

长江上游梯级水库群拦沙效果分析

段炎冲,李丹勋*,王兴奎

(清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室,北京 100084)

摘要:水库发挥重要的拦沙作用,改变水库下游的水沙条件。自2003年三峡工程投入运行后,长江上游水利水电工程建设进入高峰期,未来将建成超大规模的水库群,其拦沙作用将急剧改变三峡工程入库泥沙条件。为此,作者对长江上游水库群(含已建、在建、拟建水库)的拦沙效果进行综合分析,预测了三峡入库泥沙量。水库群涉及的水库共计66座(1995年以前建成的水库不计),计算采用基于Brune拦沙率的分组方法,采用1991—2000年实测水沙序列的均值作为输入。结果表明,在2015—2050年期间,水库群拦沙作用突出,三峡入库沙量降至每年约 $6\ 000 \times 10^4$ t,仅为1991—2005年均值的15%左右。

关键词:梯级水库;拦沙率;泥沙;三峡水库

中图分类号:TV145.3

文献标志码:A

Analysis of the Sediment Trapping by Reservoirs in the Upper Yangtze River

DUAN Yanchong, LI Danxun*, WANG Xingkui

(State Key Lab. of Hydrosience and Eng., Tsinghua Univ., Beijing 100084, China)

Abstract: The construction of reservoirs in the upper Yangtze River had reached its peak since 2003 when the Three Gorges Reservoir was putted into operation. This could greatly change the sediment condition of the Three Gorges Reservoir. To study this effect, this study presented the impact of 66 reservoirs (in operation, under construction, or being planned) in the upper Yangtze River on sediment trapping, based on which sediment load into the Three Gorges Reservoir was predicted. The analysis used the measured 1991—2000 hydrologic series as input, and the calculation of trap efficiency was based on the method proposed by Brune. The results indicate that, due to sediment trapping by the reservoirs, sediment load into the Three Gorges Reservoir drastically reduces to 60 million tons per year, accounting for only 15% of the average yearly sediment load during 1991—2005.

Key words: cascade reservoirs; trap efficiency; sediment load; Three Gorges Reservoir

长江西起青藏高原各拉丹东,东至上海,全长超过6 300 km,流域面积达 180×10^4 km²。宜昌以上称为上游,包括金沙江流域、岷江流域、沱江流域、嘉陵江流域、乌江流域及上游干流区,流域面积约 100×10^4 km²。根据规划,未来三峡及上游控制性水库总调库容近 $1\ 000 \times 10^8$ m³[1],如此大规模的梯级水库群将使三峡的入库泥沙条件发生较大程度的改变,影响三峡水库的安全运行和调度。为此,迫切要求对水库群的拦沙作用进行分析,以准确预测三峡入库水沙变化。

从目前关于长江上游梯级水库群拦沙的研究来看,大多针对已建水库群^[2-5]、若干串并联型控制性水库^[6-10]。而对于全流域水库群(已建、在建、拟建水库),由于问题的复杂性,研究相对较少,但也取得了一些成果。府仁寿等^[11]以宜昌站1950年以来水沙资料为基础,研究了三峡工程修建前的水沙变化,对三峡运行初期2003—2012年以及2013年金沙江建成金安桥、溪洛渡、向家坝后的入库沙量进行了分析。冯秀富等^[12]利用回归分析方法对二滩的拦沙量进行计算,在此基础上对二滩上游梯级电站

收稿日期:2015-04-21

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划课题资助(2012BAB04B01)

作者简介:段炎冲(1989—),男,博士生.研究方向:水力学及河流动力学. E-mail: dyc14@mails. tsinghua. edu. cn

*通信联系人 E-mail: lidx@tsinghua. edu. cn

网络出版时间:2015-8-25 16:35:11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/51.1596.T.20150825.1635.002.html>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

及金沙江干流梯级电站建成后三峡入库沙量进行了粗估。李海彬等^[13-14]统计分析了长江上游已建水库拦沙对三峡入库沙量的影响,并依据改进后的 Brune 公式建立了概化模型,考虑近期拟建水库在 2020 年的拦沙效益,对三峡入库沙量作出预测。

目前关于长江上游梯级水库群拦沙的研究还存在对中远期水库考虑不足、拦沙预测时限较短等问题。面对长江上游水电开发的新形势,亟需在前期研究的基础上,优化长江上游梯级水库群拦沙计算方法,将长江上游中长期拟建水库纳入拦沙计算,对长江上游梯级水库群拦沙进行中长期预测,以提高三峡工程调度运行的前瞻性。

基于 Brune^[15]、Vörösmarty^[16] 方法提出水库分组拦沙率,将长江上游已建、在建、中长期拟建水库纳入拦沙计算。通过水库分组及拦沙时段划分,对 2015—2050 年间长江上游梯级水库群拦沙量、三峡入库沙量进行预测。

1 水库建设与规划

1.1 已建水库

1990 年以前,长江上游的水库建设规模相对较小,并且以中小型水库为主,据统计^[17],截止 20 世纪 80 年代末,长江上游建成水库 11 931 座,总库容为 $205 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中大、中、小型水库分别为 13、165、11 753 座,库容依次为 $97.5, 39.6, 67.9 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

1991 年以后,长江上游水库建设则以大型水库为主,其库容占同期兴建水库总库容的 80% 以上。按 2005 年统计^[14],长江上游已建水库 12 994 座,库容累计 $414.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中,大、中、小型水库分别为 28、251、12 715 座,库容依次为 $275.4, 62.3, 76.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。截止 2013 年,长江上游各支流已建的主要水库^[18-19]见表 1。

表 1 长江上游主要已建水库分布情况

Tab.1 Reservoirs in operation in the Upper Yangtze River

流域	已建水库	数量
金沙江	阿海、金安桥、龙开口、鲁地拉	4
雅砻江	锦屏 1 级、官地、大桥、二滩	4
岷江	泸定、龙头石、瀑布沟、深溪沟、龚嘴、铜街子、沙湾、紫坪铺	8
嘉陵江	碧口、宝珠寺、亭子口、金银台、红岩子、新政、马回、金溪场、凤仪场、小龙门、青居、东西关、桐子壕、草街	14
乌江	普定、引子渡、洪家渡、东风、索风营、乌江渡、构皮滩、思林、沙沱、彭水、银盘	11

1.2 在建、拟建水库

自三峡工程建成投产之后,长江上游陆续开发建设诸多大型水库,以 2013 年为时间节点,在建、拟建的主要水库^[18-19]见表 2。按照梯级开发规划,长江上游 80 多座大型水利工程的总库容达 $1 990 \times 10^8 \text{ m}^3$,届时长江上游将形成复杂的水库群分布格局。

表 2 长江上游主要在建、拟建水库分布情况

Tab.1 Reservoirs in construction or being planned in the Upper Yangtze River

流域	在建、拟建水库	数量
金沙江	东就拉、色乌、俄南、白丘、降曲河口、巴塘、王大龙、日冕、虎跳峡、两家人、梨园、观音岩、金沙、银江、乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝	18
雅砻江	仁青岭、格尼、通哈、英达、新龙、贡科、龚坝沟、两河口、牙根、楞古、孟底沟、杨房沟、卡拉、锦屏二级、桐子林	15
岷江	下尔呷、巴拉、达维、卜寺沟、双江口、金川、巴底、丹巴、猴子岩、长河坝、黄金坪、硬梁包、大岗山、老鹰岩、枕头坝、沙坪、安谷	17
嘉陵江	苗家坝、利泽、井口	3
乌江	白马	1

2 研究方法

由于梯级水库群数量众多、空间拓扑结构复杂以及水库运行方式多样,目前采用精确的水沙数学模型进行大范围水库群的拦沙计算还存在困难,而采用 Brune 拦沙率^[15]、Vörösmarty 流域水库群综合拦沙率^[16]等方法可行的估算手段。

2.1 单一水库拦沙率计算

对于单个水库拦沙计算采用 Brune 拦沙率,其计算公式^[15]为:

$$TE = 1 - \frac{0.05}{\sqrt{\Delta\tau}} \quad (1)$$

$$\Delta\tau = \frac{C}{I} \quad (2)$$

其中, TE 表示水库的拦沙率,%; $\Delta\tau$ 为水库滞水系数; C 为水库淤积剩余库容, m^3 ; I 为水库入库径流, m^3 。

Brune 拦沙率公式最早是根据美国 40 余座水库的淤积资料得到,后期在其他国家的水库拦沙计算中发现其依然可以提供较好的拦沙计算结果。采用 Brune 公式对溪洛渡、乌东德水库进行拦沙计算,并与“九五”和“十一五”水沙数学模型计算结

果^[7,20]对比,计算结果吻合较好(表3),拦沙率最大误差仅为2.57%。

表3 单个水库拦沙率计算结果对比

Tab.3 Comparison of sediment trap efficiency by individual reservoir

运行年限/a	溪洛渡水库拦沙率/%		乌东德水库拦沙率/%	
	作者	数模	作者	数模
	建模结果	结果 ^[7]	建模结果	结果 ^[20]
1~10	81.81	82.70	76.35	74.10
11~20	80.25	80.90	74.17	71.60
21~30	78.27	78.50	71.37	69.60
31~40	75.62	75.30	67.60	66.90
41~50	71.88	70.10	62.26	63.10

2.2 梯级水库群拦沙计算

以单一水库 Brune 拦沙计算方法为基础,理论上可以建立梯级水库群拦沙计算方法。为减少运算量、降低复杂程度,研究中常对其进行简化。Vörösmarty(2003年)提出流域水库群综合拦沙率方法^[16],计算公式如下:

$$TE_j = 1 - \frac{0.05}{\sqrt{\Delta\tau_j}} \quad (3)$$

$$\Delta\tau_j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} C_i}{I_{j-mouth}} \quad (4)$$

$$TE_{basin} = \frac{\sum_{j=1}^m TE_j \times I_{j-mouth}}{I_{mouth}} \quad (5)$$

其中: C_i 为第 j 个子流域中第 i 个水库库容, m^3 ; n_j 为第 j 个子流域水库个数; $I_{j-mouth}$ 为第 j 个子流域最末一级入库径流量, m^3 ; $\Delta\tau_j$ 为第 j 个子流域滞水系数; TE_j 为第 j 个子流域拦沙率, %; m 为子流域个数; I_{mouth} 为全流域最末一级入库径流量, m^3 ; TE_{basin} 为全流域水库群拦沙率, %。

Vörösmarty 方法本质上是 Brune 公式在水库群拦沙计算中的简化。但由于该方法将各个子流域的水库群作为一个整体,集中在最末一级水库处进行计算,未考虑各流域内部水库分布与产沙区分布对拦沙计算的影响,其计算相对较为粗糙。

假设某流域上游为弱产沙区,中下游为强产沙区,流域水库群总库容一定的条件下,设定2种水库分布情况:1)绝大部分水库分布在上游,少数水库分布在下游;2)少数水库分布在上游,绝大部分水库分布在中下游。2种情况下,水库群实际拦沙效果存在较大差异,拦沙效果2)大于1)。而

Vörösmarty 方法对2种情况的计算结果相同,无法反映这一差异,与实际情况不符。

鉴于此,提出分组拦沙率,在对水库群分组的基础上进行拦沙计算,以充分考虑水库、强产沙区分布对计算的影响。

分组时遵循以下规则:1)组内各水库空间位置相邻且处于弱产沙区;2)拟建水库分组时投产时间须一致;3)控制性水库原则上列为组内最末一级。

以图1中的水库分组情况(5组)为例,对计算方法进行说明。

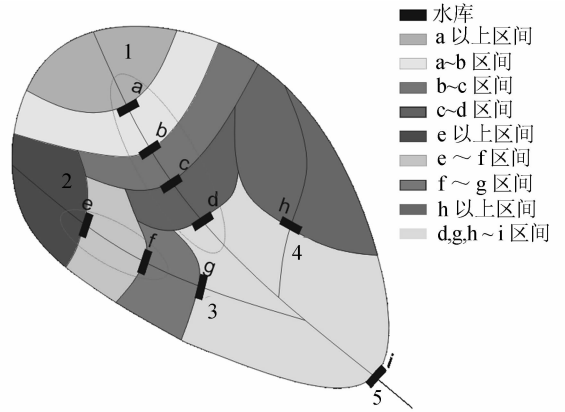


图1 水库分组范例

Fig.1 An example of reservoir grouping

将图1中的水库群按上述原则分为5组后,等价于将其视为5个水库进行计算,在保证计算精度的前提下,简化了运算。各水库组拦沙计算时,与Vörösmarty方法有所类似,即将组内水库集中至最末一级水库处进行计算,各水库组拦沙率计算公式如下:

$$TE_j = 1 - \frac{0.05}{\sqrt{\Delta\tau_j}} \quad (6)$$

$$\Delta\tau_j = \frac{C_j}{I_j} \quad (7)$$

其中: j 为水库组编号; TE_j 为第 j 组水库的拦沙率, %; $\Delta\tau_j$ 为第 j 组水库滞水系数; C_j 为第 j 组水库的淤积剩余库容, m^3 ; I_j 为第 j 组水库最末一级入库径流, m^3 。

由各水库组的拦沙率,结合入库沙量,即可计算拦沙量,计算公式如下:

$$S_j = SY_j \times TE_j \quad (8)$$

其中, S_j 为第 j 组水库的拦沙量, t; SY_j 为第 j 组水库的入库沙量, t; 其他符号同上。

由于上游水库对下游水库的入库沙量存在制约,故需自上至下依次迭代计算各水库组的入库沙量(以上一级水库组的出库沙量加上区间来沙量,

作为下一级水库组的入库沙量)。

以图 1 为例,各水库组的入库沙量计算公式如下:

$$SY_1 = SSY_d \times A_d \quad (9)$$

$$SY_2 = SSY_f \times A_f \quad (10)$$

$$SY_3 = SY_2 \times (1 - TE_2) + SSY_{f-g} \times (A_g - A_f) \quad (11)$$

$$SY_4 = SSY_h \times A_h \quad (12)$$

$$SY_5 = SY_1 \times (1 - TE_1) + SY_3 \times (1 - TE_3) + SY_4 \times (1 - TE_4) + SSY_{d,g,h-i} \times (A_i - A_d - A_g - A_h) \quad (13)$$

其中, $SSY_d, SSY_f, SSY_{f-g}, SSY_h, SSY_{d,g,h-i}$ 分别为 d 以上、f 以上、f-g、h 以上、d、g、h-i 区域的输沙模数, t/km^2 ; A_d, A_f, A_g, A_h, A_i 分别为水库 d、f、g、h、i 的控制流域面积, km^2 ; 其他符号同上。

依据上述方法,采用 1961—1970 年水沙序列对乌东德、白鹤滩水库联合运行后综合拦沙率进行计算,并与其他单位水沙数学模型计算成果^[20]进行对比,与水沙模型结果吻合较好(表 4),拦沙率最大误

差 1.55%。

表 4 乌东德、白鹤滩综合拦沙率计算结果对比

Tab. 4 Comparison of sediment trap efficiency by two reservoirs

运行年限/a	乌东德、白鹤滩联合运行综合拦沙率/%	
	作者建模结果	数模结果 ^[20]
1~10	88.08	88.54
11~20	87.76	87.78
21~30	87.41	86.86
31~40	87.04	86.00
41~50	86.63	85.08

3 计算结果及讨论

3.1 有关参数

3.1.1 水沙序列及参与拦沙计算水库的确定

依据建立的拦沙计算方法进行梯级水库拦沙效果分析的前提是确定合适的水沙序列作为输入条件。对长江上游水文站的水沙数据进行收集分析,其中主要控制站的水沙特征见表 5。

表 5 长江上游主要控制站水沙特征

Tab. 5 Characteristics of runoff and sediment load in the Upper Yangtze River

统计年份	朱沱		寸滩		北碚		武隆	
	径流量/ $10^8 m^3$	输沙量/ $10^8 t$	径流量/ $10^8 m^3$	输沙量/ $10^8 t$	径流量/ $10^8 m^3$	输沙量/ $10^8 t$	径流量/ $10^8 m^3$	输沙量/ $10^8 t$
1990*	2 659	3.150	3 470	4.590	703	1.430	492	0.293
1991—2000	2 669	3.060	3 400	3.550	552	0.466	538	0.289
2001—2013	2 531	1.705	3 260	1.912	630	0.296	427	0.063

注: * 表示从有数据统计年代开始至 1990 年。

可以看出,1991 年以来,长江干流朱沱、寸滩站的径流量较 1990 年以前无明显变化,而输沙量呈减小趋势,尤其是 2001 年以来,减幅更加明显。其中,1991—2000 年朱沱站、寸滩站输沙量较 1990 年以前分别减少 3%、23%;2001—2013 年朱沱站、寸滩站输沙量较 1990 年以前分别减少 46%、58%。

对于嘉陵江的北碚站和乌江的武隆站,径流量虽呈现一定的波动,但输沙量呈现明显的减少趋势。其中,1991—2000 年北碚、武隆站输沙量较 1990 年以前分别减少 67%、1%;2001—2013 年北碚、武隆站输沙量较 1990 年以前分别减少 79%、78%。

总体来看,近 20 多年来,长江上游径流量变化不大,但输沙量呈减小趋势^[21],其中 1991—2000 年期间,输沙量减幅相对较小,而 2001 年以后,由于长江上游大型水库建设进入高峰,水库群巨大的拦沙

作用使得长江上游的输沙量大幅度锐减。

基于长江上游水沙特征,并考虑到长江上游中小型水库大多建于 1990 年以前,作者拟采用 1991—2000 年水沙序列的均值进行拦沙计算,近似认为该均值反映的是 1995 年的水沙状况,故假定该均值已充分考虑到 1995 年前建成水库(主要为中小型水库)的拦沙作用。

在确定 1991—2000 年水沙序列的基础上,结合长江上游水库规划,对 1995 年前建成的水库以及位于弱产沙区(金沙江上游、雅砻江上游)的水库进行剔除,最终确定本次参与拦沙计算水库共计 66 座,水库资料主要来自《中国电力规划》^[18]、《中国水力发电年鉴》^[22],基本参数见表 6,水库空间分布如图 2 所示。

表6 水库基本参数
Tab.6 Major parameters of the reservoirs

电站	库容/ 10 ⁸ m ³	控制流域 面积/10 ⁴ km ²	电站	库容/ 10 ⁸ m ³	控制流域 面积/10 ⁴ km ²	电站	库容/ 10 ⁸ m ³	控制流域 面积/10 ⁴ km ²
虎跳峡	374.00	21.84	达维	1.85	1.66	亭子口	40.67	6.26
梨园	8.91	22.01	卜寺沟	2.46	1.73	金银台	1.68	6.77
阿海	8.85	23.54	双江口	31.15	3.93	红岩子	3.55	6.88
金安桥	6.63	23.74	金川	5.30	4.00	新政	3.40	6.94
龙开口	5.58	23.97	巴底	13.20	4.24	金溪场	4.60	7.34
鲁地拉	17.18	24.73	丹巴	15.40	4.55	凤仪场	4.16	7.47
观音岩	22.40	25.65	猴子岩	11.20	5.42	小龙门	2.40	7.58
乌东德	76.00	40.61	长河坝	10.75	5.66	青居	1.17	7.68
白鹤滩	206.00	43.03	黄金坪	1.54	5.70	桐子壕	0.99	7.89
溪洛渡	121.00	45.44	泸定	2.20	5.89	利泽	4.87	8.11
向家坝	51.63	45.88	大岗山	7.42	6.27	草街	22.18	15.60
两河口	101.54	6.57	龙头石	1.39	6.30	井口	11.34	15.62
牙根	7.96	7.10	老鹰岩	2.52	6.48	引子渡	5.27	0.64
楞古	2.19	7.75	瀑布沟	53.37	6.85	洪家渡	49.47	0.99
孟底沟	8.68	7.96	枕头坝1	0.47	7.31	东风	10.25	1.82
杨房沟	5.27	8.08	枕头坝2	0.32	7.31	索风营	2.01	2.19
卡拉	3.58	8.19	沙坪	1.00	7.50	构皮滩	55.64	4.33
锦屏1	77.60	10.26	沙湾	0.49	7.65	思林	15.93	4.86
官地	7.60	11.01	安谷	0.63	7.67	沙沱	6.31	5.45
二滩	58.00	11.64	紫坪铺	11.12	2.27	彭水	14.65	6.90
下尔呷	28.00	1.55	苗家坝	3.12	1.63	银盘	3.20	7.49
巴拉	4.00	1.58	宝珠寺	25.50	2.84	白马	3.74	8.37

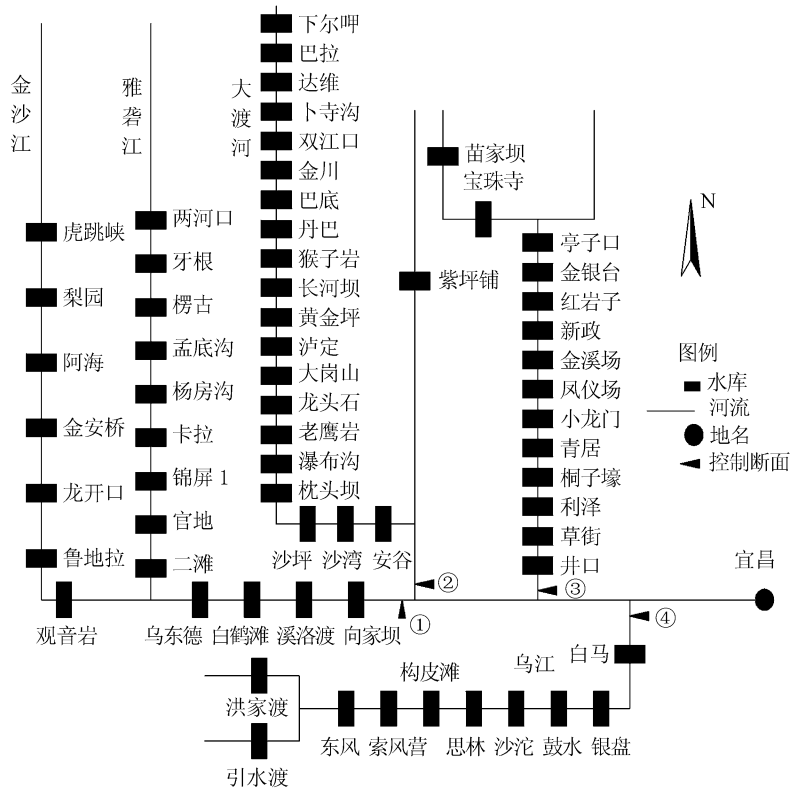


图2 长江上游水库分布示意图

Fig.2 Major reservoirs in the Upper Yangtze River

3.1.2 计算时段划分及水库分组

梯级水库群投产时间具有离散性,其划分的拦沙计算时段往往较多,增加了拦沙计算的复杂程度。考虑到拟建水库的投产时间由于科研、设计、施工等方面的不确定性可能提前或延后 1~3 a,为方便计算,作者对部分拟建水库的投产时间在 1~3 a 内进行调整,划分了计算时段并对各时段内的水库进行分组,见表 7。

表 7 计算时段划分及水库分组情况

Tab.7 Calculation period and grouping of reservoirs

流域	计算时段/年	编号	水库
金沙江	2015—2019	①	梨园、阿海、金安桥、龙开口、鲁地拉、观音岩
		②	锦屏一级、官地、二滩
		③	溪洛渡
		④	向家坝
	2020—2024	①	梨园、阿海、金安桥、龙开口、鲁地拉、观音岩
		②	两河口、牙根、楞古、孟底沟、杨房沟、卡拉、锦屏 1、官地、二滩
		③	乌东德
		④	溪洛渡
		⑤	向家坝
	2025—2050	①	梨园、阿海、金安桥、龙开口、鲁地拉、观音岩
		②	两河口、牙根、楞古、孟底沟、杨房沟、卡拉、锦屏 1、官地、二滩
		③	乌东德
④		白鹤滩	
⑤		溪洛渡	
⑥		向家坝	
岷江	2015—2019	①	金川、巴底、丹巴、泸定、大岗山、龙头石、老鹰岩、瀑布沟、枕头坝、沙坪、沙湾、安谷
		②	紫坪铺
	2020—2050	①	下尔呷、巴拉、达维、卜寺沟、双江口、金川、巴底、丹巴、猴子岩、长河坝、黄金坪、泸定、大岗山、龙头石、老鹰岩、瀑布沟、枕头坝、沙坪、沙湾、安谷
		②	紫坪铺
		①	苗家坝、宝珠寺
		②	亭子口
嘉陵江	2015—2050	③	金银台、红岩子、新政、金溪场、凤仪场、小龙门、青居、桐子壕、利泽
		④	草街、井口
		①	引子渡、洪家渡、东风、索风营、构皮滩
		②	思林、沙陀、彭水、银盘
乌江	2020—2050	①	引子渡、洪家渡、东风、索风营、构皮滩
		②	思林、沙陀、彭水、银盘
		③	白马

3.1.3 各计算时段初始条件

各计算时段的初始条件包括 4 个基本参数,分别为:水库组淤积剩余总库容 C ,水库组控制流域面积 A ,水库组最末一级入库径流量 I 和区间输沙模数 SSY (由水文站水沙数据差值、反推得到),见表 8。各时段淤积剩余总库容 C 需在前一时段计算结束后方能确定,故在此不再将库容参数列出。

表 8 各计算时段初始条件

Tab.8 Initial conditions in each calculation period

流域	拦沙计算时段	水库组编号	控制流域面积 A / (10^4 km^2)	径流量 I / (10^8 m^3)	区间	区间输沙模数 SSY / ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$)
金沙江	2015—2019	①	25.65	599	—①*	255
		②	11.64	534	—②	435
		③	45.44	1 497	①、②—③	2 165
		④	45.88	1 511	③—④	643
	2020—2024	①	25.65	599	—①	255
		②	11.64	534	—②	435
		③	40.61	1 209	①、②—③	2 938
		④	45.44	1 497	③—④	1 632
		⑤	45.88	1 511	④—⑤	643
	2025—2050	①	25.65	599	—①	255
		②	11.64	534	—②	435
		③	40.61	1 209	①、②—③	2 938
④		43.03	1 337	③—④	526	
⑤		45.44	1 497	④—⑤	2 742	
⑥		45.88	1 511	⑤—⑥	643	
岷江	2015—2019	①	7.67	478	—①	251
		②	2.27	87	—②	158
	2020—2050	①	7.67	478	—①	251
		②	2.27	87	—②	158
嘉陵江	2015—2050	①	2.84	79	—①	197
		②	6.26	152	①—②	512
		③	8.11	206	②—③	-197**
		④	15.62	559	③—④	362
乌江	2015—2019	①	4.33	246	—①	79
		②	7.49	482	①—②	615
		2020—2050	①	4.33	246	—①
②	7.49		482	①—②	615	
		③	8.37	543	②—③	741

注: * 表示从河流最上端到该组, ** 负数是由该区间已建水库的泥沙淤积导致。

3.2 梯级水库群拦沙量

依据建立的梯级水库群拦沙计算方法,对长江上游梯级水库群分流域、分时段进行拦沙计算,结果如图3所示。

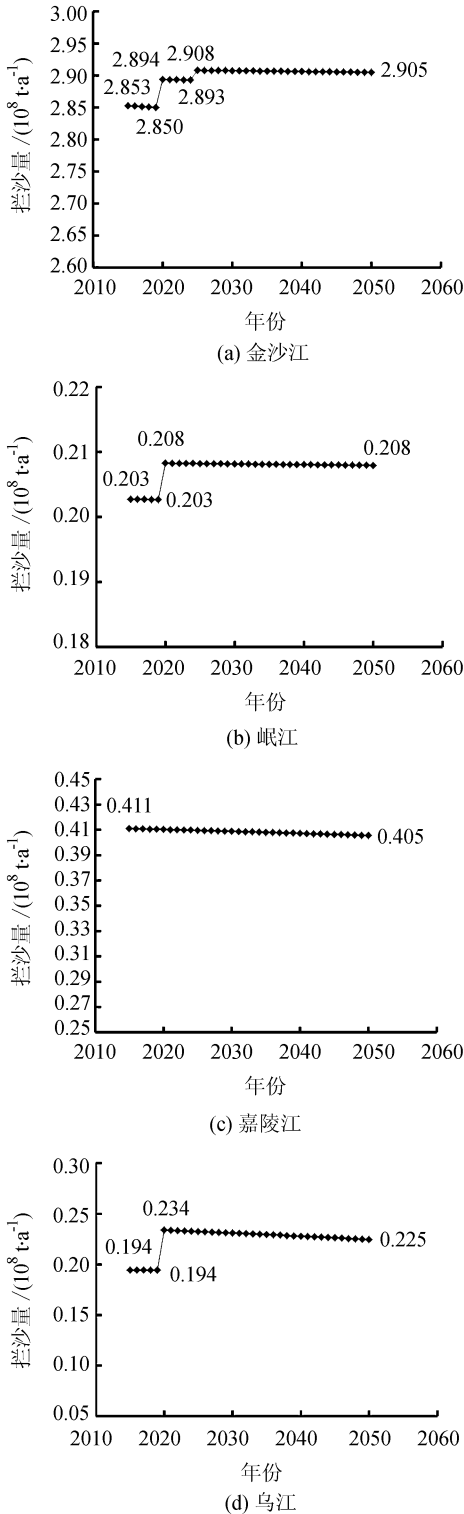


图3 各支流 2015—2050 年拦沙量年际变化

Fig. 3 Annual sediment trapping by reservoirs in sub-basins

从图3可以看出,2015—2050年,金沙江、岷江、乌江的水库拦沙量随着水库的兴建呈现阶梯式上升,嘉陵江则由于未有新建水库而呈下降趋势。同时,长江上游梯级水库群拦沙量以金沙江为主,约占80%。这是由于金沙江输沙量占宜昌站的70.6%^[23],同时诸多大型水库均位于该流域,拦截了该流域95%以上的泥沙。需要指出的是,由于水库建设情况的差异,各支流拦沙量跃变年份有所不同。

为反映长江上游梯级水库群的总体拦沙效果,将各支流拦沙量进行加和,得到长江上游梯级水库群总拦沙量变化趋势,见图4。可以看出,2015—2050年,水库群拦沙量维持在 3.65×10^8 t/a以上,2019年达到最小值(3.657×10^8 t/a),至2025年,即水库全部投产时,达到最大值(3.758×10^8 t/a)。

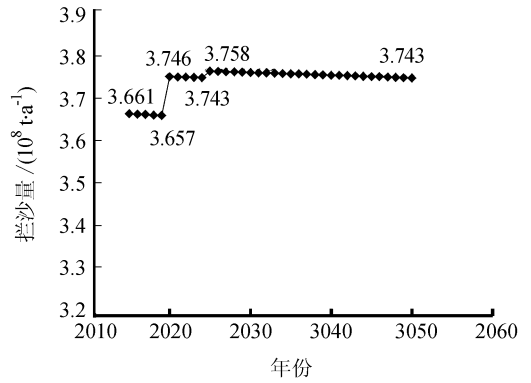


图4 长江上游 2015—2050 年总拦沙量年际变化

Fig. 4 Annual sediment trapping by reservoirs in the Upper Yangtze River basin

3.3 三峡入库沙量

假设不考虑梯级水库拦沙对川江河段造成冲刷而引起的输沙补给,以及计算年限内流域内水土保持等减沙作用,对三峡的入库沙量进行计算,结果见图5。

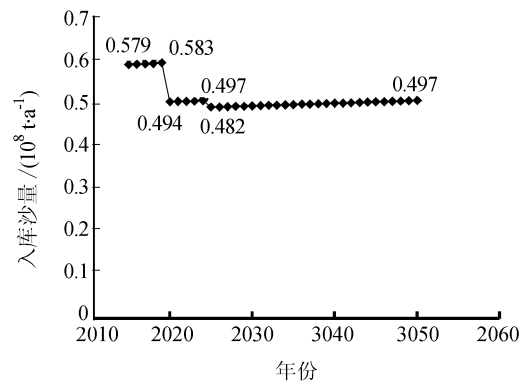


图5 三峡 2015—2050 年入库沙量年际变化

Fig. 5 Annual sediment load into the Three Gorges Reservoir

由于梯级水库群的拦沙作用,三峡 2015—2050 年入库沙量降至 $0.6 \times 10^8 \text{ t/a}$ 以下,约为论证期间入库沙量($5.29 \times 10^8 \text{ t/a}$)^[24] 的 10%,仅为 1991—2005 年入库沙量的 14%~17%。文献[14]成果在考虑近期拟建水库作用的前提下,得到三峡 2020 年的入库沙量为 $0.9 \times 10^8 \text{ t/a}$ 。作者建模结果仅为该结果的 55%,其中的差异与研究中考虑的水库数量不同有关,而具体原因还有待进一步分析。

4 结 论

对 2015—2050 年长江上游梯级水库群的拦沙效果及其对三峡入库沙量的影响进行研究,主要结论如下:

1) 由于金沙江流域建有大型水库,在 2015—2050 年间,金沙江流域水库群拦沙率达到 95% 以上,拦沙量占长江上游梯级水库群总拦沙量的 80%。

2) 若以 2015、2025 年(水库全部投产)、2050 年为时间节点进行统计,长江上游水库群拦沙量分别为 3.66、3.76、 $3.74 \times 10^8 \text{ t/a}$,相应三峡入库沙量分别为 0.58、0.48、 $0.50 \times 10^8 \text{ t/a}$ 。三峡入库沙量仅为 1991—2005 年的 14%~17%。同时从数据的变化趋势来看,上游梯级水库群对三峡入库沙量有着长期的显著影响。

由于建立的计算方法相对较为概化,计算中也未考虑水库群水沙调度和运行方式对拦沙量的影响,因此所得结果的可靠性尚待进一步检验。在未来的研究中,需要进一步改进模型并综合探究多种影响,对长江上游梯级水库群拦沙计算进行优化,使结果更加客观、准确。

参考文献:

[1] Liu Danya. Study on comprehensive water resources utilization and operation of reservoir group in upper Yangtze River and TGP[J]. Yangtze River, 2010, 41(15): 5-9. [刘丹雅. 三峡及长江上游水库群水资源综合利用调度研究[J]. 人民长江, 2010, 41(15): 5-9.]

[2] Chen Jiayang. The effect of sediment and reservoirs of the mainstream and tributaries of the upper reaches of the Yangtze River on the reach around Chongqing port[J]. Journal of Chengdu University of Science and Technology, 1990(1): 53-59. [陈家扬. 长江上游干、支流泥沙及水库对重庆港河段影响[J]. 成都科技大学学报, 1990(1): 53-59.]

[3] Shi Guoyu, Chen Xianwei, Ye Min. Discussion about the sediment trapping by constructed reservoirs in the upper Yangtze River and the influence on sediment income of the TGD[J]. Yangtze River, 1992, 23(5): 23-28. [石国钰, 陈显维, 叶敏. 长江上游已建水库群拦沙对三峡水库入库站沙量影响的探讨[J]. 人民长江, 1992, 23(5): 23-28.]

[4] Zhang Xinbao, Wen Anbang, Wallong D E, et al. Effects of large-scale hydropower reservoirs on sediment loads in Upper Yangtze River and its major tributaries[J]. Journal of Sediment Research, 2011(8): 59-66. [张信宝, 王安邦, Walling D E, 等. 大型水库对长江上游主要干支河流输沙量的影响[J]. 泥沙研究, 2011(8): 59-66.]

[5] Yang X, Lu X. Estimate of cumulative sediment trapping by multiple reservoirs in large river basins: An example of the Yangtze River basin[J]. Geomorphology, 2014, 227: 49-59.

[6] Changjiang River Scientific Research Institute. The report about the sedimentation of the TGD by one-dimensional calculation method after Xiangjiaba and Xiluodu were constructed[R]. Summary of the achievements about the sediment problem of the TGD during the ninth-five year plan. 1998. [长江科学院. 向家坝及溪洛渡水库修建后三峡水库淤积一维数模计算报告[R]. 三峡工程泥沙问题研究九五成果汇编. 1998.]

[7] China Institute of Water Resources and Hydropower Research. The influence of Xiangjiaba and Xiluodu on the TGD sedimentation [R]. Summary of the achievements about the sediment problem of the TGD during the ninth-five year plan. 1998. [中国水利水电科学研究院. 向家坝和溪洛渡水库对三峡水库泥沙淤积的影响[R]. 三峡工程泥沙问题研究九五成果汇编. 1998.]

[8] Hu Yanfen, Wu Weimin, Chen Zhenhong. Reservoir sediment computation of Xiangjiaba hydropower plant [J]. Yangtze River, 2003, 34(4): 36-48. [胡艳芬, 吴卫民, 陈振红. 向家坝水电站泥沙淤积计算[J]. 人民长江, 2003, 34(4): 36-48.]

[9] Huang Renyong, Tan Guangming, Fan Beilin. Mathematical modeling of sedimentation for joint operation of cascade reservoirs in the upper Yangtze reaches [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(6): 143-148. [黄仁

- 勇,谈广鸣,范北林.长江上游梯级水库联合调度泥沙数学模型研究[J].水力发电学报,2012,31(6):143-148.]
- [10] Huang Yuling, Huang Yue, Liang Qirong. Analysis of the sediment deposition of the TGD by constructed reservoirs in the upper Yangtze River[J]. Yangtze River, 1992, 23(11):37-41. [黄煜龄,黄悦,梁栖蓉.长江上游干支流修建水库对三峡淤积影响初步分析[J].人民长江,1992,23(11):37-41]
- [11] Fu Renshou, Qi Meilan, Fang Hongwei, et al. Incoming runoff and sediment runoff to Yichang hydrometric station affected by the projects on the upstream of Yangtze River [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(6):103-118. [府仁寿,齐梅兰,方红卫,等.长江上游工程对宜昌来水来沙变化的影响[J].水力发电学报,2006,25(6):103-118.]
- [12] Feng Xiufu, Yang Qingyuan, Zhang Ouyang, et al. Sediment trap of ertan reservoir and its effect on sediment budget of Jinsha River[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2008, 40(6):37-42. [冯秀富,杨青远,张欧阳,等.二滩水库拦沙作用及其对金沙江流域水沙变化的影响[J].四川大学学报:工程科学版,2008,40(6):37-42.]
- [13] Li Haibin, Zhang Xiaofeng, Xu Quanxi. Analysis and prediction of sediment trapped by large-scale reservoir group on upstream of Three Gorges Dam[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(5):604-607. [李海彬,张小峰,许全喜.长江三峡上游大型水库群拦沙效应预测[J].武汉大学学报:工学版,2011,44(5):604-607.]
- [14] Li Haibin, Zhang Xiaofeng, Hu Chunhong, et al. Impact of cascade reservoirs construction in the upper Yangtze River on sediment inflow to Three Gorges reservoir[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(1):94-100. [李海彬,张小峰,胡春宏,等.三峡入库沙量变化趋势及上游建库影响[J].水力发电学报,2011,30(1):94-100.]
- [15] Brune G M. Trap efficiency of reservoirs[J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 1953, 34(3):407-418.
- [16] Vörösmarty C J, Meybeck M, Fekete B, et al. Anthropogenic sediment retention: Major global impact from registered river impoundments [J]. Global and Planetary Change, 2003, 39(1/2):169-190.
- [17] Xu Jiongxin. Recent variation in water and sediment in relation with reservoir construction in the upper Changjiang River basin [J]. Journal of Mountain Science, 2009, 27(4):385-393. [许炯心.长江上游干支流近期水沙变化及其与水库修建的关系[J].山地学报,2009,27(4):385-393.]
- [18] 中国电力规划组.中国电力规划[M].北京:水利电力出版社,2005.
- [19] Tian Yu. Research on complicated reservoirs joint operation technology of upper reach of Yangtze River basin [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. [田雨.长江上游复杂水库群联合调度技术研究[D].天津:天津大学,2012.]
- [20] 李丹勋,毛继新,杨胜发,等.三峡水库上游来水来沙变化趋势研究[M].北京:科学出版社,2010.
- [21] Liu Tonghuan, Lin Qiusheng, Yao Shiming. Analysis of Three Gorges Reservoir water-sediment and the period of change of temporal series of annual runoff [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2011, 43(1):58-63. [刘同宦,蔺秋生,姚仕明.三峡工程蓄水前后进出库水沙特性及径流量时间序列变化周期分析[J].四川大学学报:工程科学版,2011,43(1):58-63.]
- [22] 邴凤山,毛亚杰,黄景湖,等.中国水力发电年鉴[M].北京:中国电力出版社,2004.
- [23] Chen Songsheng, Zhang Ouyang, Chen Zefang, et al. Variations of runoff and sediment load of the Jinsha River [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(4):475-482. [陈松生,张欧阳,陈泽方,等.金沙江流域不同区域水沙变化特征及原因分析[J].水科学进展,2008,19(4):475-482.]
- [24] Zhou Jianjun. Discussion on the sediment load for the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(1):16-24. [周建军.关于三峡水库入库泥沙条件的讨论[J].水力发电学报,2005,24(1):16-24.]