

长江中下游的河床纵剖面演变分析及预测

黄文典¹, 王兆印^{1,2}

(1. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 国际泥沙研究与培训中心, 北京 100044)

摘要: 为预测长江中下游河床纵剖面的演变趋势, 利用最小能耗率理论计算了该江段的平衡河床纵剖面, 研究了这些河段河床演变规律及其未来的变化。分析了长江水库拦沙、河道采砂、近期水沙变化、未来引水及需水量增长等因素。结果表明, 长江中下游河床纵剖面还未达到动态平衡, 大部分江段以淤积为主。在没有人类活动影响下, 达到动态平衡还需要很长一段时间。由于引水和需水量的增长, 未来长江中下游达到动态平衡需要淤积更多的泥沙。

关键词: 河床演变; 平衡纵剖面; 长江中下游; 最小能耗率; 引水

中图分类号: TV 147

文献标识码: A

文章编号: 1000-0054(2007)12-2131-04

Fluvial process forecasting for the middle and lower reaches of the Yangtze River

HUANG Wendian¹, WANG Zhaoyin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. International Research and Training Center on Erosion and Sedimentation, Beijing 100044, China)

Abstract: Equilibrium longitudinal sedimentation profiles were calculated to study the current fluvial processes and to forecast future changes in the middle and lower reaches of the Yangtze River using the minimum energy dissipation rate theory. Some factors were analysed including sediment storage in reservoirs, sediment mining, recent changes in runoff and sedimentation load, water diversion, and the water demand growth in the future. All of these affect the fluvial processes. The results show that the middle and lower reaches of the Yangtze River are not in dynamic equilibrium and will not reach equilibrium for a long time. Sedimentation will dominate the river's fluvial processes. Water diversion and water demand growth in the future will require more sedimentation to reach dynamic equilibrium in the middle and lower reaches of the Yangtze River.

Key words: fluvial process; equilibrium longitudinal profile; middle and lower reaches of the Yangtze River; minimum energy dissipation rate; water diversion

长江流经三峡进入宜昌后的中下游属冲积河流。它具有一定的自我调整作用, 其结果在于使上游的来水来沙能通过河道下泄, 保持相对平衡, 即它具有“平衡趋向性”^[1]。长江中下游堤防总长约 3 万 km, 其中干流两岸堤防总长 3 900 余 km, 河道两岸除山丘、矶头滨江地段以山代堤外, 均建有人工挡水堤防。建国 50 多年来, 长江中下游护岸工程总抛石量 8 959.7 万 m³, 沉排 408.9 万 m², 混凝土铰链排 117.1 万 m², 建成丁坝 700 余座, 护岸总长达 1 525 km, 已控制了崩岸岸线的 80% 以上^[2], 两岸堤防约束了河道的横向摆动, 主要通过改变纵剖面进行自我调整。

为了研究河流系统运动及河床演变等复杂问题, 人们提出了一些极值假说, 最小能耗率假说就是其中一个。倪晋仁等^[3]对这些假说进行了系统的理论分析, 并从形式和应用上进行比较, 认为最小能耗率假说是现行假说中较好的一个。最小能耗率原理由 Helmholtz 于 1868 年提出, 20 世纪 50 年代初由 Великанов 移植到河流动力学研究领域。20 世纪 70 年代初, Yang C T 等人^[4]在这方面取得了突破性进展, 并将它用于解释和预测河流纵向坡降随流量的变化^[5]。

为预测长江中下游河床纵剖面的演变趋势, 利用最小能耗率理论计算了该江段的平衡河床纵剖面, 研究了这些河段河床演变规律。分析了可能改变长江中下游河道原有演变进程的长江水库拦沙、河道采砂、近期水沙变化、未来引水及需水量增长等因素, 在此基础上分析了未来长江中下游河床演变规

收稿日期: 2006-11-24

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究项目 (2003CB415206);
国家自然科学基金创新群体项目 (50221903-3)

作者简介: 黄文典(1977—), 男(汉), 福建, 助理研究员。

E-mail: wdhuang@tsinghua.edu.cn

通讯联系人: 王兆印, 教授, E-mail: zywang@tsinghua.edu.cn

律的变化特点。

1 最小能耗率理论

最小能耗率理论可表述为^[4]: 一个处于动态平衡封闭、耗散的系统, 其能耗率达到最小值。这个最小值的大小是由施加于系统的约束决定的。系统不处于动态平衡时, 能耗率不为最小值。但系统会通过对自身进行调整, 减小系统的能耗率重新获得平衡。由于水沙条件的变化, 天然河流很少处于真正的平衡状态, 但它可以通过调整河道形态、坡降、糙率等条件, 减小其能耗率, 以适应上游的来水来沙条件。根据最小能耗率理论, 当河流处于动态平衡时, 其能耗率达到最小, 也可表述为单位河长的河流功(QS)达到最小^[6]。其中, Q 为体积流量, S 为坡降。

根据最小河流功原理, 当河流功达到最小值时, 必须满足^[5]

$$\frac{d}{dX}(QS) = Q \frac{dS}{dX} + S \frac{dQ}{dX} = 0. \quad (1)$$

式中, X 为距初始断面距离。

由上式知, 当流量向下游沿程增大($dQ/dX > 0$)时, 河床的纵坡降则沿程减小, 即 $dS/dX < 0$, 其平衡纵剖面为一条向下凹的曲线, 反之则为向上凹的曲线。大部分天然河流属于第 1 种情形, 而近年来黄河纵剖面演变属于第 2 种情形。王兆印等人的研究表明, 由于从黄河下游过量引水, 又缺少水量补给, 下游河段流量沿程减小, 其河床纵剖面向 S 型方向发展趋势明显^[7]。

2 长江中下游河床纵剖面演变

由于两岸支流汇入, 干流的流量沿程逐渐增大, 长江宜昌以下的中下游江段的平衡河床纵剖面应是一条向下凹的曲线。

取式(1)的差分格式, 整理可得

$$S_n = Q_n S_{n+1} [Q_n - \Delta Q_n (X_{n+1} - X_{n-1}) / \Delta X_n]^{-1}. \quad (2)$$

式中: $n=1, 2, 3, \dots$ 为断面序号; S_n 和 S_{n+1} 分别为第 n 、 $n+1$ 个江段的坡降; Q_n 为第 n 个断面的流量; ΔQ_n 和 ΔX_n 分别为第 n 个江段的流量增量和长度; X_{n-1} 和 X_{n+1} 分别为第 $n-1$ 、 $n+1$ 个断面距宜昌站的距离。

另外, 根据定义, 有

$$H_n = H_{n+1} + S_n (X_{n+1} - X_n). \quad (3)$$

式中: H_n 和 H_{n+1} 分别为第 n 和第 $n+1$ 个断面的平均河底高程。

利用长江河道流量沿程变化和地形数据, 由式

(2)和式(3)可以计算出长江中下游达到动态平衡的河床纵剖面。

从图 1 可知, 长江中下游还未达到动态平衡, 大部分江段的实际纵剖面低于平衡纵剖面。但从实际纵剖面的演变来看, 它向着平衡纵剖面发展。从整个江段来看, 干流以淤积为主。从各江段看, 宜昌-城陵矶江段, 实际纵剖面高于平衡纵剖面, 河床以冲刷为主; 城陵矶-大通江段则低于平衡纵剖面, 河床以淤积为主。石国钰等^[8]的研究也表明, 1966—1998 年, 整个中下游江段在平滩水位下累计淤积, 其中宜昌-城陵矶段累计冲刷, 城陵矶-大通段累计淤积。潘庆葵^[9]的研究也表明, 近 50 a 长江宜昌至城陵矶段发生了较长时期和较长距离的河床冲刷, 城陵矶-武汉段则在一段时期内发生淤积。在没有人类活动干扰的情况下, 长江中下游以淤积为主, 达到动态平衡还需要很长一段时间。

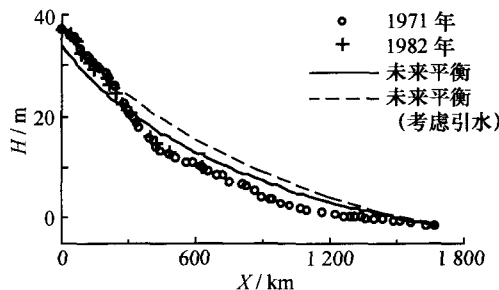


图 1 长江中下游平衡纵剖面

3 长江近期及未来水沙变化

1998 年大洪水后, 长江上游地区开展了植树造林、拦沙工程等水保措施。长江上游的干支流上修建了大量的水库, 拦截了部分泥沙。长江中下游地区经济的飞速发展, 增加了对水的需求, 南水北调工程也在建设中。这些都将引起长江水沙的变化, 改变长江河道原有的演变规律。

3.1 上游干支流水库拦沙

据统计, 宜昌站多年平均输沙量只有 $5.01 \text{ 亿 t} \cdot \text{a}^{-1}$, 而长江流域上游的年土壤侵蚀总量远大于这个数值, 两者的差值达 $10 \text{ 亿 t} \cdot \text{a}^{-1}$ 以上, 这些除一部分堆积在上游的泥石流沟谷和支流的河床中, 另一部分则被干支流的水利工程所拦截。至 1998 年为止, 长江流域内已建、在建的库容在 1 亿 m^3 以上的水库有 138 座, 总库容为 1160 亿 m^3 , 已建中小型水库 4.5 万座, 总库容 537 亿 m^3 ^[10]。长江上游各类水库群拦沙淤积总量为 $1.4 \text{ 亿 m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$, 约合 1.8 亿

$t \cdot a^{-1}$, 其中大型水库的淤积量占 45.3%, 小型水库占 43.6%^[11]。嘉陵江为长江泥沙的主要来源, 从 20 世纪 50 年代到 90 年代, 嘉陵江的产沙量呈现出明显减少的趋势^[12]。三峡水库的蓄水进一步减少了长江的输沙量。

图 2 表示长江干流主要控制站近期年输沙量沿程变化。与多年平均值相比, 近期长江干流沿程的年输沙量发生了明显的变化。由于三峡水库的蓄水, 部分泥沙沉积在库区河道内, 使重庆寸滩-宜昌江段的年输沙量沿程减少。20 世纪 80 年代中期以来, 宜昌站的输沙量已从多年平均的 5.14 亿 $t \cdot a^{-1}$ 减小到 3.82 亿 $t \cdot a^{-1}$, 近期减小到 1.0 亿 $t \cdot a^{-1}$, 减小了 4 亿多 $t \cdot a^{-1}$, 导致中下游部分江段发生冲刷; 同期, 大通站的输沙量也从 4.27 亿 $t \cdot a^{-1}$ 减小到 3.27 亿 $t \cdot a^{-1}$, 近期减小到约 2.0 亿 $t \cdot a^{-1}$ 。由于河床沿程冲刷, 近几年宜昌-汉口江段的输沙量反而有所增大。

根据长江流域综合利用规划, 未来还将在干流及雅砻江、岷江、嘉陵江等支流上修建多个大型水库, 这些水库的库容相当可观, 它们的建设将进一步拦截长江上游的泥沙, 减少输送进入长江中下游的泥沙, 引起中下游河道相应的调整, 改变长江中下游河床纵剖面的演变过程。

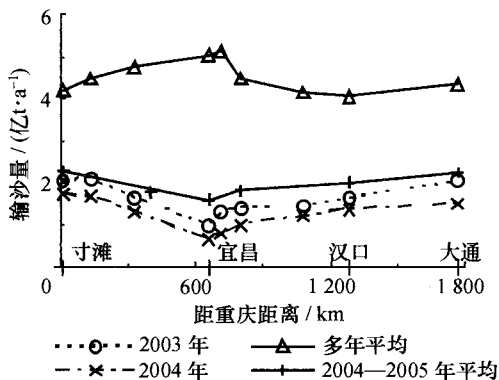


图 2 长江干流近期年输沙量沿程变化

3.2 建筑材料采砂

近年来, 长江采砂量持续增加。20 世纪 90 年代, 宜宾、泸州和重庆(不含万县)从长江建筑材料采砂总量为 1530 万 $t \cdot a^{-1}$ ^[13]。长江上游包括攀枝花、万县和宜昌在内的其他城市从长江挖取的砂量与前述几个城市的挖砂量相当, 这样长江上游的采砂量约为 3000 万 $t \cdot a^{-1}$ 。

中下游的采砂量更大。据初步估计, 近 20 年以来, 长江干流宜昌以下江砂平均采挖量为 2600 万

$t \cdot a^{-1}$, 1990 年代达到大约 8000 万 $t \cdot a^{-1}$ 。近年来采砂量还在增加, 估计年均开采量可能达 4000 万 $t \cdot a^{-1}$ ^①。根据 2003 年颁布的《长江中下游干流河道采砂规划》, 中下游规划的可采区年度控制开采总量近期为 3400 万 $t \cdot a^{-1}$ 。由于采砂配额不能满足实际需求, 很多地方存在偷采现象, 长江流域实际采砂量可能远超这个数值。

3.3 近期及未来水量变化

图 3 为长江干流近期年径流量沿程分布情况。从图中可以看出, 长江干流近几年的年径流量并不像年输沙量那样发生明显变化, 它的分布趋势与多年平均值的分布基本相同, 数值上也没有发生明显的变化。

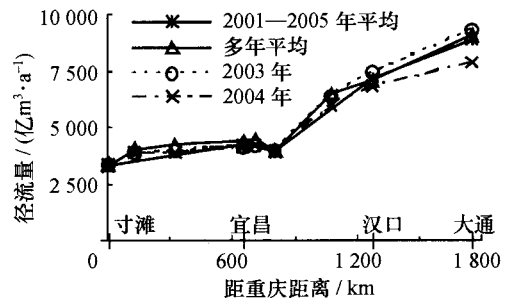


图 3 长江干流近期年径流量沿程变化

长江中下游为我国重要的工业和农业经济区, 沿岸分布着多个重要城市, 人口密集, 工业用水和农业灌溉用水量都非常巨大。长江流域 2004 年总用水量为 1804.79 亿 $m^3 \cdot a^{-1}$ ^②, 到 2030 年的需水量将达 2000 亿 $m^3 \cdot a^{-1}$ 以上^[14], 净增 200 多亿 $m^3 \cdot a^{-1}$ 。南水北调工程也将从长江引水^[15], 中线工程分二期实施, 引水量 130 亿 $m^3 \cdot a^{-1}$, 东线工程分三期实施, 引水量 148 亿 $m^3 \cdot a^{-1}$, 完工后将从中下游引水 278 亿 $m^3 \cdot a^{-1}$ 。这样, 未来中下游仅调水和需水增长 2 项就达 400 多亿 $m^3 \cdot a^{-1}$ 。

4 未来长江中下游河床纵剖面演变

大通站的多年平均径流量为 9051 亿 $m^3 \cdot a^{-1}$, 宜昌站的值为 4382 亿 $m^3 \cdot a^{-1}$, 两者的差值为 4669 亿 $m^3 \cdot a^{-1}$ 。未来长江中下游调水和需水增长总量约为这个差值的 10%, 沿程的入流量将有所减少, 引起河流的自我调整, 平衡状态的纵剖面会有所不同。据此可以计算未来长江中下游达到动态平衡状态的

① 长江水利委员会. 长江中下游干流河道治理规划措施. 1997

② 长江水利委员会. 长江流域及西南诸河水资源公报 2004. 2005

纵剖面,如图 1 中的实线所示。

可以看出,由于引水和需水量增长,未来长江中下游平衡河床纵剖面高于不考虑引水的平衡纵剖面,达到动态平衡需要淤积更多的泥沙。

5 结 论

利用最小能耗率原理计算了长江中下游平衡纵剖面,研究了这些河段河床演变规律及其未来可能的变化。结果表明,长江中下游干流河床纵剖面还未达到平衡,宜昌—城陵矶段累计冲刷,城陵矶以下江段,特别是武汉段累计淤积,达到动态平衡还需要很长一段时间。由于引水和需水量的增长,未来长江中下游河道达到动态平衡需要淤积更多的泥沙。长江三峡水库拦沙、上游多个大型水库的建设,以及河道采砂量的增加,都将减少进入长江的泥沙量,改变长江中下游河床原有的演变进程。

参考文献 (References)

- [1] 钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学 [M]. 北京: 科学出版社, 1987.
CHEN Ning, ZHANG Ren, ZHOU Zhide. Fluvial Process [M]. Beijing: Science Press, 1987. (in Chinese)
- [2] 余文畴, 卢金友. 长江中下游河道整治和护岸工程实践与展望 [J]. 人民长江, 2002, 33(8): 15-17.
YU Wenchou, LU Jinyou. Practice in river regulation and bank revetment works of the middle and lower Yangtze River and prospect [J]. Yangtze River, 2002, 33(8): 15-17. (in Chinese)
- [3] 倪晋仁, 张仁. 河相关系中的极值假说及其应用 [J]. 水利水运科学研究, 1991(3): 307-318.
NI Jinren, ZHANG Ren. Extremal hypotheses and their applications on river geometry studies [J]. Hydro-Sci and Eng, 1991(3): 307-318. (in Chinese)
- [4] YANG Chih Ted, Song C C S. Theory of minimum energy and energy dissipation rate [C] // Cheremisinoff N P. Encyclopedia of Fluid Mechanics. Houston, Texas: Gulf Publishing Company, 1986: 353-399.
- [5] YANG Chih Ted, Molinas A. Dynamic adjustment of channel width and slope [C] // White W R. International Conference on River Regime, Hydraulic Research Limited. NY: John Wiley & Sons, 1988: 17-28.
- [6] YANG Chih Ted, Simões Francisco J M. User's Manual for GSTARS 3.0 [M]. Denver, Colorado: US Bureau of Reclamation, Technical Service Center, 2002.
- [7] WANG Zhaoyin, HU Chunhong. Interaction between fluvial systems and large scale hydroprojects [C] // HU Chunhong, TAN Ying. Proc of the 9th Int Symp on River Sedimentation, Yichang, China. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 46-64.
- [8] 石国钰, 许全喜, 陈泽方. 长江中下游河道冲淤与河床自动调整作用分析 [J]. 山地学报, 2002, 20(3): 257-265.
SHI Guoyu, XU Quanxi, CHEN Zefang. Analysis on channel scouring and silting and self-adjusting in the middle and lower Yangtze River [J]. J Mou Res, 2002, 20(3): 257-265. (in Chinese)
- [9] 潘庆荣. 长江中下游河道近 50 年变迁研究 [J]. 长江科学院院报, 2001(5): 18-22.
PAN Qingshen. Study on evolution of the middle and lower Yangtze River in recent fifty years [J]. J Yangtze River Sci Res Institute, 2001(5): 18-22. (in Chinese)
- [10] 赵纯厚, 朱振宏, 周端庄. 世界江河与大坝 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
ZHAO Cunhou, ZHU Zhenhong, ZHOU Duanzhuang. Worldwide River and Dams [M]. Beijing: China Water Press, 2000. (in Chinese)
- [11] 长江水利委员会. 三峡工程水文研究 [M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1997.
Changjiang Water Resources Committee. Hydrological Study of the Three Gorges Project [M]. Wuhan: Hubei Science Press, 1997. (in Chinese)
- [12] ZHANG Xinbao, WEN Anban. Current changes of sediment yields in the upper Yangtze River and its two biggest tributaries, China [J]. Global and Planetary Change, 2004, 41: 221-227.
- [13] 易哲文. 长江上游的泥沙 [J]. 四川水利, 2003(5): 29-33.
YI Zhewen. Sediment of the upper Yangtze River [J]. Sichuan Water Conservancy, 2003(5): 29-33. (in Chinese)
- [14] 陈进, 黄薇. 未来长江流域水资源配置的思考 [J]. 水利水电快报, 2005(17): 1-3.
CHEN Jin, HUANG Wei. Water allocation of the Yangtze River basin in the future [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2005(17): 1-3. (in Chinese)
- [15] 张国良. 南水北调工程概况 [J]. 水利水电施工, 2005(2): 19-27.
ZHANG Guoliang. Overview of the south-to-north water transfers project [J]. Construction of Water Conservancy and Hydropower Works, 2005(2): 19-27. (in Chinese)