

The Decrease of the Flow and Its Cause at Datong Hydrological Station of the Yangtze River

Yanshu Rong, Xiaoyan Liu

College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing
Email: ysron@hhu.edu.cn, 406480534@qq.com

Received: Aug. 1st, 2014; revised: Aug. 8th, 2014; accepted: Aug. 12th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The increase in temperature not only causes changes in many other climate elements but also alters the timing and magnitude of runoff. Such changes raise the possibility of environmental and socioeconomic dislocations, and they have important implications for future water resources planning and management. Datong hydrological station, located at downstream of the Yangtze River, is an important station controlling the Yangtze River basin and is the uppermost boundary of ocean tide rising of East China Sea. Its hydrological elements change obviously because of climate warming. In the present paper, simple and multiple regression analysis and M-K method were used to research the variations and trends of flow and meteorological elements of Datong hydrological station. The results showed that there were obvious intra- and inter-annual variations for the annual mean flow during the year of 1951-2011 in Datong station. The annual mean and high water period flow decreased significantly and low water period flow increased slightly. When air temperature rose significantly after 1994, precipitation, wind speed, relative humidity and sunshine duration decreased, and annual mean flow, low and high water period flow also decreased. There was closed relationship between flow and meteorological elements, in which the contributions of precipitation, temperature, relative humidity and sunshine duration to decrease of annual mean flow were about 61.9%, 18.6%, 13.5%, and 6.0%, respectively. There were different contributions of meteorological elements to decrease of high and low water periods flow.

Keywords

Flow, Temperature, Precipitation, Climate Change, Variance Contribution

长江大通水文站流量减少及其原因分析

荣艳淑, 刘晓延

河海大学水文水资源学院, 南京

Email: yron@hhu.edu.cn, 406480534@qq.com

收稿日期: 2014年8月1日; 修回日期: 2014年8月8日; 录用日期: 2014年8月12日

摘要

气候变暖不仅引起气候要素变化, 也引起径流变化。这些变化还引起环境和社会经济变化, 因此, 研究气候变化对水文要素的影响对未来水资源规划和管理有重要意义。位于长江最下游的大通水文站, 是中国东海的海洋潮汐所能到达的河流的上界, 是控制长江流域入海径流的重要水文站。本文运用一元、多元回归分析和M-K方法, 对近几十年来长江大通站流量减小现象和原因进行了分析。结果表明, 在1951~2011年期间, 大通站无论是年平均流量, 还是丰、枯水期流量都有明显的减少现象, 特别是在1994年以后, 气候变暖显著, 年流量和丰、枯水期流量减小趋势更加显著。流量减小的原因与气温显著升高、降水量和相对湿度显著减少有很大关系, 降水量对流量减小可贡献61.9%, 相对湿度可贡献18.6%, 气温可贡献13.5%, 日照时数可贡献6.0%。在丰、枯水期, 气象要素的贡献略有差异。

关键词

流量, 气温, 降水量, 气候变化, 方差贡献

1. 引言

长江大通站位于安徽省池州市梅陇镇, 建站已有九十多年历史。该站位于长江下游干流水系, 集水面积约为 $1.7 \times 10^6 \text{ km}^2$, 距河口距离为 624 km, 是东海的海洋潮汐所能到达的河流的上界, 也是国家一类水文站, 是对长江下游地区水情监测的重要测站, 承担着长江下游地区, 赣、皖、苏、沪等地区的防汛测报和水质监测任务。研究长江大通站流量变化规律, 以及近些年来气候变化对长江大通站流量变化的影响, 对于水文预报工作和研究长江口的演变规律有着重要的作用。

近年来, 气候变化不仅对环境和社会经济产生了巨大影响, 对生态环境和水文要素也产生了极大影响[1][2]。暖干化的气候趋势使区域水资源量减少, 而暖湿或冷湿化的气候趋势使流域水资源量有所增加[3]。目前研究气候变化对水文要素的影响, 多从降水和气温两个因子出发[3]-[6]。研究表明, 径流与气温和降水存在线性统计关系[7], 但是, 大部分区域径流受降水的影响要敏感于气温的影响, 当二者共同作用时, 径流量变化更加复杂。例如, 在气温不变的前提下, 如果降水增加 10%, 黑河上游地区多年平均径流深分别增加 24% [3], 而在东北地区区川径流量与土壤湿度将分别增加 17.3% 和 4.9% [4]; 在灞河流域, 降水量增加 1 mm, 径流深便可增加 0.013 亿 m^3 [5]; 在美国华盛顿州的河流径流将增加 1.59 倍 [8]; 澳大利亚地区河流径流量将增加 25.0% 左右 [9]。在降水不变的情况下, 如果气温升高 1°C , 在黑河上游地区径流深可减少 6% [3], 在东北地区区川径流量可减少 4.04% [4]; 在灞河流域径流深可减少 0.106 亿 m^3 [5]; 在美国河流径流量可减少 2.45% 到 5.77% [6]。当降水和气温同时变化时, 例如, 降水增加 10%, 同时气温升高 1°C 和 2°C , 黑河地区径流深有可能增加 15% 和 8%; 如果降水增加 20%, 气温升高 1°C 和

2℃, 径流深可能会增加 39% 和 31% [3]。但是, 不同地区的径流对气温与降水变化的响应不同。

研究水文要素变化特征及其对气候变化响应的方法, 也因为研究区域不同而有所差异。例如, 将多元回归模型 [5]、SWAT 模型 [10]、VIC 模型 [11] 等用于研究降水和气温变化对水文要素的影响; 利用 GCM 的输出结果, 在一定的情景假定下, 结合各种水文模型, 评估不同区间河川径流量对气候变化的响应 [12] [13]。

对于长江大通站这样的重要水文测站, 过去的研究主要集中在径流系列的趋势性、突变性、周期性和年内分配特征、丰枯演化规律上 [1] [14] [15]。研究表明, 大通站的径流总体趋势和周期变化并不十分明显, 但径流年内变化趋势、突变特性和分配特征有所改变, 枯水年多以连续形式出现, 枯水状态明显增多。上述研究从统计学角度分析大通水文要素的变化特征, 得出了大通流量明显减少的结论。

大通流量减小的原因, 既与气候变化有关, 也与人类活动有关。从人类活动方面看, 长江流域大量水电工程建设, 改变了天然径流过程, 使许多水文站的水文要素有明显变化。例如, 葛洲坝水库因其为小库容径流式水库, 其运行对下游的径流分配几乎没有影响 [16]。但是, 丹江口水库建库后, 对汉江下游仙桃站有微弱的影响; 对汉口站径流年内过程影响较小; 对宜昌站洪期径流有一定影响; 对下游大通站径流年内过程影响微弱 [17]。但是, 三峡水库的运行对大通站径流年内过程有一定影响 [17] [18]。

本文则是从气候变化的角度, 特别是根据区域气候要素, 包括降水量、气温、相对湿度、日照时数和风速等要素的变化, 探讨气候变化对大通流量的影响, 分析大通站流量减少的可能原因。

2. 数据资料和分析方法

2.1. 数据

本文所用的长江大通水文站 1951 年到 2011 年 61 年的月平均流量资料, 来自于长江流域年鉴。

气象资料, 包括气温、降水、日照、风速、湿度等, 自于中国气象局气象信息共享网, 时间长度为 1961 年到 2012 年, 共计 52 年。由于长江大通站没有直接观测的气象资料, 所以选取大通站周围宁国、黄山、安庆、景德镇 4 个测站的气象资料, 将这四个站的气象要素取算术平均值作为长江大通站区域气象资料的代表。选取的水文和气象站的站点位置等信息见表 1。

2.2. 方法

1) 趋势分析方法及流量异常特征分析方法

采用一元线性回归模型, 分析水文气象要素时间序列的线性变化趋势。用超过平均值(或低于)1 倍和 2 倍标准差的程度来反映水文气象要素的异常特征。

2) M-K 方法

用 M-K 方法进行突变分析, 即通过构造正序列和逆序列两个序列的方式判断时间序列的突变点, 正

Table 1. Name and location of hydrological and meteorological stations

表 1. 水文站和气象站的站名及地理位置

站名	经度(°E)	纬度(°N)	测站性质
大通	117.36	30.27	国家一级水文站
宁国	118.98	30.62	国家基本气象站
黄山	118.15	30.13	国家基本气象站
安庆	117.05	30.53	国家基本气象站
景德镇	117.20	29.30	国家基本气象站

序列的值为正时,表示有上升趋势,正序列的值为负时,表明有下降趋势。如果正逆序列两曲线出现交点,并且此交点在统计显著性水平的临界线之间,那么交点对应的时刻便是突变开始的时间。详细的计算过程见文献[5]。

3) 多元回归分析方法

本文用多元回归分析方法探讨气象要素对大通站流量变化的影响。因变量为流量因子(y),自变量选取了四个气象要素,分别降水量(x_1)、气温(x_2)、日照时数(x_3)和平均湿度(x_4)。因变量 y 与 4 个自变量 x_1, x_2, \dots, x_4 之间的线性关系可表示为:

$$Y = B_0 + B_1x_1 + B_2x_2 + \dots + B_4x_4 \quad (1)$$

式(1)中,回归系数采用最小二乘法估计,计算每个自变量对因变量的方差贡献,以此分析气象要素对流量的影响程度。

3. 流量变化特征

3.1. 年内变化特征

为了区分一年之内的枯水期和丰水期,本文引入效率系数的概念。效率系数的定义是各月平均流量与年平均流量的比值,它反映的是月平均流量对年平均流量的贡献。效率系数大于 1 说明该月份流量相对较大,属于丰水期(HWP, High water period);效率系数小于 1 说明该月流量相对较小,属于枯水期(LWP, Low water period)。图 1 给出了大通站平均流量和效率系数(EC)的年内变化。可以看出 7 月份是大通站流量最多的月份,1 月份是流量最少的月份。在图 1 中还可以看到,5~10 月份的多年平均效率系数均大于 1,特别是 7 月份,平均流量最大,效率系数也最大,因此定义 5~10 月份为丰水期。11 月到转年 4 月效率系数值均小于 1,表明这几个月份的流量偏小,因此,定义 11 月~转年 4 月为枯水期。这与多数文献的定义一致。

3.2. 年际变化特征

1) 年平均流量的年际变化

图 2 是长江大通水文站 61 年来的平均流量资料的时间变化曲线,其中,红色和蓝色虚线分别表示多年平均流量 ± 1 倍标准差线,超过这个数值的年份意味着流量偏大或偏小,红色和蓝色点线分别表示多年平均流量 ± 2 倍标准差线,它们是流量极端偏大或极端偏小年份的分界线。从图 2 可以看出,流量偏大的年份共有 7 年,分别为 1952, 1954, 1964, 1973, 1983, 1998 和 2010 年,其中 1954 年和 1998 年流量

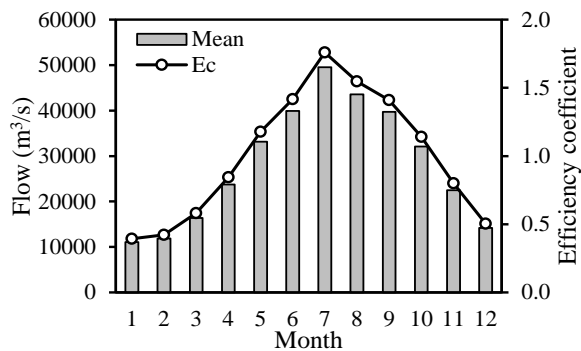


Figure 1. The variation of intra-annual mean flow and efficiency coefficient

图 1. 流量及效率系数年内变化图

最大，为流量极端偏大年份，这两年长江流域发生了全流域严重洪涝灾害，大通站的流量也有强烈反映。流量偏小的年份共有 9 年，分别是 1960，1963，1971，1972，1978，1979，1986，2006 和 2011 年，没有流量极端偏小年份。从图 2 中还可以看出，年平均流量呈微弱的减小趋势，强度大约为 $19.90 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

2) 丰枯期平均流量的年际变化

根据前面效率系数的分析，将大通站流量重新划分水文年，图 3 是划分水文年以后，1951~2011 年大通站丰、枯水期平均流量的年际变化图。从图 3 中可以看出，丰水期流量有减小趋势，减小率为 $-66.741 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ ，枯水期流量略有增加趋势，增加率为 $20.084 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

4. 大通区域气候变化特征

4.1. 气温变化特征

对于近些年来气候变暖这一明显气候变化，本文用温度变化来探讨长江大通站的气候变暖特征。图 4 给出了大通区域气温的时间变化曲线，从图 4 中可以看出，在 1990 年代以前，大通区域气温呈波动变化，无明显趋势；1990 年代以后，气温迅速增加，有明显上升趋势。在整个时间序列中，气温的线性趋势达到了 $0.025 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ 的强度。

为了确认气温的转变时期，图 5 给出了气温的 M-K 检验结果。可以看到，在 1961 到 1980 年期间，

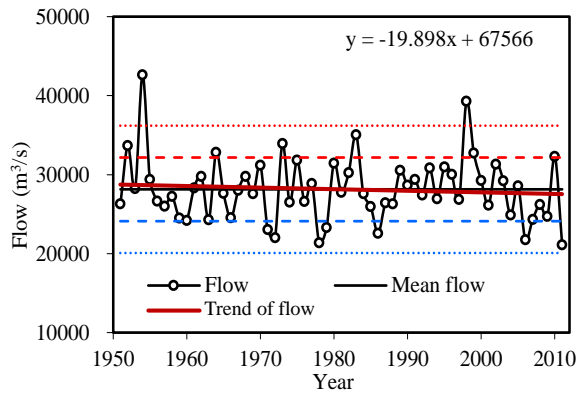


Figure 2. The intra-annual change in the streamflow of Datong hydrological station

图 2. 大通水文站年平均流量时间变化图

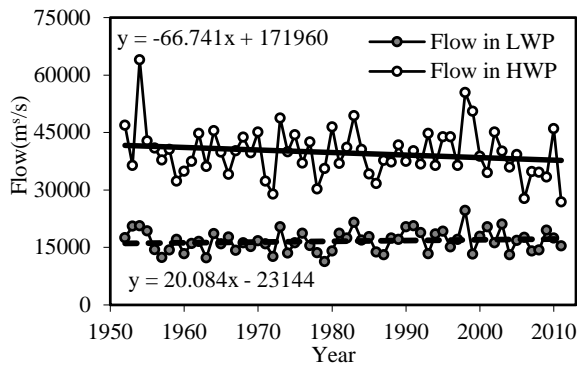


Figure 3. The time series of annual mean flow in the high (HWP) and low water periods (LWP) in Datong

图 3. 大通站丰、枯水期流量的年际变化图

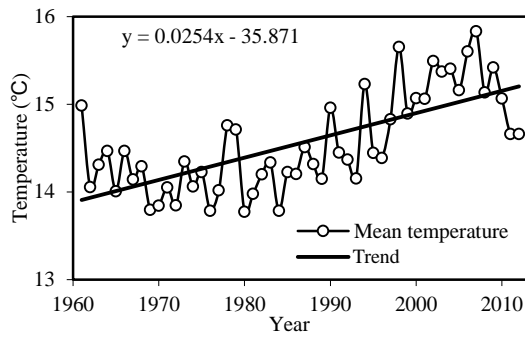


Figure 4. The time series of temperature of Datong
图 4. 大通站气温时间序列变化

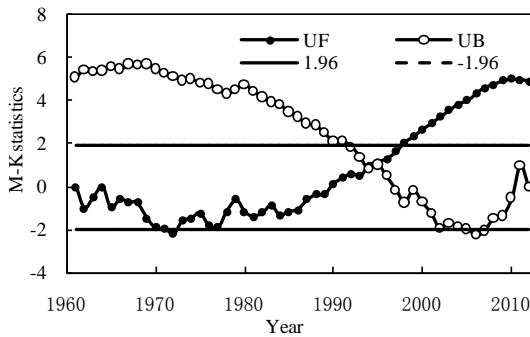


Figure 5. The M-K abrupt test of temperature
图 5. 气温 M-K 法突变检验

气温变化比较平稳，1980 年代以后，气温逐渐呈升高，与图 4 显示的结果一致。但是，在 1994 年前后气温出现了明显转折，由于该点达到了统计显著性 0.05 水平，可以认为气温发生突变。据此，本文取 1994 年为气温突变的分界点，也将此作为气候变暖的时间分割点，并以此时间点为分界点，讨论流量以及其他气象要素的变化。

4.2. 区域气候变化特征

为了了解大通区域气候变化特征，除了对气温变化进行分析以外，还选取了降水量、风速、日照时数和相对湿度等气象要素，全面分析大通站的气候变化。表 2 和表 3 分别是气温等 5 个气象要素在 1961~2012、1961~1993 和 1994~2012 年三个时间段的年均值和趋势。

从均值变化的角度来看(见表 2)，1994 年以后比以前，年平均降水量增加了 14.4 mm，气温增加了 0.9℃；风速、日照时数和相对湿度分别减小了 0.4 m/s、7.1 h 和 1%。枯水期和丰水期年降水量和温度都有所增加，风速、日照时数和相对湿度都有所减小，与各个气象因子均值的年序列中的变化相同。

从趋势变化的角度来分析(见表 3)，在 1961 年到 2012 年长达 52 年的时间尺度中，气温和年降水量均为增加趋势，而风速、日照时数和相对湿度均为减小的趋势。但是，在丰、枯水期中，有些气象要素的趋势发生变化，例如，降水量、风速、气温和相对湿度保持一致，或增加、或减小；而日照时数在丰水期为减小趋势，在枯水期中则为增加趋势。

在气温突变前后，气象要素的趋势有些变化。在 1994 年以前，降水量在三个时间序列中均为增加趋势，特别是在丰水期增加明显；风速在年和枯水期序列均为减小趋势，但是，在丰水期为增加趋势；气温与风速的趋势正好相反；日照时数和相对湿度在三个序列中均为减小趋势。但是，在 1994 年之后，降

Table 2. The mean of climate elements

表 2. 气候要素的均值

时段分类	序列分类	年降水量(mm)	风速(m/s)	气温(°C)	月日照时数(h)	相对湿度(%)
1961~2012 年	年	1724.4	3.1	14.6	152.6	77
	枯水期	1242.0	3.2	7.4	132.9	74
	丰水期	2211.6	3.0	21.7	172.0	80
1961~1993 年	年	1719.6	3.3	14.2	158.8	77
	枯水期	1236.0	3.4	7.0	138.3	75
	丰水期	2210.4	3.1	21.4	179.2	80
1994~2012 年	年	1734.0	2.9	15.1	141.7	76
	枯水期	1252.8	3.0	8.0	123.9	74
	丰水期	2214.0	2.8	22.2	159.9	78

Table 3. The trends of climate elements

表 3. 气候要素的趋势

时段分类	序列分类	降水量(mm·10a ⁻¹)	风速(m·s ⁻¹ ·10a ⁻¹)	气温(°C·10a ⁻¹)	日照时数(h·10a ⁻¹)	相对湿度(%·10a ⁻¹)
1961~2012 年	年	1.784	-0.153	0.254	-7.701	-0.555
	枯水期	1.098	-0.187	0.331	-6.644	-0.491
	丰水期	1.543	-0.114	0.225	9.246	-0.677
1961~1993 年	年	6.752	-0.093	0.030	-12.282	-0.246
	枯水期	2.939	-0.193	0.169	-11.942	-0.383
	丰水期	9.113	0.002	-0.041	-14.732	-0.174
1994~2012 年	年	-5.624	-0.417	0.137	0.004	-1.763
	枯水期	-0.433	-0.416	0.103	4.81	-1.799
	丰水期	-15.217	-0.438	0.286	-5.517	-1.698

水量均为明显的减少趋势；风速减小的程度变得很大；气温则转变为明显的增加趋势；相对湿度呈显著减少趋势；而日照时数在年和枯水期序列为增加趋势，在丰水期继续保持减小趋势。

这种结果表明，年降雨量和风速在丰水期的趋势比枯水期变化更加剧烈，减小趋势更加明显；气温突变以后，增暖强度加大；日照时数的减小趋势变缓；而相对湿度的减小程度加大。

5. 流量对气候变化的响应

5.1. 流量在气候变暖前后的变化特征

以 1994 年为气候变化的转折点,选取流量和气候因子相同的时间尺度 1961 到 2011 年 51 年的资料,讨论年平均流量、丰水期和枯水期在 1994 年前后的变化特征。图 6 和图 7 分别是大通站年、丰水期和枯水期平均流量在 1994 年前后的时间变化曲线。计算表明,在气温突变点前后,多年平均流量发生变化,1994 年以前,年平均流量为 27,900 m³/s,1994 年以后,年平均流量增加为 28,100 m³/s。枯水期平均流量由 16,300 m³/s 增加为 17,300 m³/s,丰水期平均流量由 39,500 m³/s 减小到 39,000 m³/s。气温突变点前,年平均流量呈微弱的增加趋势,大约每年增加 13.104 m³·s⁻¹(见图 6(a)),丰水期平均流量以 -29.423 m³·s⁻¹·a⁻¹

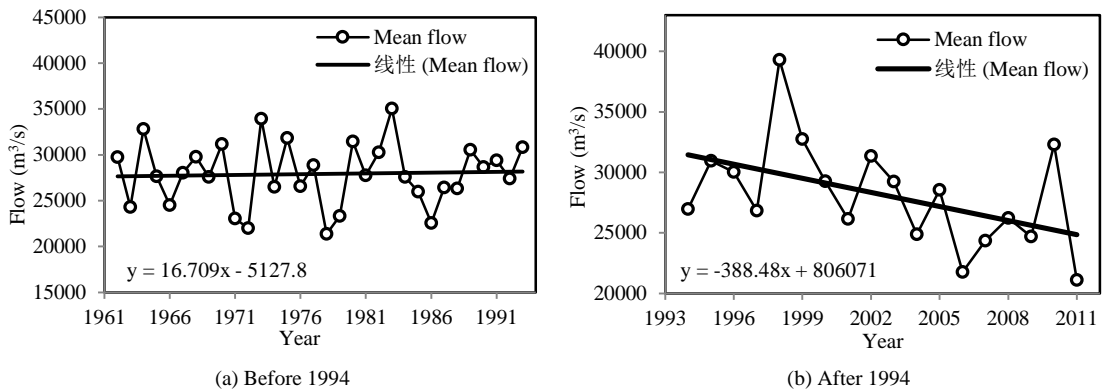


Figure 6. Before and after 1994 the change of annual average flow of Datong hydrological station
图 6. 大通站 1994 年前后年平均流量的时间变化

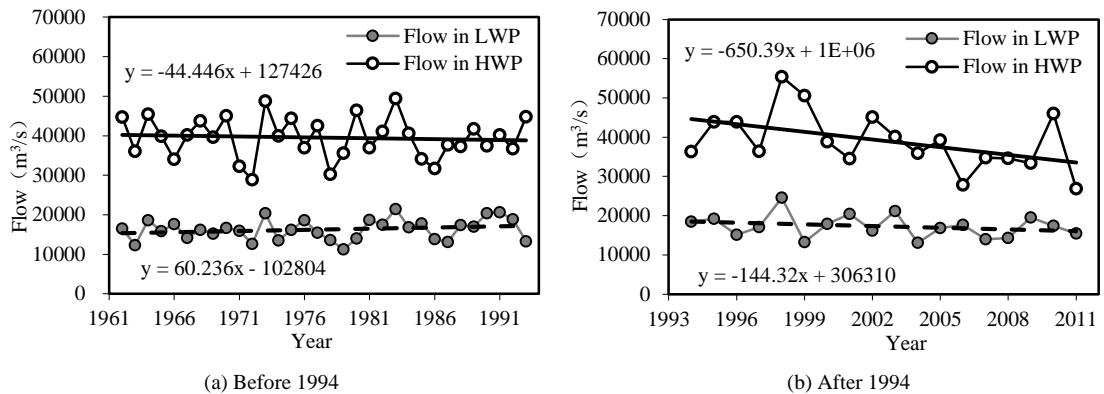


Figure 7. Before and after 1994 the change of the high and low water periods flow of Datong hydrological station
图 7. 1994 年前后大通站丰、枯水期平均流量的时间变化

的程度减少，而枯水期的平均流量以 $56.693 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 的程度增加(见图 7(a))。在 1994 年以后，年、丰水期和枯水期的平均流量均呈显著减少趋势，减少程度分别达到了 $-388.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ (见图 6(b))、 $-650.4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $-123.1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 的程度(见图 6(b)和图 7(b))。

5.2. 气候要素对流量的影响

流量产生这种变化是否仅仅由于气温升高引起？气温升高对流量的影响程度能达到多少？为了研究这些问题，本文用多元回归分析的方法，分析气象要素对大通站平均流量的影响，用方差贡献率衡量各个气象要素对流量因子的影响程度。

由于风速的影响作用偏小，同时，考虑风速的多元回归方程的拟合效果不能通过显著性 0.05 水平的检验，所以，将风速去除，仅考虑降水量、气温、月日照时数和相对湿度 4 个气象要素，建立多元回归方程，回归效果良好，通过了显著性 0.05 水平的检验。

表 4 是不同时间尺度的平均流量与各个气候要素的线性回归计算结果，表中括号中的负号表示回归方程中该要素的系数为负值，表示该要素对流量变化具有负作用。可以看到，在年序列中，降水量的方差贡献最大，对平均流量的影响程度占总影响力的 61.9%；其次是相对湿度和气温，分别达到了 18.6% 和 13.5%；影响最小的是日照时数，方差贡献仅为 6%。在气温突变点以后，降水量的正作用显著增加，增加幅度为 18.9%，日照时数的正作用略有增加，增加幅度为 1.5%，而气温和相对湿度的正作用有所减小，减小幅度分别为 9.8% 和 10.5%。综上所述，无论在哪个时段，降水量都是影响径流的主要因子，因

Table 4. The variance contribution of regional climate elements in different periods
表 4. 不同时期区域气象要素对大通流量的方差贡献

时段分类	序列分类	降水量	气温	日照时数	相对湿度
1961~2011 年	年序列	61.9	13.5	6.0	18.6
	枯水期	57.3	(-) 0.7	(-) 14.5	27.5
	丰水期	67.3	5.1	2.1	25.6
1961~1993 年	年序列	54.3	12.2	6.1	27.3
	枯水期	62.4	(-) 9.3	(-) 6.0	22.3
	丰水期	79.4	3.2	0.0	17.4
1994~2011 年	年序列	73.2	2.4	7.6	16.8
	枯水期	4.7	(-) 44.3	5.7	45.3
	丰水期	38.4	0.4	13.2	48.0

此流量的年际变化和年降水量的年际变化基本一致。

对于枯水期序列,从 1961~2011 年整体来看,降水量的正作用对径流的影响最大,达到了 57.3%;相对湿度的正作用位于第二,方差贡献为 25.6%;气温和月日照时数的负作用影响较小,方差贡献率分别为 5.1%和 2.1%。在 1994 年以前,降水量的作用仍为最大,相对湿度的作用次之,气温和日照时数最小;但是,在 1994 年之后,降水量作用迅速减小,相对湿度的正作用和气温的负作用迅速增大,分别位列第一和第二,而降水量和日照时数的作用相当,在 5%左右。

对于丰水期序列,从 1961~2011 年的时间尺度看,降水量和相对湿度仍然是影响流量的主要因素,但是,在 1994 年之后,相对湿度的正作用也明显增加,方差贡献率达到了 48%,成为影响流域第一的气候要素,日照时数方差贡献率也由之前的 0 增加到了 13.2%,降水量和气温的影响作用减小,方差贡献率分别减小了 41%和 2.0%。

根据气象要素对流量的影响程度,可以对 1994 年以后年平均流量和丰、枯期流量明显减小给出较合理的解释。流量的减少与降水和相对湿度的减少有密不可分的关系,尽管气温增加和日照时数减小会对流量增加有微弱的贡献,但是,在降水量和相对湿度大幅度减小的情况下,流量减少也就不可避免了。

6. 结论

本文利用 M-K 方法,一元和多元回归等方法,分析了长江大通水文站 1951~2011 年的流量变化,从大通区域气候变化的角度,分析了气候要素变化对流量的影响,综合归纳可得到如下结论。

1) 大通站流量具有明显的年际变化特征和丰枯变化特征,丰水期为 5~10 月,枯水期为 11 到转年 4 月份。在 1951~2011 年期间,年平均流量呈微弱的减小趋势,趋势达到了 $-19.90 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$;丰水期流量也有减小趋势,减小率为 $-66.741 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$;枯水期流量有微弱的增加趋势,增加率为 $20.084 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

2) 大通区域气候存在明显变化,1994 年之前,气温变化平稳,1994 年以后,气温显著升高,将 1994 年作为气温变暖的转折点以后,降水量、相对湿度、日照时数和风速也都有明显的变化,特别是在最近 20 多年气温显著升温的时段中,降水量、相对湿度和日照时数都出现不同程度的减小。

3) 大通流量在 1994 年前后也有明显变化,1994 年以前,年序列流量和丰水期序列均有微弱的增加趋势,枯水期有微弱的减小趋势。但是,1994 年以后,三种流量序列均有明显的减少趋势,特别是年序列和丰水期序列下降明显,枯水期下降程度偏小。

4) 流量变化与气候要素的变化有很大关系。气候要素中对流量影响最大的是降水量和相对湿度,影

响较小的是气温和日照时数。降水量和相对湿度的增加(或减小),可使流量显著增加(或减少);而气温和日照时数的增加(或减小),可使流量减少(或增加)。但是,不同时期,气候要素与流量的对应关系有所不同,因而,气候要素对流量的影响程度也随之变化。近20多年来区域降水量、相对湿度和日照时数减小对大通流量的减少负主要责任,气温升高对流量减少有次要作用。

致 谢

感谢国家自然科学基金(41371050)对本文的资助。

参考文献 (References)

- [1] VICENTE-SERRANO, S. M., L'ÓPEZ-MORENO, J. I. Hydrological response to different time scales of climatological drought: An evaluation of the standardized precipitation index in a mountainous Mediterranean Basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2005, 9: 523-533.
- [2] VANO, J. A., DAS, T. and LETTENMAIER, D. P. Hydrologic sensitivities of Colorado River runoff to changes in precipitation and temperature. *Journal of Hydrometeorology*, 2012, 13(3): 932-949.
- [3] 马彦军, 李占玲. 黑河上游径流量对未来气候变化的响应分析[J]. *水资源研究*, 2012, 1(5): 388-392.
MA Yanjun, LI Zhanling. Response of runoff to future climate change in the upper reaches of Heihe River Basin. *Journal of Water Resources Research*, 2012, 1(5): 388-392. (in Chinese)
- [4] 王国庆, 王兴泽, 张建云, 等. 中国东北地区典型流域水文变化特性及其对气候变化的响应[J]. *地理科学*, 2011, 31(6): 641-646.
WANG Guoqing, WANG Xingze, ZHANG Jianyun, et al. Hydrological characteristics and its responses to climate change for typical river basin in Northeastern China. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(6): 641-646. (in Chinese)
- [5] 贾宪, 沈冰. 澜河流域气候变化及其对径流的影响研究[J]. *水资源研究*, 2013, 2(6): 420-423.
JIA Xian, SHEN Bing. Study on impacts of climate changes on Bahe River Runoff. *Journal of Water Resources Research*, 2013, 2(6): 420-423. (in Chinese)
- [6] 王高旭, 魏俊彪, 赵宏臻, 等. 我国未来时期径流对气候变化的响应[J]. *水资源研究*, 2012, 1(5): 380-387.
WANG Gaoxu, WEI Junbiao, ZHAO Hongzhen, et al. Response of runoff over the future period to climate change in China. *Journal of Water Resources Research*, 2012, 1(5): 380-387. (in Chinese)
- [7] XU, J. H., CHEN, Y. N., LU, F., LI, W. H., ZHANG, L. J. and HONG, Y. L. The nonlinear trend of runoff and its response to climate change in the Aksu River, western China. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(5): 687-695.
- [8] MANTUA, N., TOHVER, I. and HAMLET, A. Climate change impacts on streamflow extremes and summertime stream temperature and their possible consequences for freshwater salmon habitat in Washington State. *Climatic Change*, 2010, 102(1-2): 187-223.
- [9] JONES, R. N., FRANCIS, H. S. C., WALTER, C. B. and ZHANG, L. Estimating the sensitivity of mean annual runoff to climate change using selected hydrological models. *Advances in Water Resources*, 2006, 29(10): 1419-1429.
- [10] Van Liew, M. W., Feng, S. and Pathak, T. B. Climate change impacts on streamflow, water quality, and best management practices for the shell and Logan Creek Watersheds in Nebraska. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2012, 5(1): 13-34.
- [11] LIU Zhaofei, XU Zongxue, HUANG Junxiong, et al. Impacts of climate change on hydrological processes in the headwater catchment of the Tarim River Basin, China. *Hydrological Processes*, 2010, 24(2): 196-208.
- [12] 张建云, 王国庆, 贺瑞敏, 等. 黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应[J]. *水科学进展*, 2009, 20(2): 153-158.
ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, HE Ruimin, et al. Variation trends of runoffs in the Middle Yellow River Basin and its response to climate change. *Advances in Water Science*, 2009, 20(2): 153-158. (in Chinese)
- [13] 左德鹏, 徐宗学, 赵捷, 等. 气候变化对渭河流域径流的影响[J]. *水资源研究*, 2013, 2(6): 364-370.
ZUO Depeng, XU Zongxue, ZHAO Jie, et al. Impact of climate change on runoff in the Wei River basin. *Journal of Water Resources Research*, 2013, 2(6): 364-370.
- [14] YANG, S. L., GAO, A., HOTZ, H. M., et al. Trends in annual discharge from the Yangtze River to the sea (1865-2004). *Hydrological Sciences Journal*, 2005, 50(5): 825-836.
- [15] GAO, X. J., ZHAO, Z. C., DING, Y. H., et al. Climate change due to green house effects in China as simulated by a regional climate model. *Advances in Atmospheric Science*, 2001, 18(6): 1224-1230.
- [16] 邹振华, 李琼芳, 夏自强, 等. 人类活动对长江径流量特性的影响[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(6):

622-626.

ZOU Zhenhua, LI Qiongfang, XIA Ziqiang, et al. Human-induced alteration in runoff of the Yangtze River. *Journal of Hohai University (Natural Science)*, 2007, 35(6): 622-626. (in Chinese)

- [17] 方娟娟, 李义天, 孙昭华, 等. 长江大通站径流量变化特征分析[J]. *水电能源科学*, 2011, 29(5): 9-12.
FANG Juanjuan, LI Yitian, SUN Zhaohua, et al. Analysis of runoff change characteristics at Datong Station of Yangtze River. *Water Resources and Power*, 2011, 29(5): 9-12. (in Chinese)
- [18] 李义天, 邓金运, 孙昭华, 等. 洞庭湖调蓄量变化及其影响因素分析[J]. *泥沙研究*, 2001, (6): 1-7.
LI Yitian, DENG Jinyun, SUN Shaohua, et al. A study on flood storage capacity in Dongting Lake. *Journal of Sediment Research*, 2001, (6): 1-7. (in Chinese)