DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2020.04.08

1960-2015年洞庭湖水资源演变特征分析

徐幸仪, 伍佑伦, 盛 东, 何怀光
(湖南省水利水电科学研究院, 湖南 长沙 410007)

摘 要: 洞庭湖是我国第二大淡水湖,也是长江流域重要的调蓄湖泊。由于受下垫面变化、人类活动和气候变化等的影响,洞庭湖流量、水位呈现新的变化趋势,研究洞庭湖水资源演变特征可为洞庭湖保护提供依据。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:洞庭湖上游长江枝城站在2000年以前径流量变化不大,但从2001年起呈现下降的趋势,水位呈现先上升后下降的趋势,洞庭湖出口城陵矶(七里山)站整体径流量呈现下降的趋势,而平均水位呈现上升的趋势,洞庭湖下游长江螺山站径流量整体上变化不显著,平均水位则呈现上升的趋势;三峡枢纽运行后,3个水文站汛期(4-10月)的径流量和水位均呈现下降趋势,枯水期(1-3月)则出现水位上升趋势;长江上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。

关键词: 水资源演变; Mann-Kendall突变检验法; 径流量; 水位; 年际变化; 年内变化; 洞庭湖
中图分类号:TV211.1^{+}1 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2020)04-0057-06

Evolution characteristics of water resources at Dongting Lake from 1960 to 2015

XU Xingyi, WU Youlun, SHENG Dong, HE Huaiguang
(*Hunan Institute of Water Resources and Hydropower Research, Changsha* 410007, *China*)

Abstract: Dongting Lake is the second largest freshwater lake in China and it is an important regulating lake in the Yangtze River Basin. The change of the runoff and water level of Dongting Lake shows a new trend due to the influence of the underlying surface change, human activities and climate change. We expect the study on the evolution characteristics of Dongting Lake water resources to provide some support for the protection of Dongting Lake. We analyzed the intra-annual and inter-annual variations of the runoff and the water level at the outlet control station of Dongting Lake - Chenglingji (Qilishan) station, Zhicheng and Luoshan hydrological station at Yangtze River mainstream from 1960 to 2015 using Mann-Kendall abrupt change testing method. The results showed that the runoff at Zhicheng station barely changed before 2000, whereas it started declining since 2001. The water level at Zhicheng station rose first and then fell. The runoff showed a decreasing trend at Chenglingji (Qilishan) station, whereas the average water level showed an opposite trend. The runoff had no significant change overall at Luoshan Station, but the average water level tended to rise. After the implementation of Three Gorges Project, the runoff and water level declined at the abovementioned 3 stations in flood season (April-October), whereas the water level rose in dry season (January-March next year). It indicates that the construction of Yangtze River water conservancy projects, especially the Three Gorges Project, has a significant impact on the water resources regulation of Dongting Lake.

Key words: evolution of water resources; Mann-Kendall abrupt change testing method; runoff; water level; inter-annual variation; intra-annual variation; Dongting Lake

1 研究背景

水资源是人类生存和发展不可缺少的重要自然资源,当今水问题日益增多,流域水资源短缺严重制约了经济社会发展[1-2]。通过水资源演变分析,定量研究水资源时空变化规律并分析其驱动影响机

收稿日期:2019-10-10; **修回日期**:2019-12-31
基金项目:湖南水利科技项目(湘水科计[2016]194-24、XSKJ2018179-36、湘水科计[2015]245-01)
作者简介:徐幸仪(1986-),女,湖南常德人,硕士,助理研究员,主要从事水资源节约与保护研究。

制,对进一步保护和利用水资源具有重要意义[3]。

洞庭湖是长江中游重要的调蓄型湖泊,洞庭湖湖泊水资源的保护及管理尤为重要,把握湖泊水资源演变规律是当今的研究热点[4-5]。近几十年来,长江中游及洞庭湖经历过多次工程干预,如调弦堵口、下荆江裁弯、三峡水库建设等众多水利工程[6-7],在全球气候变化背景下,伴随着强烈的人类活动,长江与洞庭湖的江湖关系多变,水资源及生态资源受到严重影响[8-11]。周蕾等[12]基于 1956 – 2015 年湖区实测水文数据,利用 Mann – Kendall 突变检验法及主成分分析法研究洞庭湖水位演变特征及驱动因素;李景保等[13-14]基于三峡运行前后洞庭湖区长序列实测水文数据,对比分析三峡水库运行对洞庭湖水文情势的影响;段蕴歆等[15]基于 1990 – 2017 年监利、城陵矶、螺山水位及流量数据,分析三峡水库运行后的新江湖关系及江湖交汇区的顶托作用。前人对洞庭湖区内水位及流量特征变化规律的研究较多且成果丰富,但以往对洞庭湖水资源的研究多集中在四水、三口和洞庭湖出口断面等处[16-17],且水量与水位多为分开单独研究[18-20],关于长江上游来水量及其过程、洞庭湖出口及下游长江水量与水位对洞庭湖水资源演变特征影响的研究较少。

本研究分别选取枝城站、城陵矶(七里山)以及螺山站共 3 处代表站进行研究,基于长序列水位及流量数据,分析洞庭湖 1960 – 2015 年的水资源演变情况及长江水文情势对洞庭湖水资源变化的影响,研究成果可为分析长江与洞庭湖的江湖关系、洞庭湖水资源的优化配置以及洞庭湖的生态保护等提供重要的参考。

2 研究区域概况

洞庭湖(东经 111°14′ ~ 113°10′,北纬 28°30′ ~ 30°23′)是长江出三峡进入中下游平原后的第一个通江大湖,地跨湖南、湖北两省,是我国第二大淡水湖[21-24]。特殊的地理位置和来水条件使洞庭湖水资源变化一直受到广泛关注。洞庭湖作为大型的通江湖泊,其水资源不仅受气候因素等自然条件的影响,同时也受到人类活动的显著影响,特别是近 50 年来水利工程等人类活动影响加剧,洞庭湖水资源呈现出新的特征[25-27]。湖区面临水质性缺水和季节性缺水并存的局面;水生态功能呈退化态势,湿地萎缩,生物多样性降低;水质下降,水污染防治压力加剧[28-30],对湖区人民的生产和生活产生了不利影响。研究区域水系及水文控制站点分布见图 1。

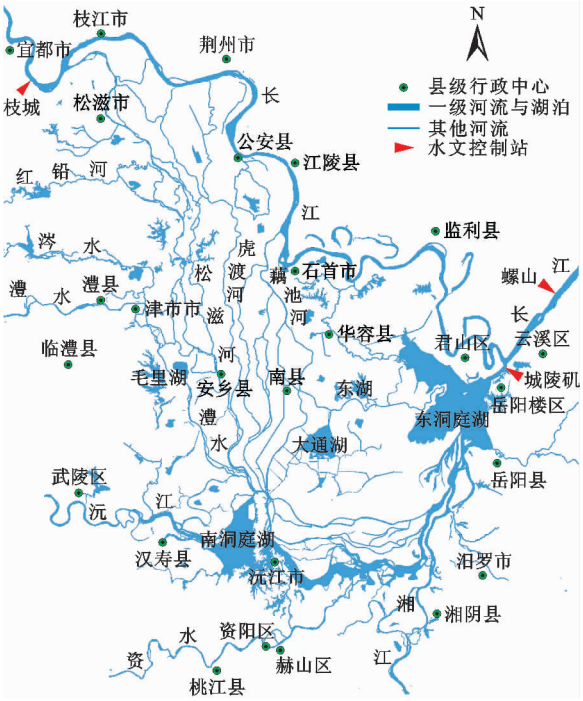

图 1 研究区域水系及水文控制站点分布

3 研究方法

为研究洞庭湖水资源的年际和年内变化特征,采用 Mann – Kendall 突变检验方法对研究区域内 3 个控制性水文站枝城站、城陵矶(七里山)站、螺山站(下简称 3 站)1960 – 2015 年的年径流量和年平均水位进行变化趋势分析,并对三峡工程运行前后(1995 – 2015 年)3 站的月平均流量和月平均水位进行分析。

Mann – Kendall 检验方法是一种非参数的统计检验方法[31]。该方法不仅计算简便,而且可以明确突变开始的时间和突变区域,更适用于类型变量和顺序变量,是一种常用的突变检测方法[32]。Mann – Kendall 法通过统计量 UF 来判断序列呈上升或下降趋势,正序列统计量 UF 和逆序列统计量 UB 大于 0,则序列呈上升趋势;若 UF 或 UB 小于 0,则序列呈下降趋势;当 UF 或 UB 超过临界线 U_α,表明上升或下降趋势显著。若 UF 和 UB 线出现交点,且交点在临界线之间,则突变开始时间为交点对应时刻[33]。其原理和具体计算步骤参照文献[34 – 35]。

4 洞庭湖径流量演变趋势分析

4.1 径流量年内变化规律分析

对枝城、城陵矶(七里山)、螺山 3 站 1960 – 2015 年的月平均径流量进行统计和分析,结果见表 1。

表 1　1960 – 2015 年不同时段枝城、城陵矶(七里山)、螺山水文站月平均径流量对比　　m^3/s

水文站	时段(年份)	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
枝城	1960-1969	4480	3900	4610	6700	12100	17800	31900	28900	29700	20600	11500	6350
	1970-1979	4130	3780	4030	7030	13100	19900	27100	24700	25200	18500	10000	5700
	1980-1989	4380	3930	4410	6830	10600	18400	33300	28300	29100	20000	10000	6030
	1990-2002	4620	4340	4860	6910	11800	19200	31100	27800	22400	16600	9660	5880
	2003-2015	5740	5600	6100	7860	12200	16900	26900	23200	21700	12400	8910	6280
	1960-2015	4720	4380	4870	7100	12000	18400	29900	26500	25200	17300	9950	6050
城陵矶(七里山)	1960-1969	2500	2560	5200	9690	13700	13800	21000	15600	14700	11100	7350	3830
	1970-1979	2170	2980	3900	8660	15300	15600	16700	11500	9380	8740	5120	2600
	1980-1989	2150	3510	5710	8980	10200	12400	14800	12800	13100	8690	5600	2930
	1990-2002	3350	4220	6380	9250	11200	14000	19200	15000	10200	7150	4560	3200
	2003-2015	3190	3860	5590	7260	11000	13500	13000	10300	8390	5260	4630	3200
	1960-2015	2740	3490	5420	8710	12100	13800	16900	13000	11000	7970	5360	3160
螺山	1960-1969	6860	6330	9560	15500	23200	26100	40500	33300	33500	25600	16900	9870
	1970-1979	6280	6720	7860	14800	25800	30700	35900	29700	28200	24000	14500	8210
	1980-1989	6510	7220	10100	15500	19500	27100	39700	34100	35200	25600	15200	9150
	1990-2002	8290	8720	11500	15800	22100	29500	42900	36300	28900	22000	14400	9490
	2003-2015	8700	8940	11500	14300	21600	28400	34600	30100	27200	17000	13600	9460
	1960-2015	7450	7720	10200	15200	22400	28400	38700	32800	30300	22500	14800	9260

从表 1 可知,3 站径流量年内分配不均匀,其中汛期(4 – 10 月)多年平均径流量约占多年平均径流量的 80%,主汛期 7 月份流量最为集中,3 站 7 月份多年月平均径流量占多年平均径流量的百分比均达到 16% 以上,而 11 月至次年 3 月多年月平均流量占多年平均流量的百分比均小于 6.2%。

三峡工程运行前后 13 a 对比:分析三峡工程运行前(1990 – 2002 年)与三峡工程运行后(2003 – 2015 年)两段时间序列发现,三峡运行后 3 站汛期(4 – 10 月)变化趋势相同,径流量均呈现减少趋势,3 站汛期多年月平均径流量分别由三峡运行前的 19 401、12 286、28 214 m^3/s 相应减少至 17 309、9 816、24 743 m^3/s,其中主汛期 7、8 月下降最为明显,可以看出三峡修建后洞庭湖汛期流量下降显著;三峡运行后枯水期(12 月 – 次年 3 月)3 站出现明显不同的变化趋势,其中枝城站径流量出现上升趋势,而城陵矶(七里山)站径流量却出现减少趋势,螺山站基本持平,径流量变化不大。枯水期枝城站径流量出现上升趋势,反映出三峡对长江的补水调节,但洞庭湖城陵矶流量却呈现下降趋势,可能与三峡修建后三口分流量减少和湖区内人类活动有关。

三峡工程运行后与多年平均对比:分析三峡工程运行后(2003 – 2015 年)与多年平均(1960 – 2015 年)两段时间序列发现,三峡运行后 3 站汛期(4 – 10 月)变化趋势基本相同,除枝城站 4 – 5 月径流量有小幅上升外,其他月份 3 站均呈现径流量减少趋势;三峡运行后枯水期 11 月,3 站径流量均减少,12 月基本持平,次年 1 – 3 月径流量均有所增加。可以看出三峡水库汛期减少下泄流量和枯水期补水对洞庭湖流量年内的调节作用明显。

4.2　流量年际变化趋势

采用 Mann – Kendall 突变检验方法检测 1960 – 2015 年间洞庭湖流量的突变情况。给定显著性水平 $\alpha = 0.05$,即 $U_{0.05} = \pm 1.96$。计算结果如图 2 ~ 4 所示。

由图 2 中 *UF* 曲线可见,洞庭湖上游长江枝城站 60 年代至 70 年代初期 *UF* 值大于 0,表明该段时间径流量呈现上升的趋势,自 70 年代初到 2000 年以来径流量基本变化不大,但在 2001 – 2015 年间由于 *UF* 值小于 0,表明径流量呈现下降的趋势,从 2011 年开始 *UF* 超过了临界线 $U_{0.05}$,表明下降趋势显著。据 *UF* 和 *UB* 交点位置判断,洞庭湖上游枝城站径流

量下降是一个突变现象,时间是从 2001 年以后开始的。而在 2002 – 2006 年间 *UF* 值大于 0,表明该段时间径流量呈现上升的趋势,但总体上由于 *UF* 值小于 $U_{0.05}$,而且更接近 0 值,这表明上游径流量整体上变化不显著。

图 3 表明,洞庭湖出口城陵矶(七里山)站的 *UF* 曲线从 1974 年开始全部在 0 值以下,表明洞庭湖出口整体径流量呈现下降的趋势,根据 *UF* 和 *UB* 曲线交点的位置,可以确定洞庭湖出口径流量下降是一个突变现象,时间是从 1999 年以后开始的。

由图 4 可看出,洞庭湖下游长江螺山站与洞庭湖上游长江枝城站的 *UF* 曲线大体类似但又有所差异,其值也是 60 年代至 70 年代初期 *UF* 值大于 0,表明洞庭湖下游长江螺山站在这一时期内整体径流量呈现上升的趋势;自 70 年代初到 2000 年以来径流量基本保持不变,但在 2006 – 2015 年间 *UF* 值小于 0,表明径流量呈现下降的趋势,但总体上 *UF* 值小于 $U_{0.05}$,说明径流量下降趋势不显著。根据 *UF* 和 *UB* 曲线交点的位置,可以确定下游径流量下降也是突变现象,时间是从 2003 年以后开始的,晚于洞庭湖上游长江枝城站流量突变的时间 2 a。总的来说,洞庭湖下游长江螺山站没有洞庭湖上游长江枝城和出口城陵矶(七里山)站径流量变化明显。

综上所述,洞庭湖上游长江枝城站和下游长江螺山站整体上径流量年际变化不显著,而洞庭湖出口城陵矶(七里山)站径流量年际变化呈现下降的趋势。其原因有待进一步深入研究。

5 洞庭湖水位演变情况

5.1 水位年内变化规律分析

对枝城、城陵矶(七里山)、螺山 3 站 1990 – 2015 年的月平均水位进行统计,统计分为三峡工程运行前(1990 – 2002 年)和运行后(2003 – 2015 年)两段时间序列,结果见表 2 和图 5 ~ 7。

对表 2 和图 5 ~ 7 中三峡工程运行前与运行后两段时间序列进行分析发现,三峡运行后 3 站汛期(4 – 10 月)变化趋势相同,月平均水位均呈现减少趋势,其中主汛期 7、8 月下降最为明显;三峡运行后枯水期(1 – 3 月)3 站出现水位上升趋势。

上述 3 站水位年内变化规律体现了三峡水库汛期减少下泄流量和枯水期向下游补水对洞庭湖水位年内调节作用明显。

表 2 三峡工程运行前后枝城、城陵矶(七里山)、螺山水文站月平均水位对比表 m

水文站	统计时段(年份)	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
枝城	1990-2002	37.66	37.52	37.75	38.60	40.41	42.49	45.26	44.55	43.50	42.04	39.78	38.25
	2003-2015	37.86	37.78	37.97	38.58	40.11	41.61	44.21	43.34	42.88	40.27	39.13	38.08
城陵矶(七里山)	1990-2002	20.78	20.95	22.21	24.26	26.22	28.28	31.29	30.01	28.31	26.38	23.87	21.66
	2003-2015	21.15	21.32	22.49	23.68	26.15	28.25	29.84	28.77	27.93	24.82	23.33	21.58
螺山	1990-2002	19.78	19.91	21.11	23.08	25.23	27.24	30.36	29.13	27.47	25.50	22.95	20.66
	2003-2015	19.85	20.03	21.23	22.46	24.87	27.08	28.76	27.75	26.86	23.73	22.16	20.36

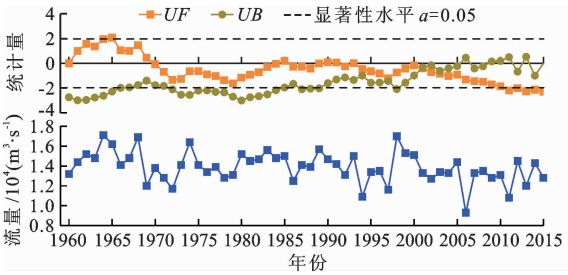

图 2 1960 – 2015 年洞庭湖上游长江枝城水文站径流量 M – K 突变检验

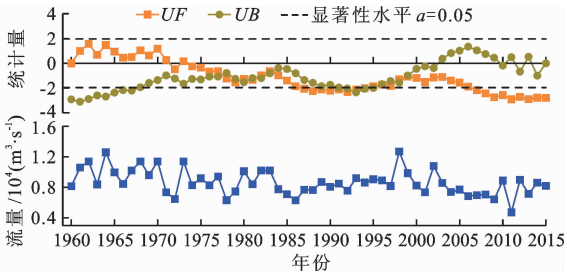

图 3 1960 – 2015 年洞庭湖出口城陵矶(七里山)水文站径流量 M – K 突变检验

5.2 水位年际变化趋势

采用 Mann – Kendall 突变检验方法检测 1960 – 2015 年间洞庭湖水位的突变情况。给定显著性水平 $a = 0.05$,即 $U_{0.05} = \pm 1.96$。计算结果如图 8 ~ 10 所示。由图 8 ~ 10 可见,洞庭湖上游长江枝城站 60 年代至 70 年代初期 *UF* 值大于 0,表明该时间段枝城年平均水位呈现上升的趋势,自 70 年代初到 2015 年 *UF* 值小于 0,表明径流量呈现下降的趋势,这种下

降趋势从 1987 年开始甚至超过了显著性水平 0.05 临界线，说明下降趋势显著。洞庭湖出口城陵矶（七里山）站的 *UF* 曲线从 1960 – 2015 年基本全部在 0 值以上，表明洞庭湖出口整体平均水位呈现上升的趋势。洞庭湖下游长江螺山站与洞庭湖出口城陵矶（七里山）站的 *UF* 曲线大体类似，其值也是基本全部在 0 值以上，表明洞庭湖下游长江螺山站在 1960 – 2015 年间整体年平均水位呈现上升的趋势，这种上升趋势从 1991 年开始甚至超过了显著性水平 0.05 临界线，说明上升趋势显著。

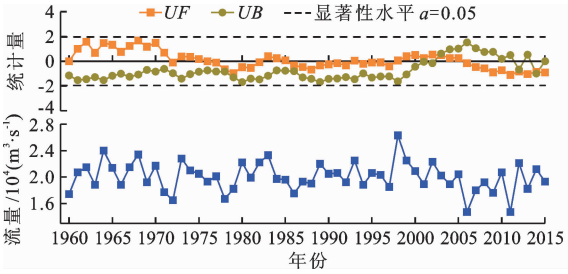

图 4　1960 – 2015 年洞庭湖下游长江螺山水文站径流量 M – K 突变检验

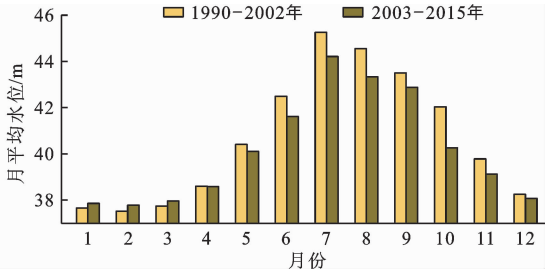

图 5　三峡工程运行前后枝城水文站月平均水位变化

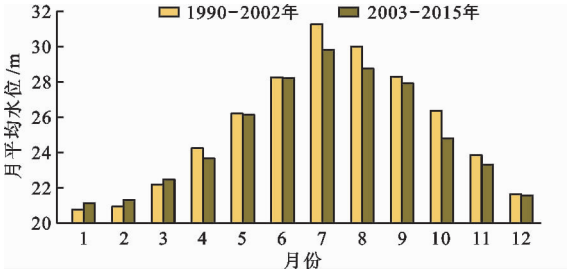

图 6　三峡工程运行前后城陵矶（七里山）水文站月平均水位变化

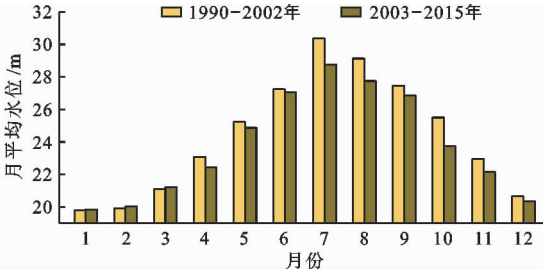

图 7　三峡工程运行前后螺山水文站月平均水位变化

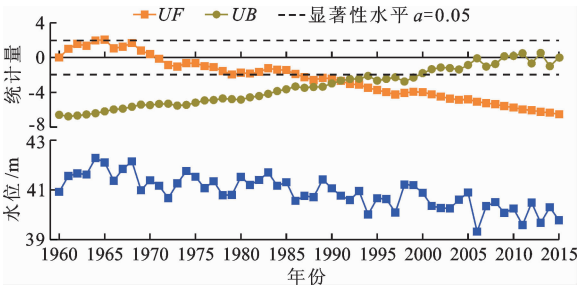

图 8　1960 – 2015 年洞庭湖上游长江枝城水文站年平均水位 M – K 突变检验

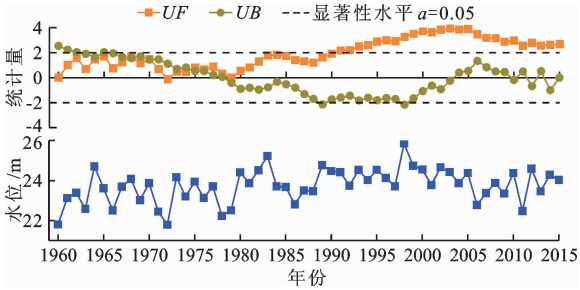

图 10　1960 – 2015 年洞庭湖下游长江螺山水文站年平均水位 M – K 突变检验

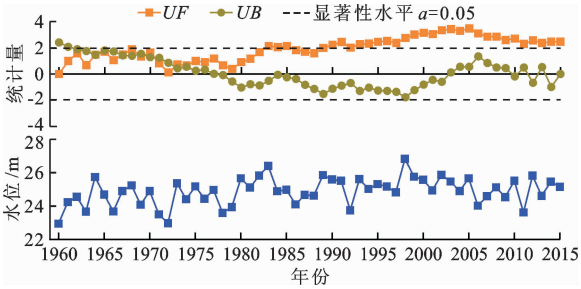

图 9　1960 – 2015 年洞庭湖出口城陵矶（七里山）水文站年平均水位 M – K 突变检验

6　结　论

（1）洞庭湖水位和流量年际变化趋势差异明显，表现在枝城、城陵矶（七里山）、螺山 3 站变化趋势大相径庭。枝城站从 2001 年开始水位下降趋势显著，径流量整体变化趋势并不明显；城陵矶（七里山）站水位呈上升趋势但径流量从 1999 年以后开始突变下降；螺山站水位呈上升趋势，径流量变化趋势并不明显。

（2）三峡运行后（2003 年 – 2015 年），枝城、城陵矶（七里山）、螺山 3 站水位与流量年内变化基本具有同步性，汛期（4 – 10 月）均呈减少趋势，枯水期（1 – 3 月）均呈上升趋势，表明长江水利工程，特别是三峡工程的修建，对洞庭湖水资源的调节影响明显。

本文分析了 1960 – 2015 年洞庭湖水资源演变特征，洞庭湖水资源年内和年际变化特征是由水文

气象条件、人类活动、水利工程等多种因素影响造成的,需进一步定量分析其影响原因。尤其是城陵矶(七里山)站径流量从 1999 年以后下降趋势显著,洞庭湖水资源综合利用和生态环境保护形势严峻,亟需深入研究。

参考文献:

[1] 王中根,李宗礼,刘昌明,等. 河湖水系连通的理论探讨[J]. 自然资源学报,2011,26(3):523 - 529.

[2] 王 浩,游进军. 中国水资源配置 30 年[J]. 水利学报,2016,47(3):265 - 271 + 282.

[3] 王喜峰,周祖昊,贾仰文,等. 水资源演变研究现状及进展[J]. 水电能源科学,2010,28(8):20 - 23.

[4] 毛德华,曹艳敏,李锦慧,等. 洞庭湖入出湖径流泥沙年内变化规律及成因分析[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(1):32 - 39 + 44.

[5] 高 耶,谢永宏,邹冬生,等. 近 40 年洞庭湖区内湖水面面积变化及其驱动因素[J]. 湖泊科学,2019,31(3):755 - 765.

[6] 王 冬,李义天,邓金运,等. 三峡水库蓄水期洞庭湖水力要素变化初步分析[J]. 水力发电学报,2014,33(2):26 - 32.

[7] 段 凯,肖伟华,梅亚东,等. 大型水利工程对洞庭湖区水资源开发利用的影响[J]. 长江流域资源与环境,2012,21(11):1389 - 1394.

[8] 万荣荣,杨桂山,王晓龙,等. 长江中游通江湖泊江湖关系研究进展[J]. 湖泊科学,2014,26(1):1 - 8.

[9] 黄 韬,张俊宏,邓志民,等. 三峡水库蓄水前后洞庭湖区水环境演化过程研究进展[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(6):61 - 67.

[10] 胡光伟,张 明,刘 珍,等. 洞庭湖水质变化及其形成机制分析[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(3):39 - 45.

[11] 戴凌全,蔡卓森,刘海波, 等. 三峡水库枯水期不同运行方式对洞庭湖生态补水效果研究[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(3):170 - 175.

[12] 周 蕾,李景保,汤祥明,等. 近 60 a 来洞庭湖水位演变特征及其影响因素[J]. 冰川冻土,2017,39(3):660 - 671.

[13] 李景保,张照庆,欧朝敏,等. 三峡水库不同调度方式运行期洞庭湖区的水情响应[J]. 地理学报,2011,66(9):1251 - 1260.

[14] 李景保,代 勇,欧朝敏,等. 长江三峡水库蓄水运用对洞庭湖水沙特性的影响[J]. 水土保持学报,2011,25(3):215 - 219.

[15] 段蕴歆,李景保,吕殿青,等. 三峡水库运行下长江与洞庭湖交汇区水情态势及相互顶托作用[J]. 长江流域资源与环境,2019,28(10):2471 - 2483.

[16] 李 晖,尹 辉,白 旸,等. 近 60 年洞庭湖区水沙演变特征及趋势预测[J]. 水土保持研究,2013,20(3):139 - 142.

[17] 方春明,胡春宏,陈绪坚. 三峡水库运用对荆江三口分流及洞庭湖的影响[J]. 水利学报,2014,45(1):36 - 41.

[18] 史 璇,肖伟华,王 勇,等. 近 50 年洞庭湖水位总体变化特征及成因分析[J]. 南水北调与水利科技,2012,10(5):18 - 22.

[19] 钱 湛,张双虎,卓志宇. 四水入洞庭湖水量变化趋势及周期分析[J]. 人民长江,2014,45(15):39 - 42.

[20] 丛振涛,肖 鹏,章诞武,等. 三峡工程运行前后城陵矶水位变化及其原因分析[J]. 水力发电学报,2014,33(3):23 - 28.

[21] 余 勋. 洞庭湖不确定性水质评价及生态水位研究[D]. 长沙:湖南大学,2014.

[22] 何 征,万荣荣,戴 雪,等. 近 30 年洞庭湖季节性水情变化及其对江湖水量交换变化的响应[J]. 湖泊科学,2015,27(6):991 - 996.

[23] YIN R L, SHEN D X, CHE Z G. Disasters and environmental management in the Lake Dongting lowlands[J]. Lowland Technology International, 2003,5:39 - 45.

[24] 史 璇,肖伟华,段玮娟,等. 变化环境下洞庭湖换水特征演变分析[J]. 长江流域资源与环境,2012,21(S2):127 - 131.

[25] 尹 辉,杨 波,蒋忠诚,等. 近 60 年洞庭湖泊形态与水沙过程的互动响应[J]. 地理研究,2012,31(3):471 - 483.

[26] 王鸿翔,查胡飞,李 越,等. 三峡水库蓄水后洞庭湖水文情势变化研究[J]. 水电能源科学,2018,36(10):31 - 33 + 48.

[27] 刘易庄,杨树清,蒋昌波,等. 洞庭湖萎缩对湖内洪水影响[J]. 水科学进展,2019,30(4):485 - 495.

[28] 宋晓猛,张建云,占车生,等. 水文模型参数敏感性分析方法评述[J]. 水利水电科技进展,2015,35(6) : 105 - 112.

[29] 钱 湛,王维俊,黎昔春,等. 基于 Mann - Kendall 法对洞庭湖区三口入湖水量趋势性分析[J]. 中国农村水利水电,2018(1):96 - 100 + 106.

[30] 胡光伟,黄作维,许 滢,等. 洞庭湖生态经济区水资源与社会经济发展协同度评价[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(5):21 - 27 + 34.

[31] 张洪波,李哲浩,席秋义,等. 基于改进过白化的 Mann - Kendall 趋势检验法[J]. 水力发电学报,2018,37(6):34 - 46.

[32] 夏继勇,钟平安,刘 畅,等. 近 58 年大汶河流域降水量演变特征分析[J]. 水电能源科学,2017,35(3):6 - 10.

[33] KISI O, AY M. Comparison of Mann - Kendall and Innovative Trend Method for Water Quality Parameters of the Kizilirmak River, Turkey[J]. Journal of Hydrology,2016,513(26):362 - 375.

[34] 隆院男,唐 蓉,蒋昌波,等. 近 60 年湘江流域水沙特性及其对人类活动的响应[J]. 农业工程学报,2018,34(24):132 - 143.

[35] XU X, SHENG D, LI G, et al. Comprehensive assessment of the water ecological security of the Xiangjiang River Basin based on physico-chemistry and organism indices[J]. Applied Ecology and Environmental Research,2019,17(2):4547 - 4574.