

陈栋, 陈际龙, 黄荣辉, 等. 2016. 中国东部夏季暴雨的年代际跃变及其大尺度环流背景 [J]. 大气科学, 40 (3): 581–590. Chen Dong, Chen Jilong, Huang Ronghui, et al. 2016. Interdecadal changes of summertime heavy rainfall in eastern China and their large-scale circulation backgrounds [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (3): 581–590, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1504.15144.

# 中国东部夏季暴雨的年代际跃变及其 大尺度环流背景

陈栋<sup>1,2</sup> 陈际龙<sup>1</sup> 黄荣辉<sup>1</sup> 刘永<sup>1</sup>

1 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100190

2 中国科学院大学, 北京 100049

**摘 要** 本文利用 1960~2011 年中国东部地面测站的逐日降水资料 and JRA-55 再分析资料探讨了夏季暴雨分布的年代际跃变及其相关联的大尺度环流异常特征。基于暴雨频数和占比 (夏季暴雨占比是指 5~8 月暴雨降水量对总降水量的贡献百分比) 的分析结果表明: 中国东部夏季暴雨分布在 20 世纪 70 年代末和 90 年代初经历两次反相的经向“三极子”跃变。中国东部夏季暴雨的年代际演变过程可分为三个时段: 1960~1979 年为华南和华北暴雨偏多、江淮流域暴雨偏少的经向“三极子”分布; 1980~1991 年为南方和华北暴雨偏少、江淮流域暴雨偏多的经向“三极子”分布; 1992~2011 年为南方暴雨显著偏多、华北暴雨持续偏少, 逐渐形成经向“偶极子”分布, 并导致近十多年我国夏季“南涝北旱”的整体格局。1970 年代末 (1990 年代初) 跃变相关联的大尺度环流异常配置: 东亚夏季风的减弱 (增强), 西太平洋副高的增强西伸但南撤 (北抬), 南亚高压的减弱南缩 (增强东扩), 以及蒙古高原中低层的气旋式 (反气旋式) 环流异常。与此同时, 低层局地环流也发生调整: 华北和黄淮地区以及华南和江南地区均为反气旋式 (气旋式) 环流异常, 而江淮流域和四川盆地受控于风场切变式辐合 (辐散) 异常; 涡度场发生相应变化, 南北方大部分地区的负 (正) 涡度异常不 (有) 利于低涡的发展, 而江淮流域和四川盆地的正 (负) 涡度异常有 (不) 利于低涡的发展, 进而引发江南和华南暴雨减少 (增加)、江淮流域和四川盆地暴雨增加 (减少)、黄淮和华北暴雨减少 (增加) 的经向“三极子”跃变。

**关键词** 夏季暴雨 年代际跃变 经向“三极子”分布 大尺度环流 东亚夏季风

文章编号 1006-9895(2016)03-0581-10

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1504.15144

## Interdecadal Changes of Summertime Heavy Rainfall in Eastern China and Their Large-Scale Circulation Backgrounds

CHEN Dong<sup>1,2</sup>, CHEN Jilong<sup>1</sup>, HUANG Ronghui<sup>1</sup>, and LIU Yong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

**Abstract** Based on the daily precipitation dataset of 395 gauge stations in eastern China and the JRA-55 reanalysis

收稿日期 2015-03-06; 网络预出版日期 2015-04-14

作者简介 陈栋, 男, 1976 年出生, 中国科学院大气物理研究所博士研究生, 从事暴雨气候学研究。E-mail: chendong@mail.iap.ac.cn

通讯作者 陈际龙, E-mail: cjl@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2013CB430201, 中国科学院先导专项任务 XDA05090401, 国家自然科学基金项目 91337104、41375082、41375065、41320104007

**Funded by** The National Basic Research Program of China (Grant 2013CB430201), “Strategic Priority Research Program” of the Chinese Academy of Sciences (Grant XDA05090401), and National Natural Science Foundation of China (Grants 91337104, 41375082, 41375065, and 41320104007)

dataset for the period 1960–2011, interdecadal changes in the spatial distribution of summertime (May–August) heavy rainfall (HR) and their associated large-scale circulation anomalies were investigated. The mutational analysis of summer HR occurrence frequency and contributing percentage showed that there were two significant changes of summertime HR—one around the late 1970s and another in the early 1990s, both exhibiting meridional three-cell (tripole for short) anomalies in spatial terms. The period from 1960 to 1979 is referred to as P1, from 1980 to 1991 as P2, and from 1992 to 2011 as P3. A positive (negative) tripole pattern can be defined as follows: negative (positive) anomalous signs in southern China; positive (negative) anomalous signs in the Sichuan Basin and Yangtze–Huaihe River basin; negative (positive) anomalous signs in the Huanghe–Huaihe valleys and North China. In other words, the interdecadal change of summertime HR around the late 1970s (early 1990s) was characterized by a positive (negative) tripole distribution in the average difference of summertime HR frequency or percentage between the periods P2 and P1 (P3 and P2), and the two interdecadal changes were almost exactly opposite. Correspondingly, the interdecadal evolution of summertime HR anomalies can be divided into three phases, as follows: a negative tripole distribution in the P1 phase; a positive tripole distribution in the P2 phase; and a dipole distribution—known as the ‘southern flood/northern drought’ pattern—in the P3 phase. Further results show that the factors responsible for the positive (negative) tripole changes of summertime HR in eastern China around the late 1970s (early 1990s) might have been associated with anomalous large-scale circulation, as follows: a weakening (strengthening) of the East Asian summer monsoon; a southwards retreat (northwards march) of the western Pacific subtropical high, which continually strengthens and extends westwards; a southwards shrinking (eastwards expansion) and weakening (strengthening) of the South Asia high; and strong cyclonic (anticyclonic) circulation anomalies in the mid–low troposphere over the Mongol highlands.

**Keywords** Summertime heavy rainfall, Interdecadal change, Meridional three-cell distribution, Large-scale circulation, East Asian summer monsoon

## 1 引言

受东亚夏季风的影响, 中国暴雨主要发生在 5~8 月, 并分布在华北、江淮流域以及华南三个纬向带上(陶诗言, 1980)。中国夏季暴雨具有突发性、频发性和持续性的特点, 往往导致严重的洪涝灾害, 危及人民的生命财产安全, 并造成严重的国民经济损失。由此可见, 针对中国夏季暴雨的天气学和气候学研究具有重要的科学和社会意义。

关于暴雨天气学已有大量研究, 陶诗言(1980)对中国暴雨的类型和发生的环流特征做过系统总结。中国夏季暴雨具有多尺度系统相互作用的特点(丁一汇, 1994; 陶诗言等, 1998; 赵思雄等, 1998), 既由天气尺度以下的中小尺度系统热动力不稳定造成(高守亭等, 2003), 又受某些大尺度环流系统配置(即环流型)的调控(张庆云等, 2003)。中国许多暴雨都是出现在大尺度环流发生显著调整的时期, 特别是中高纬度阻塞型的建立(张庆云和陶诗言, 1998), 南亚高压强度和位置的变化(张琼和吴国雄, 2001; Wei et al., 2014), 西太平洋副高的西伸北跳异常(陶诗言和卫捷, 2006)等对触发中国暴雨发生都有很大影响。大尺度环流条件对暴雨的发生、发展有明显的动力作用, 尤其是 3 d 以上的持续性暴雨发生要受到大尺度环流系统和

行星尺度环流系统的影响(鲍名, 2007; 陈栋等, 2007)。因此, 中国夏季暴雨的变化与大尺度环流系统的变化有密切的联系。

暴雨是小概率的极端降水事件, 又具有很强的区域性差异, 其时空分布的气候特征难以通过整体来描述。因此, 暴雨的气候学研究, 尤其是年代际尺度上的研究比较困难。目前关于中国暴雨和极端降水的年代际变化研究主要是长期变化趋势和分区域个别研究(Su et al., 2006; Ge et al., 2008; Li et al., 2012)。鲍名和黄荣辉(2006)分析了 1961~2000 年中国夏季暴雨发生的十年际变化, 指出各年代的暴雨日数存在明显区域性差异。Ning and Qian (2009)分析了华南夏季暴雨的年代际变化特征, 发现 20 世纪 90 年代初华南夏季暴雨的发生频数有明显增加。相比而言, 针对东亚夏季风和中国夏季降水的年代际变化研究很多(郭其蕴, 1983; 张人禾等, 2008; Ding et al., 2008; Wu et al., 2010; Zhu et al., 2011; Liu et al., 2011)。伴随着东亚夏季风年代际异常, 黄荣辉等(2011)的研究指出中国夏季降水在 20 世纪 70 年代末期、90 年代初期和 90 年代后期发生三次显著的年代际跃变, 降水异常的空间分布存在经向“三极子”和“偶极子”两种模态的年代际转换; 而 Zhang et al. (2013)的研究指出中国夏季降水分别在 20 世纪 70 年代中期、80 年

代末以及 21 世纪初发生转型，同样表现为降水异常的经向分布差异。

与中国夏季降水的年代际转型相对应，中国夏季暴雨很可能发生类似的年代际跃变转型。然而，暴雨气候学的研究尚缺乏这方面的认识，为此，本文重点探讨 1960~2011 年中国东部夏季暴雨分布的年代际跃变特征及其相关联的大尺度环流异常配置。章节安排如下：第二小节简要介绍所用资料以及跃变检测方法；第三小节检测中国东部夏季暴雨年代际跃变的发生年份（Year of change, 简称为 Yc）；第四小节分析中国东部夏季暴雨分布的年代际跃变转型特征；第五小节进一步探讨中国东部夏季暴雨年代际跃变对应的大尺度环流异常背景；第六小节为本文总结和讨论。

## 2 资料和方法

本文采用中国气象局的 756 个地面观测站的逐日降水资料，考虑到观测资料的时间连续性，筛选出 1960~2011 年的 542 个连续无缺测站点。参照我国气象部门的相关规定，确定日降水量 50 mm 为暴雨统计阈值，暴雨的主要发生期 5~8 月作为研究时段，同时选定暴雨频数和暴雨占比作为检测暴雨年代际跃变的主要指标。其中，夏季暴雨频数即 5~8 月暴雨发生的日数，夏季暴雨占比是指 5~8 月暴雨降水量对总降水量的贡献百分比。如图 1 所示，中国夏季暴雨发生的特点可概括为：东南部多，西北

部少；沿海地区多，内陆地区少。根据观测站点的均匀性和夏季暴雨频数的分布特征，将研究区域界定在中国东部地区（18°N~44°N, 100°E~127°E），共包含 395 个地面观测站。

为检测中国东部夏季暴雨的年代际跃变特征（这里的跃变是指均值突变），本文采用两种气候统计检测方法对比分析：（1）滑动  $t$  检验（MTT）；（2）Lepage 统计检测（Lepage, 1971）。其中 Lepage 统计检测为无分布双样本的非参数检验，对气候变化趋势、循环性和不连续性有更好的检测能力（Yonetani, 1993）。此外，因跃变分析结果对应的各时段统计样本数不同，本文一致采用“双尾”分布的 Student  $t$  方法检验显著性。

为讨论大尺度环流特征，需要选择合适的全球大气再分析资料。目前常用的再分析资料中，只有 NCEP-R1 再分析资料（The NCEP/NCAR reanalysis, Kalnay et al., 1996）和 JRA-55 再分析资料（The Japanese 55-year Reanalysis, Kobayashi et al., 2015）的时间长度足够覆盖 1960~2011 年。然而，许多研究（Yang et al., 2002; Inoue and Matsumoto, 2004; 陈际龙和黄荣辉, 2008）已经证实 NCEP-R1 资料在 20 世纪 70 年代以前的数据部分存在明显的系统性误差。考虑到本文的研究时段涉及 20 世纪 70 年代以前的数据，并且 JRA-55 有更高的空间分辨率（1.25°×1.25°），为避免资料问题的困扰，本文选定 1960~2011 年的 JRA-55 再分析资料来探讨中国

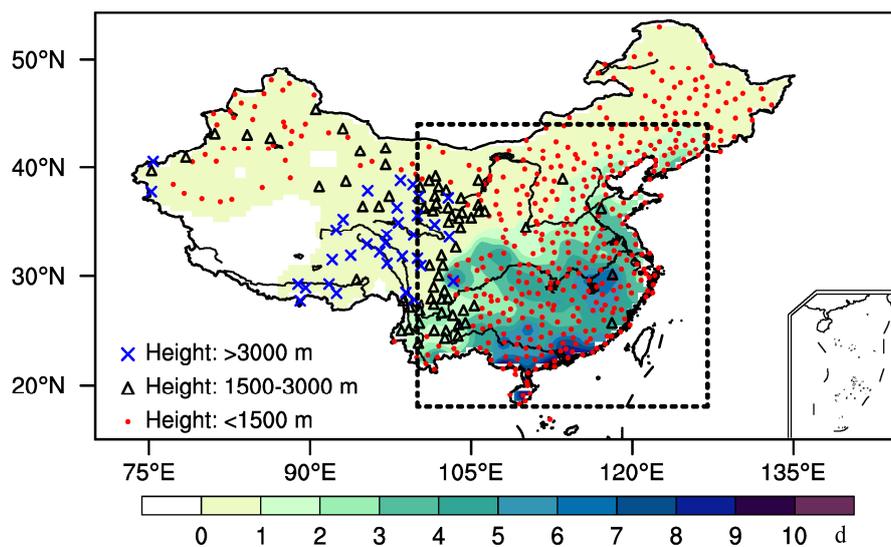


图 1 中国夏季暴雨频数（阴影，单位：d）的长期气候平均（1960~2011）分布。中国 542 个测站位置依据海拔高度以三种不同符号标出，虚线框内范围（18°N~44°N, 100°E~127°E）为本研究所关注的中国东部区域

Fig. 1 Geographical distribution of summertime heavy rainfall frequency (shaded, units: d) in China for the period 1960–2011. Based on elevation, the 542 stations are marked with three different symbols. The dashed box (18°–44°N, 100°–127°E) denotes the target region covered in the study

东部夏季暴雨年代际跃变相关联的大尺度环流配置。

### 3 中国东部夏季暴雨年代际跃变的检测

暴雨是降水的极端形式,是中国夏季降水的重要来源,与洪涝灾害有更紧密的联系。近 50 多年中国东部夏季气候和降水发生多次年代际跃变转型 (Ding et al., 2008; 黄荣辉等, 2011; Zhang et al., 2013), 与之相应, 中国东部夏季暴雨是否也存在类似的年代际跃变转型呢? 为此, 本文采用两种气候统计方法 (Lepage 和 MTT) 通过 9 年滑动窗口对中国东部区域 ( $18^{\circ}\text{N}\sim 44^{\circ}\text{N}$ ,  $100^{\circ}\text{E}\sim 127^{\circ}\text{E}$ ) 内各站点的夏季暴雨频数和占比的时间序列进行年代际跃变检测。

考虑到中国东部区域 ( $18^{\circ}\text{N}\sim 44^{\circ}\text{N}$ ,  $100^{\circ}\text{E}\sim 127^{\circ}\text{E}$ ) 内站点分布的相对均匀性, 具有显著均值变化 (通过 90% 信度检验) 的站点数峰值时刻可视作为中国东部夏季暴雨年代际跃变的发生年份  $Y_c$ 。如

图 2 所示, Lepage 和滑动  $t$  检验 (MTT) 方法因为使用不同统计量而导致通过跃变检测的站点数有较大差异, 其站点数峰值对应的时刻也不尽相同。此外, 由于采用 9 年滑动窗口进行跃变检测, 限于所选区域以及资料长度, 20 世纪 70 年代初以前和 20 世纪 90 年代末以后的跃变特征难以辨识。由图 2 可以看到, 中国东部夏季暴雨频数与暴雨占比的跃变站点数呈现类似的峰值分布, 尤其是 20 世纪 80 年代年前后和 1992 年前后 (为下文叙述方便, 定义 20 世纪 70 年代末以前即 1960~1979 为 P1 时段, 20 世纪 70 年代末至 20 世纪 90 年代初即 1980~1991 为 P2 时段, 20 世纪 90 年代初之后即 1992~2011 为 P3 时段, 下同)。同时还可以注意到, 每种方法分别针对暴雨频数和暴雨占比检测出的跃变站点数也不完全一致, 而暴雨占比的更多峰值表明暴雨降水和非暴雨降水的年代际跃变存在明显差异。由此可见, 夏季暴雨的年代际跃变与夏季降水的年代际跃变有类同之处但存在差别, 有必要区分讨论。因此, 为讨论暴雨的年代际跃变特征, 本文

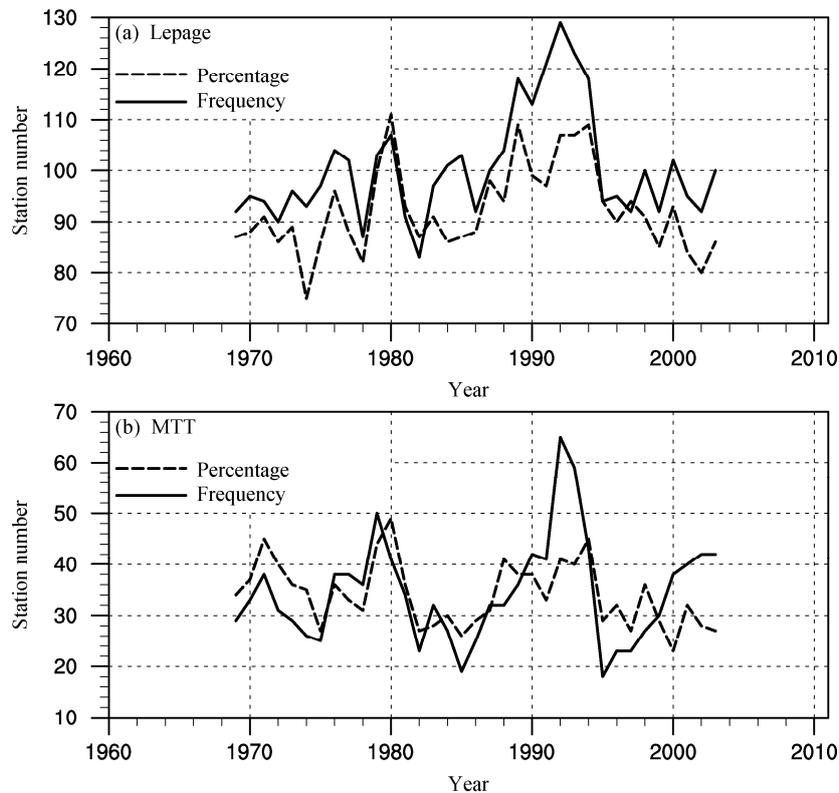


图 2 中国东部夏季暴雨频数 (实线) 和占比 (虚线) 通过 (a) Lepage 和 (b) 滑动  $t$  检测 (9 年滑动窗口的均值差异通过 90% 信度检验) 的站点数的时间序列

Fig. 2 Temporal variation in the total number of gauge stations where (a) the Lepage test and (b) moving  $t$ -test (MTT) reveal the difference between the averages of summertime heavy rainfall frequency (solid lines) and the percentage (dashed lines) over nine years prior to and after the year of change ( $Y_c$ ) at the 90% confidence level according to the Student's  $t$  test

重点参考暴雨频数并兼顾暴雨占比的检测结果，确定中国东部夏季暴雨分布的年代际跃变以 20 世纪 70 年代末和 20 世纪 90 年代初最为显著，以下内容重点讨论这两次跃变及其关联特征。

### 4 中国东部夏季暴雨的年代际跃变转型

为认识 20 世纪 70 年代末和 20 世纪 90 年代初的年代际跃变过程中暴雨分布的转型特征，图 3 和图 4 分别给出夏季暴雨频数和占比在两次跃变之后时段与之前时段的均值差异及通过显著性检验的

站点分布。结果显示，暴雨频数与暴雨占比所反映的中国东部夏季暴雨年代际跃变转型特征大致相似。P2 与 P1 时段（Yc=1980）如图 3a 和图 4a 所示，中国东部夏季暴雨在 20 世纪 70 年代末发生跃变，同相信号分布在华南、江淮和华北三个纬带上，呈现经向“三极子”型，即江南和华南地区暴雨减少(-)、江淮流域和四川盆地暴雨增加(+)、黄淮和华北地区暴雨减少(-)，其中华东东南、长江中下游、川东北、华北东部的跃变较为显著。同理，P3 与 P2 时段（Yc=1992）如图 3b 和图 4b 所示，中国夏季暴雨分布在 20 世纪 90 年代初的跃

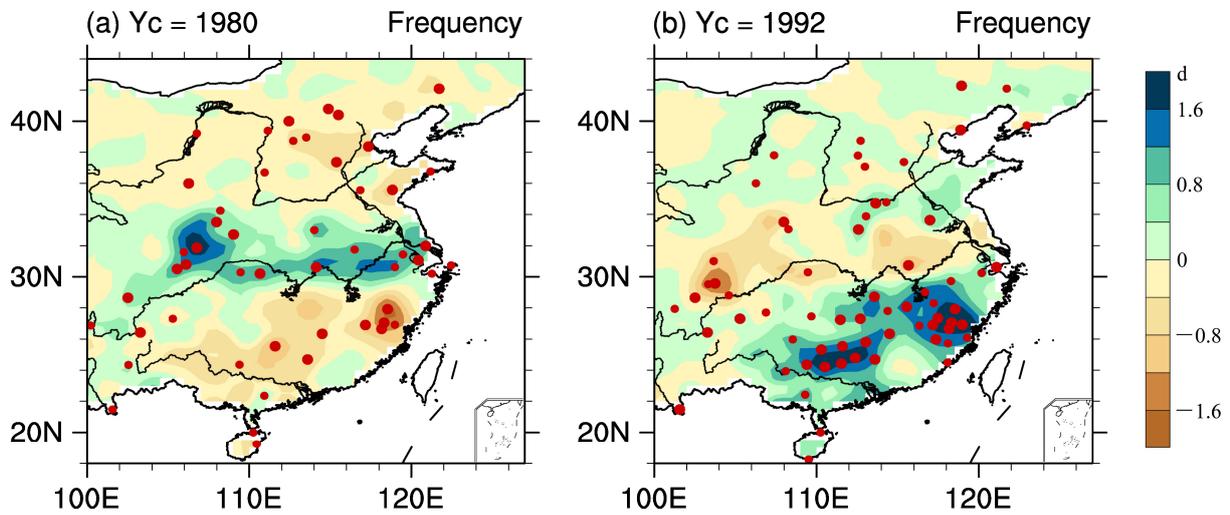


图 3 中国东部夏季暴雨频数（阴影，单位：d）在（a）P2 和 P1（Yc=1980）以及（b）P3 和 P2（Yc=1992）时段的均值差异。红色大（小）圆点代表均值差异通过 95%（90%）信度检验的观测站点

Fig. 3 Average differences in summertime heavy rainfall frequency (shaded, units: d) between the periods of (a) P2 and P1 (Yc=1980) and (b) P3 and P2 (Yc=1992). The stations marked with large (small) red dots show the average differences at the 95% (90%) confidence level according to the Student's *t* test

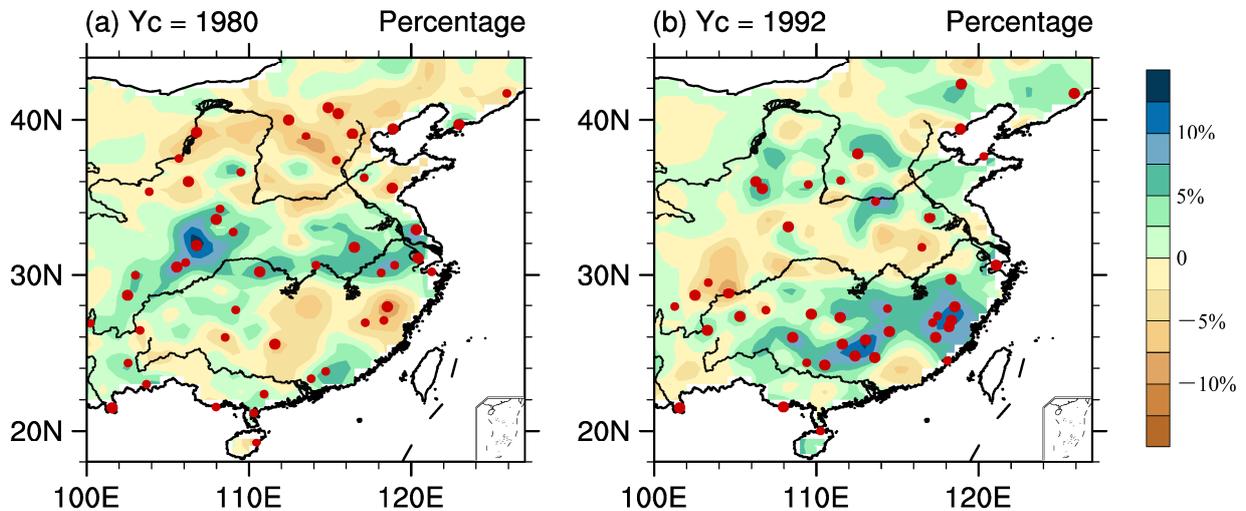


图 4 同图 3，但为暴雨占比

Fig. 4 As in Fig. 3, but for the summertime heavy rainfall percentage

变仍呈现经向“三极子”型，但与 20 世纪 70 年代末的跃变大致反相对应，即江南和华南地区暴雨增加（+）、江淮流域和四川盆地暴雨减少（-）、黄淮和华北地区暴雨增加（+），其中华南北部、华东南、川东南、黄淮西部的跃变较为显著。由此可见，中国东部夏季暴雨分别在 20 世纪 70 年代末和 20 世纪 90 年代初经历了两次反相的年代际跃变。此外，夏季暴雨频数和暴雨占比在去除长期线性趋势后的年代际跃变（图略）与之前类同，仍呈现经向“三极子”型，但两次的跃变信号完全反相对应。因此，中国东部夏季暴雨在 20 世纪 70 年代末和 20 世纪 90 年代初的跃变可能是年代际气候自然变率的一种表现，并与 20~30 年周期的气候振荡（Ding et al., 2008）存在某些关联。

中国东部夏季暴雨的年代际跃变以 20 世纪 70 年代末和 20 世纪 90 年代初的经向“三极子”反转为主要特征。图 5 给出了中国东部（100°E~127°E）夏季暴雨频数和占比异常的 9 年滑动平均的纬度-时间剖面。从图 5 所示的纬向平均结果来看，中国东部夏季暴雨频数与暴雨占比的年代际演变大致类似。P1 时段（1960~1979 年）呈现华南地区暴雨偏多（+）、江淮流域暴雨偏少（-）和华北地区暴雨偏多（+）的经向“三极子”异常分布；之后的 P2 时段（1980~1991 年），南方地区暴雨偏少（-）、江淮流域暴雨偏多（+）和华北地区暴雨偏少（-），呈现反位相的“三极子”异常分布；至 P3 时段（1992~2011 年），南方暴雨显著偏多（+）、华北暴雨持续偏少（-），逐渐呈现“偶极子”异常

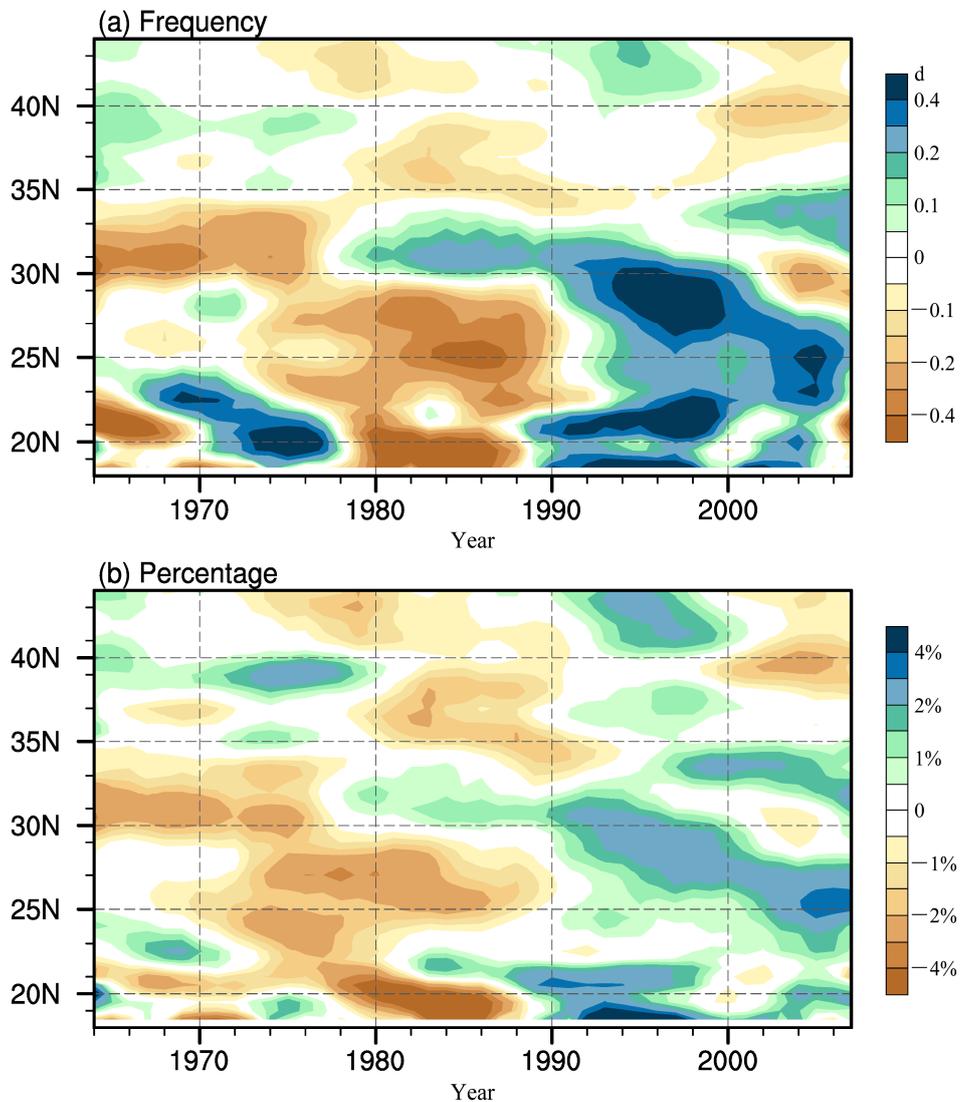


图 5 中国东部（100°E~127°E）夏季暴雨（a）频数（单位：d）和（b）占比（单位：%）异常（作 9 年滑动平均处理）的纬度-时间剖面  
Fig. 5 Time-latitude cross sections of the 9-year running average anomalies for summertime heavy rainfall (a) frequency and (b) percentage, longitudinally averaged between 100°E and 127°E

分布，并导致近十多年中国夏季“南涝北旱”的整体格局。虽然这里的夏季（5~8月）有别于一般讨论夏季降水所取的6~8月，但从图5可以注意到，与已知的夏季降水年代际变异（黄荣辉等，2011；Zhang et al., 2013）类似，在P3时段（1992~2011年）的夏季暴雨异常分布并不具有一致性，如20世纪90年代末北方暴雨的持续减少和21世纪初南方暴雨的显著增多。由此可见，限于所选区域以及资料长度，本文的检测方法未能清晰辨识出夏季暴雨在20世纪90年代末及其以后的跃变现象。显然，研究夏季暴雨在最近十多年的跃变特征对于揭示近期旱涝格局演变规律及其成因具有重要意义，必须在后期

的工作中结合更长的观测资料另作检测与讨论。

## 5 中国东部夏季暴雨年代际跃变的大尺度环流背景

已有研究（张顺利等，2002；张庆云等，2003）表明，影响中国夏季暴雨的大尺度环流系统主要包括：对流层高层的南亚高压、东亚上空对流层中层的中高纬度扰动和冷空气、西太平洋副热带高压、低层的热带季风涌等。因此，中国东部夏季暴雨分布的跃变转型必然与这些大尺度环流系统的年代际变异存在一定关联。

图6给出夏季500 hPa高度场和700 hPa风场

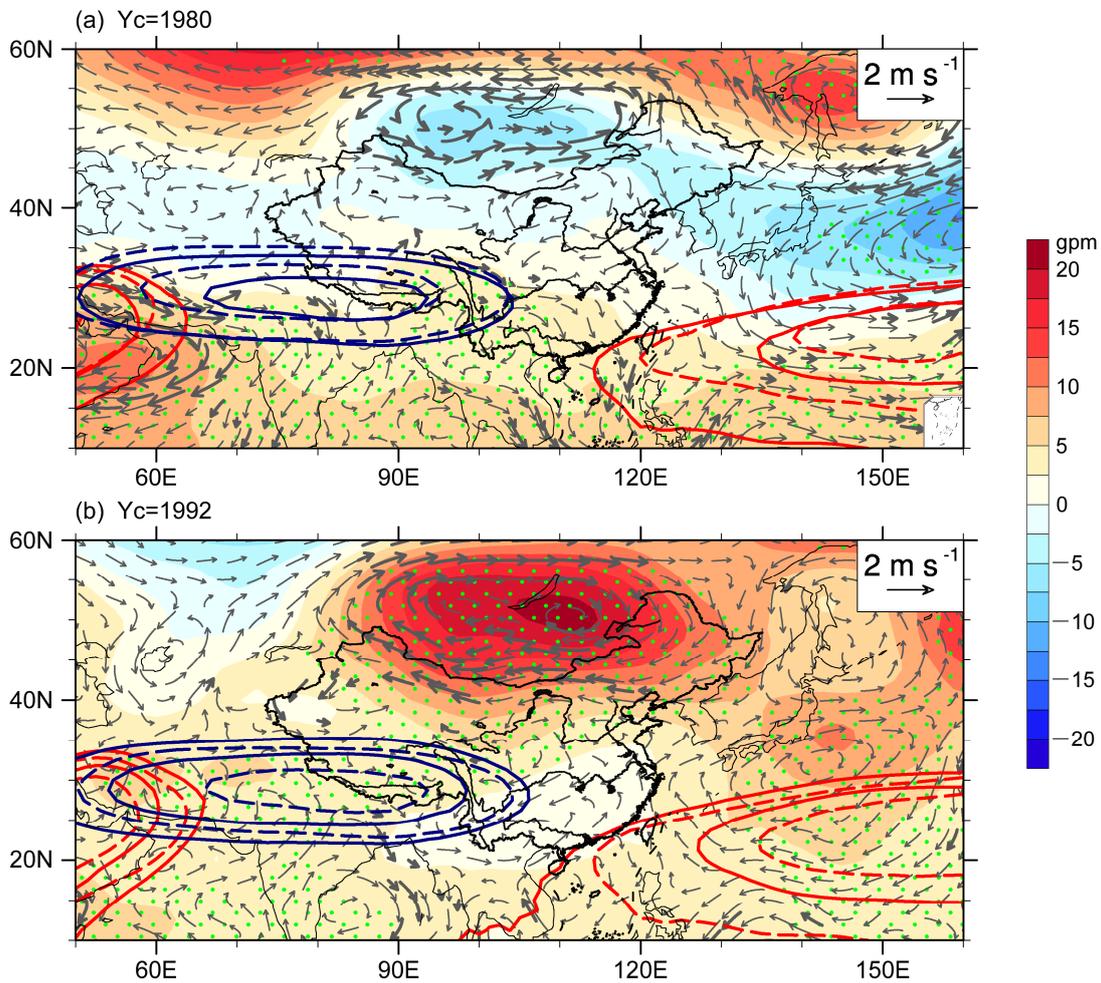


图6 夏季500 hPa高度场（阴影，单位：gpm）和700 hPa风场（箭头，单位： $m s^{-1}$ ）在（a）P2和P1（Yc=1980）以及（b）P3和P2（Yc=1992）时段的均值差异。西太平洋副高（5860 gpm和5870 gpm）的位置用两条红色等值线标出，而南亚高压（16720 gpm和16740 gpm）的位置用两条蓝色等值线标出。（a）中的实线对应P2时段，虚线对应P1时段；（b）中的实线对应P3时段，虚线对应P2时段。绿色点和加粗矢量分别表示500 hPa高度场和700 hPa风场的均值差异通过95%信度检验

Fig. 6 Average differences in summertime 500-hPa geopotential height (shaded, units: gpm) and 700 hPa wind (arrows, units:  $m s^{-1}$ ) between the periods of (a) P2 and P1 (Yc=1980) and (b) P3 and P2 (Yc=1992). The red lines denote the 5860 gpm and 5870 gpm isolines of the subtropical high over the western Pacific in (a) P2 (P1) and (b) P3 (P2), while the blue lines denote the 16720 gpm and 16740 gpm isolines of the South Asia high in (a) P2 (P1) and (b) P3 (P2). The green dots and bold vectors in (a) and (b) indicate the average differences at the 95% confidence level according to the Student's *t* test

在两次跃变之后时段与之前时段的均值差异分布以及不同时段的东西太平洋副高和南亚高压位置，而图 7 给出夏季 700 hPa 相对涡度在两次跃变之后时段与之前时段的均值差异分布。图 6a 所示的 P2 与 P1 时段的差异 ( $Y_c=1980$ ) 可以反映出 20 世纪 70 年代末跃变相关联的大尺度环流异常配置：中高纬地区的蒙古高原中低层为气旋式环流异常控制；副热带地区为南亚高压的减弱南缩和西太平洋副高的增强西伸但南撤；中国东部地区受控低层北风异常，即东亚夏季风的减弱。与此同时，低层局地环流也发生变异调整：华北和黄淮地区为反气旋式环流异常，华南和江南地区也为反气旋式环流异常，而江淮流域和四川盆地受控于风场切变式辐合异常；涡度场发生相应变化（如图 7a），南北方的大部分地区负涡度异常不利于低涡的发展，而江淮流域和四川盆地的正涡度异常有利于低涡的发展，进而引发江南和华南暴雨减少（-）、江淮流域和四川盆地暴雨增加（+）、黄淮和华北暴雨减少（-）的经向“三极子”跃变。图 6b 所示的 P3 与 P2 时段的差异 ( $Y_c=1992$ ) 可以反映出 20 世纪 90 年代初跃变相关联的大尺度异常环流配置：中高纬地区的蒙古高原中低层为反气旋式环流异常控制；副热带地区为南亚高压的增强东扩和西太平洋副高的增强西伸但北抬；中国东部地区受控低层南风异常，即东亚夏季风的增强。与此同时，低层局地环流也发生变异调整：华北和黄淮地区为气旋式环流异常，四川盆地为反气旋式环流异常，华南和江南地区为气旋式环流异常，而江淮流域受控于风场切

变式辐散异常；涡度场发生相应变化（如图 7b），南北方大部分地区的正涡度异常有利于低涡的发展，而江淮流域和四川盆地的负涡度异常不利于低涡的强烈发展，从而导致江南和华南暴雨增加（+）、江淮流域和四川盆地暴雨减少（-）、黄淮和华北暴雨增加（+）的反相“三极子”跃变。

以上分析表明，在 20 世纪 70 年代末和 20 世纪 90 年代初的两次跃变过程中，伴随东亚夏季风的减弱和增强，副热带地区南亚高压和西太平洋副高以及中高纬地区蒙古高原环流系统的年代际调整可能对中国东部局地环流和暴雨降水产生重要影响。本文的研究仅局限于分析夏季暴雨的两次年代际跃变及其所对应的大尺度环流异常配置，至于其中的关联机制及内在的动力学问题还有待进一步证实。

## 6 总结和讨论

本文利用近 50 多年中国东部测站的逐日降水资料 and JRA-55 再分析资料并使用多种统计方法检测，分析了中国夏季暴雨分布在 20 世纪 70 年代末和 20 世纪 90 年代初的年代际跃变转型，并探讨了两次跃变相关联的大尺度环流异常配置。得到如下结论：

(1) 中国东部夏季暴雨频数和占比发生类似的年代际跃变，以 20 世纪 70 年代末和 20 世纪 90 年代初的经向“三极子”反转为主要特征。其中，20 世纪 70 年代末的跃变是江南和华南地区暴雨减少（-）、江淮流域和四川盆地暴雨增加（+）、黄淮

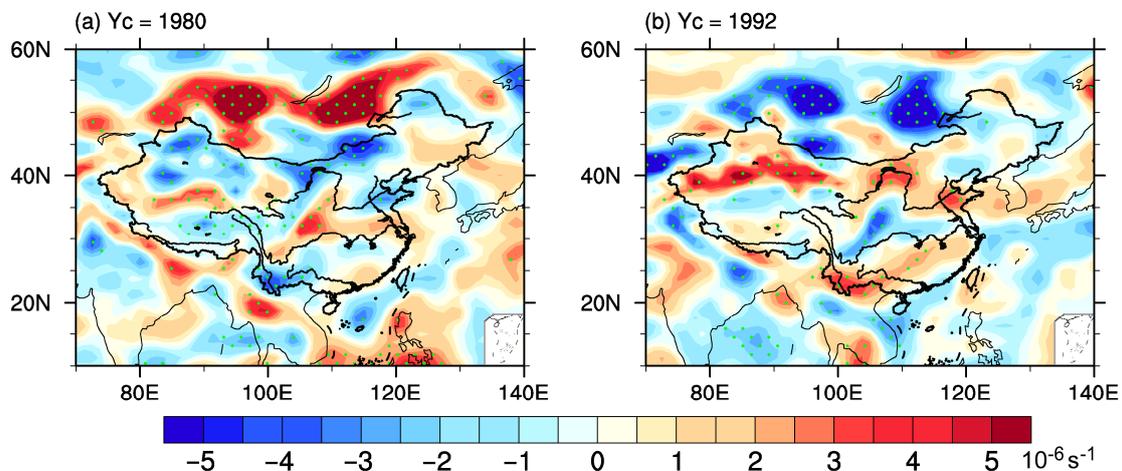


图 7 夏季 700 hPa 相对涡度（阴影，单位： $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ）在 (a) P2 和 P1 ( $Y_c=1980$ ) 以及 (b) P3 和 P2 ( $Y_c=1992$ ) 时段的均值差异。绿色点表示均值差异通过 99% 信度检验

Fig. 7 Average differences in summertime 700 hPa relative vorticity (shaded, units:  $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) between the periods of (a) P2 and P1 and (b) P3 and P2. The green dots in (a) and (b) indicate the average differences at the 99% confidence level according to the Student's  $t$  test

和华北地区暴雨减少(-); 而 20 世纪 90 年代初的跃变大致反相, 即江南和华南地区暴雨减少(-)、江淮流域和四川盆地暴雨增加(+)、黄淮和华北地区暴雨减少(-)。与此相应, 中国东部夏季暴雨分布的年代际演变表现为: P1 时段(1960~1979 年) 华南和华北暴雨偏多(+)、江淮流域暴雨偏少(-)的“三极子”异常分布; 之后的 P2 时段(1980~1991 年), 南方和华北暴雨偏少(-)、江淮流域暴雨偏多(+)的反相“三极子”异常分布; 至 P3 时段(1992~2011 年), 南方暴雨显著偏多(+)、华北暴雨持续偏少(-), 逐渐形成“偶极子”异常分布, 导致近十多年我国夏季“南涝北旱”的整体格局。

(2) 中国东部夏季暴雨的两次跃变可能受到大尺度环流调整的影响。20 世纪 70 年代末(20 世纪 90 年代初) 跃变相关联的大尺度环流异常配置: 东亚夏季风的减弱(增强), 南亚高压的减弱南缩(增强东扩), 西太平洋副高的增强西伸但南撤(北抬), 以及蒙古高原中低层的气旋式(反气旋式) 环流异常。与此同时, 低层局地环流也发生变异调整: 华北和黄淮地区为反气旋式(气旋式) 环流异常, 华南和江南地区也为反气旋式(气旋式) 环流异常, 而江淮流域和四川盆地受控于风场切变式辐合(辐散) 异常; 涡度场发生相应变化, 南北方大部分地区的负(正) 涡度异常不(有) 利于低涡的发展, 而江淮流域和四川盆地的正(负) 涡度异常有(不) 利于低涡的发展, 进而引发江南和华南暴雨减少(增加)、江淮流域和四川盆地暴雨增加(减少)、黄淮和华北暴雨减少(增加) 的经向“三极子”跃变。

本文还指出, 中国东部夏季暴雨在 20 世纪 70 年代末和 20 世纪 90 年代初的反相年代际跃变, 除受东亚夏季风变异和大尺度环流调整的影响外, 可能与 20~30 年周期的气候振荡存在某些关联。然而, 暴雨气候学研究涉及多尺度相互作用, 而且气候跃变是强非线性过程。因此, 中国夏季暴雨的年代际跃变机制非常复杂, 要全面认识还有待相关非线性动力学理论的完善。

### 参考文献 (References)

鲍名. 2007. 近 50 年我国持续性暴雨的统计分析及其大尺度环流背景 [J]. 大气科学, 31 (5): 779-792. Bao Ming. 2007. The statistical analysis of the persistent heavy rain in the last 50 years over China and their backgrounds on the large scale circulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (5): 779-792.

鲍名, 黄荣辉. 2006. 近 40 年我国暴雨的年代际变化特征 [J]. 大气科学, 30 (6): 1057-1067. Bao Ming, Huang Ronghui. 2006. Characteristics of the interdecadal variations of heavy rain over China in the last 40 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (6): 1057-1067.

陈栋, 李跃清, 黄荣辉. 2007. 在“鞍”型大尺度环流背景下西南低涡发展的物理过程分析及其对川东暴雨发生的作用 [J]. 大气科学, 31 (2): 185-201. Chen Dong, Li Yueqing, Huang Ronghui. 2007. The physical process analyses of the southwest vortex development and its effect on heavy rainfall in eastern Sichuan under the saddle pattern background of large-scale circulations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (2): 185-201.

陈际龙, 黄荣辉. 2008. 亚洲夏季风水汽输送的年际年代际变化与中国旱涝的关系 [J]. 地球物理学报, 51 (2): 352-359. Chen Jilong, Huang Ronghui. 2008. Interannual and interdecadal variations of moisture transport by Asian summer monsoon and their association with droughts or floods in China [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 51 (2): 352-359.

丁一汇. 1994. 暴雨和中尺度气象学问题 [J]. 气象学报, 52 (3): 274-284. Ding Yihui. 1994. Some aspects of rainstorm and meso-scale meteorology [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 52 (3): 274-284.

Ding Y H, Wang Z Y, Sun Y. 2008. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences [J]. Int. J. Climatol., 28 (9): 1139-1161.

高守亭, 赵思雄, 周晓平, 等. 2003. 次天气尺度及中尺度暴雨系统研究进展 [J]. 大气科学, 27 (4): 618-627. Gao Shouting, Zhao Sixiong, Zhou Xiaoping, et al. 2003. Progress of research on sub-synoptic scale and mesoscale torrential rain systems [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (4): 618-627.

Ge Q S, Guo X F, Zheng J Y, et al. 2008. Meiyu in the middle and lower reaches of the Yangtze River since 1736 [J]. Chinese Sci. Bull., 53 (1): 107-114.

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, 38 (3): 207-217.

黄荣辉, 陈际龙, 刘永. 2011. 我国东部夏季降水异常主模态的年代际变化及其与东亚水汽输送的关系 [J]. 大气科学, 35 (4): 589-606. Huang Ronghui, Chen Jilong, Liu Yong. 2011. Interdecadal variation of the leading modes of summertime precipitation anomalies over eastern China and its association with water vapor transport over East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (4): 589-606.

Inoue T, Matsumoto J. 2004. A comparison of summer sea level pressure over East Eurasia between NCEP/NCAR reanalysis and ERA-40 for the period 1960-1999 [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 82 (3): 951-958.

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.

Kobayashi S, Ota Y, Harada Y, et al. 2015. The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 93 (1): 5-48.

Lepage Y. 1971. A combination of Wilcoxon's and Ansari-Bradley's

- statistics [J]. *Biometrika*, 58 (1): 213–217.
- Li J, Dong W J, Yan Z W. 2012. Changes of climate extremes of temperature and precipitation in summer in eastern China associated with changes in atmospheric circulation in East Asia during 1960–2008 [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 57 (15): 1856–1861.
- Liu Y, Huang G, Huang R H. 2011. Inter-decadal variability of summer rainfall in eastern China detected by the Lepage test [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 106 (3–4): 481–488.
- Ning L, Qian Y F. 2009. Interdecadal change in extreme precipitation over South China and its mechanism [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 26 (1): 109–118.
- Su B D, Jiang T, Jin W B. 2006. Recent trends in observed temperature and precipitation extremes in the Yangtze River basin, China [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 83 (1–4): 139–151.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 255pp. Tao Shiyan. 1980. Heavy Rainfalls in China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 255pp.
- 陶诗言, 卫捷. 2006. 再论夏季西太平洋副热带高压的西伸北跳 [J]. *应用气象学报*, 17 (5): 513–525. Tao Shiyan, Wei Jie. 2006. The westward, northward advance of the subtropical high over the West Pacific in summer [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 17 (5): 513–525.
- 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): 290–299. 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): 290–299.
- Wei W, Zhang R H, Wen M, et al. 2014. Impact of Indian summer monsoon on the South Asian high and its influence on summer rainfall over China [J]. *Climate Dyn.*, 43 (5–6): 1257–1269.
- Wu R G, Wen Z P, Yang S, et al. 2010. An interdecadal change in southern China summer rainfall around 1992/93 [J]. *J. Climate*, 23 (9): 2389–2403.
- Yang S, Lau K M, Kim K M. 2002. Variations of the East Asian jet stream and Asian-Pacific-American winter climate anomalies [J]. *J. Climate*, 15 (3): 306–325.
- Yonetani T. 1993. Detection of long term trend, cyclic variation and step-like change by the Lepage test [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 71 (3): 415–418.
- 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. Zhan 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, 张顺利. 2003. 夏季长江流域暴雨洪涝灾害的天气气候条件 [J]. *大气科学*, 27 (6): 1018–1030. Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Zhang Shunli. 2003. The persistent heavy rainfall over the Yangtze River valley and its associations with the circulations over East Asian during summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27 (6): 1018–1030.
- 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.
- Zhang R H, Wu B Y, Han J P, et al. 2013. Effects on summer monsoon and rainfall change over China due to Eurasian snow cover and ocean thermal conditions[M]//Singh B R, Ed. *Climate Change-Realities, Impacts over Ice Cap, Sea Level and Risks*. Rijeka: InTeck, 227–250.
- 张顺利, 陶诗言, 张庆云, 等. 2002. 长江中下游致洪暴雨的多尺度条件 [J]. *科学通报*, 47 (6): 467–473. Zhang Shunli, Tao Shiyan, Zhang Qingyun, et al. 2002. Multi-scale conditions of the flood-resulting rainstorms in the middle and lower reaches of Yangtze River [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 47 (6): 467–473.
- 赵思雄, 孙建华, 陈红, 等. 1998. 1998 年 7 月长江流域特大洪水期间暴雨特征的分析研究 [J]. *气候与环境研究*, 3 (4): 368–381. Zhao Sixiong, Sun Jianhua, Chen Hong, et al. 1998. Study of heavy rainfall in the Changjiang River during July 1998 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 3 (4): 368–381.
- Zhu Y L, Wang H J, Zhou W, et al. 2011. Recent changes in the summer precipitation pattern in East China and the background circulation [J]. *Climate Dyn.*, 36 (7–8): 1463–1473.