

长江输入河口段床沙粒径的变化及机制研究*

陈西庆^{1**} 严以新¹ 童朝锋¹ 宋志尧¹ 窦希萍² 李键庸³

1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 2. 南京水利水电科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室; 南京 210029; 3. 长江水利委员会长江下游水文水资源勘测局, 南京 210011

摘要 依据长期系统观测资料, 研究了长江进入河口段床沙粒径的变化、原因及其未来发展趋势。研究揭示出大通断面1月份床沙粒径 $d < 0.100 \text{ mm}$ 的百分含量较7月份多, 而 $0.100 \text{ mm} \leq d < 2.00 \text{ mm}$ 之间的含量较7月份少。床沙与悬沙之间交换是导致这一季节变化的主要原因。1976年以来, 长江进入河口段的床沙粒径(d_{50})显示出显著的粗化趋势, 与同期长江入海悬沙量下降密切相关。入海悬沙量下降增大本河段侵蚀能力、减少淤积量和促进粗细床沙交换。1976年以来最大床沙粒径没有出现相同的变化趋势, 且变化幅度显著变小, 这一现象与葛州坝有密切关系。未来人类活动对河流系统的影响将使长江输入河口段的床沙继续向粗化的方向发展。

关键词 床沙 泥沙粒径 三峡大坝 人类活动影响 长江河口

冲积河流中的泥沙通常被分成两类, 即床沙(bottom sediment)与悬沙(suspended sediment), 后者又可分为床沙质(bed-load)与冲泄质(wash-load)。在水动力作用下, 床沙运动与床沙质的不断交换, 是导致河床演变的根本原因。人类探索床沙的运动, 可以追溯到1879年Du Boys的研究, 其后, 许多学者建立了一系列公式, 试图去描述和估算床沙的运动^[1]。关于河流床沙运动的研究, 至今还多限于水槽实验与理论计算, 许多基础理论问题有待探索^[2]。在床沙质与冲泄质的划分这类基本问题上仍在探讨中^[3,4]。自然环境中, 床沙的运动状态的时空变化很大、并且取样和观测非常困难, 远比实验室环境复杂, 所以亟待加强定量研究^[5]。我国在20世纪70年代为葛洲坝工程开展的原型观测研究^[6], 至20世纪80—90年代为建造三峡工程开展的原型观测研究^[7], 也从另一侧面反映了原型观测在床沙运动研究中的重要性。

长江潮区界(大通)以下为感潮河段, 河流地貌以分叉河床为特征, 河道内发育一系列的大小不

同, 形态各异江心洲与水下沙洲。狭义的长江口(徐六径以下)就以三级分叉, 四口入海的河口地貌为特征。长江口河床演变的历史表明, 在许多情形下, 对河口地貌发育变化其关键作用的是床沙运动(侵蚀、搬运、沉积), 而不是悬沙, 尽管在长江入海泥沙中, 悬沙量远比床沙多。河口地貌研究表明, 1988—2000年间长江口水下沙洲的运动速率可达 1960 m/a ^[8]。床沙质的粒径还与河床糙率^[9], 乃至与河型^[10]有密切的关系。

近几十年来, 人类活动对长江入海泥沙变化的影响日益显著。过去国内学者曾对年际与年代际尺度长江入海泥沙变化、成因及其趋势作了若干探索研究^[11-16], 但其研究对象至今局限于悬沙变化, 长江进入河口区底沙的变化特点至今仍然缺乏研究。本研究利用长江大通站水文断面长系列系统取样分析资料, 研究长江入河口底沙粒径的变化特点, 探索自然过程与人类活动对长江输入河口底沙粒径变化的影响。

1 研究区地理及其水沙背景

大通水文站(图1)是长江干流河道上距海最近、

2006-03-07 收稿, 2006-08-07 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目(批准号 50339010, 40371114)

** E-mail: xiqingchen@vip.sina.com

且有长期和系统水文泥沙观测资料的水文站。该站位于长江口的潮区界，是海洋动力对河口作用的上边界。长江每年的最大流量出现在7—8月份，最小流量出现在1—2月份，月平均流量变动范围在6800—84000 m³/s之间。20世纪50年代以来，长江年平均入海流量为28600 m³/s。长江每年通过大通水文断面的悬沙输移量主要受到两方面的影响，一是洪季产流量，二是其区域分布，因而有不同的水沙组合，如多水少沙和少水多沙等。20世纪50年代至三峡水库开始对长江上游来沙量施加影响以前，长江入海悬沙量的变化可以分为两个阶段：(1) 1953—1976年，年平均入海泥沙量最高，达481.7×10⁶ t/a。这一时期经济发展总体上缓慢，且以农业发展为特色。在人口高速增长的压力下，土地开发利用和植被的破坏导致土壤侵蚀速率加大；(2) 1977—2000年，这一时期长江入海泥沙有显著下降，年平均为389.5×10⁶ t/a。这一变化主要归因于大量的大、中型水库的拦沙、长江河道内的采沙^[9,10]以及某些多沙子流域(如嘉陵江流域)的气候变化，特别是洪水量的减少。2001年以来，长江入海泥沙进入了第3个阶段，以入海泥沙大幅度下降为特征。三峡大坝(135 m)2003年开始蓄水，但它对坝下水文泥沙的影响，在2001—2002年已经开始明显反映出来，连续两年在2.80×10⁶ t/a以下，2004年甚至降至1.45×10⁶ t/a。

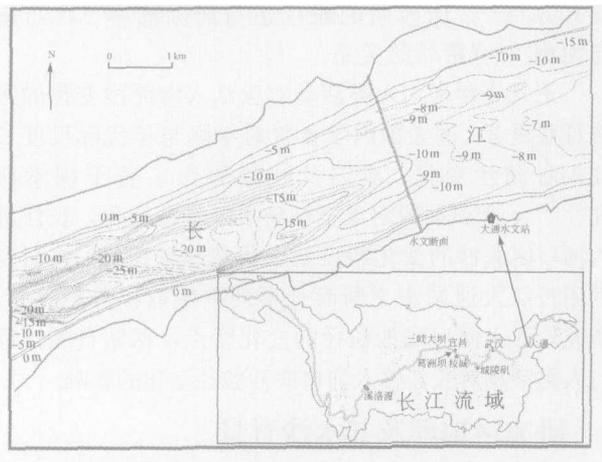


图1 大通河段地形以及大通水文站与大通水文断面位置的示意图

2 数据资料

本文用来分析研究的流量、输沙率、悬沙与床

沙粒径主要是长江大通水文站(图1)的监测数据。资料来源为长江水文年鉴、泥沙公报或直接来自长江水利委员会长江下游水文水资源勘测局。所以，该站的地理、水文、河床地貌、床沙取样与和颗粒分析方法需要给予特别的说明。

长江大通水文站位于安徽省池州市梅埂镇上游约300 m，距离长江口门约640 km。大通水文剖面在大通水文站不远处。大通水文断面附近为顺直河床，河床地貌单一，无心滩(或江心洲)和深槽发育，床底地形变化平缓(图1)。历史资料表明，大通站平均水深在洪季—17.9 m，枯季—12.4 m，相应的河宽分别为1863和1711 m^[17]，即洪季河宽比枯季河宽约大8%。在水动力方面，水文监测资料表明：1976—1985年间洪季平均流速为1.39 m/s，1985—1999年间为1.36 m/s。所以无论是从河流水文还是从河流地貌学的角度，大通水文断面是相当稳定的。虽然大通水文站设站的历史时间很早，但历经多次停站和迁站，目前的大通水文断面是1972年迁建的。水文断面位置的变化对床沙颗粒变化的影响是不言而喻的。本文选用的数据都是20世纪70年代中期以来的观测资料，满足数据分析对比的一致性要求。

大通床沙监测沿水文断面开展，有10个取样点，分布在距起点岸边90, 160, 260, 500, 750, 1050, 1215, 1475, 1590和1695 m的位置。每个月取样一次。床沙样品中泥沙粒径 $d > 0.062$ mm的部分利用筛析法分析， $d < 0.062$ mm的部分利用传统的沉降法(pipettes)分析。每个样品产生一组粒度分布数据。在这基础上，根据下述计算方法获得断面平均粒度分布

$$P_j = [(2b_0 + b_1)P_{1j} + (b_1 + b_2)P_{2j} + \dots + (b_{n-1} + 2b_n)P_{nj}] / [(2b_0 + b_1) + (b_1 + b_2) + \dots + (b_{n-1} + 2b_n)]$$

其中： P_j —断面平均小于某粒径沙重百分数(%)，

b_1, b_2, \dots, b_{n-1} —各取样垂线间的距离(m)，

P_1, P_2, \dots, P_n —各取样垂线的小于某粒径沙重百分数(%)，

b_0, b_n —尽头垂线至水边的间距(m)。

下面本文将从不同时间尺度探讨大通床沙粒径的变化，即从典型枯水年(1978)至典型洪水年

(1983)的变化和从1976年以来的长期变化。

3 洪枯年变化

先简要讨论床沙的季节变化特征。由于1987年后大通悬沙粒径分析方法与1987年以前不同，前期采用“粒径计法”，后期采用“结合法”，导致前期细沙部分偏粗¹⁾。所以选取1976—1986年1月、7月悬沙与床沙的多年月平均数据进行对比分析。结果表明，对于粒径 $d < 0.100$ mm的那部分床沙，1月份的床沙百分含量较大(22.5%)，较7月份(20.6%)多。而对于粒径 $0.100 \text{ mm} \leq d < 2.00$ mm的那部分床沙，情况截然相反，1月份相对含量(74.8%)较7月份(77.8%)少。这一现象是在泥沙供应与河流动力的季节变化背景下，活跃的床沙-悬沙交换过程导致的。在长江洪水季节(7月)，大通以上流域来沙十分丰富，悬沙在大通河段的落淤导致床沙粒径有一很宽的分布范围，特别是富含粗颗粒泥沙；在枯季(1月份)，在水动力减弱的背景下，上游来沙减少，特别是粗颗粒泥沙来量大幅度下降，多出现滩上淤积，河槽冲刷，这种悬沙与床沙之间的相互交换导致水文断面上细颗粒泥床沙含量相对增多。

为了研究床沙粒径的年际变化，我们把1978年(枯水年)与1983年(洪水年)的床沙粒度作为典型样本年(图2(a)，图2(b))。图2(c)标出了这两个典型年在长江水文长期变化中的位置。可见1978—1983年间构成一个从枯水年到洪水年的准周期变化过程。1978年与1983年大通年平均流量分别为21400和35200 m^3/s 。图2(a)与图2(b)清楚显示洪水年泥沙粒径要大于枯水年，无论床沙还是悬沙都是如此。大通悬沙月平均中值粒径在0.008—0.030 mm之间变化，底沙在0.140—0.188 mm之间。1978年悬沙年平均中值粒径0.017 mm，1983年平均0.042 mm。1978年床沙平均中值粒径0.155 mm，1983年0.173 mm。悬沙粒径的年际变化较大，其粗颗粒泥沙(≥ 0.05 mm)的百分比通常变化在20%—30%，但在1978年仅有12.8%，而在1983年高达43%。与悬沙相比，床沙粒径的变化显示出较小的年际差异，在1978年占85.4%，

1983年占94.2%。这种年际变化有明确的水动力与泥沙来源解释。洪水年大通站河道挟沙力较大，导致床沙粒径较大。另外，洪水年大通站以上粗颗粒泥沙来源丰富，也有利于床面的粗化。

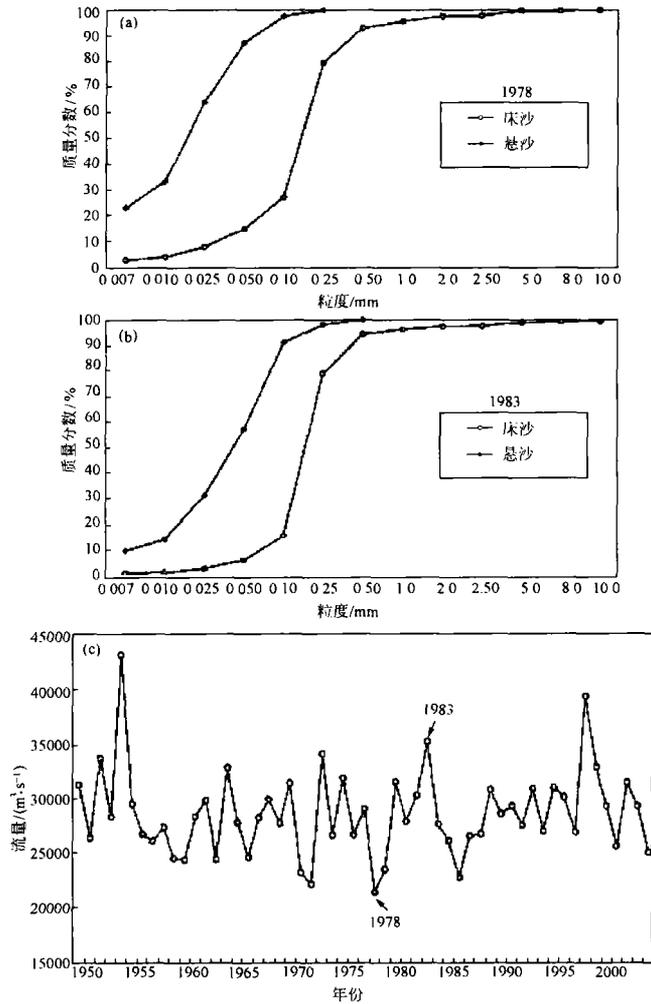


图2 典型枯水年(1978)与洪水年(1983)床沙粒径与悬沙粒径的比较(图2(a)，(b))以及这两个典型水文年在20世纪50年代以来大通水文变化历史中的位置(图2(c))

4 长期趋势变化

早在20世纪50年代，长江水利委员会水文局就开始在大通水文断面开展床沙取样与粒径分析工作。但在70代中期以前，这些监测分析的数据资料还不够系统和连续。所以，本文仅仅选用1976年以

1) 长江水利委员会长江下游水文水资源勘测局，2002，长江下游大通-镇江河道泥沙基本特征分析及水流挟沙力(打印本)。

来的数据来分析研究大通水文断面床沙粒径的长期变化趋势。图3(a)是该断面1976—2004年时段历年平均中值粒径的变化过程,床沙粒径显示出一个持

续与稳定的上升趋势,其速率为0.001 mm/a。F-检验表明这一上升趋势在 $\alpha=0.05$ 的水平上是显著的。

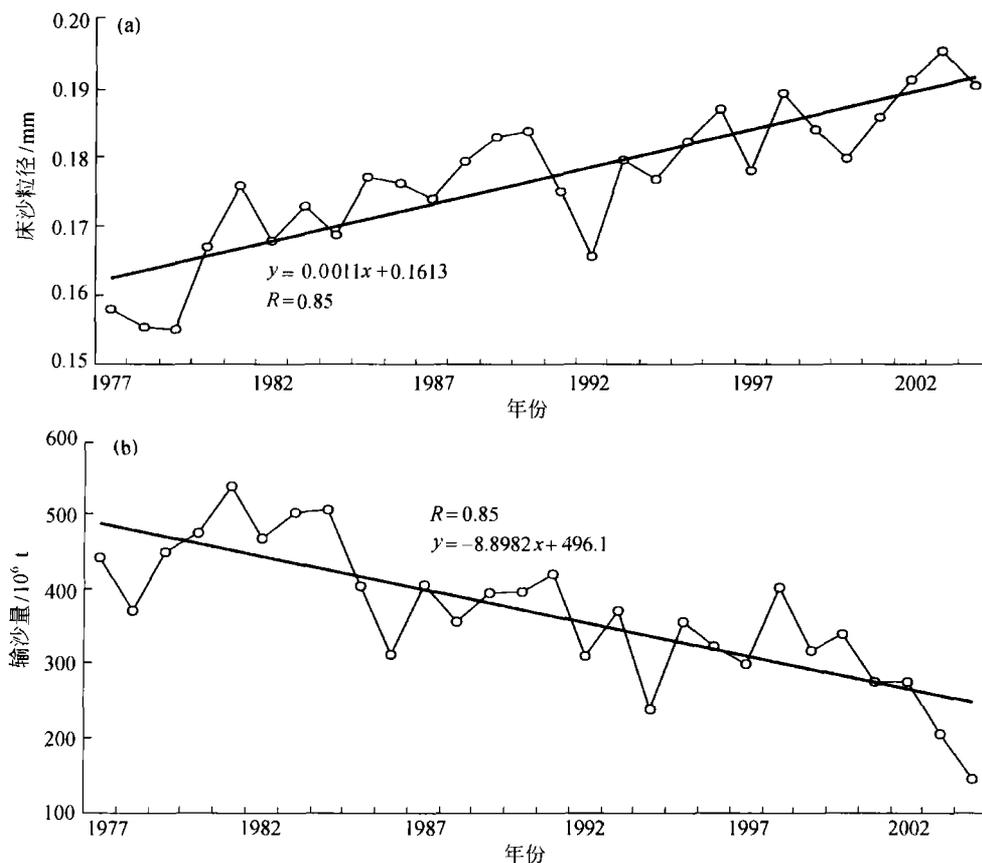


图3 大通水文断面年平均床沙粒径(d_{50})的长期变化(a)以及历年悬沙输移量的变化(b)
其中1995年粒径采用1994年与1996年的平均值,因为该年的床沙粒径出现不明原因的高异常

大通床沙粒径为何出现持续增大趋势呢?图3(b)是1976—2004年大通站历年悬沙输沙量的变化过程。统计分析表明:这一时段长江通过大通水文断面进入河口段的悬沙量也呈现持续的下降趋势,其速率为平均每年减少 8.90×10^6 t。F-检验表明这一下降趋势在 $\alpha=0.05$ 的水平上是显著的。很显然,大通床沙的粗化趋势与悬沙来量下降趋势之间有十分密切的因果关系。先前的研究表明,20世纪50年代以来,大通年平均入海流量的长期变化是稳定的,不存在任何显著的趋势性变化^[18],尽管在70年代末开始,长江中下游特枯年份沿江水资源的利用已经能导致枯季长江大通流量出现阵发性的下降^[19]。所以,长江进入河口段悬沙输移量的下

降是导致大通断面床沙颗粒粗化的根本原因。导致河床粗化的过程有两类:第一类是由于上游进入本河段水体的泥沙浓度减小,但水动力强度基本不变,导致水流侵蚀河床的能力加大,原来沉积在河床上的较细颗粒泥沙被起动与搬运、或原本要落淤的较粗悬沙(在高浓度泥沙水流情况)不再沉积,从而使水流在本断面增大了侵蚀量或减少了淤积量,结果产生了河床沙的粗化。第二类是大通以上河床的粗化,距离泥沙源较近的河床先产生冲刷,冲刷下来的较粗颗粒泥沙带到下游河道后,与河床上较细颗粒的泥沙进行交换,导致本研究区河道的床沙粒径粗化。这两类过程还有待深入研究。先前的研究表明,在上游来沙量减少背景下,在特定河段和

特定时期,河道能在河床淤积背景下发生河床的粗化过程,如钱宁等用汉江中下游(皇庄至仙桃)河床淤积背景下发生床沙粗化的实例对这一现象加以阐述,指出导致这种床沙粗化的机理是粗颗粒泥沙($d > 0.1 \text{ mm}$)的淤积量比细颗粒泥沙($d < 0.1 \text{ mm}$)的冲刷量还要大^[20]。值得注意的是:20世纪70年代以来,大通水文断面床沙的粗化过程也是发生在该河段缓慢淤积背景下的。

除了中值粒径,本研究还特别关注了大通水文断面中历年最大粒径的变化。图4表明,1977年以来历年最大床沙粒径基本稳定,约10 mm左右,且

年际间变化幅度很小,没有类似图3(a)中那种中值粒径增大趋势。但20世纪50年代以来,该河段最大床沙粒径有一显著的波动,发生在20世纪60年代中期至70年代中期,波峰出现在1970年左右。从现有资料来看,导致这一波动的原因可能来自2个方面:一是1972年大通水文断面的迁移,导致床沙数据的系统性变化;二是20世纪70年代葛洲坝的建设,阻断了粗颗粒床沙向中下游的运移,减少了洪水年与枯水年的床沙粒径变化,特别是1954年那样的长江大洪水对床沙粒径的影响。

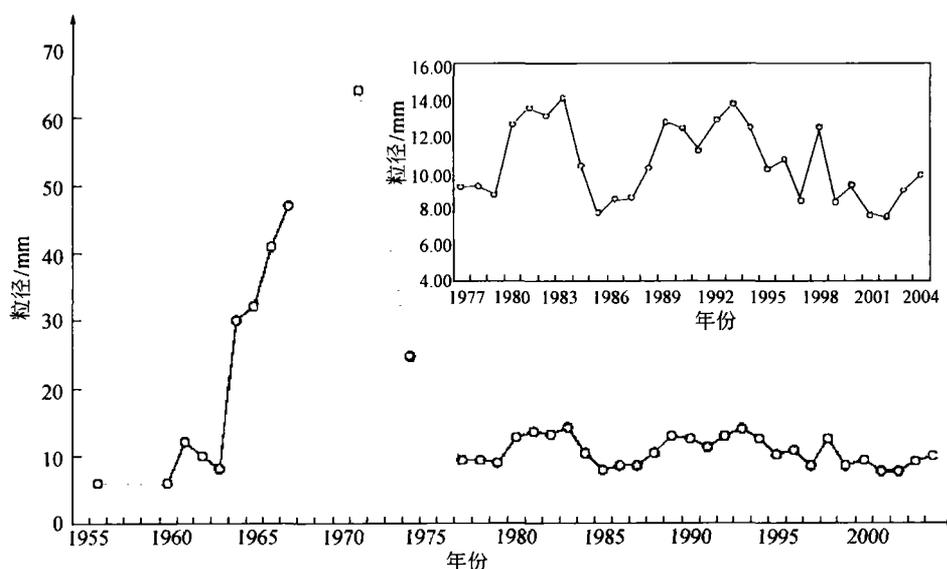


图4 20世纪50年代以来大通水文断面历年最大床沙粒径的变化

5 讨论

为了长江葛洲坝工程的建设,在20世纪70年代长江流域办公室就对长江上游河床质来量的研究工作给予高度重视。1973—1979年间长期观测与研究表明,除了每年输移 $0.708 \times 10^6 \text{ t}$ 粒径大于10 mm的卵石推移质外,长江上游每年输移 $8.625 \times 10^6 \text{ t}$ 床沙质泥沙,其粒径在0.1至10 mm之间^[6]。长江上游进入中游的悬沙中值粒径(d_{50})在0.017—0.050 mm之间,最大粒径可达2.95 mm。随着河流动力的沿程变化,粒径在0.05至0.1 mm之间的悬沙质在长江中下游地区逐步转化成河床质泥沙。长江中下游床沙质的来源有限,并且来自其间三大子

流域的粗颗粒泥沙多堆积在洞庭湖、鄱阳湖和丹江口水库内。1981年葛洲坝切断了长江上游卵石推移质的供应路线,并导致悬沙粒径大幅度减小,坝下河道中值粒径从0.032降至0.022 mm^[21]。

长江中下游河道直至大通(潮区界),长江都是蜿蜒在平原地区,河床坡降很小且变化不大,所以沿程床沙质粒径变化不显著。如长江荆江段2001年床沙质粒径在0.165至0.199 mm之间^[22]。同年大通站床沙质的中值粒径为0.184 mm。大通以下、特别是徐六径以下,随着海洋动力影响与地貌变化,床沙粒径逐步变小,至长江口外长江水下三角洲地区,床沙粒径仅0.01 mm。

床沙粒径的年内变化与年际变化都较小,悬沙

粒径的变化则较大. 悬沙粒径的季节变化与水动力之间的关系很明晰, 7月份泥沙粒径大于1月份泥沙粒径. 床沙粒径的变化比较复杂, 对于粒径 $d < 0.100 \text{ mm}$ 的那部分床沙, 1月份的床沙百分含量相对含量较多. 而对于粒径在 $0.100 \text{ mm} \leq d < 2.00 \text{ mm}$ 之间的那部分床沙, 情况截然相反, 1月份相对含量较少. 这一现象是在河流水动力和泥沙供应的季节变化背景下, 活跃的床沙—悬沙交换过程导致的.

在1976—2004年期间, 大通床沙中值粒径显示了显著的粗化趋势. 同一时期, 大通悬沙输移量出现显著的下降趋势, 但年平均流量基本稳定. 很显然, 流域悬沙来量的减少引起大通河床的加积速率减小, 从而导致床面泥沙出现长时间尺度的粗化趋势. 2003年6月三峡大坝蓄水以来, 长江上游进入中下游河道的泥沙量急剧减少. 长江中下游干流河道开始进入调整时期. 在长江荆江段, 这一调整已经十分明显. 新近的勘测数据表明: 床沙中值粒径已经从 $0.165\text{—}0.199 \text{ mm}$ 增大到 $0.173\text{—}0.221 \text{ mm}$ ^[22]. 大河流下游床沙特性的长期变化研究在目前尚十分缺乏, 特别是依据长期系统观测数据的研究. 已有报道提及1998年以后黄河下游河床沙 $d > 0.031$ 和 $d > 0.062 \text{ mm}$ 的质量分数与20世纪80年代相比, 分别减少30%和40%. 其原因一方面是由于研究区上游全沙与粗沙来量锐减, 另一方面是下游水动力条件减弱, 导致排沙比较少, 中沙淤积比增加. 但该研究没有给出具体的取样、分析与历年变化过程等具体依据^[23]. 值得注意的是, 1977—2004年间大通床沙的最大粒径变化幅度与1977年以前相比, 变化幅度明显减小. 20世纪70年代葛洲坝的建设, 阻断了粗颗粒床沙向中下游的运移, 减少了洪水年与枯水年床沙粒径的变化幅度. 同时1977年以来大通历年床沙最大粒径并未显示出类似中值粒径那样的增大趋势.

在未来几十年内, 上游金沙江干流上将建设4座超大型水库, 其发电量相当于三峡水库的2倍. 在溪洛渡水库建成后, 长江上游进入三峡库区的泥沙量将出现大幅度下降, 尽管不同研究者提出的下降比例有所不同, 如朱鉴远提出将减少92.5%^[24], 胡向阳提出将减少83%^[25], 而黄悦认为在50%以上^[26]. 未来多水库联合运行背景下, 上游泥沙来量

的下降幅度将更大. 可以预见, 在未来几十年乃至更长的时期内, 长江大通以下感潮河道由于上游来沙量的持续减少, 导致非均匀沙河床冲刷粗化^[27], 河床组成物质、河流地貌乃至河型发生较长时间尺度的调整, 以适应上游来水来沙的变化.

6 小结

20世纪70年代中期以来, 长江输入河口段(大通水文断面)的床沙粒径呈持续增大趋势, 主要原因是长江中上游来沙量显著下降, 导致水体侵蚀搬运能力加大、淤积速率下降与粗细床沙颗粒的交换. 大通以上河床的粗化也有利于河口段床沙的粗化. 同一时期, 输入河口段的最大床沙粒径没有出现相同的变化趋势, 并在20世纪70年代以后年际间变化幅度显著减小, 这一现象与葛洲坝工程有密切关系, 它阻断了长江上游, 特别是洪水年, 粗颗粒泥沙向中下游运移. 由于长江上游重大工程的影响, 未来几十年长江入海泥沙将持续出现下降趋势, 长江中下游河床的冲刷将导致长江输入河口段的床沙粒径将继续向粗化的方向发展.

参 考 文 献

- 1 van Rijn LC. Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. University of Utrecht, The Netherlands, AQUA Publications, 1993, 7.2.1—7.2.10
- 2 韩其为. 推移质中的几个理论问题研究. 中国水利, 2004, 18: 48—52
- 3 王元叶, 何青, 陈江, 等. 长江口床沙质与冲泻质划分的初步研究. 泥沙研究, 2004, 1: 43—49
- 4 黄才安, 赵晓冬. 床沙质与冲泻质划分的新方法. 杭州大学学报(自然科学版), 2003, 6(1): 61—65
- 5 Gray JR, Jonathan BL. Coordination of institutional bedload research. In: Hu Chunhong, Tan Ying (eds.). Proceedings of the Ninth International Symposium on River Sedimentation, 2004, 2501—2506, Beijing: Tsinghua University Press, 2004
- 6 唐日长(编著). 泥沙研究. 葛洲坝工程丛书, 北京: 水利电力出版社, 1990, 1—47
- 7 长江水利委员会水文局, 等. 国家“七五”科技攻关 75-16-01-04 专题“原型观测及原型观测新技术研究”. 水利部科技教育司、交通部三峡工程航运领导小组办公室编. 长江三峡工程泥沙与航运关键技术研究专题研究报告集. 上册. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1993
- 8 恽才兴著. 长江河口近期演变基本规律. 北京: 海洋出版社, 2004, 61—69

- 9 Einstein HA, Barbarossa NL. River channel roughness. *Trans Am Soc Civ Engrs*, 1952, (117): 1121—1146
- 10 许炯心. 不同床沙组成的冲积河流中河型的分布特征. *自然科学进展*, 2002, 12(8): 870—873
- 11 Chen X. An integrated study of sediment discharge from the Changjiang River, China and the delta development since the mid-Holocene. *Journal of Coastal Research*, 1996, 12(1): 26—37
- 12 陈西庆, 陈吉余. 南水北调对长江口粗颗粒悬沙来量变化的影响. *水科学研究进展*, 1997, 8(3): 259—263
- 13 Yang S, Zhao Q, Belkin I. Temporal variation of in the sediment load of the Yangtze River and the influences of human activities. *Journal of Hydrology*, 2002, 263: 56—71
- 14 府仁寿, 虞志英, 金 镠. 长江水沙变化发展趋势. *水利学报*, 2003, 34(11): 21—29
- 15 Chen X. Sand extraction from the Mid-Lower Yangtze channel and its impacts on sediment discharge into the sea. *Proceedings of the Ninth International Symposium on River Sedimentation (the 9th ISRS)*, Vol. 3, Xuejun Shao(ed.), Beijing: Tsinghua University Press, 2004, 1699—1704
- 16 Chen X, Zhang E, Mu H, et al. A preliminary analysis of human impacts on sediment discharges from the Yangtze, China, into the sea. *Journal of Coastal Research*, 2005, 21(3): 515—521
- 17 方 波. 长江下游大通镇江河道干流水流挟沙力公式. *人民长江*, 2004, 35(12): 42—44
- 18 Chen X, Zong Y, Zhang E, et al. Human impacts on the Changjiang (Yangtze) River basin, China, with special reference to the impacts on the dry season water discharge into the sea. *Geomorphology*, 2001, 41(2—3): 111—123
- 19 Chen X, Zhang E, Xu J. Large and episodic decrease of water discharge from the Yangtze River to the sea during the dry season. *Hydrological Sciences Journal*, 2002, 47(1): 41—48
- 20 钱 宁, 张 仁, 周志德. *河床演变学*. 北京: 科学出版社, 1987, 463—469
- 21 林丙南. *工程泥沙*. 北京: 中国水电出版社, 1992, 1—93
- 22 Duan G, Peng Y, Yan H. Variation in sediment transport in the Jingjiang River during the initial impounding period of the Three-Gorges Project. In: Hu Chunhong, Tan Ying (eds.). *Proceedings of the Ninth International Symposium on River Sedimentation*, Beijing: Tsinghua University Press, 2004, 689—694
- 23 周丽艳, 张长江, 史新庄, 等. 1998年以来黄河下游河道床沙质级配变化分析. *人民黄河*, 2000, 22(8): 42—43
- 24 朱鉴远. 长江沙量变化和减少途径探讨. *水力发电学报*, 2000, (3): 38—48
- 25 胡向阳. 三峡工程泥沙研究进展综述. *人民长江*, 2000, 31(1): 22—24
- 26 黄 悦. 溪洛渡水库对三峡水库泥沙影响预估. *中国三峡建设*, 2002, (9): 16—18
- 27 刘金梅, 王士强, 王光谦. 河流冲刷过程中表层床沙粗化对不平衡输沙的影响. *水科学进展*, 2000, 11(3): 229—234