

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2012.01.001

太湖流域气候变化检测与未来气候变化情景预估

徐宗学^{1,2}, 刘 浏^{1,2}

(1. 北京师范大学水科学研究院 北京 100875 ; 2. 水沙科学教育部重点实验室 北京 100875)

摘要 : 基于 1954—2006 年太湖流域 6 个气象站点的降水、气温资料 , 探讨了 1954 年以来太湖流域的气候变化问题 , 并同时应用统计降尺度模型 SDSM 和动力降尺度模型 PRECIS 对太湖流域的日降水量和日最高、最低气温进行降尺度处理 , 建立未来 2021—2050 年的气候变化情景。结果表明 : 20 世纪 90 年代以来 , 太湖流域发生了突变式增温 , 冬、春季节尤为显著 , 太湖流域降水变化相对较复杂 , Mann-Kendall 法检测到太湖流域年降水量呈振荡性周期变化 , 并在 1980 年和 2003 年发生突变 , 而 Pettitt 方法没有检测出太湖流域年降水量的突变。两种降尺度方法模拟的未来时期日最高、最低气温季节和年的变化情景增幅总体上基本一致 , 均呈显著增加趋势 , 与 Mann-Kendall 趋势分析结果一致 , 高排放情景 A2 下模拟生成的情景增温幅度较低排放情景 B2 大 , 最高气温增加幅度比最低气温明显。降水变化情景差异较大 , SDSM 模拟的未来时期降水并无明显变化趋势 , 而 PRECIS 模拟结果与趋势检验结果较为一致 , 即未来降水增加趋势明显 , 增幅较大 , 总体上全流域年降水量呈增加趋势 , 并且在未来一段时间内仍将持续增加。

关键词 : 气候变化 ; 气候突变 ; 情景分析 ; 统计降尺度 ; 动力降尺度 ; 太湖流域

中图分类号 : D467 文献标志码 : A 文章编号 : 1006-7647(2012)01-0001-07

Detection of climate change and projection of future climate change scenarios in Taihu Lake Basin / / XU Zong-xue^{1,2}, LIU Liu^{1,2} (1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, Beijing 100875, China)

Abstract : Based on the data of precipitation and temperature at 6 meteorological stations in Taihu Lake Basin from 1954 to 2006 , the problems of climate change in the basin during the past 53 years are investigated. The scenarios of climate change during the period from 2021 to 2050 are generated through the downscaling treatment of daily precipitation and the maximum and minimum daily air temperatures in the basin by means of the statistical downscaling model(SDSM) and the providing regional climates for impacts studies(PRECIS). The results show that since the 1990s , the abrupt increase of temperatures has been occurred in Taihu Lake basin , especially in winter and spring. The change of precipitation in the basin has been relatively complex. The annual precipitation has experienced a fluctuating period change. Abrupt changes of the annual precipitation were detected in 1980 and 2003 by using the Mann-Kendall method. However , no abrupt changes of the annual precipitation in Taihu Lake basin were detected by using the Pettitt method. Generally , the increments of the maximum and minimum daily air temperatures at both seasonal and yearly scales in the future simulated by means of SDSM and PRECIS are basically the same and both exhibit a tendency of significant increase , and they agree with the results of the trend analysis of the Mann-Kendall method. The increment of the air temperature under A2 scenario with high emission is greater than that under B2 scenario with low emission , and the increment of the maximum air temperature is more obvious than that of the minimum air temperature. The changes of daily precipitations generated by the two models are different , that is , no significant change of the future daily precipitation occurs by means of SDSM , while the results simulated by means of PRECIS are in accordance with those of the trend analysis , that is , the increment is large , in general , the annual precipitation in the whole Taihu Lake Basin has a tendency of increase , furthermore , it will continue to increase at certain period in the future.

Key words : climate change ; abrupt change ; scenario projection ; statistical downscaling ; dynamic downscaling ; Taihu Lake Basin

近百年来 , 全球气候正经历以全球变暖为主要特征的显著变化 , 1906—2005 年地球表面平均温度上升了 0.74℃ , 近 50 a 的线性增温速率为 0.013℃/a , 1850 年以来最暖的 12 个年份中有 11 个出现在近期的 1995—2006 年 , 未来气候变化将对自然生态系统和人类生存环境产生显著影响 , 并将对未来经济社会发展产生长期的影响 , 特别是江河三角洲地区将变得更加脆弱 , 我国气候变化趋势与全球基本一

致^[1-3]。近些年来很多学者对气候变化及其对水资源的影响方面做了大量有价值的工作,例如,张建云等^[4]应用 1950 年以来的中国六大流域 19 个重点控制水文站年径流观测资料分析了中国六大江河的年径流量变化情况,结果表明,1950 年以来中国六大江河的实测径流量均呈下降趋势,其中海河、黄河、辽河、松花江实测径流量下降明显,严重影响了我国社会经济的发展。此外,张建云等^[5]还从防洪安全、供水安全、水生态环境安全和水工程安全 4 个方面分别阐述了气候变化对中国水安全的可能影响。孙颖等^[6]利用最新一代气候模式结果对政府间气候变化委员会(IPCC)SRES A1B 情景(中等排放情景)下的东亚夏季降水和季风环流未来演变特征进行了预测,结果表明,东亚地区的降水量在未来将会增加。江善虎等^[7]通过趋势及突变检验将径流序列划分为“天然基准期”和“人类活动影响期”,定量分析了我国北方老哈河流域气候变化和人类活动对径流的影响。秦年秀等^[8]采用基于 ArcGIS 的地理分析模块建立的气温降水径流关系及双参数气候径流弹性指数方法,分析了气候变化对贵州省思南以上乌江流域水文水资源的影响。

太湖流域地处长江三角洲,是中国社会经济发展的一个重要区域和缩影,虽然其土地面积和人口仅占全国的 0.4% 和 3%,但其 GDP 却高达全国的 13%。受季风气候影响,太湖流域水资源系统对气候变化的承受能力十分脆弱,流域水资源系统面临气候变化与经济社会发展的双重压力。已有研究^[9-12]表明,气候变化引起的降水频率及强度的增加,很可能是造成太湖流域洪涝灾害的主导因素,因此,研究太湖流域的气候变化特征,以揭示太湖流域气候时空变化及其演变趋势,对理解气候变化在本区域的响应和洪水频发与气候变化的关系具有一定

的参考价值,同时可以为太湖流域未来气候情景分析和未来气候趋势预估提供依据。

本文选取 1954—2006 年太湖流域 6 个气象站点的日降水、日平均气温、日最高气温、日最低气温 4 个要素的资料,分析 1954—2006 年太湖流域这些气候要素的变化趋势,用不同方法检测各气候要素的突变性,定量描述太湖流域气候变化的事实,在此基础上分别采用统计降尺度法和动力降尺度法生成太湖流域未来气候情景,并进行对比分析。

1 资料处理和分析方法

太湖流域 6 个气象站点的 1954—2006 年降水量 P 、平均气温 T 、最高气温 $T_{\max}$ 、最低气温 $T_{\min}$ 日数据均由中国气象局国家气象信息中心气象资料室提供(已经过初步质量控制),站点分布见图 1。为了减少单站记录的片面性,取整个地区的空间平均序列作为流域平均值。为了进行气候突变分析,再对区域化的各要素的季节和年序列作 5a 滑动平均,以突出较长期的变化趋势,序列两端的 5a 滑动平均值是通过分别添加两个序列的平均值得到的,经过以上数据处理,可得到 5a 滑动平均、各季节和年、区域化的各气候要素序列。分析所用距平序列是相对于 1954—2006 年多年平均的距平,季的气温是 3 个月的平均值,降水量是 3 个月的降水总量,以此类推,得到年的气温和降水量序列。

采用 Mann-Kendall 非参数统计检验法(M-K 法)^[13]分析太湖流域各气候要素的时空变化趋势,并结合 Hurst 指数分析各要素的长程相关性;气候变化的阶段性特征采用距平曲线法;采用 M-K 法和 Pettitt 非参数检验方法联合检测气候突变现象;未来气候情景的生成采用统计降尺度模型 SDSM (statistical downscaling model)和动力降尺度模型

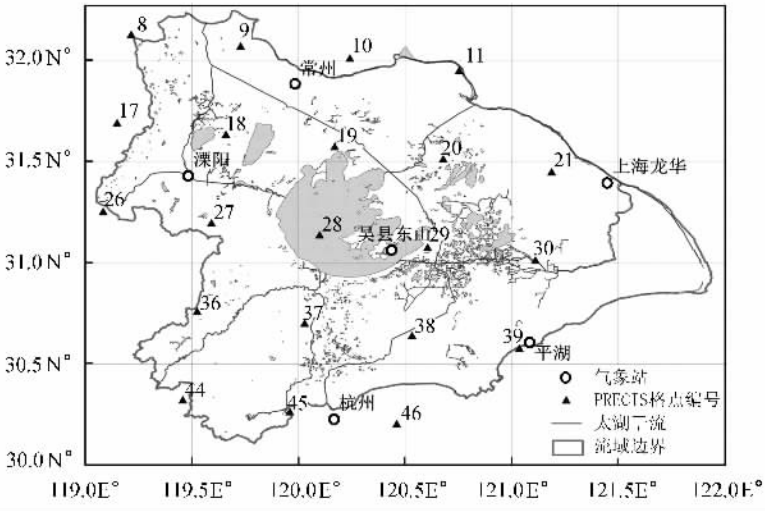


图 1 太湖流域位置及气象站点分布

PRECIS(providing regional climate for impact studies), 包括基准期(1961—1990 年)和 IPCC 排放情景报告 SRES 中 A2 ,B2 两种情景下未来时期 2021—2050 年日降水、日最高气温和日最低气温。

M-K 法是由世界气象组织(WMO)推荐的应用于环境数据时间序列趋势分析的方法 ,也是检验水文时间序列单调趋势的有效工具^[14-15]。Pettitt 方法是一种与 M-K 法相似的非参数检验方法 ,由 Pettitt 最先将这一方法用于检测突变点 ,故将其称为 Pettitt 法^[16] ,该方法直接利用秩序列来检测突变点。本文对太湖流域 6 个气象站点 1954—2006 年的数据序列在 95% 的置信水平上进行趋势及突变检验 ,同时借助站点年气候要素变率(即 Kendall 倾斜度 β 值) ,分析各气候要素在空间上的分布情况。

2 太湖流域的气候变化

2.1 降水变化

太湖流域 1954—2006 年的年降水量变化呈振荡状态 ,趋势变化不是很明显。20 世纪 60 年代中期到 70 年代中期是持续时间较长的少雨期 ,年降水量减少趋势比较明显 ,而 80 年代后期至 90 年代降水量则有所增加 ,2002 年之后年降水量呈现明显下降趋势(图 3a) ,2003—2006 年平均降水量比多年平均降水量减少了 184.1 mm。由图 3a 可知 ,1978

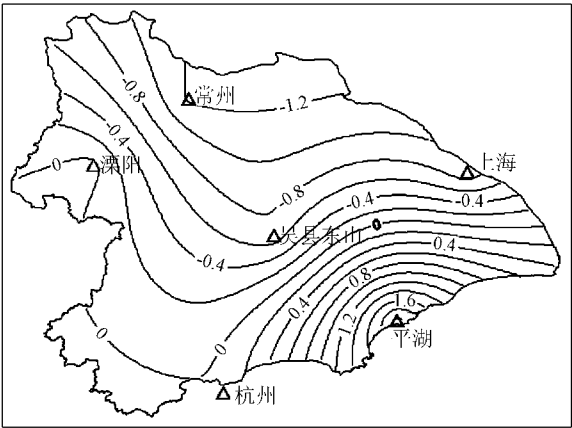
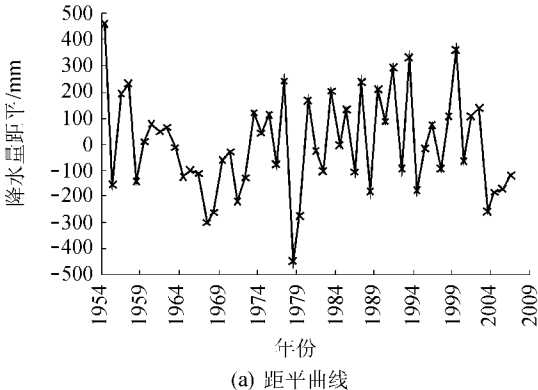


图 2 太湖流域年降水量距平曲线和 Kendall 倾斜度等值线

年、2003 年太湖流域发生干旱 ,与当年降水量偏少有关 ,而 1954 年、1991 年、1993 年、1999 年发生的流域性大洪水 ,则与当年降水量明显偏大有关。此外 ,太湖流域位于亚热带季风气候区 ,季风雨带的位置变化直接影响着该流域的干旱与洪涝。尹义星等^[17]分析了 1954—1999 年太湖流域洪旱灾害变化与东亚夏季风的联系 ,指出太湖流域在 20 世纪八九十年代洪灾加剧 ,原因在于东亚夏季风在 70 年代末以来呈减弱的趋势 ,使梅雨期长度和雨量增加。近 50 a 太湖流域洪旱灾害频谱结构的变化周期在逐渐变小 ,同时东亚夏季风指数也发生了类似的变化。

利用 Kendall 倾斜度的计算结果 ,对太湖流域 1954—2006 年降水量的空间分布规律进行了分析。由图 3b 可知 ,1954 以来 ,太湖流域西部、北部年降水量减少 ,变化幅度较小 ,东南部年降水量增加趋势较明显。其中西北部降水量减少中心分布在常州一带 ,最大 Kendall 倾斜度达 -1.227 mm/a ;东南部以平湖为中心 ,降水量呈增加趋势 ,其中心的 Kendall 倾斜度达 2.064 mm/a 。而历史上太湖以东地区易发生洪涝灾害^[18] ,太湖流域降雨的这一空间变化特征无疑将加剧太湖流域的防洪形势。由表 1 可知 ,太湖流域年降水量随时间微弱增加 ,但趋势不明显 ,秋季的降水量表现出明显减少的趋势 ,Kendall 倾斜度达到 -1.779 mm/a ;冬季则为明显增加的趋势 ,Kendall 倾斜度达到 1.481 mm/a ;春季和夏季的变化趋势并不明显 ;全流域年平均 Kendall 倾斜度仅为 0.197 mm/a 。

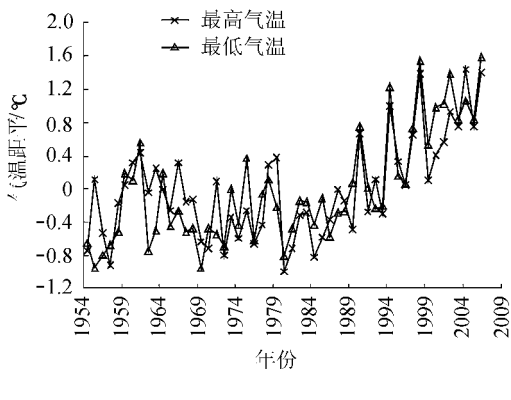
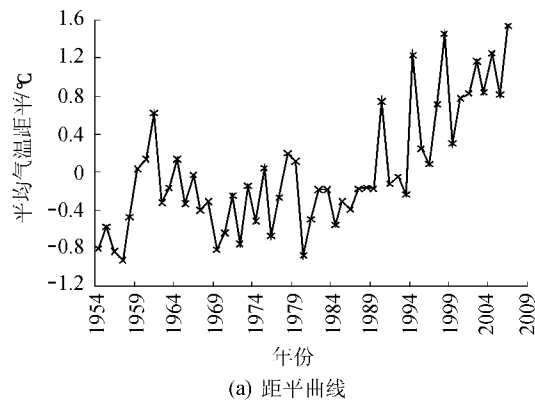
表 1 太湖流域年及季节降水量 M-K 法分析结果

时段	Kendall 倾斜度/($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)	M-K 统计量	M-K 原假设
年	0.197	0.0844	接受
春季	-1.341	-1.8640	接受
夏季	1.000	0.7901	接受
秋季	-1.779	-2.2629	拒绝
冬季	1.481	2.2168	拒绝

2.2 气温变化

由图 3a 可以看出 ,太湖流域于 20 世纪 70 年代开始经历了一个渐趋强烈的增温过程。自 1991 年开始气温进入显著性增温时期 ,1991—2000 年平均气温比多年平均气温高出约 0.4°C ,而且增温幅度随时间不断增大。

从图 3b 可以看出 ,太湖流域东北部和南部地区气温增幅大于其他地区 ,东南部平湖站和西部溧阳站增温幅度相对较小。太湖流域东部地区形成以上海站为中心的增温区 ,上海站 Kendall 倾斜度为 0.038°C/a 。平湖站和溧阳站 Kendall 倾斜度都为 0.020°C/a ,为全流域增温幅度最小的两个中心地



(a) 距平曲线

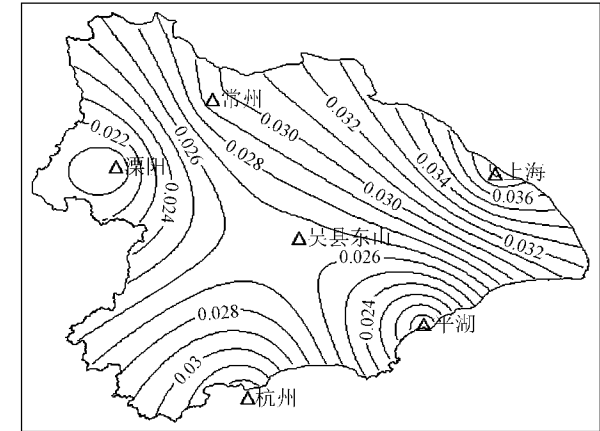
图4 太湖流域最高气温和最低气温距平曲线

夏季和冬季最高气温增温趋势不显著,而春、秋季呈显著升温趋势,Kendall 倾斜度分别达到 0.035℃/a 和 0.020℃/a。而最低气温在各季均呈现出显著上升趋势,其中冬季增温幅度最大,Kendall 倾斜度高达 0.043℃/a,春、秋季次之,夏季最弱,说明太湖流域表现出强烈的暖冬现象。从四季的变化情况来看,最高气温和最低气温的变化规律与平均气温的变化具有很好的一致性。

2.3 长程依赖性分析

自然界中,水文、地质、气候、地球化学、地震等领域的时间序列常常具有长程依赖性,定量描述长程依赖性的主要方法之一是计算 Hurst 指数。R/S 非参数分析法由于其很好的稳健性,成为估算 Hurst 指数最常用的方法之一。近些年来,我国有关学者已经将这一方法引入国内并开始应用于气候变化^[19-20]和水文时间序列变化^[21-23]的趋势分析和变异诊断研究中。

从表 3 可以看出,全流域年降水量、年平均气温、最高气温序列都表现出强烈的持续性,也就是说这些要素以后的变化趋势基本都与过去的变化趋势保持一致,而最低气温表现出一定的反持续性,由于数据接近于 0.5,数据序列也存在一定的随机性。除春季的平均气温、最高气温及最低气温表现出一定的反持续性外,全流域各气候要素在 4 个季节都表现出持续性,尤其夏季和冬季的持续性更强;从表 3 也可以看出,全流域春季的 Hurst 指数结果对年的结果有一定的影响,尤其是对最低气温。



(b) Kendall 倾斜度等值线(单位:℃/a)

图3 太湖流域年平均气温距平曲线和 Kendall 倾斜度等值线

区。结合图 3(b)可知,气温明显上升,将驱动水循环加快,流域降水时空分布更加不均匀。由于受水体对气温调节作用的影响,沿海及滨湖地区的气温升幅相较其他地区偏小,而杭州、上海等城市地区,由于城市热岛效应的作用,平均气温比其周围地区高,其升温幅度也较大。

最高最低气温的变化也是表征一个地区气候变化程度的重要指标之一,图 4 给出了太湖流域 1954—2006 年最高、最低气温的距平曲线。由图 4 可知,最高气温与最低气温变化趋势一致,20 世纪 90 年代以后升温趋势显著,太湖流域最高气温 Kendall 倾斜度为 0.020℃/a,年平均最低气温 Kendall 倾斜度为 0.029℃/a。

从 M-K 法计算结果(表 2)可以看出,太湖流域

表2 太湖流域年及季节气温 M-K 法分析结果

时段	平均气温			最高气温			最低气温		
	Kendall 倾斜度/ (℃·a ⁻¹)	M-K 统计量	M-K 原假设	Kendall 倾斜度/ (℃·a ⁻¹)	M-K 统计量	M-K 原假设	Kendall 倾斜度/ (℃·a ⁻¹)	M-K 统计量	M-K 原假设
年	0.027	5.1701	拒绝	0.020	3.4211	拒绝	0.029	5.2621	拒绝
春季	0.038	4.3339	拒绝	0.035	3.6660	拒绝	0.035	4.2879	拒绝
夏季	0.011	1.3500	接受	0.005	0.6290	接受	0.014	2.2322	拒绝
秋季	0.030	4.1575	拒绝	0.020	2.9149	拒绝	0.033	4.0425	拒绝
冬季	0.036	3.9734	拒绝	0.020	1.9484	接受	0.043	4.4567	拒绝

表 3 全流域气候要素序列 Hurst 指数计算结果				
时段	平均气温	最高气温	最低气温	降水
春季	0.444 2	0.346 6	0.442 9	0.637 2
夏季	0.637 1	0.724 7	0.534 3	0.822 0
秋季	0.624 2	0.637 5	0.532 6	0.592 5
冬季	0.783 8	0.836 1	0.620 7	0.680 8
年	0.604 4	0.760 0	0.432 3	0.933 2

与 M-K 法计算结果相比较 ,太湖流域年降水量在未来一段时间内仍将持续增加 ,流域冬季和夏季降水增加的持续性对全年的贡献较大 ,年平均气温、最高气温和最低气温显著升高 ,冬、春季节尤为显著 ,并且冬季表现出的持续性较夏秋两个季节更为强烈 ,而春季则表现出与其他 3 个季节相反的趋势 ,即反持续性 ,因此 ,冬春两季的变化对全年的影响较大 ,总体上在未来一段时间内气温仍将持续升高。Hurst 指数计算结果进一步佐证了 M-K 法的趋势分析结果 ,说明了太湖流域未来气候变化的特征。

3 太湖流域气候突变分析

用 1954—2006 年太湖流域降水量、平均气温、最高气温和最低气温的季节和年数据序列 ,分别采用 M-K 法和 Pettitt 法来检测气候突变现象 ,并结合各要素的实际观测数据序列进行比较分析。

用 M-K 法检测流域 4 个气候要素年和季节时间序列的结果见表 4。由表 4 可以看出 ,气候要素在某些年和季节的突变现象不显著。其中 ,平均气温和最低气温突变主要发生在 20 世纪 90 年代初期 ,而最高气温在 90 年代后期 ;各季节和年降水量的突变现象不显著 ,其中 1980 年和 2003 年太湖流域年降水量都表现出一定的突变现象 ,这与 M-K 法趋势分析和距平序列结果(图 2(a))一致 ,说明太湖流域年降水量 1954—1980 年经历了一次由偏少到偏多的过程 ,之后经历了由偏多到偏少的过程 ,呈振荡性周期变化。太湖流域降水变化与季风强弱关系密切 ,一般认为 ,东亚夏季风弱的年份 ,我国雨带多位于长江中下游地区 ,梅雨期偏长 ,因而太湖流域易涝 ,而当东亚夏季风强的时候 ,雨带多位于华北和华南 ,梅雨期偏短 ,太湖流域易旱^[24]。尹义星等^[17]研究指出太湖流域洪旱灾害以及梅雨的年代际变化 ,与东亚夏季风的年代际突变是基本一致的 ,因此 ,大

表 4 M-K 法检测出的太湖流域气候要素突变年份				
时段	降水量	平均气温	最高气温	最低气温
春季		1993	1997	1992
夏季	1974		1968	2003
秋季	1993	1993	1997	1993
冬季	1997	1988	1986	1988
年	1980 2003	1993	2000	1992

气环流背景的年代际变化 ,造成了太湖流域多雨和洪涝增加的现象。

表 5 为采用 Pettitt 法检测流域 4 个气候要素年和季节时间序列的结果。可以看出 ,Pettitt 法计算的太湖流域年平均气温、最高气温和最低气温的统计量都在 1993 年超过 0.01 显著性水平 ,说明在 20 世纪 80—90 年代太湖流域年平均气温经历了一次明显的升温过程 ,这与姜彤等^[11]对长江流域气温的检测结果相吻合 ,Pettitt 法没有检测出太湖流域年降水量的突变现象。由表 5 可知 ,太湖流域春季和秋季的气温突变都发生在 1993 年 ,仅冬季的突变年份发生在 1985 年 ;年降水量在各季节的检测结果不一样 ,部分气候要素并没有检测出突变现象。

表 5 Pettitt 法检测出的太湖流域气候要素突变年份				
时段	降水量	平均气温	最高气温	最低气温
春季		1993 年	1993 年	1993 年
夏季				1993 年 *
秋季	1993 年 *	1993 年	1993 年	1993 年
冬季	1987 年 *	1985 年	1985 年	1985 年
年		1993 年	1993 年	1993 年

注 : * 代表显著性水平 0.05 ,其他的为 0.01。

对比 M-K 法和 Pettitt 法的结果发现 ,两种方法确定的突变年份有一部分是吻合的 ,尤其是 20 世纪 90 年代初年平均气温、最高气温和最低气温的突变现象 ,但用 Pettitt 法没有检测到年降水量的突变现象 ,而 M-K 法检测的结果表明太湖流域年降水量存在偏少到偏多然后再偏少的变化。M-K 法对于各气候要素在年和季节的检测结果差别较大 ,Pettitt 法对太湖流域夏季降水量、平均气温和最高气温的检测效果较差 ,其中对降水量的检测能力有限 ,主要是因为太湖流域降水量时空变异性强 ,且 1954—2006 年间变化波动性强。从两种方法所有的检测结果来看 ,Pettitt 法对于各气候要素的检测结果一致性更强。

4 未来气候情景分析

本文同时应用统计降尺度模型 SDSM 和动力降尺度模型 PRECIS ,对太湖流域日降水量、日最高和日最低气温进行降尺度处理。在进行未来气候变化分析时 ,国际上普遍使用 WMO 推荐的方法 ,选用 1961—1990 年作为基准期^[25] ,本文也采用这种方法。本文同时选取 A2 和 B2 两种情景进行未来气候变化的对比分析 ,其中 A2 情景代表人口较快增长的高排放情景 ,B2 情景倾向于区域可持续发展 ,与太湖流域未来发展规划最为接近 ;并建立流域未来 2021—2050 年的气候变化情景 ,对比分析统计降尺度和动力降尺度方法的模拟结果 ,为统计降尺度和动力降尺度技术的对比研究以及发展更高精度的

混合降尺度方法做初步尝试。

4.1 SDSM 模拟结果分析

SDSM 是以天气发生器和多元回归为基础的降尺度方法相结合而产生的一种统计降尺度模式,它通过使用多元线性回归方法建立预报因子和预报量之间的统计关系,SDSM 的详细介绍见文献[26-28]。SDSM 在太湖流域的应用结果参见文献[29]。

如表 6 所示,2021—2050 年湿日平均雨量在夏季和秋季表现为减少,冬季和春季增加,尤其秋季减少幅度明显,两种情景下的模拟结果显示,除了夏季结果变化相反,其他季节和年时间尺度上模拟变化趋势一致;A2 和 B2 情景下未来年平均降水量将大约减少 1%。最高气温和最低气温表现在年和每个季节的变化情景各不相同,A2 情景下未来时期(2021—2050 年)的年最高气温和最低气温变化分别较基准期升高 1.41℃和 1.09℃;B2 情景下年最高气温和最低气温则分别升高 1.29℃和 0.94℃。两种情景下各季节和年的最高最低气温相对基准期而言,变化幅度都在 1.0℃左右;其中冬季最高气温在两种情景下变化最显著,A2 和 B2 情景下未来时期(2021—2050 年)冬季最高气温变化分别为 2.09℃和 1.68℃;而最低气温在秋季的增加幅度更大,冬季次之。由此可知,太湖流域在 2021—2050 年的气温各季节和年的升温变化明显,其中冬季变化最显著,秋季次之。

表 6 SDSM 2021—2050 年季节和年尺度气候变化情景						
时段	湿日平均雨量变化/%		最高气温/℃		最低气温/℃	
	A2	B2	A2	B2	A2	B2
春	0.98	1.10	0.90	1.07	0.67	0.87
夏	0.15	-2.07	1.37	1.51	0.77	0.88
秋	-6.41	-5.44	1.48	1.10	1.61	1.20
冬	0.13	1.27	2.09	1.68	1.51	1.03
年	-1.02	-1.00	1.41	1.29	1.09	0.94

4.2 PREICIS 模拟结果分析

关于 PRECIS 在中国区域的模拟应用,前人已有很深入的研究,其结果表明 PRECIS 能够很好地模拟全国范围内的最高、最低地面气温的区域分布特征,对降水的模拟值偏高,但亦显示出很强的模拟极端降水事件的能力^[30-31]。PRECIS 在太湖流域的分布格点见图 1。文献[29]也已对 PRECIS 在太湖流域的适应性进行了评估,并指出 PRECIS 能较好地模拟太湖流域当前气候变化特征。

由表 7 可以看出,太湖流域 2021—2050 年 4 个季节的降水量比基准期都表现为增加,其中夏季增幅最大,春季最小。两种情景下秋季和年的变化幅度基本一致,A2 情景下模拟的冬季和春季降水变化

幅度大于 B2 情景下的变化幅度,但在夏季 B2 模拟增幅超过 A2。总体而言,太湖流域未来时期的降水量增加,A2 和 B2 情景下 2021—2050 年平均年降水量分别增加 13.46%和 11.94%,其中汛期(5—9 月)增加趋势较为明显。从季节的最高气温和最低气温变化情景结果来看,在两种情景下,秋季最高、最低气温变化显著,增温幅度较大;同类情景下,最高气温和最低气温增温幅度接近。A2 情景下太湖流域 2021—2050 年最高、最低气温变化分别为 1.53℃和 1.43℃,B2 情景下则为 1.10℃和 0.97℃。

表 7 PRECIS 2021—2050 年季节和年尺度气候变化情景						
时段	湿日平均雨量变化/%		最高气温/℃		最低气温/℃	
	A2	B2	A2	B2	A2	B2
春	8.82	0.58	1.44	0.94	1.29	0.86
夏	13.07	21.11	1.54	1.09	1.41	0.92
秋	15.91	16.12	1.76	1.33	1.72	1.07
冬	9.78	4.60	1.38	1.05	1.31	1.02
年	13.46	11.94	1.53	1.10	1.43	0.97

综上所述,无论采用何种降尺度技术,B2 情景下模拟的 2021—2050 年最高、最低气温变化情景比较接近,仅仅 SDSM 模拟的夏季和冬季最高气温变化情景结果比 PRECIS 的偏大,且最高气温增幅比最低气温的大。未来时期的最高、最低气温季节和年的变化情景增幅总体上比较一致,高排放情景 A2 下模拟生成的情景增温幅度较大,未来时期最高气温增加比最低气温明显,SDSM 模拟的结果中冬季增温最显著,而 PRECIS 则表现为秋季增温明显。两种降尺度技术生成的降水变化情景差异明显,PRECIS 模拟情景表明 2021—2050 年降水增加趋势明显,增幅较大;而 SDSM 模拟的未来时期降水存在一定的减少趋势,变化幅度相对较小。

5 结 论

a. 全球变暖背景下,太湖流域气温明显升高。20 世纪 90 年代以来,太湖流域发生突变式增温,冬、春季节尤为显著;1991—2006 年平均气温比多年平均高出约 0.7℃,1998—2006 年平均气温更是高出约 1.0℃,而且增温加速的趋势明显;太湖流域降水变化相对较复杂,60 年代中期到 70 年代中期处于少雨期,1983 年后降水开始增多,2002 年后年降水量又呈现明显下降趋势。

b. M-K 法检测突变显示:太湖流域年降水量 1954—1980 年经历了一次偏少到偏多的突变,之后经历了由偏多到偏少的过程,呈振荡性周期变化。Pettitt 法没有检测出太湖流域年降水量的突变现象,年平均气温、最高气温和最低气温在 1993 年发生突变。

c. PRECIS 和 SDSM 对太湖流域的气温模拟好于对降水的模拟。两种方法对于气温情景的模拟结果较接近,尤其是 B2 排放情景下的模拟结果基本一致,对于降水的模拟情景差别较大,具有很大的不确定性。比较而言,因数据精度较高,PRECIS 模拟结果更加合理,更能反映太湖流域气候变化极端事件。

d. 上述气候变化特征仅是 1954—2006 年间相关气象数据的统计分析结果,这些变化的物理机制及相互影响机理还待进一步研究。不过,20 世纪 90 年代以来太湖流域的气候变化,已在温度(升高)、降水(增加)以及洪水事件增多上有所反映;另外,对于各气候要素突变点的检测表明,检测方法不同,结果会存在一定差异,而且每种检测方法都有其不足之处。因此,要精确地确定气候要素的突变点,需要联合运用多种方法,并结合长期历史数据序列共同确定,这些问题将在下一步研究工作中进行深入探讨。

参考文献:

[1] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis, contribution of working group I to the third assessment report of the IPCC[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

[2] 秦大河. 气候变化的事实与影响及对策[J]. 中国科学基金, 2003, 17(1): 1-3.

[3] 秦大河, 陈振林, 罗勇, 等. 气候变化科学的最新认识[J]. 气候变化研究进展, 2007, 2(2): 63-73.

[4] 张建云, 章四龙, 王金星, 等. 近 50 年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(2): 230-234.

[5] 张建云, 王国庆, 杨扬, 等. 气候变化对中国水安全的影响研究[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(5): 290-295.

[6] 孙颖, 丁一汇. 未来百年东亚夏季降水和季风预测的研究[J]. 中国科学 D 辑, 2009, 39(11): 1487-1504.

[7] 江善虎, 任立良, 雍斌, 等. 气候变化和人类活动对老哈河流域径流的影响[J]. 水资源保护, 2010, 26(6): 1-4.

[8] 秦年秀, 陈喜, 薛显武, 等. 气候变化对乌江流域水文水资源的影响[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2011, 39(6): 623-628.

[9] 李吉顺, 王昂生, 陈家田. 降水时空分布变化是长江流域水旱灾害加重的主要原因[J]. 中国减灾, 1999, 9(4): 27-30.

[10] 王张华, 陈中原, 寇莹, 等. 太湖流域公元 960 年以来的气候干湿变化研究[J]. 地理科学, 2002, 11(5): 546-551.

[11] 姜彤, 苏布达, 王艳君, 等. 四十年来长江流域气温、降水与径流变化趋势[J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(2): 65-68.

[12] 秦年秀, 姜彤, 许崇育. 长江流域径流趋势变化及突变分析[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(5): 589-594.

[13] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945, 13: 245-259.

[14] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 62-76.

[15] XU Z X, TAKEUCHI K, ISHIDAIRA H. Long-term trends of annual temperature and precipitation time series in Japan[J]. Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering, 2002, 20(2): 11-26.

[16] PETITIT 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] 尹义星, 许有鹏, 陈莹. 1950—2003 年太湖流域洪旱灾害变化与东亚夏季风的关系[J]. 冰川冻土, 2010, 32(2): 381-388.

[18] 王同生. 太湖流域防洪与水资源管理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.

[19] 赵晶, 王乃昂. 近 50 年来兰州城市气候变化的 R/S 分析[J]. 干旱区地理, 2002, 25(1): 90-95.

[20] 车慧正, 张小曳, 李杨, 等. 近 50 年来城市化对西安局地气候影响的研究[J]. 干旱区地理, 2006, 29(1): 53-58.

[21] 周寅康, 张捷, 王腊春, 等. 长江下游地区近五百年洪涝序列的 R/S 分析[J]. 自然灾害学报, 1997, 6(2): 177-182.

[22] 王孝礼, 胡宝清, 夏军. 水文时序趋势与变异点的 R/S 分析[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2002, 35(2): 10-12.

[23] 张利平, 王德智, 夏军, 等. R/S 分析在洪水变化趋势预测中的应用研究[J]. 中国农村水利水电, 2005(2): 38-40.

[24] GE Q S, GUO X F, ZHENG J Y, et al. Meiyu in the middle and lower reaches of the Yangtze River since 1736[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(1): 107-114.

[25] 刘兆飞, 徐宗学. 基于统计降尺度的渭河流域未来日极端气温变化趋势分析[J]. 资源科学, 2009, 31(8): 1573-1580.

[26] WILBY R L, DAWSON C W, BARROW E M. SDSM: a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts[J]. Environmental Modelling & Software, 2002, 17(2): 145-157.

[27] WILBY R L, DAWSON C W. Using SDSM Version 4.2: a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts[EB/OL]. [2011-03-25]. <http://copublic.lboro.ac.uk/cocwd/SDSM/SDSMManual.pdf>

[28] HAYL E, CLARK M P. Use of statistically and dynamically downscaled atmospheric model output for hydrologic simulations in three mountainous basins in the western United States[J]. Journal of Hydrology, 2003, 283(1/2/3/4): 56-75.

[29] 刘浏, 徐宗学, 黄俊雄. 2 种降尺度方法在太湖流域的应用对比[J]. 气象科学, 2011, 31(2): 160-169.

[30] 许吟隆, JONES R. 利用 ECMWF 再分析数据验证 PRECIS 对中国区域气候的模拟能力[J]. 中国农业气象, 2004, 25(1): 5-9.

[31] 张勇, 许吟隆, 董文杰, 等. SRES B2 情景下中国区域最高、最低气温及日较差变化分布特征初步分析[J]. 地球物理学报, 2007, 50(3): 714-723.

(收稿日期: 2011-06-03 编辑: 熊水斌)