

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221442

三峡工程运行后水库下游弯曲河道演变规律

郭小虎, 唐 峰, 陈 栋, 邓彩云

(长江科学院水利部长江中下游河湖治理与防洪重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要: 三峡工程运行后水库下游河道水沙过程发生较大改变, 引起弯曲型河道演变规律调整, 对河势稳定、防洪安全等可能产生不利影响。基于实测资料分析了三峡工程运行后水库河道下游典型弯道演变规律及其主要动因。结果表明, 三峡工程运行后水库下游典型弯道段均出现“切滩”, 其主要原因是进入各河段的泥沙尤其是细颗粒沙量大幅减少; 而下荆江绝大多数弯道段出现“撇弯”的主要原因为月均径流量过程变异系数较大、弯道段本身弯曲半径较小。随着长江上游干支流梯级水库陆续运行, 预计水库下游各河段月均径流量过程变异系数将继续增大, 将可能引起目前未发生“撇弯”但弯曲半径相对较小的弯道段发生“撇弯”。

关键词: 三峡工程; 水库下游; 弯曲河道; 演变规律

中图分类号: TV147

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)06-0026-05

1 概况

三峡水库下游宜昌至大通干流河段长约 1 183 km, 其中宜昌至枝城河段长约 60.8 km, 枝城至城陵矶河段(俗称荆江河段)长约 347.2 km, 城陵矶至汉口河段长约 275.1 km, 汉口至湖口河段长约 271.9 km, 湖口至大通河段长约 228 km (图 1)。水库下游河段弯曲河型主要分布在下荆江河段, 其河势稳定不仅关系到防洪安全, 且还影响到水资源利用、航道通畅及水生态环境等。2003 年三峡工程运行后水库下游水沙过程发生较大调整, 从而引起弯曲河道河床演变规律发生一定变化。实测资料分析^[1-4]认为, 三峡工程运行后水沙条件发生较大变化, 凹岸的护岸工程限制了弯曲河道向凹岸发展, 而凸岸一般未进行守护, 下荆江弯曲河道均出现“撇弯切滩”等特征, 主要表现为主流动力轴线偏离凹岸和与之对应的滩槽冲淤变化^[5-7], 这与蓄水前弯道“凹冲凸淤”的一般

规律差异显著^[8]。研究认为弯道演变出现“撇弯切滩”现象主要是河道边界条件改变引起^[9], 也有研究认为是水库蓄水后来沙条件变化^[10]或是水流动力特性变化引起^[11,12]。三峡工程运行后水沙变异与河床边界条件是导致下荆江弯曲河型河道出现“撇弯切滩”等特征的主要驱动因素; 但受水库下游支流、湖泊及河床补给等综合影响, 水库下游河道水沙变异程度沿程递减, 这种不同水沙变异程度对弯曲河型演变规律也造成一定的差异性, 而关于这方面的研究成果较少。鉴此, 本文选择熊家洲至城陵矶连续弯道作为研究河段 1, 城陵矶至汉口河段、汉口至湖口河段(分别有簪洲湾连续弯道、叶家洲弯道)分别作为研究河段 2、3 (位置见图 1), 采用实测资料分析三峡水库下游典型的弯曲河道河床演变规律及其主要因素, 结果可为三峡水库下游弯道段综合规划与设计提供技术支撑。

2 边界条件变化

2.1 河道边界条件

三个弯道段除叶家洲凹岸段因天然基岩受到抑制外, 其他弯道段均在凹岸实施了护岸工程。为了维护叶家洲弯道段航道稳定, 2020 年 10 月航道部门对叶家洲弯道牧鹅洲的凸岸实施了护滩工程。根据试圆法统计研究河段河道中心线的弯



图 1 宜昌至大通河段示意图

Fig. 1 Schematic of reach from Yichang to Datong section

收稿日期: 2022-07-14, 修回日期: 2022-08-05

基金项目: 长江水科学研究联合基金(U2240206, U2240224); 三峡后续工作总体规划项目(CKSG2021257/HL)

作者简介: 郭小虎(1981-), 男, 博士、教授级高级工程师, 研究方向为水力学及河流动力学, E-mail: xiaohu001328@163.com

曲半径(表 1),发现七弓岭弯道弯曲半径最小,仅 950 m;牧鹅洲弯道弯曲半径最大,约 3 600 m。

表 1 三个研究河段弯曲半径统计
(2016 年 10 月河道中心线计算)

Tab.1 Statistical of bending radius of three study reaches
(calculated by centerline of river in October 2016) m

研究河段 1			研究河段 2			研究河段 3 (牧鹅洲弯道)
熊家洲 弯道	七弓岭 弯道	观音洲 弯道	藤洲湾 弯道	窑头沟 弯道	双窑 弯道	
1 950	910	1 320	1 600	1 980	1 520	3 600

2.2 水文泥沙条件变化

2.2.1 年径流量与年输沙量变化

以监利、螺山、汉口水文站为例,分析三峡工程运行前后的水沙变化见图 2。

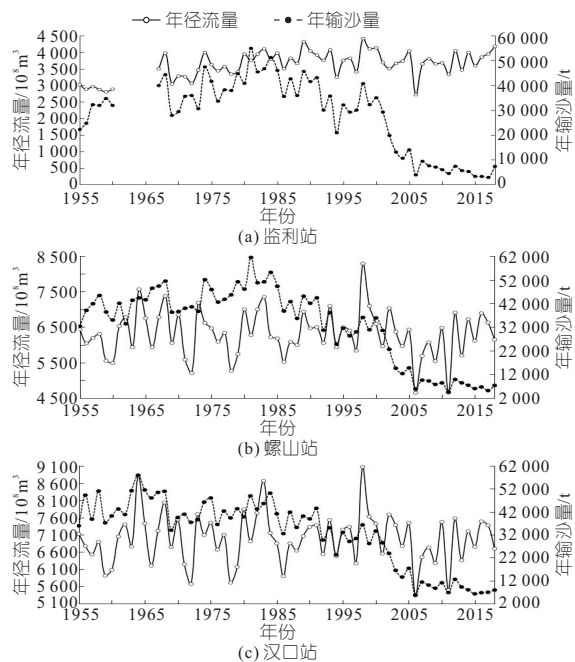


图 2 典型站点年径流量与年输沙量变化

Fig.2 Variation of annual runoff and annual sediment transport at typical sites

由图 2 可知,受 1955~1989 年期间荆江三口分流分沙持续萎缩的影响,监利站年径流量与年输沙量均呈递增趋势,1990 年后该站年径流量无明显变化趋势,受水利工程拦沙、水土保持工程 etc 等综合影响,1990~2002 年期间年输沙量呈递减趋势,较之 1955~1989 年,年均输沙量减少了 15.7%;三峡工程运行后由于水库拦截大量泥沙,2003~2007 年期间该站年均输沙量大幅减少,较之 1990~2002 年,年均输沙量减少了 68.7%;2008 年 175 m 试验性蓄水期后水库拦截泥沙能力进一步增强,较之 1990~2002 年,年均输沙量减少了 36.2%;2013 年后长江上游主要支流溪洛渡、向家坝等水库陆续运行,2013~2018 年期间该站年均输沙量进一步减小,其值为 $4 620 \times 10^4$ t,仅

为 1990~2002 年期间年均输沙量的 14.3%。

螺山与汉口站年径流量均无明显变化趋势,三峡工程运行后螺山与汉口站年输沙量变化与监利站相应时间段内变化规律基本一致,其中 2013~2018 年期间螺山与汉口站年均输沙量分别为 $6 778 \times 10^4$ 、 $7 560 \times 10^4$ t,分别仅为 1990~2002 年期间年均输沙量的 20.7%、23.8%。

2.2.2 月均径流量过程变异程度计算

虽然三峡工程运行后各典型站年径流量无明显变化趋势,但水库调蓄作用引起径流过程发生一定的改变,径流过程变异程度为三峡工程运行后月径流量与天然月径流量过程的差异。1990 年前荆江三口分流能力呈萎缩趋势,1990 年以来荆江三口分流能力无明显变化,为了减小荆江三口分流能力变化对监利站、螺山站月径流量过程的影响,三峡工程运行前采用 1990~2002 年的水文数据;三峡工程运行后分为 2003~2007 年(蓄水初期)、2008~2012 年(175 m 试验性蓄水期)、2013~2018 年(向家坝水库运行后)3 个阶段,水库下游沿程月均径流量过程变异程度 I_{FD} 计算公式为:

$$I_{FD} = \left[\sum_{m=1}^{12} \lambda_m \left(\frac{q_m - Q_m}{Q_m} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (1)$$

其中 $\lambda_m = Q_m / \sum_{m=1}^{12} Q_m$

式中, Q_m 、 q_m 分别为三峡工程运行前、后各月流量。

各阶段年均径流量数值不同导致计算 I_{FD} 值存在一定的差异性,以 1990~2002 年数据为基准,得到 1990~2002 年期间年均径流量与各阶段年均径流量的比值,各阶段月均流量按相应比值进行缩放修正。 I_{FD} 的变化见图 3。

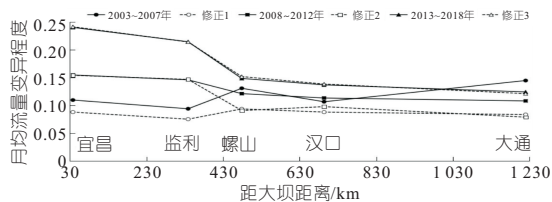


图 3 三峡工程下游河道沿程月均径流量过程变异程度变化

Fig.3 Variation of variation degree of monthly mean runoff process along lower reaches of TGP

由图 3 可知,2003~2007 年期间水库下游沿程 I_{FD} 基本相差不大;2008~2012 年期间水库下游宜昌至监利河段 I_{FD} 沿程略有减小,修正后的数值 I_{FD} 约为 0.15,螺山至大通河段 I_{FD} 呈减小趋势,与 2003~2007 年相应的数值相差不大;2013~2018 年期间水库下游沿程 I_{FD} 均明显增大,其沿程变化规律与 2008~2012 年的变化类

似,根据修正后的数值,宜昌至监利河段 I_{FD} 在 0.214~0.241 之间,螺山至大通河段 I_{FD} 在 0.121~0.151 之间。

综上所述,三峡工程运行后水库下游沿程各站 I_{FD} 除 2003~2007 年期间相差不大外,其他阶段均呈沿程递减趋势;随时间推移宜昌至监利河段 I_{FD} 明显增大,而螺山至大通河段在 2013~2018 年期间有所增大。

3 弯曲河道河床演变及其影响因素分析

3.1 弯曲河道河床演变分析

3.1.1 熊家洲至城陵矶连续弯道

研究河段 1 由熊家洲、七弓岭、观音洲三个弯道组成,三峡工程运行后研究河段 1 平面形态变化见图 4。由图 4 可知,2002~2008 年期间,研究河段深泓线基本稳定,2008 年后,深泓出熊家洲弯道后直接贴八姓洲左岸狭颈西侧下行至七弓岭弯道,导致西侧岸线持续崩退,深泓由凹岸左偏贴近凸岸下行,顶冲点大幅下移,深泓由右岸摆动到左岸近岸河床,七弓岭弯道处出现明显“撇弯”;2013 年以来,深泓左偏“撇弯”趋势逐渐减弱。下游观音洲弯道深泓发生类似的演变规律,上游熊

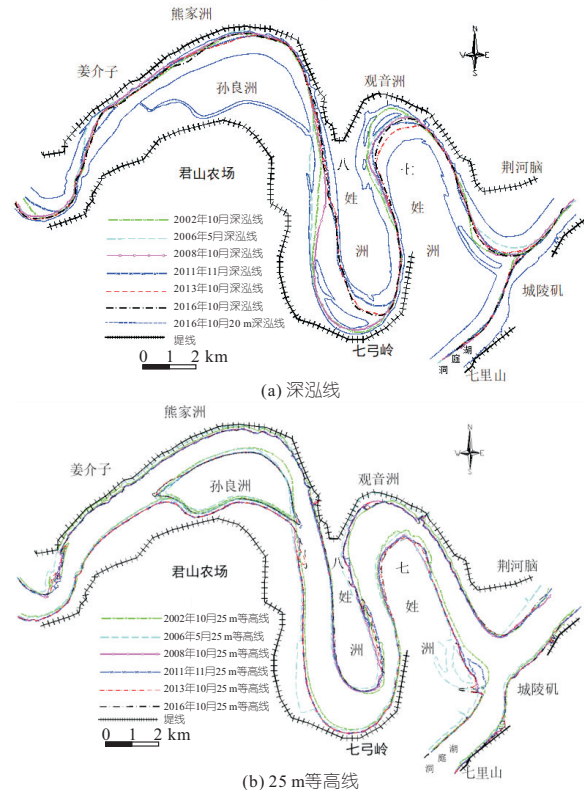


图 4 三峡工程运行后研究河段 1 平面形态变化
Fig. 4 Plane morphological of river reach 1 after impoundment of TGP

家洲弯道段深泓仍基本稳定。根据 25 m 等高线变化来看,三个弯道凸岸均出现冲刷后退,熊家洲、七弓岭、观音洲弯顶附近累积最大冲刷后退分别为 320、240、160 m。

综上所述,七弓岭与观音洲弯道均出现“撇弯切滩”,熊家洲弯道仅出现“切滩”,三个弯道最显著的特点就是弯曲半径明显不同,其中熊家洲弯道弯曲半径最大。

3.1.2 簪洲湾连续弯道

研究河段 2 由簪洲湾、窑头沟、双窑三个弯道组成,三峡工程运行后研究河段 2 平面形态变化见图 5。由图 5 可知,2001~2016 年期间,三个弯道段深泓线基本稳定。簪洲湾弯道段上段深泓线摆动幅度较大,中下段深泓线摆幅较小;窑头沟弯道深泓发生类似的演变规律;双窑弯道段深泓线在弯顶处有一定程度的摆幅,在其他段深泓线摆幅较小,三个弯道段深泓线未出现明显趋势性变化。从 20 m 等高线变化来看,三个弯道凸岸均出现冲刷后退,簪洲湾、窑头沟、双窑弯顶累积最大冲刷后退分别为 125、340、100 m。

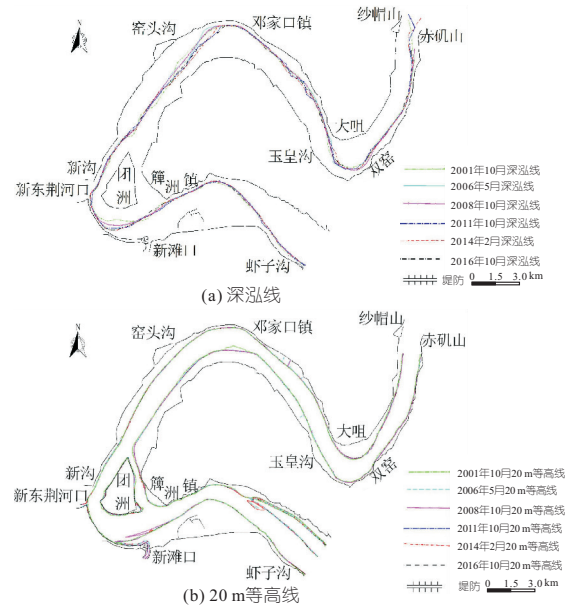


图 5 三峡工程运行后研究河段 2 平面形态变化
Fig. 5 Plane morphological of river reach 2 after impoundment of TGP

综上所述,簪洲湾、窑头沟、双窑弯道段凸岸均出现“切滩”,但三个弯道段深泓线未出现“撇弯”。

3.1.3 叶家洲弯道

研究河段 3 由牧鹅洲一个弯道组成,三峡工程运行后研究河段 3 平面形态变化见图 6。由图 6 可知,2001~2016 年期间,牧鹅洲弯道段深泓线基本稳定,未出现明显趋势性变化。从 10 m 等高线变化来看,在 2001~2006 年期间,凸岸边滩

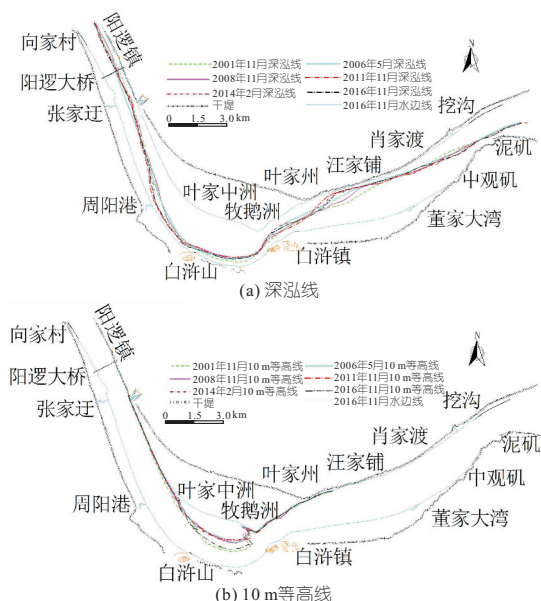


图 6 三峡工程运行后研究河段 3 平面形态变化

Fig. 6 Plane morphological of river reach 3 after impoundment of TGP

出现较大程度的冲刷后退,最大距离约 550 m,而在 2014~2016 年期间,凸岸边滩淤长 400 m,预计与 2016 年汛期发生大洪水有关。

综上所述,三峡工程运行后牧鹅洲弯道段凸岸边滩出现“切滩”现象,但遇到大水年时,凸岸边滩仍能较大程度地恢复。

3.2 弯曲河道河床演变的影响因素分析

2003~2007 年期间,典型弯道均出现“切滩”,但未出现“撇弯”。与蓄水前各月径流量变化相比,各典型水文站 I_{FD} 为 0.075~0.094,沿程基本变化不大,各典型站年均输沙量均出现大幅减少,与蓄水前各典型站年均输沙量相比,监利站、螺山站、汉口站年均输沙量分别减少约 68.4%、65.3%、59.3%;根据已有研究成果^[13]可知,水库下游河段在监利站 $d > 0.125$ mm (d 为沙粒粒径)沙量基本恢复至蓄水前的水平;因此三个站点年均输沙量减少的主要是 $d \leq 0.125$ mm 的细沙,凸岸边滩一般均以细沙为主,在各河段月均径流量过程变异系数较小的情况下,弯道出现“切滩”的主要原因是进入各河段的泥沙尤其是细颗粒沙量大幅减少。

2008~2012 年期间,七弓岭弯道与观音洲弯道深泓线出现“撇弯”,熊家洲、七弓岭、观音洲、簪洲湾、窑头沟、双窑、牧鹅洲弯道“切滩”的程度放缓;与蓄水前(1990~2002 年期间)各月径流量变化相比,监利站 I_{FD} 为 0.147,下游螺山站与汉口站其数值均小于 0.1,沿程呈递减趋势,但进入研究河段 1 月均径流量过程变异系数明显增大;各

典型站年均输沙量进一步减少,与 2003~2007 年期间各典型站年均输沙量相比,监利站、螺山站、汉口站年均输沙量减小。在研究河段 1 内七弓岭弯道与观音洲弯道出现“撇弯”,熊家洲弯道未出现“撇弯”,熊家洲弯道弯曲半径明显大于弓岭弯道与观音洲弯道弯曲半径。由于 I_{FD} 明显增大,进入本河段内径流过程坦化,但弯道段深泓线是否“撇弯”还与弯曲半径有关,弯曲半径越小, I_{FD} 越大,则弯道段深泓线越易“撇弯”。进入研究河段 2、3 内的 I_{FD} 变化不大,即使年均输沙量进一步减少,但两个研究河段内弯道“切滩”幅度仍有所趋缓。七弓岭、观音洲弯道深泓线出现“撇弯”的主要原因是 I_{FD} 明显增大,且本身弯曲半径较小。

2013~2018 年期间,七弓岭弯道与观音洲弯道深泓线“撇弯”幅度放缓,熊家洲、七弓岭、观音洲、簪洲湾、窑头沟、双窑、牧鹅洲弯道的“切滩”幅度也放缓;与蓄水前各月径流量变化相比,监利站 I_{FD} 为 0.214,下游螺山站、汉口站其数值分别为 0.152、0.138,各研究河段 I_{FD} 进一步增大,而年均输沙量进一步减少。各弯道段演变规律与上个阶段演变规律基本保持一致,即使各河段 I_{FD} 有所增大,但由于各弯道段的弯曲半径较大,仍不足以引起弯道段深泓发生“撇弯”。

三峡工程运行后下荆江河道调关、莱家铺、反咀、七弓岭及观音洲等弯道段均出现“切滩撇弯”,但仍有部分弯曲半径较大的弯道段(如熊家洲弯道)仅出现“切滩”,且城陵矶以下河段弯道段出现“切滩”。随着长江上游干支流梯级水库陆续运行,预计水库下游各河段 I_{FD} 仍将继续增大,将可能引起目前未发生“撇弯”但弯曲半径相对较小的弯道段发生“撇弯”。

4 结论

a. 三峡工程运行后水库下游水沙过程发生较大改变,水库下游典型弯道段均出现“切滩”,仅下荆江段绝大多数弯道段出现“撇弯”。

b. 水库下游典型弯道段出现“切滩”的主要原因是进入各河段的泥沙尤其是细颗粒沙量大幅减少;而下荆江段绝大多数弯道段出现“撇弯”的主要原因为月均径流量过程变异系数较大、弯道段本身弯曲半径较小。

c. 随着长江上游干支流梯级水库陆续运行,预计水库下游各河段月均径流量过程变异系数将继续增大,将可能引起目前未发生“撇弯”但弯曲半径相对较小的弯道段发生“撇弯”。

参考文献:

[1] 朱玲玲,许全喜,熊明. 三峡水库蓄水后下荆江急弯河道凸冲凹淤成因[J]. 水科学进展,2017,28(2): 193-202.

[2] 胡向阳. 三峡工程下游宜昌至湖口河段河道演变研究[J]. 人民长江,2012,43(24):1-4.

[3] 渠庚,郭小虎,何娟,等. 下荆江熊家洲至城陵矶弯曲型河段河床调整规律[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2020,18(6):156-163,169.

[4] 卢金友,渠庚,李发政,等. 下荆江熊家洲至城陵矶河段演变分析与治理思路探讨[J]. 长江科学院院报,2011,28(11):113-118.

[5] 王佳妮,毛北平,孙思瑞. 三峡水库修建后长江中游城陵矶至九江河道冲淤变化研究[J]. 水电能源科学,2020,38(3):25-29.

[6] YANG YUNPING, LI YITIAN, SUN ZHAOHUA, et al. Suspended sediment load in the turbidity maximum zone at the Yangtze River Estuary: The trends and causes[J]. Journal of geographical sciences,2014,24(1):129-142.

[7] 卢金友,朱勇辉. 三峡水库下游江湖演变与治理若干问题探讨[J]. 长江科学院院报,2014,31(2): 98-107.

[8] 李春光,景何仿,吕岁菊,等. 弯道水流运动和河床变形数值模拟研究进展[J]. 华北水利水电学院学报,2010,31(1):1-5.

[9] 李宁波,曾勇,吴忠明. 长江荆江河段七弓岭弯道主流撇弯原因初探[J]. 人民长江,2013,44(1):22-25.

[10] 何广水,姚仕明,金中武. 长江荆江河段弯道凸岸边滩非典型冲刷研究[J]. 人民长江,2011,42(17):1-3,15.

[11] ALBERT C, STEFFLER P. Estimating transverse mixing in open channels due to secondary current-induced shear dispersion[J]. Journal of hydraulic engineering,2007,133(2):186-196.

[12] 覃连超,余明辉,谈广鸣,等. 河湾水流动力轴线变化与切滩撇弯关系研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑),2009,24(1):29-35.

[13] 郭小虎,渠庚,刘亚,等. 三峡工程运用后坝下游河道泥沙输移变化规律[J]. 湖泊科学,2020,32(2): 564-572.

Evolution Law of Curved River Channel Downstream of Reservoir After Operation of Three Gorges Project

GUO Xiao-hu, TANG Feng, CHEN Dong, DENG Cai-yun

(Key Laboratory of River and Lake Management and Flood Control in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River of MWR, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: After the operation of the Three Gorges Project, the process of water and sediment in the lower reaches of the reservoir changed greatly and led to the adjustment of the evolution law of the curved channel, which may have adverse effects on the stability of the river and the safety of flood control. Based on the measured data, the evolution law of the typical bends in the lower reaches of the reservoir and its main causes were analyzed. The results show that after the operation of the Three Gorges Project, the typical bends in the lower reaches of the reservoir all appear "cutting beaches", and the main reason is that the sediments enter each river reaches. The amount of sand, especially fine-grained sand, has been greatly reduced. The main reasons for the "skipping bends" in most of the bends in the Lower Jingjiang are that the variation coefficient of the monthly average runoff process is large and the bending radius of the bends itself is small. With the successive operation of cascade reservoirs in the main and tributaries of the upper reaches of the Yangtze River, it is expected that the variation coefficient of the monthly average runoff process in the lower reaches of the reservoir will continue to increase, which may lead to the occurrence of bends with relatively small bending radius that do not currently have "skipping bends".

Key words: Three Gorges Project; downstream of reservoir; curved river channel; evolution law

(上接第4页)

Influence of Climate Abrupt Change on Extreme Distribution of Staged Rainfall in Jiangxi Province Based on Genetic Algorithm

TANG Li^{a,b}, LIU Hai-ming^b, WEI Xi^c, YAN Zhong-yue^b, YANG Bing-bing^b

(a. Jiangxi Provincial Soft Science Research Base of Water Security and Sustainable Development;

b. School of Business Administration; c. Comprehensive Management Section, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China)

Abstract: In order to study the influence of climate change on rainfall extreme value distribution in main flood season, based on the daily rainfall data from 1960 to 2017 in Jiangxi Province, a variety of test methods were used to detect and test the abrupt change points. Genetic algorithm and Fisher's optimal segmentation method were used to stage the flood season before and after the climate abrupt change, and the extreme distribution of staged rainfall and design rainfall before and after the climate abrupt change were discussed. The results show that 1991 was the abrupt change year of precipitation in Jiangxi Province from 1960 to 2017, and it was necessary to pay more attention to the occurrence of extreme heavy rainfall in Guangchang and Poyang Lake regions. Genetic algorithm is suitable for the division and staging of flood season. After the abrupt climate change (1991-2017), the designed rainfall value in the main flood season of Jiangxi Province was greater than that before the abrupt climate change (1960-1990), and also greater than that in the whole period (1960-2017). When calculating the designed flood based on the designed rainfall, the influence of climate change on the designed rainfall value should be considered, and strengthen protection against floods.

Key words: climate change; flood season division; rainfall extreme value distribution; Jiangxi Province