

长江上游卵石推移特性变化及驱动力分析

王渺林^{1,2,3}, 夏 军¹, 刘德春²

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 长江水利委员会长江上游水文水资源勘测局, 重庆 400014; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 长江上游的水沙特性变化, 直接关系到三峡工程的调度运行。朱沱站和寸滩站是长江上游与三峡水库的水沙主要控制站。本文分析了朱沱、寸滩站卵石推移特性的近期变化, 发现寸滩站从 1981 年起、朱沱站从 1991 年起卵石推移特性发生了明显变化, 主要体现在: 1) 卵石推移量系统减小: 朱沱站 1992~2001 年卵石年均推移量比 1975~1991 年减少了 46.9%, 寸滩站 1982~2001 年比 1966~1981 减少了 40.6%; 2) 推移质粒径细化, 中数粒径细化了约 11mm; 3) 流量-输沙率关系发生明显变化: 朱沱站输沙率系数 B 减少 47.5%, 寸滩站系数 B 减少 41.1%; 4) 输沙不平衡量增大, 计算的磨损系数增大近 70%。长江上游卵石推移特性变化的驱动力分析结果表明: 采取水土流失治理等措施是直接原因, 水利工程拦沙和建筑材料开采等人类活动是主要影响因素。依据上述分析, 本文指出, 应当继续加强水土保持建设, 尽快开展长江上游和支流泥沙运移和淤积情况及规律调研。并建议以可开采沙量为依据, 严格控制采沙。

关键词: 卵石推移质; 三峡工程; 长江上游; 驱动力; 泥沙

中图分类号: P931; P333.4 **文章编号:** 1000-0585(2004)05-0657-10

1 引言

泥沙问题是长江三峡工程科研工作中的一个重要问题, 受到社会各界的广泛关注^[1]。长江泥沙主要来自上游的金沙江、嘉陵江, 汉江、鄱阳湖及太湖水系也有部分泥沙注入^[2]。深入探讨、分析长江三峡工程上游河道卵石推移质输移特点及其影响因素是一个很重要的研究课题^[3]。早在 20 世纪 50 年代有关单位就对长江上游及其支流的卵石推移质和河床质进行了调查分析, 并对推移质的输移规律、采样器效率的率定作了大量的工作。随着三峡工程可行性研究的需要, 在长江上游及三峡河段先后设置了朱沱、寸滩、万县、奉节、宜昌等 5 个推移质测站, 进行了多年的推移质测验工作, 收集了大量的实测资料。其中卵石测验以寸滩站年限最长, 从 20 世纪 60 年代初开始, 至今已积累了 30 余年的实测成果^[4]。由此对长江上游及三峡河段卵石推移质的来源、数量、特性及其运动规律等作了系统的研究^[5~8]。结合实测资料的整理与分析, 提出了较可靠的适用于长江上游及三峡河段的推移质输沙计算公式^[3,9], 初步满足了生产设计的需要。在国外, Margaret Torizzo 等建立适合 Colorado 山区河流及 Vedder 河流输沙模型^[10,11]。

20 世纪 90 年代初关于长江卵石推移量方面的讨论较多^[12~14]。对于卵石推移量是否

收稿日期: 2004-02-05; 修订日期: 2004-06-01

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目 (KZCXZ-SW-317)

作者简介: 王渺林 (1975-), 男, 安徽黄山人, 中国科学院地理科学与资源研究所博士生, 长江水利委员会长江上游水文水资源勘测局工程师。从事流域水沙模拟和水环境研究。E-mail: wangml@gsnrr.ac.cn

会随时间发生趋势性变化的主要研究有：高焕锦通过对寸滩站 1966 ~ 1984 年实测卵石推移质资料分析，认为三峡入库卵石推移量随时间无系统增大或减少趋势^[15]；向治安等根据 1989 年以前的观测资料分析认为朱沱站卵石推移量没有系统性变化趋势，而寸滩站卵石推移量存在减少趋势^[16]。随着实测资料的日渐积累，长江上游卵石推移特性可能会发生新的变化。由于卵石推移质级配宽，颗粒大，室内试验范围难以达到，通常应充分利用水文站实测资料研究其输移特性变化规律^[9]。寸滩站位于长江干流和嘉陵江汇合口下游 7.5 km 的重庆市江北区寸滩镇，集水面积为 866559 km²，是三峡库区的入库控制站。寸滩站 1966 年正式开展卵石推移质测验；朱沱站位于寸滩站上游 151km，1975 年开始卵石推移质测验。上述两个测站位置见图 1。本文利用朱沱、寸滩站实测卵石推移质资料，分析了长江上游卵石推移特性的近期变化，以及引起这些变化的主要驱动力。



图 1 长江上游水系示意图

Fig. 1 Map of the main water system of the upper reaches of Yangtze River

2 研究区域卵石来源

长江上游以上流域面积占长江流域总面积的一半，域内支流众多，河道多属山区性河流，水系示意图见图 1。河流泥沙来自地表侵蚀。从地表侵蚀到河流泥沙输移，是一个很复杂的物理过程。整个过程包括在水力、冰川、风力、重力、人类活动等因素作用下的地表侵蚀，和河流输移泥沙两个过程。长江上游年平均重力侵蚀总量约 1.2 亿 t，占总侵蚀量 15.7 亿 t 的 8%，其中 60% 以上在金沙江^[8]。重力侵蚀物质在水流作用下，其中一部分成为江河推移质的来源。从储量分析，长江上游推移质来源储量是相当丰富的。由山区进入四川盆地主要河流为嘉陵江、涪江、岷江、青衣江、大渡河和金沙江，它们出山位置分别为昭化、武都、紫坪铺、漕鱼滩、龚嘴和新市镇。6 条河流分别于重庆和宜宾等地汇入长江。河流由山区进入四川盆地，比降、流速锐减，盆地区间流域推移质补给微弱，推移质输沙不平衡，导致输移量沿程减少，即重庆河段推移质输沙量应远小于上述 6 条河流推移

质输沙量的总和^[8]。长江上游主要的推移质输沙量来源见表 1。可以看出，长江上游推移质输沙模数地区之间差异很大。

表 1 长江上游主要的推移质输沙量来源

Tab. 1 Main sources of the pebble bed load in the upper reaches of Yangtze River

河流	河段	积水面积 (km ²)	推移质 输沙量 (万 t/a)	推移质 输沙模数 (t/km ² ·a)	定量单位
雅砻江	二滩	116490	67	5.75	电力部成都院
金沙江	巧家	425948	214	5.02	电力部成都院
岷江	紫坪铺	25350	70	27.61	四川水科院
大渡河	龚嘴	76130	60	7.88	龚嘴水电厂
青衣江	漕鱼滩	10789	75	69.52	四川水科院

注：统计年限 1970 ~ 1995 年^[8]。

3 卵石推移质输沙特性变化

3.1 推移量变化

据统计，朱沱站（1975 ~ 2001 年）、寸滩站（1966 ~ 2001 年）多年平均卵石推移量分别为 27.0、22.5 万 t，见表 2。寸滩站卵石推移量比朱沱站少 4.5 万 t，主要是由于受卵石沿程分选沉积和磨损的影响。寸滩站大于 64mm 的卵石推移量比朱沱站少 4.6 万 t，可见偏大的部分主要是粒径大于 64mm 的粗颗粒卵石引起的。

水文学常用双累积曲线分析自然或人类活动对水文要素的影响，分析时一般选择成因关系好的因子作为双累积曲线的参证因子。水沙双累积曲线是反映流域水沙系统变化的特性曲线，流域水沙特性如发生趋势性变化时，在累积水沙量关系线上将表现出明显的转折，双累积曲线斜率发生变化^[17]。通过对朱沱（1975 ~ 2001 年）、寸滩站（1966 ~ 2001 年）年径流量与推移量双累积曲线（见图 2）的分析可以大体地看出，寸滩站 1981 年前后、朱沱站 1991 年前后双累积曲线明显分成两部分，后期卵石推移量明显减小。分别计算两个阶段的年均径流量和年均推移量，结果见表 3。据统计，朱沱站 1992 ~ 2001 年年均卵石推移量比 1975 ~ 1991 年减少了 46.9%，寸滩站 1982 ~ 2001 年年均卵石推移量比 1966 ~ 1981 年减少了 40.6%。同时从图 3 寸滩站、图 4 朱沱站年径流量与推移量序列变化过程看，后期的推移量几乎都在前期推移量的平均值之下，这也说明后期的卵石推移量明显减小。因此，我们以 1991 年和 1981 年为分界年份分别对朱沱、寸滩站划分为两个阶段来研究：朱沱站前期（1972 ~ 1991 年）和后期（1992 ~ 2001 年），寸滩站前期（1966 ~ 1981 年）和后期（1982 ~ 2001 年）。

表 2 多年平均卵石推移量及粒径分组推移量

Tab. 2 Mean amount of the pebble bed load and the grouping amount

站 名	多年平均推移量 (万 t)	粒径 (mm) 分组推移量 (万 t)							统计年份
		10 ~ 16	16 ~ 32	32 ~ 64	64 ~ 100	100 ~ 150	150 ~ 200	> 200	
朱 沱	27.0	0.68	5.35	9.42	7.18	3.43	0.81	0.14	1975 ~ 2001
寸 滩	22.5	1.67	5.42	8.44	4.68	1.89	0.38	0.02	1966 ~ 2001

表 3 不同阶段卵石推移量

Tab. 3 Amount of the pebble bed load during different periods				
站 名	阶 段	年均径流量 (亿 m ³)	年均推移量 (万 t)	减小率 (%)
朱 沱	1975 ~ 1991	2649	32.6	
	1992 ~ 2001	2677	17.3	46.9
寸 滩	1966 ~ 1981	3376	28.8	
	1982 ~ 2001	3360	17.1	40.6

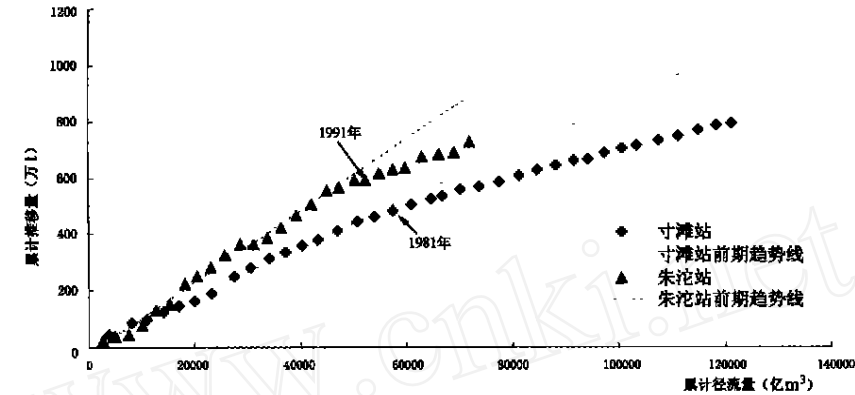


图 2 朱沱、寸滩站年径流量与推移量双累积曲线
Fig. 2 Double-mass curve between annual runoff and annual amount of the pebble bed load at Zhutuo and Cuntan stations

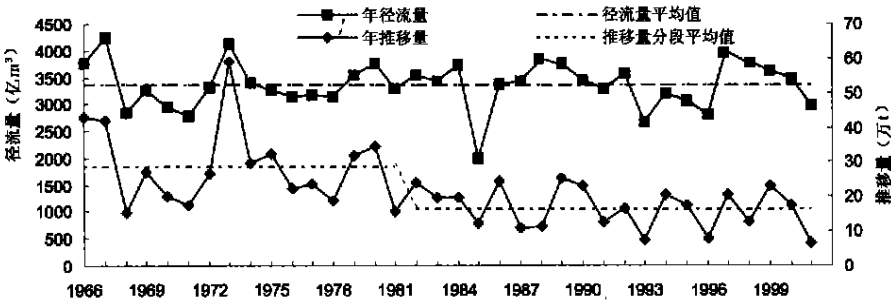


图 3 寸滩站年径流量与推移量序列变化过程
Fig. 3 Annual runoff and annual amount of the pebble bed load at Cuntan station

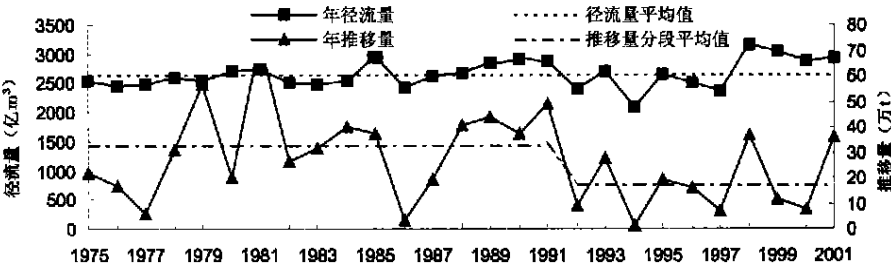


图 4 朱沱站年径流量与推移量序列变化过程
Fig. 4 Annual runoff and annual amount of the pebble bed load at Zhutuo station

3.2 颗粒级配变化

将朱沱、寸滩站两个阶段的各年推移质颗粒级配按推移量加权平均，得到两站前、后两个阶段的平均级配，计算结果见表 4。可以看出朱沱、寸滩推移质粒径明显发生细化。朱沱站中数粒径 D_{50} 细化了约 9mm；寸滩站中数粒径细化了约 11mm。

表 4 不同阶段卵石推移质颗粒级配

Tab. 4 Grading size of the pebble bed load during different periods										
站名	阶段	小于某粒径 (mm) 沙重百分数 (%)								D50 (mm)
		10	16	32	64	100	150	200	> 200	
朱沱	1975 ~ 1991	0	2.0	19.0	73.0	83.2	96.0	99.4	100	58.0
	1992 ~ 2001	0	6.3	29.5	65.0	85.4	98.3	99.9	100	49.2
寸滩	1966 ~ 1981	0	5.6	26.7	62.5	85.3	97.0	99.8	100	51.8
	1982 ~ 2001	0	11.5	38.0	76.0	95.6	99.8	100		41.0

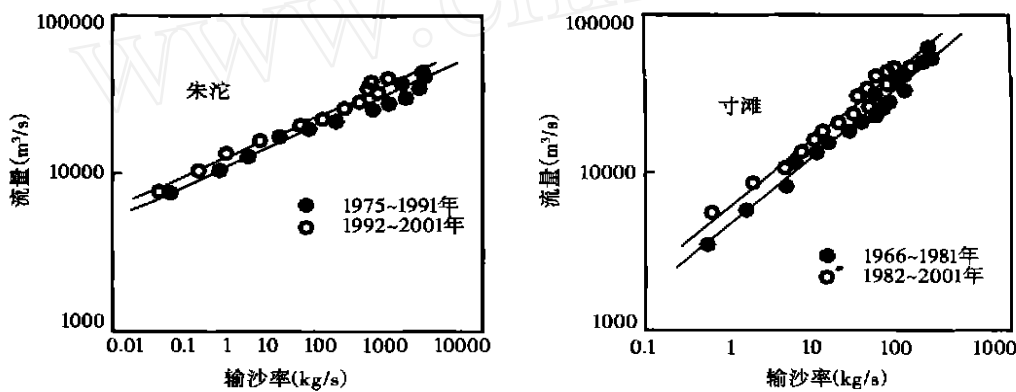


图 5 朱沱、寸滩站卵石输沙率与流量关系

Fig. 5 Relationship between bed load transport rate and runoff

3.3 水沙关系变化

输沙量满足水大则沙大，水小则沙小之规律。总的说来，水量与卵石输沙量关系基本相应。推移质输沙率与流量关系可写成如下形式^[18]

$$G_s = B Q^n \tag{1}$$

式中： G_s 为推移质输沙率 (kg/s)； Q 为流量 (m^3/s)； n 为指数，反映推移质输沙率对水流的敏感程度； B 为系数，与床沙组成、泥沙补给等条件有关。分析两站实测推移质输沙率与流量资料，相关关系见图 5，从图上看，朱沱、寸滩站流量 - 输沙率点据分成两个系列，在同一流量下后一阶段输沙率偏小。分别求得前后两个阶段的输沙率系数 n ， B ，结果见表 5，可以看出，朱沱、寸滩站两个阶段水沙关系指数 n 基本不变，而从表 3 可知前后两阶段的平均年径流量几乎是相等的，两者同时说明水流条件在两个阶段并没有发生明显变化。引起输沙率偏小的主要是系数 B ，朱沱站系数 B 减少 47.5%，寸滩站系数 B 减少 41.1%，减少幅度与表 3 中的推移量减少幅度几乎相等。这说明朱沱、寸滩站

卵石推移量的减少与水流因素关系不大，主要是床沙粗化和卵石补给量减少所致。

表 5 朱沱、寸滩站两个阶段输沙率系数

Tab. 5 Parameters of bed load transport rate during different periods

朱沱站			寸滩站		
阶段	B	n	阶 段	B	n
1975 ~ 1991	6.324 ×10 ⁻²⁴	5.70	1966 ~ 1981	3.362 ×10 ⁻⁹	2.26
1992 ~ 2001	3.319 ×10 ⁻²⁴	5.69	1982 ~ 2001	1.979 ×10 ⁻⁹	2.26

3.4 输沙不平衡量增大

推移质输沙量沿程递减，即推移质输沙不平衡。卵石推移质在运动过程中，存在一个不可忽视影响输移量的因子，即磨损作用。国内外泥沙工程师，通过野外观测和试验，都证明磨损作用是客观存在的。磨损主要表现为卵石运动中与河床的磨擦，和相互间的撞击、磨损。根据史当贝（H. Sternberg）的研究，卵石的磨损可用指数公式表示^[6]

$$W = W_0 e^{-CL}$$
 (2)

式中，W 为初始重量，W₀为运行距离 L 后的重量，C 为磨损系数。

分别计算朱沱、寸滩站 1975 ~ 1981 年和 1982 ~ 2001 年的推移量，依次分析不平衡量和磨损系数，结果见表 6。由表 6 看出，不平衡量占的比重增加，计算的磨损系数增大近 70%，其原因与人类活动对输沙的影响有关。

表 6 朱沱、寸滩站输沙不平衡量分析

Tab. 6 Analysis result on sediment discharge imbalance

阶段	朱沱站平均 推移量 (万 t)	寸滩平均 推移量 (万 t)	不平衡量 (万 t)	磨损率 (%)	磨损系数
1975 - 1981	32.2	25.7	6.6	20.4	1.49 ×10 ⁻³
1982 - 2001	25.1	17.1	8.0	31.9	2.54 ×10 ⁻³

4 驱动力分析

推移质的输移特性变化，与推移质的来源、推移质运动的动力——径流变化以及输移的外部影响因素——人类活动影响有关。人类活动对河流推移质的影响，取决于人类活动的方式和程度。下面分别从来源、径流和人类活动三个方面来分析输沙变化的驱动因素。

4.1 卵石来源的变化

河道卵石主要来源于山体滑坡、崩塌、泻溜、泥石流、沟谷冲刷等，其来源的数量将对长江上游输沙量产生直接影响。李长安等^[19]指出，长江上游森林覆盖率减少了约一半，水土流失增加了一倍，由此推出长江上游泥沙推移质有增加的趋势。但其研究的参考数据大部分是基于 1990 年以前的。而 1989 年以来，各级政府加强了对水土流失、滑坡、泥石流的治理力度^[20]，如在嘉陵江和金沙江流域内开展了以“长治”工程为主的大规模水土流失治理。迄止 1996 年，嘉陵江上游和嘉陵江中下游两个治理区，共完成治理面积 2.3 万 km²；金沙江下游治理区，共完成 2.1 万 km²面积的治理工作^[21]。研究表明，嘉陵江、

岷江的河流泥沙呈明显减少的趋势，金沙江屏山站泥沙呈略有增加的趋势^[22]。但朱沱站在金沙江、岷江来沙重新组合后泥沙有减小趋势，同样寸滩在上游来沙组合后泥沙也有减小趋势^[23]。这样，有效减少了河道卵石来源，从而导致长江上游输沙量的减少。

4.2 径流变化的影响

输沙量满足水大则沙大，水小则沙小之规律。四川盆地不同代表站年降雨量和 5 年、10 年滑动平均图表明^[24]，自 20 世纪 60 年代以来，四川盆地大部分地区年降水量呈减少趋势。另外，从 50 年代开始，气温开始下降，由偏暖阶段进入偏冷阶段，90 年代仍处于偏冷阶段，但已开始回升。与气候的变化相对应，从 50 年代开始，长江上游年径流逐渐减少^[25]。但我们分析前后两阶段两站平均年径流量，两者之间几乎相等（见表 3），这可能与 90 年代以来长江上游年径流量已开始逐渐增加有关。这说明了径流因素不是影响朱沱、寸滩站卵石推移量减少的原因。

4.3 人类活动影响

4.3.1 水利工程拦沙 大型水坝等水利工程有拦沙的作用，如葛洲坝枢纽蓄水后，坝下游宜昌站的卵石推移质大量减少^[16]。同样在长江上游修建的水坝，使坝上卵石推移质在相当长的时间内不能向下输移，从而使坝下卵石来源临近枯竭，导致推移量迅速减少。大约 20 世纪 80 年代后期开始，长江上游掀起地方兴建中小水电高潮，其中以沱江、涪江、嘉陵江等盆地河流新建的水电站、水库特多，呈梯级开发趋势。大部分水库位于盆地，控制了上游产沙区。如铜街子、宝珠寺、二滩（拦沙能力均在 $0.8 \times 10^8 \text{ t}$ 量级上）等大型水电站的兴建，大大扩充了长江上游地区的水库拦沙能力。以嘉陵江为例，其干支流修建的水利工程有：1992 年修建的嘉陵江干流东西关电站、1980 年修建的渠江凤滩电站以及 1988 年修建的涪江涪沱电站等。李丹勋等^[26]通过对嘉陵江流域卵石运动与卵石输沙量研究，得出嘉陵江干流北碚站 1961 ~ 1970 年的平均卵石推移量为 18.5 万 t。而 2002 年汛期 5 ~ 10 月，在北碚站以上 30km 的东津沱站实测卵石推移量仅 0.053 万 t，与前者相比，推移量明显偏小。究其原因，主要是与水利工程拦沙有关。另外，2030 年前在长江上游已建、在建和可能建设的大型水库还有：乌江的乌江渡、东风、洪家渡、彭水、构皮滩；嘉陵江的碧口、亭子口、合川；岷江的瀑布沟；金沙江的向家坝、溪落渡^[27]。这些水库将在很大程度上减少其下游和三峡库区的卵石数量。但与此同时，水利工程拦沙将可能造成坝上淤积，从而引起长江支流泥沙淤积严重。从遥感影像可以清楚地看到，近一二十年长江上游各二、三级支流河道泥沙呈加速堆积态势，部分支流呈现出辫状河道特点，一半以上的支流出现泥沙加积现象^[19]。以金沙江为例，支流河道泥沙较为严重，见表 7。

表 7 长江上游金沙江支流泥沙淤积速率^[28]

Tab. 7 Sedimentation rate of silt in tributaries of Tingsha River

河流	小江	大盈江	白龙江	北峪河	溪口河
沉积速率 (cm/a)	13 ~ 20	5 ~ 10	5 ~ 16	9	19

4.3.2 建筑材料开采 长距离、大范围的建筑材料开采，一方面直接减少了河床卵石储量，另一方面开挖留下了大量槽、坑、窝，在洪水期，上游下来的卵石推移质就在这些槽、坑、窝淤积下来，从而导致测验断面卵石推移质补给量迅速减少。随着城市建设规模

的扩大，开采量也越来越大。由于建筑材料主要开采的是粗颗粒的卵石，故对卵石推移特性影响较大。1993、2002 年，长江水利委员会曾对长江、嘉陵江的建筑材料开采情况进行过调查，调查结果见表 8。可以看出，两江卵石开采数量较大，每年达几百万吨，而实测卵石推移量每年仅几十万吨，卵石开采量远远大于推移量。因开采量大于补给量，导致滩面逐年下降，如重庆珊瑚坝江心洲，从 1977 年到 1996 年，洲面平均下降近 1m，局部地区下降了 4m 左右，洲体明显变小；又如江津大沙坝边滩，从 1977 年到 1996 年，滩面高程平均下降了 2.5m；位于嘉陵江出口的金沙碛卵石边滩，由于河床连年开挖，加上上游卵石补给不充分，河床已露出大片基岩。床面开挖后，高程降低，过水面积增大，流速减小，水流输沙能力减弱；加之被开采的主要是粒径小于 50mm 的中、小颗粒，这种卵石被取走后，床面留下的是大于 50mm 的粗颗粒，引起床沙粗化，增大卵石起动难度，导致输沙能力进一步减小和推移量减少。

表 8 1993、2002 年采砂调查 (单位: 万 t)

Tab. 8 Amount of the sediment excavated during 1993 and 2002

江名	1993 年				2002 年			
	调查范围及长度	沙	砾卵石	总和	调查范围及长度	沙	砾卵石	总和
长江	长寿~大渡, 337km	555	310	865	铜锣峡~泸州, 277km	507	386	893
嘉陵江	朝天门~盐井, 75km	245	105	350	朝天门~渠河嘴, 104km	290	67	357

5 结论与讨论

本文重点分析了朱沱、寸滩站卵石推移特性的近期变化，发现寸滩站从 1981 年起、朱沱站从 1991 年起卵石推移特性发生了明显变化，主要体现在：1) 卵石推移量系统减小：朱沱站 1992~2001 年卵石年均推移量比 1975~1991 年减少了 46.9%，寸滩站 1982~2001 年比 1966~1981 减少了 40.6%；2) 推移质粒径细化，中数粒径细化了约 11mm；3) 流量-输沙率关系发生明显变化：朱沱站输沙率系数 B 减小 47.5%，寸滩站系数 B 减小 41.1%；4) 输沙不平衡量增大，计算的磨损系数增大近 70%。

分别从推移质的来源、运动动力和人类活动三方面分析引起这些变化的主要驱动力，结论如下：采取水土流失治理等措施是直接原因，而动力因素——径流并没有发生变化，水利工程拦沙和建筑材料开采等人类活动是主要的影响因素。

长江上游的卵石推移特性变化等水沙变化，直接反应三峡工程入库河段的泥沙变化控制情况。因此，进一步加强观测、研究长江上游水沙变化是非常必要的。另一方面，研究中发现存在的问题有：

(1) 水利工程拦沙的同时造成了上游的淤积。资料分析表明，长江上游水利工程库容在阻挡流失水土进入长江主河道过程中起了非常重要的作用，但给水利工程本身和长江流域系统都留下了隐患^[29]。因此，在水力资源开发过程中，应当继续加强水土保持，进行生态环境建设。同时应尽快开展长江上游和支流泥沙运移和淤积情况及规律的调研。

(2) 大量建筑材料开采导致河床和滩面逐年下降，破坏了天然河床。因此本文提出可开采沙量的概念，类似于区域水资源承载力^[30]的定义，我们把“可开采沙量”定义为：

一定时期, 在某种环境状态下, 以维护河道良性发展为条件, 区域可开采沙量的阈值。建议以可开采沙量为依据, 严格控制在河道内开采建筑材料等采沙行为。

参考文献:

- [1] 张仁. 长江三峡工程的泥沙问题及对策. 中国三峡建设, 1995, (3): 18 ~ 19.
- [2] 王腊春, 陈晓玲, 储同庆, 黄河、长江泥沙特性对比分析. 地理研究, 1997, 16(4): 71 ~ 79.
- [3] 张之湘, 惠仕兵, 沈焕荣, 等. 宽级配卵石推移质输移随机过程的分维研究. 泥沙研究, 2000, (4): 60 ~ 64.
- [4] 冷魁, 王明甫. 非均匀卵石野外实测资料的整理与分析. 武汉水利电力大学学报, 1995, 28(2): 173 ~ 180.
- [5] Duo F, Cao S, Zhang Z. Transport characteristics of gravel bed-load with a wide size distribution. In: Proc. 4th Int. Symp. on River and Sedimentation, Water Resources Press, 1989. 498 ~ 505.
- [6] 林承坤. 岷江卵石推移质泥沙与数量特性. 地理学报, 1995, 20(3): 224 ~ 233.
- [7] 刘黎明, 王维国, 周风琴. 重庆河段卵石来源来量及特征研究. 人民长江, 2003, 34(12): 28 ~ 30.
- [8] 朱鉴远. 长江上游床沙变化和卵石推移质输移研究. 水力发电学报, 1999, (3): 86 ~ 102.
- [9] 曹叔尤, 刘兴年, 方铎, 等. 山区河流卵石推移质的输移特性. 泥沙研究, 2000, (4): 1 ~ 5.
- [10] Torizzo Margaret, Pitlick John. Magnitude-frequency of bed load transport in mountain streams in Colorado. Journal of Hydrology, 2004, 290: 137 ~ 151.
- [11] Martin Yvonne. Evaluation of bed load transport formulae using field evidence from the Vedder River, British Columbia. Geomorphology, 2003, 53: 75 ~ 95.
- [12] 长江水利委员会水文局. 对黄万里估算长江三峡卵石输移量一文的讨论. 水力发电学报, 1994, (2): 94 ~ 104.
- [13] 张仁. 关于长江卵石输移量的讨论. 人民长江, 1994, 25(3): 50 ~ 54.
- [14] 黄万里. 关于长江三峡砾卵石输移量的讨论(续). 水力发电学报, 1995, (1): 86 ~ 97.
- [15] 高焕锦. 长江上游干流卵石推移质输沙特性分析. 见: 水利电力部科技司. 三峡工程泥沙问题研究成果汇编. 北京: 水利电力出版社, 1988. 25 ~ 31.
- [16] 向治安, 高焕锦, 张美德. 长江三峡库区推移质输移特性及人类活动影响. 长江职工大学学报, 1994, 11(3): 44 ~ 49.
- [17] 张明波, 郭海晋, 徐德龙, 等. 嘉陵江流域水保治理泥沙模型研究与应用. 水土保持学报, 2003, 17(5): 110 ~ 113.
- [18] 唐日长 主编. 葛洲坝工程丛书——泥沙研究. 北京: 水利电力出版社, 1990. 134 ~ 178.
- [19] 李长安, 殷鸿福, 俞立中. 长江流域泥沙特点及对流域环境的潜在影响. 长江流域资源与环境, 2000, 9(4): 504 ~ 509.
- [20] 郭廷辅. 我国水土保持工作现状、问题和对策. 地理研究, 1995, 14(4): 1 ~ 7.
- [21] 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. 水利学报, 2002, (4): 56 ~ 59.
- [22] 府仁寿, 虞志英, 金缪, 等. 长江水沙变化发展趋势. 水利学报, 2003, (11): 21 ~ 29.
- [23] 王玲, 易瑜. 长江上游寸滩水文站水沙变化分析. 水利水电快报, 2003, 24(1): 14 ~ 15.
- [24] 李漱芳. 四川气候变化对淡水资源影响. 四川气象, 1999, 19(2): 26 ~ 33.
- [25] 刘春霖, 杨建青. 我国西南地区年径流变异及变化趋势研究. 气候与环境研究, 2002, 7(4): 415 ~ 422.
- [26] 李丹勋, 王兴奎. 嘉陵江流域卵石运动与卵石输沙量研究. 见: 长江委水文局. 嘉陵江水土保持措施对长江三峡工程减沙作用的研究成果汇编. 武汉: 2000. 197 ~ 203.
- [27] 潘庆桑, 胡向阳. 三峡工程泥沙问题研究的进展. 水利水电快报, 1997, 18(17): 1 ~ 5.
- [28] 崔鹏. 泥石流输移与长江洪水. 见: 许厚泽, 赵其国主编. 长江流域洪涝灾害与科技对策. 北京: 科学出版社, 1999. 256 ~ 260.
- [29] 李昌志, 刘兴年, 曹叔尤, 等. 四川水力资源开发和长江上游水土保持的思考. 长江流域资源与环境, 2002, 11(2): 117 ~ 122.
- [30] 冯耀龙, 韩文秀, 王宏庄, 等. 区域水资源承载力研究. 水科学进展, 2003, 14(1): 109 ~ 113.

Changes and driving forces of the transport characteristics of the pebble bed load in the upper reaches of Yangtze River

WANG Miao-lin^{1,2,3}, XIA Jun¹, LIU De-chun²

(1. Key Lab. of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Bureau of Hydrology & Water Resources Survey of the Upper Yangtze River, Chongqing 400014, China;

3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract :Analysis on the changes of the characteristics of runoff and sediment in the upper reaches of the Yangtze River is necessary to the operation and management of the Three Gorges Project. Zhutuo and Cuntan hydro-stations are the major water and sediment reference points for the Yangtze River and the Three Gorges Reservoir. Through analyzing the field data of the annual runoff and the pebble bed load (the PBL) across Zhutuo hydro-station from 1975 to 2001 and Cuntan hydro-station from 1966 to 2001, we concluded that the characteristics of the PBL of the upper reaches of Yangtze River change markedly. First of all, the mean annual transportation amount decreased distinctly: the transportation amount at Zhutuo station from 1992 to 2001 decreased by 46.9 % compared with that from 1975 to 1991; and the transportation amount at Cuntan station from 1982 to 2001 decreased by 40.6 % compared with that from 1966 to 1981. Secondly, the grading sizes of the PBL became smaller: the median granule diameter decreases 11 mm. Thirdly, the relationship between bed load rate and hydraulic factors changed obviously: the parameters B decreased by 47.5 % at Zhutuo hydro-station and 41.1 % at Cuntan hydro-station. Finally, the sediment discharge imbalance increased: the calculated abrasion parameter between Zhutuo and Cuntan hydro-stations increased by about 70 %.

Based on the fore study, the driving causes for the changes of the characteristics of the PBL in the upper reaches of the Yangtze River were analyzed. Firstly, the measures adopted such as soil and water conservation are the direct reason. Next, because the runoff keeps the same during different periods, the runoff has nothing to do with the above changes. Thirdly, it was concluded that the main causes are that more sediments which are being used as timbering are excavated from the watercourse and soil and water conservation prevent sediments from entering the main channel of the Yangtze River.

Based on the above analysis, it is pointed out that soil and water conservation should be strengthened. And it is important for us to investigate the current conditions and the patterns of siltation and silt movement in tributaries of the upper reaches of the Yangtze River. Finally, it is suggested that the sands excavation should be confined strictly according to the capacity of sand that can be excavated.

Key words pebble bed load; driving forces; the upper reaches of Yangtze River; Three Gorges Project