DOI:10.15928/j.1674-3075.201910090250

水文变异下洞庭湖四水环境流研究

王鸿翔,朱永卫,查胡飞,郭文献

(华北水利水电大学,河南 郑州 450045)

摘要:探究水文变异前后环境流组成成分的变化特征,可为洞庭湖四水流域的生态保护与生态修复提供科学依据。基于湘、资、沅、澧四水(湘潭、桃江、桃源、石门)4个水文站1959-2016年逐日流量数据,运用Mann-Kendall法确定长时间序列径流的突变年份,并辅以累积距平和滑动T检验法校核检验,将时间径流序列划分为水文变异前后两个阶段,并以IHA软件为平台,分析四水流域在水文变异前后环境流的组成成分变化情况。结果表明,水文变异前后,四水流域各水文站环境流的组成发生了不同程度的改变;在湘潭站环境流组成中,小洪水极大值出现次数的偏移度最大,为77%,其环境流组成呈单一化趋势,整体流量过程逐渐并入到小洪水、高流量脉冲时间和枯水流量这3种事件中,流量事件发生的多样性减少;在桃江站环境流组成中,小洪水极大值出现时间偏移度最大,为150%;在桃源站环境流组成中,大洪水极大值出现次数偏移度最大,为150%;在石门站环境流组成中,特枯流量极小值出现次数偏移度最大,为252%;与水文变异前相比,桃江、桃源和石门站的环境流较为多样化,流量过程年内更加丰富。

关键词:环境流;水文变异;水文改变指标法;洞庭湖流域

中图分类号:X143 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-3075(2021)04-0010-08

各种形式的人类活动改变了河流的原始形态,让其变得更有利于人类社会发展的需求。随着经济社会发展速度的加快,改变自然的能力也在增强,此时人类才意识到,过多地干扰自然河流,将会导致其天然水文情势发生改变,因此也在不同时空尺度上改变生物栖息地条件,从而影响生态环境系统,相关环境流量研究引起了国内外专家的重视。国外早在20世纪40年代就提出了河流环境流量概念(王西琴等,2010;马晓超和粟晓玲,2013)。这个概念刚提出时,只是将其定义为符合水生生物适宜生长繁衍的一个基本流量数值,即为一个确定的数值关系。随着近几十年的深入研究,人们发现单一的流量值已经不足以完全表达出水生生物对水量的需求关系。长时间的生存繁衍习性,让水生生物对水流的大小、流速、高低流量的频率、持续时间等多种水文要素都有极其强烈的生理反应(董哲仁等,2017)。到了近代,环境流的定义已经从狭义的适宜水生生物健康生存的最小流量,衍生成广义的维持河流生态环境所需的流量及其水文过程。在此基础上,Thame(2003)提出流量历史曲线法(Flow duration curve analysis, FDC),通过对河流最低流量的频率,分析并确定环境流。美国大自然协会(The Nature Conservancy, TNC)提出水文变化生态限度(Ecological Limits of Hydrological Alteration, ELOHA)概念,为环境流研究提供了一种水文情势和生态响应之间的定量标准(Poff & Richter, 2010)。我国学者在国外研究思路的基础上,也进行了相关探索。马晓超和粟晓玲(2013)采用5种环境流事件和34个指标,分析了渭河环境流变化;王俊娜等(2013)通过水文-生态响应关系法对三峡水库及其坝下河段的环境流进行了研究;郭文献等(2009)从鱼类繁殖产卵的角度分析了长江的环境流。国内的大部分研究都是对人类建坝活动前后环境流的简单分析,没有从纯水文数据上寻找变异的时间节点。本文通过Mann-Kendall法等数学方法,对长时间系列的流量数据进行分析,寻找可能出现的水文变异年份,并分析变异前后的环境流组成变化,以期通过科学合理的措施,使河道流量过程向着有益于当地生态环境的方向发展。

湘江、资江、沅江、澧水俗称"四水",均汇入洞庭湖,是湖南省水系的重要组成部分,与洞庭湖、荆江三口和长江组成江-河-湖联通水系。近年来,由于

收稿日期:2019-10-09 **修回日期**:2021-04-07

基金项目:国家自然科学基金(51679090,51609085,51779094);贵州省水利厅2020年度水利科技项目(KT202008);华北水利水电大学研究生教育创新计划基金(YK2020-01)。

作者简介:王鸿翔,1981年生,女,副教授,主要从事水文水资源及生态水利研究。E-mail: whxzju@163.com

通信作者:郭文献,1979年生,男,教授,主要从事水文水资源及生态水利研究。E-mail: guowenxian163@163.com

人类活动和气候变化的影响，导致四水水生生态环境受到严重破坏，加快界定四水流域的环境流将有利于改善当地河道的生态环境现状。本研究以四水流域（湘江、资水、沅水、澧水）主要水文站（湘潭、桃江、桃源、石门）1959－2016 年的日均流量资料为基础，通过 IHA 软件分析了洞庭湖四水流域水文变异前后环境流的变化特征，旨在为洞庭湖四水流域的生态保护与生态修复提供科学依据。

1 数据和方法

1.1　数据选取

湘潭、桃江、桃源、石门四个水文站分别是湘江、资水、沅水和澧水的控制水文站，都是国家级重要水文站，水文监测设备较为齐全，收集的水文资料较为系统，能够较好地反映流域内的水文情况。本文选取湘潭、桃江、桃源、石门 4 个水文站 1959－2016 年日流量数据，数据来源于湖南省水利厅，可靠性较高。

1.2　研究方法

1.2.1　突变性　本文运用常见的 Mann-Kendall 突变性检验方法，确定各水文站的突变年份。鉴于单一的 Mann-Kendall 突变检验方法具有不稳定性，选出的时间节点可能并不适合于实际研究。因此再辅以累积距平法和滑动 T 检验法，增加突变检验的可信度。文中先运用 Mann-Kendall 趋势性检验法对湘潭、桃江、桃源、石门 4 个水文站分别进行趋势性分析；然后，再分别对各个水文站进行突变性检验，具体计算过程参考相关文献（Burn & Elnur，2002；Kahya & Kalayc，2004；危起伟，2012；王随继等，2012；李景保等，2016）。

1.2.2　环境流组成　本文采用 Richter 等（2002）提出的环境流组成算法，先将时间径流序列划分为高流量日和低流量日，再通过阈值的参数设置，划分环境流的各种流量事件（吕琳莉和李朝霞，2013）。环境流指标中高脉冲流量、特枯流量和大、小洪水 4 种流量事件的上升或下降率计算方法如下：

$$P=\frac{Q_2-Q_1}{Q_1}\times 100\% \quad ①$$

式中：P 为流量事件的上升（下降）率（%），正值时为上升率，负值时为下降率；Q_1 为第一日流量（m^3/s）；Q_2 为流量事件的第二日流量（m^3/s）。

经过对各站水文数据在变异前后的中值、离散系数和偏差系数进行分析，判断环境流组成成分变化；其中，中值为径流序列从小到大排列后的第 50 百分位数。偏差系数表示为各水文指标在变异后与变异前的偏离程度（王鸿翔等，2019），变异后的流量和均值之间的偏离程度即为离散系数，计算公式如下：

$$C_D=(H-L)/M \quad ②$$

式中：C_D 为离散系数；H、L、M 为突变前后水文序列的第 75、25、50 百分位数（m^3/s）。

2　结果与分析

2.1　年均流量趋势性检验

利用绘制的四水流域各水文站点 1959－2016 年的年均流量与时间关系图，观察流量的变化趋势（图 1），再利用 Mann-Kendall 显著性检验，分析各站点变化趋势的显著性。四水年均流量的相关表达式如下：

湘潭站 $y=4.1868x-6230.8$（$R^2=0.0189$）

桃源站 $y=0.4139x+1192.3$（$R^2=0.0004$）

桃江站 $y=0.2439x+230.61$（$R^2=0.0008$）

石门站 $y=-0.3634x+1180.2$（$R^2=0.0027$）

四水水系年均流量除特枯年降低明显和特大洪水年增加明显外，其余年份的年均流量基本上都有不同程度的增长趋势，仅石门站出现微弱下降趋势，湘潭、桃源、桃江、石门站的统计量分别为 1.19、0.22、0.13、－0.30，表明各站点的径流序列变化均未通过 95%的置信区间，因此上升和下降的趋势都不显著。

2.2　突变检验

通过 Mann-Kendall、累计距平和滑动 T 检验共计 3 种方法计算各水文站的突变年份，结果见表 1。根据四水流域的实际情况和突变节点的稳定性，结合 3 种方法算出的突变年份，确定了最终的变异年，即以该年为界线，变异年之前的时间段为相对趋于自然流态的河流水文情势，变异年之后的时间段为人类活动和气候变化扰动下发生变化的水文情势发展，变异年表示水文情势发生改变的转折年。

初步调查分析造成四水流域水文变异的原因，1991 年东江水库开始蓄水，作为湘江干流的重要工程，对该流域的水量控制有很大影响；资水流域在 1987 年陆续建成的中型水库有 40 座，大量水库的综合作用使得资江水文发生变异；沅水干流的五强溪水库于 1989 年开始动工，造成了桃源站水文波动的异常；澧水在 1973 年完工了城关水电站、青山水轮泵站、艳洲水电站等一批水利工程，这些水利工程的建成是导致水文变异的主要因素。

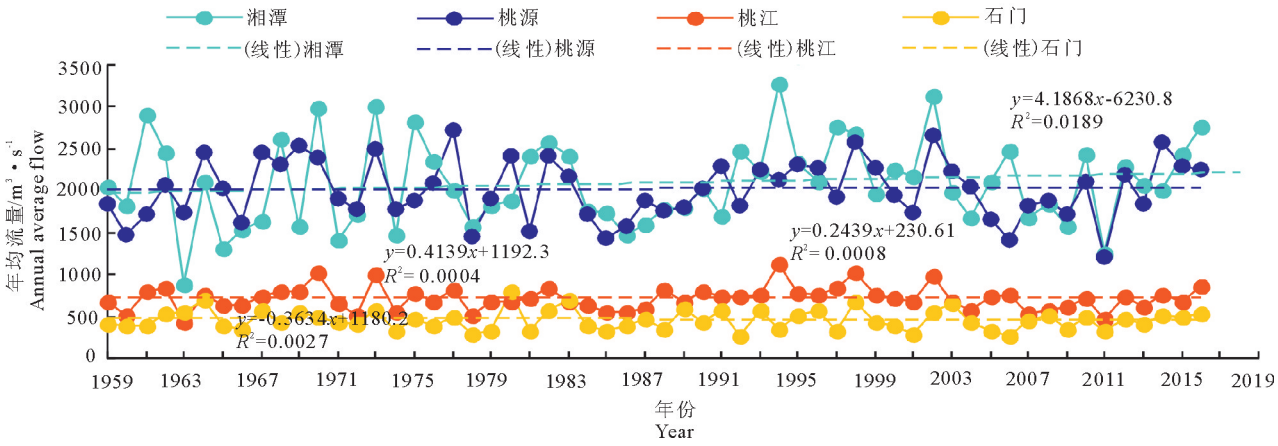

图1 四水流域时间序列的年均流量变化

Fig.1 Changes and trends in the annual average flow of the four rivers

表1 四水4个水文站年均流量突变检验结果

Tab.1 Statistical results of annual runoff variation at four hydrological stations of the four rivers

水文站	不同检验方法的水文变异年份			变异年
	M-K检验法	累计距平法	T检验法	
湘潭站	1977,1988,2009	1962,1991	1983,1991	1991
桃江站	1961,2007,2014	1987,2001	1987,2002	1987
桃源站	1961,1980,1989	1989,2004	1989,2011	1989
石门站	1962,1973,1990	1973,1983	1979,2013	1973

2.3 四水流域环境水流指标

根据表1得出的四水流域各观测站水文突变年份,将各水系的水文序列划分为突变前和突变后两个阶段,在不同时间序列的流量数据中,运用IHA计算软件,分析四水流域环境流指标突变前后的偏离度。

四水流域环境流指标计算结果见表2。

表2 四水流域环境流指标计算结果

Tab.2 Calculated environmental flow index for the four rivers

	流量事件	湘潭站			桃江站			桃源站			石门站		
		突变前/ $m^3 \cdot s^{-1}$	突变后/ $m^3 \cdot s^{-1}$	偏移度/%	突变前/ $m^3 \cdot s^{-1}$	突变后/ $m^3 \cdot s^{-1}$	偏移度/%	突变前/ $m^3 \cdot s^{-1}$	突变后/ $m^3 \cdot s^{-1}$	偏移度/%	突变前/ $m^3 \cdot s^{-1}$	突变后/ $m^3 \cdot s^{-1}$	偏移度/%
各月枯水流量	1月	843.2	1078.0	28	366.3	430.6	18	652.3	841.8	29	110.9	143.5	29
	2月	1124.0	1214.0	8	428.0	495.2	16	824.8	989.8	20	151.6	173.2	14
	3月	1416.0	1643.0	16	542.1	546.4	1	1072.0	1398.0	30	198.3	221.6	12
	4月	1784.0	1868.0	5	615.8	618.7	0	1510.0	1691.0	12	249.9	260.0	4
	5月	1872.0	1942.0	4	636.9	638.9	0	1813.0	1793.0	-1	289.8	307.1	6
	6月	1687.0	1980.0	17	638.9	625.4	-2	1692.0	2009.0	19	253.4	300.9	19
	7月	1186.0	1488.0	26	528.0	546.2	3	1442.0	1692.0	17	238.5	317.9	33
	8月	1094.0	1435.0	31	470.2	465.2	-1	1273.0	1383.0	9	215.9	257.4	19
	9月	1036.0	1198.0	16	406.5	418.2	3	1066.0	1159.0	9	190.2	215.6	13
	10月	899.8	950.0	6	383.2	376.7	-2	1004.0	944.9	-6	181.3	199.7	10
	11月	988.3	1046.0	6	440.6	397.2	-10	1055.0	998.9	-5	199.9	205.0	3
	12月	806.0	908.1	13	377.3	351.8	-7	751.5	815.0	8	134.7	165.2	23
特枯流量	极小值	338.7	337.4	0	127.2	147.3	16	354.2	334.0	-6	55.2	46.4	-16
	历时/d	12.8	6.5	-49	10.3	3.5	-66	11.3	5.5	-52	18.8	4.3	-77
	极小值出现时间/JD	296.4	338.9	23	327.4	311.4	9	342.9	333.3	5	56.2	30.1	14
	年极小值出现次数	3.0	1.2	-59	4.3	8.2	92	3.1	7.4	136	2.2	7.8	252
高流量脉冲	极大值	5067.0	4896.0	-3	1529.0	1369.0	-10	5756.0	4754.0	-17	1768.0	1424.0	-19
	历时/d	10.4	9.2	-11	6.9	7.9	15	8.3	9.4	14	5.7	5.7	1
	极大值出现时间/JD	159.7	150.8	5	178.0	145.6	18	186.3	166.0	11	183.0	181.9	1
	年极大值出现次数	7.2	8.3	16	12.0	12.2	1	9.7	8.9	-8	14.5	15.5	7
	上升率	796.4	813.9	2	339.4	273.8	-19	1337.0	816.4	-39	690.7	492.4	-29
	下降率	-478.0	-481.5	1	-231.8	-204.0	-12	-742.0	-627.0	-15	-301.4	-242.0	-19

续表 2

流量事件		湘潭站			桃江站			桃源站			石门站		
		突变前/ $m^3 \cdot s^{-1}$	突变后/ $m^3 \cdot s^{-1}$	偏移度/%	突变前/ $m^3 \cdot s^{-1}$	突变后/ $m^3 \cdot s^{-1}$	偏移度/%	突变前/ $m^3 \cdot s^{-1}$	突变后/ $m^3 \cdot s^{-1}$	偏移度/%	突变前/ $m^3 \cdot s^{-1}$	突变后/ $m^3 \cdot s^{-1}$	偏移度/%
小洪水	极大值	14830.0	14160.0	-5	5822.0	5600.0	-4	17590.0	18360.0	4	8512.0	8041.0	-6
	历时/d	34.9	41.6	19	21.7	54.2	150	26.4	37.9	43	14.1	24.0	70
	极大值出现时间/JD	150.3	182.7	18	157.9	193.1	19	180.0	208.0	15	184.1	187.1	2
	年极大值出现次数	0.5	0.9	77	0.5	0.3	-38	0.4	0.3	-20	0.6	0.4	-40
	上升率	1087.0	1291.0	19	722.9	481.9	-33	2883.0	1372.0	-52	2307.0	2282.0	-1
	下降率	-1021.0	-1058.0	4	-602.3	-271.0	-55	-1281.0	-1229.0	-4	-1000.0	-602.0	-40
大洪水	极大值	19230.0	19950.0	4	8135.0	8822.0	8	23470.0	24060.0	3	12000.0	14610.0	22
	历时/d	26.0	24.5	-6	49.5	33.8	-32	34.0	35.7	5	16.0	31.8	99
	极大值出现时间/JD	181.7	154.5	15	183.5	187.6	2	193.0	198.3	3	181.0	192.1	6
	年极大值出现次数	0.1	0.1	-18	0.1	0.3	367	0.1	0.3	150	0.1	0.1	91
	上升率	1325.0	1686.0	27	685.6	760.1	11	1333.0	2959.0	122	1945.0	2137.0	10
	下降率	-1519.0	-1175.0	-23	-601.7	-1367	127	-1564.0	-1444.0	-8	-1056.0	-733.8	-31

2.3.1　湘江　湘潭站不同流量事件分布见图 2。从流量事件的分布情况来看，突变后大洪水事件有所减少，小洪水事件有所增加，而特枯流量事件在突变后的 26 年内只发生两次，并且大洪水和特枯流量事件在 2006 年以后就再也没有出现过，小洪水事件出现时间间隔有所增长且量值有所增加，枯水流量事件和高流量脉冲事件更加集中。整体流量过程逐渐并入到小洪水、高流量脉冲时间和枯水流量事件中，流量事件发生的多样性减少，环境流组成成分逐渐单一化。

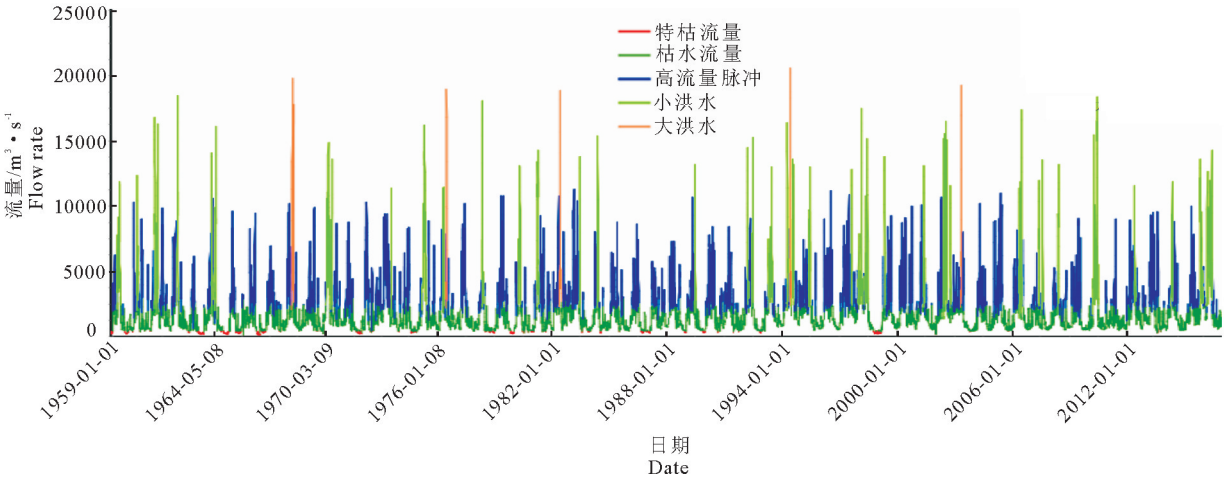

图 2　湘潭站不同流量事件分布

Fig.2　Distribution of flow events at Xiangtan station

根据湘潭站各环境流指标的变化来看（表 2），各月枯水流量在水文变异后均有不同程度的增加。其中，8 月枯水流量增幅最大，偏移度达到 31%；特枯流量事件和小洪水事件出现时间推迟了 1 个月左右，高流量脉冲出现时间提前了 9 d，大洪水事件出现时间提前了 1 个月；特枯流量事件出现次数降低为原来的 1/3，高流量脉冲次数增加了1 次，大、小洪水事件的出现次数变化都不大；大洪水和高流量脉冲事件的历时略微减少，特枯流量事件历时减少达到 49%，小洪水历时增加了 7 d；大洪水、小洪水和高流量脉冲事件的上升率和下降率都呈上升趋势（除了大洪水的下降率呈下降趋势）。

2.3.2　资水　桃江站不同流量事件分布见图 3。从流量事件的分布来看，桃江站的环境流量组成在突变后变化不大。突变后的大洪水事件明显增多，小洪水事件明显减少，特枯流量事件有所增加，但枯水流量事件和高流量脉冲事件总体上没有发生明显变化。大洪水事件出现时间间隔减少且量值明显增加，小洪水事件出现时间间隔减少且量值略有减少。与突变前相比，环境流较为多样化，流量过程年内更加丰富。

从环境流指标的均值来看，枯水流量事件在突变前后无明显变化，各月的量值略有增加，其中 1 月的流量增幅最大，但偏移度仅有 18%；小洪水事件

和大洪水事件的极值出现时间均有所推迟，其中小洪水事件的极值出现时间推迟35 d左右，高流量脉冲事件的极值出现时间提前了32 d，特枯流量事件的极值出现时间提前了16 d；特枯流量事件和大洪水事件平均历时减少，高流量脉冲事件和小洪水事件平均历时增加，其中突变后的小洪水事件平均历时偏移度达到150%；特枯流量事件和大洪水事件的出现次数明显增加，小洪水事件有所减少，高流量脉冲事件几乎没有发生改变；高流量脉冲事件及小洪水事件的上升率和下降率减少，大洪水事件的上升率和下降率增加，其中下降率的偏移度超过100%(表2)。可以看出，偏离度较大的有大洪水事件的极大值出现次数和下降率、小洪水事件的历时、特枯流量事件的极小值出现次数，偏离度都超过了90%。从总体上可以看出，偏离程度相对较大的事件是大、小洪水事件。

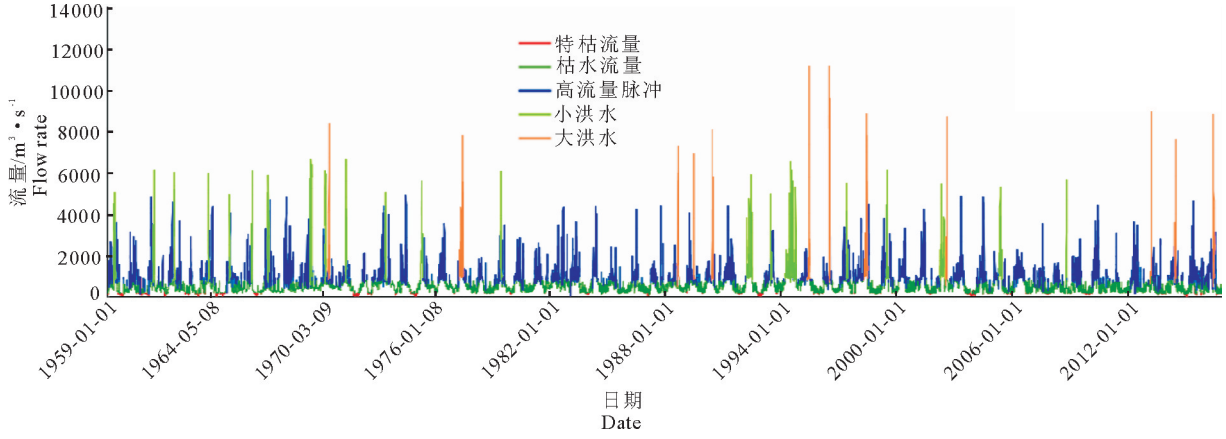

图3　桃江站不同流量事件分布

Fig.3　Distribution of flow events at Taojiang station

2.3.3　沅水　桃源站不同流量事件分布见图4。从各流量事件的组成成分可以看出，环境流量组成在突变后变化不大。突变后大洪水事件有所增加，小洪水事件略有减少，特枯流量事件发生次数增加，高流量脉冲事件发生次数减少，枯水流量事件的变化程度不明显。大洪水事件出现时间间隔减少，小洪水事件出现时间间隔有所增长且量值略有增加，枯水流量时间出现时间间隔明显减少且量值年内分别表现为增加和减少的趋势。与突变前相比，环境流组成较为多样化，流量过程年内更加丰富。

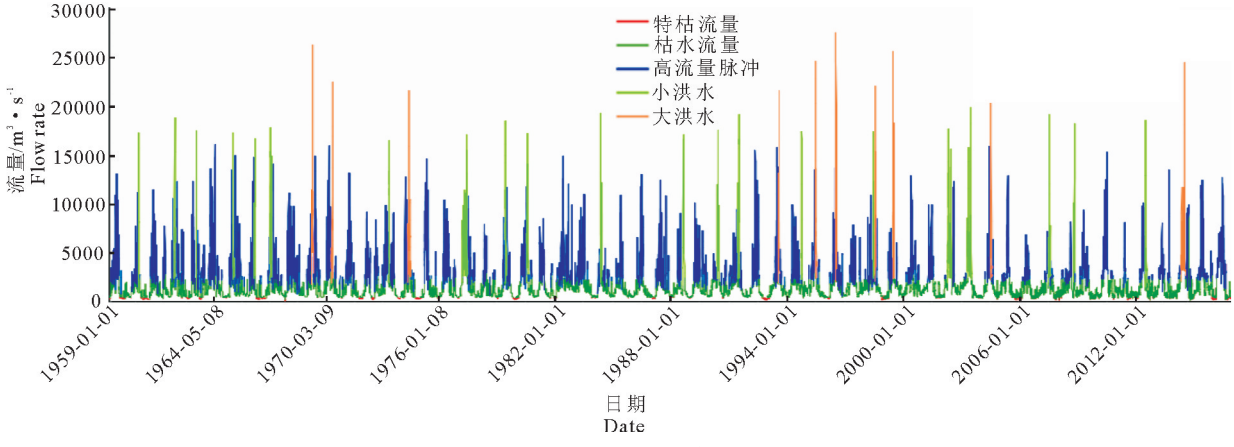

图4　桃源站不同流量事件分布

Fig.4　Distribution of different flow events at Taoyuan station

从环境流指标的均值来看，枯水流量事件在突变前后变化不大，除5月、10月和11月的流量略有减少外，其余各月流量均有所增加，其中3月的增幅最大，偏移度达到30%；大洪水事件和小洪水事件出现时间均有所推迟，其中小洪水事件推迟将近1个月，高流量脉冲事件和特枯流量事件出现时间有所提前；特枯流量事件平均历时明显减少，小洪水事件平均历时增加了11 d，高流量脉冲事件和大洪水事件平均历时变化微弱；特枯流量事件和大洪水事件出现次数明显增加，偏移度分别达到140%和

150%，高流量脉冲事件出现的次数基本不变，小洪水事件出现的次数略有减少；高流量脉冲事件及小洪水事件的上升率和下降率减少，大洪水事件的上升率增加，下降率减少，其中上升率的偏移度达到122%(表 2)。受影响较大的环境流指标包括大洪水事件出现的次数及上升率、特枯流量事件出现的次数及历时、小洪水事件的上升率，受影响较大的流量事件包括特枯流量事件和大洪水事件。

2.3.4　澧水　石门站不同流量事件分布见图 5。从流量事件的分布情况来看，石门站在突变后大洪水事件、特枯流量事件明显增加，高流量脉冲事件略有减少，小洪水事件略有减少。大洪水事件出现时间间隔减少且量值显著增加，小洪水事件出现时间间隔增加显著但量值略有减少，特枯流量时间出现时间明显减少且量值减少。与突变前相比较，环境流组成更为多样化，流量过程年内更为丰富。

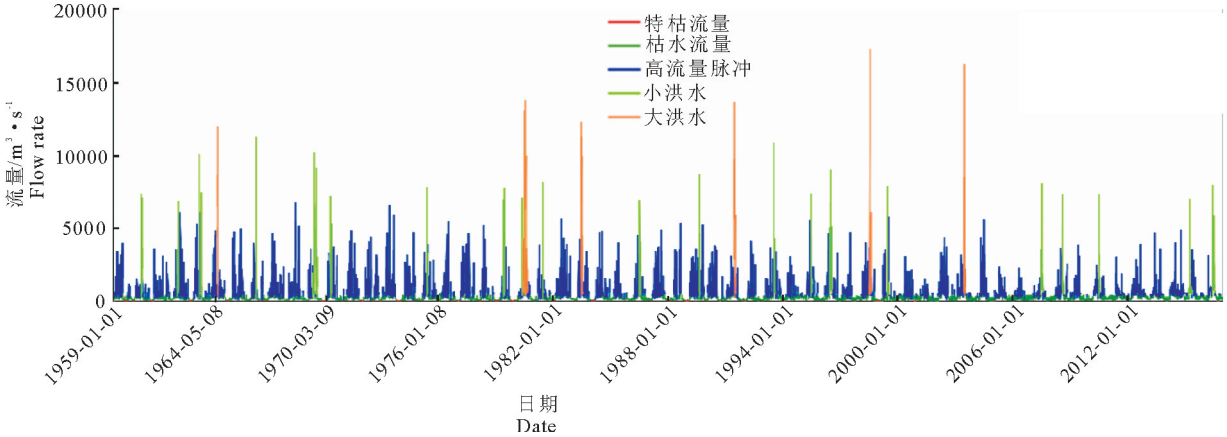

图 5　石门站不同流量事件分布

Fig.5　Event distribution of flow events at Shimen station

从环境流指标的均值来看，枯水流量事件在突变前后变化不大，月均值均略有增加，其中 7 月的增幅最大，偏移度达到 33%；大洪水事件和小洪水事件出现时间均有所推迟，高流量脉冲事件和特枯流量事件出现时间有所提前，其中特枯流量事件出现时间提前 25 d 左右；大洪水和小洪水事件平均历时明显增加，偏移度分别达到 99%和 70%，特枯流量事件平均历时明显减少，偏移度达到 77%；特枯流量事件和大洪水事件出现次数明显增加，偏移度分别达到 252%和 91%，小洪水事件出现的次数略有减少；高流量脉冲事件的上升率和下降率减少，大洪水事件的上升率增加，下降率减少，小洪水事件的上升率和下降率的偏离度都有不同程度下降(表 2)。受影响较大的环境流指标包括大洪水事件出现的次数及历时、特枯流量事件出现的次数及历时、小洪水事件的历时，受影响较大的流量事件包括特枯流量事件的大洪水事件。

3　讨论

3.1　湘江环境流单一化及其生态影响

本研究表明，水文突变后小洪水极大值出现时间延迟 1 个月，平均历时增加了 7 d，特枯流量事件历时减少达到 49%，大多数流量过程划入小洪水事件、高流量脉冲事件和枯水流量事件的模式，流量的变化范围收窄，湘江流域环境流的组成有单一化趋势。造成这种变化的主要原因是湘江梯级开发的结果，该流域是四水中流量最大的河流，水量资源十分丰富，梯级开发规划建设 8 级电站，潇湘、近尾洲、大源渡、株洲电站以及水库多采用“蓄丰补枯”的调度方式，多层梯级开发会影响水库汛期蓄水，从而导致湘江流域大洪水事件减少，在非汛期水库放水，导致小洪水出现时间延迟和特枯流量的减少甚至消失。5 种流量事件对于维持河流生态功能发挥着至关重要的作用，流量组成的单一化转变，势必会对湘江生态产生严重影响。调查发现，大源渡、株洲大坝相继建成后，湘江流域“四大家鱼”产卵场从原来的 88 km江段萎缩至现在的 39 km，少见集中成批产卵，仅零星可见，库区江段“四大家鱼”在渔获物中的比例仅为 10.8%，产卵群体不足。大源渡建坝蓄水后，家鱼繁殖量明显减少，可以从湖南鱼类原种场的捞苗情况得以说明，1998 年的捞苗量出现一个明显拐点，家鱼苗的比重从 1997 年的 39%骤降为 1.3%，并连续 3 年未捞到鳙苗，其后 3 年鳙苗量亦极少见，6 年后稍有恢复，但占比仍很低；1998 年之后，家鱼苗的比例一直未能恢复到大源渡建坝前的水平。环境流组成单一化，造成鱼类洄游受阻，“四

大家鱼”等江河洄游性鱼类产卵场萎缩，导致湘江流域该生态类型鱼类资源的衰退。

3.2 资水、沅水和澧水环境流多样化

桃江、桃源和石门站环境流的组成与人类干扰前相比，流量事件的发生频率变高，环境流的组成更为多样化，流量过程年内更加丰富。水文改变后，流域枯水流量历时延长、高流量脉冲历时增加和大洪水次数增加，其他指标并无显著变化。资水流域水文突变后，洪水事件明显增加，其原因是流域内降雨强度大，除柘溪水库外，其他梯级电站没有有效发挥调洪错洪功能，加上河道采石采砂的影响，资江流域的洪水没有得到有效的控制（葛雷，2016）；钟姗姗和刘鹂（2020）通过建立水电开发环境系统熵流指标体系，发现水文改变后，总熵流转为负值，系统有序度增强，说明环境流的多样化趋势有利于增强资水流域的生态健康整体活力。沅江流域水资源十分丰富，干流梯级开发方案自施洞口以下计划有14个梯级，但多个水库梯级开发并没有显著改变沅江流域的环境流组成，反而使得其流量过程更加丰富，这主要依赖于沅江流域梯级水库比较完备的联合调度方案。澧水流域环境流的组成在水文突变后并无变化，贺方舟和黎昔春（2020）基于断面测绘资料分析发现，澧水洪道在突变后冲刷严重和下切速率加快，这也与本文研究结果（洪水事件增多、高流量脉冲历时增加造成河道冲刷）相吻合。

综上，水文情势变化后导致河流特枯流量、大洪水历时以及次数有明显变化。在以后的水库调度过程中，有必要采取相关措施，控制环境流改变程度在可接受范围内，特别是在枯水期控制下泄流量，保证特枯流量事件满足河流生境要求；此外，在后期科研中，可以深入探究如何区别出不同环境流改变程度的可接受阈值以及如何结合环境流改变，解决科学生态调度方案等方面的问题。

参考文献

董哲仁，张晶，赵进勇，2017. 环境流理论进展述评[J]. 水利学报，48(6)：670－677.

葛雷，2016. 桃江县防御资水流域性大洪水的思考及对策[J]. 湖南水利水电，(2)：55－57.

郭文献，夏自强，王远坤，等，2009. 三峡水库生态调度目标研究[J]. 水科学进展，20(4)：554－559.

贺方舟，黎昔春，2020. 近40年洞庭湖澧水洪道冲淤演变分析[J]. 中国农村水利水电，(4)：139－144.

李景保，罗中海，叶亚亚，等，2016. 三峡水库运行对长江荆南三口水文和生态的影响[J]. 应用生态学报，27(4)：1285－1293.

吕琳莉，李朝霞，2013. 雅鲁藏布江中下游径流变异性识别[J]. 水力发电，39(5)：13－15.

马晓超，粟晓玲，2013. 渭河环境流变化研究[J]. 水力发电学报，32(5)：90－97.

王鸿翔，张爱民，郭文献，2019. 基于EFCS法的长江上游环境流量评价[J]. 中国农村水利水电，(1)：77－82.

王俊娜，董哲仁，廖文根，等，2013. 基于水文-生态响应关系的环境水流评估方法—以三峡水库及其坝下河段为例[J]. 中国科学(技术科学)，43(6)：715－726.

王随继，闫云霞，颜明，等，2012. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析[J]. 地理学报，67(3)：388－396.

王西琴，刘斌，张远，2010. 环境流量界定与管理[M]. 北京：中国水利水电出版社.

危起伟，2012. 长江上游珍稀特有鱼类国家级保护区科学考察报告[M]. 北京：科学出版社.

钟姗姗，刘鹂，2020. 基于信息熵的流域水电开发环境系统演化分析[J]. 人民黄河，42(1)：72－76，81.

Burn D H，Elnur M A H，2002. Detection of hydrologic trends and variability[J]. Journal of Hydrology，255：107－122.

Kahya E，Kalayc S，2004. Trend analysis of streamflow in Turkey[J]. Journal of Hydrology，289：128－144.

Poff N L，Richter B D，2010. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA)：a new framework for developing regional environmental flow standards[J]. Freshwater Biology，55：147－170.

Richter B D，Mathews R，Harrison D L，et al，2002. Ecologically sustainable water management：managing river flows for ecological integrity[J]. Ecological Applications，13(1)：206－224.

Thame R E，2003. A global perspective on environmental flow assessment：emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers[J]. River Research and Application，19：397－441.

（责任编辑　万月华）

Environmental Flows in Four Watersheds of Dongting Lake Under Different Hydrological Conditions

WANG Hong-xiang, ZHU Yong-wei, ZHA Hu-fei, GUO Wen-xian

(North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou　450045, P.R.China)

Abstract: Xiangjiang, Zijiang, Yuanjiang and Lishui Rivers comprise a large part of the river system of Hunan Province and they all flow into Dongting Lake. In this study, variation in the environmental flows of these four Dongting Lake tributaries were compared before and after hydrological variation. Based on long-term daily runoff data (1959 - 2016) at hydrological stations (Xiangtan, Taojiang, Taoyuan, Shimen) on each river, we identified years when runoff changed abruptly (a hydrological event) in the time series using the Mann Kendall method, means of cumulative anomaly and sliding T test. The runoff time series was then divided into two stages, before and after the hydrological event, and then the composition of changes in environmental flow in the four rivers, before and after hydrological variation, were calculated and analyzed using IHA software. Results show that the environmental flow composition at each hydrological station in the four rivers changed to different degrees before and after the hydrological event. The deviation in the occurrence frequency of small floods was the largest at Xiangtan station of Xiangjiang River (77%)。The composition of environmental flow at Xiangtan station trended toward simplification, and the flows gradually merged into three types: small flood, high flow impulse and low flow, and the diversity of flow events decreased. There were no marked changes in environmental flow composition before and after hydrological events at Taojiang station. The degree of deviation in the occurrence of small floods at Taojiang station was the largest (150%). At Taoyuan station, large flood events increased after hydrological events, and the deviation in occurrence frequency of large floods was 150%, while small flood events decreased. For the environmental flow composition at Shimen station, large flood events and extreme low flow events clearly increased, the deviation in the frequency of extreme low flows was the largest (252%). In a word, the environmental flow at Taojiang, Taoyuan and Shimen stations was more diverse than before hydrological events, and changes in flow were more abundant. Our research results provide a scientific basis for ecological protection and restoration in the watersheds of these four tributaries to Dongting Lake.

Key words: environmental flow; hydrological variation; indicators of hydrologic alteration; Dongting Lake basin