

鄱阳湖流域气候变化特征及其对径流的驱动作用^①

叶许春^{1,2}, 刘健³, 张奇², 杨勋林¹

1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715;

2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008;

3. 山东省水利科学研究院, 水资源与环境重点实验室, 济南 250013

摘要: 以 1960—2007 年鄱阳湖流域 14 个国家气象站的气象监测资料以及“五河”水系中 5 个水文监测站的径流资料为基础, 采用 Mann-Kendall 检验法分析了流域气温、降水、潜在蒸发以及径流的变化趋势, 在此基础上, 通过建立降水和潜在蒸发对径流的驱动模型, 定量分析了不同年代气候变化对赣江、信江以及抚河径流变化的影响. 研究表明, 1960—2007 年鄱阳湖流域气温升高, 降雨增加, 潜在蒸发量却呈长期的下降趋势, 径流变化过程与降雨过程总体一致, 但不同时期各站点变化趋势差异较大. 气候变化对径流的驱动作用表明, 相对于流域 1960s 的气候条件, 其他年代气候变化均起着增大径流的作用, 其中气候变化驱动作用最大的 1990s 导致径流增加 194.3~321.3 mm, 最小的 2000s 导致径流增加 32.7~106.5 mm. 此外, 受不同年代流域降雨变率以及流域调蓄作用影响, 1970s 和 1990s 气候变化导致的径流增量以信江为最, 而 1980s 和 2000s 则是赣江最大.

关键词: 气候变化; 趋势分析; 径流; 蒸发率函数; 鄱阳湖流域

中图分类号: P343.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2014)7-0103-07

鄱阳湖流域气候变化在长江流域中比较突出, 流域水旱灾害频繁, 是长江中下游水旱灾害的重灾区和多发区^[1-2]. 鄱阳湖接纳流域“五河”径流补给, 五河入湖径流量是影响湖泊水量平衡的主要要素. 近年来鄱阳湖干旱和洪水并存、频发, 影响因素之一是流域来水量的变化. 水文监测数据表明, 自上个世纪 60 年代以来鄱阳湖流域径流量总体呈增长趋势, 其中以 1990s 年代流域径流量增加最为突出^[3]. 流域径流量自 1998 年发生反转以后, 鄱阳湖流域迅速进入了降水偏少的贫水期^[4]. 尽管鄱阳湖流域径流变化还受到流域内人类活动作用如土地利用/覆被变化、水利工程建设以及工农业用水等因素叠加效应的影响, 但气候波动很可能是对流域水循环产生影响的主导因素^[5-7]. 随着近 50 年来鄱阳湖“五河”流域降水时间分布不均匀情况的加剧, 导致区内旱涝灾害的风险也在增加^[8].

气候变化将改变流域水资源的时空分布, 并影响区域社会经济的可持续发展和生态安全的维护^[9-10]. 分析气候变化及其对区域水资源的影响, 对于区域水资源的优化利用、调度和管理具有重要的意义. 本文旨在通过对鄱阳湖流域气温、降水、潜在蒸发的年际变化以及流域径流的时空变化特征的分析, 了解鄱阳湖流域水文水资源的时空变化规律及其对气候变化响应的区域差异, 为未来水资源合理调配和使用提供科学依据.

① 收稿日期: 2012-11-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41201026); 国家重点基础研究发展计划(2012CB417003)联合资助.

作者简介: 叶许春(1982-), 男, 安徽潜山人, 博士, 副教授, 主要从事水文水资源变化研究及流域水文过程的模拟.

1 数据和方法

1.1 研究区概况及基础数据

鄱阳湖流域位于长江中下游,流域面积 16.2 万 km²,年平均径流量 1 450 亿 m³.该流域三面环山,北邻长江,赣江、抚河、信江、饶河、修水分别从南、东、西三面向北汇入鄱阳湖,构成山江湖为一体的核心—边缘结构体系(图 1).鄱阳湖流域地属亚热带湿润季风气候,降水丰富,多年平均气温 17.5 ℃,多年平均降雨量为 1 664 mm.区内河系众多,降雨径流时空分布不均,年内、年际变化明显,具有明显的季节性和区域性.

研究数据包括:(1)鄱阳湖“五河”水系 5 个主要水文控制站 1960—2007 年的实测日径流量数据,各站分别是:赣江外洲站(集水面积 80 948 km²),抚河李家渡站(集水面积 15 811 km²),信江梅港站(集水面积 15 535 km²),饶河水系的虎山站(集水面积 6 374 km²)以及修水水系的万家埠站(集水面积 3 548 km²);(2)流域 14 个国家气象站 1960—2007 年逐日资料,包括日降雨、最高气温、最低气温、日照时数、风速、相对湿度和气压等.以上数据分别获自于长江水利委员会水文局和中国气象局国家气象信息中心气象资料室.各站点位置见图 1.

1.2 研究方法

1) Mann-kendall 趋势分析及突变检验
MK 检验法是世界气象组织推荐并

已广泛使用的非参数检验方法,已被广泛应用于气候和水文序列的趋势分析和突变检验,具体算法参见文献[11].需要指出的是 MK 法检测到的趋势序列上的各点值为从起始年至该年的平均趋势,而不是某年相对于其前一年的趋势.另外,该方法检测到的突变为“均值突变”,它反映的是序列特征平均值的变化.

2) 气候变化对径流的驱动模型

气候变化导致降雨和潜在蒸发能力改变,从而引起流域水文水资源发生相应的变化.基于流域的水量平衡,Zhang 等^[12]指出流域多年平均蒸散发很大程度上是由降雨和潜在蒸散发决定的,并提出如下的蒸发率函数:

$$\frac{E}{P} = \frac{1 + \omega(E_0/P)}{1 + \omega(E_0/P) + (E_0/P)^{-1}}$$

(1)

式中: P, E, E_0 分别为流域降雨、实际蒸发和潜在蒸发量.其中,流域实际蒸发量可用水量平衡方法计算,即降雨减径流($ET = P - Q$),潜在蒸发量由彭曼公式^[13]计算. ω 是植被有效水系数,表示不同植被利用土壤水的相对差异(表现为植被根系深度的不同),与流域的植被覆盖和类型有关.

已知气候变化引起降水和蒸发的变化情况时,可以采用干燥指数来模拟多年河川径流的变化.基于蒸发率函数,气候变化引起的流域多年平均径流的改变量可由如下公式表示^[14]:

$$\Delta Q^{\text{clim}} = \beta \Delta P + \gamma \Delta E_0$$

(2)

式中: $\Delta Q^{\text{clim}}, \Delta P$ 和 ΔE_0 分别是径流、降雨和潜在蒸散发的改变量. β 和 γ 是径流对降雨和潜在蒸散发的敏

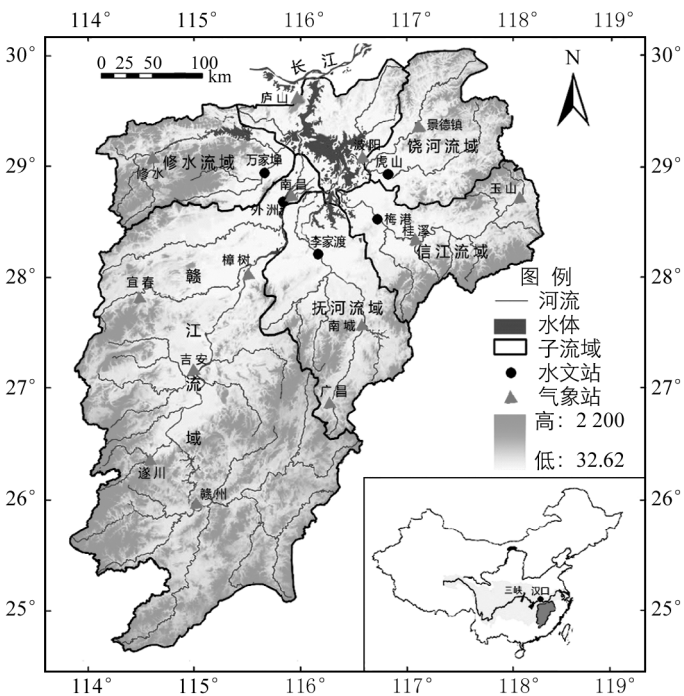


图 1 鄱阳湖流域位置及主要水文、气象站点分布

感性参数. 其中 β 、 γ 可用如下公式来计算^[15]:

$$\beta=\frac{1+2x+3wx}{(1+x+wx^2)^2}\tag{3}$$

$$\gamma=-\frac{1+2wx}{(1+x+wx^2)^2}\tag{4}$$

式中: x 是干燥系数, 即 E_0/P .

为分析气候变化对径流的驱动作用, 我们以 1960—1969 年的气候和径流条件为基准, 从而计算其他年代气候变化对鄱阳湖流域及其子流域径流的影响. 其中, 流域平均径流的计算采用各水文监测站径流及其控制面积的加权平均值, 所有径流均以径流深计.

2 结果分析

2.1 鄱阳湖流域气温及降雨和潜在蒸发的变化趋势

近 50 年来, 流域年平均气温的变化区间为 16.7℃~19.2℃, 多年平均值为 17.5℃. 气温的变化总体上经历了一个先下降后上升的过程(图 2a、b). 年均气温在 1960s 中后期下降明显, 并在 1970—1985 年间达到显著性水平, 之后下降趋势减缓. 流域气温在 1997 年发生转折以后呈上升趋势, 并于 2001 年发生突变(图中 Uf-UB 曲线交叉处). 2003 年流域气温的上升趋势达到显著, 并且上升趋势至今未减. 根据气温资料的统计结果可知, 2000—2007 年间鄱阳湖流域年均气温达 18.1℃, 为近 50 年来最高.

流域年降雨量的变化区间为 1 136.4~2 195.3 mm, 多年平均值为 1 664.7 mm. 流域降雨量在不同年代间波动较大, 其中降雨量在 1960s 和 1980s 相对偏少, 而 1970s 和 1990s 相对偏多, 2000 年后降雨量又明显减小(图 3c). 年降雨量时间变化的 MK 趋势检验显示, 1969 年前流域降雨量呈下降趋势, 自 1969 年开始呈现上升趋势且于同年发生突变, 1969—1991 年间上升趋势缓慢, 之后降雨在 1990s 上升趋势加剧, 并于 1999—2002 年间达到显著性水平(图 3d).

流域年潜在蒸发量的变化过程区间为 914.3~1 209.4 mm, 多年平均值为 1 052.5 mm. 潜在蒸发量的年际变化过程总体呈下降趋势, 与降雨变化趋势相反(图 3e). MK 检验表明, 流域潜在蒸发自 1969 年开始进入长期的下降趋势并于同年发生突变, 1975 年下降趋势达到显著性水平, 1992 之后潜在蒸发的下降趋势有所加剧, 并于 2002 年达到最大(图 3f), 随后有所减缓, 但仍显著.

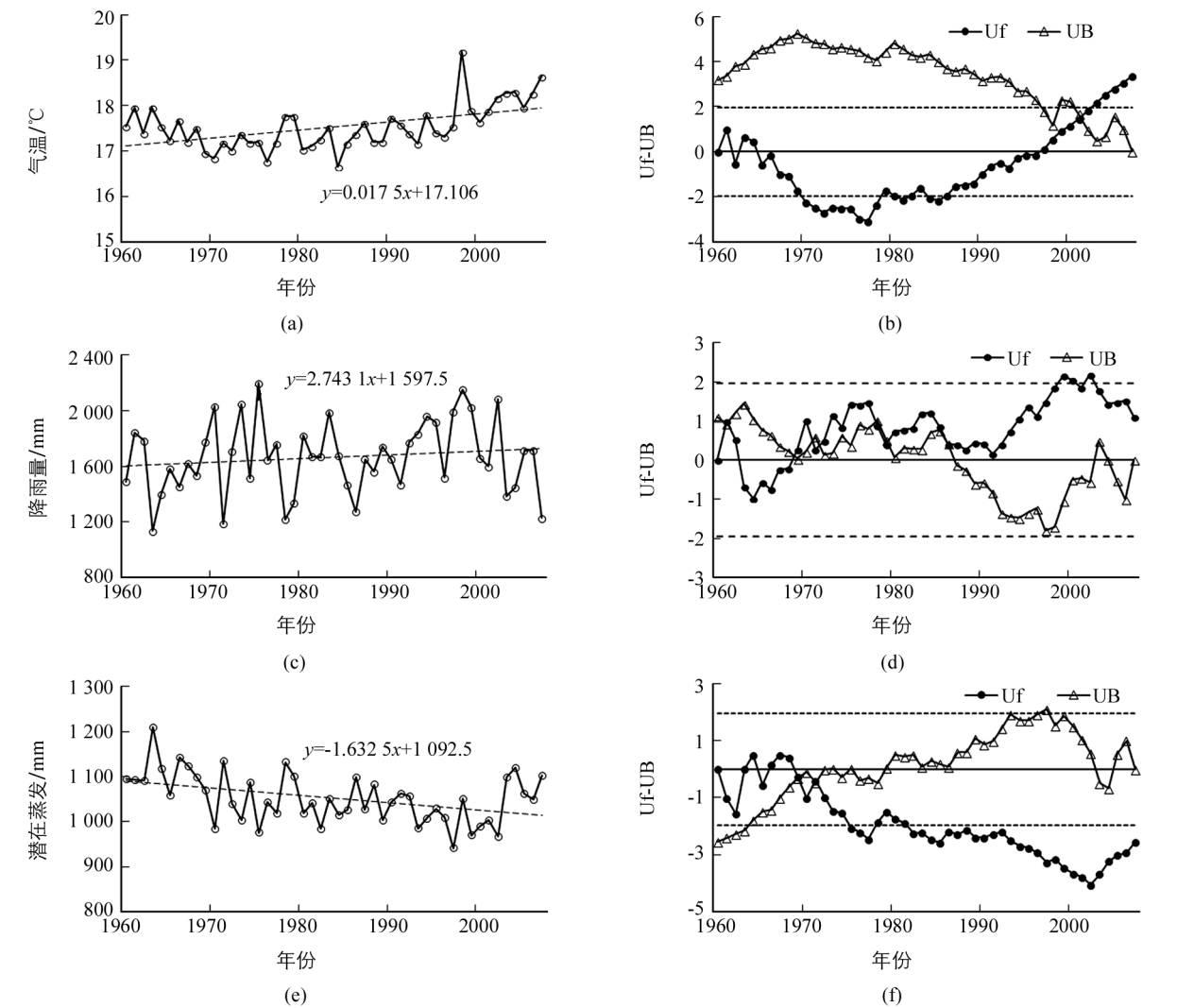
2.2 鄱阳湖流域水资源时空变化

气候变化对水资源的直接影响就是改变径流的大小及其空间分布. 从鄱阳湖流域近 50 年地表径流的变化过程看(图 3), “五河”径流变化具有一定相似性, 但也存在差异.

不同年代鄱阳湖“五河”水系主要监测站径流总体呈现出“增加—降低—增加—降低”的变化过程. 1960s 和 2000 年后的流域径流量总体较小, 1980s 次之, 而 1970s 和 1990s 是流域径流量相对较大的时期. 统计显示, 各站径流在 1990s 增加最为突出, 达到近几十年来的最大, 尤其以饶河和信江为最, 其分别在 1980s 的基础上增加 36.4%和 25.3%, 最小的抚河增加了 7.1%. 2000 以来, 河流径流均明显减小, 其中抚河李家渡站和饶河虎山站径流量均小于 1960s 水平. 就径流年际变化的波动特征而言, 五站径流变差系数(C_v)分别为 0.28, 0.33, 0.36, 0.32 和 0.35, 表明赣江外洲站径流年际变化的波动性是五河中最小的, 而抚河李家渡站最大.

图 3 显示了 1960—2007 年间鄱阳湖流域“五河”水系主要控制站径流深度年际变化的趋势检测结果, 其总体变化过程与流域降雨的变化过程基本一致. 由图可知, 外洲站径流在 1960s 主要表现出下降趋势, 自 1972 开始呈上升趋势, 但在 1992 年之前径流变化不明显, 1992 年之后径流量增加趋势较明显, 但未达到显著性水平. 信江梅港站年径流呈长期的上升趋势, 其在 1970 达到显著性水平, 之后增加趋势减缓, 1990s 径流增加趋势又加剧, 并在 1999—2002 年间达到显著性水平. 抚河李家渡站年径流量总体上无明显

变化趋势,该站径流 1990s 增加缓慢,并且在 1987—1996 年间呈下降趋势,与其余站点 1990s 径流的明显增加趋势形成对比.修水潦河的万家埠站和饶河昌江的虎山站径流变化趋势相同,自 1960s 末以来两站径流总体呈上升趋势,并在 1970s 中期超过 95%的置信水平,之后上升趋势有所减缓.1990s 初以来上升趋势又加剧,两站分别于 1993—2006、1993—2001 年间径流的上升趋势达到显著性水平.



a, c, e 为实际值历时曲线; b, d, f 为 MK 趋势曲线; Uf 代表变化趋势,线上任一点超过置信线($U=\pm 1.96$),即表示变化趋势显著; UB 为实线序列的反序列,变化趋势显著时,若两线交点在置信区间内即为突变点.

图 2 鄱阳湖流域气温及降水和潜在蒸发趋势变化

表 1 各子流域 ω 率定及相应敏感性参数计算

流域	赣江	信江	抚河	流域平均状态
ω	0.30	0.08	1.50	0.56
β	0.89	0.88	1.05	0.97
γ	-0.42	-0.41	-0.60	0.50

2.3 不同年代气候变化对径流的驱动作用分析

为确定气候变化对径流的基本作用,我们首先分析流域尺度上径流深度与主要气候要素间的相关关系.统计显示,流域年平均气温与径流的相关程度极低,没有统计意义的相关关系,但温度变化可以通过影响潜在蒸发和降水过程从而间接影响河川径流.根据鄱阳湖流域 1960—2007 逐年径流深与降水量、径流深与潜在蒸发量数据,计算得出其相关系数分别为 0.91 和 -0.63(图略),并通过 99%的置信度检验.由此

可以确定,鄱阳湖流域径流与降水的变化趋势一致,降水对径流的有正向的驱动作用,而径流与潜在蒸发的变化趋势相反,潜在蒸发对径流有负向的驱动作用.

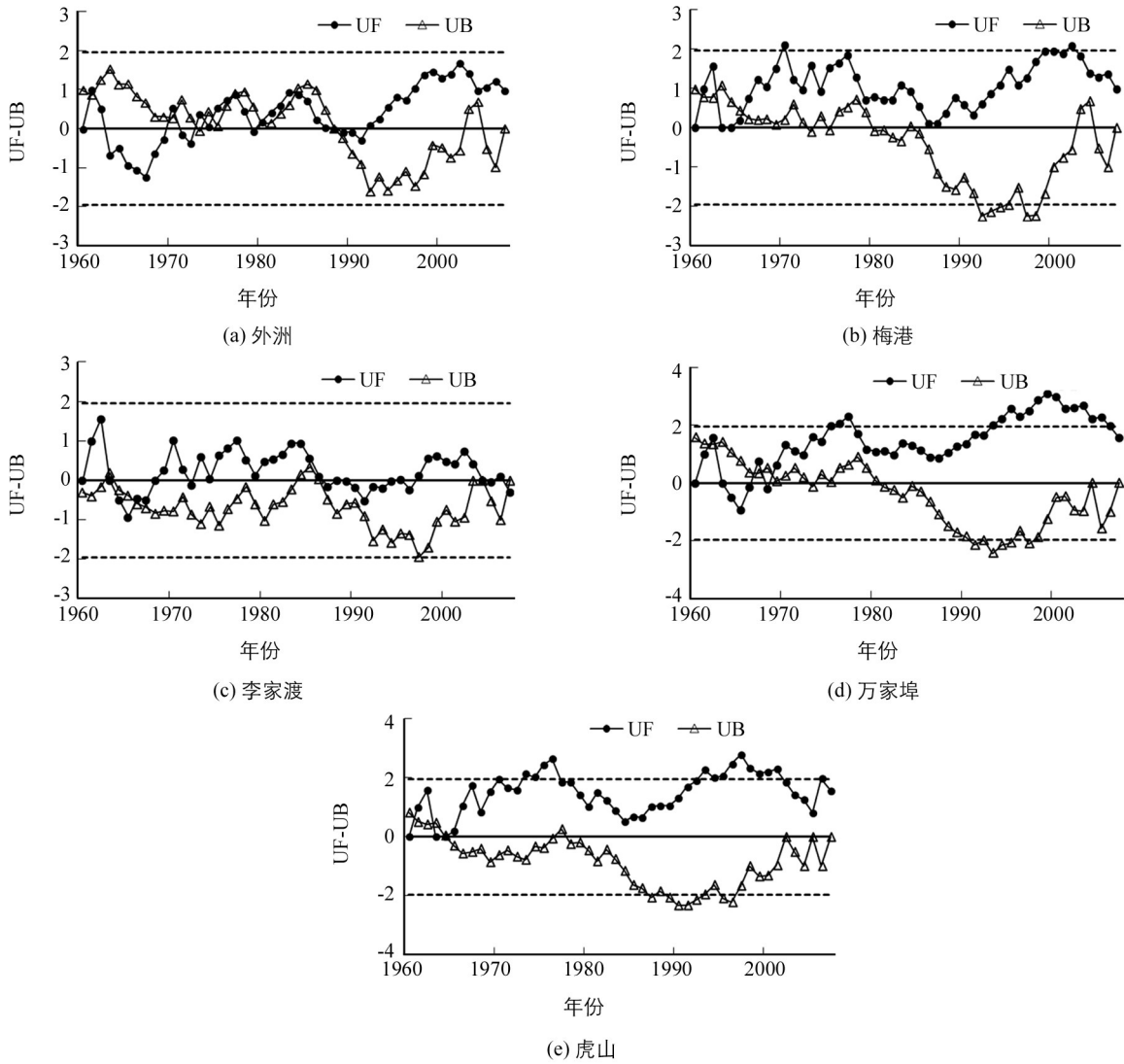


图 3 主要水文站径流趋势变化

由于没有修水和饶河流域出口控制站水文资料,我们这里仅分析赣江、信江、抚河以及鄱阳湖流域平均情况下气候变化对径流的影响分量. 在分析之前,以鄱阳湖流域 1960—1969 年间的实测水文和气象资料为基础,率定蒸发率函数并获得各流域的植被有效水系数 ω 值,以及驱动模型的敏感性参数(见表 1).

根据驱动模型,计算不同年代相对于 1960s 因气候变化作用所导致的流域径流的改变量,结果见图 4. 由图可知,相对于 1960s 流域的气候和径流条件,其他年代气候变化作用均起着增大径流的作用. 其中,赣江、信江及抚河水系的径流增量以 1990s 为最大,分别为 242.8,321.3 和 194.3 mm. 2000s 气候变化导致的径流增量最小,分别为 106.5,32.7 和 66.1 mm. 另外图 4 还显示,1970s 和 1990s 气候变化导致的径

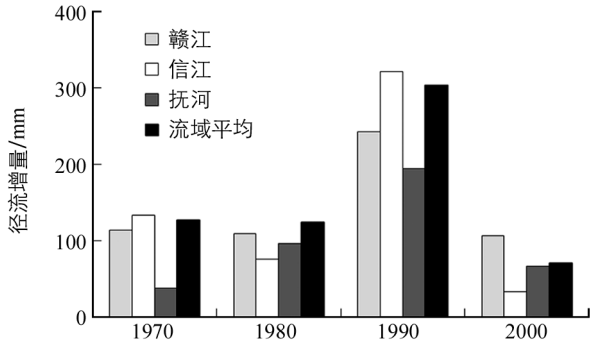


图 4 相对于 1960s 气候作用对赣江、信江、抚河以及流域平均状态下径流变化的影响分量

流增量以信江为最,而 1980s 和 2000s 则是赣江最大.根据前面的分析可知,对鄱阳湖流域而言,1970s 和 1990s 流域降雨量相对较多,而 1980s 和 2000s 降雨量相对偏少.这种丰水期气候变化对信江径流的驱动作用较大,而枯水期对赣江径流的驱动作用较大的现象,一方面与信江流域不同年代的降雨变率较大有关,另一方面也受两河流集水面积的大小及其调蓄作用的影响(外洲站径流变差系数 0.28,梅港站径流变差系数为 0.33).以上情况表明,不同年代各子流域气候作用对径流变化的影响分量不同,充分体现了不同子流域内部气候变化以及流域本身自然特征的差异,并在径流变化上产生反馈.流域整体情况下气候变化对径流的驱动作用与赣江流域情况相似,不再赘述.

3 结论及讨论

近 50 年来,鄱阳湖流域年平均气温经历了先下降后上升的过程,1990s 年代以来增温明显,并于 2000s 初达到显著性水平.流域年降雨量自 1960s 末以来总体呈现上升趋势,其中 1990s 上升趋势最为明显,之后有所减缓.流域潜在蒸发量总体呈下降趋势,与降雨变化趋势相反.气候变化导致“五河”水系径流发生了相应变化,其中信江梅港、修水万家埠和饶河虎山站径流增加趋势在 1990s 末和 2000s 初均达到显著性水平,赣江外洲站径流变化不显著,抚河李家渡站总体上无明显变化趋势.对不同时期气候变化对径流的驱动作用分析揭示,相对于 1960s,其他年代气候变化均起着增大径流的作用,但各子流域气候作用对径流变化的影响分量不同.其中,赣江、信江及抚河的径流增量以 1990s 为最大,2000s 气候变化导致的径流增量最小.此外,受不同年代流域降雨变率以及流域集水面积大小及其调蓄作用影响,1970s 和 1990s 气候变化导致的径流增量以信江为最,而 1980s 和 2000s 则是赣江最大.

本文主要探讨气候变化对径流的驱动作用,尚未考虑流域人类活动作用的影响.然而人类活动对水资源的影响在一些年代中还是比较突出,以赣江流域为例,相对于 1960s,1990s 气候变化导致的径流增量为 240.1 mm,而赣江外洲径流的实际增量为 194.2 mm,这一差异主要是受流域内水资源开发利用的影响.有资料表明,江西省自 1990s 年代以来,随着社会经济的发展,工农业耗水量占地表水资源总量的比例有逐步上升的趋势,多年平均水资源利用量约 $205 \times 10^8 \text{ m}^3$.由此可见,流域水资源的开发利用,是人类活动减少地表径流的重要表现.因此,在未来气候变化可能导致鄱阳湖流域水旱灾害风险增加的情况下,探索人类活动对区域水资源的优化利用、调度和管理是将是一项有意义的工作.

参考文献:

- [1] 闵 骞. 20 世纪 90 年代鄱阳湖洪水特征的分析 [J]. 湖泊科学, 2002, 14(4): 323—331.
- [2] 闵 骞, 闵 聃. 鄱阳湖区干旱演变特征与水文防旱对策 [J]. 水文, 2010, 30(1): 84—88.
- [3] 郭 华, 苏布达, 王艳君, 等. 鄱阳湖流域 1955—2002 年径流系数变化趋势及其与气候因子的关系 [J]. 湖泊科学, 2007, 19(2): 163—169.
- [4] 刘 健, 张 奇, 许崇育, 等. 近 50 年鄱阳湖流域径流变化特征研究 [J]. 热带地理, 2009, 29(3): 213—224.
- [5] ZHAO Guo-jun, HÖRMANN G, FOHRER N, et al. Streamflow Trends and Climate Variability Impacts in Poyang Lake Basin [J]. Water Resources Management, 2009, 24(4): 689—706.
- [6] 叶许春, 李相虎, 张 奇. 长江倒灌鄱阳湖的时序变化特征及其影响因素 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2012, 34(11): 69—75.
- [7] GUO Hua, HU Qi, JIANG Tong. Annual and Seasonal Stream Flow Responses to Climate and Land-Cover Changes in the Poyang Lake Basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2008, 33: 172—186.
- [8] 王怀清, 赵冠男, 彭 静, 等. 近 50 年鄱阳湖五大流域降雨变化特征研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(7): 615—619.
- [9] MENZEL L, BURGER G. Climate Change Scenarios and Runoff Response in the Mulde Catchment (Southern Elbe, Germany) [J]. Journal of Hydrology, 2002, 267: 53—64.

- [10] 简虹, 骆云中, 谢德体. 基于 Man-Kendall 法和小波分析的降水变化特征研究——以重庆市沙坪坝区为例 [J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2011, 36(4): 217—222.
- [11] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [12] ZHANG Lu, DAWES W R, WALKER G R. The Response of Mean Annual Evapotranspiration to Vegetation Changes at Catchment Scale [J]. Water Resources Management, 2001, 37(3): 701—708.
- [13] MONTEITH J L. Evaporation and Environment [J]. Symposia of the Society for Experimental Biology, 1965, 19: 205—234.
- [14] KOSTER R D, SUAREZ M J. A Simple Framework for Examining the Interannual Variability of Land Surface Moisture Fluxes [J]. Journal of Climate, 1999, 12: 1911—1917.
- [15] LI Li-juan, ZHANG Lu, WANG Hao, et al. Assessing the Impact of Climate Variability and Human Activities on Streamflow from the Wuding River Basin in China [J]. Hydrological Processes, 2007, 21, 3485—3491.

Characteristics of Climate Variability and Its Driving Effect on the Change in Runoff Across the Poyang Lake Catchment

YE Xu-chun^{1,2}, LIU Jian³, ZHANG Qi², YANG Xun-lin¹

1. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, State Key Laboratory of Lake Science and Environment, CAS, Nanjing 210008, China;

3. Key Laboratory of Water Resources and Environment, Water Research Institute of Shandong Province, Jinan 250013, China

Abstract: Based on the observed data of 14 meteorological stations and 5 hydrological stations across the Poyang Lake catchment during 1960—2007, this paper analyses the change trends of temperature, precipitation, potential evaporation and runoff depth by means of Mann-Kendall test. After that, a runoff model driven by precipitation and potential evaporation is established and the impact of climate change on the runoff is quantified for the sub-catchments of the Ganjiang, the Xinjiang and the Fuhe Rivers in different decades. The results show that during the period of 1960—2007 the temperature and precipitation of the Poyang Lake catchment increased, while the calculated potential evapotranspiration decreased significantly. The changes in runoff were generally consistent with the change in catchment precipitation. The driving effect analysis reveals that compared to the 1960s, the climate changes played an important role in increasing runoff depth during the other decades. The most obvious driving effect occurred in the 1990s and led to an increase of the runoff depth by 194.3 mm—321.3 mm, while the increase in the 2000s was just 32.7 mm—106.5 mm. In addition, because of the influence of precipitation anomalies and catchment storage in different decades, the Xinjiang River sub-catchment had the maximum increased runoff depth caused by climate change in the 1970s and the 1990s, while the Ganjiang River sub-catchment had the maximum increased runoff depth in the 1980s and the 2000s.

Key words: climate variability; trend analysis; runoff; evaporation ratio function; the Poyang Lake catchment

