异常与中国江淮流域夏季旱涝天气的关系 [J]. 气象学报, 53 (4): 440–450. Sun Shuqing, Sun Bomin. 1995. The relationship between the anomalous winter monsoon circulation over East Asia and summer drought/flooding in the Yangtze and Huaihe River valley [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 53 (4): 440–450.
- 孙树鹏, 张璐, 侯威, 等. 2011. 基于非线性相似度量方法研究中国季节划分 [J]. 物理学报, 60 (2): 029201-1-029201-7. Sun Shupeng, Zhang Lu, Hou Wei, et al. 2011. A non-linear similarity method for season division in China [J]. Acta Physica Sinica, 60 (2): 029201-1-029201-7.
- 谭佳容, 孙照渤. 2004. 西太平洋副高与华北旱涝的关系 [J]. 热带气象学报, 20 (2): 206–211. Tan Guirong, Sun Zhaobo. 2004. Relationship of the subtropical high and summertime floods/droughts over North China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 20 (2): 206–211.
- 陶诗言, 徐淑英. 1962. 夏季江淮流域持久性旱涝现象的环流特征 [J]. 气象学报, 32 (1): 1–18. Tao Shiyan, Xu Shuying. 1962. Some aspects of the circulation during the periods of the persistent drought and flood in Yangtze and Hwai-Ho valleys in summer [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 32 (1): 1–18.
- 涂长望, 黄仕松. 1944. 夏季风进退 [J]. 气象杂志, 18: 1–20. Tu Changwang, Huang Shisong. 1944. The advance and retreat of the summer monsoon [J]. Meteorological Magazine (in Chinese), 18: 1–20.
- 王绍武, 赵宗慈. 1987. 长期天气预报基础 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 55–86. Wang Shaowu, Zhao Zongci. 1987. The Basis of Long-Term Weather Forecast (in Chinese) [M]. Shanghai: Shanghai scientific and Technical Publishers, 55–86.
- 王遵娅. 2004. 近 50 年中国气候变化的特征与中国夏季降水的气候学 [D]. 南京气象学院硕士学位论文, 7. Wang Zunya. 2004. An updated analysis of the climate change in China in recent 50 years and the climatology of summer rainfall in China [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing Institute of Meteorology, 7.
- 魏凤英. 2007. 我国夏季雨带分布类型的集成估算模型 [J]. 自然科学进展, 17 (5): 639–645. Wei Fengying. 2007. The estimation model of summer rain distribution type in China [J]. Progress in Natural Science (in Chinese), 17 (5): 639–645.
- 徐淑爱. 1988. 冬季风异常年份的环流特征及其与华南前汛期降水的关系 [J]. 热带气象学报, 4 (3): 263–271. Xu Shu'ai. 1988. Circulation features of the abnormal winter monsoon and their relation with the early summer rainfall over South China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 4 (3): 263–271.
- 徐予红, 陶诗言. 1996. 东亚夏季风的年际变化与江淮流域梅雨期旱涝 [M]//黄荣辉主编. 灾害性气候的过程及诊断. 北京: 气象出版社, 31–39. Xu Yuhong, Tao Shiyan. 1996. The interannual variability of the East Asian summer monsoon and the drought and flood in Changjiang–Huaihe River valleys for the Meiyu period [M]//Huang Ronghui, Ed. Study on the Formation Process of Disastrous Climate and Its Diagnostics (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 31–39.
- 薛峰, 林一骅, 曾庆存. 2002. 论大气环流的季节划分和季节突变: III 气候平均情况 [J]. 大气科学, 26 (3): 307–313. Xue Feng,

- Lin Yihua, Zeng Qingcun. 2002. On the seasonal division of atmospheric general circulation and its abrupt change. Part III: Climatology [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (3): 307–313.
- 晏红明, 段玮, 肖子牛. 2003. 东亚冬季风与中国夏季气候变化 [J]. 热带气象学报, 19 (4): 367–376. Yan Hongming, Duan Wei, Xiao Ziniu. 2003. A study on relation between East Asian winter monsoon and climate change during raining season in China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 19 (4): 367–376.
- 晏红明, 肖子牛. 2000. 印度洋海温异常对亚洲季风区天气气候影响的数值模拟研究 [J]. 热带气象学报, 16 (1): 18–27. Yan Hongming, Xiao Ziniu. 2000. The numerical simulation of the Indian Ocean SSTA influence on climatic variations over Asian monsoon region [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 16 (1): 18–27.
- Yeh T C, Dao S Y, Li M T. 1959. The abrupt change of circulation over the Northern Hemisphere during June and October [M]// The Atmosphere and the Ocean in Motion. New York: Rockefeller Institute Press in Association with Oxford University Press, 249–267.
- 曾庆存, 张邦林. 1992. 论大气环流的季节划分和季节突变: I 概念和方法 [J]. 大气科学, 16 (6): 641–648. Zeng Qingcun, Zhang Banglin. 1992. On the seasons of general atmospheric circulation and their abrupt changes. Part I: General concept and method [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 6 (6): 41–648.
- 曾庆存, 张邦林. 1998. 大气环流的季节变化和季风 [J]. 大气科学, 22 (6): 805–813. Zeng Qingcun, Zhang Banglin. 1998. On the seasonal variation of atmospheric general circulation and the monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 22 (6): 805–813.
- 张邦林, 曾庆存. 1998. 论大气环流的季节划分和季节突变: II 个别年份的分析 [J]. 大气科学, 22 (2): 129–136. Zhang Banglin, Zeng Qingcun. 1998. A study on the seasons of general atmospheric circulation and their abrupt changes. Part II: Case study of particular year [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 22 (2): 129–136.
- 张宝堃. 1934. 中国四季之分配 [J]. 地理学报, 1 (1): 1–18. Zhang Baokun. 1934. The duration of four seasons in China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 1 (1): 1–18.
- 张家诚, 林之光. 1985. 中国气候 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 55–63. Zhang Jiacheng, Lin Zhiguang. 1985. Climate of China [M] (in Chinese). Shanghai: Shanghai Science & Technology Press, 55–63.
- 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 Shiyan. 1998. Influence of Asian mid-high latitude circulation on East Asian summer rainfall [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 56 (2): 199–211.
- 张庆云, 陶诗言. 2003. 夏季西太平洋副热带高压异常时的东亚大气环流特征 [J]. 大气科学, 27 (3): 369–380. Zhang Qingyun, Tao Shiyan. 2003. The anomalous subtropical anticyclone in western Pacific and their association with circulation over East Asia during summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (3): 369–380.
- 张庆云, 陶诗言, 陈烈庭. 2003. 东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流 [J]. 气象学报, 61 (4): 558–568. Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Chen Lieting. 2003. The inter-annual variability of east Asian summer monsoon indices and its association with the pattern of general circulation over East Asia [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61 (4): 558–568.
- 张世轩, 张璐, 孙树鹏, 等. 2011. 全球变暖情况下中国季节的变化 [J]. 高原气象, 30 (3): 659–667. Zhang Shixuan, Zhang Lu, Sun Shupeng, et al. 2011. Changes of the seasons in mainland China under global warming [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 2011, 30 (3): 659–667.
- 赵汉光, 张先恭. 1996. 东亚季风和我国夏季雨带的关系 [J]. 气象, 22 (4): 8–12. Zhao Hanguang, Zhang Xiangong. 1996. The relationship between the summer rain belt in China and the East Asia monsoon [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 22 (4): 8–12.
- 赵平, 周自江. 2005. 东亚副热带夏季风指数及其与降水的关系 [J]. 气象学报, 63 (6): 933–941. Zhao Ping, Zhou Zijiang. 2005. East Asian subtropical summer monsoon index and its relationships to rainfall [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63 (6): 933–941.
- 赵振国. 1996. 中国旱涝趋势预测进展 [M]//陶诗言主编. 气候预测研究. 北京: 气象出版社, 84–93. Zhao Zhenguo. 1996. The drought suffers from water logging trend prediction develops in flood season in our country [M]//Tao Shiyan, Ed. The Study of Climate Prediction (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 84–93.
- 赵振国. 1999. 中国夏季旱涝以及环境场 [M]. 北京: 气象出版社, 1–9. Zhao Zhenguo. 1999. Summer Rainfall and Its Environment Field in China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1–9.
- 周连童, 黄荣辉. 2003. 关于我国夏季气候年代际变化特征及其可能成因的研究 [J]. 气候与环境研究, 8 (3): 274–290. Zhou Liantong, Huang Ronghui. 2003. Research on the characteristics of interdecadal variability of summer climate in China and its possible cause [J]. Climate and Environment Research (in Chinese), 8 (3): 274–290.
- 朱炳海. 1962. 中国气候 [M]. 北京: 科学出版社, 76–77. Zhu Binghai. 1962. Climate of China (in Chinese) [M]. Beijing: Scientific Publishers, 1–9.
- 竺可桢. 1934. 东南季风与中国之雨量 [J]. 地理学报, (1): 1–26. Zhu Kezhen. 1934. The enigma of southeast monsoon in China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), (1): 1–26.