

太湖地区 2020 年洪水先兆特征 与降雨预测模拟研究

秦建国¹, 边晓阳², 蔡 晶², 张 洪², 席泽超¹

(1. 江苏省水文水资源勘测局无锡分局, 江苏 无锡 214031; 2. 无锡市太湖闸站管理处, 江苏 无锡 214062)

摘要:以单要素年际序列分析为基础,采用多种方法对太湖地区 2020 年洪水的先兆特征进行总结,基本摸清了太湖地区旱涝转换的规律。研究表明,通过成因、频率和相似年景对比分析,可以从宏观上找到暴雨洪水发生的理论依据;通过历史演变法、分段法和细部特征法的研究,可以从无锡站年际降雨序列的微观变化中准确把握太湖地区 2020 年降雨大幅增长的趋势和数值预测的范围;太湖流域的气候与长江中下游地区基本同步,气候突变和非典型旱涝周期的研究,可以提升气候预测水平。

关键词:洪水;非典型周期;分段法;细部特征法;预测模拟

中图分类号:TV882.9 **文献标识码:**B **文章编号:**1007-7839(2021)09-0056-06

Study on precursory characteristics of flood in 2020 and simulation of rainfall forecast in Taihu Lake Region

QIN Jianguo¹, BIAN Xiaoyang², CAI Jing², ZHANG Hong², XI Zechao¹

(1. Wuxi Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Jiangsu Province, Wuxi 214031, China;
2. Engineering Management Division of Wuxi Taihu Sluice Station, Wuxi 214062, China)

Abstract:Based on single factor inter-annual sequence analysis, precursory characteristics of floods in the Taihu Lake region in 2020 were summarized by various methods, and the law of drought-flood transition in the Taihu Lake region was basically understood. The results showed that theoretical basis of rainstorm flood could be found through the comparative analysis of cause, frequency and similar years. Through the study of historical evolution method, segment method and detailed characteristic method, the trend of significant increase in rainfall in 2020 in the Taihu Lake area and the scope of numerical prediction could be grasped from the micro-changes of inter-annual rainfall series at Wuxi Station. The climate in the Taihu Basin was basically synchronous with that in the middle and lower reaches of the Yangtze River. The study of climate mutation and atypical drought and flood cycles could improve the level of climate prediction.

Key words: flood; atypical period; fractionation method; detail characteristic method; forecast simulation

据统计,2020 年夏季梅雨期的梅雨量达到 759.2 mm,较常年(343.4 mm)偏多 1.2 倍,超过 1998 年和 2016 年的记录,为 1961 年以来最大值;梅雨期持续时长达 62 d,较常年(40 d)偏长 22 d,为

1961 年以来最长;梅雨期共有 46 个市(县)日降水量达到极端事件标准,主要分布在上海、江苏、安徽、湖北、江西等地,长江、鄱阳湖、洞庭湖、太湖、淮河水位先后超过警戒水位。因此,对区域降雨进行

收稿日期:2021-04-06

作者简介:秦建国(1970—),男,高级工程师,主要从事水文勘测、中长期水文预报和气候研究工作。E-mail:843216854@qq.com

预测模拟研究,及时发现产生洪涝灾害的先兆特征,具有重要的科研价值。

本文以太湖地区代表站——无锡站的实测年降水量资料为例,在总结此前经验的基础上,深入分析了2020年梅雨的成因,并且将2种时间序列分析的新方法(分段法和细部特征法)与传统方法相结合,探讨了太湖地区2020年洪水发生的先兆特征,研究太湖流域旱涝趋势变化的周期性规律。

1 成因探讨

东亚夏季风是控制我国东部地区天气、气候的主要系统,“梅雨”是东亚夏季风进程中特有的气象事件,发生在长江中下游、韩国南部和日本中南部等地区,从6月中旬持续到7月中旬,由于正是江南梅子的成熟期,在我国称其为“梅雨”,这一时段便被称作梅雨季节或者梅雨期。由于大气环流系统的变异性,每年梅雨季节的开始和结束时间以及梅雨量的变化情况也不尽相同,这也是长江中下游地区出现旱涝的最主要原因。一般认为,厄尔尼诺现象的衰减期西北太平洋会出现异常反气旋,因而导致东亚地区梅雨期的降雨显著偏多。这是亚洲季风最重要的研究进展,因而厄尔尼诺现象也成为中国汛期降水重要的预报因子。历史上,中国长江流域的特大洪涝灾害常发生在厄尔尼诺事件的次年夏季,如1954年、1983年、1998年、2010年、2016年等。但是“2020年超级梅雨”除受到厄尔尼诺现象的巨大影响外,还具有一些不同的特点。

国家气候中心的丁一汇院士团队在研究中发现,2020年东亚季风环流系统表现出明显的准双周振荡(QBWO),它与梅雨的开始和结束,雨带的北移和停滞,强降水过程的发生和维持有很好的对应关系。梅雨期包括西太平洋副热带高压、高层东亚西风急流和低空西南风急流在内的多个季风环流子系统,均经历了与QBWO相关的周期性振荡,尤其是低空西南急流的不断加强,南风大值中心反复建立和位置的相对稳定,使得源自热带的水汽输送一次次加强,水汽辐合与上升运动反复发展,从而导致梅雨在江淮流域长时间持续,暴雨过程频频发生。另一方面,梅雨期欧亚中高纬度地区环流呈现出“两脊一槽”型,阻塞高压活动频繁,东亚沿岸低槽活跃,经西北、东北路径的冷空气不断南侵我国,与低层一次次加强的西南暖湿水汽在江淮区域频繁交汇,这是造成2020年梅雨异常偏强的另一重要因素。作为一个重要的外强迫因子,热带印度洋的

持续增暖使得东亚地区环流呈现出EAP/PJ遥相关型,对应的是西太平洋副热带高压偏强偏南,从而有利于长江中下游地区的降水明显偏多^[1-2]。

复旦大学的周震强团队通过数值模式试验发现,“2020超级梅雨”最早可以追溯到2019年秋季的印度洋极端异常信号,而不是像往常一样主要受到太平洋厄尔尼诺事件的影响。2019年秋季,西印度洋异常偏暖,东印度洋(印尼群岛附近)异常偏冷,这种印度洋海盆东西两端相反的海温异常被称为印度洋偶极子现象,温度差达到 2.1°C ,成为有记录以来最强的一次印度洋偶极子事件。与2019年秋季极端印度洋偶极子事件相伴随的热带东南印度洋上空的大气环流异常,强迫出下沉的海洋罗斯贝波,并缓慢向西传播,到达西南印度洋后使得当地的温跃层加深、海温偏暖。至2019年冬季,印度洋偶极子事件消亡后,太平洋的弱厄尔尼诺事件充当接力的作用,继续维持印度洋的大气环流异常和海洋罗斯贝波,使得印度洋海温暖异常现象维持到2020年夏季。此时,印度洋海温暖异常通过电容器机制激发出西太平洋反气旋,并且增强了长江流域高空的西风急流。西太平洋反气旋引起的异常水汽输送和西风急流强迫的大气异常上升运动,共同作用使得2020年夏季梅雨异常偏多^[3]。

2 研究资料概况

根据江苏省气象局的研究,无锡站是太湖地区代表性最好的雨量站^[4]。无锡站位于太湖地区的腹地,无锡市西南的大运河畔,该站始建于1922年初,但是在1949年以前因各种原因经常中断^[5]。因此,本文选择的研究对象仍然是无锡站的实测降雨资料,时间序列是1950—2019年,其中1950年数据根据历史文献资料插补。

3 无锡站年际旱涝预测模拟

3.1 传统统计方法

历史演变法是利用某个台站某个水文气象要素过程线(即历史演变曲线)的外形特点,通过研究其统计规律进行预报的方法^[6]。历史演变法是气象学家杨鉴初先生首先提出的,它是传统时间序列分析方法的主要代表之一,具有重要的历史地位^[7]。

按照历史演变法统计分析,无锡站2020年降水量的预测结果为:最大可能性的上限是 $1\,676.6\text{ mm}$ (2015年降水量,无锡站排名第二),下限是

801.1 mm(1994 年降水量,无锡站排名倒数第二),预测值为 1 238.8 mm。大于 2 019.2 mm(2016 年降水量,无锡站最大值)和小于 552.9 mm(1978 年降水量,无锡站最小值)的出现是最小可能性,也不能排除出现在 1 676.6 ~ 2 019.2 mm 或者 552.9 ~ 801.1 mm 之间的可能性^[8]。

按照无锡站的实际情况,对历史演变法的持续性特征进行修正后可得:如果当年降水量低于 1 000 mm 时,那么第二年都是上升趋势。在 2019 年以前,这种情况出现了 20 次,无一例外。由于 2019 年降水量为 941.2 mm,根据历史演变法特征的统计分析,2020 年的旱涝趋势是必然上升^[9]。但因其指标单一不易定性,所以一般认为传统统计方法得出的预测结果具有随机性和不确定性^[10-11]。

因此,改进后 2020 年降水量的预测结果为:旱涝趋势上升的可能性极大,最大可能性的上限是 1 676.6 mm(2015 年降水量),下限是 941.2 mm(2019 年降水量),预测值为 1 309 mm,但是也不能排除 > 1 676.6 mm 或者 < 941.2 mm 的可能性。

3.2 分段法与近现代气候分类研究

分段法是以近现代气候突变的临界点做切割,根据分段特征一致性,解决时间序列分析主要矛盾的方法^[12]。通常认为“时间序列越长,代表性越好”,然而这种认识存在误区^[13]。笔者早在 2009 年就曾经发现:“1978 年前后无锡站年际降雨序列的旱涝特征截然不同,发生了突变现象”^[14-17]。其后陆续发现了 3 个气候突变的临界点,并且完成了验证工作^[18]。因此,分段法的目的是降低序列的模拟难度,提高预测效率。

气候突变是气候领域的新概念,至今没有明确的定义。参照突变理论,简单定义为“气候突变是指气候由一种稳定状态跃升至另一种稳定状态的现象,变化过程急剧”^[19-20]。根据分段法特征分析,无锡站可以分成旱涝趋势不同的 3 个时段,而且每个时段节点对应的都是一次气候突变^[12]。由于气候突变的临界点(1934 年、1978 年、2013 年)都是我国世纪罕见的夏季特大干旱灾害年景,而且每个世纪出现的次数不多,所以这个成果完成了我国近现代气候历史的分类研究^[18]。无锡站年际旱涝独立周期组合见表 1,表 1 中括号里的内容为预测项。

3.3 细部特征法与周期性分析

在水文气象预测领域,年际序列分析时成熟的方法不多,一般采用多年滑动来展望远景^[21-22]。在实际工作中,若将仅有的观测资料压缩处理,将带

来信息的大量丢失,其结果是导致中长期预报工作无法开展。因此,细部特征法就是在研究时逆向操作,利用放大镜原理,对序列的细部特征做统计分析,寻找其中隐含的自然规律^[18]。

现阶段细部特征法的主要内容是周期性分析,根据非典型周期的原则:若将时间序列中一个年际升降的完整过程,看做一个周期性变化的基本单元,那么 2020 年超级梅雨所形成的关键大气环流条件示意图中的过程线由 3 种基本单元组成,分别是 2 a、3 a、4 a 周期;按照上升期或者下降期时长的变化,非典型周期还具有正(两侧等时)、顺(上升期长、下降期短)、逆(上升期短、下降期长)等 3 种时间特性。2 种特征组合后,可形成 6 种类型的基本单元,分别是正 4 a、顺 4 a、逆 4 a、顺 3 a、逆 3 a、正 2 a 周期^[13]。

每个相邻时段的特征也不相同。第一时段,由 5 种类型的独立周期组成,邻近的 2 个独立周期可以组合在一起,形成大的复合周期;复合周期也具有时间趋势特性,其中独立周期为正时需要隐藏,为顺、逆时即作为复合周期的时间特征,以反映它们的自然属性。第二时段,由 3 种类型的独立周期组成,不具有复合周期的特征,但是可以归类合并成正、顺相间的 4 个部分。第三时段,目前只有 2 个独立周期组成,但是其主要特征与第一时段基本类似,具有复合周期的特点^[12]。

根据第一时段总结的经验,可以认定第三时段(2013—2019 年)是一个顺 6 a 的复合周期;按照复合周期的特征推算,未来必然出现一个逆 5 a 或者逆 6 a 类型的复合周期;逆 5 a 型周期只有“升-降-降+升-降”型一种情况,逆 6 a 周期包括“升-降-降+升-降-降、升-降-降-降+升-降”型两种情况。不管什么情况,2020 年的旱涝趋势必然是上升的,一定是逆 3 a 或者逆 4 a 型独立周期的顶点,而且是未来 3 a(2020—2022 年,若独立周期为“升-降-降-降”型,就是 4 a)内唯一的高点,其预测取值区间在 941.2 ~ 2 019.2 mm 之间,平均值是 1 480.2 mm。

3.4 历史洪水频率分析

根据刘沛林对历史的研究,隋唐以前长江流域的洪涝灾害的记录较少。自唐、宋以后,长江流域农业生产经营活动的规模不断扩大,逐渐赶上并且超越了黄河和淮河流域,成为我国最重要的经济文化中心。此后的长江,洪水频繁的程度越来越高。在隋、唐时期,长江洪水平均约 18 a/次;在两宋时

表1 无锡站年际旱涝独立周期的组合

段号	时间/a	组号	年份	独立周期的结构	新周期	特性
一段	1934—1978	1	1950—1955	1个逆3 a周期+1个正2 a周期	5 a周期	逆
		2	1955—1961	2个顺3 a周期	6 a周期	顺
		3	1961—1967	1个逆4 a周期+1个正2 a周期	6 a周期	逆
		4	1967—1973	1个顺4 a周期+1个正2 a周期	6 a周期	顺
		5	1973—1978	1个逆3 a周期+1个正2 a周期	5 a周期	逆
二段	1978—2013	1	1978—1994	1个正4 a周期+6个正2 a周期	不明显	正
		2	1994—2003	3个顺3 a周期	不明显	顺
		3	2003—2007	2个正2 a周期	不明显	正
		4	2007—2013	2个顺3 a周期	不明显	顺
三段	2013—(2056)	1	2013—2019	1个顺4 a周期+1个正2 a周期	6 a周期	顺
		2	2019—2024	(1个逆3 a周期+1个正2 a周期)	(5 a周期)	(逆)

期,平均约5~6 a/次;到了明清时期,已经增加到约4 a/次,与现代洪涝灾害发生的频率基本一致^[23]。

太湖流域地处长江三角洲的南岸,降水量的多年平均值约为1 186 mm。根据对区域代表站年降水量观测资料的统计:在1951—2020年期间,无锡站多年降水量平均值略多于1 110 mm;其中年降水量超过1 200 mm(属于无锡地区偏涝年景的下限)的年景有20次,出现的频率为3.5 a/次;超过1 300 mm(无锡地区洪涝年景的下限)的年景有16次,出现的频率为4.4 a/次^[24]。

由于地球自然地理分布的特点,气候具有南北向差异较大、东西向差异较小的特征。而长江中下游地区位于我国北纬30°附近,环境差异相对较小,气候和降水量的变化情况都差不多。因此,太湖流域与长江中下游地区的洪涝灾害具有频率相同、出现时间大多一致的特点^[25]。

3.5 相似年景对比分析

2019年以前,无锡站年降水量超过1110mm的年景有33次,其中前一年降水量低于1 000 mm的只有9次,与2019年降水量数值的最大偏差是±7.1%,而且次年的平均升幅是42.6%;超过1 200 mm的有19次,其中前一年降水量低于1 000 mm的只有6次,与2019年的最大偏差也是±7.1%,而且次年的平均升幅是48.5%;超过1 300 mm的有15次,其中前一年降水量低于

1 000 mm的只有4次,与2019年的最大偏差是±3%,平均升幅是54.7%。若将年降水量数值相近的年景视为其气候特征也是类似的,那么表2中与2019年更接近的是次年降水量超过1 300 mm的,显然后者的相似度更高。而且其中的1954、1987、2020年的前一年,东太平洋都出现了厄尔尼诺现象,它们的平均升幅是64.2%。

4 综合预测模拟成果

4.1 2020年洪水的先兆特征

对暴雨洪水年景出现的先兆特征进行系统研究,是提高预报水平的主要途径。目前多数气象学者将预报研究的方向瞄准在气候成因领域,而忽视了微观世界先兆特征的研究。太湖地区2020年洪水先兆特征见表3。

4.2 无锡站综合预测模拟成果

按照成因分析,厄尔尼诺现象的第二年我国南方地区容易出现大范围暴雨洪水;按照频率分析,长江中下游地区暴雨洪水出现的频率是4 a/次,2020年出现洪水的可能性较大;按照相似年景对比分析,相似年景的次年降水量平均涨幅是54.7%,2020年的取值范围是>1 300 mm,其预测值是1 456 mm;按照改进后的历史演变法,无锡站年降水量低于1 000 mm的次年必然上升;按照分段法,太湖流域仍处于一个多雨周期之中,无锡站2020年

表 2 无锡站与 2019—2020 年雨情相似年景对比

序号	年份	本年降水量/mm	相似度/%	上年降水量/mm	相似度/%	升幅/%	太湖地区气候特征
1	1954	1 521.3	95.7	935.9	99.4	62.5	属于特大洪涝年景
2	1974	1 242.6	78.2	874.8	92.9	42.0	属于偏涝年景
3	1985	1 327.3	83.5	962.8	102.3	37.8	属于一般洪涝年景
4	1987	1 500.4	94.4	930.0	98.8	61.3	属于严重洪涝年景
5	1993	1 487.0	93.5	945.5	100.4	57.3	属于严重洪涝年景
6	2001	1 261.8	79.4	969.6	103.0	30.1	属于偏涝年景
7	2020	1 590.0	100.0	941.2	100.0	68.9	属于特大洪涝年景

表 3 太湖地区 2020 年洪水的先兆特征

序号	方法	先兆特征	备注
1	成因分析	2019 年秋季爆发的印度洋海温异常与太平洋弱厄尔尼诺现象叠加,激发出超强西太平洋反气旋,并且增强了长江流域高空的西风急流,两者共同作用使得 2020 年夏季梅雨期偏长、梅雨量异常偏多	宏观条件
2	频率分析	长江中下游地区暴雨洪水出现的频率是约 4 a/次,太湖地区已经连续 3 a 是正常至偏旱年景	宏观条件
3	相似年景对比	与 2019 年相似度最高的是 1953 年、1984 年、1986 年、1992 年,其次年太湖地区都发生大洪水,年降水量平均涨幅是 54.7%	宏观条件
4	历史演变法	无锡站 2019 年降水量低于 1 000 mm 后,次年必然上升,最大可能性是在 941.2 ~ 1 676.6 mm 之间	微观条件
5	分段法	2015 年、2016 年无锡站连续创出历史新高,表明至少该时段的早期处于一个多雨周期之中,而且增加了年降水量向上时的拓展空间,另外该时段降水量的最大可能性是在 1 017.7 ~ 1 676.6 mm 之间	微观条件
6	细部特征法	预计 2020 年将是无锡站非典型旱涝周期的一个顶点,也是太湖地区未来 3 a(2020—2022 年)或者 4 a(2020—2023 年)内年降水量的最大值	微观条件

降水量预测值的最大可能性是 1 017.7 mm(2013 年降水量,第三时段排序倒数第二位) ~ 1 676.6 mm(2015 年降水量)之间,平均值是 1 347.2 mm;按照细部特征法分析,无锡站未来 3 a(2019—2022 年)的旱涝趋势是逆 3 a 周期,即为“升—降—降”型,所以 2020 年是逆 3 a 周期的顶点,其旱涝趋势是上升的。

根据多种条件的综合预测:无锡地区 2019—2020 年的旱涝趋势是必然上升,而且上升的幅度很大;未来 3 a 期间(2019—2022 年),无锡站的旱涝趋势是逆 3 a 非典型周期的可能性极大;无锡站 2020 年降水量的最大可能性的上限是 1 676.6 mm、

下限是 1 300 mm,预测值为 1 488.3 mm。

4.3 太湖地区预测模拟成果

太湖地区预测值是在无锡站预测值的基础上乘以系数 K ($K = \text{太湖地区多年平均值} / \text{无锡站多年平均值} = 1.068$),其波动范围是 1 388.4 ~ 1 790.6 mm,平均值是 1 589.5 mm,比多年平均值偏多约 34.0%。由于 2019 年太湖地区降雨是北部偏少、南部偏多,面平均降水量接近常年值。因此,太湖地区 2020 年旱涝的预测结果是:太湖地区的旱涝趋势与无锡站相同,都是大幅上升的趋势,但是上升幅度会小于无锡站;预计太湖地区年降水量偏多 1 成至 4 成,夏季可能会出现较大洪水。

5 预测模拟成果评价

5.1 区域实况

2020年无锡站年降水量是1 590.0 mm,比多年平均值偏多约44.5%;太湖流域面平均年降水量是1 489.3 mm,较常年偏多25.6%;太湖地区年内降雨的时空分布严重失衡,暴雨多集中在梅雨期,梅雨量583.8 mm,是常年值的2.42倍;太湖发生超标洪水,最高洪水位是4.79 m,出现在7月21日,与1991年持平,并列历史第三位;梅雨期内河水位全面超警,其中有56个站点超过保证水位,上海站等5个站点出现超历史洪水位。

5.2 成果评价

依据水文情报预报规范(GB/T22482—2008),由太湖地区2020年度降雨预测成果(表4)可知,无锡站和太湖地区2020年降雨的预测精度较高,相对误差<10%,都在良好以上,可以满足经济社会发展对中长期预报的需求。

表4 太湖地区2020年度降雨预测成果

地点	降水量 上限/mm	降水量 下限/mm	预报值/ mm	与多年 比/%	允许 误差/%	实测值/ mm	与多年 比/%	相对 误差/%	预报精度
无锡站	1 676.6	1 300.0	1 488.3	134.1	±20	1 590.0	143.2	-6.4	良好
太湖地区	1 790.6	1 388.4	1 589.5	134.0	±20	1 489.3	25.6	6.7	良好

其中,无锡站预测值的相对误差与太湖地区的符号正好相反,两者背离的原因是由于梅雨期间无锡站处于流域中西部的暴雨中心,降水量较区域面平均值明显偏多。

参考文献:

- [1] 刘芸芸,丁一汇. 2020年超强梅雨特征及其成因分析[J]. 气象, 2020, 46(11):1393-1404.
- [2] Ding, Y. H., Y. Y. Liu, and Z. -Z. Hu., 2021: The Record-breaking Meiyu in 2020 and Associated Atmospheric Circulation and Tropical SST Anomalies. Adv. Atmos. Sci. <https://doi.org/10.1007/s00376-021-0361-2>.
- [3] Zhou Zhenqiang, XIE Shangping, ZHANG Renhe. Historic Yangtze flooding of 2020 tied to extreme Indian Ocean conditions [J]. PNAS, 2021, 118 (12): e2022255118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2022255118>.
- [4] 吴文富,陆安娜,费清培. 太湖地区气候资源研究[M]. 北京:气象出版社,1992.
- [5] 朱骊,乐峰,张建平,等. 城市水利工程对京杭大运河无锡段水位影响分析[J]. 水文, 2014, 34(4):92-96.
- [6] 秦建国,洪国喜,张涛,等. 无锡站年际降水趋势、特征与预报分析[J]. 水文, 2013, 33(4):92-96.
- [7] 秦建国,吴朝明,姚华,等. 气候突变点前后无锡站年际降水序列历史演变法特征[J]. 人民长江, 2021, 52(3):76-80.
- [8] 秦建国,洪国喜,朱骊,等. 无锡地区降水年际变化趋势分析与历史演变法的应用[C]//中国水文科技新发展——2012中国水文学术讨论会论文集. 南京:河海大学出版社,2012.
- [9] 秦建国. 太湖地区2015年主汛期雨情展望及后期对比分析[J]. 江苏水利, 2019(8):14-20.
- [10] 周恩济,林镜榆,范钟秀,等. 气象学[M]. 南京:河海大学出版社,1989.
- [11] 范钟秀. 中长期水文预报[M]. 南京:河海大学出版社,1999.
- [12] 秦建国,朱龙喜,盛龙寿,等. “2016太湖大洪水”年景的雨情预测模拟[J]. 江苏水利, 2020(5):1-7.
- [13] 秦建国,尤征懿,陈寅达,等. 年际序列分析的2种新方法 with 早涝预测模拟——以太湖流域2017年降雨为例[J]. 中国市政工程, 2020(5):88-91.
- [14] 秦建国,朱玲,任小龙,等. 无锡地区太湖春汛成因分析[J]. 江苏水利, 2010(7):19-21.
- [15] 秦建国. 对无锡地区湿润年景周期性变化的思考[J]. 人民长江, 2010, 41(增刊1):50-55.
- [16] 秦建国,张泉荣,洪国喜,等. 太湖地区2011年春季严重干旱成因与预测[J]. 水资源保护, 2012, 28(6):29-36.
- [17] 秦建国,张涛,孙磊,等. 气候转折期前后无锡站年际早涝周期水文特征对比分析[J]. 水文, 2017, 37(6):51-57.
- [18] 秦建国. 非典型周期和气候突变的识别与判定[J]. 水文, 2020, 40(1):23-28.
- [19] 符淙斌,王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学, 1992, 16(4):482-493.
- [20] 郑景云,葛全胜,张丕远. 气候突变:史实与意义[J]. 地球科学进展, 1999, 14(2):177-182.
- [21] 易淑珍,王钊. 水文时间序列周期分析方法探讨[J]. 水文, 2005, 25(4):26-29. (下转第65页)