

1988 – 2018 年洞庭湖北部地区地表水资源量演变分析

黄草^{1,2}, 姜万¹, 冯迪子¹, 曾杭^{1,2}, 周慧³

(1. 长沙理工大学 水利工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114; 3. 湖南省水文水资源勘测中心, 湖南 长沙 410007)

摘要: 洞庭湖区水资源总量较为丰富,但近年来在气候变化以及强人类活动的影响下,水资源短缺问题日益凸显。根据 1988 – 2018 年的降水及径流数据,采用趋势及突变分析等方法分析了洞庭湖北部地区降水量和地表水资源量的演变特征。结果表明:洞庭湖北部地区降水量呈先减小后增大的趋势,年际波动增大,荆南“三河”径流量呈显著减少;与 1988 – 2003 年(三峡水库蓄水前)相比,2004 – 2018 年(三峡水库蓄水后)洞庭湖北部地区本地水资源量由 $38.90 \times 10^8 \text{ m}^3$ 减少到 $30.07 \times 10^8 \text{ m}^3$,减小幅度为 22.7%;过境水资源量由 $608.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 减小到 $471.4 \times 10^8 \text{ m}^3$,减幅为 22.6%;2004 – 2018 年洞庭湖北部地区 9、10 月的过境水资源量大幅减少,其中 10 月份减少幅度达 45%。

关键词: 本地水资源量; 过境水资源量; 演变分析; 洞庭湖

中图分类号:TV211.1

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2021)03-0037-07

Evolution analysis of surface water resources in the north Dongting Lake area from 1988 to 2018

HUANG Cao^{1,2}, JIANG Wan¹, FENG Dizi¹, ZENG Hang^{1,2}, ZHOU Hui³

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Hunan Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-environmental Control and Restoration, Changsha

410114, China; 3. Hunan Hydrology and Water Resources Survey Center, Changsha 410007, China)

Abstract: The Dongting Lake area is enriched with water resources; however, under the influence of climate change and intense human activities, water resources shortage has become increasingly prominent in recent years. Based on the precipitation and runoff data from 1988 to 2018, the evolution characteristics of precipitation and surface water resources in the north part of Dongting Lake was analyzed using trend and abrupt change analysis methods. The results showed that the precipitation in the north Dongting Lake area showed a trend of decreasing first and then increasing, with an increasing amount of inter-annual fluctuations. The runoff of the “Three Rivers” in Jingnan decreased significantly. Compared with the period of 1988 – 2003 (before the impoundment of the Three Gorges Reservoir), the amount of local water resources in the north Dongting Lake area from 2004 to 2018 (after the impoundment of the Three Gorges Reservoir) decreased from $3.89 \times 10^9 \text{ m}^3$ to $3.01 \times 10^9 \text{ m}^3$, a decrease of 22.7%, and the amount of transit water resources decreased from $60.87 \times 10^9 \text{ m}^3$ to $47.14 \times 10^9 \text{ m}^3$, a decrease of 22.6%. Furthermore, the amount of transit water resources in the north Dongting Lake area from 2004 to 2018 decreased sharply in September and October, with a decrease of 45% in October.

Key words: local water resources; transit water resources; evolution analysis; the Dongting Lake

收稿日期:2020-11-12; 修回日期:2021-03-04

基金项目:国家自然科学基金项目(51709019); 湖南省教育厅优秀青年项目(18B126); 湖南省水利科技项目(XSKJ2018179-42)

作者简介:黄草(1985-),男,湖南衡阳人,博士,讲师,研究方向为水文学及水资源。

通讯作者:周慧(1984-),女,湖南衡阳人,博士,工程师,研究方向为水文学及水资源。

1 研究背景

洞庭湖是我国第二大淡水湖泊,也是长江中下游重要的调蓄湖泊,对长江中下游的水生态、水环境等方面具有重要作用。由于气候变化以及(长)江(洞庭)湖关系深度调整的影响,特别是长江荆江河段河槽冲深的影响,枯水季松滋、太平、藕池“三口”门口前长江水位下降,“三口”入湖径流量大幅减少,断流时间延长,洞庭湖北部地区已成为湖南省严重干旱缺水地区。“三口”断流时间延长、湖泊水位降低、湖面萎缩以及湿地退化导致湖区水生态系统重新调整,从而使生物生境和生物多样性在一定程度上遭到破坏,湖区水生态保护任务更加艰巨复杂。因此,开展洞庭湖北部地区水资源演变规律研究,是解决该地区水资源供需矛盾的基础性研究,对规划和建设水资源配置工程具有十分重要的意义。

我国区域性水资源演变规律的研究始于北方地区,大量研究表明我国华北地区、西北地区、三江源地区等许多河流自 1980 年以来径流量明显减少^[1-5]。宁怡楠等^[6]利用 M-K 检验法和双累积曲线法分析了黄河中游 1960-2015 年的资料,发现黄河中游径流量显著减少;焦紫岚等^[7]利用最小二乘法等方法分析了塔里木河近 50 年的径流资料,发现塔里木河年径流量呈现逐年减少趋势,减小幅度为 $3.03 \times 10^8 \text{ m}^3/10\text{a}$;雷静等^[8]分析了人类活动对长江流域水资源量演变趋势的影响,提出了相应的对策措施以及进一步深化研究的建议;管晓祥等^[9]利用 M-K 非参数检验法分析了中国 6 个不同气候区典型流域水文站 55 年的水文资料,发现随着近年来气温的不断升高,各流域径流量均出现了不同程度的减少。这些研究对解析气候变化与生态环境的互馈影响以及科学制定流域水资源开发利用方案具有重要的作用。

随着洞庭湖北部地区水资源短缺问题的日益严峻,关于洞庭湖区及洞庭湖西北部地区水资源量问题的研究也逐步开展。如,李静芝等^[10]构建了洞庭湖生态经济圈水资源供需系统仿真模型,研究了该地区的需水量和供水量;胡春宏等^[11]采用定额指标法和趋势预测法计算 2030 年洞庭湖区总需水量为 $132.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,缺水量为 $24.1 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中“三口”河系总需水量为 $49.9 \times 10^8 \text{ m}^3$,缺水量为 $15.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。在水资源演变规律方面,孙思瑞等^[12]通过构建模型并根据各调度方案计算不同方案下洞庭湖出口的水位变化过程,结果表明洞庭湖水水位受到了

蓄水期三峡水库蓄水的影响,其中 10 月份受到的影响较大;Cheng 等^[13]指出受三峡水库蓄水影响,洞庭湖秋季水位下降了 0.52~2.26 m,年最低水位时间提前了 5~35 d,洞庭湖的水文情势改变度达到了 50.4%(中度改变);徐幸仪等^[14]等采用 Mann-Kendall 突变检验方法对洞庭湖出口控制水文站城陵矶(七里山)及长江干流水文站枝城站、螺山站的 1960-2015 年流量、水位的年际和年内变化趋势进行分析,结果表明洞庭湖水位和流量年际变化趋势差异明显,表现为枝城、城陵矶(七里山)、螺山 3 站的变化趋势大相径庭,同时长江上游水利工程尤其是三峡工程的修建,对洞庭湖水资源的调节影响明显;贺秋华等^[15]采用掩膜处理、K-Means 聚类方法分析城陵矶多年日观测水位数据,结果表明三峡水库对下泄量的调控在缓解洞庭湖洪涝灾害隐患的同时,也使得低枯水位提前 1 个月,且对洞庭湖枯水期的补给水量极其有限。目前,江湖关系持续调整,洞庭湖北部地区缺水风险继续增大,有必要立足新江湖关系重新研究该地区的水资源量以及变化趋势,以利于积极应对洞庭湖北部地区的干旱缺水问题。

因此,本文通过研究洞庭湖北部地区 1988-2018 年降水量、径流量的时空变化,评价分析了洞庭湖北部地区湖南省部分的水资源量及其演变规律;探讨了江湖关系调整对该地区过境水资源量的影响,重点分析了三峡水库蓄水前(1988-2003)、后(2004-2018)该地区过境水资源量的变化趋势,为进一步优化区域水资源配置与调度以及合理的水资源开发利用与保护措施提供科学依据。

2 研究区概况及数据来源

2.1 研究区概况

洞庭湖地区地跨湘、鄂两省,是国家生态保护和湖南省生态文明建设的战略要点。本文中洞庭湖北部地区主要为澧水洪道以东、草尾河以北、东洞庭湖以西的湖南省区域,即通常所说的洞庭湖“四口”(松滋口、太平口、藕池口和调弦口)水系地区,具体包括岳阳市的君山区和华容县、益阳市的南县(含大通湖区)和沅江市、常德市的安乡县共 5 个县级行政区(如图 1),总面积 $5\,980 \text{ km}^2$,2018 年区域总人口 92.2×10^4 ,农作物播种面积 $61.4 \times 10^4 \text{ hm}^2$,地区生产总值 $1\,298.3 \times 10^8$ 元。

2.2 数据来源

(1)降雨数据。选取洞庭湖北部地区时间序列完整、位置分布均匀的 6 个气象站点(君山、华容、

南县、沅江、安乡和岳阳站,见图1)1988-2018年的日降水资料,这6个站点的资料较为完整且典型,能基本反映研究区域的降水特性。

(2)径流资料。选取荆南“三河”的5座控制性水文站(弥陀寺、新江口、沙道观,管家铺和康家岗站)1988-2018年的实测日流量数据分析评价研究区的过境水资源量及其变化趋势。

(3)水资源量资料。根据《湖南省第2次水资源调查评价》成果及岳阳、常德和益阳水资源公报成果(其中水资源公报数据年份为2010-2018年),分析研究区域本地水资源量及其时空变化特征。

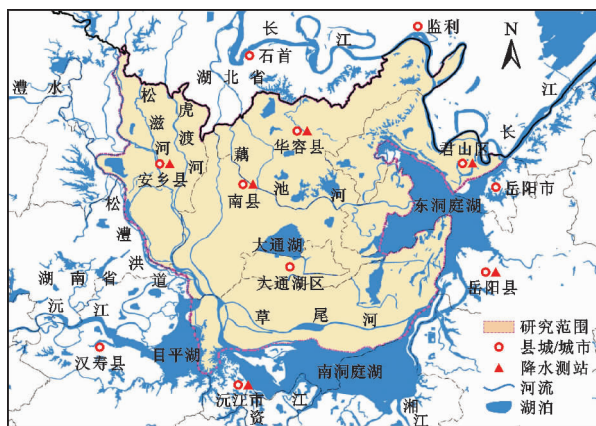


图1 研究区及其水系分布图

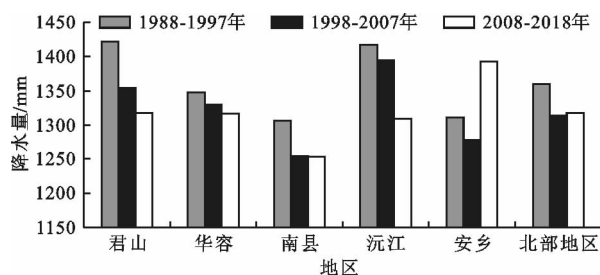


图2 1988-2018年研究区及各县级行政区分年代年均降水量

3.2 本地水资源量

基于《湖南省第2次水资源调查评价》成果及岳阳市、常德市和益阳市的2010-2018年水资源公报成果,分析研究区各县级行政区1988-2018年年均本地水资源量及其变化情况,如图4所示。

分析图4可知,1988-2018年洞庭湖北部地区年均本地水资源量为 $32.33 \times 10^8 \text{ m}^3$,2002年本地水资源量最多,为 $61.79 \times 10^8 \text{ m}^3$,2007年本地水资源量最少,为 $12.51 \times 10^8 \text{ m}^3$,年均本地水资源量最大值为最小值的4.94倍。沅江的本地水资源量年际变化最大,最大值与最小值之比达10.27;君山区的本地水资源量年际变化最小,最大值与最小值之比为3.18。空间上沅江市本地水资源量占比最大,

3 结果与分析

3.1 降水量及其变化趋势

基于君山、华容、南县、沅江、安乡和岳阳6个气象站1988-2018年的日降水量资料分析,洞庭湖北部地区降水量较丰富,多年平均降水量为1309.6 mm,2002年降水量最大,为1809.2 mm,2007年降水量最小,为1038.6 mm。降水量年内分布以6月份最多,为183.7 mm;12月份最少,仅37.7 mm。

根据降水资料,统计出每10 a洞庭湖北部各县的年均降水量及整个研究区的年均降水量,如图2所示。由图2可见,洞庭湖北部地区1988-1997年的年均降水量较大,1998-2007和2008-2018年的年均降水量明显减少,各县级行政区的降水量变化与整个地区的整体趋势类似;空间上沅江市的多年平均降水量最大,南县最小,具有南多北少的特点。为了进一步分析该地区年降水量变化趋势,绘制1988-2018年研究区年降水量过程线和5 a滑动平均线,如图3所示。图3表明,1988-2018年该地区的降水量年际间变化较大,年降水量最大值为最小值的1.74倍;1988-1997年降水量呈增大趋势,2000-2008年降水量呈显著减少趋势,2008以后年降水量再次呈上升趋势,但年际变化明显增大。

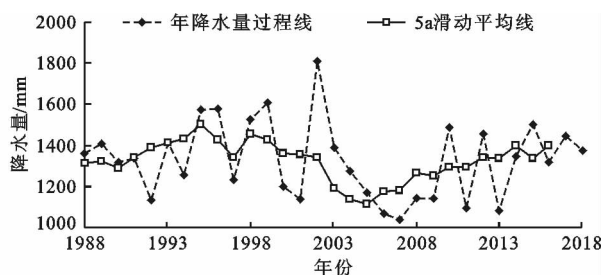


图3 1988-2018年研究区年降水量过程线及5a滑动平均线

为33.28%,南县最小,为14.37%。

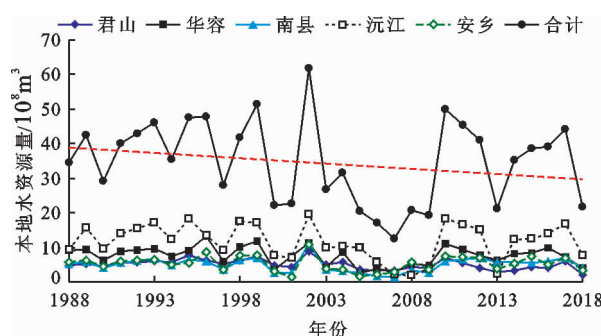


图4 1988-2018年研究区各县级行政区本地水资源量年际变化

为了分析三峡工程建设前后洞庭湖北部地区各

县级行政区本地水资源量的变化,将 1988—2018 年的多年平均水资源量划分为 1988—2003 年(三峡水库蓄水前)和 2004—2018 年(三峡水库蓄水后)两个时期进行统计分析,结果见表 1。由表 1 可见,三峡工程蓄水后,洞庭湖北部地区多年平均水资源总量由蓄水前的 $38.90 \times 10^8 \text{ m}^3$ 减小到蓄水后的

$30.07 \times 10^8 \text{ m}^3$,减小幅度为 22.70%。各县级行政区的本地水资源量变化与北部地区的整体趋势类似,5 个县市的平均水资源量均有不同程度的减少。其中,沅江市的本地水资源量变化率最大,由 $13.21 \times 10^8 \text{ m}^3$ 减小到 $9.69 \times 10^8 \text{ m}^3$,减小幅度达 26.65%,安乡县最小,减小幅度为 16.35%。

表 1 1988—2018 年三峡水库蓄水前后研究区各县级行政区平均水资源量

 10^8 m^3

项目	君山	华容	南县	沅江	安乡	合计
1988—2003 年平均水资源量(蓄水前)	5.89	8.54	5.45	13.21	5.81	38.90
2004—2018 年平均水资源量(蓄水后)	4.34	6.71	4.47	9.69	4.86	30.07
变化率/%	-26.32	-21.43	-17.98	-26.65	-16.35	-22.70

3.3 过境水资源量

洞庭湖北部地区的过境水资源量是指由荆南“三口”(即松滋口、藕池口和太平口,调弦口已于 1958 年封堵)分流长江水经松滋河、虎渡河以及藕池河干支流入洞庭湖的水量,其他跨流域调水量不计算在内。近 30 年来,江湖关系持续调整,“三口”分流水量出现了明显的变化,这是导致洞庭湖西北地区季节性干旱的重要因素之一^[16-18]。选取荆南“三河”的 5 座控制性水文站(弥陀寺、新江口、沙道观、管家铺和康家岗水文站)1988—2018 年的实测日流量数据来分析评价研究区的过境水资源量及其变化趋势。

3.3.1 过境水资源年际变化分析 基于荆南“三

河”5 个水文站的长系列逐日流量数据,分析得出的 1988—2018 年荆南“三河”年径流量特征值见表 2。由表 2 可看出,1988—2018 年荆南“三河”径流量年际波动较大,荆南“三河”的多年平均径流量为 $537.0 \times 10^8 \text{ m}^3$,最大值为 $1\,022.6 \times 10^8 \text{ m}^3$,最小值为 $180.9 \times 10^8 \text{ m}^3$,最大值与最小值之比为 5.65。其中,藕池河的径流量年际变化最大,最大年径流量与最小年径流量之比达 11.48。

为进一步分析三峡工程建设前后荆南“三河”过境水资源量的变化,将 1988—2018 年的逐日流量序列划分为 1988—2003 年(三峡水库蓄水前)和 2004—2018 年(三峡水库蓄水后)两个时期进行统计分析,结果见表 3 和图 5。

表 2 1988—2018 年荆南“三河”年径流量特征值

河流	水文站	多年平均径流量/ 10^8 m^3	最小年径流量/ 10^8 m^3	最大年径流量/ 10^8 m^3	最大年径流量与 最小年径流量之比
松滋河	沙道观+新江口	311.4	116.9	521.5	4.46
虎渡河	弥陀寺	98.9	35.2	170.6	4.85
藕池河	管家铺+康家岗	126.7	28.8	330.5	11.48

表 3 1988—2018 年三峡水库蓄水前后荆南“三河”径流量及其变化率

河流	水文站	1988—2003 年(蓄水前)/ 10^8 m^3			2004—2018 年(蓄水后)/ 10^8 m^3			变化率/%		
		汛期	非汛期	多年平均	汛期	非汛期	多年平均	汛期	非汛期	多年平均
松滋河	沙道观+新江口	293.8	44.7	338.5	251.4	32.9	284.3	-14.4	-26.4	-16.0
虎渡河	弥陀寺	110.4	4.9	115.3	72.7	5.7	82.7	-34.2	16.3	-28.3
藕池河	管家铺+康家岗	148.1	6.8	154.9	98.9	5.5	104.4	-33.2	-19.1	-32.6
合计		552.3	56.4	608.7	427.4	43.9	471.4	-22.6	-22.2	-22.6

由表 3 和图 5 可看出,三峡工程蓄水后,荆南“三河”的汛期(4—9 月)的分流量减少,由蓄水前

的年均 $552.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 减小到蓄水后的 $427.4 \times 10^8 \text{ m}^3$,减小幅度为 22.6%;三峡工程蓄水后,“三河”中

汛期径流量变化最大的为虎渡河,减少了 34.2%,非汛期(10 – 翌年 3 月)虎渡河的分流量反而有所增加,年均非汛期分流量由 $4.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到 $5.7 \times 10^8 \text{ m}^3$,增长了 16.3%,由于非汛期总流量占比很小,虎渡河的多年平均分流量仍然呈减少趋势;蓄水后总年均分流量由蓄水前的 $608.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 减少到 $471.4 \times 10^8 \text{ m}^3$,减少了 22.6%,其中藕池河的年均分流量减小幅度最大,为 32.6%。

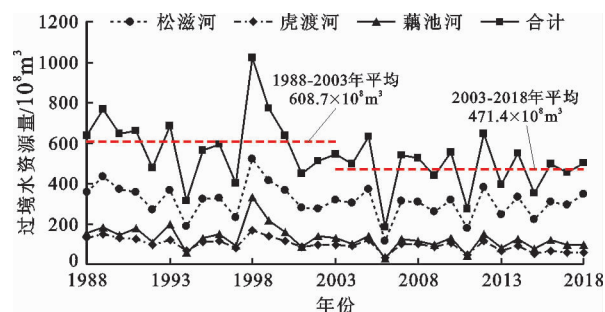


图 5 荆南“三河”径流量年际变化过程线

分别采用参数 Pearson 线性相关检验法、非参数 Mann – Kendall (M – K) 秩次相关检验法和 Spearman 秩次相关检验法^[19–20]进一步对 1988 – 2018 年荆南“三河”年径流序列进行趋势检验,得到趋势诊断结果,如表 4 所示。由表 4 可见,在 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平下,1988 – 2018 年松滋河的径流量 Pearson 线性相关检验的减少趋势不显著,但两种秩次相关检验的减小趋势均为显著,因此松滋河段的径流量

减小显著;虎渡河和藕池河径流量的 Pearson 线性相关检验的减少趋势和秩次相关检验的减小趋势均为显著。因而,荆南“三河”的径流量存在显著的减小趋势。
3.3.2 过境水资源月变化分析 根据荆南“三河”各水文站的径流量序列,统计分析 1988 – 2018 年荆南“三河”多年月平均径流量占年平均径流量的百分比,如图 6 所示。图 6 表明,径流量的年内分配不均,其中汛期(4 – 9 月)平均径流量大约占多年平均径流量的 93.5% 以上,松滋口、太平口、藕池口汛期径流量占比分别为 91.1%、96.9%、96.6%。非汛期“三河”来水很少,12 – 翌年 3 月基本处于断流状态,这对于研究区非汛期的水资源开发利用非常不利。

通过计算分析三峡工程蓄水运行前后荆南“三河”各月平均径流量的变化情况,结果如图 7 所示。由图 7 可看出,三峡水库蓄水后,12 – 翌年 5 月荆南“三河”的径流量有所增大,径流量增加比例最大的为 2 月,增加了 155%;6 – 10 月荆南“三河”的径流量显著减小,径流量减少比例最大的为 10 月,减少了 45%。虽然 12 – 翌年 5 月荆南“三河”的径流量增加比例较大,但由于径流量增加的绝对值小,对湖区的水资源开发利用影响比较有限;而 6 – 8 月主汛期荆南“三河”径流量的减少增大了洞庭湖北部地区的“伏旱”风险,9 – 10 月径流量的减少,将导致洞庭湖枯水期的提前与延长,引发“秋旱”,从而加剧洞庭湖北部地区的水资源短缺。

表 4 1988 – 2018 年荆南“三河”年径流量序列趋势诊断结果 ($\alpha = 0.05$)

河流	水文站	Pearson 检验(线性)			M – K 检验		Spearman 检验		
		r	r_α	显著性	P	显著性	U	$U_{\alpha/2}$	显著性
松滋河		-0.34	0.36	不显著	0.04	显著	-2.18	2.05	显著
	新江口	-0.31	0.36	不显著	0.07	不显著	-2.00	2.05	不显著
	沙道观	-0.38	0.36	显著	0.02	显著	-2.70	2.05	显著
虎渡河		-0.60	0.36	显著	0.00	显著	-4.06	2.05	显著
	弥陀寺	-0.60	0.36	显著	0.00	显著	-4.06	2.05	显著
藕池河		-0.39	0.36	显著	0.06	不显著	-3.00	2.05	显著
	康家岗	-0.26	0.36	不显著	0.01	显著	-1.87	2.05	不显著
	管家铺	-0.40	0.36	显著	0.01	显著	-2.81	2.05	显著

注:在参数 Pearson 线性相关检验法中, $|r| > r_\alpha$ 时,表示数据系列变化显著;在非参数 M – K 秩次相关检验法中,计算值 $P <$ 参考值 (0.05) 时,表示数据系列变化显著;在 Spearman 秩次相关检验法中,计算值 $|U| >$ 参考值 $U_{\alpha/2}$ 时,表示数据系列变化显著。

4 讨 论

基于洞庭湖北部地区 1988 – 2018 年的降水和径流资料,本文采用趋势分析、突变分析等方法研究

其地表水资源的演变情势,以期为流域水资源开发利用与合理保护、区域引调水工程的规划与建设提供技术支持。

(1) 本研究采用了研究区域近 30 年的水文资

料以及湖南省水资源公报资料,数据来源可靠,为分析出科学合理结果提供了基础。从与其他学者的相关研究成果对比来看,李景保等^[21]认为三峡大坝建成后洞庭湖北部地区水资源总量减少幅度为 25%;贺秋华等^[15]提出荆南“三河”径流量减少了 $109.3 \times 10^8 \text{ m}^3$,减少幅度为 18.3%,这些结论与本文研究成果基本一致。此外,本文进一步分析了三峡水库蓄水后荆南“三河”径流量的变化情况,其中 10 月份径流量减小幅度达到了 45%,这对该地区的枯水期水资源利用带来了较大的负面影响。

(2)三峡大坝建成运行以来极大提高了流域的调蓄能力,对长江流域特别是荆江河段的防洪减灾有着重要意义。但同时也改变了上下游的水文情势,荆南“三河”的径流量明显减少^[16,21],枯水季洞庭湖北部地区的垸外河流水位大幅降低,低于向垸内引水和补水工程的最低取水水位,从而加剧了该

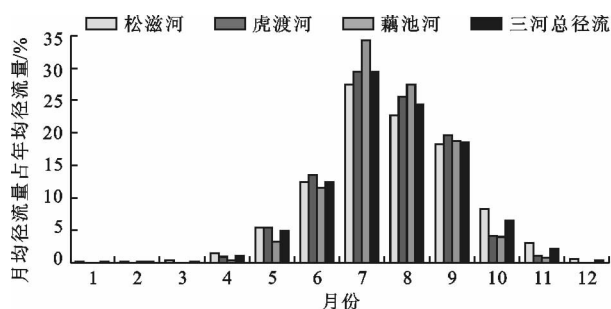


图6 1988-2018年荆南“三河”月平均径流量占年平均径流量的百分比

地区的区域性和季节性缺水问题。与此同时,垸内水系由于得不到外河水补充,枯水季难以实现水体流动和交换,垸内水系的水环境问题依然严峻,水质型缺水直接影响了人民的饮水安全。

(3)洞庭湖北部地区季节性和区域性缺水问题,特别是9、10月份的过境水量大幅减少而引发的枯水季提前与延长的问题,使枯水季农业生产用水受到了较大影响,因此需要进一步研究洞庭湖北部地区的水资源配置问题,进而提出科学合理的水资源开发利用方案。一方面是考虑从水资源较为丰沛的长江流域和澧水流域引水,通过水利工程措施调丰补枯,从水量上缓解研究区枯水季缺水问题;另一方面是加强洞庭湖北部地区的垸内与垸外水系连通以及垸内互连,建设垸内水网系统,促进垸内垸外水体的交换,提升水体稀释自净能力,解决水系黑臭化的水质问题。

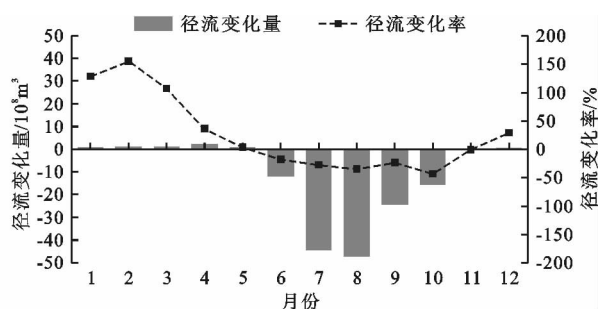


图7 三峡工程蓄水运行前后荆南“三河”月均径流量变化情况

5 结 论

(1)1988-2003年洞庭湖北部地区年均本地地表水资源量为 $38.90 \times 10^8 \text{ m}^3$,2004-2018年洞庭湖北部地区年均本地地表水资源量为 $30.07 \times 10^8 \text{ m}^3$,减少了 22.7%。

(2)荆南“三河”多年平均径流量(即洞庭湖北部地区多年平均过境水资源量)为 $537.0 \times 10^8 \text{ m}^3$,汛期的平均径流量占多年平均的 93.5%以上;非汛期荆南“三河”径流量很小,甚至断流。对比 1988-2003年(三峡水库蓄水前),2004-2018年(三峡水库蓄水后)荆南“三河”的总径流减少 $137.3 \times 10^8 \text{ m}^3$,减少率为 22.6%。

(3)2004-2018年(三峡水库蓄水后),荆南“三河”12-翌年5月的径流量有所增加,6-10月的径流量显著减少,其中10月份减少幅度达 45%,导致洞庭湖枯水期的提前与延长,甚至引发“秋旱”,加剧了洞庭湖北部地区的水资源短缺。

参考文献:

- [1] WANG Guoqing, LIU Yanli, ZHANG Jianyun, et al. Detecting evolution trends in the recorded runoffs from the major rivers in China during 1950-2010[J]. Journal of Water and Climate Change, 2013, 4(3): 252-264.
- [2] 王乐扬,李清洲,王金星,等.变化环境下近60年来中国北方江河实测径流量及其年内分配变化特征[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2020,41(2):36-42.
- [3] 张利茹,贺永会,唐跃平,等.海河流域径流变化趋势及其归因分析[J].水利水运工程学报,2017(4):59-66.
- [4] 黄草,黄梦迪,胡国华,等.梯级电站运行下拉萨河干流水文情势变异及归因分析[J].水资源与水工程学报,2020,31(5):62-69+79.
- [5] 汪雪格,胡俊,吕军,等.松花江流域1956-2014年径流量变化特征分析[J].中国水土保持,2017(10):61-65+72.
- [6] 宁怡楠,杨晓楠,孙文义,等.黄河中游河龙区间径流量变化趋势及其归因[J].自然资源学报,2021,36(1):256-269.
- [7] 焦紫岚,王家强,迟春明,等.塔里木河干流区年径流量

- 变化特征及其主要影响因素[J]. 塔里木大学学报, 2020, 32(4): 96-104.
- [8] 雷静, 张琳, 邓宇杰, 等. 长江流域地下水资源开发利用与保护研究[J]. 人民长江, 2012, 43(3): 48-51.
- [9] 管晓祥, 刘悦, 金君良, 等. 中国不同气候区典型流域的水文变化特性[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(3): 13-17.
- [10] 李静芝, 朱翔, 李景保. 环洞庭湖区水资源供需系统仿真及优化决策研究[J]. 自然资源学报, 2013, 28(2): 199-210.
- [11] 胡春宏, 阮本清, 张双虎, 等. 长江与洞庭湖鄱阳湖关系演变及其调控[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [12] 孙思瑞, 谢平, 陈柯兵, 等. 三峡水库蓄水期不同调度方案对洞庭湖出口水位的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(8): 1819-1826.
- [13] CHENG Junxiang, XU Ligang, WANG Xiaolong, et al. Assessment of hydrologic alteration induced by the Three Gorges Dam in Dongting Lake, China[J]. River Research and Applications, 2018, 34(7): 686-696.
- [14] 徐幸仪, 伍佑伦, 盛东, 等. 1960-2015年洞庭湖水资源演变特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(4): 57-62.
- [15] 贺秋华, 余德清, 余姝辰, 等. 三峡水库运行前后洞庭湖水资源量变化[J]. 地球科学, 2021, 46(1): 293-307.
- [16] 帅红, 李景保, 何霞, 等. 环境变化下长江荆南三口径流变化特征检测与归因分析[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 83-88.
- [17] 李景保, 何霞, 杨波, 等. 长江中游荆南三口断流时间演变特征及其影响机制[J]. 自然资源学报, 2016, 31(10): 1713-1725.
- [18] 代稳, 吕殿青, 王金凤, 等. 基于变权灰色关联法的长江荆南三口地区水资源短缺程度分析[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(6): 17-23.
- [19] Hamed K H. Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis[J]. Journal of Hydrology, 2008, 349(3-4): 350-363.
- [20] 张悦, 李国芳. 长江口潮位非一致性及对水文设计的影响研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(5): 21-27+36.
- [21] 李景保, 钟一苇, 周永强, 等. 三峡水库运行对洞庭湖北部地区水资源开发利用的影响[J]. 自然资源学报, 2013, 28(9): 1583-1593.

(上接第36页)

- [27] 王权, 李阳兵, 黄娟, 等. 喀斯特槽谷区土地利用转型过程对生态系统服务价值的影响[J]. 水土保持研究, 2019, 26(3): 192-198.
- [28] 王福红, 赵锐锋, 张丽华, 等. 黑河中游土地利用转型过程及其对区域生态质量的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(12): 4057-4066.
- [29] 杨延成, 阿里木江·卡斯木, 祖拜旦·阿克木, 等. 干旱区绿洲灌溉条件下生态服务价值研究——以新疆轮台县为例[J]. 冰川冻土, 2019, 41(4): 1005-1014.
- [30] 张杨, 马泽忠, 陈丹. 基于生态格局视角的三峡库区土地生态系统服务价值[J]. 水土保持研究, 2019, 26(5): 321-327.
- [31] 王思涵, 邢洁, 闫澄澄. 水利工程对森林生态系统服务价值的影响研究[J]. 环境科学与管理, 2019, 44(10): 170-174.
- [32] 姜翠红, 李广泳, 程滔, 等. 青海湖流域生态服务价值时空格局变化及其影响因子研究[J]. 资源科学, 2016, 38(8): 1572-1584.
- [33] SCHOLTE S S K, TODOROVA M, VAN TEEFFELLEN A J A, et al. Public support for wetland restoration: What is the link with ecosystem service values? [J]. Wetlands, 2016, 36(3): 467-481.