



# 满足通航标准条件下 电站最小下泄流量计算与分析\*

刘勇, 张毅

(长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆 400074)

**摘要:**金沙江最下游梯级向家坝水电站已蓄水至正常蓄水位, 但相关航运参数仍存在较大争议。为保障长江上游干线基本维护尺度, 用保证频率法、保障航道基本维护尺度反推流量法、天然入汇比分配法等对金沙江向家坝水电站最小下泄流量进行研究分析, 认为: 在干支流均建电站的条件下, 按照天然入汇比分配法较为合适; 在不考虑非恒定流及河床冲刷影响的情况下, 向家坝水电站最小下泄流量不应小于  $1\ 296\ \text{m}^3/\text{s}$ 。

**关键词:** 最小下泄流量; 入汇比; 维护尺度; 通航标准

中图分类号: TV 135.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)01-0134-05

## Calculation and analysis of the minimum discharge about hydropower station under condition of satisfying navigation standard

LIU Yong, ZHANG Yi

(Changjiang Chongqing Harbour and Waterway Engineering Investigation and Design Institute, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** Xiangjiaba hydropower station in Jinsha river has stored to normal level, but its shipping parameters is still a big controversy. To protect the upper Yangtze River's main basic maintenance dimensions, we carry out a research on the minimum discharge of Xiangjiaba hydropower station in Jinsha river by the guaranteed frequency method, reverse flow method about waterway maintenance scale, natural inflow ratio with the score distribution method, etc. The result shows that the natural inflow ratio with the score distribution method is more suitable for hydropower station in branch streams, and the minimum discharge of Xiangjiaba hydropower station should not be less than  $1\ 296\ \text{m}^3/\text{s}$ .

**Keywords:** the minimum discharge; inflow ratio; maintenance dimension; navigation standard

GB 50139—2004《内河通航标准》规定枢纽瞬时下泄流量不应小于原天然河流设计最低通航水位时的流量。对于无支流的河道, 该标准是合适的; 但是对于有大型支流入汇、且支流也有已建和在建电站的河道, 再按照该方法确定最小下泄流量是不合适的。

向家坝水电站为金沙江下游最后一个梯级, 下游有岷江和横江支流, 电站于2006年11月开工, 2008年12月截流, 2012年10月10日首次下

闸蓄水, 2013年9月12日水位蓄至正常蓄水位380 m, 向家坝水电站已经步入运行期。根据《金沙江向家坝水电站水库运用和电站运行调度规程(试行)》, 向家坝水电站相关的航运参数为: 下游水位最大日变幅暂按不超过4.5 m/d控制, 最大时变幅暂按不超过1 m/h控制, 最小下泄流量为  $1\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$ ; 升船机按IV级航道标准设计, 通航净空高度为10 m, 承船厢有效尺度为  $116\ \text{m} \times 12\ \text{m} \times 3.0\ \text{m}$ (长×宽×水深), 最大通航流量为  $12\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 。

收稿日期: 2014-05-11

\*基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAB05B02)

作者简介: 刘勇(1984—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口、海岸及近海工程设计与研究工作。

向家坝水电站建在通航河道上, 下游为长江干线, 水库运用与电站运行直接关系到枢纽上、下游河道的通航条件。关于向家坝水电站航运相关参数, 相关航运部门认为不满足长江干线航运需求, 需要研究之后再确定<sup>[6]</sup>。

### 1 叙渝段航道概况

宜宾至重庆河段长 384 km, “十一五”期间对该段航道 30 余处碍航滩险进行了整治, 目前已

达Ⅲ级标准, 维护尺度为 2.7 m × 50 m × 560 m, 枯水期能通航 1 000 吨级船舶组成的船队, 并实现夜航。

为适应沿江经济社会发展的需要, 充分发挥航运效益, 地方政府和港航企业强烈呼吁提高航道等级。为体现“三个服务”, 长江航道局于 2011 年利用中、洪水期自然水深, 试运行提高了中、洪水期航道维护尺度(表 1), 部分缓解了社会需求与航道通过能力的矛盾。

表 1 宜宾—重庆河段航道分月维护水深

河段	分月维护水深											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
宜宾合江门—泸州纳溪	2.7	2.7	2.7	2.7	3.2	3.5	3.7	3.7	3.7	3.2	3.2	2.7
泸州纳溪—重庆羊角滩	2.7	2.7	2.7	2.7	3.2	3.5	3.7	3.7	3.7	3.5	3.2	2.7

### 2 干支流来水条件分析

#### 2.1 干支流来流情况

向家坝水电站下游主要支流有横江、岷江等, 均有长时间的观测资料。

金沙江流域枯水期为历年的 12 月至次年 4 月, 6—10 月为洪水期, 其余月份为中水期。根据屏山站观测资料统计实测最大流量为 29 000 m<sup>3</sup>/s, 最小流量为 1 060 m<sup>3</sup>/s, 多年平均流量为 4 590 m<sup>3</sup>/s。洪枯水位涨落幅度较大, 实测最大洪枯水位变幅为 24.46 m, 最小变幅为 10.74 m。径流的年内分配不均, 主要集中在每年的 4—10 月, 占年径流量的 82.04%, 1—3 月和 11—12 月只占年径流的 17.96%。

横江水文站(距河口 15 km)多年平均流量 291 m<sup>3</sup>/s, 最大月平均流量 1 290 m<sup>3</sup>/s, 最小月平均流量 78 m<sup>3</sup>/s, 主汛期(7—9 月)多年平均流量

550 m<sup>3</sup>/s, 枯水期(12 月至次年 4 月)多年平均流量 144 m<sup>3</sup>/s, 枯水期各月 90% 保证率相应的月平均流量为 90 ~ 115 m<sup>3</sup>/s。

据岷江高场水文站(距河口 26.5 km)多年平均流量 2 880 m<sup>3</sup>/s, 最大月平均流量 13 100 m<sup>3</sup>/s, 最小月平均流量 604 m<sup>3</sup>/s, 主汛期多年平均流量 6 020 m<sup>3</sup>/s, 枯水期多年平均流量 952 m<sup>3</sup>/s, 枯水期各月 90% 保证率相应的月平均流量在 635 ~ 970 m<sup>3</sup>/s。

#### 2.2 干支流天然入汇比

叙渝段上游干、支流有横江、岷江、金沙江, 下面对干、支流的汇流情况做简要分析。设:  $Q_{屏}$  为金沙江屏山站流量,  $Q_{横}$  为金沙江支流横江的流量,  $Q_{岷}$  为岷江高场站流量, 则  $Q_{支} = Q_{岷} + Q_{横}$ ;  $Q_{合} = Q_{支} + Q_{屏}$ 。再设汇流比  $R = Q_{屏}/Q_{合}$ 。表 2 统计了金沙江干支流汇流比情况。

表 2 金沙江干支流汇流比统计参数

流量统计范围/ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	最大 R	最小 R	平均 R	R <sub>2</sub>	R <sub>5</sub>	R <sub>10</sub>	R <sub>20</sub>	R <sub>30</sub>	R <sub>40</sub>	R <sub>50</sub>	R <sub>60</sub>	R <sub>70</sub>	R <sub>80</sub>	R <sub>90</sub>	R <sub>95</sub>	R <sub>98</sub>
全部	0.843	0.221	0.614	0.395	0.442	0.488	0.540	0.577	0.605	0.628	0.648	0.668	0.689	0.720	0.741	0.771
<2 600	0.777	0.433	0.621	0.487	0.514	0.539	0.576	0.594	0.611	0.626	0.638	0.652	0.671	0.698	0.716	0.733
≥2 600 ~ 4 000	0.779	0.377	0.615	0.443	0.474	0.506	0.548	0.581	0.608	0.629	0.646	0.659	0.678	0.706	0.724	0.739
>4 000 ~ 5 000	0.777	0.319	0.583	0.394	0.432	0.463	0.506	0.536	0.568	0.598	0.620	0.643	0.664	0.681	0.695	0.709
>5 000 ~ 6 000	0.752	0.269	0.577	0.350	0.405	0.431	0.476	0.528	0.561	0.591	0.623	0.645	0.671	0.695	0.711	0.727
>6 000 ~ 10 000	0.804	0.256	0.600	0.360	0.402	0.441	0.516	0.557	0.594	0.622	0.646	0.667	0.689	0.715	0.733	0.755
>10 000 ~ 15 000	0.824	0.262	0.624	0.388	0.433	0.491	0.542	0.579	0.615	0.640	0.664	0.689	0.708	0.734	0.749	0.774
>15 000	0.843	0.221	0.651	0.348	0.439	0.493	0.568	0.617	0.646	0.674	0.693	0.721	0.723	0.773	0.795	0.812

注: R<sub>2</sub> ~ R<sub>98</sub> 表示小于和等于某汇流比所占的天数占统计总天数的百分比。

从整体上看, 汇流比随流量的增大有增加的趋势, 当  $Q_{\text{合}} < 2\,600\text{ m}^3/\text{s}$  时,  $R_{50}$  为 0.626; 当  $10\,000\text{ m}^3 < Q_{\text{合}} < 15\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时,  $R_{50}$  为 0.640; 当  $Q_{\text{合}} > 15\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时,  $R_{50}$  为 0.674。汇流比分布范围也随着流量的增大有增大的趋势,  $Q_{\text{合}} < 2\,600\text{ m}^3/\text{s}$  的变化范围仅为 0.344;  $10\,000 < Q_{\text{合}} < 15\,000\text{ m}^3/\text{s}$  的变化范围仅为 0.483;  $Q_{\text{合}} > 15\,000\text{ m}^3/\text{s}$  的变化范围为 0.622 见图 1、2 和表 3。

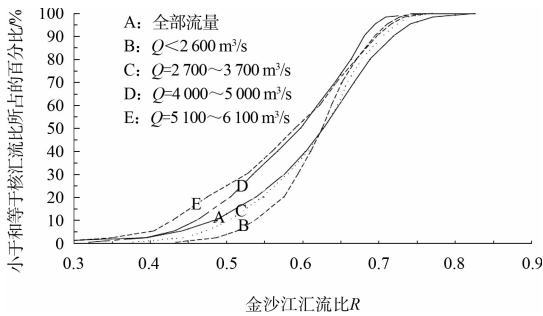


图1 金沙江干支流汇流比累计频率曲线

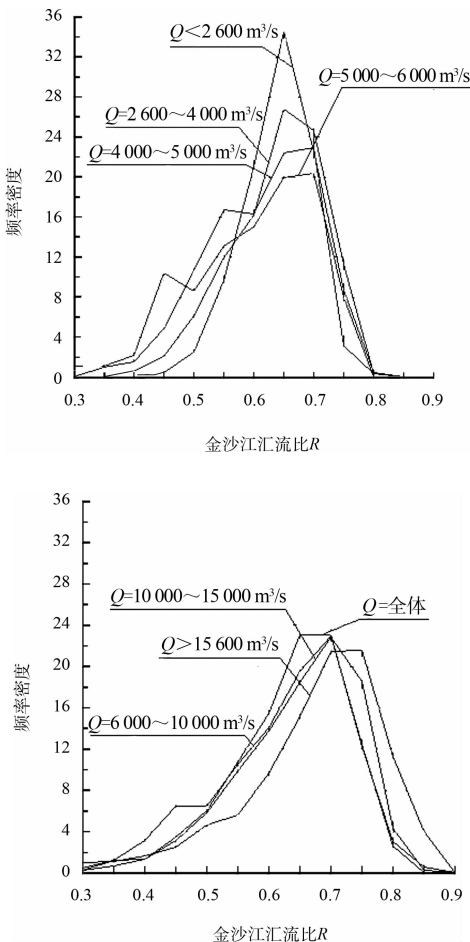


图2 金沙江干支流汇流比频率密度分布曲线

表3 金沙江干支流出现频率最大的汇流比统计

流量统计范围/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	汇流 比范围	所占 百分比/%	汇流 比范围	所占 百分比/%
全部流量	0.60 ~ 0.70	46.96	0.55 ~ 0.75	73.9
< 2 600	0.60 ~ 0.70	57.4	0.55 ~ 0.75	86.8
$\geq 2\,600 \sim 4\,000$	0.60 ~ 0.70	51.5	0.55 ~ 0.75	78.8
$> 4\,000 \sim 5\,000$	0.55 ~ 0.65	38.8	0.50 ~ 0.70	78.1
$> 5\,000 \sim 6\,000$	0.55 ~ 0.65	35.0	0.50 ~ 0.70	68.5
$> 6\,000 \sim 10\,000$	0.60 ~ 0.70	42.5	0.55 ~ 0.75	69.1
$> 10\,000 \sim 15\,000$	0.60 ~ 0.70	41.4	0.55 ~ 0.75	73.7
$> 15\,000$	0.65 ~ 0.75	43.1	0.60 ~ 0.80	69.6

### 3 满足航运需求所需向家坝最小下泄流量分析

#### 3.1 屏山站保证率流量

根据 GB 50139—2004 《内河通航标准》要求, 采用综合历时曲线法对 1990—2010 年 21 a 序列屏山站实测的逐日平均流量进行统计, 结果见表 4。屏山站保证率为 98% 对应的流量为  $1\,245\text{ m}^3/\text{s}$ , 可见向家坝水电站最小下泄流量较屏山站设计流量小。

表4 屏山水文站枯水流量经验频率统计

计算方法	枯水保证率/%	流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )
综合历时曲线法	90	1 470
	95	1 320
	96	1 280
	98	1 245

根据岷江、横江相关在建、拟建水电枢纽概况, 岷江最下游为龙溪口航电枢纽, 最小出库流量按 98% 保证率确定, 为  $605\text{ m}^3/\text{s}$ ; 横江最下游为波龙口电站, 最小出库流量为  $69\text{ m}^3/\text{s}$ 。若向家坝最小出库流量按  $1\,245\text{ m}^3/\text{s}$ , 岷江电站与向家坝电站的日调节时间较为相似, 且距离宜宾汇合口的距离也较为接近, 最小流量将同时达到宜宾, 宜宾三江合流量仅为  $1\,919\text{ m}^3/\text{s}$ , 较宜宾设计流量 ( $2\,071\text{ m}^3/\text{s}$ ) 小, 宜宾以下难以满足基本维护需要。

#### 3.2 保障叙渝段航道基本维护尺度所需向家坝最小下泄流量

为分析向家坝水电站下泄流量对宜宾以下重点滩险航道条件的影响, 建立了宜宾—重庆段一

维和部分滩险平面二维数学模型。

### 1) 计算工况。

计算向家坝下泄流量为 1 200、1 300、1 400、1 500 m<sup>3</sup>/s 共 4 个流量工况, 支流按保证率为 98% 考虑, 横江流量为 69 m<sup>3</sup>/s, 岷江流量为 605 m<sup>3</sup>/s。平面二维计算滩险选择 3 个代表典型, 杨柳碛是顺直型滩险的代表、铜鼓滩是弯曲型代表、风簸碛是分汉型浅滩的代表。

### 2) 全河段一维计算成果。

根据表 5 水位计算成果, 对各个工况下航道尺度进行了核查。其中工况 2、工况 3 和工况 4 满足航道尺度要求; 工况 1 条件下部分滩险航道尺度有所降低, 其中李庄、杨柳碛、井口、火焰碛、小米滩、冰盘碛、苦竹碛、占碛子、胡家滩、三角碛及猪儿碛等水道难以满足Ⅲ级航道尺度标准, 最低维护尺度为 2.5 m × 50 m × 560 m。

表 5 各种工况下重庆朝天门—宜宾段主要滩险航道尺度变化

水道	航道里程/km	航道尺度/(m × m × m)			
		工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
李庄	1 021 ~ 1 035	2.5 × 50 × 560	2.7 × 50 × 560	2.8 × 50 × 560	2.9 × 50 × 560
杨柳碛	1 015 ~ 1 017.3	2.6 × 50 × 700	2.7 × 60 × 700	2.8 × 60 × 700	2.9 × 60 × 700
筒箕背	1 004 ~ 1 005.1	2.7 × 50 × 560	3.0 × 50 × 560	3.0 × 50 × 560	3.0 × 50 × 560
铜鼓滩	993 ~ 1 001	2.7 × 50 × 560	2.9 × 50 × 560	3.0 × 50 × 560	3.0 × 50 × 560
香炉滩	981 ~ 993	2.7 × 50 × 560	2.8 × 50 × 560	2.8 × 50 × 560	2.9 × 50 × 560
江安	974 ~ 981	2.7 × 50 × 560	2.9 × 50 × 560	2.9 × 50 × 560	3.0 × 50 × 560
二龙口	962 ~ 974	2.7 × 50 × 560	3.0 × 50 × 560	3.0 × 50 × 560	3.1 × 50 × 560
井口	953 ~ 962	2.5 × 50 × 560	2.7 × 50 × 560	2.8 × 50 × 560	2.9 × 50 × 560
纳溪	933 ~ 944	2.7 × 50 × 600	2.9 × 50 × 600	2.9 × 50 × 600	3.0 × 50 × 600
火焰碛	922.0 ~ 923.8	2.5 × 50 × 560	2.7 × 50 × 560	2.8 × 50 × 560	2.9 × 50 × 560
泸州	910 ~ 921	2.7 × 50 × 600	3.0 × 50 × 600	3.0 × 50 × 600	3.1 × 50 × 600
小米滩	904 ~ 910	2.5 × 50 × 600	2.7 × 50 × 600	2.8 × 50 × 600	2.9 × 50 × 600
冰盘碛	878 ~ 885	2.6 × 50 × 560	2.8 × 50 × 560	2.9 × 50 × 560	2.9 × 50 × 560
神背咀	871 ~ 878	2.7 × 50 × 560	3.0 × 50 × 560	3.0 × 50 × 560	3.1 × 50 × 560
莲石滩	834.5 ~ 839	2.7 × 50 × 600	3.0 × 50 × 600	3.0 × 50 × 600	3.1 × 50 × 600
东溪口	806 ~ 816	2.7 × 50 × 560	2.8 × 50 × 560	2.9 × 50 × 560	2.9 × 50 × 560
白沙	767.5 ~ 779	2.7 × 50 × 560	3.0 × 50 × 560	3.0 × 50 × 560	3.1 × 50 × 560
兰家沱	740.5 ~ 741.5	2.7 × 50 × 600	3.0 × 50 × 600	3.0 × 50 × 600	3.1 × 50 × 600
苦竹碛	728.5 ~ 729.8	2.6 × 50 × 600	2.8 × 50 × 600	2.9 × 50 × 600	2.9 × 50 × 600
占碛子	715.4 ~ 716.2	2.6 × 50 × 700	2.8 × 50 × 700	2.9 × 50 × 700	2.9 × 50 × 700
铜罐驿	710.7 ~ 711.8	2.7 × 50 × 700	3.0 × 50 × 700	3.0 × 50 × 700	3.1 × 50 × 700
车亭子	700.0 ~ 701.5	2.7 × 50 × 650	3.0 × 50 × 650	3.0 × 50 × 650	3.1 × 50 × 650
胡家滩	679.6 ~ 680.6	2.5 × 50 × 600	2.7 × 50 × 600	2.8 × 50 × 600	2.9 × 50 × 600
三角碛	670.5 ~ 671.3	2.5 × 50 × 560	2.8 × 50 × 560	2.9 × 50 × 560	2.9 × 50 × 560
猪儿碛	660.1 ~ 661.9	2.5 × 50 × 600	2.7 × 50 × 600	2.8 × 50 × 600	2.9 × 50 × 600

注: 航道尺度为航道水深 (m) × 航道宽度 (m) × 弯曲半径 (m)。

### 3) 局部滩险二维数学模型计算成果。

选择 3 个典型滩险进行平面二维数学模型计算: 杨柳碛计算长度为 6.2 km (长江上游航道里程 1 014.3 ~ 1 020.5 km); 铜鼓滩计算长度为 6.0 km (999.0 ~ 993.0 km); 风簸碛计算长度为 11.7 km (952.0 ~ 963.7 km)。

计算结果显示, 在工况 1 条件下杨柳碛、风簸碛不满足航道尺度标准。其他工况均满足航道尺度标准。

通过以上分析, 在不考虑滩险冲淤变化的基础上, 通过重点滩险航道条件核查, 当向家坝水电站最小出库流量达到 1 300 m<sup>3</sup>/s 时, 才能满足

叙渝段最小维护尺度要求。

### 3.3 保障宜宾设计水位不变所需向家坝最小下泄流量分析

叙泸段设计通航流量为 2 071 m<sup>3</sup>/s，保障宜宾设计水位不变，在不考虑河道冲刷引起的水位降落的情况下即保证设计流量不变。而向家坝位于金沙江上，至宜宾之间有支流横江和岷江汇入，其流量分配确定较为复杂。从以下几个方面进行分析：

1) 按支流保证率流量来推求，岷江、横江按 98% 保证率对应流量分别为 605、69 m<sup>3</sup>/s，推算所需向家坝流量为 1 397 m<sup>3</sup>/s。根据 1990—2010 年 21 a 横江、岷江流量实测资料，横江、岷江日平均流量最小分别为 17、396 m<sup>3</sup>/s，考虑最不利情况，横江、岷江来流量最小时要保证叙渝段宜宾设计通航流量 2 071 m<sup>3</sup>/s，则所需向家坝最小下泄流量为 1 658 m<sup>3</sup>/s。

2) 从干支流天然汇流比分析，确定向家坝水电站下泄流量需同时确定金沙江、横江和岷江流量，或干支流汇流比（干流流量为金沙江流量；支流流量为横江与岷江流量之和）。通过分析，干支流汇流比的范围较大（0.433~0.777），汇流比的选择遵循“可能”、“不利”和“对应”的原则。“可能”主要选取本流量级内可能出现的汇流比；“不利”主要选取本流量级中偏大的汇流比；“对应”是指干支流对应的流量。选取不利情况将造成需求向家坝水电站下泄流量较大，向家坝水电站难以满足；选取汇流比保证率为 50% 对应的流量，汇流比频率较高，分配向家坝水电站及支流电站最小下泄流量也较为合理，各方也能较好接受，则要求向家坝水电站下泄流量为 1 296 m<sup>3</sup>/s。

3) 从维护经验来看，当金沙江来流较小时将给航道维护管理及航运安全带来重要影响。金沙江 2010 年最枯流量为 1 210 m<sup>3</sup>/s，长江航道局为保障长江上游航道畅通，在最低水位来临之前，疏浚了杨柳碛、红灯碛、火焰碛等浅滩，疏浚量为 12.97 万 m<sup>3</sup>；航务海事局也发布了减载通告，

严禁 1 000 吨级以上的船舶进入叙渝段航道。

### 3.4 综合分析

向家坝水电站最小下泄流量的确定依不同的考虑或思路得出的结果有所差异（表 6）。按屏山站保证率流量推求屏山站保证率 98% 对应流量为 1 245 m<sup>3</sup>/s；通过重点滩险航道条件核查，满足叙渝段最小维护尺度要求的向家坝水电站最小出库流量应为 1 300 m<sup>3</sup>/s；从保证向家坝水电站成库后宜宾设计最低通航水位不变出发，按照宜宾 98% 流量减去支流对应流量得到向家坝水电站最小下泄流量为 1 397 m<sup>3</sup>/s，按支流最小流量考虑所需向家坝水电站下泄流量为 1 658 m<sup>3</sup>/s；按照干支流天然汇流比，按保证率 50% 考虑，对应向家坝水电站下泄流量为 1 296 m<sup>3</sup>/s。而向家坝水电站的最小出库流量需满足相关规范、保证叙渝段基本维护尺度及向家坝成库后宜宾合江门（上游航道里程 1 044 km）设计最低通航水位不低于天然等要求，在平衡各方利益的条件下，不考虑河床冲刷下切及浅滩演变的基础上，向家坝水电站应按不低于 1 296 m<sup>3</sup>/s 下泄。

表 6 向家坝最小下泄流量分析 m<sup>3</sup>/s

计算方法	计算值	备注
屏山站最小流量	1 060	屏山站近 20 年最小流量(1995 年 3 月 19—21 日)
	1 200	向家坝水电站初定最小出库流量
屏山站设计流量	1 245	屏山站 98% 保证率流量(1990—2010 年序列)
重点滩险航道核查确定	1 300	满足叙渝段最小维护尺度要求(未考虑冲刷下切及冲淤变化)流量
按宜宾流量保证率法计算	1 397	宜宾流量(P=98%) - 岷江流量(P=98%) - 横江流量(P=98%)
	1 658	宜宾流量(P=98%) - 最小岷江流量 - 最小横江流量
按宜宾流量干支流汇流比分配计算	897	宜宾流量(P=98%) × 汇流比 R <sub>0</sub> (表 2)
	1 296	宜宾流量(P=98%) × 汇流比 R <sub>50</sub> (表 2)
	1 609	宜宾流量(P=98%) × 汇流比 R <sub>100</sub> (表 2)