

洞庭湖流域气候变化特征(1961–2003年)*

王国杰^{1,2,3}, 姜彤^{1,2}, 王艳君^{1,3}, 俞肇元⁴

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

(2: 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081)

(3: 中国科学院研究生院, 北京 100039)

(4: 南京师范大学, 南京 210097)

摘要:以 22 个气象站 1961–2003 年的气象观测数据为基础, 对洞庭湖流域的气温、降水和参照蒸散量进行趋势与突变分析。从 1970 年开始, 洞庭湖流域经历了一个缓慢而稳定的增温过程, 1990s 发生突变进入快速增温时期; 尤其是在春、冬季节, 这种突变式的增温特征非常显著; 秋季持续而稳定增温, 而夏季气温并无明显变化。进入 1990s, 洞庭湖流域降水有明显增多, 尤其是夏季降水突变式增加; 与此同时, 夏季暴雨频率也突变式增大, 但是暴雨强度并无明显变化。1960s 迄今, 参照蒸散量持续而稳定的减少, 夏季减少量尤为显著。全球变暖的区域响应, 驱动洞庭湖流域水循环速度加快, 夏季降水增多, 而蒸发能力减弱, 这是 1990s 洞庭湖流域洪水频发的主要气候因子。

关键词:气候变化; 趋势; 突变; 洞庭湖流域

Characteristics of climate change in the Lake Dongting Basin (1961–2003)

WANG Guojie^{1,2,3}, JIANG Tong^{1,2}, WANG Yanjun^{1,3} & YU Zhaoyuan⁴

(1: *Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, P. R. China*)

(2: *Key Laboratory of Climate Change Research, China Meteorological Administration, Beijing 100081, P. R. China*)

(3: *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, P. R. China*)

(4: *Nanjing Normal University, Nanjing 210097, P. R. China*)

Abstract: This paper has detected the trends and abrupt changes of climate changes in Lake Dongting basin in the past 40 years based on observed data of 22 meteorological stations. Lake Dongting basin had undergone a slow but steady increase of temperature since 1970s, but a significant increase with abrupt change has been detected since 1990s, especially in spring and winter; while in summer, the temperature has changed little. A positive and abrupt trend of precipitation in summer as well as its storm frequency has been well detected in 1990s; on the contrary, hardly has the storm density changed. The reference evapotranspiration has decreased steadily and obviously since 1960s; and in summer the decrease is of much more significance. The accelerated water circulation driven by global warming-up has brought the Lake Dongting basin more precipitation in summer, but the reference evapotranspiration has decreased at the same time, as is the main climatic contributor to the frequent floods in summer in 1990s.

Keywords: Climate change; trend; abrupt change; Lake Dongting basin

长江流域洪水灾害是我国为患最为严重的自然灾害。20 世纪 90 年代以来, 长江流域洪水灾害呈现不断加剧的趋势^[1]。长江流域特殊的洪水形势是特定气候条件和特殊的人类活动共同作用的结果。洞庭湖流域是长江流域全球气候变化极为显著的区域, 也是洪涝灾害最为严重的区域。1990s 是全球近千年最温暖的时期, 这个时段洞庭湖流域出现了 1991、1993、1995、1996、1998、1999、2002 年 7 次大洪水, 达到 2 年 1

* 中国科学院南京地理与湖泊研究所知识创新工程所所长专项基金(S220007)。中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-331)、中国气象局气候变化专项(CCSF2005-2-QH4)联合资助。2005-08-02 收稿; 2006-01-11 收修改稿。王国杰, 男, 1976, 博士研究生; E-mail: wgjie1976@163.com.

次的高频率^[2],而且多数在上游没有洪峰下泄的情况下以自身暴雨的形式致灾. 气候变暖与洪水加剧之间的动力机制问题,尤其在当前持续升温的气候条件下,已成为一个亟需解决的科学问题. 根据 IPCC 预测结果,全球变暖驱动陆地和海洋的水循环加强,为降水量的增加创造了条件;同时,也会改变降水分布的时空格局,引发旱涝等自然灾害^[3]. 而气候研究洞庭湖流域气候变化的特征,对于认识洞庭湖流域气候变化对洪水致灾机理的影响具有重要理论意义,目前尚缺乏相关研究.

1 数据来源

研究选用洞庭湖流域 22 个气候资料国际交换站的日平均气温和降水数据,由中国气象局国家气象信息中心气象资料室提供. 文中采用的 22 个气象站的空间分布如图 1. 由于部分站点在 1950s 后半期才开始有资料记录,为了时间序列的统一,所用数据时段为 1961. 1. 1-2003. 12. 31. 本项研究采用 Von Neumann ratio (N), Cumulative deviations ($Q/n^{-0.5}, R/n^{-0.5}$) 和 Bayesian procedures (U, A) 统计量^[4]的方法,在 95% 置信度下对研究中所选用的 22 个气象站实测数据进行均一性检验.

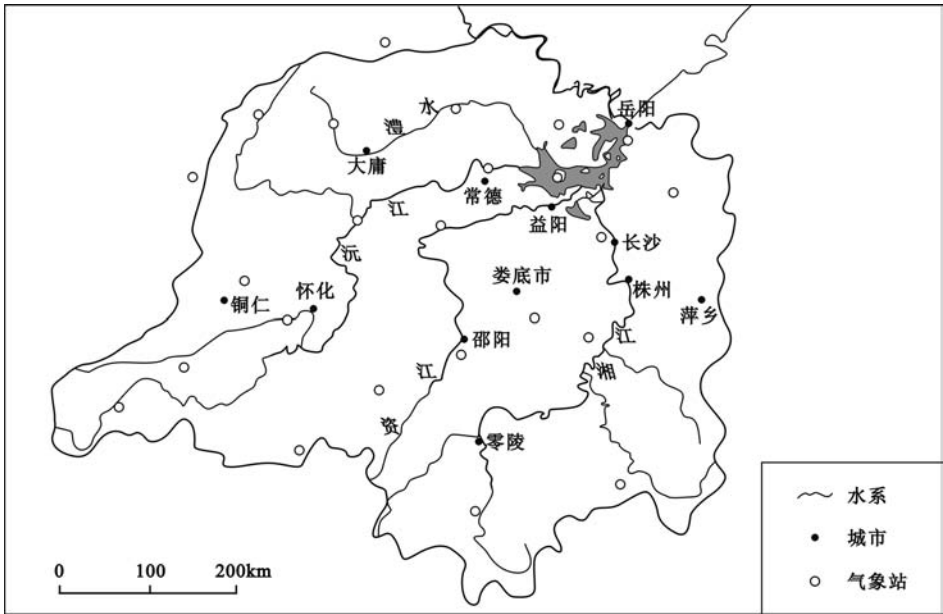


图 1 洞庭湖流域气象站点分布

Fig. 1 The location of observatory stations in the Lake Dongting basin

2 研究方法

本文侧重考察洞庭湖流域气温、降水与参照蒸散量近 40 年来的变化趋势与突变现象. 降水中暴雨的计算以日降雨超过 50 mm 作为阈值,以暴雨出现的天数作为暴雨频率,单次暴雨中的降水量作为暴雨强度. 参照蒸散量 (ET_r) 由联合国粮农组织推荐使用的彭曼-蒙特斯(Penman-Monteith)公式计算^[5,6]:

$$ET_r = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (1)$$

式中, ET_r 为参照蒸散量 (mm/d), Δ 为饱和水汽压-温度曲线斜率 [$\text{kPa}/^\circ\text{C}$], γ 为干湿表常数 ($\text{kPa}/^\circ\text{C}$), R_n 为地表净辐射 ($\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$), G 为土壤热通量 ($\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$), T 为 2 m 高度的平均气温 ($^\circ\text{C}$), u_2 为 2 m 高度的风速 (m/s), e_s 为饱和水汽压 (kPa), e_a 为实际水汽压 (kPa).

时间序列趋势检测采用 Mann-Kendall 秩相关分析方法,该方法因其适合于水文、气象等非正态数据,受

到世界气象组织推荐并广泛应用^[7]. 由于自然要素与人类活动在不同的时空尺度上的复杂耦合机制, 气候系统表现为高度非线性的行为特征. 1980s 发展起来的奇异谱分析 (SSA, Singular Spectrum Analysis) 方法, 以重构相空间为基本手段, 通过经验正交函数 (EOF) 提取序列主要成分, 为分析貌似随机的复杂非线性时间序列提供了有效途径^[8-10]. SSA 较一般的功率谱而言, 序列波形无需正弦假定, 而且对信号有强化放大作用, 特别适合探索非线性系统中的弱信号, 因而在识别气候、水文等地学变量的周期振荡和历史趋势方面获得广泛应用^[11-13]. 文中以 10a 为嵌入维数, 通过重建序列趋势项消除数据噪音.

突变的检测基于 CUSUM (cumulative sum) 统计量进行. 传统的 CUSUM-chart 方法, 并不能判定突变发生的准确时间. 本文基于 CUSUM 统计量初步判定突变点产生的可能区间, 并根据均方误 (Mean Square Error) 均方误最小原则判定突变点, 显著性水平检验采用“解靴” (bootstrap) 算法^[14].

3 结果与分析

3.1 气温变化

对洞庭湖流域年与季气温序列做奇异谱分析, 重建趋势项并对其进行趋势与突变检验, 检验结果如表 1 和图 2. 1970a 以来, 洞庭湖流域先是经历了一个缓慢的增温过程, 并于 1989a 发生突变式增温, 进入快速增温时期. 1990a 以来的 10 余年间, 较 1990a 之前 30 年增加了 0.36°C, 而 1998a 以来则较 1990a 之前 30 年增加了 0.65°C, 增温趋势明显加强. 春、秋、冬 3 季都有明显的增温过程. 春季温度在 1990s 以前并没有发生显著变化, 1993a 发生突变后开始快速增温. 夏季气温比较平稳, 没有明显的趋势变化. 秋季增温则持续而稳定, 但是增幅不大. 冬季先是经历了一个缓慢的增温过程, 并于 1989a 发生突变快速增温. 可以认为, 1970s - 1980s 洞庭湖流域缓慢增温, 主要由秋、冬季节缓慢的增温过程决定; 而 1990s 的快速增温, 则由春、冬季节的突变式增温过程决定.

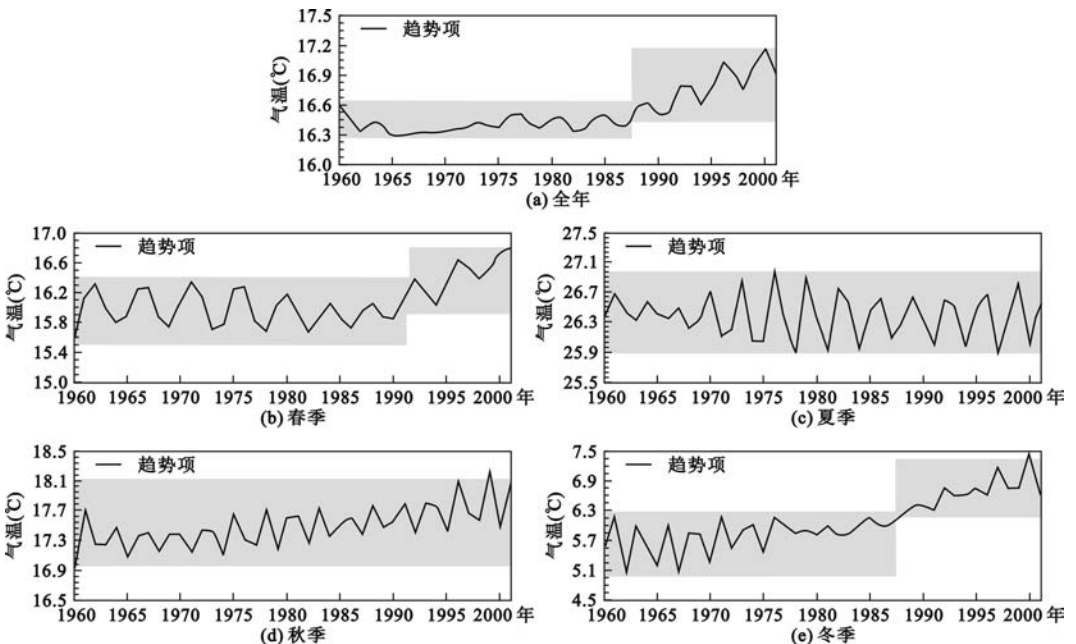


图 2 洞庭湖流域气温变化趋势与突变 (阴影标志序列结构的一致性)

Fig. 2 The trends and abrupt changes of temperature in the Lake Dongting basin

(Shady area donotes the coherency of times structure)

表1 洞庭湖流域气温变化主要统计量

Tab. 1 The main statistics of temperature change in the Dongting Lake basin

时段	均温(°C)		重建趋势项	MK	显著性水平	突变	显著性水平
	1961年-1990年	1991年-2003年	方差贡献率(%)	统计量	(%)	年份	(%)
春季	16.01	16.35	99.80	2.89	99.61	1993	100.00
夏季	26.46	26.39	99.96	-0.48	36.98	-	-
秋季	17.51	17.75	99.98	4.20	99.99	1989	100.00
冬季	5.83	6.79	98.01	5.79	99.99	1989	100.00
全年	16.46	16.82	99.40	5.53	99.99	1989	100.00

3.2 降水变化

在分析年均降水变化的基础上,重点探讨与洪水有密切关系的夏季降水变化特征,检验结果如表2和图3。洞庭湖流域年降水有明显增加,尤其是1988a以来,这种增加的趋势尤为明显。夏季降水在1989a之前的30年里比较稳定,没有明显的增加趋势,但是自1989a开始突变式的增加趋势非常显著;1990a后的10余年间,夏季降水较之前的30a增加了60mm。1960a迄今,暴雨在夏季降水中的比率持续而稳定地增大。夏季暴雨强度并没有显著的趋势,但是暴雨频率在1989a突变式的增加非常显著。因此可以认为,1990a以来洞庭湖流域夏季暴雨的增加,主要是由暴雨频率增加引起。

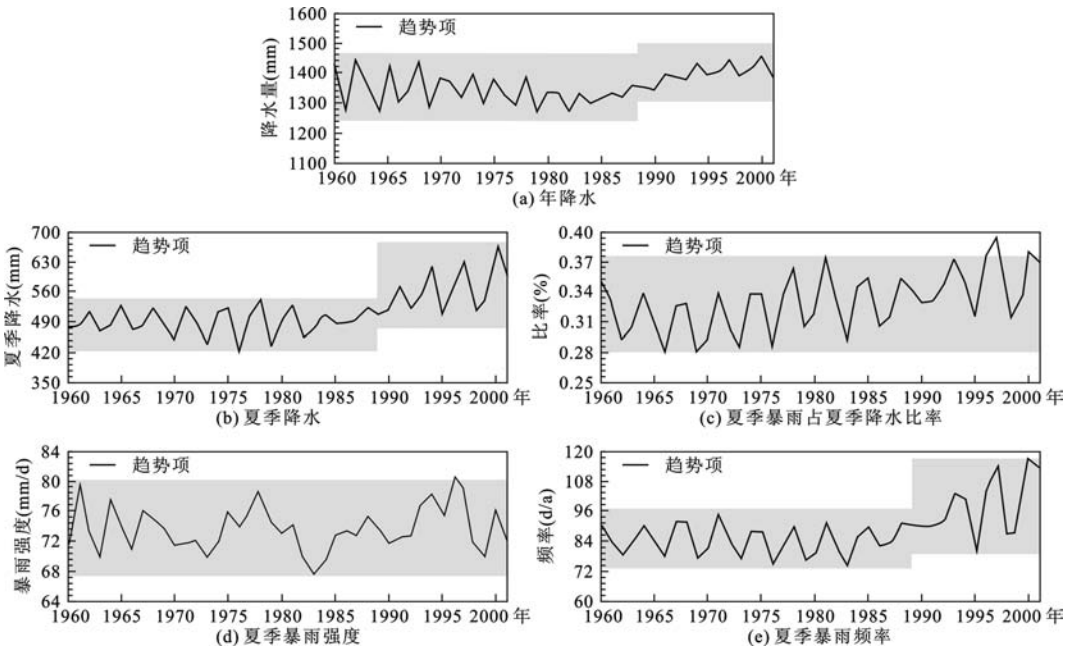


图3 洞庭湖流域降水变化趋势与突变(阴影标志序列结构的一致性)

Fig. 3 The trends and abrupt changes of precipitation in the Lake Dongting basin

(Shady area donotes the coherency of times stucture)

3.3 参照蒸散量变化

参照蒸散量序列中没有检测到突变现象,其主要统计量见表3。洞庭湖流域年参照蒸散量的减少的趋势非常明显,MK统计量达-2.81,显著性水平达到99%;1990s参照蒸散量较之前30a平均减少了26mm。夏季参照蒸散量减少的趋势非常显著,其MK统计量达-4.07,显著性水达到99%;1990s参照蒸散量较之

前30a平均减少了30 mm. 春、秋、冬季参照蒸散量没有明显的变化趋势. 与气温和降水序列的变化不同, 洞庭湖流域参照蒸散量的变化不存在突变特征, 其减少趋势持续而且稳定.

表2 洞庭湖流域降水变化主要统计量

Tab. 2 The main statistics of precipitation change in the Dongting Lake basin

时段	均温(°C)		重建趋势项 方差贡献率(%)	MK 显著性水平 统计量 (%)	突变 年份	显著性水平 (%)
	1961年-1990年	1991年-2003年				
全年(mm)	1339	1402	98.80	2.06	1988	98.00
夏季(mm)	480	553	96.45	3.05	1989	99.00
夏季暴雨占夏季 降水的比率(%)	32.2	35.0	95.41	2.67	-	-
夏季暴雨强度 (mm/d)	73.3	69.6	98.60	0.92	-	-
夏季暴雨频率 (d/yr)	84.0	89.9	96.20	1.81	1989	92.00

表3 洞庭湖流域参照蒸散量变化主要统计量

Tab. 3 The main statistics of reference evapotranspiration change in the Dongting Lake basin

时段	均温(°C)		重建趋势项 方差贡献率(%)	MK 统计量	显著性水平 (%)
	1961年-1990年	1991年-2003年			
全年	1042.0	1015.6	99.68	-2.81	99.51
春季	259.3	261.1	99.68	0.27	22.20
夏季	430.7	400.7	99.54	-4.07	99.99
秋季	235.4	235.4	98.34	-0.67	50.80
冬季	117.76	118.9	96.78	0.56	61.14

4 结论

(1) 1970s开始, 全球气候开始转暖, 我国的增温速度明显高于全球平均速度^[15]. 在这个大背景下, 洞庭湖流域也于1970s开始经历了一个缓慢的增温过程. 进入1990s以来, 洞庭湖流域发生突变式增温, 冬、春季节尤为显著; 年均温较1990a之前的30a里温度增高0.36°C, 而且有增温加速的趋势. 秋季增温持续而稳定, 但是增温幅度不大; 而夏季没有增温趋势. 可以认为, 全球变暖在洞庭湖流域表现出明显的区域响应特征, 并且表现为低温增高、高温持平的特点.

(2) 1990a以来, 洞庭湖流域降水有明显增多的趋势, 夏季降水的增加尤为显著. 1990a以来夏季降水较之前30a增加了60 mm, 个别年份甚至达到200 mm. 与此同时, 暴雨在夏季降水中的比率也不断加大. 夏季暴雨强度没有增加, 而暴雨频率增加明显, 这是整个长江流域普遍存在的特点, 而在洞庭湖流域表现尤为显著. 1989a暴雨频率的突变式增大, 是洞庭湖流域1990s洪水频发的重要贡献因子.

(3) 随着气温不断升高, 参照蒸散量持续而稳定地降低, 尤其是夏季减少的趋势非常显著, 但是没有明显的突变现象. Hu Q^[16]等研究认为, 长江流域参照蒸散量下降的原因, 主要是太阳净辐射和风速的显著下降, 抵消了气温上升所引起的参照蒸散量的上升, 反而使参照蒸散量表现为下降趋势.

(4) 全球变暖背景下, 洞庭湖流域气温明显升高; 尤其是1990s突变式的增温过程, 驱动水循环急剧加快; 夏季降水尤其是暴雨明显增多, 而蒸发能力不断减弱, 无疑增大了洪水风险, 这是1990s洞庭湖流域夏季洪水频繁爆发的主要气候因子. 除受气候变化的影响, 洞庭湖流域洪水增加也与人类活动对下垫面的改造活动有着密切的关系, 如湖泊围垦导致洞庭湖蓄洪能力减弱^[17]、人类对下垫面的改造导致不透水地面的增长等.

5 参考文献

- [1] 姜 彤,施雅风. 气候变化、长江洪水与可能损失. 地球科学进展,2003,(2):277-284.
- [2] 李景保,杨 艳,许树辉. 洞庭湖区 1990-2000 年大洪涝灾害特点及成因分析. 湖南师范大学学报(自然科学版),2001,24(4):90-94.
- [3] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. In: Houghton J T, Ding Yihui, Griggs D *et al* eds. Summary for Policy Makers and Technical Summary of Working Group I Report. Cambridge: Cambridge University Press,2001.
- [4] Buishand T A. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of Hydrology*, 1982, 58:11-27.
- [5] 邱新法,曾 燕,刘昌明. 陆面实际蒸散研究. 地理科学进展,2003,22(2):118-124.
- [6] Doorenbos J, Pruitt W O. Guidelines for predicting crop water requirements, Irrigation and Drainage Paper 24, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1975:179.
- [7] Su B D, Xiao B, *et al*. Trends in frequency of precipitation extremes in the Yangtze River basin, China: 1960-2003. *Hydrological Sciences Journal*, 2005, 50(3):479-490.
- [8] Golyandina N, Nekrutkin V, Zhigljavsky A. Analysis of time series structure:SSA and related techniques. New York:Hapman & Hall/CRC,2001:1-305.
- [9] Elsner J B,Tsonis A. Singular spectral analysis-a new tool in time series analysis. New York:Plenum Press, 1996:1-163.
- [10] Vautard R, Ghil M. Singular spectrum analysis in nonlinear dynamics, with applications to paleoclimatic time series. *Physica D*, 1989, (35):395-424.
- [11] 刘 禹,Shishov V,史江峰等. 内蒙古西部贺兰山和东部白音敖包未来 20 年降水趋势预测. 科学通报, 2004,49(3):270-274.
- [12] 段克勤,姚檀栋,蒲健辰. 喜马拉雅山中部过去约 300 年季风降水变化. 第四纪研究,2002,22(3):236-242.
- [13] Mann M E, Lees J M . Robust estimation of background noise and signal detection in climatic time series. *Climatic Change*, 1996, (33):409-445.
- [14] Michael B C. Determining the Time of a permanent shift in the process mean of CUSUM control charts. *Quality Engineering*, 2005,17(1):87-93.
- [15] 左洪超,吕世华,胡隐樵. 中国近 50 年气温及降水的变化趋势分析. 高原气象,2004,23(2):239-244.
- [16] Hu Q. Centennial variations and recent trends in summer rainfall and runoff in the Yangtze River Basin, China. 湖泊科学, 2003, 15(增刊):97-104
- [17] 姜加虎,黄 群. 洞庭湖近几十年来湖盆变化与冲淤特征. 湖泊科学,2004, 16(3):210-214.