

DOI: CNKI: 32. 1309. P. 20111125. 1636. 014

三峡水库下游宜昌—昌门溪河段河床调整分析

罗 优¹, 陈 立¹, 许文盛², 苏 畅¹

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 长江科学院河流研究所, 湖北 武汉 430010)

摘要: 建立反映河床调整幅度的体幅指标 K , 分析 2003 ~ 2008 年三峡水库下游宜昌—昌门溪河段河床调整幅度的沿程变化。研究发现该河段 K 与河段净冲刷强度不成正相关, 而是与河道宽深比成正相关, 当床沙中值粒径小于 0.5 mm 时, K 与床沙中值粒径成负相关。初步分析认为: 三峡下游粗颗粒泥沙容易达到输送饱和状态, 当水流挟沙力减小时出现落淤, 使得宽浅河段局部出现较大淤积, 净冲刷强度较小, 调整幅度较大; 当床沙中值粒径小于 0.5 mm 时, 该河段河床冲刷以悬移质输沙为主, 河床组成越细, 被冲刷的量越大, 河床调整幅度也就越大。结合建库前后不同粒径组悬移质输沙量的沿程变化, 对水库下游河床粗化方式进行了讨论。

关键词: 三峡水库; 河床调整; 河床粗化; 挟沙力

中图分类号: TV147; P343

文献标志码: A

文章编号: 1001-6791(2011)06-0807-06

水库下游河床冲刷调整, 改变了河道水位流量关系^[1-2], 对于航道整治工程、防洪工程、取水设施等水利工程也可能有较大影响, 因此对于水库下游河段河床冲刷调整的研究具有重大的工程实际意义。国内外关于水库下游河床冲刷调整趋势的研究成果较多, 如 Brandt^[3] 认为基于水库下泄水沙条件, 可以大致预测水库下游河道断面形态的变化, 并根据不同的水库下泄水沙条件和河道边界条件, 将水库下游河床形态调整方式分为 9 类。YOUNG 等^[4] 对 Hwang 河 Hapcheon 坝下游 45km 河段河宽、河床高程以及河床组成等建坝前后变化进行了调查研究, 并基于 Julien 等^[5] 提出的平衡河宽方程的计算结果, 认为 2004 年该段河道河宽逐渐趋于平衡。许炯心^[6] 基于永定河、汉江以及黄河河道实测资料, 将水库下游游荡分叉型河道河床调整分为 3 个阶段, 并通过室内试验成功模拟了这 3 个阶段。张俊勇等^[7] 分析研究了丹江口建库后汉江下游河床调整过程, 揭示了水库下游河床调整在冲刷延展、河床粗化、含沙量及其特征以及河型变化等方面具有较典型的时空演替现象。水库下游河床冲刷调整包括了岸边调整、边滩调整、洲滩调整等, 如张春燕等^[8] 研究了水库下游河床调整过程中边滩组成与河岸崩塌、滩地组成与撇弯切滩之间的关系。基于水库下游强约束和弱约束条件下分汊河道河床调整分析, 何娟等^[9] 认为河岸与河床相对抗冲性是分汊河道河床调整的重要指标。刘金等^[10] 根据河道地形资料发现 2003 ~ 2008 年间宜昌至虎牙滩河道持续冲刷, 以冲槽为主, 冲刷强度随时间有所减弱。罗优等^[11] 根据实测地形资料发现芦家河河槽有些部位抗冲性较强, 三峡蓄水后 2003 ~ 2008 年冲刷下切不明显, 但是洲滩变化幅度较大。江凌等^[12] 认为三峡工程运用以来, 微弯放宽分汊段的河床演变主要表现为江心洲或心滩滩头冲刷后退、支汊有所冲刷发展。水库下游河床冲刷调整必然带来河道综合阻力调整, 如周银军等^[13] 采用分形维数(BSD)对河道表面形态进行量化, 并认为河床表面 BSD 的变化可在一定程度上表征三峡水库下游河道河床综合阻力的调整。水库下游河段河床调整非常复杂, 现有的研究成果多是研究河床调整趋势预测, 河床不同部位的调整情况和相互关系, 河道综合阻力以及水位流量关系的调整等, 对于河床调整幅度的研究较少。考虑到水库下游河床调整总体表现为冲刷的同时局部位置会出现淤积, 有时候出现较大淤积, 净冲刷量并不能反映水库下游河床调整的幅度。因此本文基于 2003 ~ 2008 年间宜昌—昌门

收稿日期: 2011-01-26; **网络出版时间:** 2011-11-25

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20111125.1636.014.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10932012); 中央高校基本科研业务经费专项资金资助(20082060101000026)

作者简介: 罗 优(1985-), 男, 江西赣州人, 博士研究生, 主要从事水力学及河流动力学方面研究。

E-mail: walyms@126.com

溪河段河床地形资料，尝试建立一个反映河床调整幅度的指标，研究该河段河床调整的特点。

1 研究河道基本情况

宜昌—昌门溪河段为山区向平原过渡的河段，两岸为低山和阶地，主要由基岩卵石层和粘土层组成，抗冲性强，而河床覆盖大部分为卵石夹沙，上覆中细沙，沙层平均厚 2 ~ 3 m，沿程逐渐增大。该河段沿程分布又可分为 4 个子河段：宜昌河段(19.4 km)、宜都河段(14 km)、关洲河段(14 km)及芦家河河段(12 km) (见图 1)。宜昌河段为顺直段，河宽沿程变化不大；宜都河段为弯曲段，河宽沿程变化不大；关洲河段进口和出口河宽较小，中间河道放宽，存在心滩；芦家河河段进口河宽较小，河道宽度逐渐增大，中间有心滩存在。关洲和芦家河河段为展宽河段，即进口河段河宽较小，然后沿程河宽不断增大。

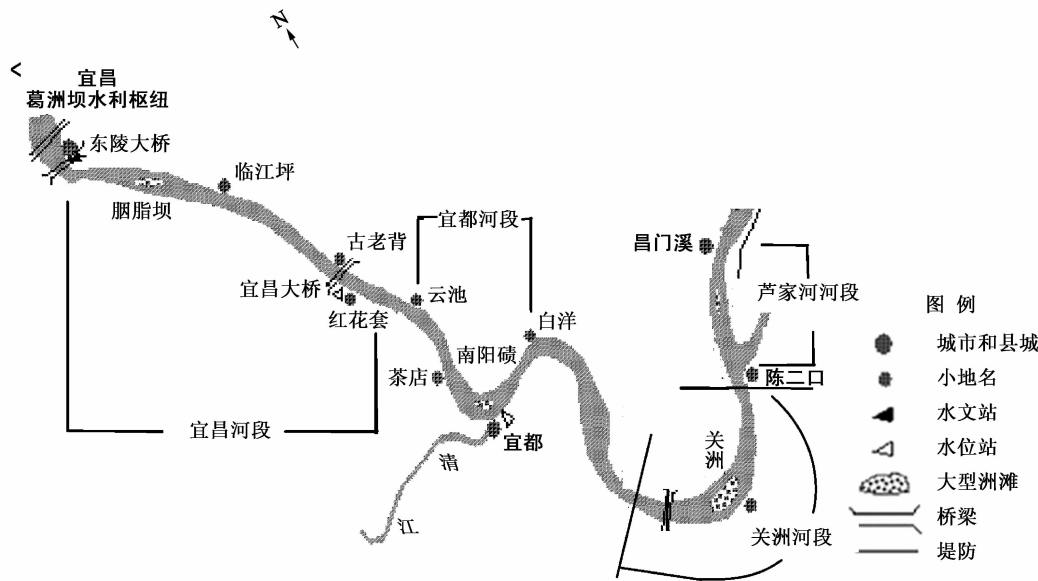


图 1 长江宜昌—昌门溪典型河段分布示意图

Fig.1 Sketch of Yichang to Changmenxi Reach on Yangtze River

各子河段基本概况以及蓄水后 2003 ~ 2008 年间河道累计冲淤情况见表 1，其中：① 深泓高程变化值为 2003 ~ 2008 年累计变化值；② 在冲淤强度 4 列中，枯水河槽和滩地指 2003 ~ 2008 年的累计净冲刷强度，而淤积和冲刷指将河床的局部淤积和冲刷分开统计后得出的冲刷或者淤积强度；③ 宽深比是基于 2003 ~ 2007 年间流量为 5 700 m³/s 条件下各河段平均水面宽、平均水位以及平均深泓高程计算得出的，在该流量下河道宽深比沿程增大。

表 1 研究河段基本概况统计

Table 1 Factors about the four river reaches

河段	长度 /km	高 程/m		冲淤强度/(万 m ³ · km ⁻¹)				流量 5 700 m ³ /s 条件下			
		深泓高程	变化值	枯水河槽	滩地	淤积	冲刷	河宽/km	水位/m	水深/m	宽深比
宜昌	19.4	22.6	-1.8	104.4	15.8	0.04	120.2	1.4	37.7	15.2	92
宜都	14.0	25.4	-2.2	252.0	8.5	8.76	269.3	1.5	36.5	11.1	135
关洲	14.0	19.9	-0.2	69.8	27.8	18.22	115.8	2.5	36.0	16.1	155
芦家河	12.0	25.6	-0.7	46.8	25.7	106.02	178.5	2.3	34.7	9.1	252

从表 1 可以看出，宜昌—昌门溪河段 2003 ~ 2008 年间虽然总体处于冲刷状态，但是局部出现淤积，关洲和芦家河河段局部淤积强度较大。宜昌和宜都河段基本为枯水河槽冲刷，深泓平均高程减小幅度较大，关洲和芦家河河段洲滩冲刷占了较大比重，深泓平均高程减小幅度较小。河床冲刷调整部位的沿程变化与河床

边界条件密切相关:窄深河段如宜昌河段两岸基岩出露,滩地范围较小,河床冲刷调整以枯水河槽冲刷为主;宽浅河段如芦家河河段两岸抗冲性有所减弱,而且存在较大的心滩或者边滩,滩岸冲刷占了较大比重。

2 体幅指标的建立与运用

2.1 体幅指标 K 的建立

水库下游河床调整过程中,淤积和冲刷同时存在,仅用净冲刷强度无法反映河床调整的幅度,本文尝试建立反映河床冲淤调整幅度的量纲一指标 K 。其中,河床表面形态如图2所示,河床表面形态调整如图3所示。

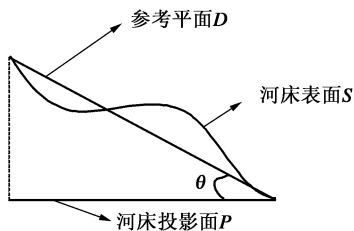


图2 河床表面形态
Fig. 2 Riverbed form

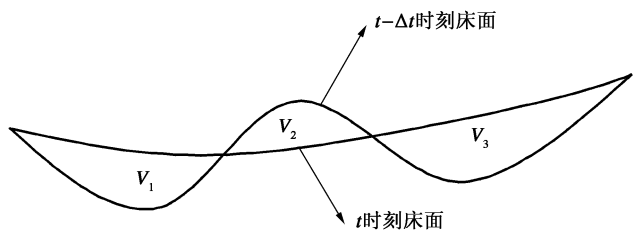


图3 河床表面形态调整
Fig. 3 Riverbed evolution

设河床在 t 时刻,较 $t - \Delta t$ 时刻,不同部位冲淤调整体积为 V_1 , V_2 及 V_3 , 则

$$K_t = \frac{V}{HS_D} = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{HS_D} = \frac{\iint_G |\Delta z| dx dy}{HS_D} \quad (1)$$

式中 K_t 为 $t - \Delta t$ 至 t 时刻河床调整体幅指标; $V = V_1 + V_2 + V_3$, 为河床冲刷体积和淤积体积之和; Δz 为 t 时刻河床地形高程和 $t - \Delta t$ 时刻地形高程差; x 、 y 为河床平面坐标; G 为河床调整的研究范围; H 为平均水深; $J = \tan \theta \approx \sin \theta$, 为床面比降; θ 为参考平面 D 的坡角; S_D 为河床表面在参考面的投影面积。

$$S_D = \frac{\iint_G dx dy}{\sqrt{1 - J^2}} \quad (2)$$

从式(1)中可以看出:当比较一个河段内的各子河段调整幅度大小时,由于选取的水深 H 相同,同时河床比降 J 很小,对 K 值的影响较小,所以 K 的值主要取决于河床高程的变化; K 越小,河床调整幅度越小, K 越大,河床调整幅度越大。

2.2 K 与河道宽深比以及床沙中值粒径的关系

基于宜昌—昌门溪河段沿程4个河段2003~2008年实测地形资料,建立河床表面DEM,网格尺寸为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$, 计算河床调整过程中各河段体幅指标 K (宜昌—昌门溪河段计算 K 时, H 取 13 m) 随时间的变化,时间差为1年。2003~2008年间宜昌—昌门溪河段年平均 K 与河道宽深比的关系如图4所示:河床调整体幅指标 K 与河道宽深比成正相关,即河床调整幅度芦家河最大,其次为关洲和宜都,宜昌最小,这与净冲刷强度宜都最大,其次为宜昌和关洲,芦家河最小不一致。水库下游河道在总体为冲刷的情况下,局部出现较大的淤积是导致各河段净冲刷强度与河床调整幅度大小关系不一致的主要因素,而河道宽深比的变化与水流挟沙能力和局部淤积密切相关,这在下节中有具体分析。

2003~2008年间宜昌—昌门溪河段年平均 K 与床沙中值粒径 D_{50} 的关系如图5所示:当床沙中值粒径小于 0.5 mm 时, K 与床沙中值粒径成负相关,床沙中值粒径越小,河床调整幅度越大。当宜昌—昌门溪河段

床沙中值粒径小于 0.5 mm 时, 河床冲刷以悬沙输沙为主, 床沙组成越细, 泥沙沉速越小, 以质量计的悬移质水流挟沙力越大(见式(3)), 年冲刷量越大, 河床调整幅指标也就越大, 即 K 与床沙中值粒径成负相关。当床沙中值粒径大于 0.5 mm 时, 推移质输沙占了河床总冲刷量的较大比重, 河床调整幅指标与推移质输移的距离以及冲刷量有关, 推移质输移距离和冲刷量往往受河段上出现洪水次数与量级影响较大, 因此河床调整幅指标与河床中值粒径不存在直接正或负相关的关系。

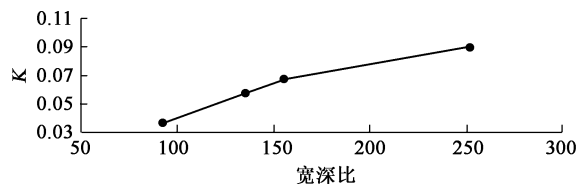


图 4 河道河床调整 K 与宽深比的关系

Fig. 4 Relationship between K and the ratio of river width to depth

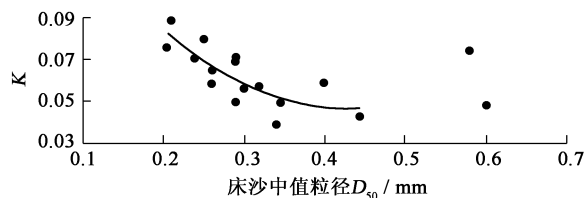


图 5 河段河床调整 K 与床沙中值粒径的关系

Fig. 5 Relation of K and the median diameter of bed-load

3 调整幅度变化机理及河床粗化方式

3.1 建库前后悬移质输沙量的沿程变化对比

本文将某一水文站中某粒径组多年平均悬移质输沙量与该粒径组不同水文站悬移质多年平均输沙量的平均值的比值作为该水文站的悬移质输沙量相对值, 分析不同粒径组悬移质输沙量的沿程变化。建坝前不同粒径组多年平均悬移质输沙量相对值沿程变化如图 6 所示, 各粒径组悬移质输沙量相对值沿程局部出现波动, 总体上沿程减小; 而建坝后, 2003 ~ 2008 年间年平均悬移质输沙量相对值的沿程变化如图 7 所示, 两个较大粒径组悬移质输沙量相对值先增大后减小, 而较小粒径组悬移质输沙量相对值沿程局部出现波动, 总体上沿程增大。

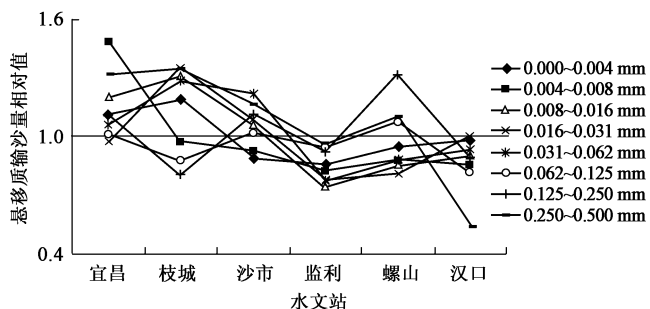


图 6 建库前各粒径组悬移质输沙量沿程变化

Fig. 6 Relative transport amount of different sediment size ranges with distance before TGR construction

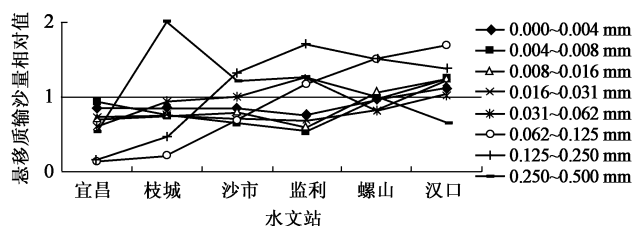


图 7 建库后各粒径组悬移质输沙量沿程变化

Fig. 7 Relative transport amount of different sediment size ranges with distance after TGR construction

3.2 调整幅度与水流挟沙能力的变化

悬移质输沙量的沿程变化与河床床沙组成、水流挟沙能力有关, 而水流挟沙能力与河道尺寸有关: ① 自然条件下, 水流由山区河道流向平原河道, 挟沙能力总体有下降趋势, 因此不同粒径组输沙量沿程总体减小; ② 水库下游泥沙的补充与下游床沙组成有关, 不同粒径组泥沙的补充恢复程度不同, 当某粒径组泥沙先恢复到挟沙饱和状态时, 如果下游水流挟沙能力的下降, 该粒径组泥沙将会出现落淤。结合曼宁公式和张瑞瑾水流挟沙力公式^[14], 水流挟沙力公式变为

$$S_* = k \left(\frac{RJ_w^{1.5}}{gwn^3} \right)^m \quad (3)$$

式中 S_s 为以质量计的悬移质水流挟沙力; J_w 为水面比降; n 为糙率系数; g 为重力加速度; R 为水力半径; w 为泥沙沉速; k 和 m 为大于 0 的系数。三峡下游河段中 0.125 ~ 0.25 mm 和 0.25 ~ 0.5 mm 粒径组泥沙沉速大, 水流挟沙能力小, 河床床沙中含量大, 因此能在较短距离内恢复到饱和状态。当水流挟沙能力减小时, 粗颗粒泥沙就会落淤, 输沙量沿程下降(见图 7)。水流挟沙能力与水力半径 R 成正相关, 同一河段中, 窄深段水流挟沙能力大于宽浅段, 因此水库修建初期, 下游展宽河段在总体表现为冲刷的情况下可能局部会出现淤积, 这与芦家河河段局部位置出现大量淤积的实际情况相符(见表 1), 也是导致宜昌—昌门溪河段河床调整幅度与净冲刷强度不成正相关而与河道宽深比成正相关的主要原因(见图 4)。

3.3 水库下游河床粗化方式分析

考虑到水库下游不同粒径泥沙挟沙恢复程度不同, 粗颗粒泥沙水流挟沙能力小于细颗粒泥沙, 容易达到挟沙饱和状态, 在局部河段由于水流挟沙能力减小而落淤, 而细颗粒泥沙由于没有达到饱和状态, 将继续冲刷。当落淤的泥沙中值粒径大于床沙中值粒径, 而持续冲刷的细颗粒泥沙中值粒径小于床沙中值粒径时, 水库下游河床粗化方式就可以分为两类: ① 自身河段河床上细颗粒泥沙被带走导致的河床粗化; ② 上游粗颗粒泥沙落淤导致的河床粗化。窄深河段河床粗化以第①种方式为主, 展宽河段河床粗化则可能包含了这两种粗化方式。水库修建后河道下游河床粗化方式与自然河道条件下河道粗化方式不同, 自然条件下河床冲刷时河床粗化, 河床淤积时河床细化。因此水库下游河床粗化的第②种方式对于展宽河段河床粗化的影响程度值得进一步研究, 比如对建库前后下游展宽河段河床组成进行分析对比等。

4 结 论

(1) 本文建立的河床调整幅度的体幅指标 K 在研究水库下游河床调整时考虑了河床可能淤积的情况, 比传统的净冲刷量方法更为准确地反映了河床调整的幅度。宽浅型河段芦家河河段, 虽然净冲刷量小于宜昌和宜都河段, 但是河床上有淤有冲, 调整幅度大于宜昌和宜都河段。

(2) 水库下游泥沙挟沙恢复与下游河道床沙组成有关, 不同粒径泥沙恢复至挟沙饱和状态所需要的距离不一样。水库下游河床冲刷粗化可能包含两种方式, 一是自身河段细颗粒泥沙被带走, 二是上游粗颗粒泥沙的落淤。窄深河段河床粗化以方式一为主, 展宽河段河床粗化则可能包含这两种形式。

水库修建后, 下游河床粗化的第二种方式对于展宽河段河床粗化的影响程度值得进一步研究, 比如对建库前后下游展宽河段河床组成进行分析对比等。

参考文献:

- [1] 葛华, 李义天, 朱玲玲, 等. 三峡蓄水初期宜昌枯水位稳定机理分析[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2009, 41(1): 47-53. (GE Hua, LI Yi-tian, ZHU Ling-ling, et al. Analysis of stability mechanism of Yichang low-water level during TGP's initial impoundment period[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2009, 41(1): 47-53. (in Chinese))
- [2] 陈立, 许文盛, 何小花, 等. 三峡蓄水后宜昌断面枯水位下降趋势及应对策略分析[J]. 水运工程, 2006(5): 59-64. (CHEN Li, XU Wen-sheng, HE Xiao-hua, et al. Low water level descending trend of yichang section after water storing of Three Gorges and it's solution[J]. Port & Waterway Engineering, 2006(5): 59-64. (in Chinese))
- [3] BRANDT S A. Classification of geomorphological effects downstream of dams [J]. Catena, 2000, 40: 375-401.
- [4] YOUNG H S, PIERRE Y J. Changes in hydraulic geometry of the Hwang River below the Hapcheon Re-regulation Dam, South Korea [J]. Intl J River Basin Management, 2010, 8(2): 139-150.
- [5] JULIEN P Y, WARGADALAM J. Alluvial channel geometry: Theory and applications [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 121(4): 312-325.
- [6] XU Jiong-xin. Channel pattern change downstream from a reservoir: An example of wandering braided rivers [J]. Geomorphology, 1996, 15(2): 147-158.
- [7] 张俊勇, 陈立, 吴门伍, 等. 水库下游河流再造床过程的时空演替现象[J]. 水科学进展, 2006, 17(3): 348-353. (ZHANG Jun-yong, CHEN Li, WU Men-wu, et al. Phenomena of replacement between spatial and temporal processes during the

- process of reformation downstream reservoir [J]. *Advance in Water Science*, 2006, 17(3): 348-353. (in Chinese))
- [8] 张春燕, 陈立, 张俊勇, 等. 水库下游河流再造床过程中的河岸侵蚀[J]. *水科学进展*, 2005, 16(3): 356-360. (ZHANG Chun-yan, CHEN Li, ZHANG Jun-yong, et al. Lateral erosion in downstream of the reservoir[J]. *Advance in Water Science*, 2005, 16(3): 356-360. (in Chinese))
- [9] 何娟, 陈立, 关洪林. 水库下游不同约束条件分汊河道冲刷调整规律研究[J]. *长江科学院院报*, 2009, 26(5): 5-8. (HE Juan, CHEN Li, GUAN Hong-lin. Research on erosion adjustment law of braided reach in downstream reservoir in different constraint condition [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2009, 26(5): 5-8. (in Chinese))
- [10] 刘金, 陈立, 周银军, 等. 三峡蓄水后宜昌河段河床演变分析[J]. *水运工程*, 2009(11): 116-120. (LIU Jin, CHEN Li, ZHOU Yin-jun, et al. Evolution of Yichang reach after impoundment of the Three Gorges Reservoir [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2009(11): 116-120. (in Chinese))
- [11] 罗优, 陈立, 周银军. 三峡蓄水后芦家河河段演变分析[J]. *水运工程*, 2009(12): 154-158. (LUO You, CHEN Li, ZHOU Yin-jun. Analysis of river-course evolution on the Changjiang-Lujiahe River after water impoundment of the Three Gorges [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2009(12): 154-158. (in Chinese))
- [12] 江凌, 李义天, 孙昭华, 等. 三峡工程蓄水后荆江沙质河段河床演变及对航道的影响[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2010, 18(1): 1-10. (JIANG ling, LI Yi-tian, SUN Zhao-hua, et al. Channel evolution of Jingjiang Reach and its influences on waterway after impoundment of the Three Gorges Project [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2010, 18(1): 1-10. (in Chinese))
- [13] 周银军, 陈立, 欧阳娟, 等. 三峡蓄水后典型河段分形维数的变化分析[J]. *水科学进展*, 2010, 21(3): 299-306. (ZHOU Yin-jun, CHEN Li, OUYANG Juan, et al. Changes in fractal dimensions of representative reaches after the impoundment of Three Gorges Project [J]. *Advance in Water Science*, 2010, 21(3): 299-306. (in Chinese))
- [15] ZHANG Rui-jin, XIE Jian-heng. *Sedimentation research in China systematic selections* [M]. Beijing: China WaterPower Press, 1993: 57-58.

Riverbed evolution in the Yichang-Changmenxi reach downstream of Three Gorges Reservoir *

LUO You¹, CHEN Li¹, XU Wen-sheng², SU Chang¹

(1. *State Key Lab of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;*

2. Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: An index K , which stands for the extent of riverbed evolution, is proposed and used to analyze the riverbed evolution in the reach of Yichang to Changmenxi. The study finds that K is inconsistent with the net scour intensity, while positively correlated to the ratio of width to depth and negatively correlated to the median diameter of bed material when the diameter is less than 0.5mm. Preliminary analysis shows that: it is easy to reach the state of transport saturation for coarse sediments downstream of the Three Gorges Reservoir. And the coarse sediments deposit when transport capacity decreases, causing great local deposition on wide-shallow river channels and the net scour intensity decreases, and riverbed evolution strengthens. When the median diameter is less than 0.5mm, the suspend loads is dominant in the downstream scouring amount, resulting that: the finer the bed material is, the greater the scouring amount and the riverbed evolution is. Considering the changes of capacity of sediment transport along the river reach after dam construction, two ways of coarsening the river bed are discussed.

Key words: Three Gorges Reservoir; riverbed evolution; coarsening; sediment carrying capacity

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 10932012).