

# 近 140 年芜湖地区降水量年代际变化特征

刘 蕾<sup>1</sup>, 高 辉<sup>2</sup>, 张 丽<sup>1</sup>, 王亚玲<sup>1</sup>, 付 伟<sup>1</sup>

(1.芜湖市气象局, 安徽 芜湖 241000; 2.中国人民解放军 93117 部队, 南京 210018)

**摘 要:**近百年以来,全球气候发生了明显的年代际变化,探讨长江中下游地区代表站的百年降水变迁具有十分重要的意义。利用近 140 年芜湖市气象观测数据和最新发布的 CRU 降水资料,订正构建了 1880—2019 年芜湖市月降水量序列,并通过气候趋势、小波分析、MK 检验、累积距平等方法分析了芜湖市百年降水变化特征。结果表明:近一个半世纪来芜湖市降水量呈现干、湿交替的分布。芜湖市年降水量存在 40 a, 10 a, 5 a 的周期,且呈微弱的增加趋势;春季降水量还存在 80 年的长周期变化,总体呈现减弱趋势;夏季降水量周期也与年降水量一致,增加趋势最为显著,对年降水量的增加贡献最大;秋、冬季降水量增加趋势并不显著,其周期变化也与春、夏季有所不同。19 世纪 90 年代芜湖市各季降水量一致性偏少,20 世纪初—1920 年则异常偏多,这种各季变化高度一致性在百年芜湖市降水变化中非常罕见。1940 年之后,各季节的年代际分布差异性逐渐增大,特别是近 20 年来各季降水量变化趋势的差异更为显著,冬季降水量在 1997 年以后呈明显上升趋势,春季降水量减弱趋势主要集中在 2002 年之后,秋季降水量则自 2011 年以后增加显著。

**关键词:**年代际特征;干湿交替;小波分析;M-K 检验

中图分类号:P467

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)05-0114-07

## Interdecadal Variability of Precipitation in Wuhu in Last 140 Years

LIU Lei<sup>1</sup>, GAO Hui<sup>2</sup>, ZHANG Li<sup>1</sup>, WANG Yaling<sup>1</sup>, FU Wei<sup>1</sup>

(1.Wuhu Meteorological Bureau, Wuhu, Anhui 241000, China; 2.Troops 93117 of PLA, Nanjing 210018, China)

**Abstract:** Global climate has significantly decadal change in the past century. Discussion on precipitation change of representative station in Middle and Lower Reaches of Yangtze River is meaningful. Based on precipitation observation data of Wuhu in last 140 years and CRU precipitation dataset, monthly precipitation series from 1880 to 2019 in Wuhu were corrected and constructed. Characteristics of precipitation series were analyzed through climate tendency, wavelet analysis, MK method and accumulative anomaly. The precipitation showed an alternate drying-wetting feature during the last one and a half centuries in Wuhu. Annual precipitation had quasi-forty, quasi-ten and quasi-five year periods and exhibited a weak increasing tendency in Wuhu. Spring precipitation had eighty-year period and displayed a decreasing trend. The period of summer precipitation was consistent with that of annual precipitation. Meanwhile, summer precipitation increased significantly and contributed most to annual precipitation. Autumn and winter precipitation showed no notable increasing tendency and their periods were different from those of spring and summer precipitation. Seasonal precipitation showed uniform less in the 1890s and abnormal more in 1900s and 1910s. It was very rare that seasonal precipitation changes were completely consistent from 1890s to 1910s. The decadal variation differences between the seasonal precipitation increased gradually after 1940s, especially in last twenty years. Winter precipitation showed the significantly increasing trend after 1997, while spring precipitation displayed the decreasing tendency after 2002 and autumn precipitation had increased obviously since 2011.

**Keywords:** decadal variation; dry-wet cycle; wavelet analysis; M-K method

随着全球变暖速度的加快,近 100 年来全球范围内气温、降水都存在明显的年代际改变,已经引起很多学者的关注<sup>[1-3]</sup>。长序列降水资料是近百年来气候变化研究的基础<sup>[4]</sup>,但我国大部分连续观测资料都是解放后开始的,因此解放前的资料主要是基于多种数据源的重建资料。例如,王绍武<sup>[5]</sup>利用史料、树木年轮等代用资料重建了 1880—1996 年中国气温和降水序列;杨溯等<sup>[6]</sup>收集全球 12 个数据源降水历史月值资料,通过多种统计方法整理出全球降水历史月值数据集;李庆祥等<sup>[7]</sup>基于不同分辨率网格数据集,建立了 110 年中国降水变化序列,并指出全国年降水量变化略呈下降趋势。

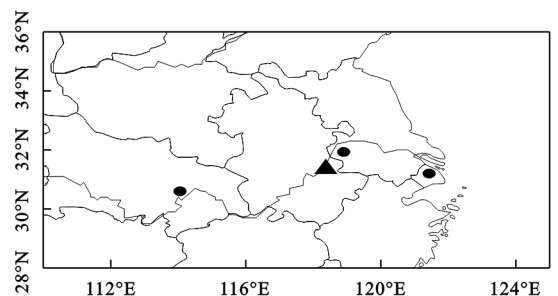
近百年来降水变化存在明显的区域特征<sup>[8]</sup>。海英和高志强<sup>[9]</sup>利用 CRU05 资料研究中国的气候变化,发现除了秦淮以南亚热带地区气候变得的冷湿,其他地区气候向湿热方向发展。近百年来华北以及华南的降水发生了 4 次年代际尺度的跃变,长江中下游降水发生了 5 次年代际尺度的跃变<sup>[10]</sup>。在夏季,我国东部夏季降水百年来年代际变化特征显著,空间场上以偶极型和三级型的分布特征为主<sup>[11-12]</sup>。针对长江中下游不同地区的百年降水研究也较多,近 120 年来浙江省年降水量无明显的线性变化趋势,存在 56 a 和 35 a 两个周期<sup>[13]</sup>,上海地区夏季降水在过去 100 多年里存在 3 个多雨湿润期和 3 个少雨偏干期<sup>[14]</sup>;近百年来武汉地区汛期降水有明显的阶段性和跃变性,旱涝灾害频繁发生<sup>[15]</sup>。近百年来的降水变化与太阳活动、火山爆发、大尺度的海洋变率密切相关<sup>[16]</sup>。

可以看出,许多学者对近百年长江中下游地区年降水、夏季降水的分布特征进行了多角度分析,但是对近百年四季降水量的分析及不同季节的变化突变、周期的差异性研究较少。另外,很多研究是基于再分析资料,且研究范围较广,无法细致的描述安徽沿江地区百年降水的变化特征。中国具有长达百年气象观测的站少之又少,特别是长江中下游地区,仅有武汉、芜湖、南京、上海徐家汇 4 个站自 19 世纪末起开始进行气象观测且资料序列较长(图 1)。芜湖作为中国 12 个百年气象台站之一,自 1880 年起就有了降水观测,资料十分可贵,利用实测的数据进行分析,能更真实的展示出长江中下游地区、特别是安徽沿江地区百年降水变化。

## 1 数据源与方法

1880 年 3 月芜湖海关开始气象观测,资料持续到 1937 年 11 月。1937 年 12 月 10 日,日军轰炸芜湖后,芜湖沦陷。自此,长达 58 a 的气象观测被迫中断,直至解

放后才逐渐恢复气象观测。故本文数据来源于三处:1880 年 3 月—1937 年 11 月降水资料来源于中国气象局档案馆,该数据摘自海关气象观测的逐月降水统计表;1952—2019 年芜湖市降水资料来源于安徽省气象信息中心;由于 1938—1951 年芜湖市气象观测中断,为了资料的完整性,采用 CRU 再分析降水资料进行检验和替代。CRU 资料整合了若干个数据集,月降水量时间长度为 1901—2019 年,分辨率较高且资料连续,在东亚地区具有较高的可靠性<sup>[17]</sup>。有研究表明,CRU 资料重建的我国年总降水量与全国 160 个站观测数据吻合,部分地区相关系数高达 0.9 以上,中国东部四季降水量和 CRU 重建资料十分一致<sup>[18]</sup>。



注:图中三角形为芜湖站。

图 1 长江中下游地区自 19 世纪末起开始观测的 4 个百年气象站

对得到的 140 年芜湖市降水长序列采用 Morlet 小波分析进行周期检验;另外,采用 Mann-kendall 检验方法和累积距平对全年和各季节降水时间序列进行突变分析。1952—2019 年芜湖市降水资料来源于安徽省气象信息中心,该资料已进行了严格的质量控制,对台站迁移和自动站代替人工站数据均进行了对比观测,数据质量较高,故不再对其进行检验。

1880 年 3 月—1937 年 11 月降水资料由于年份久远,故需要多种资料进行对比。首先参考竺可桢等<sup>[19]</sup>汇编的《中国之雨量》对该资料进行验证,发现两套资料无论在年、月季尺度上相关系数极高,说明这些资料是经过早期气象学者校对的,但部分月份降水仍有异常值存在。先对 1880—1937 年月降水量进行均一性检验并结合 1952—2019 年的台站极值检查,发现异常月份见表 1,对这 7 个奇异值采用如下方法替代:首先计算出该缺测数据前后 10 a 当月平均降水量,再与当月 CRU 资料降水值取平均值,得到的月降水数据能较准确的反映出当月降水的真实变化。

进一步比对 1901—1936 年、1952—2019 年 CRU 和芜湖市测站月、年降水量数据,发现 CRU 重建的芜湖市降水量与月降水量和年降水相关系数均较高,高达 0.8 以上,通过了 99.9% 的信度检验。说明 CRU 可以很好地模拟出芜湖市月降水变化特征,

对年降水的模拟效果也较好。故 1938—1951 年的月降水资料主要参考 CRU 资料,但由于 CRU 资料存在变化振幅小、极值不显著的特征,与实际降水量有一定偏差,因此先对其进行订正再代入使用。具体方法如下:首先以 CRU 资料作为基准,计算出 1938—1951 年各月距平百分率,再分别以同等级的 1880—1937 年、1952—2019 年月降水量的平均值代替。从图 2 可以看出,通过该方法订正后,1938—1951 年降水标准差增加明显,极值更为显著,订正后的降水更符合观测降水的变化。

表 1 月降水奇异值及存在非均一性的原因		
时间	存在非均一性的原因	
1901 年 1 月	异常偏低	
1903 年 12 月	异常偏低	
1905 年 4 月	异常偏高	
1913 年 8 月	异常偏低	
1917 年 4 月	异常偏低	
1928 年 10 月	缺测	
1931 年 10 月	缺测	

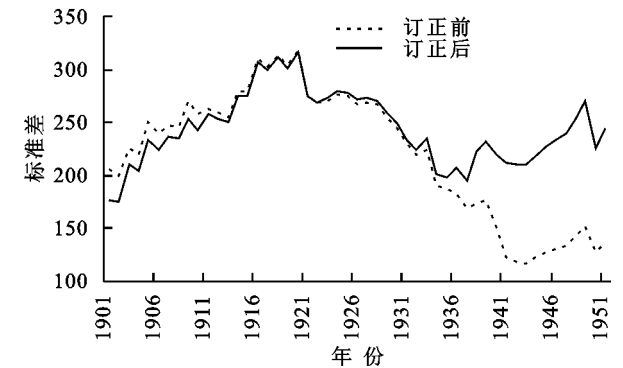


图 2 1901—1951 年降水量订正前后的 13 a 滑动标准差时间序列

## 2 结果与分析

### 2.1 趋势变化

芜湖市 1880—2019 年近 140 年的降水量特征变化见图 3A 所示,年降水量呈现微弱的增加趋势,递增率仅为 2.0 mm/10 a,但芜湖市百年降水有明显的年代际、年际间差异。降水最多的年份为 2016 年(1 984.2 mm),降水最少的年份为 1978 年(564.2 mm),相差 3 倍以上。从 9 点滑动平均的时间序列可以看出,20 世纪初 1905—1920 年降水量异常偏多,其次 20 世纪 50 年代、80 年代—90 年代初期、2010s 年代后期芜湖市均呈现降水量偏多的态势。19 世纪 80 年代后期—90 年代、20 世纪 20—30 年代、60—70 年代降水偏少。近 140 年来,芜湖市年降水量共经历了 4 次偏多—偏少间的年代际转换,因此芜湖市少雨期和多雨期呈现交替分布的格局。

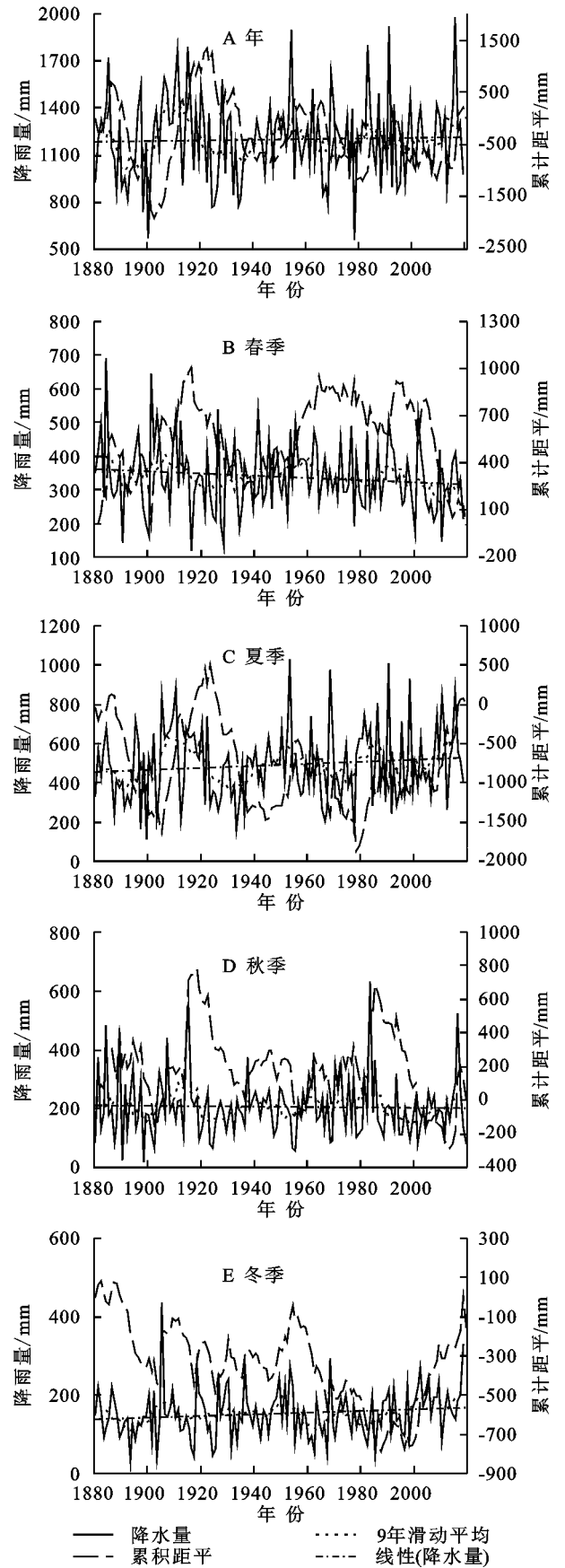


图 3 芜湖市 1880—2019 年降水量时间序列  
芜湖市春季降水量总体呈现较明显的递减的趋势(图 3B),递减率为 3.4 mm/10 a。春季降水异常偏多的

年份主要在1930年之前,最多的年份春季降水量可高达690.9 mm(1885年),该年份春季降水量甚至多于夏季。最低的年份春季降水量仅为119.3 mm(1917年)。20世纪初—1920年、20世纪50年代、90年代春季降水量偏多,19世纪90年代、20世纪20年代、21世纪以来春季降水量偏少。从累积距平变化可以看出,20世纪以来,春季降水量递减速度明显加快,递减率达到39.4 mm/10 a。其中,1880—1940年年际间变化最为剧烈,此时春季出现旱涝的概率最大。

芜湖市夏季降水量是呈明显的增加趋势(图3C),递增率为4.8 mm/10 a,特别是近70 a来,夏季降水的递增速度加快,递增率高达6.7 mm/10 a。累积距平场上也显示自1980年来夏季降水量一直维持正距平增加的趋势。夏季降水量最大值出现在1954年(1 028.1 mm),最小值出现在1900年(115.1 mm)。从9 a滑动平均序列图看出,20世纪初—1920年、20世纪50年代、80年代至今,芜湖市夏季降水量偏多;19世纪90年代、20世纪20—30年代、70年代夏季降水量偏少,夏季降水量也呈现干、湿交替的年代际变化。

芜湖市秋季整体无明显的增加或减少趋势(图3D),秋季最大降水量出现在1983年(629.5 mm),最小降水量出现在1898年,季度降水量仅17.8 mm,属于严重的秋季干旱。秋季降水异常偏多的年份主要在1910年之前和1980年之后,1911—1979年之间秋季降水变化平稳,没有出现明显的极值。20世纪初—1920年、60—80年代,2015年至今,芜湖市秋季降水量偏多;19世纪90年代、20世纪20—30年代、50年代、90年代秋季降水量偏少。

芜湖市冬季降水量为微弱的增加趋势(图3E),递增率为2.2 mm/10 a。冬季最大降水量出现在1905年(436.6 mm),最小降水量出现在1893年(32.8 mm)。芜湖市冬季降水量变化比较平缓,年代际变化较小。20世纪初—1920年、50年代、21世纪以来冬季降水量偏多,20世纪60年代、80年代冬季降水量偏少。但这种年代际变化的变率明显小于夏季和全年降水量。

总体来看,19世纪90年代,除了1895年左右秋季降水偏多,其他各月降水量均为负距平。1900—1920年基本呈现四季一致正距平,异常强降水主要集中在6—9月,对全年降水量增加的贡献最大。20世纪20—30年代则呈现完全相反的趋势,除了个别年份外,3—10月维持持续的负距平,故全年降水量也呈现明显的递减趋势。40年代降水变化平缓;50年代5—7月降水异常偏多,9—11月降水偏少。60年代则与50年代呈现相反的季节分布。70年代9—11月降水偏多,其他月份维持降水负距平。80年代

—90年代初期,夏季降水一直维持正距平,这也与之前的分析一致。2000年左右夏季降水明显偏少,但进入21世纪以来,6—9月的降水量持续增多。芜湖市夏季降水量的变化趋势与全年降水量变化最为一致,两者相关系数高达0.79,说明夏季降水量的年代际变化对全年降水量起决定性作用。

## 2.2 周期变化

图4A中清晰的显示了年降水量小波变换系数的实部的波动特征,具体反映了芜湖市年降水量偏多和偏少交替变换的特性。可以看出,芜湖市年降水量存在40 a、10 a、5 a左右的准周期振荡。从模平方时频分布结果可得:40 a时间尺度的周期振荡最为显著,在这个尺度上共出现了干、湿交替4次,这一点与年降水量序列变化结论一致。1990年之前,年降水量一直存在准10 a的周期,但这种周期在近20 a变得不再显著。5 a左右的周期变化时间较短,且不连续,波动能量集中在1900—1920年,2000—2019年。总体来看,准40 a的周期振荡贯穿整个140年,是影响未来芜湖地区降水量的主要时间尺度。

图4B显示,在整个时间域上芜湖市春季降水量具有80 a尺度的年代际变化周期。另外,芜湖市春季降水也存在在30~40 a的周期变化;1940—1980年存在准20 a周期变化;1880—1940年、1880—2019年为准10 a周期变化。但整体信号强度明显比年降水量弱,这说明春季降水量的周期振荡并不十分显著。其中,10 a时间尺度的周期表现最强,其他长周期波动能量较弱。

从图4C可以看出,夏季降水量的周期变化特征与年降水量十分相似,但周期振荡时段与年降水量有所不同。夏季降水量小波实部等值线在40 a左右的振荡最为明显。除此之外,芜湖市夏降水量一直存在准10 a的周期,但在1880—1940年、1950—1980年波动最为显著。1890—1920年、1970—2019年,芜湖市夏季降水量还存在准5 a的周期变化。但夏季降水量的准10 a、5 a周期的振荡中心与年降水量的振荡中心不同。

由图4D可见,秋季降水量整个周期上存在60 a的年代际变化周期,1960年之前存在30 a的周期,这两个周期主要集中在2000年之前,另外在整个时间域上具有10 a尺度的变化周期,并且周期振荡十分显著。

冬季降水量在整个时间域上存在80 a的年代际变化周期(图4E),除此之外,20世纪60年代之前存在20~25 a的变化周期,但这种变化周期在1960—2000年之间缩短至15 a左右,2000年之后,又变成



了 20 a 左右的周期变化。另外,20 世纪 40 年代之前芜湖市秋季降水还存在 10 a 的周期变化。综上所述,芜湖市年、四季的降水量均存在多个周期,且有一致的准 10 a 周期,但在长周期上分布有所不同。

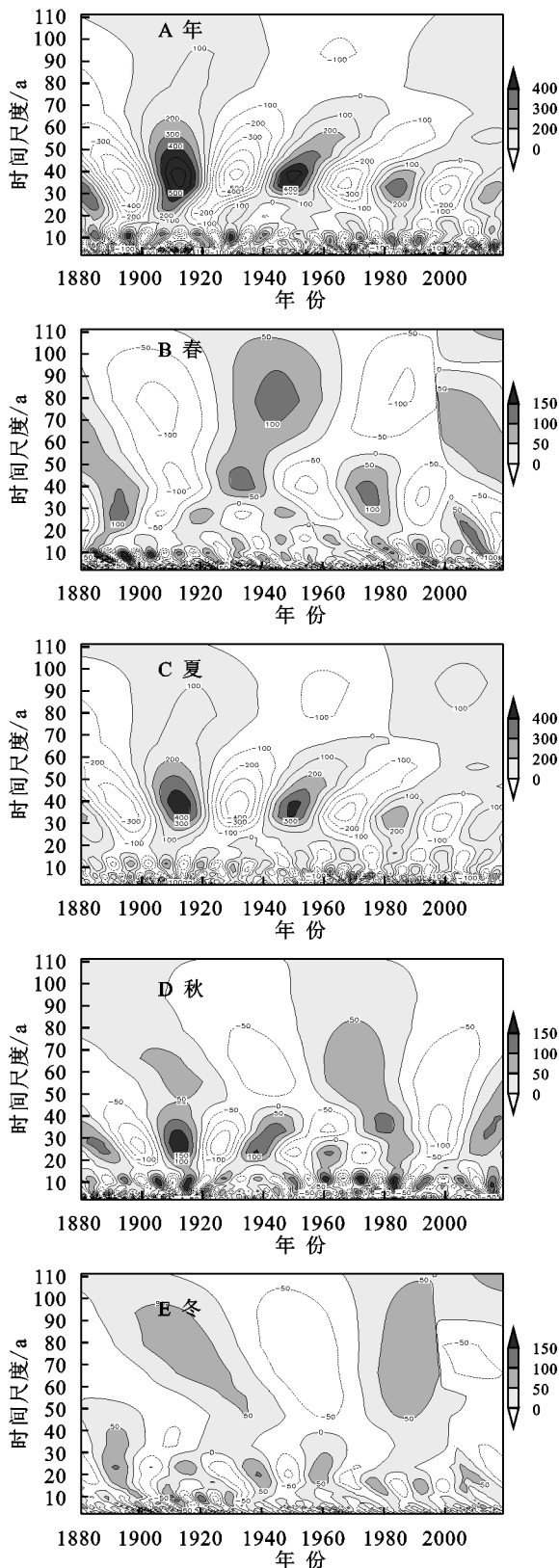


图 4 1880—2019 年芜湖市降水量的 Morlet 小波变换实部

## 2.3 突变特征

芜湖市百年降水量序列较长,除了存在周期性变化,还存在变化显著的年份,需要进行突变检验。不同的突变检验方法各有优缺点,本文采用 Mann-Kendall 检验并结合图 3 的累积距平对芜湖市百年年降水量、四季降水量的突变特征进行分析。若某时段内 UF 和 UB 曲线交点太多,则没有明显的统计学意义。去除掉交点太多的时段后,芜湖市年降水量的 UF 和 UB 主要相交于 1901 年、1924 年、1954 年、2014 年(图 5A),这些年份也是累积距平场上的转折年份,说明这些年份降水量变化幅度较大。图 5B 显示春季降水量 UF 和 UB 在 1901 年、1925 年、2002 年、2014 年相交,考虑到累积距平(图 3B)的变化,确定 1901 年、1925 年、2002 年为春季降水量的突变年。夏季降水量的 UF 和 UB 曲线交于 1885 年、1905 年、1921 年、2006 年(图 5C),由于累积距平中 2006 年不是转折年份(图 3C),确定 1885 年、1905 年、1921 年为夏季降水量突变年,结合夏季降水的周期变化和年代际变化特征,这 3 个年份降水都有明显的转折,具有气候学意义。秋季降水量 UF 和 UB 主要相交于 1901 年、1922 年、1977 年、1984 年、2011 年(图 5D),在累积距平曲线上(图 3D)除了 1977 年,其他年份都是转折年,因此 1901 年、1922 年、1984 年、2011 年秋季降水量增多或减少显著。MK 检验(图 5E)和累积距平(图 3E)均显示冬季降水量的突变年为 1997 年,这表明 1997 年之后,冬季降水量呈现明显的上升趋势。

## 3 结论

(1) 近 140 年来芜湖市年降水量仅呈略微上升趋势,但各季节变化趋势明显不同,其中夏季降水量增加趋势最为明显,冬季次之;秋季没有明显的增加趋势;春季降水量则呈现较明显的递减趋势,21 世纪以来这种递减趋势更为显著。

(2) 不同季节降水的周期也有所不同。芜湖市年降水量和夏季降水量周期时间尺度基本一致,整个时间域内受 40 a、10 a 和 5 a 等 3 个时间尺度波动变化所影响,但 10 a 和 5 a 时间尺度的周期振荡时段不同。春季降水量存在 80 a、40 a、20 a 和 10 a 共 4 个时间尺度的周期变化规律;秋季降水量存在 60 a、30 a 和 10 a 的准周期变化;冬季降水量存在 80 a、15~20 a 和 10 a 等 3 个周期,其中 15~20 a 左右周期较明显,是主导周期。对比发现,年降水量及四季降水量多雨期和少雨期交替分布与其周期变化十分吻合,不同季节的周期变化影响着各季节降水量的干湿交替变化。

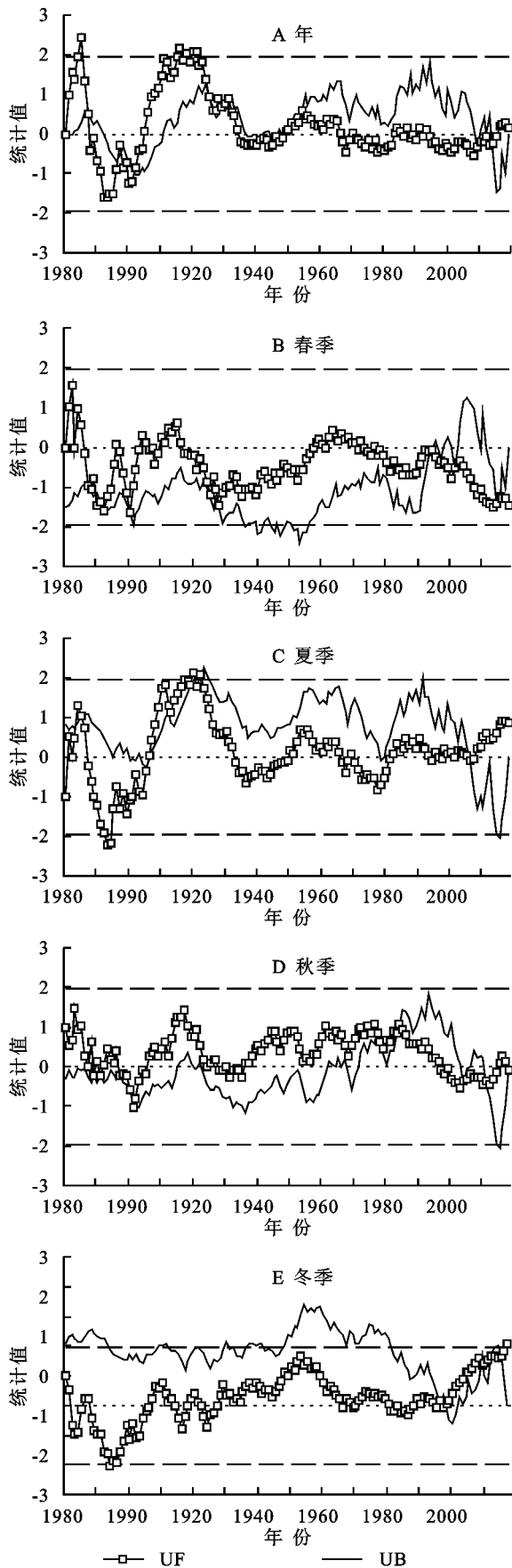


图5 1880—2019年芜湖市降水量的 Mann-Kendall 突变检验

(3) 各季节的突变年是多雨期、少雨期的转换年,与降水量的周期变化对应关系较好。除了冬季

外,1900年、1920年左右都是年、各季降水量一致的突变年,故1900年左右全年和各季降水量呈明显增多的趋势,1920年则呈现显著的递减趋势。除此之外,春季在2002年开始呈现明显的减弱趋势;秋季在1984年、2011年也存在突变,特别是2011年以来,秋季降水量偏多的趋势更加明显;冬季降水量在1997年之后处于偏后期。

综上,19世纪90年代—1920年芜湖市各季节降水变化趋势基本一致,这种一致性在百年芜湖市降水变化中非常罕见。1940年之后,各季节的年代际分布差异性逐渐增大,突变分析也显示了近20a来各季降水量变化趋势差异性更为显著。近140年来这种各季气候趋势的差异性逐渐增大是否与全球变暖有关?是否是整个长江中下游的共同特征?这些问题还需要进一步深入研究。

#### 参考文献:

- [1] Ding Y H, Wang Z Y, Sun Y. Interdecadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I. Observed evidences[J]. International Journal of Climatology, 2008,28(9):1139-1161.
- [2] Tu K, Yan Z W, Dong W J. Climatic jumps in precipitation and extremes in drying North China during 1954-2006 [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 2010,88(1):29-42.
- [3] 王敏,任建玲,易笑园,等.1901—2016年天津地区降水的多尺度特征[J].水土保持研究,2020,27(5):154-159.
- [4] 丁一汇,任国玉,赵宗慈,等.中国气候变化的检测及预估[J].沙漠与绿洲气象,2007,1(1):1-10.
- [5] 王绍武.近百年中国气候变化的研究[J].中国科学基金,1998,3(4):167-170.
- [6] 杨溯,徐文慧,许艳,等.全球地面降水月值历史数据集研制[J].气象学报,2016,74(2):259-270.
- [7] 李庆祥,彭嘉栋,沈艳.1900—2009年中国均一化逐月降水数据集研制[J].地理学报,2012,67(3):301-311.
- [8] 施能,陈绿文,封国林,等.1920—2000年全球陆地降水气候特征与变化[J].高原气象,2004,23(4):435-443.
- [9] 海英,高志强.中国百年气候变化及时空特征分析[J].科技通报,2010,26(1):58-62.
- [10] 吕俊梅,琚建华,江剑民.近一百年中国东部区域降水的年代际跃变[J].大气科学,2009,33(3):524-536.
- [11] 吕俊梅,祝从文,琚建华,等.近百年中国东部夏季降水年代际变化特征及其原因[J].大气科学,2014,38(4):782-794.
- [12] 任永建,宋连春,肖莺.1880—2010年中国东部夏季降水年代际变化特征[J].大气科学学报,2016,39(4):445-454.
- [13] 肖晶晶,李正泉,郭芬芬,等.浙江省1901—2017年降水序列构建及变化特征分析[J].气候变化研究进展,

- 2018,14(6):553-561.
- [14] 孟菲,康建成,王甜甜,等.上海市近百年来夏季降水时空分布特征及影响因素[J].气象与环境科学,2007,30(3):14-19.
- [15] 张秀丽,郑祚芳,何金海.近百年武汉市主汛期降水特征分析[J].气象科学,2002,22(4):379-386.
- [16] 丁一汇,王会军.近百年中国气候变化科学问题的新认识[J].科学通报,2016,61(10):1029-1041.
- [17] 张存杰,李栋梁,王小平.东北亚近 100 年降水变化及未来 10-15 年预测研究[J].高原气象,2004,23(6):919-929.
- [18] 闻新宇,王绍武,朱锦红,等.英国 CRU 高分辨率格点资料揭示的 20 世纪中国气候变化[J].大气科学,2006,30(5):894-904.
- [19] 竺可桢,涂长望,张宝堃.中国之雨量[M].南京:国立中央研究院气象研究所,1936:76-78.

(上接第 107 页)

- [11] Drew H. Abney. Introduction and application of the multi-scale coefficient of variation analysis[J]. Behavior Research Methods, 2017,49(5):1571-1581.
- [12] 余良坤.线性回归法在水文预测预报中的应用[J].低碳世界,2017(8):45-46.
- [13] 裴益轩,郭民.滑动平均法的基本原理及应用[J].火炮发射与控制学报,2001(1):21-23.
- [14] Fu C, Diaz H F, Dong D, et al. Changes in atmospheric circulation over northern hemisphere oceans associated with the rapid warming of the 1920s[J]. International Journal of Climatology, 1999,19(6):581-606.
- [15] Afifi A A, Azen S P. Statistical analysis: A computer oriented approach[M]. New York and London: Academic Press, 2014.
- [16] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics), 1979,28(2):126-135.
- [17] Pettitt A N. A simple cumulative sum type statistic for the change-point problem with zero-one observations[J]. Biometrika, 1980,67(1):79-84.
- [18] 刘瑞,朱道林.基于转移矩阵的土地利用变化信息挖掘方法探讨[J].资源科学,2010,32(8):1544-1550.
- [19] 张秋菊,傅伯杰,陈利顶.关于景观格局演变研究的几个问题[J].地理科学,2003,1(3):264-270.
- [20] 邬建国.景观生态学:格局、过程尺度与等级[M].北京:高等教育出版社,2007.
- [21] Leps J, Smilauer P. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO[R]. United Kingdom: Cambridge University Press, 2002.
- [22] Smilauer P, Leps J. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO [R]. Cambridge University Press, United Kingdom, 2014.
- [23] 魏艳红,焦菊英.皇甫川流域 1955—2013 年水沙变化趋势与周期特征[J].水土保持研究,2017,24(3):1-6.
- [24] 周熙.集体林权制度改革对生态环境建设影响的研究[D].武汉:华中科技大学,2011.

(上接第 113 页)

- [24] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: A review [J]. Biology and Fertility of Soils, 2002,35(4):219-230.
- [25] 岑睿,屈忠义,孙贯芳,等.秸秆生物炭对黏壤土入渗规律的影响[J].水土保持研究,2016,23(6):284-289.
- [26] 王艳阳.黑土区施用生物炭条件下的土壤水分运动与溶质运移模拟[D].沈阳:东北农业大学,2016.
- [27] 赵云鹏,白一茹,王幼奇,等.宁夏引黄灌区土壤饱和和导水率空间分异特征[J].北方园艺,2017,40(8):166-171.
- [28] 王丹丹,郑纪勇,颜永毫,等.生物炭对宁南山区土壤持水性能影响的定位研究[J].水土保持学报,2013,27(2):101-104.
- [29] 文曼.黄土高原地区生物炭的土壤水动力学效应[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [30] 张一璇,史常青,杨浩,等.永定河流域官厅水库南岸典型林分土壤饱和和导水率研究[J].生态学报,2019,39(18):6681-6689.