李淑萍,侯威,封泰晨. 2015. 近 52 年长江中下游地区夏季年代际尺度干湿变化及其环流演变分析 [J]. 大气科学, 39 (5): 885–900. Li Shuping, Hou Wei, Feng Taichen. 2015. Decadal variations of summer dryness/wetness over the middle and lower reaches of the Yangtze River and the evolution of atmospheric circulation in the last 52 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (5): 885–900, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1412.14186.

近 52 年长江中下游地区夏季年代际尺度干湿 变化及其环流演变分析

李淑萍1 侯威2 封泰晨1

1 兰州大学大气科学学院,兰州 730000 2 中国气象局国家气候中心,北京 100081

摘 要利用中国气象局国家气象信息中心提供的长江中下游地区 353 站 1961~2012 年逐月降水资料,通过计 算得到各站点夏季标准化降水指数(SPI)。根据长江中下游地区夏季中旱及以上等级站点数目及其突变检测 (Mann-Kendall 方法,MK)结果,将时间序列划分为三个时段。在此基础上,利用 NCEP/NCAR 再分析资料及 NOAA 海洋表面温度重建资料,分析了各个时段前冬至夏季环流背景场的异常特征及其演变过程,并建立了各时 段的概念模型。结果表明:(1)长江中下游夏季在第一时段(1961~1973 年)呈明显干旱状态;第二时段(1974~ 1986 年)为干旱向湿润转变的阶段;第三时段(1987~2012 年)基本转为湿润状态。(2)第二时段为第一时段 与第三时段的过渡期,环流背景场在该时段发生明显变化,使得第一时段与第三时段所对应季节的环流距平场相 位相反。(3)第一时段,前冬至夏季全球海温持续偏冷,印度洋海温冷异常在夏季尤为显著,南亚高压与西太平 洋副热带高压偏弱;前冬,青藏高原北部脊偏弱,蒙古高压明显偏弱;夏季,印度低压偏强、南支槽加深,夏季 风水汽输送偏强,而亚洲中高纬度为平直西风气流,北方冷空气不易南下至我国南方地区,冷暖空气交缓受阻, 使得长江中下游夏季出现大范围的干旱。第三时段相对于第一时段,前冬至夏季全球海温暖异常,印度洋海温显 著偏暖,西太平洋副热带高压偏强;前冬,青藏高原北部脊偏强,蒙古高压异常偏强;夏季,印度低压减弱、南 支槽异常偏弱,夏季风水汽输送较弱,水汽滞留在长江流域,且贝加尔湖高压脊发展,脊前冷空气南下,使得长

关键词 长江中下游 标准化降水指数 干湿特征 环流演变
 文章编号 1006-9895(2015)05-0885-16
 中图分类号 P467
 文献标识码 A
 doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1412.14186

Decadal Variation of Summer Dryness/Wetness over the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River and the Evolution of Atmospheric Circulation in the Last 52 Years

LI Shuping¹, HOU Wei², and FENG Taichen¹

College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000
 National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract Monthly precipitation records at 353 stations in the middle and lower reaches of the Yangtze River during 1961–2012, provided by the National Climate Center of the China Meteorological Administration, were used to calculate

通讯作者 侯威, E-mail: houwei@cma.gov.cn

收稿日期 2014-05-22; 网络预出版日期 2014-12-23

资助项目 国家自然科学基金项目 41305056、41175067,国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目 2013CB430204、2012CB955901

作者简介 李淑萍, 女, 1991年出生, 硕士研究生, 主要从事气候变化与干旱研究。E-mail: lishupingdb@hotmail.com

the Standardized Precipitation Index in summer. The Mann-Kendall (MK) statistical test was applied to detect the trend in the number of stations at which summer SPI reached a value of -1.0 or less. According to the MK test results, the whole time series could be divided into three stages, separated by abrupt change points. Furthermore, based on National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research reanalysis data and National Oceanic and Atmospheric Administration extended reconstructed sea surface temperature (SST) data, the evolution of the large-scale atmospheric circulation was analyzed from pre-winter to summer, and a conceptual model established for each stage. The results showed that: (1) the first stage (1961–1973) was in an obvious state of drought, the second stage (1974–1986) was a dry-to-wet transition phase, and the third stage (1987–2012) was basically wet; (2) the atmospheric circulation changed notably in the second stage, leading to an opposite phase of the circulation anomaly between the first and third stages; and (3) global SST remained abnormally cold from pre-winter to summer, and Indian Ocean SST was especially colder in summer, which led to a dramatically weaker South Asian high and western Pacific subtropical high. The high pressure ridge over the northern Tibetan Plateau was weaker, resulting in weaker high pressure over Mongolia in pre-winter. Low pressure over India was stronger, the southern branch of the trough deepened, and southerly moisture transported by the summer monsoon prevailed over eastern China. Meanwhile, there was straight westerly wind over the mid-high latitudes of Asia, which was unfavorable for the cold air to extend into southern China. Under the above evolution and configuration of the atmospheric circulation, the middle and lower reaches of the Yangtze River were prone to widespread drought in summer during the first stage. However, the circulation from pre-winter to summer during the third stage was opposite to that during the first stage. Global SST was warmer from pre-winter to summer, especially in the Indian Ocean, resulting in a stronger western Pacific subtropical high. The stronger high pressure ridge over the northern Tibetan Plateau reinforced the high pressure in pre-winter over Mongolia. Moreover, the low pressure over India and the southern branch of the trough weakened, and water vapor stagnated over the Yangtze River basin because of the weaker summer monsoon; plus, the high ridge over Lake Baikal was favorable for the cold air to extend into southern China. Therefore, the circulation from pre-winter to summer during the third stage led to more precipitation in summer over the middle and lower reaches of the Yangtze River.

Keywords Middle and lower reaches of the Yangtze River, Standardized precipitation index, Dry/wet characteristics, Atmospheric circulation evolution

1 引言

全球气候变暖背景下,干旱事件频发 (Dai, 2011),超过一半以上的陆地地区受到不同程度干 旱的影响(Kogan, 1997), 且气候变化对干旱及半 干旱地区影响更加显著(Huang et al., 2008; Ji et al., 2014)。我国地域广阔,东北、华北、西北、西南 及长江中下游地区均受到不同程度旱灾的影响,这 严重威胁到人们的生产生活(张庆云等, 2003a; 侯威等, 2008; 章大全等, 2010)。长江中下游地 区经济发达,人口密度大,开展对这一地区干旱与 洪涝等灾害性天气气候的预测,已成为政府关注与 科学研究的焦点。有研究显示,长江中下游地区夏 季降水在 70 年代后期明显增加,但降水天数减少, 降水强度增强,干旱和洪涝等极端事件频发(叶笃 正和黄荣辉, 1991; Wang and Zhou, 2005; Zhang et al., 2008; 封国林等, 2012a)。长江中下游地处亚热 带季风区, 南海季风爆发后, 水汽从南半球越过赤 道经孟加拉湾/南海向我国东部地区输送,季风区内 水汽输送与雨带位置一致(周晓霞等,2008)。东亚

夏季风的强弱也会影响长江中下游夏季旱涝(施能 等,1996),西太平洋副热带高压是东亚夏季风体 系的环流成员之一(黄士松和汤明敏,1987),西太 平洋副热带高压的位置与强度对我国东部地区的 天气气候有重要的影响(陶诗言和徐淑英,1962;张 庆云和陶诗言,1999;朱乾根等,2000),同时,西太 平洋副热带高压的位置与强度受南亚高压的制约 (陶诗言和朱福康,1964)。已有研究(陶诗言等, 1998;孙淑清和马淑杰,2003;王蕾和张人禾,2006) 表明海温是影响气候变化的一个重要外强迫因子, 关键区海温异常对中国夏季降水有指示作用。封国 林等(2012b)研究发现,2011 年春季海温场的转 变引起了环流形势的变化,导致长江中下游地区在 春末夏初出现旱涝急转现象。

干旱是长期水汽异常偏少(Huschke, 1959), 其发展具有一定的积累过程,影响区域比较大,属 于一种中长期的气候行为(Hirschi et al., 2011)。因 此,前期及同期环流形势的维持与演变对干旱有十 分重要影响。研究显示,长江中下游夏季旱年,前 冬阻塞形势发展(孙淑清和孙柏民, 1995),春季 南印度洋和南海海温异常偏冷(张琼等,2003), 夏季中高纬度乌拉尔山与鄂霍次克海高压脊偏弱 (张庆云和陶诗言,1998)。值得注意的是,在已 有研究中,对长江中下游夏季旱涝的个例分析及降 水趋势变化的研究比较多(施能和朱乾根,1996; Gong and Wang,2000;王遵娅和丁一汇,2008), 但对该地区夏季干湿的分阶段变化特征及其年代 际环流演变的考察较为欠缺。鉴于此,本文主要分 析了1961~2012年长江中下游地区夏季干湿变化 的阶段性特征,并且重点研究了不同时段夏季及前 期环流背景场的异常特征。在此基础上,综合分析 了前冬至夏季环流形势的演变过程,从环流演变的 过程性角度出发,建立了干湿变化三个不同时段的 概念模型,为长江中下游地区夏季干旱预测提供新 的思路。

本文主要内容包括七节,第二节介绍了文中所 用到的资料与方法,第三节根据长江中下游地区夏 季中旱及以上等级站点数目的突变检测结果,将 1961~2012年划分为三个时段,并探讨了长江中下 游地区夏季不同时段的干湿变化。第四节主要对比 分析了不同时段夏季环流背景场的异常特征,并分 析了环流内部动力过程和海温外强迫作用。第五节 主要研究了不同时段前期环流形势及海温场的变 化。结合前冬至夏季环流背景场的维持与演变,文 中第六节建立了三个时段的概念模型。第七节为本 文的结论与讨论。

2 资料和方法

本文用到的资料包括:NCEP/NCAR 提供的 1960~2012年月平均高度场、风场及比湿场再分析 资料(Kalnay et al., 1996),空间分辨率为 2.5°× 2.5°;中国气象局国家气象信息中心提供的长江中 下游地区 353 站(图1)1961~2012年的逐月降水 资料,并以此计算得到各个站点 1961~2012年夏 季标准化降水指数(SPI)资料;美国 NOAA 提供 的 1960~2012年月平均海洋表面温度重建资料 (Smith et al., 2008),空间分辨率是 2°×2°。本文 研究的区域是长江中下游地区,包括湖北、湖南、 安徽、江苏、江西、浙江 6 省及上海市。计算过程 中取 1961~2012年的平均作为气候态,对于某一 气候变量,每一时段的距平场为该时段气候变量的 平均值与其气候态的差值,反映该时段气候变量偏 离气候态的平均情况,并对距平场进行了显著性检



图 1 长江中下游地区 353 站站点分布

Fig. 1 Spatial distribution of the 353 stations in the middle and lower reaches of the Yangtze River

验(施能和古文保, 1993)。

3 1961~2012 年长江中下游地区夏 季干湿变化

SPI 是基于降水的气象干旱指数,可以反映实测降水量相对于降水概率分布函数的标准偏差。降水资料满足偏态分布,根据 Gamma 概率分布计算给定时间尺度的累积概率,将累积概率转换为标准正态分布函数,这样有利于消除降水量的时空分布差异。因此,计算得到的 SPI 能够用于不同时间尺度、不同区域的干旱研究(Mckee et al., 1993; Lana et al., 2001; Heim, 2002)。SPI 是国内研究干旱的主要指标之一,可以表征短期降水异常和土壤湿度,适用于特定区域近时干旱监测和季节性预测(Byun and Wilhite, 1999)。

利用长江中下游地区 353 站 1961~2012 年的 逐月降水资料,计算夏季降水量的累积概率密度, 并将其转化成标准正态分布函数,最后近似求得各 站点夏季 SPI (Thom, 1966; Mckee et al., 1993)(取 1961~2012 年夏季降水量的平均为气候态,计算过 程中的参数采用最大似然估计求得)。文中利用季 节尺度的 SPI 来表征夏季长江中下游地区各站点的 干湿状态,当 SPI 值大于 0,表明降水偏多,处于 偏湿状态; SPI 值小于 0,表明降水偏少,处于偏 干状态。SPI 旱涝等级划分规则如表 1 (Mckee et al.,1995)(基于长江中下游地区各站点 1961~2012 年逐年夏季 SPI,根据表 1 得到各站点逐年夏季的

887

干湿状态),并统计了整个长江中下游地区逐年夏 季中旱及以上等级的站点数目(干旱站点数目), 即逐年夏季 SPI 值小于或等于-1.0 的站点数目。

表1 标准化降水指数(SPI)旱涝等级划分

Table 1Meteorological drought grades based on theStandardized Precipitation Index (SPI)

SPI	旱涝程度
SPI ≤−2.0	重早
-1.5 ≤SPI<-2.0	大旱
$-1.0 \leqslant \text{SPI} < -1.5$	中旱
-1.0 <spi<0< td=""><td>轻旱</td></spi<0<>	轻旱
0 <spi<1.0< td=""><td>轻涝</td></spi<1.0<>	轻涝
$1.0 \leq \text{SPI} < 1.5$	中涝
1.5≪SPI<2.0	大涝
SPI ≥2.0	重涝

图 2 给出了长江中下游地区 1961~2012 年夏 季干旱站点数目的逐年变化及其 MK 突变检测结果 (Mann, 1945; Litchfield and Wilcoxon, 1955)。从图 2a 可看出,干旱站点数目具有明显的年际变化,在 1970年代早期减少、中后期明显增加,1990年代 以后干旱站点数目则显著减少。据此,图 2b 进行 了 MK 突变检测,当曲线 UF/UB 的值大于(小于) 0 时,表明序列呈上升(下降)趋势,并且当曲线 UF/UB 曲线超过信度线时,则表明序列有显著上升 (下降)趋势(魏凤英, 2007)。由图中 UF 曲线可 见, UF 值在 1970 年代由正转负, 表明该地区干旱 站点数目有减少的趋势。MK 突变检测中, 若 UF 和 UB 曲线相交于信度线之间,则该点为突变点(符 淙斌和王强, 1992)。注意到, UF 和 UB 曲线在 1970年代中后期至1980年代中期一直交叉,同时, 有研究(施能等, 1995; Gong and Ho, 2002; 马柱 国和任小波, 2007; 张人禾等, 2008) 表明, 在 1970 年代末与 1980 年代中后期长江中下游夏季降水及

我国东部夏季气候发生了明显的突变/转折。基于以 上分析,将 1961~2012 年长江中下游地区夏季干 湿变化划分为三个时段: 1961~1973 年为第一时 段,该时段干旱站点较多; 1974~1986 年为第二时 段,干旱站点数目呈现不稳定变化,该时段处于过 渡阶段,且在时间上也与目前学术界公认的一次全 球气候突变/转折的发生时间(1970 年代末至 1980 年代初)相吻合(Graham,1994; Alley et al.,2003; Xiao and Li, 2007); 1987~2012 年为第三时段,该 时段干旱站点较少。图 2a 中黑色虚线分别为三个 时段干旱站点数目的均值,表明干旱站点显著减 少。

图 3 给出了长江中下游地区夏季 SPI 分布。计 算是根据各站点逐年夏季 SPI 合成每一时段各站点 的 SPI 值。从图 3 中可见,在第一时段(1961~1973 年),长江中下游大部分地区干旱,浙江东部、江 苏南部部分地区及上海市干旱比较严重,只有江苏 北部及江西南部部分地区无旱。第二时段(1974~ 1986 年)相对于第一时段,干旱强度减弱,范围缩 小,尤其是浙江东部、江苏南部及上海地区干旱明 显减轻。第三时段(1987~2012 年),长江中下游 绝大部分地区 SPI 为正值,只有很少且零星分布的 局部地区存在干旱。综合图 2 和图 3 的结果,说明 长江中下游地区夏季干旱程度及干旱范围有明显 的年代际变化,干旱范围在不断缩小,且干旱程度 持续减弱。

4 不同时段夏季环流背景场异常特 征分析

4.1 不同高度水平环流及整层水汽输送通量

图 4 给出了不同时段夏季 500 hPa 高度场及其 距平场,第一时段(图 4a),欧亚上空为显著负距



图 2 长江中下游地区(a)夏季干旱站点数目逐年变化(虚线为各时段干旱站点数目均值)及(b)Mann-Kendall方法统计量曲线(虚线为 95%的置 信水平)

Fig. 2 (a) Interannual variation and (b) the Mann–Kendall statistics for the number of stations in the middle and lower reaches of the Yangtze River above the level of moderate drought in summer. Dotted lines in (a) denote the average number of stations in each stage, and in (b) denotes the 95% confidence level

平,乌拉尔山至蒙古上空为显著负距平中心,鄂霍 次克海上空为负距平,不利于乌拉尔山与鄂霍次克 海高压脊发展;贝加尔湖西部槽北移偏强,东亚大 槽偏强且槽区较宽,亚洲中高纬度西风环流平直, 不利于冷空气南下;南支槽加深,槽前从孟加拉湾 向我国东部地区的西南水汽输送偏强;副热带高压 偏弱,西太平洋副热带高压偏弱尤为明显。第二时 段(图 4b)相对于第一时段,欧亚上空负距平明显 减弱,部分地区甚至出现正距平;巴尔喀什湖附近 为正距平中心,巴尔喀什湖高压脊发展,我国东北 上空有一浅槽;东亚大槽位置偏东,南支槽西移减 弱,西太平洋副热带高压增强,但仍弱于气候态。 第三时段(图 4c),500 hPa 高度场为正距平控制, 乌拉尔山及贝加尔湖附近为显著正距平中心,乌拉 尔山与贝加尔湖高压脊发展;东亚大槽东移偏弱, 南支槽异常偏西偏弱,西太平洋副热带高压显著偏 强,使得其西侧向我国东部地区的偏南水汽输送增 强。

将 1961~2012 年逐年夏季各站点的 SPI 进行 区域平均,得到可以反映长江中下游地区逐年夏季 整体干湿状态的 SPI (定义为 Y_SPI)。图 5a 给出 了夏季海平面气压场与 Y_SPI 的相关系数分布,北 半球低纬度太平洋及东亚地区海平面气压与 Y_SPI 为显著正相关关系。在第一时段(图 5b),欧亚大 陆及赤道东太平洋海平面气压为显著负距平,我国 及蒙古地区为显著负距平中心,且北太平洋为弱的 负距平,阿留申低压较强;印度及孟加拉湾附近为 显著负距平,印度低压偏强。第二时段(图 5c), 北半球基本为弱的正距平控制,蒙古地区为正距平 中心,北太平洋出现弱的正距平,阿留申低压减弱;



图 3 长江中下游地区夏季标准化降水指数 (SPI) 分布: (a) 1961~1973 年; (b) 1974~1986 年; (c) 1987~2012 年 Fig. 3 Spatial distribution of summer Standardized Precipitation Index (SPI) in the middle and lower reaches of the Yangtze River during (a) 1961–1973, (b) 1974–1986, and (c) 1987–2012



图 4 夏季 500 hPa 高度场(等值线,单位: gpm)及其距平场(阴影): (a) 1961~1973 年; (b) 1974~1986 年; (c) 1987~2012 年。蓝色实线为 气候态 5880 线,圆点区置信水平高于 95%

Fig. 4 Composite geopotential height (contours, units: gpm) and its anomalies (shading) at 500 hPa in summer during (a) 1961–1973, (b) 1974–1986, and (c) 1987–2012. Blue solid lines indicate the average climate state of 5880 gpm; stippling represents statistical significance exceeding the 95% confidence level

南亚地区海平面气压正异常,印度低压较弱。相对 于第一时段,第三时段(图 5d)欧亚大陆为正距平, 我国大部分区域为显著正距平,且蒙古地区为显著 正距平中心,北太平洋、阿留申群岛及南亚地区为 弱的正距平,阿留申低压与印度低压填塞减弱。

图 6a 是夏季 200 hPa 高度场与 Y_SPI 的相关系数分布,由图可知,蒙古以北部分地区及低纬度高空高度场与 Y_SPI 呈显著正相关关系。第一时段(图 6b),欧亚高空高度场负异常,低纬度高空为显著

负距平控制,南亚高压比气候态弱,意味着长江中 下游易处于偏干状态。第二时段(图 6c),200 hPa 高度场负距平减弱甚至出现正距平,且南亚高压比 第一时段强,但弱于气候态,说明Y_SPI值由负转 正,长江中下游处于干旱向湿润转变的阶段。第三 时段(图 6d)高空高度距平场与第一时段基本相 反,欧亚高空为显著正距平控制,南亚高压位置偏 东,强度偏强,则长江中下游易处于湿润状态。南 亚高压对长江中下游夏季各时段干湿变化的影响



图 5 (a) 夏季海平面气压与长江中下游区域平均的 SPI (Y_SPI) 的相关系数及其 (b) 1961~1973 年, (c) 1974~1986 年, (d) 1987~2012 年距平 场(阴影,单位: hPa)。(a) 蓝色区域与(b-d) 圆点区置信水平高于 95%

Fig. 5 (a) Correlation coefficient between sea level pressure and regional average of SPI over the middle and lower reaches of the Yangtze River (Y_SPI) and sea level pressure anomalies (shading; units: hPa) in summer during (b) 1961–1973, (c) 1974–1986, and (d) 1987–2012. The blue shading in (a) and the stippling in (b–d) indicate statistical significance exceeding the 95% confidence level



图 6 同图 5, 但为夏季 200 hPa 高度场与 Y_SPI 的相关系数及其距平场(单位: gpm)。蓝色实线为气候态 12480 线,黑色实线为该时段 12480 线 Fig. 6 (a) Correlation coefficient between 200 hPa geopotential height and Y_SPI, and 200 hPa geopotential height anomalies (shading; units: gpm) in summer during (b) 1961–1973, (c) 1974–1986, and (d) 1987–2012. Blue solid lines indicate the average climate state of 12480 gpm, and black for the stage average of 12480 gpm. The blue shading in (a) and the stippling in (b–d) indicate statistical significance exceeding the 95% confidence level

与张琼和吴国雄(2001)指出的"在20世纪70年 代南亚高压强度的变化导致了长江中下游地区旱 涝转变"相一致。这进一步说明,夏季200 hPa高 度场在第二时段发生明显的转折,即由第一时段的 负距平转变为第三时段的正距平。

我国东部地区夏季主要水汽来源是来自孟加 拉湾的偏南水汽输送及西太平洋副热带高压西侧 来自南海的水汽输送,且对流层低层来自印度季风 区的水汽输送为最主要水汽来源(陆渝蓉和高国 栋, 1983; 丁一汇和胡国权, 2003)。图 7 给出了 不同时段夏季整层水汽输送通量距平场,第一时段 (图 7a),从孟加拉湾沿青藏高原东侧至我国东部 地区为显著异常的西南风水汽输送距平,并且在日 本海至北太平洋为异常偏西风水汽输送距平,这意 味着该时段夏季风水汽输送偏强,水汽随夏季风到 达长江流域后继续北上,使得长江流域降水偏少。 第二时段(图 7b),赤道印度洋附近有异常西风水 汽输送距平,孟加拉湾为异常气旋式水汽输送距 平。同时,从北太平洋经日本至东海为异常偏东北 风水汽输送距平且我国东部地区为显著偏北风水 汽输送距平,这说明从孟加拉湾及南海向我国东部 地区的偏南水汽输送异常偏少。而第三时段(图7c), 从日本海经我国东部地区至中南半岛及孟加拉湾 为显著偏东北风水汽输送距平,这意味着该时段夏 季风水汽输送偏弱,水汽滞留在长江流域,有利于 长江中下游夏季降水,这与已有研究一致(张庆云 等,2003b;丁一汇和刘芸芸,2008)。显然,第一 时段夏季,长江流域虽然盛行强的西南暖湿气流,但 是没有明显的冷空气配合,冷暖空气交绥受阻,使得 长江中下游降水异常偏少;第二时段,长江流域盛行 偏北气流,冷空气明显偏强,而南支槽与西太平洋 副热带高压同时偏弱,暖湿气流也明显偏弱,仍不 利于长江中下游降水;第三时段,北方有强的东北 气流南下,与西太平洋副热带高压西侧向东北输送 的暖湿气流交汇于长江流域,长江流域上空出现明 显气旋性环流,有利于长江中下游降水偏多。

从环流系统看,第一时段夏季,由于乌拉尔山 及鄂霍次克海高压脊发展受抑,亚洲中高纬度西风 环流平直,冷空气停滞在我国北方,同时南支槽偏 东偏强,南支槽槽前向我国东部地区的西南水汽输 送偏强,长江流域暖湿气流偏强。第二时段夏季, 东亚大槽偏东,巴尔喀什湖高压脊发展,东北上空 有一冷槽,中高纬度冷空气异常活跃,从而使得长 江流域盛行偏北冷空气,暖湿气流明显不足。第三 时段相对于第一时段,乌拉尔山西部及贝加尔湖高 压脊发展,贝加尔湖高压脊明显偏强,脊前冷空气 活跃;西太平洋副热带高压偏西偏强,有利于西太 平洋副热带高压西侧向我国东部地区的水汽输送,



图 7 夏季整层水汽输送通量距平场 (矢量,单位: kg m⁻¹ s⁻¹): (a) 1961~1973 年; (b) 1974~1986 年; (c) 1987~2012 年。等值线为水汽输送 通量距平的量值,阴影区置信水平高于 95%

Fig. 7 Anomalies of vertically integrated water vapor flux (arrows, units: kg $m^{-1} s^{-1}$) in summer during (a) 1961–1973, (b) 1974–1986, and (c) 1987–2012, solid lines are the values of vertically integrated water vapor flux. Areas that are statistically significant over the 95% confidence level are shaded

冷暖气流交汇于长江流域,长江流域上空出现明显 气旋性环流。

4.2 海温异常及其对环流的影响

海温是影响气候变化的一个重要外强迫因子, 印度洋海温异常对亚洲天气气候有重要影响(肖子 牛等,2000),且夏季南海海温偏高时,西太平洋副 热带高压西伸发展,长江中下游夏季降水偏多(梁 建茵和林元弼, 1992)。图 8a 给出了夏季海温场与 Y SPI 相关系数分布, 20°S 以北的印度洋、孟加拉 湾、南海、西太平洋及赤道东太平洋部分海域的海 温与Y SPI 显著相关,这些区域是影响长江中下游 夏季干旱的关键区。第一时段(图 8b),全球海温 冷异常,关键区海温显著偏冷,意味着长江中下游 夏季易发生干旱。在第二时段(图 8c),全球海温 负异常显著减弱,部分关键区海温为正距平,印度 洋及赤道东太平洋海温增温尤为明显。第三时段 (图 8d)相对于第一时段,全球海温场为正距平, 关键区海温明显偏暖,则长江中下游夏季易处于湿 润状态。

夏季,第一时段全球海温冷异常,印度洋、南海及赤道西太平洋海温显著偏冷,西太平洋副热带高压与南亚高压偏弱,同时海陆气压梯度增大,印度洋及南海对流层低层偏南风增强,有利于东亚夏季风偏强;第二时段为全球海温距平由负转正的阶段,印度洋海温明显增温,西太平洋副热带高压与南亚高压增强,海陆气压梯度减小,抑制夏季风的

加强;第三时段海温距平场与第一时段基本相反, 印度洋及南海海温为显著正距平,西太平洋副热带 高压与南亚高压偏强,海陆气压梯度较小,印度洋 及南海对流低层偏南风较弱,不利于夏季风北进。 这进一步验证了前文不同时段强、弱夏季风水汽输 送对长江中下游夏季干旱的影响。

5 不同时段前期(前冬、春季)环流 背景场异常特征

5.1 前冬水平环流形势及海温场对比分析

图 9 给出了不同时段前冬 500 hPa 高度场及其 距平场,第一时段(图 9a),高纬度上空为正负相 间(由西至东,下同)的高度距平波列,乌拉尔山 与北太平洋上空为正距平中心, 东亚大槽偏西偏 强,有利于阻塞形势发展;中低纬度上空为显著负 距平,地中海附近为显著负距平中心;青藏高原北 部脊偏弱,我国上空为显著负距平。在第二时段(图 9b),高纬度上空正负相间的距平波列较弱,乌拉 尔山与鄂霍次克海附近的正距平易形成阻塞形势; 东亚大槽减弱,欧亚上空负距平明显减弱。第三时 段(图 9c)相对于第一时段,高纬度上空亦为正负 相间的距平波列,但与第一时段的距平波列相位相 反,乌拉尔山及鄂霍次克海上空为负距平,东亚大 槽异常偏弱,阻塞形势发展受抑;中低纬度上空为 正距平控制,地中海附近为正距平中心;青藏高原 北部脊偏强,我国上空为显著正距平。



图 8 同图 5,但为夏季海温场与 Y_SPI 的相关系数及其距平场(单位: °C)

Fig. 8 (a) Correlation coefficient between sea surface temperature and Y_SPI and SST anomalies (shading; units: °C) in summer during (b) 1961–1973, (c) 1974–1986, and (d) 1987–2012. The blue shading in (a) and the stippling in (b–d) indicate statistical significance exceeding the 95% confidence level

图 10a 给出了前冬海平面气压场与 Y_SPI 的相 关系数分布,欧亚大陆海平面气压与 Y_SPI 呈正相 关关系。第一时段(图 10b),北半球中低纬度海平 面气压场为负距平,欧亚及赤道东太平洋附近为显 著负距平,蒙古高压明显偏弱;阿留申群岛及北太 平洋为正距平中心,阿留申低压偏弱。在第二时段 (图 10c),欧亚大部分区域为弱的正距平,蒙古高 压加强;北太平洋为负距平中心,阿留申低压较强。 第三时段(图 11d)相对于第一时段,北半球中低 纬度海平面气压为正距平,蒙古冷高压偏强,冷空 气比较活跃;阿留申群岛附近为负距平,阿留申低 压偏强。 前冬(图11a),赤道南印度洋、鄂霍次克海及 我国东海海温与Y_SPI呈显著正相关关系。在第一 时段(图11b),全球海温异常偏冷,鄂霍次克海、 南印度洋及东海冷异常尤为显著。第二时段(图 11c),海温负距平减弱,部分关键区海温为弱的正 距平,南印度洋海温增温趋势明显。第三时段(图 11d)相对于前两个时段,全球海温整体偏暖,关 键区海温显著偏暖。

5.2 春季水平环流形势及海温场对比分析

图 12 给出了不同时段春季 500 hPa 高度场及其 距平场,第一时段(图 12a),中高纬度上空为"负 一正一负"的距平波列,欧亚及北美上空为显著负



图 9 前冬 500 hPa 高度场(等值线)及其距平场(阴影)(单位: gpm): (a) 1961~1973 年; (b) 1974~1986 年; (c) 1987~2012 年。圆点区置信 水平高于 95%

Fig. 9 Composite geopotential height (contours; units: gpm) and its anomalies (shading) at the 500-hPa level in winter during (a) 1961–1973, (b) 1974–1986, and (c) 1987–2012. Stippling indicates statistical significance over the 95% confidence level



图 10 (a) 前冬海平面气压与 Y_SPI 的相关系数及其 (b) 1961~1973 年、(c) 1974~1986 年、(d) 1987~2012 年距平场(阴影,单位: hPa)。(a) 蓝色区域与(b-d) 圆点区置信水平高于 95%

Fig. 10 (a) Correlation between sea level pressure and Y_SPI and sea level pressure anomalies (shading; units: hPa) in winter during (b) 1961–1973, (c) 1974–1986, and (d) 1987–2012. The blue shading in (a) and the stippling in (b–d) indicate statistical significance exceeding the 95% confidence level

距平控制,北太平洋上空为正距平中心,东亚大槽 异常偏西偏强; 青藏高原北部脊偏弱,我国上空为 显著负距平。在第二时段(图12b),乌拉尔山至鄂 霍次克海为"正一负一正"距平波列,乌拉尔山与 鄂霍次克海上空为正距平,北太平洋上空为负距平 中心,乌拉尔山与鄂霍次克海高压脊发展,东亚大 槽偏东偏强,我国上空为弱的负距平。相对于第一 时段,第三时段(图12c)乌拉尔山与北太平洋上 空为负距平,东亚大槽北移减弱,阻塞形势发展受 抑; 青藏高原北部脊偏强,蒙古及我国上空为显著 正距平。

图 13a 给出了春季海平面气压场与 Y_SPI 相关 系数分布,由图可见,阿留申群岛、赤道太平洋及 里海附近海平面气压场与 Y_SPI 呈显著正相关关 系。第一时段(图 13b),欧亚地区为显著负距平, 蒙古高压明显偏弱;赤道太平洋海平面气压显著负 异常,北太平洋及阿留申群岛附近为正距平中心, 阿留申低压明显偏弱。第二时段(图 13c),欧亚大 部分地区海平面气压正异常,蒙古高压增强;阿留 申群岛附近为负距平中心,阿留申低压偏强。在第



图 11 同图 10,但为前冬海温场与 Y_SPI 的相关系数及其距平场(单位:℃),

Fig. 11 (a) Correlation coefficient between sea surface temperature (SST) and Y_SPI and SST anomalies (units: °C) in winter during (b) 1961–1973, (c) 1974–1986, and (d) 1987–2012. The blue shading in (a) and the stippling in (b–d) indicate statistical significance exceeding the 95% confidence level



图 12 春季 500 hPa 高度场(等值线)及其距平场(阴影)(单位: gpm): (a) 1961~1973 年; (b) 1974~1986 年; (c) 1987~2012 年。圆点区置 信水平高于 95%

Fig. 12 Composite geopotential height (contours; units: gpm) and its anomalies (shading) at the 500-hPa level in spring during (a) 1961–1973, (b) 1974–1986, and (c) 1987–2012. Stippling indicates statistical significance over the 95% confidence level

三时段(图13d),欧亚部分区域为显著正距平,蒙 古及我国大部分地区为显著正异常中心,蒙古高压 异常偏强;赤道太平洋及阿留申群岛附近为正距 平,阿留申低压填塞减弱。

春季(图 14a),南印度洋、赤道印度洋及赤道 东太平洋海温与Y_SPI呈显著正相关关系。第一时 段(图 14b),全球海温偏冷,关键区海温冷异常尤 为显著。在第二时段(图 14c),全球海温冷异常减 弱,部分海域海温为正距平,且南印度洋及赤道东 太平洋增温明显。第三时段(图 14d)相对于前两 个阶段,全球海温场异常偏暖,赤道印度洋及赤道 东太平洋偏暖尤为显著,有利于西太平洋副热带高 压与南亚高压的偏强(张琼等,2003)。

6 不同时段环流演变及其概念模型

6.1 前冬至夏季环流演变及其影响

500 hPa 高度场及其距平场分析表明,第一时段,前冬高纬度上空正负相间的高度距平波列在



图 13 (a) 春季海平面气压与 Y_SPI 的相关系数及其(b) 1961~1973 年、(c) 1974~1986 年、(d) 1987~2012 年距平场(阴影,单位: hPa)。(a) 蓝色区域与(b-d)圆点区置信水平高于 95%

Fig. 13 (a) Correlation coefficient between sea level pressure and Y_SPI and sea level pressure anomalies (shading; units: hPa) in spring during (b) 1961–1973, (c) 1974–1986, and (d) 1987–2012. The blue shading in (a) and the stippling in (b–d) indicate statistical significance exceeding the 95% confidence level



图 14 同图 13, 但为春季海温场与 Y_SPI 的相关系数及其距平场(单位: °C)

Fig. 14 (a) Correlation coefficient between sea surface temperature and Y_SPI and SST anomalies (units: °C) in spring during (b) 1961–1973, (c) 1974–1986, and (d) 1987–2012. The blue shading in (a) and the stippling in (b–d) indicate statistical significance exceeding the 95% confidence level

春季调整为"正一负一正"的距平波列,并在夏季 消失;中低纬度上空从前冬至夏季维持显著负距 平,前冬地中海附近的负距平中心在春季东移至里 海附近,该负异常中心在夏季稳定维持在蒙古上 空,且强度加强;夏季,东亚大槽位置偏北,亚洲 上空西风环流平直,南支槽发展,西太平洋副热带 高压异常偏弱。第二时段,前冬高纬度上空正负相 间的距平波列较弱,乌拉尔山与鄂霍次克海附近的 正距平在春季加强,有利于阻塞形势发展,且乌拉 尔山附近的正距平中心在夏季减弱并移至巴尔喀 什湖附近,而中低纬度上空从前冬至夏季负距平持 续减弱;夏季,巴尔喀什湖高压脊偏强,东北上空 有一冷槽,西太平洋副热带高压比第一时段偏强。 在第三时段,前冬高纬度上空正负相间的距平波列 与第一时段相位相反,这一波列在春季转变为"负 一正一负"的距平波列,乌拉尔山与北太平洋上空 为负距平,而蒙古及我国上空前冬至夏季维持显著 正距平;前冬,乌拉尔山与鄂霍次克海高压脊偏弱, 东亚大槽偏弱,阻塞形势发展受抑;夏季,乌拉尔 山与贝加尔湖高压脊偏强,南支槽异常偏弱,西太 平洋副热带高压显著偏强。由此可见,500 hPa 高 度场没有呈现出一致性的变化趋势,而表现为明显 的年代际变化,即第一时段与第三时段所对应季节 的高度距平场相位明显相反,说明在第二时段 500 hPa 高度场发生明显的突变/转折,即由负(正)相 位转为正(负)相位,这与已有的研究相一致(施 能和朱乾根 1996; 颜鹏程等, 2014)。

前冬,赤道中太平洋及里海附近海平面气压与 Y_SPI 为显著正相关关系,在春季与夏季显著正相 关区域进一步扩大至阿留申群岛附近及东亚地区, 且北半球低纬度太平洋海平面气压与Y SPI的正相 关关系随季节变得越来越显著。第一时段, 前冬欧 亚大陆为显著负距平、蒙古冷高压偏弱, 阿留申群 岛附近为正距平中心、阿留申低压异常偏弱,里海 附近的显著负距平中心在春季移至蒙古地区,同时 阿留申群岛附近的正距平中心在春季减弱; 夏季, 欧亚大陆显著负距平加强,蒙古地区负距平中心尤 为显著,印度低压偏强,则长江中下游夏季易发生 干旱。第二时段,前冬至夏季欧亚大部分地区海平 面气压维持弱的正距平, 前冬至春季阿留申群岛附 近为负距平中心,蒙古高压加强、阿留申低压偏强; 夏季,阿留申群岛附近为弱的正距平,阿留申低压 与印度低压同时偏弱,有利于长江中下游夏季干旱 减弱。第三时段,前冬,欧亚大陆为正距平,里海 附近为显著正距平中心,蒙古高压偏强,阿留申群 岛附近为负距平,阿留申低压偏强;春季,里海附 近的正距平中心移至蒙古地区并且强度加强,阿留 申群岛为弱的正距平,阿留申低压填塞减弱;夏季, 蒙古地区的正距平中心持续加强,我国及周边地区 海平面气压显著正异常,印度低压偏弱,这意味着 长江中下游地区夏季易处于偏湿状态。由此可见, 与第二时段长江中下游夏季干湿转变相对应,北半 球海平面气压场在第二时段发生了明显的转折,使 得第一时段与第三时段所对应季节的海平面气压 距平场相位相反。

前冬至夏季,赤道南印度洋海温与Y SPI 显著 相关,并且赤道印度洋显著相关区随季节范围扩 大,而南印度洋显著相关区范围缩小。第一时段, 海温场从前冬至夏季整体持续偏冷, 20°S 以北印度 洋偏冷异常显著,南印度洋冷中心持续向北移动, 西太平洋副热带高压偏弱,这意味着该时段长江中 下游夏季易发生干旱。第二时段,全球海温负异常 显著减弱,甚至出现正海温异常,海温距平由负转 正, 使得长江中下游夏季干湿状态发生转变。而第 三时段,前冬至夏季全球海温场整体持续偏暖,印 度洋海温偏暖尤为显著,南印度洋暖中心持续向北 移动,且范围扩大;南亚高压与西太平洋副热带高 压偏强,长江中下游夏季易处于湿润状态。全球海 温场在第二时段发生了转折,即在第一时段全球海 温为冷异常,表现为负距平;第三时段全球海温为 暖异常,表现为正距平。

6.2 概念模型

结合前冬至夏季环流形势及海温场的异常特征及其演变过程,初步建立了长江中下游地区各个时段的概念模型:

(1)第一时段,前冬至夏季全球海温持续偏冷,南印度洋与南海海温冷异常在春季显著增强,使得西太平洋副热带高压与南亚高压偏弱。前冬,青藏高原北部脊偏弱,蒙古高压偏弱,冷空气活动较弱;东亚大槽位置偏西,阿留申低压异常偏弱。春季,槽脊系统东移减弱,有利于经向环流转变为纬向环流;蒙古地区海平面气压负异常中心在夏季维持并加强。夏季,印度低压偏强,南支槽加深发展,夏季风水汽输送明显偏强;同时乌拉尔山高压脊偏西偏弱,亚洲中高纬度为平直西风气流,冷空气南下受阻。在以上环流配置下,长江中

下游夏季暖湿气流偏强,中高纬度冷空气异常偏弱,不利于冷暖空气交绥,导致长江中下游大部分 地区发生干旱。

(2)第二时段,前冬至夏季全球海温冷异常减弱,部分海域出现弱的正距平,南印度洋海温增温趋势明显,西太平洋副热带高压与南亚高压增强。前冬,欧亚海平面气压为正距平、蒙古冷高压增强,乌拉尔山与鄂霍次克海上空的正距平在春季加强,有利于高压脊发展,且前冬与春季阿留申低压偏强。夏季,巴尔喀什湖高压脊发展,且我国东北上空有一浅槽,北方冷空气活跃;相对于第一时段,印度低压偏弱,南支槽西移减弱,槽前从孟加拉湾向我国东部地区的西南水汽输送减弱,同时西太平洋副热带高压仍弱于气候态,其西北侧来自南海的偏南水汽输送较弱。在这样的环流演变与配置下,我国长江中下游地区夏季盛行偏北冷空气,暖湿空气明显不足,导致长江中下游部分地区发生干旱。

(3)第三时段,前冬至夏季全球大部分海域出 现暖异常,印度洋与南海海温偏暖尤为显著,西太 平洋副热带高压与南亚高压偏强,同时欧亚上空维 持显著正距平。前冬,乌拉尔山与鄂霍次克海高压 脊偏弱,东亚大槽偏弱,不利于阻塞形势发展;青 藏高原北部脊发展,蒙古冷高压强盛,冷空气活跃。 春季,印度洋海温暖异常明显增强,贝加尔湖高压 脊发展,蒙古及我国上空为显著正距平。夏季,印 度低压异常偏弱,南支槽异常偏西偏弱,且夏季风 水汽输送偏弱,水汽滞留在长江流域;同时贝加尔 湖高压脊偏强,脊前中高纬度冷空气南下。在以上 环流的演变与配置下,冷暖空气交绥于长江流域, 有利于长江中下游夏季降水偏多。

7 结论与讨论

本文根据长江中下游地区夏季 SPI 及干旱站点 数目的 MK 突变检测结果,将 1961~2012 年长江 中下游地区夏季干湿变化划分为三个时段,并且重 点分析了不同时段前冬至夏季环流演变过程。主要 结论如下:

(1)长江中下游地区夏季干湿状态有明显的年代际变化,且干旱强度持续减弱。第一时段(1961~1973年),长江中下游大部分地区干旱比较严重,处于干旱状态。第二时段(1974~1986年)为第一时段与第三时段的过渡阶段,长江中下游地区干旱

范围减小、程度减轻。第三时段(1987~2012年), 长江中下游大部分地区降水正常或偏多,处于湿润 状态。

(2)研究表明,海平面气压场、高度场、整层 水汽输送通量场及海温场呈现出不一致的变化趋势,即第一时段与第三时段所对应季节的环流背景 距平场相位明显相反,这说明环流背景场在第二时 段发生了突变/转折。第二时段前冬至夏季,环流背 景距平场基本处于由负转正的状态,且在春季正距 平明显增强;而第一(三)时段前冬至夏季,海平 面气压场、高度场及海温场持续维持负(正)距平, 且在春季与夏季负(正)异常持续增强。

(3) 第一时段, 前冬乌拉尔山至北太平洋上空 为"正一负一正"的高度距平波列,青藏高原北部 脊偏弱,我国上空为显著负距平,蒙古冷高压偏弱; 前冬至夏季,关键区海温持续偏冷,使得南亚高压 和西太平洋副热带高压异常偏弱; 夏季, 印度低压 偏强、南支槽加深,夏季风水汽输送偏强,长江流 域盛行西南暖湿气流,但亚洲中高纬度西风环流平 直,冷空气不易南下,导致长江中下游出现大范围 干旱。在第二时段前冬,蒙古高压较强,乌拉尔山 与鄂霍次克海上空的正距平在春季加强,阻塞形势 发展;夏季,巴尔喀什湖高压脊偏强且我国东北上 空有一冷槽,北方冷空气活跃,而南支槽西移减弱, 且西太平洋副热带高压较弱,从而使得长江流域暖 湿空气明显不足,冷空气偏强,导致长江中下游部 分地区干旱。第三时段,前冬青藏高原北部脊发展, 我国上空为正距平控制,蒙古冷高压偏强;前冬至 夏季,全球海温持续偏暖,关键区海温暖异常尤为 显著, 使得西太平洋副热带高压与南亚高压偏强; 夏季,印度低压偏弱、南支槽异常偏西偏弱,夏季 风水汽输送较弱,水汽滞留在长江流域,同时贝加 尔湖高压脊偏强,脊前冷空气活跃,有利于冷暖空 气交绥, 使得长江中下游大部分地区夏季降水偏 名。

本文主要分析了 1961~2012 年长江中下游地 区夏季干湿变化的阶段性特征及前冬至夏季环流 演变的过程,并初步建立了概念模型。干旱最主要 的影响因子是降水,长江中下游夏季降水受夏季 风、青藏高原热力作用以及地形等因素影响。李新 周等(2004)发现,暖时段干旱发生的频率比冷时 段高,因此,温度对干旱的影响是一个值得深入研 究的问题。目前,干旱预测与降水预测本质上的区 别还不清楚,且干旱的机理与机制也有待更进一步的研究。

参考文献(References)

- Alley R B, Marotzke J, Nordhaus W D, et al. 2003. Abrupt climate change [J]. Science, 299 (5615): 2005–2010.
- Byun H R, Wilhite D A. 1999. Objective quantification of drought severity and duration [J]. J. Climate, 12 (9): 2747–2756.
- Dai A G. 2011. Drought under global warming: A review [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2 (1): 45–65.
- 丁一汇, 胡国权. 2003. 1998 年中国大洪水时期的水汽收支研究 [J]. 气 象学报, 61 (2): 129–145. Ding Yihui, Hu Guoquan. 2003. A study on water vapor budget over China during the 1998 severe flood periods [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61 (2): 129–145.
- 丁一汇,刘芸芸. 2008. 亚洲—太平洋季风区的遥相关研究 [J]. 气象学 报, 66 (5): 670-682. Ding Yihui, Liu Yunyun. 2008. A study of the teleconnection in the Asian-Pacific monsoon region [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (5): 670-682.
- 封国林, 侯威, 支蓉, 等. 2012a. 极端气候事件的检测、诊断与可预测性 研究 [M]. 北京: 科学出版社, 18–97. Feng Guolin, Hou Wei, Zhi Rong, et al. 2012a. Detection, Diagnosis and Predictability Research of Extreme Climate Events (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 18– 97.
- 封国林,杨涵洧,张世轩,等. 2012b. 2011 年春末夏初长江中下游地区 旱涝急转成因初探 [J]. 大气科学, 36 (5): 1009–1026. Feng Guolin, Yang Hanwei, Zhang Shixuan, et al. 2012b. A preliminary research on the reason of a sharp turn from drought to flood in the middle and lower reaches of the Yangtze River in late spring and early summer of 2011 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (5): 1009– 1026.
- 符淙斌, 王强. 1992. 气候突变的定义和检测方法 [J]. 大气科学, 16 (4): 482–493. Fu Congbin, Wang Qiang. 1992. The definition and detection of the abrupt climatic change [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 16 (4): 482–493.
- Gong D Y, Wang S W. 2000. Severe summer rainfall in China associated with enhanced global warming [J]. Climate Research, 16: 51–59.
- Gong D Y, Ho C H. 2002. Shift in the summer rainfall over the Yangtze River valley in the late 1970s [J]. Geophys. Res. Lett., 29 (10): 78-1–78-4.
- Graham N E. 1994. Decadal-scale climate variability in the tropical and North Pacific during the 1970s and 1980s: Observations and model results [J]. Climate Dyn., 10 (3): 135–162.
- Heim R R Jr. 2002. A review of twentieth-century drought indices used in the United States [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 83: 1149–1165.
- Hirschi M, Seneviratne S I, Alexandrov V, et al. 2011. Observational evidence for soil-moisture impact on hot extremes in southeastern Europe [J]. Nature Geoscience, 4 (1): 17–21.
- 侯威,杨萍,封国林. 2008. 中国极端干旱事件的年代际变化及其成因
 [J]. 物理学报, 57 (6): 3932–3940. Hou Wei, Yang Ping, Feng Guolin.
 2008. The decadal variability and its cause of the extreme drought in China [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 57 (6): 3932–3940.

Huang Jianping, Zhang Wu, Zuo Jinqing, et al. 2008. An overview of the

semi-arid climate and environment research observatory over the Loess Plateau [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 25 (6): 906–921.

- 黄士松, 汤明敏. 1987. 论东亚夏季风体系的结构 [J]. 气象科学, 7 (3): 1–16. Huang Shisong, Tang Mingmin. 1987. On the structure of the summer monsoon regime of East Asia [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 7 (3): 1–16.
- Huschke R E. 1959. Glossary of Meteorology [M]. Boston, MA: American Meteorological Society, 638pp.
- Ji Fei, Wu Zhaohua, Huang Jianping, et al. 2014. Evolution of land surface air temperature trend [J]. Nature Climate Change, 4: 462–466, doi: 10.1038/nclimate2223.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77 (3): 437–471.
- Kogan F N. 1997. Global drought watch from space [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 78 (4): 621–636.
- Lana X, Serra C, Burgueño A. 2001. Patterns of monthly rainfall shortage and excess in terms of the standardized precipitation index for Catalonia (NE Spain) [J]. International Journal of Climatology, 21 (13): 1669–1691.
- 李新周, 刘晓东, 马柱国. 2004. 近百年来全球主要干旱区的干旱化特 征分析 [J]. 干旱区研究, 21 (2): 97–103. Li Xinzhou, Liu Xiaodong, Ma Zhuguo. 2004. Analysis on the drought characteristics in the main arid regions in the world since recent hundred-odd years [J]. Arid Zone Research (in Chinese), 21 (2): 97–103.
- 梁建茵,林元弼. 1992. 南海海温异常对七月份中国气候的影响及数值 试验 [J]. 热带气象, 8 (2): 134–141. Liang Jianyin, Lin Yuanbi. 1992. The influence of sea surface temperature anomalies for the South China Sea on July climate in China and their numerical experiments [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 8 (2): 134–141.
- Litchfield J T Jr, Wilcoxon F. 1955. Rank correlation method [J]. Analytic Chemistry, 27 (2): 299–300.
- 陆渝蓉,高国栋. 1983. 中国大气中的水汽平均输送 [J]. 高原气象,2
 (4): 34–47. Lu Yurong, Gao Guodong. 1983. The mean transfer of water-vapour in the atmosphere over China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 2 (4): 34–47.
- 马柱国, 任小波. 2007. 1951–2006 年中国区域干旱化特征 [J]. 气候变化 研究进展, 3 (4): 195–201. Ma Zhuguo, Ren Xiaobo. 2007. Drying trend over China from 1951 to 2006 [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 3 (4): 195–201.
- Mann H B. 1945. Nonparametric tests against trend [J]. Econometrica, 13: 245–259.
- McKee T B, Doesken N J, Kleist J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales [C]// Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Boston, MA: American Meteorological Society, 179–183.
- McKee T B, Doesken N J, Kleist J. 1995. Drought monitoring with multiple time scales [C]// Ninth Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, 233–236.
- 施能,古文保. 1993. 大气环流异常分析中使用合成方法的一个问题 [J]. 气象,19 (9): 32–34. Shi Neng, Gu Wenbao. 1993. A note on composite analysis of atmospheric circulation anomalies [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 19 (9): 32–34.

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, 53 (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), 53 (4): 431–439.

- 施能,朱乾根,吴彬贵. 1996. 近 40 年东亚夏季风及我国夏季大尺度天 气气候异常 [J]. 大气科学, 20 (5): 575–583. Shi Neng, Zhu Qian'gen, Wu Bingui. 1996. The East Asian summer monsoon in relation to summer large scale weather-climate anomaly in China for last 40 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica), 20 (5): 575–583.
- 施能,朱乾根. 1996. 北半球大气环流特征量的长期趋势及年代际变化 [J]. 南京气象学院学报, 19 (3): 283-289. Shi Neng, Zhu Qian'gen. 1996. Secular trends and interdecadal variation of characteristic quantities of atmospheric circulations for northern winter [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 19 (3): 283-289.
- 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.
- 孙淑清, 马淑杰. 2003. 海温异常对东亚夏季风及长江流域降水影响的 分析及数值实验 [J]. 大气科学, 27 (1): 36–52. Sun Shuqing, Ma Shujie. 2003. Analysis and numerical experiment on the relationship between the 1998 summer monsoon activities and SSTA in tropical regions [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (1): 36–52.
- 陶诗言, 徐淑英. 1962. 夏季江淮流域持久旱涝现象的环流特征 [J]. 气 象学报, 32 (1): 1–10. Tao Shiyan, Xu Shuying. 1962. Some aspects of the circulation during the periods of the persistent drought and flood in Yang—tze and Huaihe valleys in summer [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 32 (1): 1–10.
- 陶诗言,朱福康. 1964. 夏季亚洲南部 100 毫巴流型的变化及其与西太 平洋副热带高压进退的关系 [J]. 气象学报, 34 (4): 385–396. Tao Shiyan, Zhu Fukang. 1964. The 100-mb flow patterns in southern Asia in summer and its relation to the advance and retreat of the West-Pacific subtropical anticyclone over the Far East [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 34 (4): 385–396.
- 陶诗言, 张庆云, 张顺利. 1998. 1998 年长江流域洪涝灾害的气候背景和 大尺度环流条件 [J]. 气候与环境研究, 3 (4): 290–298. Tao Shiyan, Zhang Qingyun, Zhang Shunli. 1998. The great floods in the Changjiang River valley in 1998 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 3 (4): 290–298.
- Thom H C S. 1966. Some Methods of Climatological Analysis [M]. Geneva, Switzerland: Secretariat of the World Meteorological Organization, 53 pp.
- 王蕾, 张人禾. 2006. 不同区域海温异常对中国夏季旱涝影响的诊断研 究和预测试验 [J]. 大气科学, 30 (6): 1147–1159. Wang Lei, Zhang Renhe. 2006. Diagnostic researches and forecasting experiments of the various regional sea surface temperature anomaly on summer precipitation in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in

Chinese), 30 (6): 1147-1159.

- 王遵娅, 丁一汇. 2008. 夏季长江中下游早涝年季节内振荡气候特征 [J]. 应用气象学报, 19 (6): 710–715. Wang Zunya, Ding Yihui. 2008. Climatic features of intraseasonal oscillations of summer rainfalls over mid-lower reaches of the Yangtze River in the flood and drought years [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 19 (6): 710– 715.
- Wang Y Q, Zhou L. 2005. Observed trends in extreme precipitation events in China during 1961–2001 and the associated changes in large-scale circulation [J]. Geophysical Research Letters, 32: L09707, doi:10. 1029/2005GL022574.
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 气象出版社, 63-66. Wei Fengying. 2007. Modern Climatic Statistical Diagnosis and Prediction Technology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 63-66.
- Xiao D, Li J P. 2007. Spatial and temporal characteristics of the decadal abrupt changes of global atmosphere–ocean system in the 1970s [J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 112: D24S22, doi:10.1029/2007JD008956.
- 肖子牛, 孙绩华, 李崇银. 2000. El Niño 期间印度洋海温异常对亚洲气 候的影响 [J]. 大气科学, 24 (4): 461–469. Xiao Ziniu, Sun Jihua, Li Chongyin. 2000. Influence of the Indian Ocean SSTA on Asian climate during an ENSO period [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (4): 461–469.
- 颜鹏程, 封国林, 侯威, 等. 2014. 500 hPa 温度场时间序列的年代际突变 过程统计特征 [J]. 大气科学, 38 (5): 861–873. Yan Pengcheng, Feng Guolin, Hou Wei, et al. 2014. Statistical characteristics on decadal abrupt change process of time sequence in 500 hPa temperature field [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (5): 861–873.
- 叶笃正,黄荣辉. 1991. 我国长江黄河两流域旱涝规律成因与预测研究 的进展、成果与问题 [J]. 地球科学进展, 6 (4): 24-29. Ye Duzheng, Huang Ronghui. 1991. Advances, results and problems of the project "investigation on laws, causes and predictions of droughts and floods in the Yellow River valley and the Yangtze River valley of China" [J]. Advance in Earth Sciences (in Chinese), 6 (4): 24-29.
- 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. 1999. 夏季西太平洋副热带高压北跳及异常的研究 [J]. 气象学报, 57 (5): 539–548. Zhang Qingyun, Tao Shiyan. 1999. The study of the sudden northward jump of the subtropical high over the western Pacific [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 57 (5): 539–548.
- 张庆云,卫捷,陶诗言. 2003a. 近 50 年华北干旱的年代际和年际变化及 大气环流特征 [J]. 气候与环境研究, 8 (3): 307–318. Zhang Qingyun, Wei Jie, Tao Shiyan. 2003a. The decadal and interannual variations of drought in the northern China and association with the circulations [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (3): 307–318.
- 张庆云,陶诗言,陈烈庭. 2003b. 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): 559–568. Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Chen Lieting. 2003b. 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), 62 (4): 559–568.

- 张琼, 吴国雄. 2001. 长江流域大范围早涝与南亚高压的关系 [J]. 气象 学报, 9 (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), 9 (5): 569–577.
- 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.
- Zhang Q, Xu C Y, Zhang Z, et al. 2008. Spatial and temporal variability of precipitation maxima during 1960–2005 in the Yangtze River basin and possible association with large-scale circulation [J]. J. Hydrol., 353 (3-4): 215–227.
- 张人禾, 武炳义, 赵平, 等. 2008. 中国东部夏季气候 20 世纪 80 年代后

期的年代际转型及其可能成因 [J]. 气象学报, 66 (5): 697–706. Zhang Renhe, Wu Bingyi, Zhao Ping, et al. 2008. The decadal shift of the summer climate in the late 1980s over East China and its possible causes [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (5): 697–706.

- 章大全, 张璐, 杨杰, 等. 2010. 近 50 年中国降水及温度变化在干旱形 成中的影响 [J]. 物理学报, 59 (1): 655–663. Zhang Daquan, Zhang Lu, Yang Jie, et al. 2010. The impact of temperature and precipitation variation on drought in China in last 50 years [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 59 (1): 655–663.
- 周晓霞, 丁一汇, 王盘兴. 2008. 夏季亚洲季风区的水汽输送及其对中 国降水的影响 [J]. 气象学报, 66 (1): 59–70. Zhou Xiaoxia, Ding Yihui, Wang Panxing. 2008. Moisture transport in Asian monsoon region and its relationship with summer precipitation in China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61 (1): 59–70.
- 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 2000. 天气学原理和方法 [M]. 北京:气象出版社, 350–359. Zhu Qian'gen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2000. Principles and Methods of Weather (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 350–359.