

乌江流域水库拦沙及其减沙作用研究

袁晶, 陈薇薇, 杨成刚, 熊明*

长江水利委员会水文局, 湖北 武汉

收稿日期: 2022年5月1日; 录用日期: 2022年6月13日; 发布日期: 2022年6月29日

摘要

乌江作为三峡入库水沙的重要控制站, 水库拦沙对其流域输沙的影响, 直接关系到三峡入库水沙条件的变化。为了系统掌握乌江流域水库拦沙情况, 基于1956年以来流域内水库及实测水沙资料, 采用经验公式、典型调查以及输沙平衡原理相结合的方法, 对近60年不同阶段乌江流域的水库拦沙情况以及水库建设对乌江流域减沙贡献权重进行了定量研究。结果表明: 1956~2015年, 乌江流域水库年均拦沙1347万t, 大型水库拦沙量占总拦沙量的83%, 其中1956~1990、1991~2005、2006~2015年水库拦沙对乌江武隆站的减沙权重分别为14%、45%和72%, 可见水库拦沙作用逐步增强; 1991~2005年对武隆站减沙造成影响的主要分布在乌江中游的乌江渡和东风水库, 2006~2015年则主要分布在乌江中下游干流的构皮滩、思林、沙陀和彭水等水库。

关键词

水沙关系, 水库拦沙, 减沙权重, 乌江

Study on Sediment Retention and Reduction of Reservoirs in Wujiang River Basin

Jing Yuan, Weiwei Chen, Chenggang Yang, Ming Xiong*

Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan Hubei

Received: May 1st, 2022; accepted: Jun. 13th, 2022; published: Jun. 29th, 2022

Abstract

As an important control station of flow and sediment into the Three Gorges Reservoir (TGR), the influence of reservoir trapping in the Wujiang River has a great influence on the condition of the inflow and sediment of the TGR. To complete understanding of the situation of reservoir trapping in the Wujiang

作者简介: 袁晶(1979-), 女, 湖北潜江人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事水文泥沙及河床演变方面的分析, Email: 13471654@qq.com
*通讯作者 Email: 863551158@qq.com

River basin, the reservoir silting situation in the recent 60 years and the contribution weight of reservoir trapping to sediment reduction were studied quantitatively based on the observed flow and sediment data from 1956, and the empirical formulas using typical investigations and the principle of sediment transport balance. The results indicated that the average annual sediment interception capacity of reservoirs was 13.47 million tons from 1956 to 2015, and the sediment interception capacity of large reservoirs accounted for 83% of the total sediment interception capacity. In which the contribution weight of reservoir trapping to the sediment reduction at Wulong station from 1956 to 1990, 1991 to 2005, and 2006 to 2015 was 14%, 45% and 72%, respectively, it is apparent that the effect of reservoir trapping increased gradually. The sediment reduction at Wulong station were mainly affected by the Wujiangdu and Dongfeng reservoirs from 1991 to 2005, and were mainly distributed in Goupitan, Silin, Shatuo and Pengshui reservoirs in the middle and lower reaches of Wujiang River from 2006 to 2015.

Keywords

Flow and Sediment Relationship, Reservoir Trapping, Sediment Reduction Weight, Wujiang River

Copyright © 2022 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

乌江是长江上游右岸最大的支流，也是我国重要的水电能源基地，乌江流域的大型水电资源开发为贵州、重庆及全国经济建设发挥着重要作用。这些工程在除害兴利、发展生产、改善生态环境等方面发挥了积极作用，但随着水电开发力度的不断加大，大部分泥沙被拦截在水库内，其对流域水沙系统造成的影响日益突出，且对流域输沙的影响远大于其对径流的影响[1]。多年来，许多专家学者对长江流域的水沙变化及水库拦沙的影响开展了较多的研究工作，取得了十分丰富的研究成果。主要可以归纳为三个方面：

1) 水文泥沙特性及其影响因素分析、人类活动对流域内输沙量变化的影响研究以及水库拦沙及其对流域内的减沙作用研究。其中，在水文泥沙特性分析方面，熊明[2]、王延贵[3]对长江上游水沙变化的影响因素进行了分析，许全喜等[4]对长江上游近期水沙变化特点及趋势进行了研究，吴晓玲[5]、邵骏[6]等对乌江流域的水沙变化及成因进行了分析计算。

2) 在针对人类活动对流域内输沙量变化的影响方面，姚文艺[7]、Yu [8]等采用实测资料分析了大坝等人类活动对埃布罗河、黄河等流域内水沙输移的影响；杜俊[9]等利用双累积曲线和经验统计模型对长江上游主要站点 1956~2007 年水沙序列进行分期分析，并对各时期人为减沙因素做了定量估算；曹亚丽[10]等利用 MIKE11 模型对乌江干流水电梯级开发对水文情势累积影响进行了分析。

3) 针对长江流域内水库拦沙及减沙作用研究方面，主要有两类研究成果，一是通过典型调查和实测资料整理，估算水库的拦沙量[11] [12] [13] [14]，如王延贵等[11]引入流域水库调控系数、来沙系数和输沙模数等参数，深入研究修建水库对长江干支流输沙变化态势的影响，特别是对干支流输沙量的作用。如冯秀富等[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及金沙江干流梯级电站建成后三峡入库沙量进行了粗略估计；李海彬等[14]分析了长江上游已建水库拦沙对三峡入库沙量的影响，此类研究成果是基于 2005 年以前的资料开展，然而 2005 年以后，即 2006~2015 年乌江流域新建水库的库容是 1956~2005 年水库总库容的 1.6 倍，已有研究成果尚不足以反映现状水库的拦沙、减沙效应；另一类研究成果，则主要借助于一维水沙数学模型，采用流域内相关规划资料，对水库拦沙对流域内的输沙影响开展预测计算，如段炎冲[15]等对长江上游水库群(含已建、在建、拟建水库)的拦沙效果进行综合分析；李海彬等[16]在系统分析三峡上游已建大型水库拦沙作用的基础上，预测了在建及拟建大型水库运行后三峡上游大型水库的拦沙效应。实测资料表明，这类结果的预测略显保守。

综上所述，在长江流域水沙变化特性及影响因素方面，目前基本有一个较为清晰的认识，对流域内输沙量变化的主要影响因素较为明确，然而，至于各影响因素对流域减沙的贡献权重问题，已有研究大多停留在定性分析的基础上，针对水库拦沙作用的定量研究较少，特别是 2006 年以来，乌江下游梯级水电站陆续建成运用后，对三峡入库的武隆站带来了新的影响，已有研究成果尚不足以反映现状水库的拦沙、减沙效应。

因此，研究乌江流域水库拦沙及其对武隆站的减沙作用，对分析三峡水库来水来沙条件的变化，具有重要意义。本文利用乌江流域主要控制站近 60 年的水沙实测资料序列，在全面整理流域内水库基本情况的基础上，采用典型调查、由点至面的方法，采用实测资料和经验公式的计算手段，定量分析计算了流域内截至 2015 年已建 1422 座水库在不同阶段的淤积率及淤积量，并研究了不同阶段水库拦沙对武隆站输沙量减小的贡献权重。

2. 乌江流域水库建设

乌江是长江右岸最大的支流，集中落差 2143 m，水能资源开发条件十分优越，是国家规划的 12 个水电基地之一。1956~2015 年乌江流域已建大、中、小型水库 1422 座，总库容 275.31 亿 m³ (见图 1 和表 1)。其中：大型水库 21 座，库容 239.33 亿 m³，占总库容的 87%；中型水库 77 座，库容 24.32 亿 m³，占总库容的 9%；小型水库 1324 座，库容 11.66 亿 m³，占总库容的 4%，可见各个阶段的水库建设均以大型水库为主，各大型水库所在位置及基本情况见图 2 和表 2 所示。

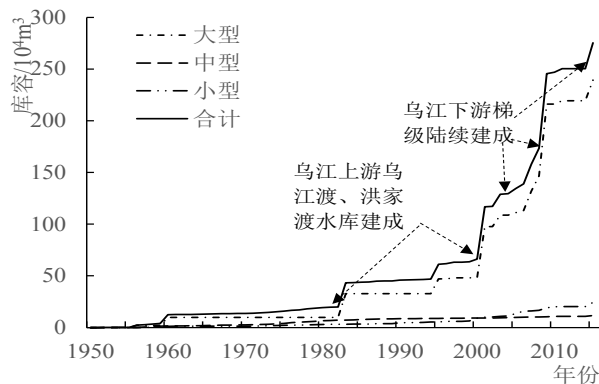


Figure 1. Accumulative diagram of reservoir capacity change in the Wujiang River basin since 1956

图 1. 1956 年以来乌江流域水库库容变化累计图

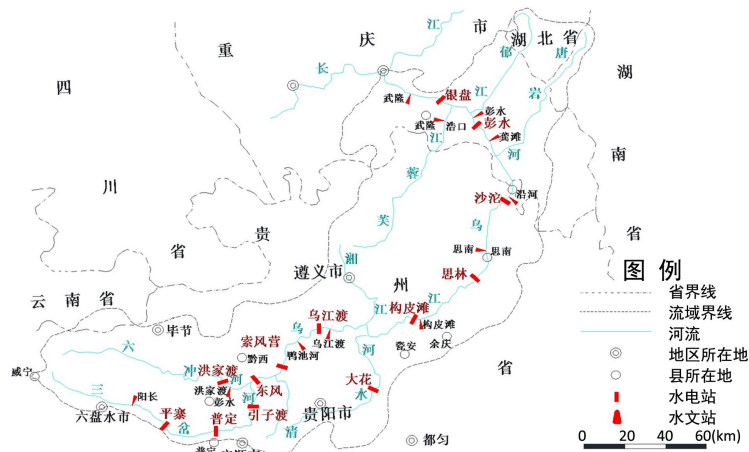


Figure 2. Schematic map of typical sediment reservoirs in the Wujiang River basin

图 2. 乌江流域典型拦沙水库分布示意图

Table 1. The statistics of the reservoirs in the Wujiang River basin (from 1956 to 2015)

表 1. 乌江流域已建水库统计(1956~2015)

时段	大型		中型		小型		水库群合计	
	数量(座)	总库容(亿 m ³)	数量(座)	总库容(亿 m ³)	数量(座)	总库容(亿 m ³)	数量(座)	总库容(亿 m ³)
1956~1990	3	32.74	21	4.59	1110	8.54	1134	45.86
1991~2005	8	78.43	25	9.06	132	1.22	165	88.71
2006~2015	10	128.16	31	10.68	82	1.90	123	140.74
1950~2015	21	239.33	77	24.32	1324	11.66	1422	275.31

Table 2. Construction situation of large reservoirs in the Wujiang River basin

表 2. 乌江流域大型水电站建设情况

水库名称	水库位置	建成年份	所在河流	坝址控制流域面积(km ²)	总库容(亿 m ³)
百花湖	贵州省清镇市	1956	乌江·猫跳河	1895	2.208
红枫湖	贵州省清镇市	1960	乌江·猫跳河	1596	7.529
乌江渡	贵州省遵义县	1979	乌江干流	27,790	23
东风	贵州省清镇市	1993	乌江干流	18,161	10.25
普定	贵州省普定县	1995	乌江·三岔河	5871	3.99
大河口	重庆市酉阳县	1997	乌江·濯河	4619	1.15
洪家渡	贵州省黔西县	2001	乌江·六冲河	9900	49.47
江口	重庆市武隆县	2003	乌江·芙蓉江	7740	5.86
引子渡	贵州省平坝、织金	2003	乌江·三岔河	6422	5.29
鱼塘	贵州省道真县	2005	乌江·芙蓉江	5335	1.213
朝阳寺	湖北省咸丰县	2005	乌江·濯河	2452	1.205
索风营	贵州省黔西、修文	2006	乌江干流	21,862	2.012
大花	贵州省开阳县	2007	乌江·清水江	4328	2.765
思林	贵州省思南县	2007	乌江干流	48,558	15.93
彭水	重庆市彭水县	2008	乌江干流	69,000	14.65
金家坝	重庆市酉阳县	2009	乌江·甘龙河	1059	1.581
石埡子	贵州省务川县	2009	乌江·洪渡河	2589	3.492
构皮滩	贵州省余庆县	2009	乌江干流	43,250	64.54
银盘	重庆市武隆县	2011	乌江干流	74,910	3.2
沙坨	贵州省沿河县	2013	乌江干流	54,508	9.1
平寨	贵州省六枝区	2016	乌江·三岔河	3492	10.89

3. 乌江流域水沙变化特性

3.1. 乌江水沙变化特性

乌江渡水电站是乌江干流上第一座大型水电站，其中一号、二号机组已分别于 1979 年、1981 年发电，于 1982 年 12 月 4 日全部建成，该电站蓄水对乌江下游水沙特性影响较大。2006 年以来，乌江下游梯级水电站陆续建成运用，进一步影响了乌江下游的水沙特性变化。分析表明：1956~1979、1980~2005、2006~2016 年乌江干流主要控制站的径流有所减小，但减幅不大，每个时间段减小幅度基本在 10% 以内，然而，水电工程的建设对河段内的输沙量产生了较为显著的影响，2006~2016 年鸭池河、乌江渡、思南和乌江站的输沙量仅分别为 0.35、0.37、118、357 万 t，较 1956~1979 年输沙量的减幅均达到 90% 以上，较 1980~2005 年平均输沙量的减幅也达到 70% 以上，见图 3 所示。

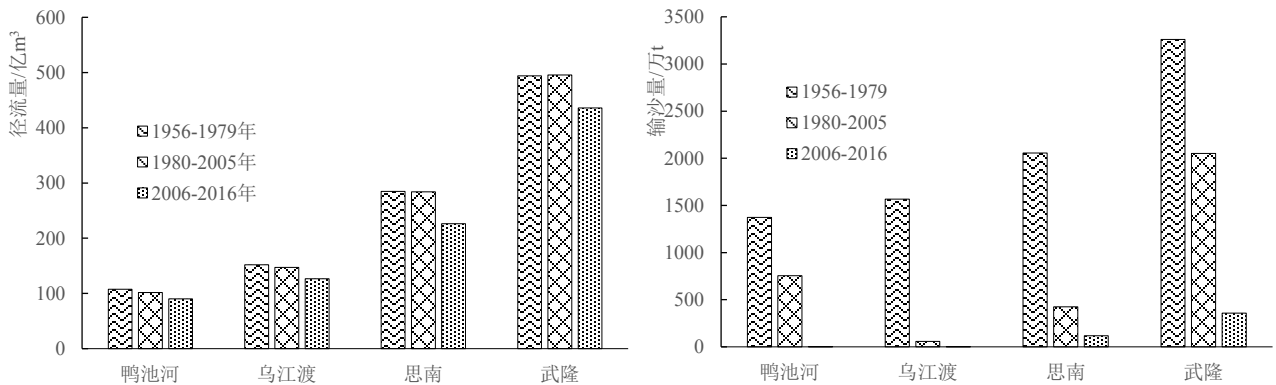


Figure 3. Variation of flow and sediment change of the main stream of Wujiang River basin

图 3. 乌江干流主要控制站水沙变化

3.2. 水沙地区组成及其变化

根据乌江流域各站多年水沙资料统计分析，乌江渡以上地区、乌江渡 - 思南区间和下游地区来水量分别占武隆站的 30%、26% 和 44%；沙量则主要来自乌江渡以上地区和下游地区，其输沙量分别占武隆站的 30% 和 54%，乌江渡 - 思南区间来沙量较小，仅占 16%。随着流域内水电工程的大力建设，特别是乌江渡水电站于 1980 年正式蓄水，导致水沙地区分布发生明显变化，主要表现为：乌江渡以上地区输沙量所占比例大幅度减小，由 48% 减小至 2%；乌江渡 - 思南区间输沙量变化不大，下游地区输沙量虽没有发生明显的变化，但由于武隆站同期输沙量大幅减小，其占武隆站输沙量的比例由 37% 增大至 78%，见图 4。

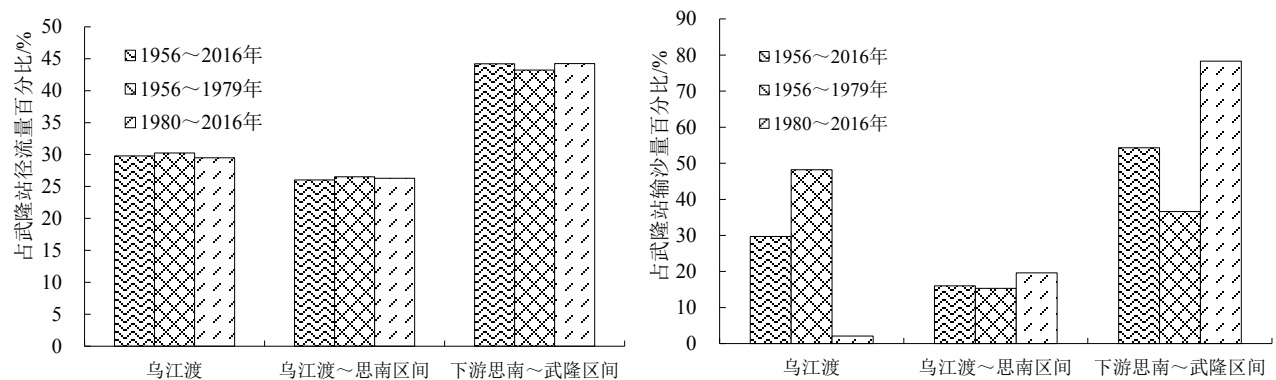


Figure 4. Composition of the inflow and sediment in Wujiang River basin

图 4. 乌江流域来水来沙组成变化

3.3. 水沙关系变化

为研究乌江流域水沙关系的变化情况, 点绘乌江干流主要控制站乌江渡、思南和武隆站的径流量、输沙量的水沙相关关系(见图 5, 图 6)。从图中可以看出: 思南和武隆站近期水沙关系均发生了明显变化, 同径流量条件下沙量减小明显。具体表现为:

1) 乌江渡和思南站均受乌江渡电站拦沙作用影响, 1980 年后年径流量没有发生明显的变化, 但输沙量减小明显, 1981~2016 年乌江渡和思南站的径流量较 1956~1980 均值均偏小 7%, 输沙量则分别减小 98%和 84%, 特别是近 10 余年来, 乌江渡站的输沙量不足 0.5 万 t/年, 由于河床的冲刷补给作用, 位于乌江渡下游的思南站近 10 年的输沙量为 120 万 t, 减幅稍小于位于其上游的乌江渡站。

2) 受 1990 年后上游来沙大幅减小的影响, 武隆站同径流量条件下输沙量减小也较为明显, 相应年径流量-输沙量关系发生了显著变化, 同径流量下输沙量大幅度减小, 特别是 2007 年乌江下游思林、彭水等水电站建成后, 水沙关系进一步变化, 主要表现为径流量变化不大, 年均输沙量进一步减小至 280 万 t。

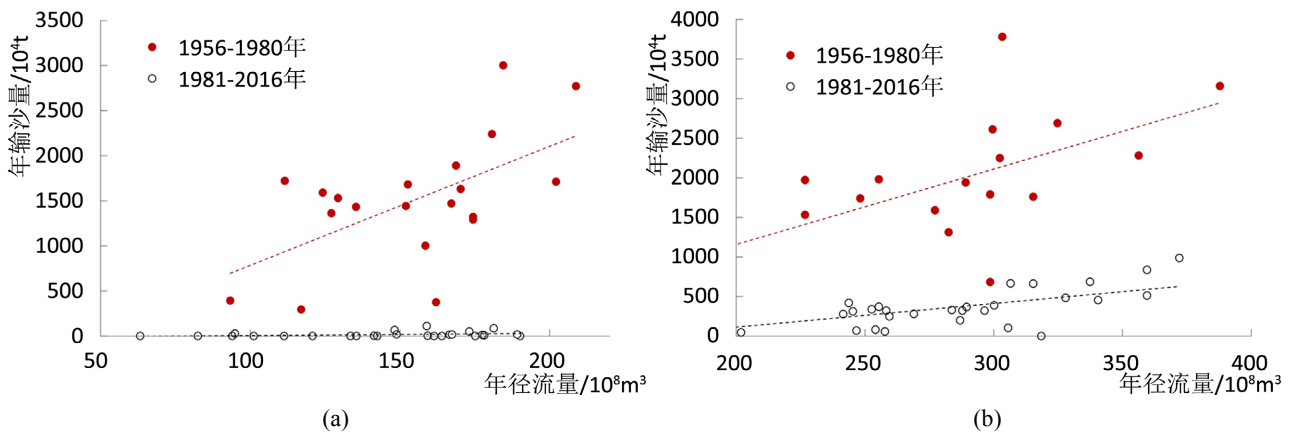


Figure 5. (a) Annual flow and sediment transport process of Wujiangdu Station; (b) Annual flow and sediment transport relationship of Sinan Station

图 5. (a) 乌江渡站年径流量、输沙量变化图; (b) 思南站年径流量、输沙量关系图

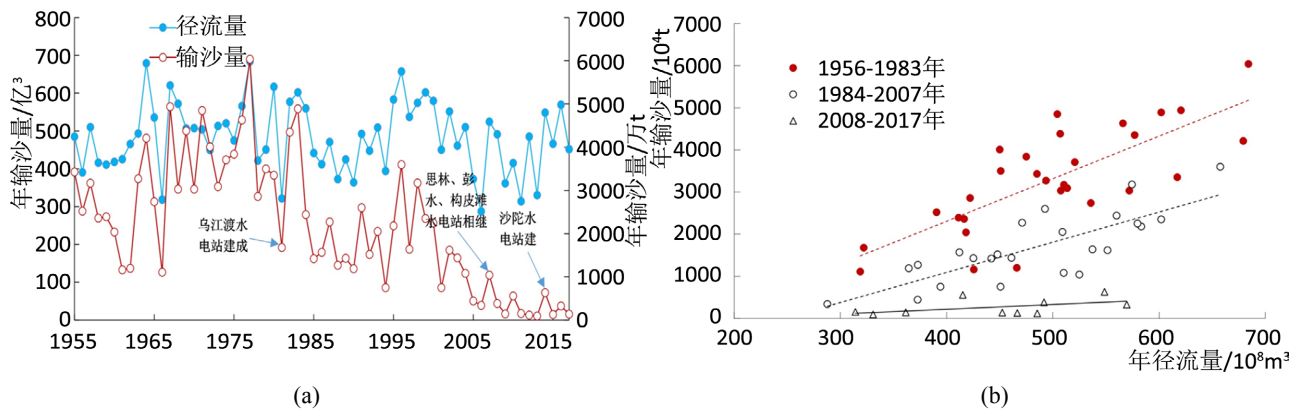


Figure 6. (a) Annual flow and sediment transport process of Wu Long station; (b) Annual flow and sediment transport relationship of Wu Long station

图 6. (a) 武隆站年径流量与输沙量变化图; (b) 武隆站年径流量与输沙量关系图

4. 水库拦沙调查

1) 普定电站

普定水电站于 1994 年蓄水, 1995 年第一台机组发电。工程建成后, 该电站基本拦截了三岔河中上游的全部来沙量。根据其上游阳长水文站资料统计分析(见图 7(a)), 其年均拦沙量在 250 万 t 左右。

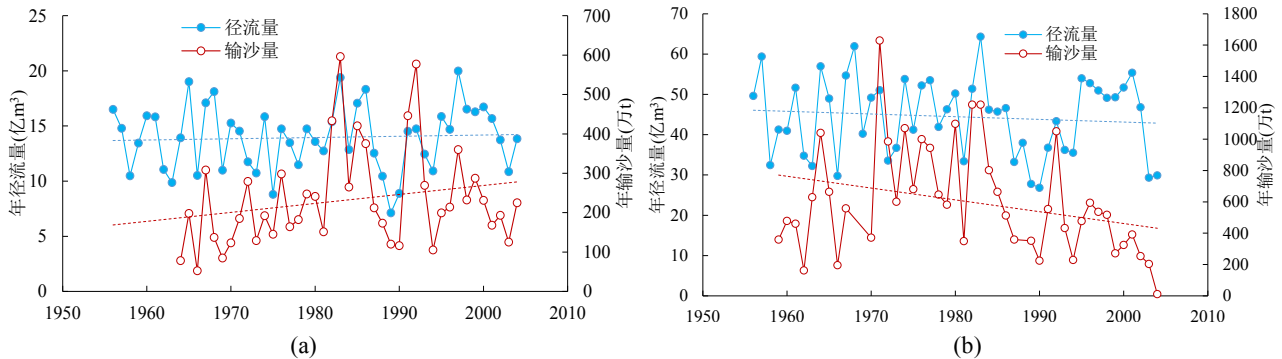


Figure 7. (a) Flow and sediment change of Yangchang hydrological station; (b) Flow and sediment change of Hongjiadu hydrological station

图 7. (a) 阳长水文站水沙变化; (b) 洪家渡水文站水沙变化

2) 洪家渡电站

洪家渡水电站于 2004 年 4 月蓄水。工程建成后, 其基本拦截了六冲河的全部来沙量。蓄水前, 洪家渡水文站 1959~2003 年多年平均输沙量为 611 万 t, 蓄水后其下泄沙量大幅度减小, 其下游洪家渡水文站 2004 年实测输沙量仅为 11 万 t(见图 7(b)), 说明其 2004~2005 年年均拦沙量在 600 万 t 左右。

3) 东风电站

东风电站于 1994 年 4 月蓄水, 其下游约 5 km 处有鸭池河水文站。根据该水文站实测资料分析, 电站蓄水拦沙前, 1957~1993 年年均径流量和输沙量分别为 104 亿 m^3 和 1350 万 t, 蓄水后 1994~2016 年则分别为 99 亿 m^3 和 14 万 t, 水量变化不大, 但沙量减幅达到 99% (图 8)。由此可以说明, 东风电站建成后, 其年均拦沙量为 1336 万 t 左右。

4) 乌江渡电站

乌江渡水电站是乌江干流上第一座大型水电站, 于 1982 年 12 月 4 日全部建成。根据库区 1973 年、1974 年以及 1983 年、1984 年和 1985 年实测断面和地形资料分析统计, 1980~1985 年水库库区淤积泥沙约 1.2 亿 m^3 , 占总库容的 5.7%。同时根据实测资料统计, 1972~1988 年, 水库总淤积量为 1.79 亿 m^3 (合 2.06 亿 t), 这主要是由于 1972~1979 年电站围堰挡水期间, 库区泥沙存在一定淤积, 其淤积量为 680 万 m^3 [17]。因此 1986~1988 年总拦沙量为 0.522 亿 m^3 , 年均拦沙量为 1740 万 m^3 。

乌江渡电站建成后, 其拦沙作用显著, 如 1956~1979 年乌江渡水文站年均输沙量为 1566 万 t, 乌江渡电站建成后, 1980~1994 年平均输沙量减小为 97 万 t, 其减幅达 94% (见图 9), 可见乌江渡电站拦沙约为 1500 万 t。东风电站 1993 年开始蓄水后, 乌江渡入库沙量大幅减少, 其上游鸭池河水文站 1994~2015 年年均输沙量仅为 16.6 万 t, 其拦沙量也相应减少, 乌江渡水文站 1995~2016 年年均输沙量仅为 6.5 万 t 左右, 年均拦沙量不足 10 万 t。

5) 构皮滩、思林、沙沱、彭水梯级电站

2006 年以来, 乌江下游梯级水电站陆续建成运用, 如构皮滩水库于 2009 年首台机组发电, 2011 年完工, 库容 64.54 亿 m^3 ; 思林水库于 2009 年全部机组发电, 库容 15.9 亿 m^3 ; 沙沱水库于 2013 年 4 月份下闸蓄水, 5 月份第一台机组投产, 库容 9.1 亿 m^3 ; 彭水水库于 2009 年电站全部建成投产, 总库容 14.65 亿 m^3 。

这一系列水库的建成运行, 对流域内的水沙输移产生了较大的影响。通过采用乌江渡站、思南站、沙沱站、龚滩站泥沙资料, 推得乌江渡 - 思林、思林 - 沙沱, 沙沱 - 彭水的区间来沙量分别为 300 万 t、370 万 t 和 600 万 t, 再根据已有拦沙率计算结果[14], 得到构皮滩、思林、沙沱、彭水水库等四座水库的年均拦沙量分别为 273

万 t、97.5 万 t、97.3 万 t 和 460 万 t。

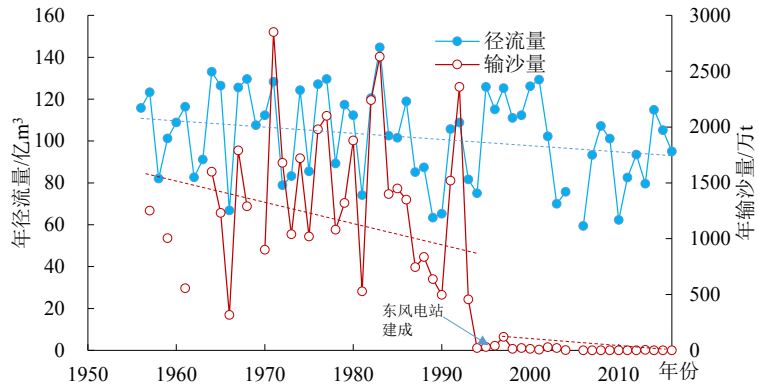


Figure 8. Flow and sediment change of Yachihe hydrological station from 1956 to 2016

图 8. 1956~2016 年鸭池河站水沙变化过程

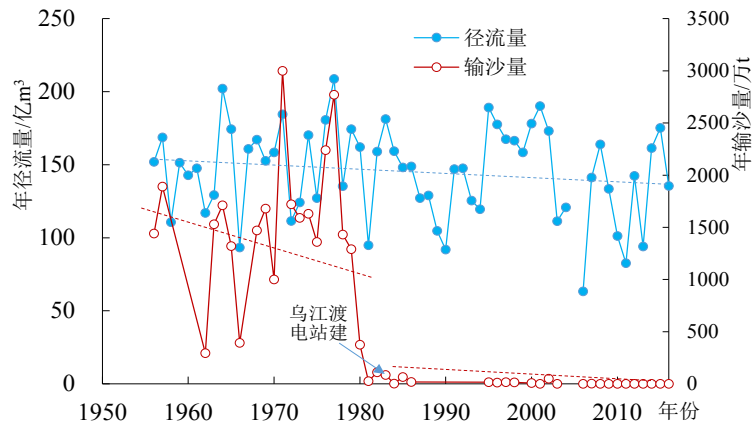


Figure 9. Flow and sediment change of Wujiangdu hydrological station from 1956 to 2016

图 9. 1956~2016 年乌江渡站水沙变化过程

5. 水库减沙作用研究

5.1. 水库拦沙计算

依据文献[18]对水库拦沙的计算方法，对 1956 年以来乌江流域不同类型的水库淤积及其拦沙作用进行了计算。结果表明：

1) 1990 年以前，乌江干流水库多年平均拦沙量为 0.092 亿 t，以大型水库为主，占总拦沙量的 77%，中、小型水库拦沙量则占 23%，主要是乌江渡电站拦沙所致。

2) 1991~2005 年，水库多年平均拦沙量为 0.16 亿 t。与 1956~1990 年相比增加 0.068 亿 t，主要是大型水库拦沙比例增加至 89%，主要是洪家渡、东风、普定等电站拦沙所致。

3) 2006 年以来，流域新建水库 123 座，总库容 140.74 亿 m³，多年平均拦沙量为 2315 万 t。其中：大型水库 10 座，库容 128 亿 m³，其年均拦沙量为 2003 万 t；中型水库 31 座，库容 11 亿 m³，其年均拦沙量为 272 万 t；小型水库 82 座，库容 2 亿 m³，其年均拦沙量为 40 万 t，见图 10 所示。可见，大型水库的拦沙比例高达 86%，

以构皮滩、思林、沙陀和彭水水库的拦沙为主。此外，位于其上游的洪家渡、东风、乌江渡水电站建成时间分别为 2001 年 1995 和 1983 年，仍然有拦沙作用，其年均拦沙量约为 1350 万 t。

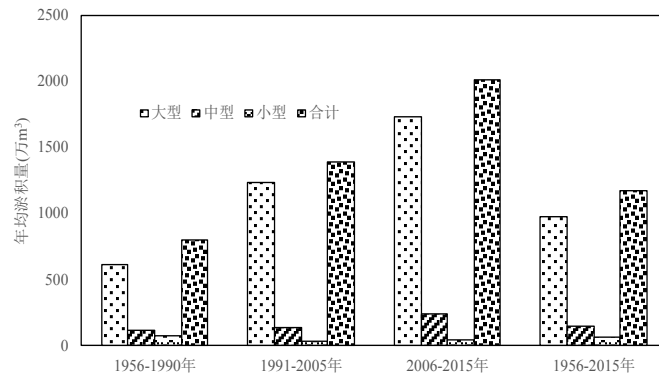


Figure 10. Reservoir trapping amount in the Wujiang River basin from 1956 to 2015

图 10. 1956~2015 年乌江流域水库拦沙量

5.2. 水库减沙贡献研究

水库拦沙后，不仅改变了流域输沙条件，大大减小流域输沙量，而且由于水库下泄清水，引起坝下游河床沿程出现不同程度的冲刷和自动调整，在一定程度上增大了流域出口的输沙量。已有研究成果表明，水库拦沙对流域出口的减沙作用系数可以表达为：

$$J = \frac{C_t - C_a}{C_t} \quad (1)$$

式中： C_t 表示水库拦沙量， C_a 表示区间河床冲刷调整量，水库减沙作用系数与其距河口距离的大小成负指数关系递减。

1) 1990 年以前

1956~1990 年除乌江渡电站位于乌江上游干流外，其他中小型水库大多位于支流上，拦沙量较小，根据“七五”攻关期间石国钰等人(1991) [19]通过采用多维动态灰色系统理论的方法，建立了乌江流域(武隆站)产输沙方程，得到流域水库群拦沙作用系数为 0.034。乌江渡电站修建后，坝下游河床冲刷调整作用较大，在蓄水后的 4 年内坝下游河道冲刷调整较为剧烈，电站拦沙对武隆站输沙量影响不大，1984 年后，其拦沙作用得以体现，根据已有研究成果[18]：乌江渡电站拦沙作用对武隆站输沙量的作用系数为 0.59。因此，本文考虑中小型水库拦沙作用系数为 0.034，大型水库为 0.59 作为一种近似估算，1956~1990 年乌江渡电站等水库群拦沙可减小武隆站输沙量为 424 万 t，仅占武隆站同期年均输沙量的 14%，说明这时期水库群拦沙对武隆站输沙量影响不大。

2) 1991~2005 年

1991~2005 年流域水库拦沙主要以乌江干流上修建的大型电站为主，中小型水库由于大多位于支流或水系末端，距离武隆站较远，其拦沙对武隆站输沙量影响可忽略不计。已有研究表明，乌江上中游大型水电站拦沙对武隆站的作用系数应在 0.66 左右[20]。计算得到 1991~2005 年乌江流域水库(主要是乌江渡电站、东风电站等大型水库)拦沙引起武隆站减沙量为 941 万 t，与 1990 年前 424 万 t 相比，新增减沙量为 517 万 t，而武隆站 1991~2005 年较 1956~1990 年平均减沙量为 1150 万 t，占武隆站同期年均输沙减少量的 45%。

3) 2006 年以来

2006 年以来，乌江流域内新建大型水库大多位于乌江下游，对武隆站的减沙作用较为显著，综合考虑其减

沙作用系数为 0.90, 通过 2006 年以来各大型水库的拦沙量, 考虑其建成年份, 统一加权平均至 2006~2015 年, 得到 2006 年以后新建大型水库的年均拦沙量为 1803 万 t, 中小型水库由于大多位于支流或水系末端, 距离武隆站较远, 其拦沙作用系数取为 0.034, 则其对武隆站输沙量的减沙量为 10 万 t, 可见大、中、小型水库引起武隆站的减沙量为 1813 万 t。与 1991~2005 年相比, 水库新增减沙量约占武隆站 2005 年后总减沙量 1470 万 t 的 72%。

6. 结论

1) 大型水库对流域内的减沙起着十分重要的作用。1956 年以来, 乌江流域已建水库 1422 座, 总库容 275.31 亿 m^3 , 不同阶段水库的建设均以大型水库为主, 其中: 大型水库 21 座, 库容 239.33 亿 m^3 , 占总库容的 87%; 中型水库 77 座, 库容 24.32 亿 m^3 , 占总库容的 9%; 小型水库 1324 座, 库容 11.66 亿 m^3 , 占总库容的 4%。

2) 1956 年以来, 乌江流域水库多年平均拦沙量为 1347 万 t, 其中大型水库拦沙占总拦沙量的 83%。从不同阶段的拦沙变化来看, 1990 年以前、1991~2005 和 2006 年以来水库年均拦沙量分别为 922 万 t、1601 万 t 和 2315 万 t。

3) 从水库拦沙作用的年际变化来看, 1990 年以前、1991~2005、2006 年以来年水库拦沙对武隆站的减沙权重分别为 14%、45%和 72%, 水库拦沙作用逐步增强; 从水库减沙较为明显的典型水库来看, 1991~2005 年, 对武隆站减沙造成影响的水库主要是乌江渡电站、东风电站, 2006 年以来, 对武隆站减沙造成影响的水库则主要分布在乌江中下游干流的构皮滩、思林、沙陀和彭水等水库。

基金项目

国家自然科学基金联合基金项目(U2040218)。

参考文献

- [1] 张强, 陈桂亚, 许崇育, 等. 长江流域水沙周期特征及可能影响原因[J]. 水科学进展, 2009, 20(1): 80-85.
ZHANG Qiang, CHEN Guiya, XU Chongyu, et al. Periodic characters of sediment load and runoff changes in the Yangtze River basin in the past 40 years, China. *Advances in Water Science*, 2009, 20(1): 80-85. (in Chinese)
- [2] XIONG, M., XU, Q. X. and YUAN, J. Analysis of multi-factors affecting sediment load in the Three Gorges Reservoir. *Quaternary International*, 2009, 208(1): 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2009.01.010>
- [3] 王延贵, 胡春宏, 刘茜, 史红玲. 长江上游水沙特性变化与人类活动的影响[J]. 泥沙研究, 2016(1): 1-8.
WANG Yangui, HU Chunhong, LIU Qian and SHI Hongling. Changes of water and sediment characteristics and influence of human activities in the upper reaches of the Yangtze River. *Journal of Sediment Research*, 2016(1): 1-8. (in Chinese)
- [4] 许全喜, 石国钰, 陈泽方. 长江上游近期水沙变化特点及趋势分析[J]. 水科学进展, 2004, 15(4): 420-426.
XU Quanxi, SHI Guoyu and CHEN Zefang. Analysis of recent changing characteristics and tendency runoff and sediment transport in the upper reach of Yangtze River. *Advances in Water Science*, 2004, 15(4): 420-426. (in Chinese)
- [5] 吴晓玲, 张欣, 向小华, 等. 乌江流域上游水沙特性变化及其水电站建设的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(3): 642-650.
WU Xiaoling, ZHANG Xin, XIANG Xiaohua, et al. Runoff and sediment variations in the upstream of Wujiang River basin and the influences of hydropower station construction. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(3): 642-650. (in Chinese)
- [6] 邵骏, 范可旭, 郗建平, 等. 乌江干流年径流变化趋势及成因分析[J]. 水文, 2012, 32(6): 86-91+20.
SHAO Jun, FANG Kexu, BING Jianping, et al. Variation trend and driving factors of annual runoff in Wujiang River. *Journal of China Hydrology*, 2012, 32(6): 86-91+20. (in Chinese)
- [7] 姚文艺, 侯素珍, 丁赟. 龙羊峡、刘家峡水库运用对黄河上游水沙关系的调控机制[J]. 水科学进展, 2017, 28(1): 1-13.
YAO Wenyi, HOU Suzhen and DING Yun. Effects on flow and sediment in the upper Yellow River by operation of Longyangxia Reservoir and Liujiata Reservoir. *Advances in Water Science*, 2017, 28(1): 1-13. (in Chinese)
- [8] YU, Y., SHI, X., WANG, H., et al. Effects of dams on water and sediment delivery to the sea by the Yellow River: The special role of Water-Sediment Modulation. *Anthropocene*, 2013, 3: 72-82. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2014.03.001>
- [9] 杜俊, 师长兴, 张守红, 等. 人类活动对长江上游近期输沙变化的影响[J]. 地理科学进展, 2010, 29(1): 15-22.
DU Jun, SHI Changxing, ZHANG Shouhong, et al. Impact of human activities on recent changes in sediment discharge of the upper Yangtze River. *Progress in Geography*, 2010, 29(1): 15-22. (in Chinese)

- [10] 曹亚丽, 贺心然, 姜文婷. 水电梯级开发水文情势累积影响研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(6): 20-25.
CAO Yali, HE Xinran and JINAG Wenting. Study on cumulative effects of hydrological regime by cascade hydropower stations built on rivers. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2016, 27(6): 20-25. (in Chinese)
- [11] 王延贵, 史红玲, 刘茜. 水库拦沙对长江水沙态势变化的影响[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 467-476.
WANG Yangui, SHI Hongling and LIU Xi. Influence of sediment trapping in reservoirs on runoff and sediment discharge variations in Yangtze River. Advances in Water Science, 2014, 25(4): 467-476. (in Chinese)
- [12] 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.
FENG Xiufu, YANG Qingyuan, ZHANG Ouyang, et al. Sediment trap of Ertan Reservoir and its effect on sediment budget of Jinsha River. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2008, 40(6): 37-42. (in Chinese)
- [13] YANG, S. L., ZHAO, Q. Y. and BELKIN IGOR, M. Temporal variation in the sediment load of the Yangtze River and the influences of human activities. Journal of Hydrology, 2002, 263: 56-71. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00028-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00028-8)
- [14] 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.
LI Haibin, ZHANG Xiaofeng, HU Chunhong, et al. Impact of cascade reservoirs construction in the upper Yangtze River on sediment inflow to Three Gorges reservoirs. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(1): 94-100. (in Chinese)
- [15] 段炎冲, 李丹勋, 王兴奎. 长江上游梯级水库群拦沙效果分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(6): 15-23.
DUAN Yanchong, LI Danxun and WANG Xinkui. Analysis of the sediment trapping by reservoirs in the upper Yangtze River. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2015, 47(6): 15-23. (in Chinese)
- [16] 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.
LI Haibin, ZHANG Xiaofeng and XU Quanxi. Analysis and prediction of sediment trapped by large-scale reservoir group on upstream of Three Gorges Dam. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(5): 604-607. (in Chinese)
- [17] 刘家应, 柴家福. 乌江渡水库泥沙淤积观测研究(二)[J]. 贵州水力发电, 1994(1): 33-43.
LIU Jiaying, CAI Jiafu. Observational study on sediment deposition in Wu-Jiang-Du reservoir (II). Guizhou Hydroelectric Power Generation, 1994(1): 33-43. (in Chinese)
- [18] 袁晶, 许全喜. 金沙江流域水库拦沙效应[J]. 水科学进展, 2018, 29(4): 10.
YUAN Jing, XU Quanxi. Sediment trapping effect by reservoirs in the Jinsha River basin. Advances in Water Science, 2018, 29(4): 10. (in Chinese)
- [19] 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.
SHI Guoyu, CHEN Xianwei and YE Min. Discussion on the effect of sediment storage on the upper reaches of the Yangtze River to the Three Gorges Reservoir. Yangtze River, 1992, 23(5): 23-28. (in Chinese)
- [20] 陈松生, 许全喜, 陈泽方. 乌江流域水沙变化特性及其原因分析[J]. 泥沙研究, 2008(5): 42-48.
CHEN Songsheng, XU Quanxi and CHEN Zefang. Analysis on variation characteristics and influencing factors of runoff and sediment in the Wujiang river basin. Journal of Sediment Research, 2008(5): 42-48. (in Chinese)