

大型水库对长江上游主要干支流河流输沙量的影响

张信宝^{1,2}, 文安邦¹, D E Walling³, 吕喜玺⁴

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041;

2. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002;

3. Department of Geography and Archaeology, Exeter University, Exeter EX 4 4RJ, UK;

4. 新加坡国立大学 地理系, 新加坡)

摘要:本文阐明了大型水库的拦沙和滞洪削减洪峰,降低挟沙能力的减沙机制,给出了大型水库下游河流输沙量时空变化的坝下河段无泥沙补给、少量泥沙补给和有大量泥沙补给三种模式。在此基础上,通过水库修建前后下游河流水沙变化的对比分析,认为大型电站水库的修建是20世纪80年代以来乌江、90年代以来金沙江、嘉陵江输沙减少和70年代以来岷江输沙波动的重要驱动力。宜昌站1992-2002年期间的输沙量比1956-1992年期间减少28.2%,主要归功于嘉陵江来沙减少和1998年以后的金沙江来沙减少;2003-2007年期间的输沙量又比1992-2002年期间减少82.2%,主要归功于三峡水库的蓄水拦沙。

关键词:长江上游;主要干支流;大型水库;河流输沙;影响

中图分类号: TV142 **文献标识码:** A **文章编号:** 0468-155X(2011)04-0059-08

1 前言

20世纪50年代以来,长江上游干流和主要支流金沙江、嘉陵江、岷江和乌江的输沙量均发生了变化,但趋势不尽相同^[1-8]。不同于植被的破坏与恢复,水土流失的治理,交通、城镇、矿山和中小水利工程建设,河流输沙量对大型水库的响应迅速,容易鉴别。本文在阐明大型水库影响下游河流泥沙机制的基础上,通过修建前后下游河流水沙变化的对比分析,解译大型电站水库对长江上游主要干支流河流泥沙的影响,为合理解译长江上游河流泥沙对人类活动的响应,正确预测未来变化趋势作好铺垫。

2 主要干支流及大型电站水库概况

宜昌以上的长江上游流域面积100.5万km²,1956-2007年期间的年均径流量 $4.29 \times 10^{11} \text{ m}^3$,年均输沙量 $4.50 \times 10^8 \text{ t}$,平均含沙量 1.05 kgm^{-3} 。长江上游的四大主要支流金沙江、岷江、嘉陵江和乌江流域面积分别为 $50 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $13.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $16.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $8.7 \times 10^4 \text{ km}^2$,总面积 $88.3 \times 10^4 \text{ km}^2$,占长江上游流域面积的87.9%。

(1)宜宾以上的长江称为金沙江,和岷江在宜宾汇合后称为长江。金沙江源于青藏高原,流经横断山区,全长3500km,汇水面积 $50 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。屏山站是金沙江的把口站,汇水面积 $48.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,1956-2007年期间的年均径流量 $1.43 \times 10^{11} \text{ m}^3$,年均输沙量 $2.44 \times 10^8 \text{ t}$,平均含沙量 1.70 kgm^{-3} 。径流量和输沙量分别占长江宜昌站的33.5%和54.2%。攀枝花以下的金沙江下游,地质破碎、气候干热,人口较多,坡耕地大面积分布,水土流失强烈,是长江上游的主要产沙区之一,输沙模数高达 $3000 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。20世纪90年代以来,金沙江水电开发步伐加快,最大支流雅砻江上的二滩电站于1999年建成发电,干流上的溪落渡和向家坝电站正在建设中,分别于2007年和2008年截流。

收稿日期:2009-10-15

基金项目:水利部公益性项目“长江上游重点产沙区的侵蚀产沙类型及其控制技术”(200701034);中国科学院西部行动项目“三峡库区水土流失与面源污染控制试验示范”(KZCX2-XB2-07);国家重点基础研究发展计划973项目(2006CB40320)

作者简介:张信宝(1946-),男,研究员,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:zxbao@imde.ac.cn

表1 长江上游主要干支流大型水库特征值

Table 1 Characteristic values of large-scale reservoirs on mainstream of Yangtze River and its major tributaries

水系	水库名称	库容 / 亿 m ³	位置	控制面积 / 万 km ²	占把口站比例%	年均径流量 / 亿 m ³	占把口站比例%	年均输沙量 / 万 t	占把口站比例%	蓄水竣工时间
长江	葛洲坝	15.8	宜昌	100		4510*		45026*		1981年蓄水发电, 1989竣工
	三峡	393	秭归	100		4510*		45026*		2003年一期蓄水发电, 2008二期蓄水
金沙江	二滩	58	雅砻江下游	11.64	24.0	527	36.9	2720	11.1	1998年蓄水发电
嘉陵江	碧口	5.21	白龙江下游	2.60	16.7	86.72	13.3	2460	17.2(14.9, 1954-1970)	1976年蓄水, 1997年竣工
	宝珠寺	25.5	白龙江下游	2.84	18.2	105	16.1	2160	15.1(15.3, 1954-1991)	1996年第一台机组发电, 1998年竣工
	东西关	1.65	武胜县	7.73	49.6	277.2	42.6	7470	67.9	1995年蓄水发电
	东风	10.25	贵阳	1.81	20.9	109	22.2	1225.2	48.0	1994年蓄水发电
乌江	索风营	2.012	修文、黔西交界	2.18	25.1	124.6	25.3			2006年蓄水发电
	乌江渡	21.4	遵义县	2.77	31.3	158	32.1	1223.0	47.9	1983年蓄水发电
岷江	龚嘴	3.74	乐山大渡河下游	7.61	56.4	472.5	55.3	2990	64.0	1970年蓄水发电
	铜街子	2.0	乐山大渡河下游	7.64	56.6	473	55.3	2360	50.5	1993年蓄水发电, 1994竣工

*宜昌站值

(2) 岷江源于青藏高原东缘, 流经横断山区东北部、成都平原和川中丘陵区的西南部, 于宜宾汇入长江, 全长 790km, 流域面积 $13.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。大渡河是岷江的最大支流, 流域面积 $8.3 \times 10^4 \text{ km}^2$, 在乐山附近汇入岷江。乐山以下的岷江下游流经川中丘陵区, 为砂砾覆盖的基岩河床。高场站是岷江的把口水文站, 汇水面积 13.5 万 km^2 。1956-2007 年期间的年均径流量 855 亿 m^3 , 年均输沙量 0.467 亿 t, 平均含沙量 0.55 kg/m^3 。径流量和输沙量分别占长江宜昌站的 19.9% 和 10.4%。大渡河干流上的龚嘴和铜街子电站分别于 1970 年底和 1992 年蓄水发电, 两电站水库库容不大, 分别为 3.4 亿方和 2.0 亿方, 现已淤满。大渡河干流上在建电站主要有瀑布沟电站和泸定电站等。都江堰以上的岷江上游多为引水式中小型电站, 都江堰上游 9km 的紫坪铺电站为大型蓄水电站, 2006 年蓄水发电。

(3) 嘉陵江源于秦岭山地, 自北向南纵贯川中丘陵区, 于重庆注入长江, 全长 1119km, 流域面积 $16.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。嘉陵江上游的黄土区是流域的重点产沙区, 侵蚀模数高达 $3000 \text{ tkm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 以上; 中下游的川中丘陵区人口密集, 农事发达, 干流和主要支流为嵌入基岩的曲流河道, 多为砂砾覆盖的基岩河床。北碚站是嘉陵江的把口水文站, 汇水面积 15.6 万 km^2 。1956-2007 年期间的年均径流量 648.5 亿 m^3 , 年均输沙量为 1.10 亿 t, 平均含沙量 1.47 kg/m^3 , 径流量和输沙量分别占长江宜昌站的 15.1% 和 24.1%。上游主要支流白龙江上的碧口和宝珠寺电站分别于 1976 年和 1996 年蓄水发电。结合嘉陵江航道渠化, 90 年代以来修建了东西关等一系列中低水头航电枢纽等。

(4) 乌江流域位于长江南岸的贵州北部和重庆东南部的喀斯特高原山地区, 于涪陵汇入长江, 全长 1018km, 流域面积 $8.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。中下游河段为基岩深切河段, 多为砂砾覆盖的基岩河床。武隆站为乌江的把口水文站, 汇水面积 8.3 km^2 。1956-2007 年期间的年均径流量 492.0 亿 m^3 , 年均输沙量为 2550 万 t, 平均含沙量 0.52 kg/m^3 。径流量和输沙量分别占长江宜昌站的 11.4% 和 5.6%。乌江流域大部分为喀斯特高原山地区, 土壤流失量小, 河水含沙量低。位于乌江干流中段的乌江渡电站, 1983 年蓄水发电, 之后, 东风、和索风营等电站相继于 1994 和 2006 年蓄水发电。

3 大型水库影响下游河流输沙量的机制

大型水库影响下游河流输沙量的机制主要有三: (1) 水库拦沙, 输入下游的泥沙减少^[9-13]。(2) 水库蓄水滞洪, 下游洪峰流量减少, 挟沙能力降低, 输沙量减少。(3) 下游河床发生清水冲刷, 泥沙得到部

分补充,含沙量有所提高。大型水库对于干流对下游河流输沙量的影响是上述三种机制的综合结果^[14-16]。

大型水库对下游河流输沙量影响研究比较深入的水库,如黄河的三门峡水库和长江的三峡水库^[17-18],下游多为两岸来沙有限的平原、丘陵河流。长江上游山高谷深,地质破碎,水土流失强烈,两岸流域补给沙量大,研究干支流大型水库对下游河流输沙量的影响,必须考虑这一特点。水库拦沙量和调控径流状况长期不变的理想条件下,水库下游河流输沙时空变化的3种模式见图1。无支流来沙补给的条件下(图1(a)),建库前,河流输沙量不随河长而变化(t_0)。水库蓄水后,紧邻坝址的下游河段,输沙量的减少值等于水库拦沙量;以下的河段,由于河床冲刷补给泥沙,输沙量呈随河道长度的增加而增加的趋势。随着时间的推移($t_1 \rightarrow t_4$),河床冲刷补给的泥沙量逐渐减少,坝下各河段的输沙量也呈减少的趋势; $t \rightarrow t_\infty$,河床趋于稳定,无河床冲刷补给泥沙,坝下各河段的输沙量均等于紧邻坝址的下游河段的输沙量,不随河长而变化。支流来沙少量补给的条件下(图1(b)),建库前,河流输沙量随河长而缓慢增加,受支流来沙补给控制的输沙量增加值和距离的比值小(斜率, t_0)。水库蓄水后,和无支流来沙补给的情况相仿,紧邻坝址的下游河段,输沙量的减少值等于水库拦沙量;以下的河段,由于河床冲刷补给泥沙,输沙量呈随河道长度的增加而增加的趋势。随着时间的推移($t_1 \rightarrow t_4$),河床冲刷补给的泥沙量逐渐减少,坝下各河段的输沙量也呈减少的趋势; $t \rightarrow t_\infty$,河床趋于稳定,无河床冲刷补给泥沙,坝下河段年输沙量随距离变化的斜率(t_∞),和建库前相等, t_0 和 t_∞ 平行。支流来沙大量补给的条件下(图1(c)),建库前,河流输沙量随河长而迅速增加,受支流来沙补给控制的输沙量增加值和距离的比值大(t_0)。水库蓄水后,近坝河段,由于距离较短,支流来沙量增加量不多,水库滞洪引起的输沙能力降低对输沙量随距离变化的影响有限,输沙量随距离变化的时间效应和支流来沙少量补给的情况相仿,随着时间的推移($t_1 \rightarrow t_4$),河床冲刷补给的泥沙量逐渐减少,坝下各河段的输沙量也呈减少的趋势。远坝河段,由于支流来沙量大,水库滞洪引起的输沙能力降低对输沙量随距离变化的影响很大,降低后的河流输沙能力已不能全部输送包括支流来沙在内的河流泥沙,部分泥沙停积于河床内,河流输沙能力和来沙量的差值随距离的增加而增加。随着时间的推移($t_1 \rightarrow t_4$),由于泥沙的堆积,河床的组成、形态逐渐发生变化,如比降、糙率等,输沙能力逐渐恢复,输沙量逐渐增加。 $t \rightarrow t_\infty$,近坝河段,河床趋于稳定,无河床冲刷补给泥沙,坝下河段年输沙量随距离变化的斜率(t_∞),和建库前相等, t_0 和 t_∞ 平行;远坝河段,河床输沙能力和输沙量也恢复到建库前, t_0 和 t_∞ 平行。下游河流输沙量调整期的时间长短和库容大小密切相关,库容很大的河流,调整期历时可能长达数百年;库容小的河流,历时可能几年或十几年;库容很小的水库,可能仅影响当年或次年的下游河流输沙量,甚至无明显影响。

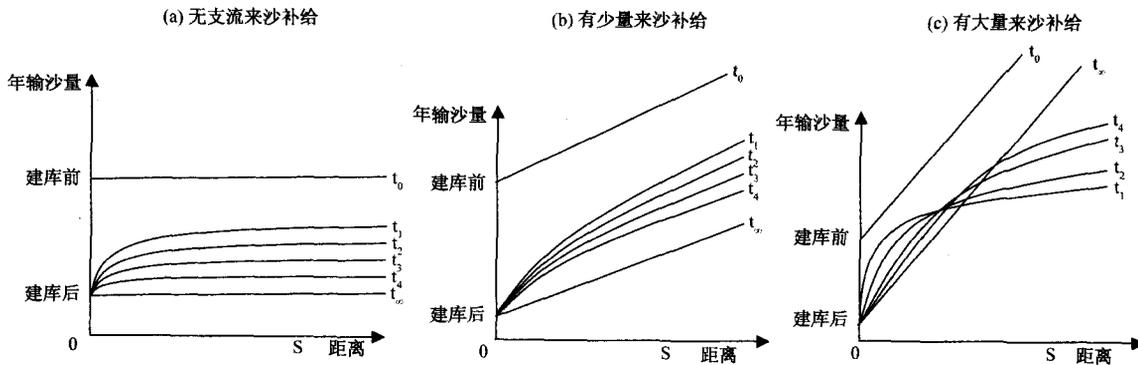


图1 大型水库河流输沙量的时空变化模式

Fig.1 Changes of sediment loads with time and distance in river channel below a large reservoir

4 大型水库对河流泥沙的影响

宜昌站、屏山站、北碚站、和武隆站的1956-2007年期间的径流量和输沙量双累积曲线见图2,径

流量和输沙量的时间变化见图 3。

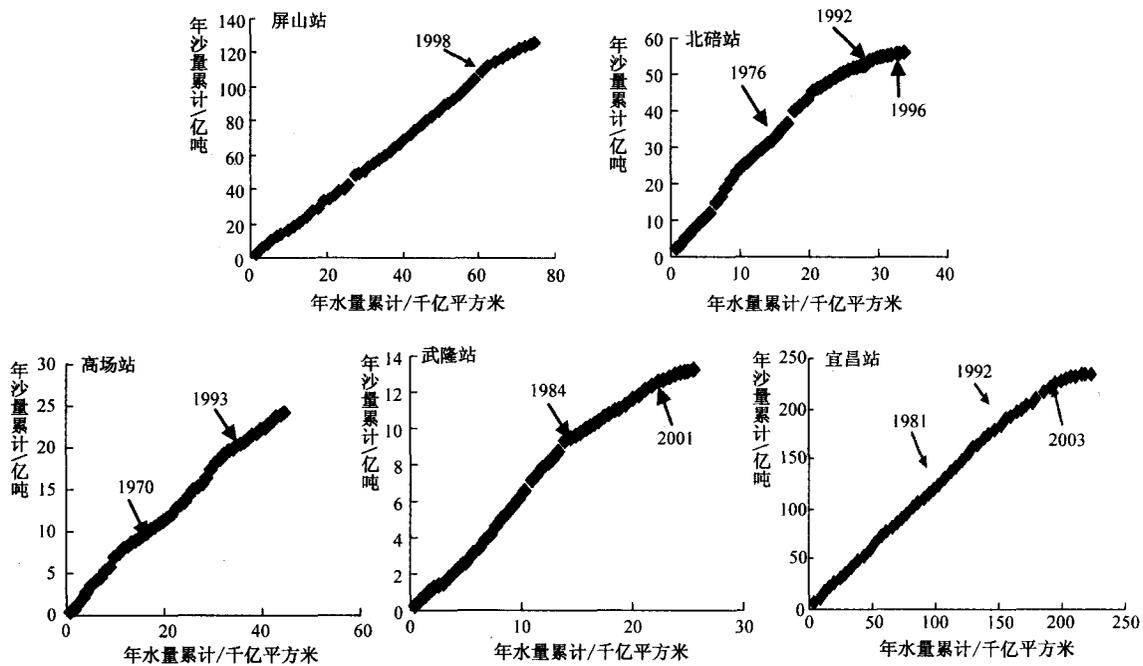


图 2 长江上游主要干支流把口站 1956 - 2007 年期间的年水量和年沙量双累积线

Fig. 2 Double accumulative curves at controlling stations on mainstream of Yangtze River and its four major tributaries

(1)金沙江。雅砻江上的二滩水库是金沙江流域最大的已建水库,库容 58 亿 m^3 ,1998 年蓄水发电。水库控制面积、径流量和输沙量分别占屏山站的 24.0%,36.9% 和 11.1%。1980 - 1990 年期间,金沙江的泥沙呈略有增加的趋势,屏山站的径流量和输沙量双累积曲线向输沙轴方向偏转(图 2)。笔者和潘久根等认为,植被破坏、毁林开荒、工程建设增沙强烈,是这一期间金沙江输沙量呈增长趋势的重要原因^[6,19]。屏山站的径流量和输沙量双累积曲线 1998 年拐点明显,1998 年后曲线突然向径流轴方向偏转,输沙明显减少(图 2)。1999 - 2007 年期间的径流量、输沙量和含沙量分别为 1 543.7 亿 m^3 、1.938 亿 t 和 1.23 kg/ m^3 ,为 1956 - 1998 年期间值的 109.2%、76.3% 和 69.9%。1999 - 2007 年期间的径流量略高于 1956 - 1998 年期间,但输沙量减少了 23.7%,河流泥沙明显减少(图 3)。二滩水库的年均输沙量仅占屏山站的 11.1%,但水库蓄水后屏山站的输沙量减少了 23.7%,显然不能用二滩水库拦沙解释屏山站输沙量减少的原因。二滩水库年均径流量 527 亿方,占屏山站的 36.9%,水库库容 58 亿 m^3 ,滞洪功能强,削减下游洪峰流量作用大。坝下河段有大量泥沙补给的大型水库河流输沙量时空变化模式(图 1(c))可以较好地解释二滩水库蓄水后,屏山站的输沙减少量大于雅砻江输沙量的现象。一些研究者将屏山站这一阶段输沙量的减少归功于“长治”和“天然林保护”等水土保持生态修复工程^[8,20]。1998 年长江特大洪水发生后实施的“天然林保护”工程和 1989 年起开展的“长治”水保工程的河流减沙效益是毋庸置疑的,但河流输沙量对这些工程的响应是渐变的,不可能出现“立竿见影”的效果。从金沙江攀枝花、华弹和屏山水文站 1988 - 1998 和 1999 - 2007 两个期间年均径流量和输沙量的对比可见,雅砻江汇口以上的攀枝花水文站,1999 - 2007 期间的年均径流量较 1988 - 1998 期间增加 5.1%,年均输沙量增加 13.6%;华弹站和屏山站年均径流量分别增加 5.3% 和 6.9%,输沙量分别减少 27.9% 和 31.9%。雅砻江汇口以上的金沙江流域 1998 年后也实施“天然林保护”工程,但攀枝花站的年均输沙量不降反升表明,该工程并没有立即引起主河输沙量的减少。华弹和屏山区间 1999 - 2007 年期间的输沙模数为 655 t/ $km^2 a$,1988 - 1998 期间为 1 273 t/ $km^2 a$,减少了 48.5%,该区间输沙模数 1998 年以后的急剧减少显然不是“天然林保护”工程等水土保持工程的主要原因,应主要归功于二滩水库建

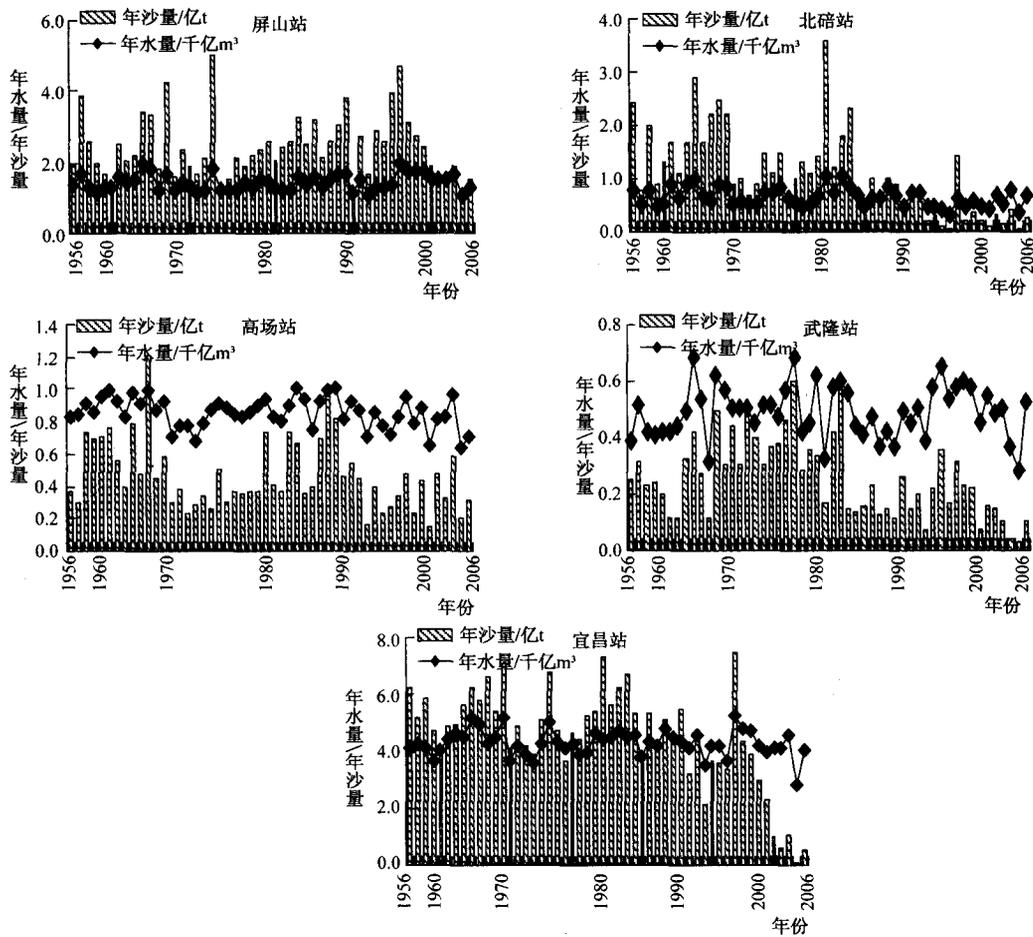


图3 长江上游主要干支流把口站 1956 - 2007 年期间的年水量和年沙量的变化
 Fig. 3 Variation of annual water discharges and annual sediment fluxes at controlling stations on mainstream of Yangtze River and its four major tributaries

成后金沙江输送能力的降低。上世纪 70 年代以来,笔者一直从事西南地区泥石流和水土流失的研究,考察中发现雅砻江汇口以下的小江、黑水河、牛栏江等金沙江支流有河口冲积扇扩大和河床上涨的趋势。

表 2 金沙江攀枝花、华弹和屏山水文站 1988 - 1998 和 1999 - 2007 两个期间年均径流量和输沙量的对比
 Table 2 Comparison of mean annual water discharges and annual sediment yields at Panzhihua, Huatan and Pinshan hydrological stations on Jinsha River between periods of 1988 - 1998 and 1999 - 2007

站名	集水面积/km ²	年均径流量/10 ⁹ m ³ ·a ⁻¹			年均输沙量/10 ⁸ t·a ⁻¹		
		1988 - 1998	1999 - 2007	变化 (%)	1988 - 1998	1999 - 2007	变化 (%)
攀枝花	28.5	0.59	0.62	0.03 (+5.1)	0.59	0.67	+0.08 (+13.6)
华弹	43.0	1.32	1.39	0.07 (+5.3)	2.15	1.55	-0.60 (-27.9)
屏山	48.5	1.44	1.54	0.10 (+6.9)	2.85	1.94	-0.91 (-31.9)

(2) 嘉陵江。碧口水库是嘉陵江干流上最早建成的大型水库,库容 2.60 亿 m³,1976 年蓄水发电,控制面积、径流量和输沙量分别占把口站的 16.7%、13.3% 和 17.2%,碧口水库下方的宝珠寺水库是库容最大的水库,库容 25.5 亿 m³,1996 第一台机组发电,水库控制面积、径流量和输沙量分别占把口站的 18.2%、16.1% 和 15.1% (宝珠寺水库水文资料的统计年限较碧口水库长);东西关水库是嘉陵江渠化工程中的最大的航电枢纽水库,库容 1.65 亿 m³,1995 年蓄水发电,水库控制面积、径流量和输沙量分别占把口站的 49.6%、42.6% 和 67.9%。东西关航电枢纽建成后,马回、红岩子、桐子壕、青居、金银

台、新政、金溪、小龙门、凤仪、沙溪等航电枢纽又相继建成,但这些枢纽水库的库容均小于1亿 m^3 。上世纪70年代以来,嘉陵江的输沙量呈总体减少的趋势,北碚站的径流量和输沙量双累积曲线向径流轴方向偏转。植被恢复和“长治”等水保生态工程和大量的塘库拦沙被认为是嘉陵江泥沙减少的主要原因^[6-8,18]。1981-1984年期间的曲线波动,和这一期间降水偏多,输沙量急剧增加有关。

碧口水库蓄水的当年,北碚站的年输沙量和含沙量突然减少,分别为0.70亿t和 $1.08kg/m^3$,为1956-1975年期间的43.8%和49.1%,1977年的输沙量和含沙量迅速恢复正常(图3)。碧口水库库容小,来沙多,水库淤积快,水库对当年北碚站的输沙量影响很大,对以后年份的影响不大。宝珠寺水库1991年二期截流,1992年后,双累积曲线更向径流轴方向偏转,输沙进一步减少(图2、3)。北碚站1992-2007年期间的年均径流量、输沙量和含沙量,分别为547.5亿 m^3 ,3000万t和 $0.55kg/m^3$,为1982-1991年期间值的77.3%,28.6%和37.2%。我们认为,北碚站1992-2007年期间输沙量较1982-1991年期间减少71.4%,可能不但与宝珠寺水库和1995年以来修建的东西关等嘉陵江一系列渠化航电枢纽水库干流大型水库的拦沙和蓄水滞洪,削减洪峰流量,降低河流挟沙能力有关;还与大量星罗棋布的塘库蓄水、农田灌溉用水增加和这一期间降水偏少导致的径流量减少22.7%有关;及流域生态环境改善、水土流失减轻和公路拦沙滞洪等有关。

(3)岷江。位于支流大渡河下游的龚嘴和铜街子电站是姐妹电站。龚嘴水库,库容3.74亿 m^3 ,1970年蓄水发电,控制面积、径流量和输沙量分别占高场站的56.40%,55.3%和64.0%;龚嘴水库下方的铜街子水库,库容2.2亿 m^3 ,1993年蓄水发电,控制面积、径流量和输沙量分别占高场站的56.6%,55.3%和50.5%。1956年以来的高场站输沙量波动明显。双累积曲线有1970年和1993年两个拐点,分别和1970年龚嘴水库和1993年铜街子蓄水发电对应。两水库-高场站区间为产状水平的中生代紫色砂页岩轻度水土流失区,流域补给泥沙有限,高场站输沙量的波动主要和两水库的修建有关。龚嘴和铜街子水库库容小,分别为7.61和7.64亿 m^3 ,削减洪峰流量,降低河流挟沙能力有限,发挥拦沙作用的期限短,几年后迅即恢复到水库修建前状况。因此,1956-1970阶段的水沙关系拟合线和1981-1993的基本重合,1981-1993的和1994-2007的基本重合(图4)^[21]。

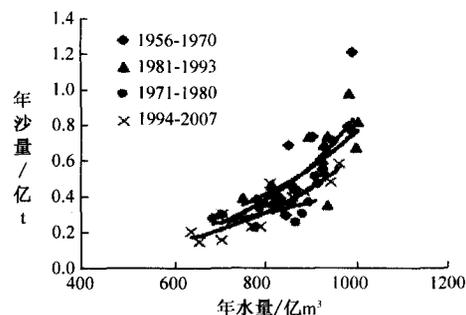


图4 岷江高场年水量和年输沙量相关线
(据府仁寿图修改)

Fig.4 Relation between annual water discharge and annual sediment flux at Gaochang hydrological station on Minjiang River (modified from Fu, et al., 2006)

(4)乌江。干流上最早的电站是1983年建成的乌江渡电站,电站水库库容21.4亿 m^3 ,控制面积、径流量和输沙量分别占武隆站的31.3%,32.1%和47.9%;1994年,东风电站建成,电站水库库容10.25亿 m^3 ,控制面积、径流量和输沙量分别占武隆站的20.9%,22.2%和48.0%;2006年,两电站之间的索风营电站建成,电站水库库容2.01亿 m^3 。从武隆站的径流量和输沙量双累积曲线(图2)可见,1984年前曲线呈抛物线形态,1962年后逐渐向输沙轴方向偏转,输沙量呈增加的趋势。武隆站1963-1983年期间的年均径流量和输沙量分别为521亿 m^3 和3740万t,为1956-1962年期间值的120.9%和176.4%。1984年前乌江河流泥沙的增加应主要归咎于这一期间的植被破坏和毁林开荒。双累积曲线有1984年和2001年两个明显的拐点。1984年后曲线向径流轴方向偏转,输沙量呈明显减少的趋势;2001年后更向径流轴方向偏转,输沙量进一步减少。武隆站1984-2000年期间的年均输沙量较1963-1983年期间减少48.7%,乌江渡的输沙量占武隆站的47.9%,乌江渡水库-武隆站区间为喀斯特高原山地区,水土流失轻微,流域补给泥沙有限,显然乌江渡电站水库拦沙是武隆站这一期间输沙量减少的主要原因。武隆站2001-2007年期间的年均径流量和输沙量分别为454亿 m^3 和960万t,为1984-2000年期间的91.5%和50%,2001年以后输沙量的进一步减少和乌江渡电站以上1990年以后修建的东风、洪家渡、索风营、构皮滩和普定等一系列电站水库有关。

(5)长江干流。宜昌站上游不远处的葛洲坝电站1981年蓄水发电,1989年竣工,库容15.8亿 m^3 ;

该电站上游 38km 处的三峡电站 2003 年一期蓄水发电,2008 二期蓄水发电,库容 393 亿 m^3 。二电站水库的控制面积、年均径流量和输沙量一般沿用宜昌站值,分别为 100 万 km^2 , 4 510 亿方和 4.5 亿 t (1956 - 2007)。宜昌站 1992 年前的径流量和输沙量一直处于正常的波动,葛洲坝电站对宜昌站的输沙量无明显影响(图 2、3)。1992 年后,径流量仍处于正常的波动,但输沙量有减少的趋势(图 2、3)。1992 - 2002 年期间的径流量和输沙量分别为 4 281.7 亿方和 3.77 亿 t,为 1956 - 1992 年期间值的 98.68% 和 71.765%;2003 - 2007 年期间的径流量和输沙量分别为 3 936.4 亿方和 0.67 亿 t,为 1992 - 2002 年期间值的 91.9% 和 17.8%。宜昌站 1992 - 2002 年期间的输沙量减少显然是支流来沙减少缘故。三峡水库一期蓄水后,由于水库蓄水拦沙,宜昌站输沙量急剧减少(图 2、3)。宜昌站和葛洲坝电站水库距离很近,坝下河床冲刷补给的泥沙量非常有限。

5 结语

(1) 大型水库对下游河流输沙量的影响,是水库拦沙,蓄水滞洪挟沙能力降低和下泄清水冲刷河床三种机制的综合结果。蓄水滞洪能力强的大型水库降低河流挟沙能力明显,可能是有大量泥沙补给的坝下河段,水库蓄水后输沙量减少的主要原因,有可能导致输沙减少量大于水库的拦沙量。如二滩水库 1998 年蓄水后,屏山站 1999 - 2007 年期间的输沙量较 1956 - 1998 年期间减少了 23.7%,远大于二滩水库入库沙量占屏山站输沙量的比例 11.1%。同期屏山站的径流量增加了 9.2%。

(2) 除生态环境改善、水土流失减轻、塘库和公路拦沙滞洪等原因外,大型水库是上世纪 80 年代以来武隆站与 90 年代以来屏山站和北碚站输沙量减少,也是 70 年代以来高场站输沙量波动的重要驱动力。

(3) 宜昌站 1992 - 2002 年期间输沙量减少是上游生态环境改善、水土流失工程减沙和水库拦沙的综合结果。三峡水库蓄水拦沙引起了 2003 年以后宜昌站输沙量的急剧降低。1992 - 2002 年期间的输沙量比 1956 - 1992 年期间减少 28.2%;2003 - 2007 年期间的输沙量又比 1992 - 2002 年期间减少 82.2%。

(4) 溪洛渡和向家坝电站的修建和瀑布沟电站的修建将分别引起金沙江和岷江输沙量的减少,三峡水库上游来沙也将进一步减少。

参考文献:

- [1] 史立人. 长江流域水土流失特征、防治对策及实施成效[J]. 人民长江, 1998, 29(1): 41 - 43.
- [2] 郭厚祯, 万彩兵. “长治”工程与长江流域跨世纪发展[J]. 人民长江, 1998, 29(2): 38 - 39.
- [3] 刘毅. 嘉陵江河流泥沙特性分析[A]. 三峡水库来沙来水条件研究论文集[C]. 水利部长江水利委员会水文测验研究所. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1992. 15 - 21.
- [4] 张平, 金沙江河流泥沙特性分析[A]. 三峡水库来沙来水条件研究论文集[C]. 水利部长江水利委员会水文测验研究所. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1992. 8 - 14.
- [5] 国务院三峡工程建设委员会办公室泥沙课题专家组, 中国长江三峡工程开发总公司三峡工程泥沙专家组, 长江三峡工程泥沙问题研究—长江三峡工程上游来沙与水库泥沙问题(一), 第四卷. 北京: 知识产权出版社, 2001.
- [6] 张信宝, 文安邦. 长江上游干流和支流河流泥沙近期变化及其原因[J]. 水利学报, 2002, (4): 56 - 59.
- [7] 许炯心. 人类活动和降水变化对嘉陵江流域侵蚀产沙的影响[J]. 地理科学, 2006, 26(5): 432 - 437.
- [8] 许炯心, 孙季. 长江上游重点产沙区产沙量对人类活动的响应[J]. 地理科学, 2007, 27(2): 211 - 218.
- [9] Ackermann, W. C., White, G. F., Worthington, E. B., (Eds.), 1973. Man-made lakes: their problems and environmental effects. American Geophysical Union Monograph 17, Washington, DC.
- [10] Brune, G. M., Trap efficiency of reservoirs. Transactions American Geophysical Union[J]. 1953, 34 (3): 407 - 418.
- [11] Xu Jiongxin. Plausible causes of temporal variation in suspended sediment concentration in the upper Changjiang River and major tributaries during the second half of the 20th century, Quaternary International, 2009, 208: 85 - 92.
- [12] Walling, D. E., Erosion and sediment yield in a changing environment. In: Branson, J. (Ed.), Global Continental Changes: the Context of Palaeohydrology. Special Publication, Geological Society, London, 1996: 43 - 56.

- [13] Walling, D. E. ,The response of sediment yields to environmental change, IAHS Publication, 1997, 77 – 89.
- [14] Fu K. D. , D. M. He and X. X. Lu, Sedimentation in the Manwan reservoir in the Upper Mekong and its downstream impacts, Quaternary International, 2008, (186) 91 – 99.
- [15] 卢金友. 三峡工程下游河床冲刷对护岸工程的影响[J]. 人民长江, 2002, (8): 23 – 25.
- [16] 卢金友, 郑文燕. 长江科学院长江泥沙若干问题研究与实践[J]. 泥沙研究, 2006, (5): 73 – 80.
- [17] 韩其为. 黄河下游输沙及冲淤的若干规律[J]. 泥沙研究, 2004, (3): 1 – 13.
- [18] 韩其为. 三峡水库运行后城汉河段会只淤不冲吗? ——对“关于三峡工程对城陵矶防洪能力影响有关研究的讨论”的讨论[J]. 水力发电学报, 2006, 25(6): 79 – 90.
- [19] 潘久根. 金沙江流域的河流泥沙输移特征[J]. 泥沙研究, 1999, (2): 46 – 49.
- [20] 郭生练, 徐高洪, 张新田. “长治”工程对三峡入库泥沙特性变化影响研究[J]. 人民长江, 2004, 35(11): 1 – 6.
- [21] 府仁寿, 齐梅兰, 方红卫. 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 – 110.

Effects of large-scale hydropower reservoirs on sediment loads in Upper Yangtze River and its major tributaries

ZHANG Xin-bao^{1,2}, WEN An-bang¹, D E Walling³, LU Xi-xi⁴

(1. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;*

2. *State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;*

3. *Department of Geography and Archaeology, Exeter University, Exeter EX4, 4RJ, UK;*

4. *Department of Geography, National University of Singapore, Singapore)*

Abstract: The mechanics of trapping sediments and detaining floods to reduce flood discharges and sediment-carrying capacity by large-scale reservoirs on main streams is illustrated. Three patterns of sediment yield variation with distance and time in the river channels below reservoirs under conditions of little, limited and large sediment recharge from the downstream watershed are shown in this paper. By analyses of runoff and sediment yield changes after construction of large-scale reservoirs on main streams, it is suggested that construction of those reservoirs was an important driving force of sediment yield reductions since 1990s in the Jinsha and Jialing Rivers and since 1980s in the Wujiang River as well as of sediment load fluctuation since 1970s in the Minjiang River. The annual sediment yield during the period of 1992 – 2002 decreased by 28.2% of the yield during the period of 1956 – 1992 and the reduction was mainly contributed by the sediment yield reductions of the Jialing and Jinsha Rivers since 1998. The annual sediment yield at Yichang station during the period of 2003 – 2007 decreased by 82.2% of the yield during the period of 1992 – 2002 and the rapid reduction since 2003 was no doubt caused by the Three Gorges Reservoir.

Key words: Upper Yangtze River; major tributaries; sediment load; large-scale hydropower reservoir