

宜昌至沙市段水位流量关系变化及影响因素分析

唐庆霞, 闫金波, 邹 涛

(长江委水利委员会 长江三峡水文水资源勘测局, 湖北 宜昌 443000)

摘要:长江中游河段水位流量关系受多种因素的综合影响,呈现出较为复杂和不规律的特点。研究了洪水涨落率、来水顶托和水库调度等因素对水位流量关系的影响。根据实测资料,对宜昌站、枝城站和沙市站的水位流量关系变化进行分析,并讨论了沿程水位下降趋势和比降的变化规律。结果表明,洪水涨落率是控制各站水位流量关系曲线的主要影响因素,来水顶托和水库调节仅对水位流量关系曲线产生局部影响。宜昌至枝城段和枝城至沙市段的水位和比降变化规律恰好相反。研究成果对水文预报、水文资料整编、水文分析计算和河演分析工作具有较大参考价值。

关键词:水位流量关系;涨落率;河床演变;顶托影响;水库调度

中图分类号: TV697.11 **文献标志码:** A

1 研究背景

长江宜昌至沙市河段位于三峡水利枢纽和葛洲坝水利枢纽下游,处于长江中游上段,全长 158 km。其中,松滋口以上属于低山丘陵,松滋口以下属于平原地区。按照河段特点,宜昌至沙市河段可细分为宜昌、宜都、枝江和沙市 4 个小河段。河段在宜都有清江,在董市有玛瑙河,在马羊洲尾部有沮漳河等较大支流入汇。在松滋口有松滋河、在太平口有虎渡河等河口分流入洞庭湖。三峡水库自 2003 年开始蓄水运用至今已近 10 a,出库水沙情势发生了较大变化,由此也引起了坝下近坝河道的一系列演变,主要表现为:河床冲刷下切,水位下降,也导致了水位流量关系的变化。基于此,有必要深入分析和研究水位流量关系变化的因素、程度和发展趋势。研究成果将有助于提高水文预报、水文资料整编和水文分析计算的精度。

2 主要影响因素

河道水文断面的水位流量关系,通常受到测站的断面和河槽影响。当测站处在一个特定的天然河流,其测站特性在一定时期相对稳定,影响水位流量关系

的因素亦基本固定。若测站特性改变,如修建水利工程、截弯工程等,都将会使水位流量关系的影响因素发生新的变化。

三峡水库坝下游宜昌、枝城、沙市等水文站,是长江中游上荆江河段的重要控制站,其水位流量关系影响因素复杂多变。为了分析这些站水位流量关系曲线受工程影响的变化情况,重点研究水位流量关系的轴线(即中心线)变化。历史资料分析表明,这 3 个站的水位流量关系轴线受长河槽控制,即受到河道地形和水文(情)条件变化的综合影响。在这种轴线的控制下,洪水涨落率使水位流量关系呈逆时针绳套曲线变化,而下游水体(支流来水和河槽壅水)顶托和水库调度又常使关系曲线局部变形或扭曲。

2.1 洪水涨落率的影响

利用圣维南方程组对洪水波分类,考虑不同条件可分为运动波、扩散波、惯性波和动力波。这里以扩散波来分析洪水涨落率对 $Z \sim Q$ 关系的影响,经推导如下:

$$Q = Q_c \sqrt{1 + \frac{1}{i_0 C} \frac{dz}{dt}} \quad (1)$$

式中, Q 为某时刻流量, m^3/s ; Q_c 为某时刻对应的稳定

流流量, m^3/s ; C 为洪水波波速, m/s 或 m/h , 约为断面平均流速的 1.3 ~ 1.7 倍; i_0 为河流平均纵坡降; dz/dt 为水位涨落率, m/s 或 m/h 。

统计宜昌站近 20 a 内约 30 场较大洪水的水位涨落率变化情况, 并通过实测流量确定 Q 和 Q_c 值。统计 1982 ~ 2011 年成果, dz/dt_{max} 变化为 0.068 ~ 0.325, 宜昌站水位流量关系绳套曲线的套幅均不大, 若用 Q/Q_c 表示, 变化为 1.006 ~ 1.19, 见图 1。

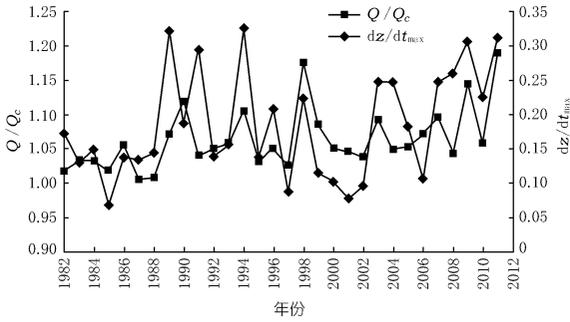


图 1 Q/Q_c 和 dz/dt_{max} 年际变化

2.2 水体顶托的影响

2.2.1 支流来水顶托

重点分析支流清江来水对宜昌站的顶托影响。清江是长江中游较大支流之一, 在宜昌站下游约 38 km 汇入长江。清江流域是长江中游暴雨中心之一, 地处五峰、恩施暴雨区, 而且常与三峡区间暴雨同时发生。历史上清江发生的最大洪水是 1969 年 7 月 12 日, 流量达 $16\,900\,m^3/s$, 1951 ~ 1985 年最大洪峰流量均值为 $8\,140\,m^3/s$ 。

统计历史上近 30 余场洪水表明, 清江来水流量在 $2\,000\,m^3/s$ 时对宜昌站水位有顶托影响, 清江来水入汇长江, 约 3 h 后对宜昌水位产生顶托, 其水位抬高值与清江和宜昌的流量大小(或称底水)有关, 即清江流量大, 宜昌水位顶托值大, 宜昌水位高则水位抬高值减小。随着清江梯级电站的全面投产, 2000 年后没有出现清江顶托现象, 但还是要予以重视。

2.2.2 下游河槽壅水

在中高水时, 宜昌、枝城、沙市站水位流量关系均呈绳套曲线变化, 其左右外包线与中心线(也称为水位流量关系的中轴线)之差——即绳套曲线的套幅并不大。但水位流量关系的中轴线历年变化幅度较大, 可达 15% ~ 20%, 其主要原因为下游各年槽蓄壅水情况不同(与各支流和本站洪量有关), 加上坝下游河床下切及荆江截弯等影响河道纵比降与糙率的变化, 导致水位流量关系轴线受长河槽控制亦产生了平移。

2.3 水库调度的影响

葛洲坝水库自 1981 年 5 月蓄水以来, 经过几次调整库水位, 从二期运用开始, 库水位基本维持在 66 m, 但有 $\pm 0.5\,m$ 的日调节。在汛末, 当三江航道开闸冲沙时, 库水位变化较大。在高洪期还有一定的滞洪作用。根据葛洲坝水库实测地形资料, 计算坝前水位变化对库容及下泄流量的影响, 见表 1(表中所列流量系时段平均值)。

表 1 葛洲坝水库调度对下泄流量影响计算成果

库水位差/ m	调节库容/ 万 m^3	对下泄流量的影响值/($m^3 \cdot s^{-1}$)					
		1h	2h	3h	4h	5h	10h
0.1	287	797	399	266	199	159	79.7
0.2	573	1590	797	530	398	318	159
0.3	860	2390	1200	797	598	478	239
0.4	1147	3190	1590	1060	797	638	319
0.5	1433	3980	1990	1330	995	797	398
1.0	2870	7970	3990	2660	1990	1590	797

由于水库调度, 使宜昌水位流量关系局部发生扭曲变形。图 2 为 1998 年汛期葛洲坝水库为配合长江中下游防洪, 采取滞洪调度措施, 即控制葛洲坝水库的下泄流量, 使宜昌水位流量关系曲线发生较强烈的变形。当时宜昌流量已超过 $63\,000\,m^3/s$, 经水库滞洪后, 流量削减为 $61\,000\,m^3/s$ 左右, 削减流量达 $2\,000\,m^3/s$ 以上, 滞洪历时达 20 h。

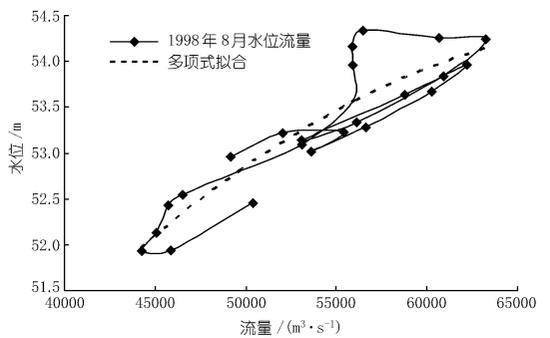


图 2 宜昌站 $Z \sim Q$ 关系(1998 年 8 月 9 ~ 24 日)

三峡水库于 2003 年完成 135 m 蓄水, 2006 年 10 月蓄水至 156 m, 2010 年 10 月正式蓄水至 175 m。蓄水运用后, 根据三峡水库调度规程, 原则上每年汛前水位降低到 145 m, 汛后抬高水位至 175 m, 但有 $\pm 0.5\,m$ 的调节, 根据 2011 年三峡库容曲线计算出坝前水位变化对库容及下泄流量的影响。

3 近坝段主要水文站水位流量关系变化

采用实测资料分析, 选择典型年主要依据洪水量级、水利工程修建前后等情况, 初步选择了 1954 年(特

大洪水)、1973年(葛洲坝工程开工前)、1981年(葛洲坝水库蓄水及特大洪水年)、1998年(特大洪水年)、2003年(三峡水库135 m蓄水)、2007年(三峡水库156 m蓄水)和2011年(三峡水库175 m试验性蓄水后)等。

3.1 宜昌站

(1) 中低水位,即流量小于20 000 m³/s时,水位流量关系受胭脂坝节点控制,表现为单一曲线,在葛洲坝工程施工前(1973年)基本上保持稳定。葛洲坝工程施工期至水库蓄水时(1981年),因施工采砂等影响,下游河床已出现下切而使水位流量关系线平移,同流量下水位开始有明显下降。

近60 a来,宜昌低水位下降达2 m左右,见表2。其中,下降的主要时期为葛洲坝水库蓄水后(1981~2003年),如流量6 000 m³/s时,水位下降了1.0 m;施工期(1973~1981年)下降0.45 m;三峡水库运行后(2003~2011年)下降了0.47 m。最大水位下降值出现在流量为10 000~15 000 m³/s时,达2.2 m左右。

(2) 中高水,即流量大于20 000 m³/s时,水位流量关系轴线历年变化幅度较大,可达15%~20%。其主要原因是下游各年槽蓄壅水情况不同(与各支流和宜昌站洪量有关),加上葛洲坝和三峡水库蓄水后坝下游河床下切及荆江截弯等,影响河道纵比降与糙率的变化,导致中高水水位流量关系受长河槽控制亦产生了平移。

表2 近60 a不同流量宜昌站水位升降情况 m

年份	6000 m ³ /s	10000 m ³ /s	15000 m ³ /s	20000 m ³ /s	30000 m ³ /s	40000 m ³ /s	50000 m ³ /s
1954	41.55	43.75	45.80	47.30	49.65	51.55	53.18
1973	41.50	43.85	45.95	47.30	49.20	50.80	52.23
1981	41.05	43.25	45.45	47.20	49.60	51.30	52.76
1998	40.30	42.45	44.55	46.15	48.70	50.80	52.50
2003	40.05	42.20	44.30	46.05	48.55	50.45	
2007	39.85	42.10	44.30	46.05	49.85	50.85	
2011	39.58	41.55	43.65	45.45	48.38	50.90	
累积下降值	1.97	2.20	2.15	1.85	1.27	0.65	

3.2 枝城站

(1) 中低水位,即流量小于20 000 m³/s时,水位流量关系受下游关洲、芦家河等节点控制表现为单一曲线,1954~2003年,流量6 000 m³/s的水位下降了0.85 m,三峡水库运行后(2003~2011年)下降了0.50 m,共计下降了1.35 m。该站水位最大下降值仍在流量为10 000~15 000 m³/s时,达1.77 m,较宜昌站下降值为小。见表3。

(2) 中高水水位仍有一定下降,但受下游河道壅

水影响,其下降值并不明显。

表3 近60 a枝城站不同流量下水位下降情况 m

年份	6000 m ³ /s	10000 m ³ /s	15000 m ³ /s	20000 m ³ /s	30000 m ³ /s	40000 m ³ /s	50000 m ³ /s
1954	39.15	40.95	42.65	43.98	45.95	47.45	48.90
1998	38.30	39.85	41.60	43.10	45.58	47.40	48.95
2003	38.30	39.85	41.55	42.88	44.90	46.48	
2007	38.00	39.70	41.50	42.96	45.23	46.85	48.08
2011	37.80	39.18	40.85	42.40	45.05	46.98	
累积下降值	1.35	1.77	1.75	1.36	0.90	0.47	

3.3 沙市站

(1) 中低水位,即流量小于20 000 m³/s时,沙市站水位流量关系受下游河槽控制表现为单一曲线。1998~2003年,流量6 000 m³/s下降了0.35 m;三峡水库运行后(2003~2011年)下降了1.10 m,共计下降了1.45 m。该下降值比枝城站大,比宜昌站小。该站最大下降值出现在低水期,随流量增加,下降值逐渐减少,与上游宜昌站和枝城站不一致,见表4。

(2) 中高水水位仍有一定下降,但受下游河道壅水影响,其下降值并不明显。

表4 1998~2011年沙市站不同流量水位下降情况 m

年份	6000 m ³ /s	10000 m ³ /s	15000 m ³ /s	20000 m ³ /s	30000 m ³ /s	40000 m ³ /s	50000 m ³ /s
1998	32.55	35.05	37.58	39.48	42.08	43.60	44.80
2003	32.20	34.60	36.95	38.60	40.57		
2007	31.70	34.55	37.10	38.85	40.88	42.58	
2011	31.10	33.82	36.48	38.40	41.00		
累积下降值	1.45	1.23	1.10	1.08	1.08		

3.4 沿程水位下降趋势

通过各站水位流量关系绳套曲线的轴线拟合,分析计算可得到图3,图3反映了各站水位随流量下降的趋势,具有以下特点。

(1) 宜昌站和枝城站的水位下降趋势完全一致,均受到上游葛洲坝和三峡水库运行的影响。而沙市站水位下降趋势与上游两站不一致,说明该站除受上游葛洲坝和三峡水库运行的影响外,还受到其他方面的因素影响。

(2) 宜昌站和枝城站在流量为10 000~15 000 m³/s时,水位下降达最大值,而对于沙市站,则流量越小,水位下降越大。

(3) 由图3可预估,在大流量40 000 m³/s时,宜昌、枝城站水位下降约0.5~0.6 m;50 000 m³/s时,水位下降则不明显。沙市站在20 000 m³/s以上大流量

时,其水位下降约 1.1 m。

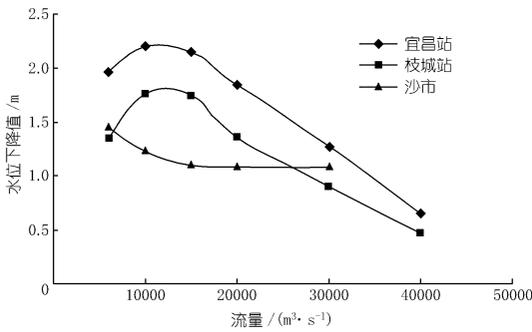


图 3 坝下游沿程水位下降趋势

3.5 近坝段水位落差与比降变化分析

3.5.1 水位落差变化

各流量级的水位落差计算结果见表 5。总体上看,宜昌至枝城水位落差随流量增加而增加。但自 1954 年以来,流量越小,宜昌至枝城段水位落差减少越多,大流量减少则不明显。如流量为 6 000 m³/s 时,1954 年水位落差为 2.4 m,1998 年减为 2 m,2003 年再减为 1.75 m,至 2011 年落差则基本稳定。这与坝下游近坝段冲刷自上而下密切相关,即宜昌水位下降较枝城为大,是造成落差减小的主要原因。

表 5 各级流量水位落差变化情况 m

河段	年份	6000 m ³ /s	10000 m ³ /s	15000 m ³ /s	20000 m ³ /s	30000 m ³ /s	40000 m ³ /s	50000 m ³ /s
宜昌 - 枝城	1954	2.40	2.80	3.15	3.32	3.70	4.10	4.28
	1998	2.00	2.60	2.95	3.05	3.12	3.40	3.55
	2003	1.75	2.35	2.75	3.17	3.65	3.97	
	2007	1.85	2.40	2.80	3.09	4.62	4.00	
	2011	1.78	2.37	2.80	3.05	3.33	3.92	
枝城 - 沙市	1998	5.75	4.80	4.02	3.62	3.50	3.80	
	2003	6.10	5.25	4.60	4.28	4.33		
	2007	6.30	5.15	4.40	4.11	4.35	4.27	
	2011	6.70	5.36	4.37	4.00	4.05		

枝城至沙市段水位落差变化则恰好与宜昌至枝城段相反:① 随流量增加,落差减小。② 落差逐年增加,流量越小,增加越多。如流量为 6 000 m³/s 时,1998 年水位落差为 5.75 m,2003 年为 6.1 m,2007 年为 6.3 m,2011 年则增大到了 6.7 m;流量为 30 000 m³/s 时,落差由 1998 年的 3.5 m 增加到 2011 年 4.05 m,这一变化主要是因沙市站水位下降较枝城快所致。

3.5.2 比降变化

点绘宜昌至枝城河段比降的年内变化,见图 4,可进一步说明比降在洪枯水时的变化规律,即枯水期比降小,洪水期比降大。三峡水库蓄水前后,主汛期(7~9 月)比降基本保持稳定,枯水期比降则明显变小。

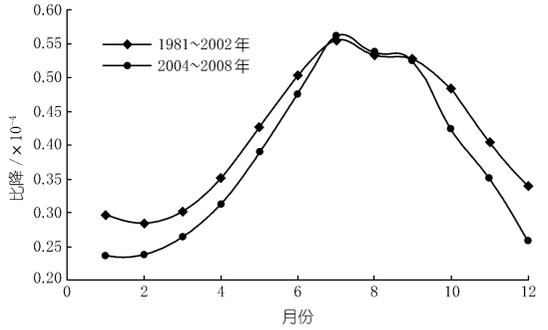


图 4 三峡水库蓄水前后宜昌至枝城段年内比降变化

图 5 为枝城至沙市河段的比降年内变化,其洪枯变化情况与上述的一般规律恰好相反,即枯季比降大,汛期比降小。图 5 也表明,三峡水库蓄水前后主汛期(7~9 月)比降也基本稳定,而蓄水后的枯水期比降比蓄水前增大较多,这与宜昌至枝城河段的变化情况一样,也是相反的。

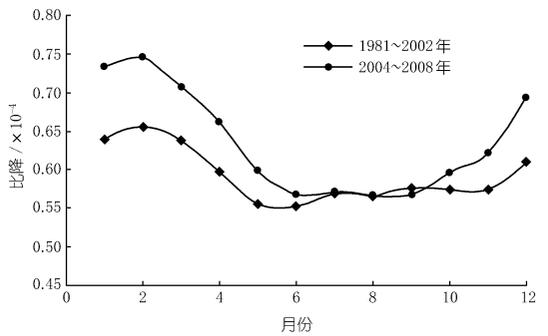


图 5 三峡水库蓄水前后枝城至沙市段年内比降变化

3.5.3 对坝下游比降变化规律的认识

一般而言,河道水面比降与洪水量级及涨落密切相关,呈现出“水小比降小、水大比降大,涨水比降大、落水比降小”的规律。但从图 6 可以看出,枝城至沙市段比降和宜昌至枝城段比降随流量的变化刚好相反,也反映了两个河段比降变化的基本规律。这一变化规律也将导致两个河段洪、枯水水力特性的重大变化。如枝城至沙市段枯季比降大,对少数河段(如芦家河浅滩段)的通航不利,值得进一步关注。

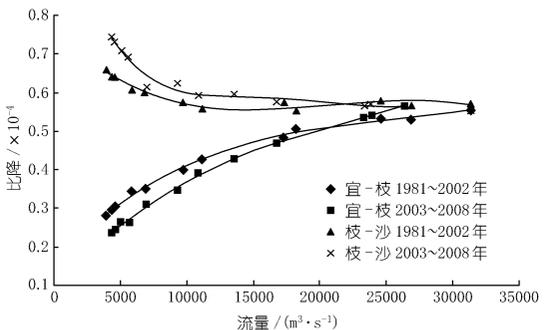


图 6 葛洲坝下游河道比降与流量的关系

4 结 论

(1) 近坝段各站水位流量关系受多种因素的综合影响,测站控制为长河槽控制,其控制河长的长度随流量大小变化。

(2) 水位流量关系轴线受下游支流和河槽壅水影响而摆动。

(3) 在各年度水位流量关系轴线控制下,洪水涨落率的影响是主要因素,使水位流量关系呈逆时针绳套变化,但绳套的套幅并不大,一般在稳定流(可认为是绳套的中心线)流量 $\pm 4\%$ 范围内变化,当洪水涨落水急剧时可达10%以上。

(4) 清江来水、葛洲坝水库调节(错峰、冲沙等),对宜昌水位流量关系的影响是短暂的,仅使水位流量

关系曲线发生局部变形。

(5) 水位流量关系多年平均轴线又因河道逐年冲刷下切(主要受水库拦沙影响)、采砂、荆江截弯等的影响而变化。宜昌站枯水下降最大,近2 m;沙市站次之,为1.45 m;枝城站相对较小,为1.35 m。可见,人类活动对水位流量关系的影响是较深远的。

(6) 宜昌至枝城段和枝城至沙市段水位落差、比降呈现出相反的变化规律。其中,宜昌至枝城段水位落差或比降随流量增加而增加,枝城至沙市段则随流量增加而减小。三峡蓄水前后,宜昌至枝城段水位落差或比降在枯水期减小,枝城至沙市则增加,但洪水期均趋于稳定。这一相反的变化规律,也将导致两个河段洪、枯水水力特性的重大变化。

(编辑:李慧)

Analysis of water level – discharge relationship variation of Yichang to Shashi reach and its influential factors

TANG Qingxia, YAN Jinbo, ZOU Tao

(Hydrology and Water Resources Survey Bureau of the Three Gorges, Changjiang Water Resources Commission, Yichang 443000, China)

Abstract: Influenced by multiple factors, the water level – discharge relationship of middle Yangtze River is complicated and irregular. Several factors that influence the water level – discharge relationship are studied, including flood fluctuation rate, backwater effects and reservoir operation, etc. According to the measured data, the water level – discharge relationship of Yichang Station, Zhicheng Station and Shashi Station are analyzed and the trend of water level decrease along the waterway and the variation laws of gradient are discussed. The results show that the flood fluctuation rate is the main influential factor for the water level – discharge relationship of the 3 stations, the backwater effects and reservoir operation influence partly. The variation laws of water level and gradient from Yichang to Zhicheng reach is the opposite of that from Zhicheng to Shashi reach. The results can be referred for hydrological forecast, hydrological data compilation, hydrological analysis and calculation, riverbed evolution analysis.

Key words: water level – discharge relationship; fluctuation rate; riverbed evolution; backwater; reservoir operation

(上接第13页)

Analysis on variation features of multi – years precipitation in Yangtze River Basin

LI Chunlong¹, ZHANG Fangwei¹, ZI Li¹, YAN Fuhai²

(1. Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China; 2. Shangcheng County Water Conservancy Bureau of Henan Province, Shangcheng 465350, China)

Abstract: By precipitation data from 173 meteorological stations during 1951 to 2005 in Yangtze River Basin, the precipitation trend of several main areas in the basin are analyzed by climate trend coefficient method, climate tendency rate method, and the significance of the trends are further tested by rank correlation method of Mann – Kendall. The results indicate that, the precipitation in the area of upstream Yangtze River Basin shows a significant decrease trend, while the precipitation variation in other areas is not notable; in flood season, the precipitation in the area of upstream Yangtze River Basin decreases significantly while in other areas the precipitation shows a little upward trend in dry season. It is discovered that the precipitation of all the areas in Yangtze River Basin have a slight downward trend.

Key words: climate change; precipitation; climate trend coefficient; Yangtze River Basin