

金沙江梯级水库群下游河道河床冲刷分析

朱玲玲, 熊明

长江水利委员会水文局, 湖北 武汉

收稿日期: 2022年10月7日; 录用日期: 2023年1月2日; 发布日期: 2023年2月24日

摘要

金沙江下游是长江流域的重点产沙区, 自2012年开始, 下游的乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝四个梯级水库陆续蓄水运行, 截断了金沙江下游的泥沙, 水库群下游向家坝坝址至江津河段发生冲刷, 河床下切导致同流量中低水位下降, 可能对下游河道的水生态环境及通航造成影响。基于金沙江下游的水沙和河道地形、断面等观测资料, 围绕金沙江下游梯级水库蓄水对水沙条件的影响和向家坝下游河道河床冲刷两个主要内容进行分析, 结果表明, 自2012年向家坝水库开始蓄水, 金沙江下游出口沙量骤减幅度超过90%, 向家坝坝下游至江津河段河床发生冲刷, 累计冲刷量为1.516亿 m^3 , 河床冲刷导致枯水位下降0.41 m。

关键词

金沙江下游, 梯级水库群, 河道冲刷, 枯水位

Analysis of River Bed Scour Downstream from Dams of Cascade Reservoirs in the Lower Jinsha River

Lingling Zhu, Ming Xiong

Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan Hubei

Received: Oct. 7th, 2022; accepted: Jan. 2nd, 2023; published: Feb. 24th, 2023

Abstract

The lower Jinsha River is a key sediment producing area in the Yangtze River basin. Four cascade reservoirs at the lower reaches, Wudongde, Baihetan, Xiluodu, and Xiangjiaba, have been successively impounded and operated since 2012, thus cut off the sediment at the lower Jinsha River. The reach from the

作者简介: 朱玲玲(1984-), 女, 江西鄱阳人, 博士, 正高级工程师, 主要从事流域水沙输移与河道演变及数值模拟方面的研究, Email: zhull1012@foxmail.com

文章引用: 朱玲玲, 熊明. 金沙江梯级水库群下游河道河床冲刷分析[J]. 水资源研究, 2023, 12(1): 10-15.

DOI: 10.12677/jwrr.2023.121002

reservoir group downstream Xiangjiaba dams site to the Jiangjin River has been scoured, and the cutting down of the riverbed has led to the lowering of the middle and low water levels at the same flow, which may have an impact on the aquatic ecological environment and navigation of the downstream river channels. Based on the observation data of water and sediment, river channel topography and cross section in the lower Jinsha River, the impact of water storage in cascade reservoirs in the lower Jinsha River on water and sediment conditions and river bed scouring downstream from the Xiangjiaba Dam to Jiangjin are analyzed. The results show that since Xiangjiaba Reservoir began to store water in 2012, the sediment amount at the outlet of the lower Jinsha River has decreased by more than 90%, and the river bed in the lower reaches of Xiangjiaba River to Jiangjin River has been scoured, with a total scouring amount of 151.6 million m³, the low water level drops by 0.41 m due to river bed scouring at Xiangjiaba hydro-metric station.

Keywords

The Lower Jinsha River, Cascade Reservoirs, River Channel Scouring, Low Water Level

Copyright © 2023 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/>



Open Access

1. 引言

上世纪 90 年代开始,金沙江下游先后经历了二滩、中游梯级电站等重大水利工程和流域重点区域水土保持工程的影响,水沙条件持续变化[1] [2] [3]。尤其是 2012 年起,金沙江下游的乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝 4 座梯级水电站陆续建成运行,4 个梯级均为高坝深库,排沙比较小[4],拦沙是电站建设的主要任务之一[5],水库群蓄水后基本截断了金沙江流域的泥沙,水库群下游向家坝水文站的年输沙量一度下降至不足百万吨,相较于设计阶段的 2.5 亿吨,现阶段金沙江下游出口的泥沙减幅超过 90%。向家坝下游的河道也与三峡水库坝下游一样,经历了高强度的河床冲刷过程。所不同的是,一方面向家坝下游为山区河流,河床可冲刷的沙质覆盖层极薄;另一方面向家坝至江津河段区间还有多条含沙量偏大的支流入汇,给干流河道提供了一定的泥沙补充[6]。因而,向家坝下游河道的河床冲刷发展过程也有一定的特点,以往详细的阐述相对较少。同时,河床冲刷下切必然会带来枯水位的下降,向家坝下游自宜宾以下的江段均有通航[7],枯水位下降对于通航水深是否会造成影响,以及枯水位是否会持续下降等都值得深入探讨。除此之外,向家坝下游依次分布有长江上游珍稀、特有鱼类国家级自然保护区试验区、缓冲区和核心区,向家坝的不同出库流量以及河床冲刷带来的床面组成变化都会对鱼类繁殖等造成一定影响[8]。文章以金沙江下游水文观测站和河床断面观测资料为主,针对向家坝坝址至三峡水库变动回水区末端的江津段为对象,开展水沙条件变化分析和河床冲淤计算以及枯水位下降幅度研究,基本明确了向家坝下游枯水位下降趋势。

2. 研究区域及数据源

分析以金沙江下游向家坝坝址至江津为主要对象,河道总长约 325.8 km,冲淤量的统计分为近坝的向家坝坝址至宜宾、宜宾至朱沱和朱沱至江津三段,长度分别为 29.8 km、233 km 和 63 km。以位于向家坝坝址下游约 2 km 的向家坝水文站作为水沙变化的分析对象。自 2006 年金沙江下游梯级水电站开工建设以来,研究河段内存在大量护堤护岸等工程施工及河道采砂活动,这些人类活动对河道冲淤计算成果均有较大影响,采用断面法对向家坝坝址至江津河段进行冲淤计算时,对护坡及施工影响明显的断面进行了还原处理。水文、泥沙及河道

断面观测资料均来源于长江水利委员会水文局。

3. 梯级水库对水沙的影响

3.1. 金沙江下游梯级水库运行情况

2002 年国家授权长江三峡集团有限公司开发建设金沙江下游乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝 4 座巨型水电站，总装机容量相当于 2 座三峡电站，4 座电站首尾相连。其中：

乌东德工程为金沙江下游干流首级枢纽，位于四川省会东县和云南省禄劝县交界处的金沙江峡谷内，坝址下至宜宾河道长 562 km，距白鹤滩大坝 180 km。电站 2015 年 4 月实现大江截流，2015 年 12 月正式开工建设，2017 年 3 月大坝开始浇筑，2020 年 6 月大坝全线到顶，2020 年 5 月初期蓄水，2020 年 6 月首台机组投产发电，2021 年 6 月全部机组投产发电。

白鹤滩工程为金沙江下游干流第 2 级枢纽，位于四川省宁南县和云南省巧家县交界处的金沙江峡谷内，坝址下至宜宾河道长 382 km，至溪洛渡大坝 199 km。电站于 2014 年 11 月导流洞过流，2015 年 11 月实现大江截流，2016 年 6 月围堰投入运行，2017 年 3 月大坝主体混凝土浇筑，2021 年 5 月初期蓄水，2021 年 6 月首台机组投产发电，2022 年 6 月全部机组投产发电。

溪洛渡工程为金沙江下游干流第 3 级枢纽，坝址位于四川省雷波县和云南省永善县交界的金沙江峡谷内，下至宜宾河道长 190 km，至向家坝坝址 157 km。电站于 2005 年底正式开工，2007 年 11 月实现大江截流，2013 年 5 月初期蓄水完成，2013 年 7 月首批机组发电，2014 年 6 月底 18 台机组全面投产发电。

向家坝工程为金沙江下游干流第 4 级枢纽，库区回水长度约 157 km，位于四川省屏山县和云南省水富县交界的金沙江峡谷内。水电站于 2006 年 11 月开工建设，2008 年 12 月实现大江截流，2012 年 10 月初期蓄水完成，2012 年 11 月首台机组投产发电，2014 年 7 月 7 日 8 台机组全面投产发电；2018 年 5 月升船机正式试通航。

3.2. 梯级水库对下游水沙的影响

2012 年之前，金沙江下游出口的水沙均由向家坝坝址上游约 28 km 的屏山水文站控制，2012 年向家坝水电

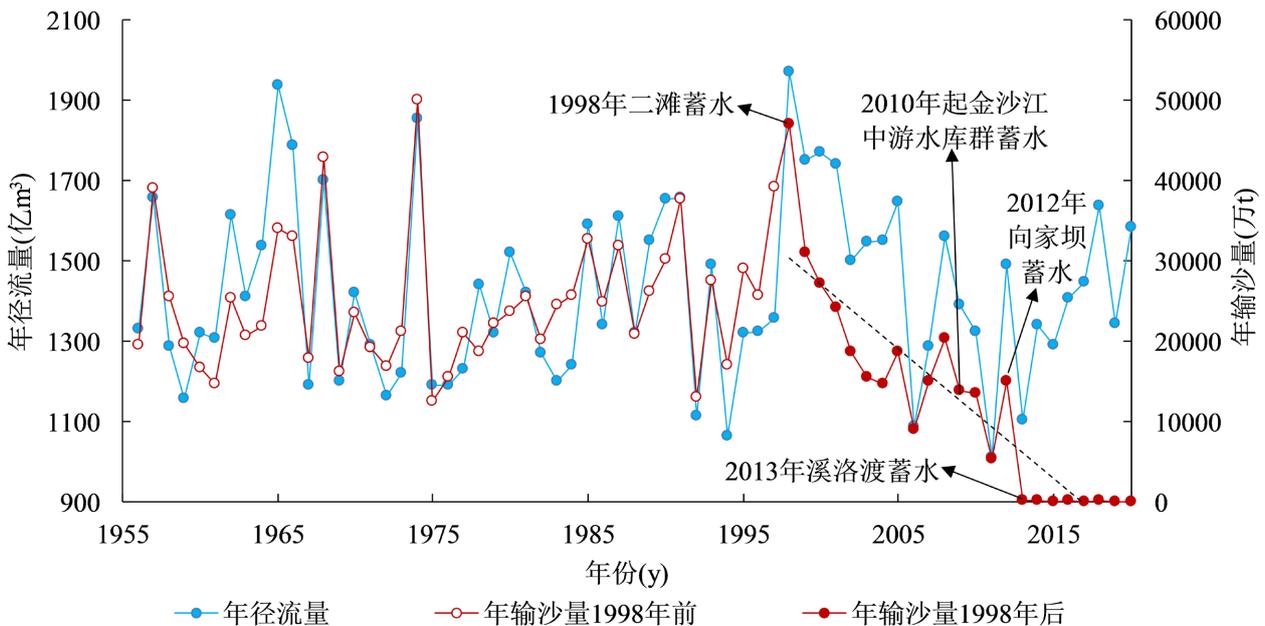


Figure 1. Annual runoff and sediment discharge of Xiangjiaba Station (Pingshan Station) in the lower Jinsha River
图 1. 金沙江下游向家坝站(屏山站)年径流量和年输沙量变化过程

站蓄水运行后,屏山站改为水位站,在向家坝坝址下游约 2 km 处设立了向家坝水文站,控制金沙江下游出口的径流和泥沙输移量。金沙江下游径流整体上变化较小,其输沙过程先后受到最大的支流雅砻江二滩电站建成、金沙江中游梯级水库建成、重点区域水土保持工程和 2012 年以来的乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝水电站群蓄水等综合影响,年输沙量持续减少,依据这些控制性工程建设和运行时间,将向家坝站径流输沙统计时段划分为 1956~1997 年、1998~2010 年和 2011~2021 年,统计分析发现,这三个时期向家坝站多年平均年径流量分别为 1400 亿 m^3 、1550 亿 m^3 和 1350 亿 m^3 ,以周期性波动变化为主;多年平均年输沙量为 2.49 亿 t、2.07 亿 t 和 1980 万 t,2011 年金沙江中游、下游梯级陆续运用后,2011~2021 年年输沙量均值分别相较于 1956~1997 年和 1998~2010 年均值偏小 92% 和 90.4%,尤其是乌东德、白鹤滩蓄水后,2020 年、2021 年向家坝站年输沙量均不足 130 万 t,梯级水库群基本上截断了金沙江流域的泥沙(如图 1)。梯级水库群“清水”下泄,是造成向家坝下游河道河床冲刷的直接原因。

4. 向家坝下游河道河床冲刷及影响分析

4.1. 河床冲刷分析

向家坝水库蓄水后 2012 年 10 月至 2021 年 11 月,坝址至三峡水库回水末端江津共计 325.8 km 的河道累计冲刷泥沙约 1.516 亿 m^3 (如表 1)。其中,从沿时变化来看,冲刷主要发生在 2016 年以前,2012 年 10 月至 2016 年 11 月,河道累计冲刷 1.5635 亿 m^3 ,2016 年 11 月至 2021 年 11 月河床累积呈小幅度淤积的状态,淤积量为 475 万 m^3 。其主要原因在于,一方面该段河道曾经采砂活动频繁,采砂量较大,2016 年开始河道全面禁止采砂;另一方面,向家坝至朱沱江段水系较为发育,分别有横江、岷江和沱江等支流入汇,其中岷江和沱江于宜宾至朱沱江段入汇,2020 年岷、沱江流域强降雨带来的强输沙造成宜宾至朱沱段泥沙大幅度淤积。2020 年 6~8 月(主汛期),岷、沱江上中游附近降雨超过 800 mm,尤其是 8 月,嘉陵江、岷江、沱江等流域均遭遇明显暴雨过程 [9],强降雨带来了强输沙,岷江高场站和沱江富顺站观测到入汇长江干流的年输沙量分别高达 6630 万 t 和 2100 万 t,分别相较于多年平均值偏大 55.5% 和 145%。同时干支流洪水过程反复遭遇、相互顶托,向家坝坝址至江津段水动力条件较弱。冲淤计算结果显示,2019 年 10 月至 2020 年 11 月间,向家坝坝址至江津河段累计淤积 1881 万 m^3 ,其中宜宾至朱沱江段淤积 1594 万 m^3 。

从沿程变化来看,向家坝坝址至宜宾、宜宾至朱沱和朱沱至江津河段分别累计冲刷 1243 万 m^3 、7929 万 m^3 和 5988 万 m^3 ,分别占总冲刷量的 8.2%、52.3% 和 39.5%,单位河长的冲刷量以朱沱至江津段最大,宜宾至朱沱段最小,其最主要的原因是岷江和沱江仍然是长江上游重要的泥沙来源,遭遇强降雨过程,仍然会为宜宾至朱沱江段提供一定的泥沙来源,从而缓解该段河床冲刷。

Table 1. Amount of scouring and silting of riverbed from Xiangjiaba Dam to Jiangjin River from 2012 to 2021

表 1. 2012~2021 年向家坝坝址至江津河段河床冲淤量

计算河段	坝址至宜宾	宜宾至朱沱	朱沱至江津	宜宾至江津	坝址至江津
河长(km)	29.8	233	63	296	325.8
2012.10~2016.11	-1050	-8929	-5656	-14,585	-15,635
2016.11~2021.11	-193	1000	-332	668	475
2012.10~2021.11	-1243	-7929	-5988	-13,917	-15,160

注:冲刷量的单位为“万 m^3 ”,正值表示淤积,“-”表示冲刷。

4.2. 冲刷对枯水位的影响分析

河床是枯水位的下边界,河床冲刷下切后,一般都会造成枯水位的下降。2012~2021 年间,基于实测流量

和水位资料,建立向家坝站水位流量关系如图2,2000 m³/s下,向家坝站枯水位累计下降约0.41 m,且2015年前相对稳定,2015年之后枯水位开始下降,与河床冲刷发展的过程基本一致。随着流量的增大,水位降幅也有所增加,3000 m³/s下,向家坝站枯水位累计下降约0.72 m,4000 m³/s下,枯水位累计下降约1.17 m。枯水位降幅随着流量增大而增加的原因在于,枯水位主要受深槽形态的影响,向家坝下游深泓纵剖面存在高凸的节点,且年间基本稳定,对枯水位下降幅度有一定的控制作用,相反地,下游河道砂石料开采主要发生在中低滩段,是以中水的水位下降幅度大于低水,这与三峡水库下游近坝砂卵石河段水位下降规律基本一致[10]。

长江干流航道上起宜宾,河床冲刷和电站日调节都可能对通航造成一定影响,一方面河床冲刷可能导致水位下降,造成部分浅滩段水深不满足;另一方面,《向家坝水电站水库运行与电站运行调度规程(试行)》规定,为保障枯水期通航,向家坝最小下泄流量不小于1200 m³/s,最大日水位变幅不超过4.5 m/d,最大小时水位变幅不超过1.0 m/h [7]。为缓解枯水位下降对坝下游宜宾以下江段通航的不利影响,向家坝电站自2012年起不断加大最小下泄流量,自2017年,各年最小下泄流量均在1500 m³/s以上,基本满足相关通航保障的论证要求。至2021年,向家坝最小下泄流量增加729 m³/s,与之相关的年最低水位也有所抬升,累计增幅约0.72 m;年内仅较短时间内不满足最大小时水位变幅的要求。伴随向家坝下游河床冲刷强度逐渐减弱,加之电站对枯水期小流量的调控作用,向家坝下游枯水位继续大幅下降的可能性较小,基本不会对宜宾以下通航水深造成不利影响。

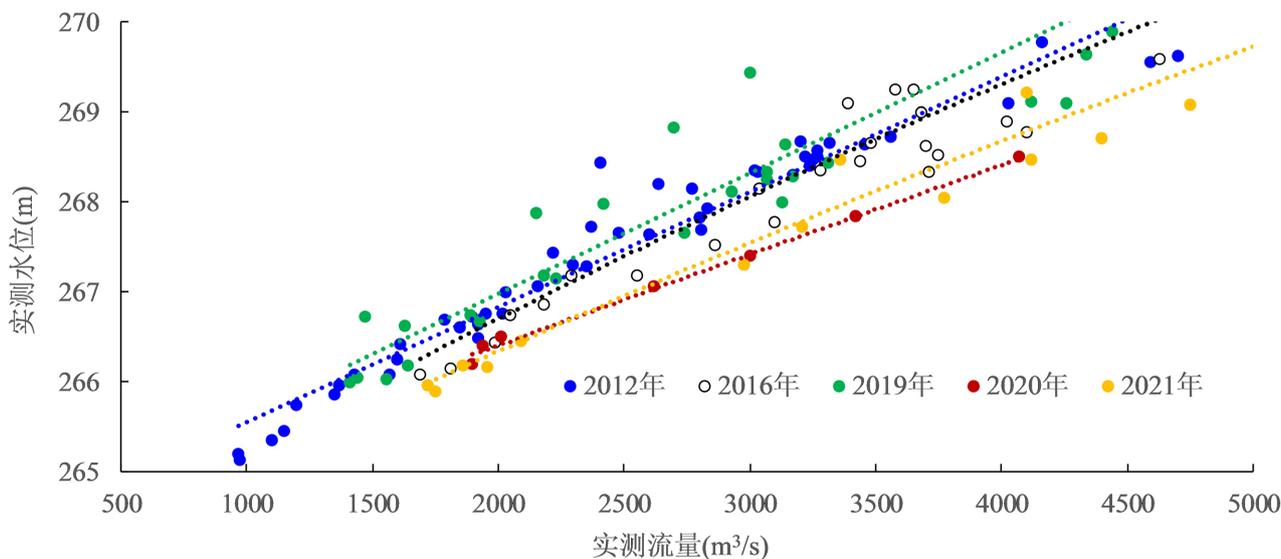


Figure 2. Measured water level discharge relationship of Xiangjiaba Station in the lower Jinsha River from 2012 to 2021

图2. 2012~2021年金沙江下游向家坝站实测水位流量关系

5. 主要认识

1) 伴随金沙江中游、下游梯级水库群陆续建成运行,2011~2021年金沙江出口控制站年输沙量锐减幅度超过90%,水库群基本截断了金沙江流域的来沙。

2) 向家坝水库蓄水后,坝址至三峡水库回水末端江津段河床累计冲刷泥沙约1.516亿m³,冲刷主要发生在2016年以前,2016年后河床累积呈小幅淤积的状态。采砂活动、区间支流来沙对河床冲刷发展过程及沿程分布有一定影响。

3) 2012~2021年,2000 m³/s枯水流量下,向家坝站水位累计下降约0.41 m,随着流量的增大,水位降幅增加。河床纵剖面高凸部分稳定和电站不断增大最小下泄流量双重影响下,向家坝下游枯水位继续大幅下降的可能性较小,基本不会对宜宾以下通航水深造成不利影响。

基金项目

本文由长江水科学联合基金项目(编号: U2040218)资助。

参考文献

- [1] 金兴平, 许全喜. 长江上游水库群联合调度中的泥沙问题[J]. 人民长江, 2018, 49(3): 1-8, 31.
JIN Xingping, XU Quanxi. Sediment issues in joint dispatch of reservoir group in upper Yangtze River. *Yangtze River*, 2018, 49(3): 1-8, 31. (in Chinese)
- [2] 许全喜, 石国钰, 陈泽方. 长江上游近期水沙变化特点及其趋势分析[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. *Advance in Water Science*, 2004, 15(4): 420-426. (in Chinese)
- [3] 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.
CHEN Songsheng, ZHANG Ouyang, CHEN Zefang, et al. Variation of runoff and sediment load of the Jinsha River. *Advance in Water Science*, 2008, 19(4): 475-482. (in Chinese)
- [4] 朱玲玲, 许全喜, 董炳江, 等. 金沙江下游溪洛渡水库排沙效果及影响因素[J]. 水科学进展, 2021, 32(4): 544-555.
ZHU Lingling, XU Quanxi, DONG Bingjiang, et al. Study of the effect and influencing factors of sand discharge of Xiluodu Reservoir in the Lower Jinsha River. *Advance in Water Science*, 2021, 32(4): 544-555. (in Chinese)
- [5] 朱玲玲, 陈翠华, 张继顺. 金沙江下游水沙变异及其宏观效应研究[J]. 泥沙研究, 2016(5): 20-27.
ZHU Lingling, CHEN Cuihua and ZHANG Jishun. Study on variations of runoff and sediment and effect to the lower Jinsha River. *Journal of Sediment Research*, 2016(5): 20-27. (in Chinese)
- [6] 杨成刚, 李圣伟, 董炳江. 三峡水库试验性蓄水以来长江上游来水来沙变化[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(S1): 38-44.
YANG Chenggang, LI Shengwei and DONG Bingjiang. Changes of runoff and sediment in the upper reaches of the Yangtze River since the trial impoundment of the Three Gorges Reservoir. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, 53(S1): 38-44. (in Chinese)
- [7] 潘增, 陈忠贤, 范向军, 等. 向家坝水电站下游河道变化对枢纽运行影响研究[J]. 人民长江, 2020, 51(增 2): 320-324.
PAN Zeng, CHEN Zhongxian, FAN Xiangjun, et al. Study on the influence of downstream channel change on the operation of Xiangjiaba Hydropower Station. *Yangtze River*, 2020, 51(Supplement II): 320-324. (in Chinese)
- [8] 戴凌全, 王煜, 戴会超, 等. 金沙江下游向家坝水库不同出库流量对四大家鱼生境面积影响的定量分析[J]. 环境科学研究, 2021, 34(7): 1710-1718.
DAI Lingquan, WANG Yu, DAI Huichao, et al. Effect of different release from Xiangjiaba Reservoir in the lower reaches of Jinsha River on habitat area of four major Chinese carps. *Research of Environmental Science*, 2021, 34(7): 1710-1718. (in Chinese)
- [9] 邱辉, 熊莹, 邢雯慧, 等. 2020 年主汛期长江流域暴雨特征及成因分析[J]. 人民长江, 2020, 51(12): 104-111.
QIU Hui, XIONG Ying, XING Wenhui, et al. Study on characteristics and causes of rainstorm in Yangtze River Basin during major flood season in 2020. *Yangtze River*, 2020, 51(12): 104-111. (in Chinese)
- [10] 朱玲玲, 杨霞, 许全喜. 上荆江枯水位对河床冲刷及水库调度的综合响应[J]. 地理学报, 2017, 72(7): 1184-1194.
ZHU Lingling, YANG Xia and XU Quanxi. Response of low water level change to bed erosion and operation of Three Gorges Reservoir in upper Jingjiang reach. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(7): 1184-1194. (in Chinese)