

郝立生,崔童,马宁,等,2024.一种华北夏季潜势雨季监测方法[J].气象,50(6):746-755. Hao L S, Cui T, Ma N, et al, 2024. A method for monitoring summer potential rainy season in North China[J]. Meteor Mon, 50(6):746-755(in Chinese).

# 一种华北夏季潜势雨季监测方法<sup>\*</sup>

郝立生<sup>1</sup> 崔童<sup>2</sup> 马宁<sup>1</sup> 何丽烨<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 天津市气候中心,天津 300074

<sup>2</sup> 国家气候中心,北京 100081

**提 要:** 针对华北夏季雨季监测存在的难题,提出了华北夏季潜势雨季概念,并建立了一种新监测方法——比湿副高法。主要监测结果如下:1961—2022 年平均华北夏季雨季开始日期为 7 月 10 日,结束日期为 8 月 8 日,雨季长度为 28 d;华北雨季起止时间无明显长期变化趋势,但年代际变化明显。该方法监测到的华北夏季雨季降水量、雨季综合强度指数与夏季降水量变化非常一致,为高度正相关,表明监测到的各雨季参数对华北夏季降水变化具有很好的指示性。华北夏季雨季开始、结束伴随着大气环流的明显变化:850 hPa 层东亚副热带夏季风增强与减弱、30°N 以北华北地区大气比湿迅速增大与减小;500 hPa 层高度场在华北地区出现正、负距平中心,西北太平洋副热带高压在东亚沿岸开始明显北抬或东撤;200 hPa 层高空西风急流轴由 37.5°N 附近北移到 41.5°N 附近或由 44.5°N 附近南移到 40.5°N 附近。

**关键词:** 华北,雨季,监测,强度指数,副热带高压

**中图分类号:** P463

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.030401

## A Method for Monitoring Summer Potential Rainy Season in North China

HAO Lisheng<sup>1</sup> CUI Tong<sup>2</sup> MA Ning<sup>1</sup> HE Liye<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Tianjin Climate Centre, Tianjin 300074

<sup>2</sup> National Climate Centre, Beijing 100081

**Abstract:** In view of the difficulties in monitoring summer rainy season in North China, the concept of the summer potential rainy season in North China is proposed, and a new monitoring method, i. e., the specific humidity subtropical high method, is established. The main monitoring results are as follows. The average start date of the summer rainy season in North China from 1961 to 2022 is 10 July, the end date is 8 August, and the rainy season lasts for 28 days. The start and end time of the rainy season in North China has no obvious long-term change trend, but the interdecadal change is significant. The summer rainy season precipitation and the comprehensive intensity index of rainy season monitored by this method in North China are very consistent with the changes in summer precipitation, which is a high positive correlation. This indicates that the monitored rainy season parameters have a good indication of the changes in summer precipitation in North China. The start and end of the summer rainy season in North China are accompanied by significant changes in atmospheric circulation. The East Asian subtropical summer monsoon at 850 hPa strengthens and weakens, and the atmospheric specific humidity in North China north of 30°N rapidly increases and decreases. The 500 hPa height field presents positive and negative anomaly centers in North China, and the Northwest Pacific subtropical high begins to significantly lift northward or retreat eastward along the coast of East Asia. The upper westerly jet axis at 200 hPa moves north from 37.5°N to

<sup>\*</sup> 中国气象局创新发展专项(CXFZ2021J30、CXFZ2022J017)共同资助

2023 年 5 月 11 日收稿; 2024 年 3 月 5 日收修定稿

第一作者:郝立生,主要从事华北旱涝演变机理及预测技术研究. E-mail:hls54515@163.com

41.5°N or south from 44.5°N to 40.5°N.

**Key words:** North China, rainy season, monitoring, intensity index, subtropical high

## 引言

华北地区夏季降水特征比较特殊(郝立生, 2011; 郝立生和侯威, 2018; 郝立生和丁一汇, 2012; 2023), 降水量高度集中在夏季, 占全年的65%以上, 夏季降水量的多少往往决定全年降水量多少; 华北夏季中雨及以上降水过程平均约10 d左右出现一次, 用降水量监测雨季起止时间存在较大困难; 华北夏季降水异常主要是由暴雨、大雨次数多少造成的, 监测预测华北夏季降水变化应重点关注暴雨、大雨发生情况。吴志伟等(2006)对比分析发现, 华南前汛期降水、江淮梅雨和华北雨季存在明显差别。施逸等(2022)分析中国东部不同地区雨季水汽变化, 发现华南前汛期低层水汽主要来自于中国东部和南海, 中高层水汽主要来自印度洋; 江淮梅雨低层水汽主要来源于太平洋, 中高层水汽主要来源于印度洋; 华北雨季低层主要水汽来源于太平洋, 中高层主要水汽来源为欧亚大陆中纬西风通道。可见, 不同地区雨季水汽来源明显不同。还有研究表明, 华北夏季雨季与华西秋雨背景环流明显不同(梅双丽和陈尚锋, 2022)。

由于东亚副热带夏季风和雨季年际变化大, 常常在华北引发严重洪涝和干旱等自然灾害, 对工农业生产、生命财产安全、生态环境建设等带来巨大威胁, 有时会造成严重的损失(黄荣辉等, 2003; 丁一汇等, 2013)。例如河北“63·8”、河南“75·8”、河北“96·8”、北京“7·21”、河南“21·7”、海河流域“23·7”等特大暴雨洪涝灾害, 造成了巨大人员伤亡和财产损失(徐国强和张迎新, 1999; 柳艳菊等, 2015; 苏爱芳等, 2021; 杨浩等, 2022; 汪小康等, 2022; 张芳华等, 2023)。深入认识华北夏季雨季变化规律和科学监测预测雨季变化, 对做好防灾减灾、生产调度、生态建设等都非常重要。

赵汉光(1994)采用旬降水量监测华北雨季, 发现开始、结束日期分别集中在7月中旬左右、8月中旬左右。这种方法在20世纪90年代被应用于国家气候监测业务中(赵振国, 1999)。Samel et al(1999)采

用单站逐日降水量划分雨季, 提高了雨季划分的时间分辨率。虽然该方法比以前方法(赵汉光, 1994; 赵振国, 1999)有所改进, 但在监测华北雨季时常出现相邻站点之间雨季起止时间差别较大的情况。之后, 一些学者对华北夏季降水特征和华北雨季变化开展探索和深入研究(杨修群等, 2005; 张天宇等, 2007; 王遵娅和丁一汇, 2008; 刘海文和丁一汇, 2011; 闵锦忠等, 2016; 郝立生等, 2021; 2023), 尝试改进雨季监测方法。中国气象局(2019)采用单站日降水量结合西太平洋副热带高压(以下简称副高)脊线的方法监测华北雨季, 对雨季监测有了明显改进, 但仍存在相邻单站间雨季起止时间会有较大差别的问题。

随着气候变暖, 华北地区极端洪涝和干旱事件频发, 华北夏季雨季监测研究再次引起关注。于晓澄等(2019)主要依据日降水量监测雨季起止时间, 并将华北雨季典型环流形势作为辅助条件, 结果表明1961—2016年华北雨季开始最早在7月6日, 最晚在8月10日, 1961—2016年华北雨季开始平均日期是7月18日。郝立生等(2021)针对海河流域雨季监测难题, 通过对比分析和合理性分析, 初步提出基于随时间连续变化的气象变量的监测方法——比湿副高法。赵琳等(2022)从环流异常分析了2021年夏季华北雨季偏强的原因。崔童等(2022)采用降水量和副高脊线监测到, 华北平均雨季开始和结束日期分别为7月17日、8月18日, 雨季长度为32.5 d。

由以上可以看出, 不同方法监测得到的结果差别较大, 且大都计算较为复杂, 业务应用不方便。考虑到华北地区降水性质与其他地区明显不同, 如: 长江中下游地区梅雨多为持续性准静止锋降水; 华西秋雨、华南汛期降水等多为连续性降水; 而华北地区夏季降水多为间歇性、对流性降水, 在雨季经常出现连续多日无降水的情况。所以, 采用传统降水量监测华北夏季雨季存在较大困难。本文提出华北夏季潜势雨季概念, 并采用一种基于连续变量的比湿副高法监测华北夏季雨季, 改进以往监测起止时间难以界定和稳定性差的问题, 为华北夏季雨季监测提

供一种新参考方法。

## 1 资料与方法

### 1.1 数据来源

(1)降水量数据。使用国家气象信息中心提供的 1961—2022 年全国华北地区 148 个站逐日降水资料(图 1)。(2)环流数据。使用美国国家环境预报中心和美国国家大气研究中心联合制作的再分析资料(<https://psl.noaa.gov>),水平分辨率  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ (Kalnay et al, 1996),选用时段为 1961—2022 年,要素为 1000~200 hPa 层的位势高度  $H$ 、纬向风  $u$ 、经向风  $v$ 、比湿  $q$  等。(3)地理信息数据。中国国界、河流信息采用国家基础地理信息系统数据(<http://www.tianditu.gov.cn>);海岸线和地形背景采用“自然地球”数据(<https://www.naturalearthdata.com>)。文中地图基于审图号为 GS(2021)5448 号的中国地图制作,底图无修改。

### 1.2 主要方法

#### 1.2.1 华北夏季潜势雨季定义

由于华北夏季降水多为间歇性、对流性降水,时间上不连续。即使在雨季,也经常间隔很多天无降水过程,中雨及以上降水过程平均每 10 天左右出现一次(郝立生等,2021)。对于华北雨季,用日降水量

监测存在较大困难,相邻站点监测结果往往存在较大差别,造成起止时间有时难以准确界定、监测结果不稳定。

华北雨季与其他季节降水最大的不同就是大气环流发生了明显改变(闵锦忠等,2016;Liu et al, 2019;郝立生等,2021;Zhou and Li, 2022)。进入夏季,当湿度达到阈值以上、副高脊线越过  $35^{\circ}\text{N}$ ,潜势雨季开始。这时大环流背景有利于降水,但不是每天都出现降水,因为还缺乏动力上升扰动条件和水汽输送加强条件。在潜势雨季里,当出现局部扰动产生上升运动和水汽输送加强时,容易产生降水过程。在潜势雨季之外,即使出现局部扰动产生上升运动和水汽输送,也不像在潜势雨季里那样容易产生降水过程。因此,本文将华北夏季雨季特有的大范围环流形势维持的时间段定义为潜势雨季。

#### 1.2.2 华北夏季潜势雨季监测方法——比湿副高法(简称 QH)

通过前期对各种雨季监测要素的比较分析(闵锦忠等,2016;郝立生等,2021),发现比湿副高法较为合理,本文进行进一步改进——采用 850 hPa 层的比湿和 500 hPa 层副高脊线监测华北夏季雨季开始、结束日期和雨季长度。相比于用日降水量的监测方法,逐日比湿、高度随时间变化是连续的,监测起来更加方便。该方法适合作华北夏季潜势雨季实时监测,如结合动力模式预报产品,也可作华北夏季雨季起止时间预测。监测时,对 850 hPa 层比湿和 500 hPa 层副高脊线,分别取  $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 584 dagpm,作为监测雨季起止时间的阈值。

数据处理和指标建立分两步:

(1)计算 850 hPa 层比湿在华北区域( $35^{\circ} \sim 42.5^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ} \sim 120^{\circ}\text{E}$ )的平均值  $Q_{\text{ave}}$  和 500 hPa 层位势高度沿  $35^{\circ}\text{N}$  在  $110^{\circ} \sim 150^{\circ}\text{E}$  范围的平均值  $H_{\text{ave}}$ (Liu et al, 2019;郝立生等,2021),并进行 5 d 中心滑动平均处理。

(2)定义雨季指标。

①雨季开始日。首先在 6 月 1 日至 8 月 31 日,当某日比湿  $Q_{\text{ave}} \geq 10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  且持续 5 d,则该日定义为雨季开始参考日 start1;在 6 月 1 日至 8 月 31 日期间,当某日位势高度  $H_{\text{ave}} \geq 584 \text{ dagpm}$  且持续 5 d,则该日定义为雨季开始参考日 start2;将参考日 start1 和 start2 二者出现较晚的日期定义为雨季开始日。

②雨季结束日。从雨季开始日期至 9 月 30 日,

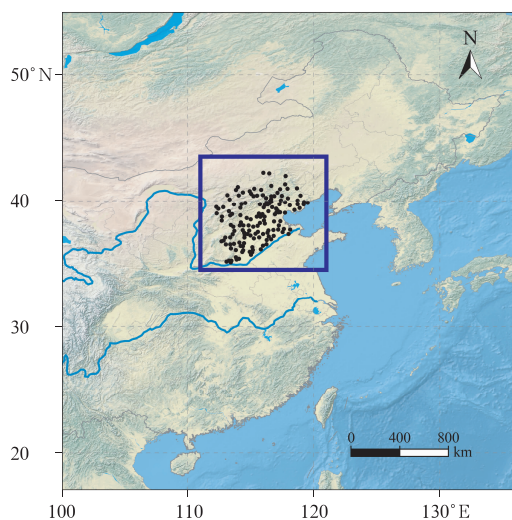


图 1 华北地区位置(蓝色框)及站点分布  
Fig. 1 Location of North China (blue box)  
with weather stations

当某日比湿  $Q_{ave} \leq 10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  且持续 5 d, 则该日定义为雨季结束参考日 end1; 从雨季开始日期至 9 月 30 日, 当某日位势高度  $H_{ave} < 584 \text{ dagpm}$  且持续 5 d, 则该日定义为雨季结束参考日 end2; 将参考日 end1 和 end2 二者出现较早的日期定义为雨季结束日。

③雨季长度。将雨季开始日和结束日之间的天数定义为雨季长度。

④雨季降水总量。将雨季开始日与结束日之间累计降水量称为雨季降水总量。

⑤雨季平均降水强度。将雨季降水总量除以雨季天数得到雨季平均降水强度。

⑥雨季综合强度指数  $M$ 。参考气象行业标准

QX/T495—2019(中国气象局, 2019), 采用如下公式计算:

$$M = \frac{L}{L_0} + 0.5 \times \frac{R/L}{R_0/L_0} + \frac{R}{R_0} - 2.5$$

式中:  $L$  为某一年雨季的长度(天数),  $L_0$  为历年雨季的平均长度,  $R$  为某一年雨季总降水量,  $R_0$  为历年雨季总降水量平均值,  $R/L$  为雨季内平均日降水强度,  $R_0/L_0$  为历年雨季平均日降水强度平均值。根据  $M$  划分雨季强度等级, 见表 1。

此外, 还用到相关分析、合成分析等方法。本文所用气候值指 1991—2020 年平均值。相关显著性采用  $t$  检验方法。

表 1 雨季强度指数  $M$  的等级划分

Table 1 Classification of rainy season intensity index  $M$

等级	弱	偏弱	正常	偏强	强
$M$ 界值	$(-\infty, -1.250]$	$(-1.250, -0.375]$	$(-0.375, 0.375)$	$[0.375, 1.250)$	$[1.250, +\infty)$

2 监测结果分析

2.1 华北夏季雨季气候特征

华北年降水量气候平均为 516.8 mm, 其中春、夏、秋、冬四季降水量分别为 73.8、334.6、96.5、11.9 mm, 夏季(6—8 月)降水量占全年总量的 65%。全年平均降水日数为 71 d, 夏季降水日数平均为 32 d。在夏季, 小雨、中雨、大雨、暴雨日数分别约为 22.8、5.6、2.7、1.2 d。可以看到, 中雨及以上降水过程平均 10 d 左右出现一次, 中间常常连续多日无降水, 所以用日降水量监测雨季存在较大困难。

在夏季, 小雨、中雨、大雨、暴雨降水量分别为 60.3、90.4、93.2、90.7 mm, 分别占夏季降水总量的 18.0%、27.0%、27.9%、27.1%。暴雨变化的方差占夏季降水方差的 57%, 所以, 夏季降水量的变化主要受暴雨量变化的影响。

图 2 是 1961—2022 年华北逐日降水量多年平均值和监测到的夏季潜势雨季起止日期变化。可以看到, 华北全年降水量高度集中在夏季的 6—8 月, 日降水量从 6 月中旬开始迅速增大, 8 月中旬开始迅速减小, 雨季主要出现在 6—8 月(图 2a)。1961—2022 年雨季监测结果(图 2b), 雨季开始时间最早为 6 月 25 日(1963 年、1978 年)、最晚为 7 月 28 日(1982 年); 雨季结束时间最早为 7 月 31 日

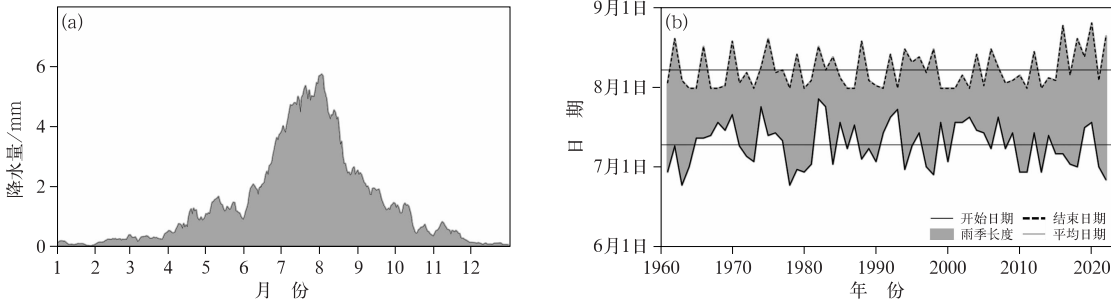


图 2 1961—2022 年华北(a)多年平均的逐日降水量变化(11 d 滑动平均)和(b)雨季起止时间  
Fig. 2 (a) Variation of multi-year average daily precipitation variation (11 d moving averaged) and  
(b) the start and end dates of rainy season in North China from 1961 to 2022

(1964 年、1968 年、2000 年)、最晚为 8 月 25 日(2020 年)。多年平均的雨季开始日期为 7 月 10 日,结束日期为 8 月 8 日,雨季长度为 28 d。

## 2.2 以往雨季监测方法存在的不足

依照现行的行业标准判定华北雨季开始日期时,在某些降水稀少的年份,降水量或者累计站点比例无法满足阈值标准,即使使用标准中“雨季的特殊情况”(降低了对降水量的标准)也无法判定开始日期。

例如京津冀地区,2014 年和 2022 年是典型的华北降水异常相反年(图略)。其中 2014 年为“南涝北旱”,6 月下旬至 8 月整体降水偏少,特别是华北东部,7 月 1—3 日出现一次小到中雨量级的降水过程,此后近一个月内无有效降水,区域内逐日降水量总体低于常年平均,直到 8 月 4 日再次出现小到中雨。从 7 月起,京津冀地区降水持续偏少,不能达到雨季开始的站点比例阈值(70%),所以 2014 年定义为空雨季。再看反例,2022 年盛夏为华北地区多雨年(章大全等, 2023),降水异常分布为典型的“北涝南旱”,从 6 月 27 日开始到 7 月 6 日持续有小到中雨的降水过程,7 月 10 日和 12 日又再次出现中雨量级降水。依现行标准,从 7 月 13 日开始,京津冀地区达到开始标准的站点累计超过 70%,才判定当日为开始日期,比实际开始日期明显滞后。如果采用华北夏季潜势雨季监测方法,则 2014 年潜势雨季起止时间分别为 7 月 14 日、8 月 5 日,雨季长度 22 d,夏季雨季明显偏短、偏弱,与实际情况比较相符;2022 年潜势雨季起止时间分别为 6 月 27 日、8 月 21 日,雨季长度 55 d,夏季雨季明显偏长、偏强,

与实际情况也比较相符。

通过举例对比 2014 年和 2022 年,表明现行华北雨季判定标准存在一定的缺陷,也反映出华北地区雨季判定的难点:一方面对降水稀少的非典型年开始日期的判定显得有些“力不从心”,不能精准表述降水偏多的时段,即雨季时段;另一方面,对其余的年份开始日期的判定,一般是某日降水量达标后才算当日为开始日,实际情况是前期已经出现不少降水,造成监测到的雨季开始日期比实际开始日期偏晚,这也是一个值得进一步研究改进的问题。

## 2.3 华北夏季潜势雨季监测结果

图 3 是 1961—2022 年华北潜势雨季和夏季降水量变化及对应的潜势雨季综合强度变化,均进行了 3 年滑动平均处理。可以看到,雨季降水量占整个夏季降水量的 47%。监测到的雨季降水量与夏季降水量变化非常一致(图 3a),相关系数达 0.68,为高度相关。监测到的雨季综合强度指数与夏季降水量变化也非常一致(图 3b),相关系数达 0.61,为高度相关。用 3 年滑动平均数据计算得到相关系数更大,分别为 0.73 和 0.71。这表明,华北夏季潜势雨季监测方法监测到的雨季降水量和雨季强度均能代表华北夏季降水强弱的变化情况。另外,华北夏季降水量与雨季开始日期呈显著负相关、与结束日期呈明显正相关、与雨季长度呈显著正相关(表 2),即雨季开始早、结束晚、雨季时间长,则对应华北夏季降水量偏多。可见,该方法监测到的雨季各参数对华北夏季降水强弱具有很好的代表性。

监测结果还表明,2000 年以来,华北夏季雨季降水量逐渐增加,雨季强度也在逐渐加强,与华北夏季

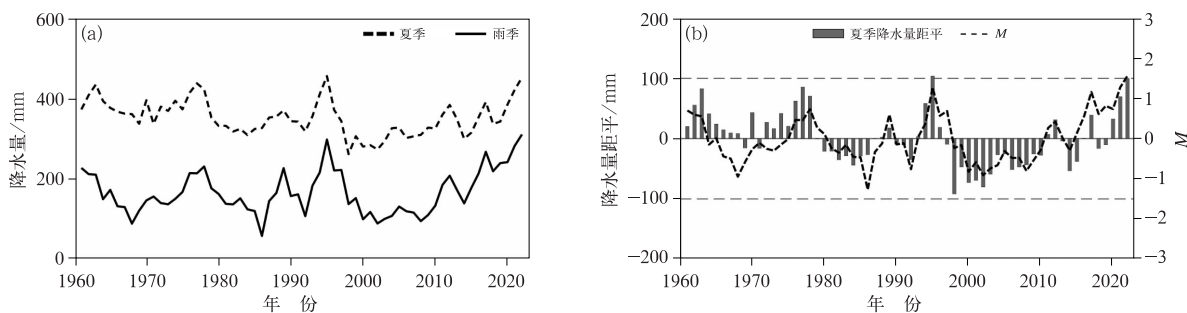


图 3 3 年滑动平均的 1961—2022 年华北(a)潜势雨季与夏季降水量变化,  
(b)雨季综合强度指数与夏季降水量距平变化

Fig. 3 Variations of the 3-year moving averaged (a) precipitation in potential rainy season and in summer, (b) combined rainy season intensity index and summer precipitation anomaly in North China from 1961 to 2022



表 2 华北夏季降水量与潜势雨季监测指数的相关系数

Table 2 Correlation coefficient between summer precipitation and potential rainy season monitoring index in North China

指数	雨季开始时间	雨季结束时间	雨季长度	雨季降水量	雨季强度 $M$
相关系数	-0.31 **	0.22 *	0.39 **	0.68 **	0.61 **

注：\*\*和\*分别通过了0.05和0.10显著性水平检验。

降水量 2000 年以来的变化有很好的对应关系。

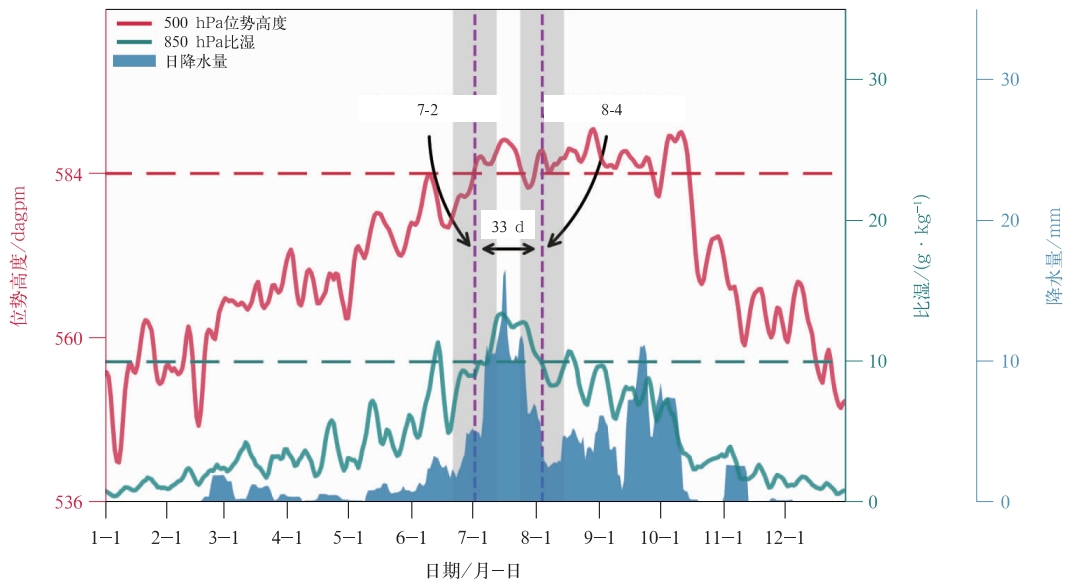
2021 年夏季降水比较特殊(赵俊虎等,2022),出现了夏季、秋季雨季相连的情况,为此选用该年检验华北夏季潜势雨季监测方法的合理性。图 4 是 2021 年雨季实际监测情况。为便于作对比分析,图中叠加了逐日降水量曲线。由图可见,监测到的华北夏季潜势雨季与夏季降水集中时段非常一致,监测结果是夏季雨季 7 月 2 日开始、8 月 4 日结束。后期由于副高一直未彻底南退,造成后期的秋季雨季偏强,且与夏季雨季间隔时间不长,整个雨季持续到 10 月。尽管夏季、秋季雨季几乎相连,但秋季雨季与夏季雨季环流形势是明显不同的。在夏季雨季,大气水汽含量明显偏多,副高位置偏北;而秋季雨季,大气水汽含量已明显减少,降水主要是由于大气动力条件有利和其他异常的水汽输送加强造成

的。原有标准使用日降水量监测雨季时,无法区分出夏季雨季和秋季雨季。这里的结果进一步验证了华北潜势雨季监测方法的可用性和合理性。

2.4 雨季对应的主要环流特征

华北夏季雨季期间,大气动力环流形势和水汽分布形势均有利于降水的发生,所以雨季开始、结束必然伴随大气环流的明显变化。图 5 是气候平均的华北夏季雨季开始前后、雨季结束前后各 5 d 平均的环流场变化。具体计算方法是,比如某年雨季是 7 月 10 日开始,则开始前后的环流变化就是 11—15 日的平均场减去 5—9 日的平均场,雨季结束前后的环流对比也同样。

在 850 hPa 层,华北夏季潜势雨季开始时(图 5a), 30°N 以北比湿迅速增大;菲律宾附近为气旋型环流



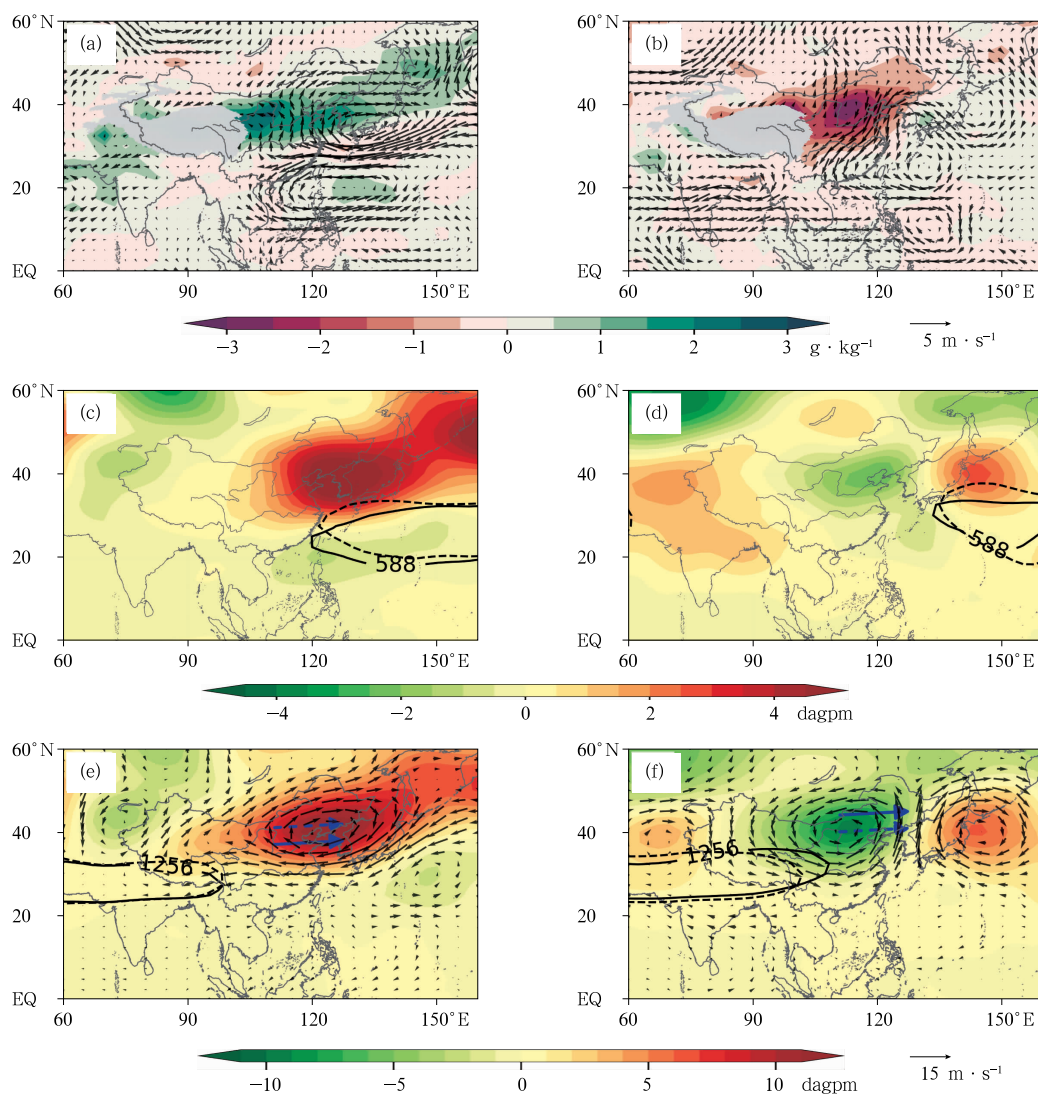
注:比湿和位势高度为 5 d 滑动平均,降水量为 11 d 滑动平均;青色、红色横虚线分别为监测要素(比湿、位势高度)阈值线;紫色竖虚线是监测到的雨季起止日期。

图 4 2021 年华北夏季潜势雨季监测结果:区域平均的 850 hPa 层比湿, 500 hPa 层 35°N、110°~150°E 平均位势高度和日降水量

Fig. 4 Monitoring results of summer potential rainy season in North China in 2021: specific humidity (5 d moving averaged) at 850 hPa averaged over North China, geopotential height (5 d moving averaged) at 500 hPa averaged at 35°N, 110°—150°E, and daily precipitation (11 d moving averaged)

异常,朝鲜半岛附近为反气旋型环流异常,东亚副热带地区为明显偏南风异常,长江及以南地区为偏东风异常。表明华北夏季潜势雨季开始时,东亚热带夏季风开始减弱,而东亚副热带夏季风开始增强,华北东南风至偏南风水汽输送加强,华北地区大气水汽含量迅速增加。雨季结束时(图 5b), $30^{\circ}\text{N}$  以北

比湿迅速减小;原来位于朝鲜半岛的反气旋性环流东移到日本以东海上,且强度减弱;原来位于菲律宾的气旋性环流已移到东北方向,且强度明显减弱。东亚出现明显的东北风异常,北半球热带出现明显的偏东风异常。这表明雨季结束时,东亚副热带夏季风、印度夏季风明显减弱,且异常风向明显反转,



注:图 c、d 中,黑色实(虚)等值线示意雨季开始前(后)的副高位置,图 e、f 中,黑色实(虚)等值线、蓝色实(虚)粗箭头线分别示意雨季开始前(后)的南亚高压位置、高空急流轴变化。

图 5 1991—2020 年华北夏季潜势雨季(a、c、e)开始前后、(b、d、f)结束前后各 5 d 平均的环流场变化  
(a、b)850 hPa 比湿场异常(填色)和水平风场异常(风矢),(c、d)500 hPa 位势高度场异常(填色),  
(e、f)200 hPa 位势高度场异常(填色)和水平风场异常(风矢)

Fig. 5 Climatologically averaged changes of the circulation fields for 5 days before and after (a, c, e) the start date and (b, d, f) the end date of the summer potential rainy season in North China from 1991 to 2020  
(a, b) specific humidity anomaly (colored) and horizontal wind anomaly (wind vector) at 850 hPa,  
(c, d) geopotential height anomaly (colored) at 500 hPa, (e, f) geopotential height anomaly  
(colored) and horizontal wind anomaly (wind vector) at 200 hPa

华北地区大气水汽含量迅速减小。

在 500 hPa 层,华北夏季潜势雨季开始时(图 5c),高度场在朝鲜半岛附近出现明显的正距平中心,副高明显北抬,强度和东西向变化不明显。雨季结束时(图 5d),华北地区出现明显的负距平中心,日本以东出现明显正距平中心,副高明显东退。可以看出,当朝鲜半岛出现明显的正距平中心,副高开始明显北抬,华北夏季潜势雨季开始;之后,副高缓慢东移,华北逐渐出现负距平中心,日本以东出现正距平中心,当副高突然东撤,则华北雨季结束。

在 200 hPa 层,华北夏季潜势雨季开始时(图 5e),高度场也是在朝鲜半岛附近出现明显的正距平中心,使得高空出现反气旋性异常风场环流,即高空维持为辐散环流,长江流域出现东风异常,华北北侧出现西风异常,表明高空西风急流明显北移,急流轴突然由  $37.5^{\circ}\text{N}$  北移到  $41.5^{\circ}\text{N}$ ,南亚高压略有北抬。雨季结束时(图 5f),华北地区出现明显的负距平中心,日本以东出现明显正距平中心,南亚高压明显西退,造成华北上空出现气旋性环流异常,即华北上空出现辐合环流。这时,长江流域上空出现偏西风异常,华北北侧出现东风异常,表明高空西风急流明显南移,急流轴突然由北纬  $44.5^{\circ}\text{N}$  南移到  $40.5^{\circ}\text{N}$ ,朝鲜半岛附近出现明显的偏南风异常。

### 3 结论与讨论

由于华北夏季降水多为间歇性、对流性降水,时间上常常不连续。即使在雨季,也经常间隔很多天无降水过程,中雨及以上降水过程平均每 10 天左右出现 1 次。所以,用日降水量监测华北雨季存在较大困难,相邻站点监测结果往往差别较大,造成区域雨季起止时间有时难以准确界定、监测结果不稳定。因此,本文提出了华北夏季潜势雨季概念,并建立了潜势雨季监测新方法——比湿副高法。

监测结果表明,1961—2022 年华北夏季潜势雨季平均开始日期为 7 月 10 日,结束日期为 8 月 8 日,雨季长度为 28 d。华北雨季起止时间无明显长期变化趋势,但年代际变化明显,进入 21 世纪以来雨季逐渐变长。该方法监测到的华北夏季雨季降水量、雨季综合强度指数与夏季降水量变化非常一致,为高度相关,说明其监测到的华北雨季各参数对华

北夏季降水强弱具有很好的指示性。

华北夏季潜势雨季期间,大气动力环流形势和水汽分布形势均有利于降水的发生,所以雨季开始、结束必然伴随大气环流的明显变化。华北夏季雨季开始时,850 hPa 层东亚热带夏季风开始减弱,而东亚副热带夏季风明显增强,华北东南风至偏南风水汽输送加强, $30^{\circ}\text{N}$  以北华北地区大气比湿迅速增大;500 hPa 层高度场在朝鲜半岛出现明显的正距平中心,副高在东亚沿岸开始明显北抬;200 hPa 层高度场在朝鲜半岛附近也出现明显的正距平中心,使得高空出现反气旋性异常风场环流,即高空维持为辐散环流,高空西风急流轴由  $37.5^{\circ}\text{N}$  附近北移到  $41.5^{\circ}\text{N}$  附近。雨季结束时,850 hPa 层东亚出现明显的东北风异常,北半球热带地区出现明显的偏东风异常,华北地区大气水汽比湿迅速减小;500 hPa 层华北地区出现明显负距平中心,副高出现突然东撤;200 hPa 层高度场在华北地区出现明显的负距平中心,使得华北上空出现气旋性环流异常,即华北上空出现辐合环流,高空西风急流由  $44.5^{\circ}\text{N}$  附近南移到  $40.5^{\circ}\text{N}$  附近。

### 参考文献

- 崔童,张若楠,郝立生,等,2022. 华北雨季降水年代际变化与水汽输送的联系[J]. 大气科学,46(4):903-920. Cui T, Zhang R N, Hao L S, et al, 2022. Relationship between the interdecadal variation of rainy season precipitation and water vapor transport in North China[J]. Chin J Atmos Sci, 46(4):903-920(in Chinese).
- 丁一汇,朱定真,石曙卫,等,2013. 中国自然灾害要览(上卷)[M]. 北京:北京大学出版社:508. Ding Y H, Zhu D Z, Shi S W, et al, 2013. Natural Disasters in China[M]. Beijing: Peking University Press:508(in Chinese).
- 郝立生,2011. 华北降水时空变化及降水量减少影响因子研究[D]. 南京:南京信息工程大学:148. Hao L S, 2011. Spatial-temporal variation of the precipitation in North China and the impact factors of precipitation reduction[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology:148(in Chinese).
- 郝立生,丁一汇,2012. 华北降水变化研究进展[J]. 地理科学进展,31(5):593-601. Hao L S, Ding Y H, 2012. Progress of precipitation research in North China[J]. Prog Geogr, 31(5):593-601(in Chinese).
- 郝立生,丁一汇,2023. 华北夏季降水异常与华南前汛期降水异常的关系[J]. 高原气象,42(2):272-282. Hao L S, Ding Y H, 2023. Relationship between summer precipitation anomaly in North China and precipitation anomaly in the pre-flood season in South China[J]. Plateau Meteor, 42(2):272-282(in Chinese).



- 郝立生,何丽烨,程善俊,等,2021.海河流域雨季气候特征及监测分析[J].地理科学进展,40(7):1181-1194. Hao L S, He L Y, Cheng S J, et al, 2021. Climatic characteristics and monitoring analysis of rainy season in the Haihe River Basin [J]. Prog Geogr, 40(7):1181-1194(in Chinese).
- 郝立生,何丽烨,马宁,2023.东北冷涡气候特征及其对海河流域夏季降水的影响[J].气象学报,81(4):559-568. Hao L S, He L Y, Ma N, 2023. Climatic characteristics of Northeast cold vortex and its impact on summer precipitation in the Haihe River Basin [J]. Acta Meteor Sin, 81(4):559-568(in Chinese).
- 郝立生,侯威,2018.华北夏季降水变化及预测技术研究[M].北京:气象出版社,201. Hao L S, Hou W, 2018. Study on Summer Precipitation Change and Prediction Technology in North China [M]. Beijing: China Meteorological Press, 201(in Chinese).
- 黄荣辉,陈际龙,周连童,等,2003.关于中国重大气候灾害与东亚气候系统之间关系的研究[J].大气科学,27(4):770-787. Huang R H, Chen J L, Zhou L T, et al, 2003. Studies on the relationship between the severe climatic disasters in China and the East Asia climate system [J]. Chin J Atmos Sci, 27(4):770-787 (in Chinese).
- 刘海文,丁一汇,2011.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, 2011. Analysis 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).
- 柳艳菊,丁一汇,张颖娴,等,2015.季风暖湿输送带与北方冷空气对“7·21”暴雨的作用[J].热带气象学报,31(6):721-732. Liu Y J, Ding Y H, Zhang Y X, et al, 2015. Role of a warm and wet transport belt of Asian summer monsoon and cold air from north in the Beijing July 21 heavy rainstorm [J]. J Trop Meteor, 31(6):721-732(in Chinese).
- 梅双丽,陈尚锋,2022.华西秋雨变异特征及其成因分析[J].高原气象,41(6):1492-1500. Mei S L, Chen S F, 2022. Variation characteristics causes of autumn rain in western China [J]. Plateau Meteor, 41(6):1492-1500(in Chinese).
- 闵锦忠,赵悦晨,郝立生,2016.华北雨季监测及对应环流变化特征[J].干旱区地理,39(3):539-547. Min J Z, Zhao Y C, Hao L S, 2016. Monitoring of rainy season and characteristics of corresponding circulation changes in North China [J]. Arid Land Geogr, 39(3):539-547(in Chinese).
- 施逸,江志红,李肇新,2022.基于拉格朗日方法的中国东部雨季水汽输送垂直特征[J].大气科学,46(2):380-392. Shi Y, Jiang Z H, Li Z X, 2022. Vertical characteristics of water vapor transport during the rainy season in eastern China based on the Lagrangian method [J]. Chin J Atmos Sci, 46(2):380-392(in Chinese).
- 苏爱芳,吕晓娜,崔丽曼,等,2021.郑州“7·20”极端暴雨天气的基本观测分析[J].暴雨灾害,40(5):445-454. Su A F, Lü X N, Cui L M, et al, 2021. The basic observational analysis of “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou [J]. Torr Rain Dis, 40(5):445-454(in Chinese).
- 汪小康,崔春光,王婧羽,等,2022.“21·7”河南特大暴雨水汽和急流特征诊断分析[J].气象,48(5):533-544. Wang X K, Cui C G, Wang J Y, et al, 2022. Diagnostic analysis on water vapor and jet characteristics of the July 2021 severe torrential rain in Henan Province [J]. Meteor Mon, 48(5):533-544(in Chinese).
- 王遵娅,丁一汇,2008.中国雨季的气候学特征[J].大气科学,32(1):1-13. Wang Z Y, Ding Y H, 2008. Climatic characteristics of rainy seasons in China [J]. Chin J Atmos Sci, 32(1):1-13(in Chinese).
- 吴志伟,江志红,何金海,2006.近50年华南前汛期降水、江淮梅雨和华北雨季旱涝特征对比分析[J].大气科学,30(3):391-401. Wu Z W, Jiang Z H, He J H, 2006. The comparison analysis of flood and drought features among the first flood period in South China, Meiyu period in the Yangtze River and the Huaihe River valleys and rainy season in North China in the last 50 years [J]. Chin J Atmos Sci, 30(3):391-401(in Chinese).
- 徐国强,张迎新,1999.“96·8”暴雨的水汽来源及对水汽敏感性的模拟分析[J].气象,25(7):12-16. Xu G Q, Zhang Y X, 1999. The heavy rain's vapor sources and vapor sensitivity simulation in August 1996 [J]. Meteor Mon, 25(7):12-16(in Chinese).
- 杨浩,周文,汪小康,等,2022.“21·7”河南特大暴雨降水特征及极端性分析[J].气象,48(5):571-579. Yang H, Zhou W, Wang X K, et al, 2022. Analysis on extremity and characteristics of the “21·7” severe torrential rain in Henan Province [J]. Meteor Mon, 48(5):571-579(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).
- 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(in Chinese).
- 章大全,袁媛,韩荣青,2023.2022年夏季我国气候异常特征及成因分析[J].气象,49(1):110-121. Zhang D Q, Yuan Y, Han R Q, 2023. Characteristics and possible causes of the climate anomalies over China in summer 2022 [J]. Meteor Mon, 49(1):110-121(in Chinese).
- 张芳华,杨舒楠,胡艺,等,2023.“23·7”华北特大暴雨过程的水汽特征[J].气象,49(12):1421-1434. Zhang F H, Yang S N, Hu Y, et al, 2023. Water vapor characteristics of the July 2023 severe torrential rain in North China [J]. Meteor Mon, 49(12):1421-1434(in Chinese).

- 张天宇,程炳岩,王记芳,等,2007. 华北雨季降水集中度和集中期的时空变化特征[J]. 高原气象,26(4):843-853. Zhang T Y, Cheng B Y, Wang J F, et al, 2007. Temporal and spatial change characteristics of precipitation-concentration degree(PCD) and precipitation-concentration period (PCP) over North China in rainy reason[J]. Plateau Meteor, 26(4):843-853(in Chinese).
- 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).
- 赵俊虎,陈丽娟,章大全,2022. 2021年夏季我国气候异常特征及成因分析[J]. 气象,48(1):107-121. Zhao J H, Chen L J, Zhang D Q, 2022. Characteristics and causes for the climate anomalies over China in summer 2021[J]. Meteor Mon, 48(1):107-121(in Chinese).
- 赵琳,孙林海,竺夏英,等,2022. 2021年华北雨季气候特征及华北降水偏多成因初探[J]. 气象与环境科学,45(2):20-26. Zhao L, Sun L H, Zhu X Y, et al, 2022. Climate characteristics of rainy season and causes for more precipitation in North China in 2021[J]. Meteor Environ Sci, 45(2):20-26(in Chinese).
- 赵振国,1999. 中国夏季旱涝及环境场[M]. 北京:气象出版社:13-16. Zhao Z G, 1999. The Drought and Flood of China in Summer and Its Environmental Field [M]. Beijing: China Meteorological Press:13-16(in Chinese).
- 中国气象局,2019. 中国雨季监测指标 华北雨季:QX/T 495—2019[S]. 北京:气象出版社. China Meteorological Administration, 2019. Monitoring indices of rainy season in China-Rainy season in North China:QX/T 495—2019[S]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. Bull Amer Meteor Soc, 77(3):437-472.
- Liu Y Y, Liang P, Sun Y, 2019. The Asian Summer Monsoon: Characteristics, Variability, Teleconnections and Projection [M]. Cambridge:Elsevier, 237.
- Samel A N, Wang W C, Liang X Z, 1999. The monsoon rainband over China and relationships with the Eurasian circulation[J]. J Climate, 12(1):115-131.
- Zhou P H, Li X Z, 2022. Comparison of intraseasonal variation of the meridional displacement of the western North Pacific subtropical high in early and late summer[J]. J Climate, 35(19):6361-6379.

(本文责编:戴洋)