

华北汛期降水长期变化规律研究新进展

刘海文^{①*}, 袁帅^①, 杨朝虹^①, 武凯军^①, 朱玉祥^②, 林一骅^{③④}^① 中国民航大学 空中交通管理学院航空气象系, 天津 300300;^② 中国气象局 气象干部培训学院, 北京 100081;^③ 中国科学院 大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029;^④ 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 100049

* 联系人, E-mail: hwliu@cauc.edu.cn

2021-10-17 收稿, 2021-11-27 接受

国家自然科学基金-中国民用航空局联合研究基金重点项目(U2033207); 民航局 2020 年民航安全能力建设资金资助项目(20600822)

摘要 华北汛期降水的年代际减少, 一直是气候学领域关心的重要课题之一。本文扼要回顾了华北汛期旱涝研究的最新代表性成果, 主要包括华北汛期起讫的客观识别、华北汛期降水多时间尺度的变化特征、华北汛期降水变化与大气遥相关型的关系, 以及华北汛期降水量增多趋势的停滞等。在此基础之上, 归纳和总结了该领域需要继续深入研究的问题, 如: 华北汛期起讫时间的统一性; 在华北汛期降水年代际变少的归因分析中, 其年际振荡成分衰减的物理原因; 华北汛期降水年代际变多趋势停滞的原因; 华北汛期降水何时恢复增多等科学问题。

关键词汛期降水;
华北;
长期变化;
研究进展

华北是我国人口密集、经济发达、土地和矿产资源丰富的地区, 也是我国工农业主要生产基地之一。然而, 华北又是我国水资源十分贫乏的地区之一, 水资源的缺乏已严重妨碍华北地区工农业生产的进一步发展, 也严重影响着华北地区城乡人民的生活, 可以说, 水资源缺乏是华北今后经济发展中亟待解决的重大问题(黄荣辉等, 1999)。

华北汛期降水一直是气候界研究和每年汛期降水预报关注的重要问题之一。本文在对华北汛期降水研究进行较为详细的回顾和总结后, 对一些亟待解决的科学问题进行简单讨论和总结。

1 华北汛期的定义及汛期降水的构成特征

目前对于华北汛期时间的确定, 基本上是按照天文月份来进行, 且月份的选择并不统一。比如, 陆日宇(2002, 2003, 2005) 将 7、8 月降水量称为华北汛期降水量。冯丽文(1980) 则将 4—9 月作为华北的汛期。戴新刚等(2003a) 则将 7—9 月作为华北汛

期。相对于“汛期”一词的使用, 还有对华北雨季的降水规律进行研究。比如, 赵汉光(1994) 根据旬降水量资料, 对华北雨季进行了划分, 认为华北雨季开始期主要集中在 7 月中旬左右, 结束期主要集中在 8 月中旬左右, 即所谓的“七下八上”的华北雨季。因此, 对华北汛期的客观识别显得十分重要。

Samel et al.(1999) 利用半客观分析的方法, 确定了 6 月 14 日—9 月 12 日的时间范围作为华北汛期降水的持续时间, 具有较好的时空分布特征。刘海文(2009) 使用 Samel et al.(1999) 研究华北雨带的半客观分析方法和 EOF 分解以及趋势分析法, 也从 6 月 14 日—9 月 12 日来确定华北汛期开始和结束的时间, 图 1 即为 1971—2000 年平均的华北 44 站汛期日降水量 EOF 分析所得的第一特征向量对应的时间序数的 Mann-Kendal 以及滑动 t 检验的结果。由图 1a 可见, 时间序列在 6 月 28 日左右发生了突变, 表明华北日降水在这天发生了突变。因此, 结合突变分析和 Samel et al.(1999) 的半客观方法, 可以认定 6 月 30 日左右基本上是华北汛期的开始

引用格式: 刘海文, 袁帅, 杨朝虹, 等, 2022. 华北汛期降水长期变化规律研究新进展 [J]. 大气科学学报, 45(5): 700-712.

Liu H W, Yuan S, Yang Z H, et al., 2022. New research progress on long-term variation of precipitation in flood season in North China [J]. Trans Atmos Sci, 45(5): 700-712. doi: 10. 13878/j.cnki.dqkxxb.20211017007. (in Chinese).

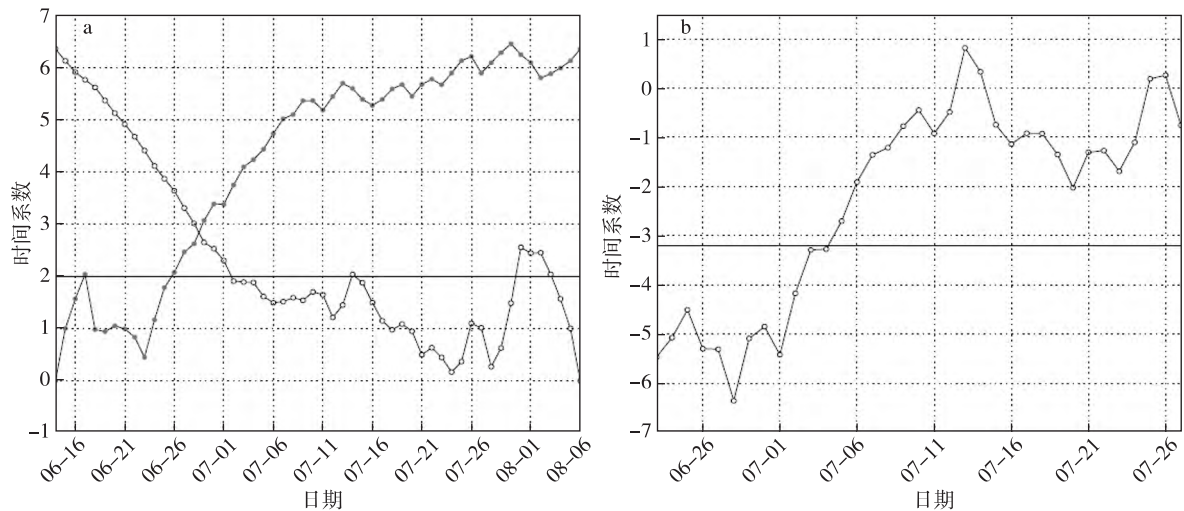


图1 1971—2000年平均的华北地区汛期日降水 EOF 第一模态的时间系数(6月14日—8月6日)的 Mann-Kendal 检验结果(a; 水平直线表示 0.05 信度的显著性检验临界线)及其滑动 t 检验(b; 直线表示 0.01 信度的显著性检验临界线) (引自刘海文(2009))

Fig.1 (a) Mann-Kendall test results of time coefficients of the first EOF mode of daily (from 14 June to 6 August) precipitation in flood season in North China averaged from 1971 to 2000 (Horizontal straight line denotes the 95% confidence level), and (b) the moving t -test (Horizontal straight line denotes the 99% confidence level) (from Liu(2009))

日期。同理,图2给出了1971—2000年平均的华北汛期日降水 EOF 分解第一特征向量对应的时间系数中8月6日—9月12日时间序列 Mann-Kendal 检验以及滑动 t 检验的结果。由图2可见, Mann-Kendall 统计曲线中有好几个相交点,显然其中第一个突变点为汛期结束的日期,这个突变日期大约是8月22日,由于 Mann-Kendall 统计曲线也不在信度

内,因此又进行了滑动 t 检验趋势分析,表明8月18日超过了 0.01 信度的显著性检验。虽然 Mann-Kendall 统计结果和滑动 t 检验趋势分析结果相差比较大,但是滑动 t 检验趋势分析结果和 Samel et al.(1999) 半客观方法确定的华北汛期结束日期基本一致,因此,从气候学上讲,8月18日左右是华北汛期的结束日。

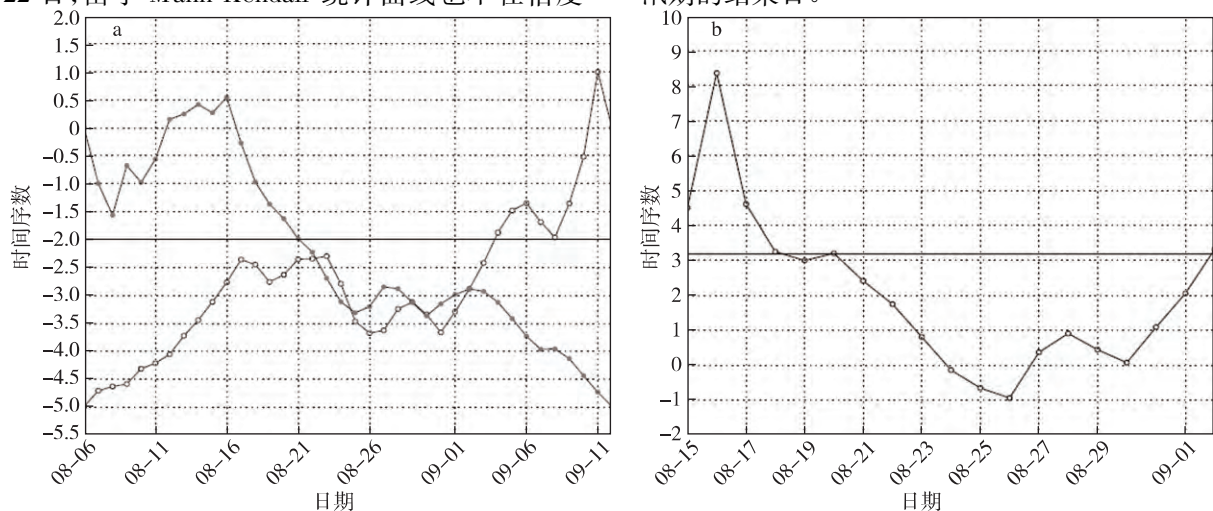


图2 1971—2000年平均的华北地区汛期日降水 EOF 第一模态的时间系数(8月6日—9月12日)的 Mann-Kendal 检验结果(a; 水平直线表示 0.05 信度的显著性检验临界线)及其滑动 t 检验(b; 直线表示 0.01 信度的显著性检验临界线) (引自刘海文(2009))

Fig.2 (a) Mann-Kendall test results of time coefficients of the first EOF mode of daily (from 6 August to 12 September) precipitation in flood season in North China averaged from 1971 to 2000 (Horizontal straight line denotes the 95% confidence level), and (b) the moving t -test (Horizontal straight line denotes the 99% confidence level) (from Liu(2009))

因此,华北汛期大约始于 6 月 30 日,止于 8 月 18 日,维持时间为 50 d。于晓澄等(2019)也得到了类似的结果,进一步分析了华北雨季开始早晚与春、夏季热带印度洋、赤道中东太平洋海表温度之间的关系。研究认为,当 Niño3.4 指数和热带印度洋全区海表温度一致模态为正值时,华北雨季开始偏晚;当海表温度指数为负值时,则华北雨季开始偏早。

2 华北汛期降水多时间尺度的变化特征

华北汛期降水具有多时间尺度的变化特征(李红梅等,2008),这里所指的变化包括了长期趋势、年际和年代际等所有时间尺度上的信号。华北汛期降水在年际时间尺度存有很大的变率(赵声蓉等,2003)。研究表明,华北汛期降水量在年际时间尺度上存在着准 2 a、准 5 a 的周期振荡(戴新刚,2003b)。除了华北汛期降水自身的周期振荡外,大气环流异常是导致华北汛期降水异常的主要原因。梁平德等(2006)根据华北历史上几个重旱年逐日的 500 hPa 环流分布,综合得出华北夏季干旱年东亚地区上空大气环流的 3 种基本流型。赵声蓉和宋正山(1999)利用 1980—1994 年 NCEP/NCAR 月平均高度场和我国测站降水量资料,探讨了华北汛期降水与 500、200 hPa 欧亚中高纬大气环流异常的关系,得到与华北汛期旱涝有关的两类异常环流型。毕慕莹(1990)发现,华北旱年贝加尔湖附近易有阻塞高压生成,阻塞高压进而使得西风带分支,华北处于两个分支之间的弱锋区。余锦华等(2005)研究表明,华北地区汛期降水与青藏高原 5—6 月地表温度具有显著的正相关。最近,聂俊等(2021)在将副高指数分为 3 类的基础上,指出用于表征副高强度的绝对强度指数与东亚遥相关型具有较好的相关关系,而东亚遥相关型指数为正位相时,华北汛期降水偏少。

在年际变化时间尺度上,东亚夏季风是影响华北汛期降水量的重要因素(郝立生等,2016)。一般而言,东亚夏季风强,华北汛期降水则偏多,反之亦然(郝立生等,2016)。东亚夏季风又可以划分为东南季风和西南季风(高由禧等,1962);程龙等(2013)研究认为,东南季风频率对盛夏山东半岛降水有显著影响。虽然印度夏季风和东亚夏季风存在着显著差异(Tao and Chen,1987),但是,印度夏季风与中国华北汛期降水却存在着较好的正相关关系(郭其蕴和王继琴,1981;郭其蕴,1992;梁平德,

1988; Ding and Wang,2005; 张人禾,1999)。刘芸芸和丁一汇(2008)研究认为,印度夏季风强(弱)时,华北地区容易出现降水偏多(少)的天气;华北地区降水偏多(少)时,印度夏季风偏强(弱)的机率却低一些。除了季风对华北汛期降水量有重要影响以外,孙燕等(2003)研究发现,前一年 3—5 月的 100 hPa 高度场存有影响华北地区汛期降水的“强信号区”,这为华北汛期降水的跨季节气候预测提供了一个重要的理论依据。张启龙等(1999)将华北分成 I 区和 II 区以后,认为在年际时间尺度上,华北 I 区与前一年 10 月热带西太平洋暖池西部热含量有显著的负相关关系;华北 II 区汛期降水与同年冬季黑潮的热输送有较密切的负相关关系。段丽瑶等(2008)研究发现,副热带高压脊线在 30°N 以北的日数与华北降水有大范围正相关区。陆日宇(2005)研究发现,赤道东太平洋海温异常通过可能存在的北传的波列的作用,继而使得东亚高空急流偏北,华北汛期降水异常偏多。赵树云等(2017)从 ENSO 的位相转换对华北雨季降水量的影响进行了研究,研究发现当该年份发生的 El Niño 结束,且当年又转为 La Niña 的年份时,则该年份华北汛期降水偏多。赵声蓉等(2002)研究认为,在年际时间尺度上,华北汛期干旱年,青藏高压及西太平洋副热带高压偏南、偏东,而华北汛期降水偏多年,青藏高压及西太平洋副热带高压变化则与干旱年变化相反。

华北汛期降水具有鲜明的年代际变化特征。华北汛期降水量首先在 1965 年左右有一次明显的减少(严中伟等,1990a;陆日宇,2002),然后在 20 世纪 70 年代上半段略有回升之后,于 70 年代下半段出现了又一次的明显减少(陆日宇,2002;杨修群等,2005),1990 年代又有回升的趋势(陆日宇,2002),而这个上升趋势直到 1996 左右突然停止(Liu et al.,2020)。陆日宇(2002)研究认为,华北汛期年代际时间尺度的降水量和年际时间尺度的降水量之间呈线性关系。因此,不少研究者(陆日宇,2002;杨修群等,2005)将华北汛期降水量进行尺度分离,进而研究影响华北汛期降水量在两个不同时间尺度降水量上的归因差别。张婕等(2012)和于勇等(2009)还研究了南半球环流系统与华北盛夏(7、8 月)降水的年际关系及其年代际变化,表明南半球环流系统对华北汛期降水也具有十分重要的作用。

为了进一步研究华北汛期降水多寡长期变化的内在因素,刘海文和丁一汇(2010)在把华北日降水量划分为小雨、中雨、大雨、暴雨以及大暴雨五种类

型的基础上,研究了华北汛期降水、五类降水频率和贡献率,三者的长期变化特征。研究认为,华北汛期降水长期变化特征三者都有一定的下降趋势,但是三者的下降趋势程度并不相同。其中,华北汛期降水量下降趋势最明显。五类降水频率中,小雨频率下降趋势最大,暴雨和大暴雨的下降频率并不显著。五类降水贡献率中,暴雨贡献率下降趋势最大,小雨贡献率下降趋势最小。华北汛期大雨发生的频率和暴雨的贡献率决定了华北汛期降水量的多寡(刘海文和丁一汇,2010)。

3 华北汛期降水多时间尺度周期振荡的年代际变化

如上所述,华北汛期降水呈现出多时间尺度的周期振荡。李崇银(1992)研究表明,华北汛期降水具有比较明显的准两年周期振荡和约为16 a的周期振荡,华北汛期降水在时间尺度上具有多时间尺度的周期振荡特征。朱锦红等(2003)认为,华北降水的80 a振荡与东亚夏季风强度的长期变化有很好的对应关系。戴新刚等(2003b)使用小波分析等方法,通过研究1951—2002年华北汛期的降水资料,发现华北汛期降水量存在着准10 a、准18 a和大约50 a时间尺度周期的谱分量,其中年际尺度部分约占总方差的85%。在年际时间尺度上,华北汛期多雨年份,其汛期降水量有明显季节内(30~60 d)的振荡;而在汛期少雨年份,降水量的30~60 d

振荡周期却不太明显(李崇银,1992)。

在月内时间尺度周期振荡上,华北汛期降水量也存在着明显的年代际变化。图3和图4分别给出了华北处于不同年代际阶段,华北汛期降水量月内时间周期振荡的年代际变化的差异。由图3可见,在华北汛期降水偏多阶段,其降水量有着显著的3~8 d时间尺度的周期振荡,这个时间尺度的周期振荡在华北整个汛期一直存在,并一直持续到9月上旬后才减弱。且华北汛期日降水主要以3~8 d时间尺度周期为主,其周期比较单一(刘海文和丁一汇,2011a)。但是在华北汛期降水偏少阶段,华北汛期降水的月内时间尺度的周期振荡和降水偏多阶段相比却有很大不同(图4)。首先,华北入汛后,华北降水并没有出现天气时间尺度的高频降水,而是过了7月上旬以后,才突显出显著的天气时间尺度的高频降水特征。另外,在华北汛期降水偏少阶段,华北汛期日降水存在着两个时间尺度的周期振荡,一个是3~8 d的天气时间尺度,另一个是10~20 d准双周振荡周期。

4 华北汛期降水与大气遥相关型的关系

自从Wallace and Gutzler(1981)使用一点相关的方法,揭示出北半球冬季大气存在着5种遥相关型的事实后,关于遥相关及其对区域气候的影响研究得到广泛开展。比如:Kripalani and Kulkarni

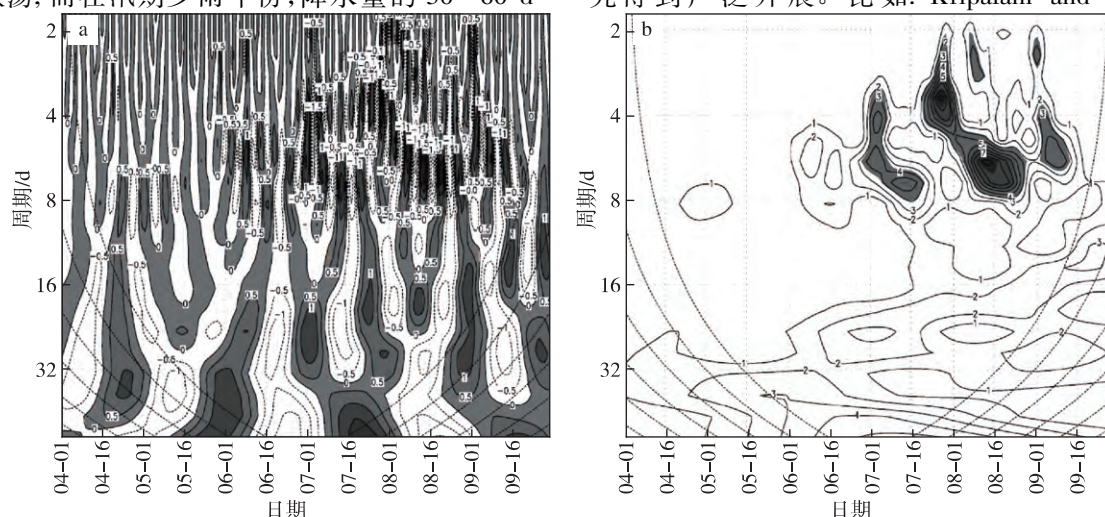


图3 1957—1978年(华北汛期降水偏多阶段)平均的4月1日—9月30日华北降水量去除年循环时间序列的Morlet小波实部(a)和标准功率谱(b)(虚线为受边界影响区域,阴影区表示通过0.05信度的显著性检验;引自刘海文(2009))

Fig.3 Morlet wavelet (a) real part and (b) standard power spectrum of the time series of daily precipitation (removing annual cycle) in North China from 1 April to 30 September averaged from 1957 to 1978 (The precipitation in flood season in North China is more than normal) (dashed lines: the boundary effect; shaded areas: passing the significance test at 0.05 level; from Liu(2009))

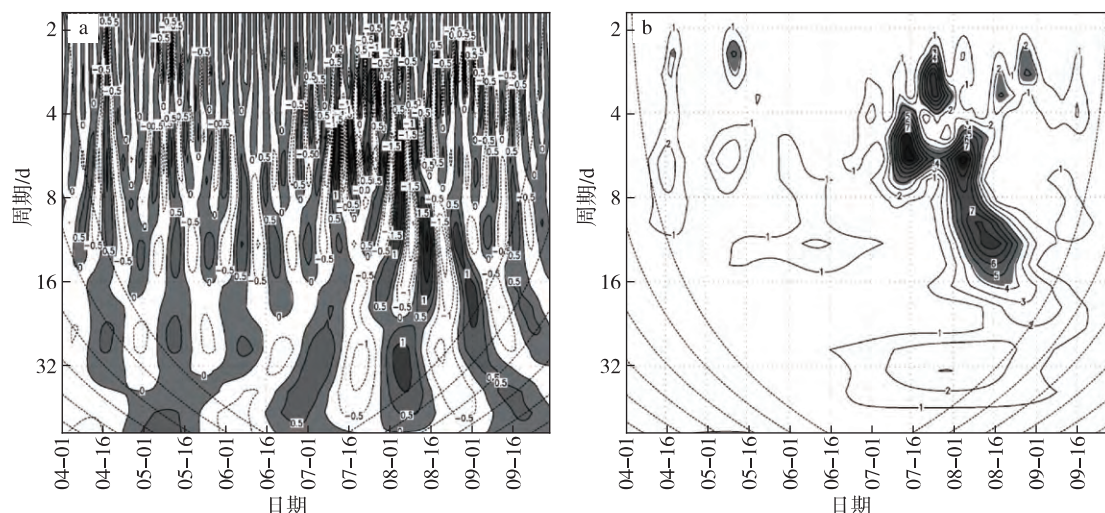


图 4 1979—2006 年(华北汛期降水偏少阶段)平均的 4 月 1 日—9 月 30 日华北降水量去除年循环时间序列的 Morlet 小波实部(a)和标准功率谱(b)(虚线为受边界影响区域,阴影区表示通过 0.05 信度的显著性检验;引自刘海文(2009))

Fig.4 Morlet wavelet (a) real part and (b) standard power spectrum of the time series of daily precipitation (removing annual cycle) in North China from 1 April to 30 September averaged from 1979 to 2006 (The precipitation in flood season in North China is less than normal) (dashed lines: the boundary effect; shaded areas: passing the significance test at 0.05 level; from Liu(2009))

(1997,2001) 以及张人禾(1999) 利用多种气候资料,发现印度夏季风与中国华北和日本夏季降水存在遥相关关系。Ding and Liu(2008) 认为,在夏季风盛行期间,由印度西北部经青藏高原到中国华北地区存着一支西南-东北走向的“北支”遥相关型。随后,Liu and Ding(2008) 又用区域气候模式对这支遥相关型加以验证,并进一步揭示华北汛期旱涝前期遥相关经向波列的传播能量路径及其机制。苗峻峰和徐祥德(1993) 使用滤波以及尺度分离等方法,发现了定常行星波尺度的 PNA、EAP 型遥相关波列与华北汛期旱涝的相互关联。张庆云等(2003) 研究表明,夏季华北降水偏少的一种主要大气环流型是: 500 hPa 位势高度场上 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 的欧亚大陆位势高度偏高并叠加欧亚(EU) 遥相关型。林大伟等(2016) 在分析大气环流对夏季华北降水与印度降水之间的关系时认为,对流层中高层环半球遥相关型波列(CGT) 对华北夏季(汛期) 降水有着重要影响(Ding and Wang, 2005)。最近,Wang and He(2015) 研究了近 60 年以来的华北干旱年的原因,认为华北干旱与丝绸之路遥相关型,太平洋-日本型以及欧亚遥相关型有关。

5 华北汛期降水量增多趋势的停滞

如前所述,华北汛期降水量在 20 世纪 90 年代左右又有回升的趋势(陆日宇,2002),而这个上升

趋势直到 1996 左右突然停止(Liu et al.,2020)。图 5 给出了华北汛期降水量的长期变化的时间序列和 Mann-Kendal 趋势检验(Liu et al.,2020)。由图 5 可见,华北汛期降水量在 1979—1996 年有一个显著的上升趋势,1996 年华北汛期降水量出现了峰值,随后在 1997 年后,华北汛期降水量又进入了停滞期。导致华北汛期降水量进入停滞期的原因,除了东亚夏季风减弱以外,西风带向华北输送的水汽减少也是华北汛期降水量又进入停滞期的原因之一(Liu et al.,2020)。

6 华北汛期降水多寡的年代际变化的归因

在 20 世纪 70 年代中期以前,华北汛期降水处于降水偏多阶段;70 年代中期以后,华北汛期降水进入了偏少阶段(陆日宇,2002)。自此,中国东部地区形成了“南涝北旱”的降水格局(Wang and Lin,2002; Yu et al.,2004)。关于“南涝北旱”的研究很多,Hu and Fu(2007) 研究认为,华北夏季的对流层变暖比中纬度其他经度地区变暖要大得多,由于纬向平均的 Hadley 环流的向北延伸,使得中国东部地区出现“南涝北旱”。Zhang et al.(2007) 研究表明,1925—1999 年,北半球副热带地区降水在减少,而且 Hu and Fu(2007) 认为,北半球副热带地区降水的减少可能和副热带旱区的向北扩张有关。关

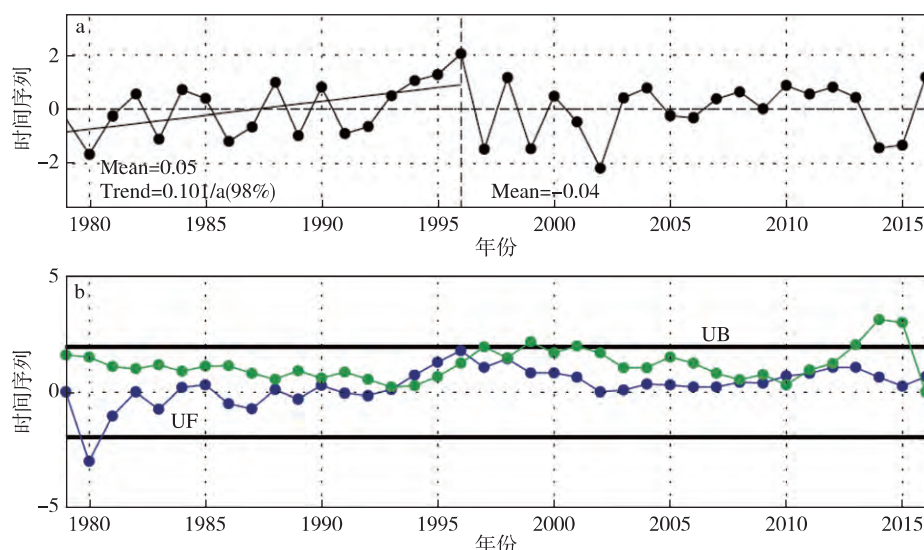


图5 1979—2016年ISPNC17的时间序列(a; 水平虚线表示多年平均值,1979—1996年的实线表示年代际趋势,竖虚线表示年代际偏移点),以及ISPNC17的Mann-Kendall检验结果(b; 绿点线表示后向统计秩序列,蓝点线表示前向统计秩序列; 两条黑线表示置信度为95%的显著性水平)(引自Liu et al.(2020))

Fig.5 (a) Time series of ISPNC17 from 1979 to 2016 (Horizontal dashed line indicates the multi-year average value, solid line from 1979 to 1996 indicates the interdecadal trend, and vertical dashed line indicates the interdecadal shift point), and (b) Mann-Kendall test results of ISPNC17 (Green dotted line shows the backward statistical rank series, and blue dotted line shows the forward statistical rank series. Two black lines show the 95% confidence level) (from Liu et al.(2020))

于“南涝北旱”的研究文献很多,宇如聪等(2008)曾对“南涝北旱”的研究进行了总结:其形成原因主要涉及季风减弱(郭其蕴等,2003;陈隆勋等,2004)、青藏高原热状况异常(朱玉祥等,2009;Zhao et al., 2010)、南亚高压的变化(毕云和钱永甫,2001;张琼和吴国雄,2001)、北太平洋年代际振荡(杨修群等,2004)、ENSO(Wu and Wang, 2002; Huang et al., 2003; 黄荣辉等,2003)、人为气溶胶排放(Xu, 2001; Menon et al., 2002)以及大气环流异常变化(赵声蓉和宋正山,1999)。

“南涝北旱”的“北旱”,主要是指1978年后华北汛期降水量进入了严重的干旱阶段。马柱国(2007)通过计算地表湿润指数,分析了中国华北地区1951—2005年干湿变化的年代际趋势特征,结果表明,中国华北地区气候及环境干湿变化存在显著的年代际趋势和突变特征,20世纪70年代中后期至今处于一个暖而降水少的干旱时段。张庆云等(2003)也认为20世纪80年代以来华北地区降水持续偏少,干旱强度有所增加。影响华北汛期降水年代际变化的原因很多,涉及的主要因子有大范围的温度改变导致的热力梯度(严中伟等,1990a, 1990b)、赤道中东太平洋海温(周连童和黄荣辉,

2003)、印度洋和大西洋海温(Yang and Lau, 2004; Sun and Yuan, 2009; Sun et al., 2009; Wang et al., 2009)、中纬度海-气相互作用(李崇银和廖清海, 1996)、位于东亚副热带高压的年代际变化(Nitta and Hu, 1996)、冬季北极海冰(武炳义等,1999; 刘海文等,2004)、北大西洋涛动(NAO)和北太平洋涛动(NPO)(Li and Li, 1999)、季风环流减弱(Wang, 2001)以及青藏高原春季积雪(朱玉祥等,2009)。除此以外,PDO(Zhang et al., 1997; Chang et al., 2000; Yang and Lau, 2004)、黑炭气溶胶(Menon et al., 2002)、大尺度降水条件的改变(刘海文和丁一汇,2011b)包括水汽输送的改变(周晓霞等,2008)、东亚上空平流层底以及对流层顶变冷(Yu and Zhou, 2007; 宇如聪等,2008)也造成了华北汛期降水的减少。Ren et al.(2004)还发现了华北汛期降水和萨赫勒地区降水存在年代际时间尺度上的联系。魏建宁和张杰(2021)研究认为,亚非副热带西风急流入口区位置及其伴随的动能异常对中国华北盛夏年代际干旱有重要的影响。戴新刚等(2003a)从华北降水频谱变化来研究华北汛期降水的年代际变化的归因,认为华北汛期降水年代际较弱主要是年际振荡成分的衰减,且20世纪70年代后准2 a

成分也逐渐减弱。

众所周知,夏季我国降水雨带的位置决定了中国东部汛期降水的多寡。早在 20 世纪 80 年代,王德瀚(1981)、查良松和邹进上(1985)都揭示出夏季在华北地区存在一条“南北”向雨带。刘海文和丁一汇(2011c)研究认为,华北夏季(7、8月)降水的年代际变化与华北雨带的年代际变化密不可分。刘海文和丁一汇(2011c)研究表明,华北汛期期间,华北地区呈现出“南北”向雨带和“东西”向两条雨带;而且,在华北汛期降水偏多阶段,中国东部地区,“北方”雨带和“南方”雨带呈“断裂”状分布,“北方”雨带和“南方”雨带之间形成一个较大范围的降水低值区;而在华北汛期降水偏多阶段,“北方”雨带和“南方”打通,“北方”雨带和“南方”雨带之间形成的降水低值区区域变小。华北雨带分布的年代际变化和东亚大气环流以及东亚夏季风的年代际变化有关(刘海文和丁一汇,2011c)。

中国主雨带以二次北跳,三次准静止的阶段性方式随季节向北推进(Ding, 1992; 丁一汇等, 2004)。当中国主雨带处于第 3 个停滞期,则华北和东北进入雨季,即所谓的“七下八上”。赵平和周秀骥(2006)还研究了近 40 年来我国东部降水持续时间和雨带移动的年代际变化特征,认为从春末到夏季,冷位相时我国东部强降水带表现出从华南、经过长江流域向华北移动的特征,而在暖位相时强降水主要集中在长江流域,从华南向华北移动的特征不明显。李爱华和江志红等(2007)利用中国东部 355 站夏季逐日降水资料,研究认为中国东部夏季雨带推进强度在 1966 年和 1979 年发生明显突变,1957—1966 年雨带推进偏强,而在 1979—1989 年雨带推进偏弱。

7 华北汛期降水的预测和数值模拟研究

范可等(2008)鉴于华北汛期降水和对流层大气有准两年振荡的特点。建立了一种通过预测汛期降水的年际增量,然后再预测华北汛期降水距平百分率的新方法,能够提高华北汛期降水预测水平,具有一定的应用价值。王革丽和杨培才(2003)使用时空序列预测分析方法,对华北旱涝进行了预测研究,表明场时间序列方法对华北地区旱涝预测有一定的能力。陈丽娟等(2019)根据影响华北汛期降水的主要因子绘制了华北汛期降水的预测模型,并且强调华北雨季降水的强弱不仅与 ENSO 循环的

位相有关,更多受到 ENSO 演变速率的影响,强调了 ENSO 事件演化对华北汛期降水的作用和重要性。

在华北汛期降水量的数值模拟方面,吕世华和陈玉春(1999)使用美国 NCAR 区域气候模式 RegCM2 对 1991 和 1994 年我国华北夏季降水进行了气候模拟研究。模拟结果表明,该模式对华北夏季降水的主要分布特征有一定的模拟能力。李栋梁等(2003)通过数值模拟研究发现,夏季青藏高原大面积感热异常偏强时,黄河流域降水偏多;反之,华北干旱。最近,胡一阳等(2021)基于参与 CMIP6 高分辨率模式比较计划(HighResMIP)9 个模式组的 18 个全球气候模式模拟数据,评估了不同分辨率气候模式对中国区域 1961—2014 年降水特征的模拟能力。结果表明,模式分辨率的提高确实能在一定程度上改善模式对中国降水模拟能力。

8 新的研究方向展望

华北地区是我国水资源十分贫乏的地区之一,华北出现的年代际干旱一直是气候界关心的重要研究课题。虽然关于华北汛期降水的研究和成果很多,得出的结论也很多,但是未来关于华北汛期降水的研究,仍然有以下几个方面值得关注:

1) 华北汛期降水年代际变化最显著的就是 7 月和 8 月,6 月年代际变化并不显著,因此建议研究华北汛期降水的年代际变化最好集中于这两个月份或者本文用客观的方法定义的华北雨季,这样对华北汛期降水多少的归因研究结果,具有较好的可比性。

2) 尽管影响华北汛期降水的因素很多,但是到目前为止,学术界尚未得到统一的认识,其中的机制中既有人类活动的影响(Menon et al., 2002),也有华北汛期降水的自然变率。其中华北汛期降水年代际变化的最本质的原因是什么,仍值得大家深入研究。

3) 华北汛期在 1996 年后出现的年代际降水停滞,对这一新现象,关注的或者研究的文章还比较少。

4) 华北汛期降水的谱系分析中,为什么华北汛期降水主要是年际振荡成分的衰减,且 20 世纪 70 年代后准 2 a 成分也逐渐减弱(戴新刚等, 2003a),以及华北汛期降水在不同年代际背景下,高频的天气振荡和准双周周期振荡表现不同,其背后的原因是什么,这方面的研究仍值得关注。

5) 华北汛期降水与大气遥相关型的变化,一种是随着急流波导传播的,比如 CGT 型,另一种是沿着大圆路径传播的,比如欧亚型,但这两类遥相关型在影响华北汛期降水时的相互作用方面,也值得大家研究和关注。

6) 华北汛期降水的预测方面,包括中国东部雨带的空间分布,对华北的汛期降水多寡起着十分重要的作用。如何提高模式对东亚夏季风年际变率和年代际变率的模拟效果,这对每年的汛期降水的预测起着至关重要的作用;另外,在预测方法上,能否

将模式结果或者统计结果(包括统计降尺度方法)和现在兴起的人工智能,机器学习等方面结合在一起,用来提高华北汛期降水的预测能力,也是值得研究者去尝试和努力的方向。

综上所述,华北汛期降水的多少的变化归因问题是个非常复杂的问题,在年际变化中又有年代际变化成分,在年代际干旱化趋势过程中又有可能出现某个年份降水的突然增加,这些问题,无论是对华北汛期降水的研究还是对华北汛期降水的预测,都带来了一定的难度。

参考文献(References)

- 毕慕莹,1990.旱涝气候研究进展[M].北京:气象出版社. Bi M Y,1990.Advance in drought and flood climate research[M].Beijing: China Meteorological Press.(in Chinese).
- 毕云,钱永甫,2001.近40年高层温度场和高度场的时空变化特征[J].南京气象学院学报,24(1):59-65. Bi Y,Qian Y F,2001.The temporal and spatial variations of the upper level temperature and height fields in recent 40 years[J].J.J Nanjing Inst Meteor,24(1):59-65.(in Chinese).
- Chang C P,Zhang Y,Li T,2000.Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs.Part I: roles of the subtropical ridge[J].J Climate,13(24):4310-4325.doi: 10.1175/1520-0442(2000)0134310:IAIVOT>2.0.CO;2.
- 陈丽娟,赵俊虎,顾薇,等,2019.汛期我国主要雨季进程成因及预测应用进展[J].应用气象学报,30(4):385-400. Chen L J,Zhao J H,Gu W,et al.,2019.Advances of research and application on major rainy seasons in China[J].J Appl Meteor Sci,30(4):385-400.doi: 10.11898/1001-7313.20190401.(in Chinese).
- 陈隆勋,高辉,何金海,等,2004.夏季东亚和印度热带季风环流系统动能和对流扰动的纬向传播特征[J].中国科学D辑:地球科学,34(2):171-179. Chen L X,Gao H,He J H,et al.,2004.Characteristics of zonal propagation of kinetic energy and convective disturbance in tropical monsoon circulation system of East Asia and India in summer[J].Sci China Ser D,34(2):171-179.(in Chinese).
- 程龙,刘海文,周天军,等,2013.近30余年来盛夏东亚东南季风和西南季风频率的年代际变化及其与青藏高原积雪的关系[J].大气科学,37(6):1326-1336. Cheng L,Liu H W,Zhou T J,et al.,2013.Interdecadal variations of summer southeast and southwest monsoon frequency over east Asia and its relationship with snow cover over the Tibetan Plateau for recent 30 years[J].Chin J Atmos Sci,37(6):1326-1336.doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12189.(in Chinese).
- 戴新刚,汪萍,张培群,等,2003a.华北降水频谱变化及其可能机制分析[J].自然科学进展,13(11):1182-1189. Dai X G,Wang P,Zhang P Q,et al.,2003a.Analysis of the spectrum variation of precipitation over North China and its possible mechanism[J].Advance in Natural Science,13(11):1182-1189.(in Chinese).
- 戴新刚,汪萍,丑纪范,2003b.华北汛期降水多尺度特征与夏季风年代际衰变[J].科学通报,48(23):2483-2487. Dai X G,Wang P,Chou J F,2003b.Multi-scale characteristics of precipitation in flood season in North China and decadal decay of summer monsoon[J].Chin Sci Bull,48(23):2483-2487.doi: 10.3321/j.issn:0023-074X.2003.23.015.(in Chinese).
- Ding Q,Wang B,2005.Circumglobal teleconnection in the Northern Hemisphere summer[J].J Climate,18:3483-3505.doi: 10.1175/JCLI3473.1.
- Ding Y H,1992.Summer monsoon rainfalls in China[J].J Meteor Soc Japan,70(1B):373-396.
- 丁一汇,李崇银,何金海,等,2004.南海季风试验与东亚夏季风[J].气象学报,62(5):561-586. Ding Y H,Li C Y,He J H,et al.,2004.South China Sea monsoon experiment(SCSMEX) and the East Asian monsoon[J].Acta Meteorol Sin,62(5):561-586.doi: 10.11676/qxxb2004.057.(in Chinese).
- Ding Y H,Liu Y Y,2008.A study of the teleconnections in the Asian-Pacific monsoon region[J].Acta Meteorol Sin,22(4):404-418.
- 段丽瑶,荣艳淑,梁平德,2008.西太平洋副热带高压位置对华北盛夏降水的影响[J].气象科技,36(3):273-276. Duan L Y,Rong Y S,Liang P D,2008.Effect of West Pacific subtropical high on summer precipitation in North China[J].Meteor Sci Technol,36(3):273-276.doi: 10.19517/j.1671-6345.2008.03.005.(in Chinese).
- 范可,林美静,高煜中,2008.用年际增量方法预测华北汛期降水[J].中国科学(D辑:地球科学),38(11):1452-1459. Fan K,Lin M J,Gao Y Z,2008.Prediction of precipitation in flood season in North China by interannual increment method[J].Sci China Ser D Earth Sci,38(11):1452-1459.(in Chinese).
- 冯丽文,1980.北京近255年雨季及其多年变化[J].气象学报,38(4):341-350. Feng L W,1980.The rainy season and its variation in Beijing during the last 255 years[J].Acta Meteorol Sin,38(4):341-350.doi: 10.11676/qxxb1980.040.(in Chinese).
- 高由禧,徐淑英,郭其蕴,等,1962.东亚季风若干问题[M].北京:科学出版社:12-27. Gao Y X,Xu S Y,Guo Q Y,et al.,1962.Some Problems about East Asian Monsoon[M].Beijing: Science Press:12-27.(in Chinese).
- 郭其蕴,1992.中国华北旱涝与印度夏季风降水的遥相关分析[J].地理学报,47(5):394-402. Guo Q Y,1992.Teleconnection between the floods/

- droughts in North China and Indian summer monsoon rainfall [J]. *Acta Geogr Sin*, 47(5) : 394-402. doi: 10. 1007/BF02656973. (in Chinese) .
- 郭其蕴,王继琴,1981.近 30 年夏季风时期中国的降水分布 [J]. *地理学报*, 36(2) , 187-195. Guo Q Y, Wang J Q, 1981. Precipitation distribution in China during summer monsoon in recent 30 years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 36(2) : 187-195. (in Chinese) .
- 郭其蕴,蔡静宁,邵雪梅,等,2003.东亚夏季风的年代际变率对中国气候的影响 [J]. *地理学报*, 58(4) : 569-576. Guo Q Y, Cai J N, Shao X M, et al., 2003. Interdecadal variability of East Asian summer monsoon and its impact on the climate of China [J]. *Acta Geogr Sin*, 58(4) : 569-576. (in Chinese) .
- 郝立生,丁一汇,闵锦忠,2016.东亚夏季风变化与华北夏季降水异常的关系 [J]. *高原气象*, 35(5) : 1280-1289. Hao L S, Ding Y H, Min J Z, 2016. Relationship between summer monsoon changes in East Asia and abnormal summer rainfall in North China [J]. *Plateau Meteor*, 35(5) : 1280-1289. doi: 10. 7522/j.issn.1000-0534. 2015. 00085. (in Chinese) .
- Hu Y Y, Fu Q, 2007. Observed poleward expansion of the Hadley circulation since 1979 [J]. *Atmos Phys Chem*, 7: 5229-5236.
- 胡一阳,徐影,李金建,等,2021.CMIP6 不同分辨率全球气候模式对中国降水模拟能力评估 [J]. *气候变化研究进展*, 17(6) : 14. Hu Y Y, Xu Y, Li J J, et al., 2021. Evaluation on the performance of CMIP6 global climate models with different horizontal resolution in simulating the precipitation over China [J]. *Climate Change Res*, 17(6) : 14. (in Chinese) .
- 黄荣辉,徐予红,周连童,1999.我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势 [J]. *高原气象*, 18(4) : 465-476. Huang R H, Xu Y H, Zhou L T, 1999. The interdecadal variation of summer precipitations in China and the drought trend in North China [J]. *Plateau Meteor*, 18(4) : 465-476. (in Chinese) .
- 黄荣辉,陈文,丁一汇,等,2003.关于季风动力学以及季风与 ENSO 循环相互作用的研究 [J]. *大气科学*, 27(4) : 484-502. Huang R H, Chen W, Ding Y H, et al., 2003. Studies on the monsoon dynamics and the interaction between monsoon and ENSO cycle [J]. *Chin J Atmos Sci*, 27(4) : 484-502. doi: 10. 3878/j.issn.1006-9895. 2003. 04. 05. (in Chinese) .
- Huang R H, Zhou L T, Chen W, 2003. The progresses of recent studies on the variabilities of the East Asian monsoon and their causes [J]. *Adv Atmos Sci*, 20(1) : 55-69.
- Kripalani R H, Kulkarni A, 1997. Rainfall variability over South-East Asia: connections with Indian monsoon and ENSO extremes: new perspectives [J]. *Int J Climatol*, 17(11) : 1155-1168.
- Kripalani R H, Kulkarni A, 2001. Monsoon rainfall variations and teleconnections over South and East Asia [J]. *Int J Climatol*, 21(5) : 603-616.
- 李爱华,江志红,2007.中国东部夏季雨带推进过程的年际、年代际变化 [J]. *南京气象学院学报*, 30(2) : 186-193. Li A H, Jiang Z H, 2007. Interannual and interdecadal changes of summer rain band propagation over Eastern China [J]. *J Nanjing Inst Meteor*, 30(2) : 186-193. doi: 10. 13878/j.cnki.dqkxb.2007. 02. 006. (in Chinese) .
- 李崇银,1992.华北地区汛期降水的一个分析研究 [J]. *气象学报*, 50(1) : 41-49. Li C Y, 1992. An analytical study on the precipitation in the flood period over Huabei area [J]. *Acta Meteorol Sin*, 50(1) : 41-49. (in Chinese) .
- Li C Y, Li G L, 1999. Variation of the NAO and NPO associated with climate jump in the 1960s [J]. *Chin Sci Bull*, 44(21) : 1983-1987.
- 李崇银,廖清海,1996.东亚和西北太平洋地区气候的准 10 年尺度振荡及其可能机制 [J]. *气候与环境研究*, 1(2) : 29-34, 36. Li C Y, Liao Q H, 1996. Quasi-decadal oscillation of climate in East Asia/northwestern Pacific region and possible mechanism [J]. *Clim Environ Res*, 1(2) : 29-34, 36. (in Chinese) .
- 李栋梁,魏丽,李维京,等,2003.青藏高原地面感热对北半球大气环流和中国气候异常的影响 [J]. *气候与环境研究*, 8(1) : 60-70. Li D L, Wei L, Li W J, et al., 2003. The effect of surface sensible heat flux of the Qinghai-Xizang Plateau on general circulation over the Northern Hemisphere and climatic anomaly of China [J]. *Clim Environ Res*, 8(1) : 60-70. doi: 10. 3969/j.issn.1006-9585. 2003. 01. 008. (in Chinese) .
- 李红梅,周天军,宇如聪,2008.近四十年我国东部盛夏日降水特性变化分析 [J]. *大气科学*, 32(2) : 358-370. Li H M, Zhou T J, Yu R C, 2008. A-nalysiss of July-August daily precipitation characteristics variation in eastern China during 1958—2000 [J]. *Chin J Atmos Sci*, 32(2) : 358-370. doi: 10. 3878/j.issn.1006-9895. 2008. 02. 14. (in Chinese) .
- 梁平德,1988.印度夏季风与我国华北夏季降水量 [J]. *气象学报*, 46(1) : 75-81. Liang P D, 1988. The Indian summer monsoon and the rainfall in North China in summer [J]. *Acta Meteorol Sin*, 46(1) : 75-81. doi: 10. 11676/qxb1988. 009. (in Chinese) .
- 梁平德,段丽瑶,周鸣盛,等,2006.华北盛夏旱涝的环流型特征及其在初夏的预兆 [J]. *气象学报*, 64(3) : 385-391. Liang P D, Duan L Y, Zhou M S, et al., 2006. Circulation patterns for mid-summer drought/flood in North China and their early-summer precursors [J]. *Acta Meteorol Sin*, 64(3) : 385-391. doi: 10. 3321/j.issn: 0577-6619. 2006. 03. 013. (in Chinese) .
- 林大伟,布和朝鲁,谢作威,2016.夏季中国华北与印度降水之间的关联及其成因分析 [J]. *大气科学*, 40(1) : 201-214. Lin D W, Bueh C L, Xie Z W, 2016. Relationship between summer rainfall over North China and India and its genesis analysis [J]. *Chin J Atmos Sci*, 40(1) : 201-214. (in Chinese) . doi: 10. 3878/j.issn.1006-9895. 1503. 14339. (in Chinese) .
- 刘海文,2009.华北汛期降水的多尺度变化及其大尺度降水条件的演变研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学. Liu H W, 2009. Multiple-time-scale variability analyses of rainfall during rainy season over North China and study on it's evolution of large-scale precipitation conditions [D]. Nan-jing: Nanjing University of Information Engineering. (in Chinese) .
- 刘海文,丁一汇,2010.华北汛期日降水特性的变化分析 [J]. *大气科学*, 34(1) : 12-22. Liu H W, Ding Y H, 2010. Analysis of daily precipitation characteristics over North China during rainy seasons [J]. *Chin J Atmos Sci*, 34(1) : 12-22. (in Chinese) .
- 刘海文,丁一汇,2011a.华北汛期降水月内时间尺度周期振荡的年代际变化分析 [J]. *大气科学*, 35(1) : 157-167. Liu H W, Ding Y H, 2011a. A-nalysiss on the interdecadal change of submonthly time scales oscillation of precipitation over North China during rainy seasons and its cause [J].

- Chin J Atmos Sci, 35(1): 157-167. (in Chinese).
- 刘海文, 丁一汇, 2011b. 华北汛期大尺度降水条件的年代际变化[J]. 大气科学学报, 34(2): 146-152. Liu H W, Ding Y H, 2011b. Interdecadal variability of large-scale precipitation conditions over North China during rainy seasons [J]. Trans Atmos Sci, 34(2): 146-152. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxb.2011.02.004. (in Chinese).
- 刘海文, 丁一汇, 2011c. 华北夏季降水的年代际变化[J]. 应用气象学报, 22(2): 129-137. Liu H W, Ding Y H, 2011c. The interdecadal variability of summer precipitation over North China [J]. J Appl Meteor Sci, 22(2): 129-137. doi: 10.11898/1001-7313.20110201. (in Chinese).
- 刘海文, 郭品文, 张娇, 2004. 戴维斯海峡海冰与华北降水的年际关系及其年代际变化[J]. 南京气象学院学报, 27(2): 253-257. Liu H W, Guo P W, Zhang J, 2004. The interannual relationship between Davis strait sea-ice and rainfall of North China and its decadal variability [J]. J Nanjing Inst Meteor, 27(2): 253-257. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxb.2004.02.015. (in Chinese).
- Liu H W, Miao J R, Wu K J, et al., 2020. Why the increasing trend of summer rainfall over North China has halted since the mid-1990s [J]. Adv Meteor, 2020: 1-10. doi: 10.1155/2020/9031796.
- 刘芸芸, 丁一汇, 2008. 印度夏季风与中国华北降水的遥相关分析及数值模拟[J]. 气象学报, 66(5): 789-799. Liu Y Y, Ding Y H, 2008. Analysis and numerical simulation of the teleconnection between Indian summer monsoon and precipitation in North China [J]. Acta Meteorol Sin, 66(5): 789-799. doi: 10.3321/j.issn:0577-6619.2008.05.012. (in Chinese).
- Liu Y Y, Ding Y H, 2008. Analysis and numerical simulations of the teleconnection between Indian summer monsoon and precipitation in North China [J]. Acta Meteor Sinica, 22(4): 489-501.
- 陆日宇, 2002. 华北汛期降水量变化中年代际和年际尺度的分离[J]. 大气科学, 26(5): 611-624. Lu R Y, 2002. Separation of interannual and interdecadal variations of rainfall in North China [J]. Chin J Atmos Sci, 26(5): 611-624. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2002.05.03. (in Chinese).
- 陆日宇, 2003. 华北汛期降水量年代际和年际变化之间的线性关系[J]. 科学通报, 48(7): 718-722. Lu R Y, 2003. Linear relationship between interdecadal and interannual variation of precipitation in flood season in North China [J]. Chin Sci Bull, 48(7): 718-722. doi: 10.3321/j.issn:0023-074X.2003.07.017. (in Chinese).
- 陆日宇, 2005. 华北汛期降水量年际变化与赤道东太平洋海温[J]. 科学通报, 50(11): 1131-1135. Lu R Y, 2005. Interannual variation of precipitation in flood season in North China and SST in equatorial eastern Pacific Ocean [J]. Chin Sci Bull, 50(11): 1131-1135. (in Chinese).
- 吕世华, 陈玉春, 1999. 区域气候模式对华北夏季降水的气候模拟[J]. 高原气象, 18(4): 632-640. Lü S H, Chen Y C, 1999. Simulation of summer precipitation over North China in 1991 and 1994 with a NCAR regional climate model [J]. Plateau Meteor, 18(4): 632-640. (in Chinese).
- 马柱国, 2007. 华北干旱化趋势及转折性变化与太平洋年代际振荡的关系[J]. 科学通报, 52(10): 1199-1206. Ma Z G, 2007. The relationship between the drought trend and turning change in North China and the interdecadal oscillation in the Pacific Ocean [J]. Chin Sci Bull, 52(10): 1199-1206. doi: 10.3321/j.issn:0023-074X.2007.10.018. (in Chinese).
- Menon S, Hansen J, Nazarenko L, et al., 2002. Climate effects of black carbon aerosols in China and India [J]. Science, 297(5590): 2250-2253. doi: 10.1126/science.1075159.
- 苗峻峰, 徐祥德, 1993. 华北汛期旱涝前期月平均环流异常的遥相关型[J]. 南京气象学院学报, 16(3): 319-323. Miao J F, Xu X D, 1993. Teleconnection pattern of monthly mean circulation anomaly in relation to the rainfall in the period previous to the wet or dry season of North China [J]. J Nanjing Inst Meteor, 16(3): 319-323. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxb.1993.03.010. (in Chinese).
- 聂俊, 刘鹏, 赵灿, 2021. 西北太平洋副热带高压的不同指数及其与中国东部夏季降水关系的探讨[J]. 大气科学, 45(4): 833-850. Nie J, Liu P, Zhao C, 2021. Research on relationship between various indexes of the western North Pacific subtropical high and summer precipitation in eastern China [J]. Chin J Atmos Sci, 45(4): 833-850. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2009.20160. (in Chinese).
- Nitta T, Hu Z Z, 1996. Summer climate variability in China and its association with 500 hPa height and tropical convection [J]. J Meteor Soc Japan, 74(4): 425-445.
- Ren B H, Lu R Y, Xiao Z N, 2004. A possible linkage in the interdecadal variability of rainfall over North China and the Sahel [J]. Adv Atmos Sci, 21(5): 699-707. doi: 10.1007/BF02916367.
- Samel A N, Wang W, Liang X Z, 1999. The monsoon rainband over China and relationships with the Eurasian circulation [J]. J Climate, 12: 115-131. doi: 10.1175/1520-0442-12.1.115.
- Sun J Q, Yuan W, 2009. Contribution of the sea surface temperature over the Mediterranean-Black Sea to the decadal shift of the summer North Atlantic Oscillation [J]. Adv Atmos Sci, 26(4): 717-726. doi: 10.1007/s00376-009-8210-8.
- Sun J Q, Wang H J, Yuan W, 2009. Role of the tropical Atlantic sea surface temperature in the decadal change of the summer North Atlantic Oscillation [J]. J Geophys Res, 114: D20110.
- 孙燕, 王谦, 钱永甫, 等, 2003. 华北汛期降水异常与 100 hPa 高度场异常的关系[J]. 气象科学, 23(4): 418-425. Sun Y, Wang Q Q, Qian Y F, et al., 2003. The relation between the anomalies of the North China precipitation in flood season and the anomalies of 100 hPa height field [J]. Meteor Sci Technol, 23(4): 418-425. (in Chinese).
- Tao S Y, Chen L X, 1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China [M] // Chang C P, Krishnamurti T N. Monsoon Meteorology. Oxford: Oxford University Press: 60-92.
- Wallace J, Gutzler D, 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter [J]. Mon Wea Rev, 109: 784-812. doi: 10.1175/1520-0493(1981)109<0784:TITGHE>2.0.CO;2.
- Wang B, Lin H, 2002. Rainy seasons of the Asian-Pacific monsoon [J]. J Climate, 15(4): 386-396.

- 王德瀚,1981.雨季划分及雨带变动的研究[J].气象学报,39(2):252-256. Wang D H,1981.Study on the division of rainy season and the change of rain belt [J].Acta Meteorol Sin,39(2):252-256.(in Chinese).
- 王革丽,杨培才,2003.时空序列预测分析方法在华北旱涝预测中的应用[J].地理学报,58(S1):132-137. Wang G L,Yang P C,2003.The application of temporal and spatial series analysis to flood and drought prediction in Northern China [J].Acta Geogr Sin,58(S1):132-137.doi:10.3321/j.issn:0375-5444.2003.z1.016.(in Chinese).
- Wang H J,2001.The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's [J].Adv Atmos Sci,18(3):376-386.doi:10.1007/BF02919316.
- Wang H J,He S P,2015.The North China/northeastern Asia severe summer drought in 2014 [J].J Climate,28:6667-6681.doi:10.1175/JCLI-D-15-0202.1.
- Wang Y M,Li S L,Luo D H,2009.Seasonal response of Asian monsoonal climate to the Atlantic Multidecadal Oscillation [J].J Geophys Res,114(D2):D02112.doi:10.1029/2008jd010929.
- 魏建宁,张杰,2021.亚非副热带西风急流入口区位置及动能异常对中国华北盛夏年代际干旱的影响[J].高原气象,40(2):281-291. Wei J N,Zhang J,2021.Influence of the position and kinetic energy anomalies of the inlet region of the Asian-African subtropical westerly jet on the mid-summer interdecadal drought in North China [J].Plateau Meteor,40(2):281-291.(in Chinese).
- 武炳义,黄荣辉,高登义,1999.冬季北极海冰长期变化对华北降水的可能影响[J].高原气象,18(4):590-594. Wu B Y,Huang R H,Gao D Y,1999.Impacts of long range variations of winter sea ice extents in Arctic on rainfall in North China [J].Plateau Meteor,18(4):590-594.doi:10.3321/j.issn:1000-0534.1999.04.014.(in Chinese).
- Wu R G,Wang B,2002.A contrast of the East Asian summer monsoon-ENSO relationship between 1962—1977 and 1978—1993 [J].J Climate,15(15):3266-3279.
- Xu Q,2001.Abrupt change of the mid-summer climate in central East China by the influence of atmospheric pollution [J].Atmos Environ,35(30):5029-5040.doi:10.1016/S1352-2310(01)00315-6.
- Yang F L,Lau K M,2004.Trend and variability of China precipitation in spring and summer: linkage to sea-surface temperatures [J].Int J Climatol,24(13):1625-1644.
- 杨修群,朱益民,谢倩,等,2004.太平洋年代际振荡的研究进展[J].大气科学,28(6):979-992. Yang X Q,Zhu Y M,Xie Q,et al.,2004.Advances in studies of Pacific decadal oscillation [J].Chin J Atmos Sci,28(6):979-992.(in Chinese).
- 杨修群,谢倩,朱益民,等,2005.华北降水年代际变化特征及相关的海气异常型[J].地球物理学报,48(4):789-797. Yang X Q,Xie Q,Zhu Y M,et al.,2005.Decadal-to-interdecadal variability of precipitation in North China and associated atmospheric and oceanic anomaly patterns [J].Chin J Geophys,48(4):789-797.(in Chinese).
- 严中伟,季劲钧,叶笃正,1990a.60年代北半球夏季气候跃变: I.降水和温度变化[J].中国科学(B 辑),1:97-103. Yan Z W, Ji J J, Ye D Z,1990a.Summer climate change in the Northern Hemisphere during the 1960s: I.precipitation and temperature changes [J].Scientia Sinica (B),1:97-103.(in Chinese).
- 严中伟,季劲钧,叶笃正,1990b.60年代北半球夏季气候跃变: II.海平面气压和 500 hPa 高度变化[J].中国科学(B 辑),8:879-885. Yan Z W, Ji J J, Ye D Z,1990b.Summer climate change in the Northern Hemisphere during the 1960s: II.pressure on sea surface and variation in 500 hPa [J].Scientia Sinica (B),8:879-885.(in Chinese).
- 余锦华,荣艳淑,任健,2005.青藏高原地表温度对华北汛期降水变化的影响[J].气象科学,25(6):579-586. Yu J H,Rong Y S,Ren J,2005.The effects of Tibetan Plateau surface temperature on the precipitation over North China during rainy season [J].Sci Meteor Sin,25(6):579-586.(in Chinese).
- Yu R C,Wang B,Zhou T J,2004.Tropospheric cooling and summer monsoon weakening trend over East Asia [J].Geophys Res Lett,31(22):1-4.
- Yu R C,Zhou T J,2007.Seasonality and three-dimensional structure of interdecadal change in the East Asian monsoon [J].J Climate,20(21):5344-5355.
- 宇如聪,周天军,李建,等,2008.中国东部气候年代际变化三维特征的研究进展[J].大气科学,32(4):893-905. Yu R C,Zhou T J,Li J,et al.,2008.Progress in the studies of three-dimensional structure of interdecadal climate change over Eastern China [J].Chin J Atmos Sci,32(4):893-905.(in Chinese).
- 于晓澄,赵俊虎,杨柳,等,2019.华北雨季开始早晚与大气环流和地表温度异常的关系[J].大气科学,43(1):107-118. Yu X C,Zhao J H,Yang L,et al.,2019.The relationship between the onset date of the rainy season in North China and the atmospheric circulation and SST [J].Chin J Atmos Sci,43(1):107-118.doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17242.(in Chinese).
- 于勇,牛生杰,刘海文,等,2009.华北盛夏降水年代际变化与南半球环流异常的关系[J].大气科学学报,32(5):661-666. Yu Y,Niu S J,Liu H W,et al.,2009.Anomaly patterns of Southern Hemispheric atmospheric circulation associated with interdecadal variability of summer precipitation in North China [J].Trans Atmos Sci,32(5):661-666.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2009.05.003.(in Chinese).
- 查良松,邹进上,1985.我国东部地区汛期雨带的变动及其与环流的关系[J].南京大学学报(自然科学版),21(2):380-393. Zha L S,Zou J S,1985.On the variation of rain-belt in the Eastern China with respect to atmospheric circulation [J].J Nanjing Univ Nat Sci,21(2):380-393.(in Chinese).
- 张婕,武芳,刘文菁,等,2012.马斯克林高压与华北盛夏降水的年际关系及其年代际变化[J].大气科学学报,35(4):431-437. Zhang J,Wu F,Liu W J,et al.,2012.The interannual relationship between Mascarene High and summer precipitation in North China and its interdecadal variability

- [J].Trans Atmos Sci,35(4) : 431-437.doi: 10. 13878/j.cnki.dqkxxb.2012. 04. 010.(in Chinese) .
- 张启龙,翁学传,程明华,1999.华北地区汛期降水与热带西太平洋暖池和黑潮的关系[J].高原气象,18(4) : 575-583. Zhang Q L,Weng X C, Cheng M H,1999.Relationship between the precipitation in the rainy season in North China and the tropical western Pacific warm pool and kuro-shio [J].Plateau Meteor,18(4) : 575-583.doi: 10. 3321/j.issn: 1000-0534. 1999. 04. 012.(in Chinese) .
- 张庆云,卫捷,陶诗言,2003.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 Q Y,Wei J, Tao S Y,2003.The decadal and interannual variations of drought in the northern China and association with the circulations [J].Clim Environ Res, 8(3) : 307-318.(in Chinese) .
- 张琼,吴国雄,2001.长江流域大范围旱涝与南亚高压的关系[J].气象学报,59(5) : 569-577. Zhang Q,Wu G X,2001.The large area flood and drought over Yangtze River valley and its relation to the South Asia high [J].Acta Meteorol Sin,59(5) : 569-577.doi: 10. 3321/j.issn: 0577-6619. 2001. 05. 007.(in Chinese) .
- 张人禾,1999.El Niño 盛期印度夏季风水汽输送在我国华北地区夏季降水异常中的作用[J].高原气象,18(4) : 567-574. Zhang R H,1999.The role of Indian summer monsoon water vapor transportation on the summer rainfall anomalies in the northern part of China during the El Niño mature phase [J].Plateau Meteor,18(4) : 567-574.doi: 10. 3321/j.issn: 1000-0534. 1999. 04. 011.(in Chinese) .
- Zhang X B,Zwiers F W,Hegerl G C,et al.,2007.Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends [J].Nature,448(7152) : 461-465.doi: 10. 1038/nature06025.
- Zhang Y,Wallace J M,Battisti D S,1997. ENSO-like interdecadal variability: 1900—1993 [J].J Climate,10(5) : 1004-1020.
- 赵汉光,1994.华北的雨季[J].气象,20(6) : 3-8. Zhao H G,1994.Rainy season in North China [J].Meteor Mon,20(6) : 3-8.(in Chinese)
- Zhao P,Yang S,Yu R,2010.Long-term changes in rainfall over eastern China and large-scale atmospheric circulation associated with recent global warming [J].J Climate,23: 1544-1562.doi: 10. 1175/2009JCLI2660. 1.
- 赵平,周秀骥,2006.近 40 年我国东部降水持续时间和雨带移动的年代际变化[J].应用气象学报,17(5) : 548-556. Zhao P,Zhou X J,2006.Decadal variability of rainfall persistence time and rainbelt shift over eastern China in recent 40 years [J].J Appl Meteor Sci,17(5) : 548-556.doi: 10. 3969/j.issn.1001-7313. 2006. 05. 004.(in Chinese) .
- 赵声蓉,宋正山,1999.华北汛期旱涝与中高纬大气环流异常[J].高原气象,18(4) : 535-540. Zhao S R,Song Z S,1999.Floods and droughts in Northern China and general circulation anomalies over middle and high latitudes [J].Plateau Meteor,18(4) : 535-540.doi: 10. 3321/j.issn: 1000-0534. 1999. 04. 008.(in Chinese) .
- 赵声蓉,宋正山,纪立人,2002.华北汛期降水与亚洲季风异常关系的研究[J].气象学报,60(1) : 68-75. Zhao S R,Song Z S, Ji L R,2002.Study on the relationship between the anomalies of rainfall over North China and the Asian monsoon anomalies [J].Acta Meteorol Sin,60(1) : 68-75.doi: 10. 3321/j.issn: 0577-6619. 2002. 01. 008.(in Chinese) .
- 赵声蓉,宋正山,纪立人,2003.青藏高原热力异常与华北汛期降水关系的研究[J].大气科学,27(5) : 881-893. Zhao S R,Song Z S, Ji L R, 2003.Heating effect of the Tibetan Plateau on rainfall anomalies over North China during rainy season [J].Chin J Atmos Sci,27(5) : 881-893.doi: 10. 3878/j.issn.1006-9895. 2003. 05. 09.(in Chinese) .
- 赵树云,陈丽娟,崔童,2017. ENSO 位相转换对华北雨季降水的影响[J].大气科学,41(4) : 857-868. Zhao S Y,Chen L J,Cui T,2017.Effects of ENSO phase-switching on rainy-season precipitation in North China [J].Chin J Atmos Sci,41(4) : 857-868. doi: 10. 3878/j. issn. 1006-9895. 1701. 16226.(in Chinese) .
- 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 L T,Huang R H, 2003.Research on the characteristics of interdecadal variability of summer climate in China and its possible cause [J].Clim Environ Res,8(3) : 274-290.doi: 10. 3969/j.issn.1006-9585. 2003. 03. 003.(in Chinese) .
- 周晓霞,丁一汇,王盘兴,2008.影响华北汛期降水的水汽输送过程[J].大气科学,32(2) : 345-357. Zhou X X,Ding Y H,Wang P X,2008. Features of moisture transport associated with the precipitation over North China during July-August [J].Chin J Atmos Sci,32(2) : 345-357.(in Chinese) .
- 朱锦红,王绍武,慕巧珍,2003.华北夏季降水 80 年振荡及其与东亚夏季风的关系[J].自然科学进展,13(11) : 1205-1209. Zhu J H,Wang S W, Mu Q Z,2003. 80 year oscillation of summer precipitation in North China and its relationship with East Asian summer monsoon [J].Advance in Natural Science,13(11) : 1205-1209.(in Chinese) .
- 朱玉祥,丁一汇,刘海文,2009.青藏高原冬季积雪影响我国夏季降水的模拟研究[J].大气科学,33(5) : 903-915. Zhu Y X,Ding Y H,Liu H W, 2009.Simulation of the influence of winter snow depth over the Tibetan Plateau on summer rainfall in China [J].Chin J Atmos Sci,33(5) : 903-915.(in Chinese) .

New research progress on long-term variation of precipitation in flood season in North China

LIU Haiwen¹, YUAN Shuai¹, YANG Zhaohong¹, WU Kaijun¹, ZHU Yuxiang², LIN Yihua^{3,4}

¹Department of Aviation Meteorology, College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

²China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081, China;

³State Key Laboratory of Numerical Modelling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

⁴College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

The interdecadal reduction of precipitation in flood season in North China has always been one of the important topics in the field of climatology. This paper briefly reviews the latest representative results of the research on drought and flood in flood season in North China, mainly including the objective identification of the beginning and end of flood season in North China, the multi-time-scale variation characteristics of precipitation in flood season in North China, the relationship between precipitation changes in flood season in North China and atmospheric teleconnection patterns, and the stagnation of increasing trend of precipitation in flood season in North China. On this basis, this paper summarizes issues that need to be further studied in this field, such as the unity of initial and final dates of flood season in North China, the physical reason of the attenuation of the interannual oscillation components in the attribution analysis of interdecadal decrease of precipitation in flood season in North China, the reason for the stagnation of interdecadal variation trend of precipitation in flood season in North China, and the time of precipitation recovery and increase in flood season in North China.

precipitation in flood season; North China; long-term variation; research progress

doi: 10. 13878/j.cnki.dqkxxb.20211017007

(责任编辑: 张福颖)