

长江三峡 ADP 流速剖面特征及其水文地貌环境意义分析

陈 静 陈中原* 徐开钦 韦桃源 李茂田 王张华 渡边正孝

(华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062; 华东师范大学河口与海岸国家重点实验室, 上海 200062; 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 日本国立环境研究所, 筑波, 日本. * 通讯作者, E-mail: Z.Chen@ecnu.edu.cn)

摘要 2002年5月21日至6月2日间, 利用ADP等仪器对重庆至宜昌段三峡河床进行了纵剖面流速及地形的测试. 工作期间的流量小于 $15000 \text{ m}^3/\text{s}$. 结果表明重庆至万县段流速与河宽成正比, 最高流速达 $3.0\sim 4.0 \text{ m/s}$, 一般出现在河宽大于 1000 m , 水深小于 20 m , 由巨砾和卵石滩组成的碛滩部位, 过水断面面积很小. 相反, 低流速出现在水深较大的河床部位, 河宽小于 500 m , 河谷呈准“U”字型, 过水断面面积较大. 万县往下至奉节河段, 最大流速基本都出现在水深大于 50 m 的峡谷河床部位, 流速大于上部碛滩河段, 河宽较小(小于 600 m), 河床呈“V”字型, 过水断面面积较小. 奉节至秭归河段, 水深大的部位, 河宽小(小于 500 m), 河床呈“W”字型, 过水断面面积较大, 流速变小. 研究表明过水断面控制着流速分布. 秭归~葛洲坝之间出现缓流区(包括西陵峡), 流速小于 1.0 m/s , 为葛洲坝建坝后效应. 另外, 葛洲坝建坝 25 年来河床明显淤积, 库区河床淤积抬高达到 20 m , 并且出现水面壅水现象, 向上游可延伸 150 km . 坝下底床出现 $15\sim 20 \text{ m}$ 的冲刷现象.

关键词 ADP 流速剖面 葛洲坝 水文地貌 三峡河谷 长江上游

河流是连接陆地和海洋的枢纽, 是全球变化在区域响应上最敏感的地理位置之一, 是大陆径流、物质流和能量流向海洋传送的通道, 是大陆-海洋物质循环的传递手. 发现和揭示河流泥沙在流域环境中的产生和运动机理, 特别是在不同地质、气候条件下运动特征, 是一件十分有意义和艰巨的任务.

河流流速的分布是反映流域水文地貌过程一个极其重要的指标, 它直接关系到泥沙搬运和堆积过程并与全球变化和人类活动紧密相连^[1~4]. 大量泥沙在不同流速特征的水文条件下被带至河流各个部位, 倾泄至河口区, 不仅建造了不同类型的地貌环境, 而且给海洋生物的繁衍提供了充分的物质条件^[5~7]. 同时, 大量的有机和无机碳入海也促进了海洋与大气的交换, 给全球气候的波动增添了驱动力^[8].

长江是世界性大河, 全长 6300 km 以上, 流域面积达 180 多万平方公里, 平均年降雨量为 $800\sim 1600 \text{ mm}$, 最大可达 2400 mm ^[9]. 近百年平均年输沙量为 $4.7 \times 10^8 \text{ t}$, 近年来由于剧烈的人类活动有所下降, 约为 $3.5 \times 10^8 \text{ t}$ ^[10]. 张顺利等人^[11]和姜彤等人^[4]的研究表明, 随着全球气候变暖, 长江流域近 10 年来的降雨量明显增加, 洪涝灾害更有频发的可能性. 此外, 著名的三峡大坝也即将完工, 由此引起的流域环境变迁为世人关注^[3]. 在此背景下, 本研究利用先进的物理观测仪器进行现场测试, 旨在建立和完善建坝

前、期间的水文地貌数据库, 为深入研究建坝后流域-河口环境变迁提供科学依据.

1 工作方法

2002年5月21日至6月2日, 利用声学多普勒流速剖面仪(ADP-500 Hz)和测深仪(Echo Sounder 449DF)对长江三峡河段的水文地貌进行了野外调查. 此次调查共分为两个阶段: 5月21~29日从宜昌逆流而上至重庆; 5月29日至6月2日又从重庆顺流而下至宜昌. 两次走航线均位于在深水主航道. 另外在葛洲坝库区进行了一个横断面的测航, 全程测量采用全球定位仪定位, 用磁倾角进行误差校正. 对ADP以及测深仪收集到的宜昌~重庆与重庆~宜昌河段的流速和水深资料进行了数据处理, 结果发现两次数据基本一致. 本文采用了重庆~宜昌河段实测数据.

ADP探头共有3个传感器, 每个传感器在垂向上夹角为 25° , 在水平面上夹角为 120° . 使用时将整个仪器用铁三脚架固定在船舷外 50 cm , 并使3探头入水 $50\sim 100 \text{ cm}$. 本型号ADP可测的最大水深为 100 m , 最大分辨率为 1 m , 在表层和底层各产生 1 m 的盲区. 本次ADP剖面流速记录精度为每分钟一个剖面流速, 每米水深一个平均流速. 所有信息全部在微机上自动生成记录, 每天工作前后进行仪器保养和修正.

2 数据处理

对于 ADP 实测水深以及剖面流速数据, 首先根据记录的有效单元格个数消除由声学反射产生的噪音, 继而采用 Arcview 软件中的 Spatial Analysis 模块进行数据处理, 利用 IDW 内插方式将沿程、垂向以及底部和表层 1.0 m 盲区中的分散流速处理为连续流速, 并作出研究区流速分布色标图。

根据长江水利委员会泥沙公报所提供的实时水位资料可知(<http://www.cjh.com.cn>), 研究区水位与上世纪 50 年代差别很小, 所以本次调查三峡段水位采用 50 年代的资料, 葛洲坝下游采用 80 年代的资料; 葛洲坝库区水位为本次调查实测水位。本文的河宽测量资料(个/km)取自于 20 世纪 50 年代的海军水道图。据同样资料, 在典型河段共作河床横剖面图 12 个, 计算过水断面面积 48 个。葛洲坝库区河床横剖面图是根据本次调查实测数据和历史数据所得。

3 结果与讨论

本次调查期间无大范围降雨, 三峡河段也无大支流汇入, 因此, 根据 ADP 实测断面可推知, 本次调查的流速都是在 $15000 \text{ m}^3/\text{s}$ 或更小的流量下获得。实测的 ADP 流速剖面反映了三峡河流流速的分布状况(图 1)。资料表明河谷内的流速一般可以分为 3 层, 即上、中、下层。对比后可知, 表、中层流速最大, 在 $2.0 \sim 3.0 \text{ m/s}$ 之间, 下层流速明显减小。资料显示重庆至万县河段(长约 300 km)的流速与河宽成正比, 即河宽大的部位表中层流速较大, 在 $3.0 \sim 4.0 \text{ m/s}$ 之间。据统计这样的现象共出现约有 20 处(编号 1~20, 图 1)。这些部位的河床一般宽于 1000 m, 水深一般介于 10~20 m 之间(图 1 和图 2, 见选择剖面 2, 8, 10, 13), 现场观测并结合航道地形图资料可以认识到, 这些河床部位碛滩广布, 多由巨砾和卵石滩组成。重庆至万县河段流速小于 1.5 m/s 处(约有 6 处, 编号 ~, 图 1), 河床一般较窄(小于 600 m), 水深大于 50 m, 河床形态多为准“U”字型(图 1 和图 2, 见选择剖面 ~)。

计算了上述 26 个地点的河床过水断面面积, 结果表明, 本河段流速实际上与过水断面面积成反比(图 3(a))。将河床过水断面面积与河床的河宽、水深作了进一步分析后可知, 这些地点的断面面积与河宽成反比, 与水深成正比(图 3(b))。

流速与水深成正比的情况出现在万县至奉节段

(长约 130 km)。河段内流速明显大于上部碛滩河段, 表中层流速一般为 $3.0 \sim 3.5 \text{ m/s}$, 最大流速为 4.5 m/s ; 高流速基本都出现在水深大于 50 m 的峡谷河床部位, 约有 13 处(编号 21~33, 图 1)。有 1 处流速小于 1.0 m/s (编号 ~, 图 1)。本河段河宽一般小于 600 m, 河床剖面形态为“V”字型(图 2, 见选择剖面 22, 26, 32)。野外观察证实河床由巨砾石组成。从奉节继续往下游至秭归(约 100 km), 流速和水深又呈反比趋势, 表中层流速一般为 $2.5 \sim 3.5 \text{ m/s}$, 最大可达 6.0 m/s (巫山附近, 图 1)。流速小于 2.0 m/s 秒约有 2 处(编号 ~, 图 1), 大于 3.5 m/s 的约有 6 处(编号 34~39, 图 1)。河宽一般小于 500 m, 最小处仅约 300 m, 河床剖面为“W”型(图 2, 见选择剖面 37)。

上述 22 个地点的流速与河床过水断面面积成反比(图 3(a))。万县至奉节河段尽管水深较大, 但是断面面积是由较小的河床宽度所控制, 而奉节至秭归河段断面面积受水深影响较大(图 3(b))。

在秭归至葛洲坝之间(约 100 km)出现缓流区(包括西陵峡), 流速小于 1.0 m/s , 为葛洲坝建坝后效应。

理论上, 流速 v 的控制因素之一是过水断面面积 A , 而不是受单一的河宽、水深所控制的, 如下列公式所示^[12]:

$$Q = A \times v \quad (Q \text{ 为流量}).$$

由于本次走航期间的流量基本无大变化($15000 \text{ m}^3/\text{s}$, 或更小), 所以流速应该与过水断面面积成反比。

从图 3(a)中可以看出流速 v 基本上与过水断面面积 A 成反比, 即断面面积小的河段流速大。因河形不同, 过水断面面积与河宽、水深有着密切的关系。在重庆至万县段, 我们的实测数据表明了河宽大的部位, 水深很小, 广布的碛滩河形导致了过水断面面积小, 从而形成高流速河段; 万县至奉节河段, 水深大的部位, 由于河宽较小以及“V”型河谷的原因, 其过水断面面积也小, 导致流速增大; 奉节至秭归河段内, 水深大的部位, 河宽虽小, 但河谷呈“W”型, 即河谷内深水范围较大, 所以过水断面面积明显大于万县至奉节段, 因而流速变小(图 3(b))。由此可知, 三峡河段的水文地貌条件决定了过水断面面积控制本河段流速的分布。

本次用测深仪获得的河流底床数据反映了三峡河段河床地貌的分布特征(图 4)。总体上奉节至宜昌河床段的地形起伏较大, 水深相应也大。在瞿塘峡、

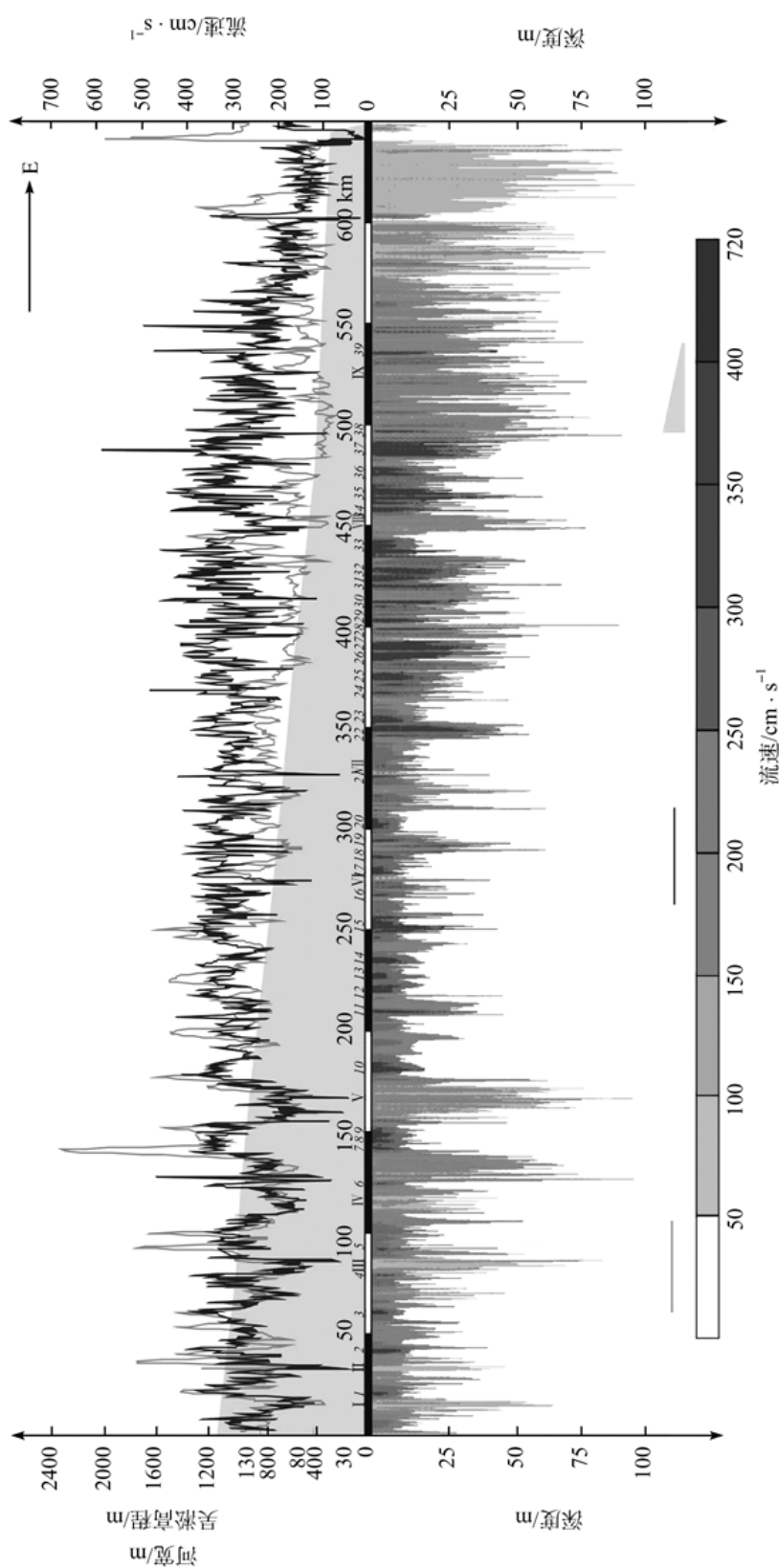


图1 长江三峡 ADP 剖面流速特征
葛洲坝坝上水面坡降和河宽资料来源于长江上游重庆-宜昌水道图, 1954; 坝下来源于长江中游宜昌-武汉水道图, 1983; 库区为实测资料

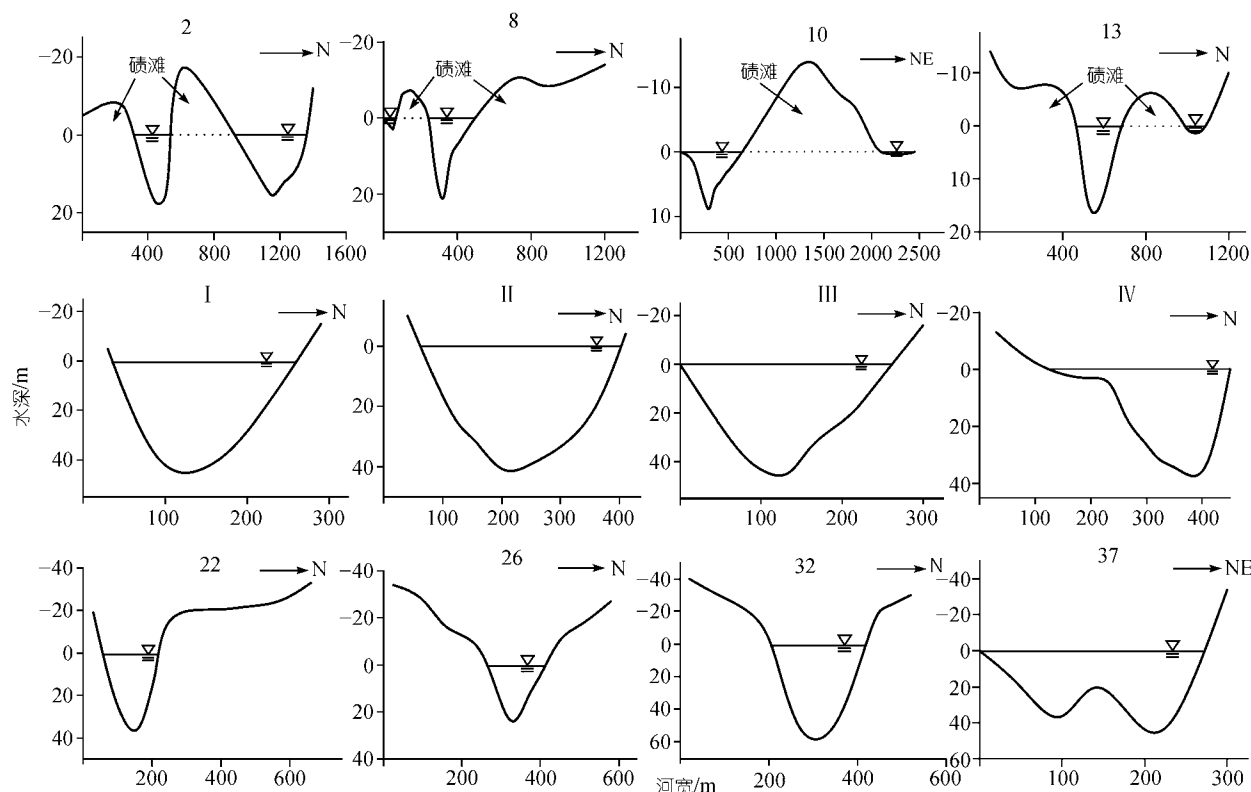


图 2 长江三峡代表性河床横剖面地形特征

水深取自长江上游重庆-宜昌水道图, 1954^[1]

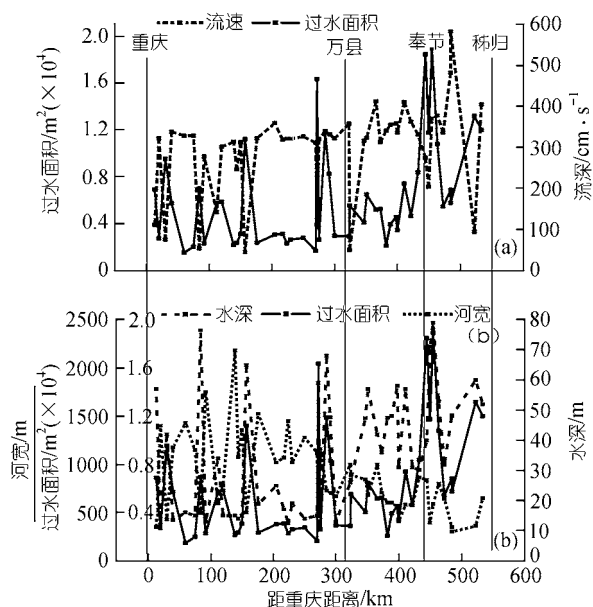


图 3 长江三峡流速与水文地貌特征分量的关系

水深和河宽来源于长江上游重庆-宜昌水道图, 1954; 过水面积是利用上述资料计算得到

巫峡和西陵峡的水深都在 70~80 m 之间, 最深可以达到 100 m 以上(石碑附近, 图 4), 床底可低于现代海平面 30~40 m. 奉节以上的水深随着高程加大而逐步减小(在丰都、清溪场、长寿等地仍可深达 50~60 m, 图 4). 从图 4 中还观测到上世纪 70 年代未完工的葛洲坝提高了坝上水位约 27 m 的现象, 坝上床底淤积明显, 最厚可达 20 m 以上, 主要集中在河床右岸(面对下游), 淤积长度可大于 20 km(图 4, 5). 调查资料还可以观测到葛洲坝后缘水面壅水现象, 一直可以延伸到坝上游约 150 km 处的巫山附近(图 4). 此外, 坝下底床明显出现冲刷现象, 与历史资料对比后可知, 冲刷深度达 15~20 m.

4 结语

三峡大坝即将在 2009 年建成, 正常调节水位要提高到 145~175 m. 在此期间, 应建立长期有效的监控措施, 对长江流域的水文地貌环境演变建立数据库并进行深入的研究, 这是一项非常有意义的工作.

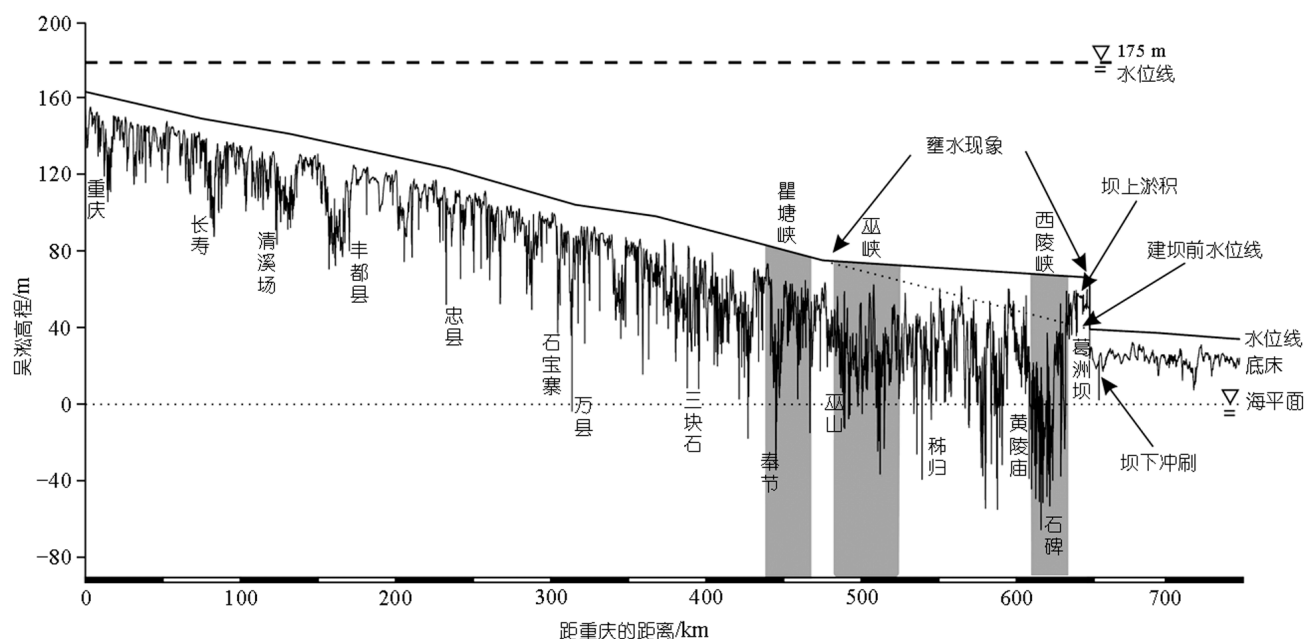


图 4 长江三峡(重庆~宜昌)河谷地形特征(水位资料同图 1)

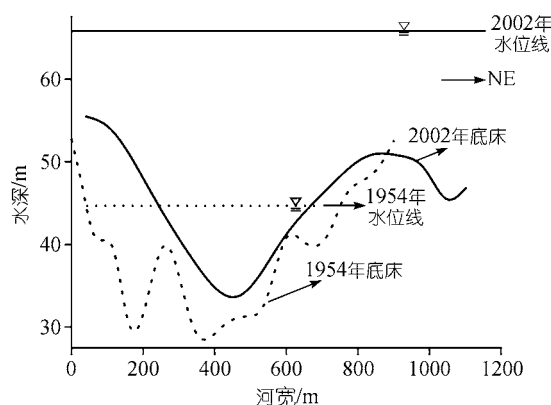


图 5 葛洲坝上游库区建坝前后的河谷横剖面特征

致谢 本次野外调查得到薛元忠高级工程师、顾靖华助理工程师以及赵怡文和李绿芊研究生的帮助;余凤玲和李艳红协助了数据处理,作者在此深表感谢。本工作受国家自然科学基金项目(批准号: 40341009)、APN/START项目(编号: 2003-12)以及日本环境部流域综合管理国际合作基金的资助。

参 考 文 献

- 1 Milliman J D, Meade R H. World-wide delivery of river sediment
to the oceans. *Journal of Geology*, 1983, 91: 1~22

- 2 Miller A J, Gupta A. *Introduction. In: Miller A J, Gupta A, eds. Varieties of Fluvial Form*. Chichester: John Wiley & Sons, 1999. 1~7
- 3 Chen Z, Yu L Z, Gupta A. The Yangtze River: an introduction. In: Chen Z, Yu L Z, Gupta A, eds. *Yangtze River, China. Geomorphology*, 2001, 41(2-3): 73~75[DOI]
- 4 姜彤, 崔光柏, 徐高洪, 主编. 气候变化与长江洪水专辑. 湖泊科学. 北京: 科学出版社, 2003. 1~288
- 5 沈焕庭. 长江河口物质通量. 北京: 海洋出版社, 2001. 1~2
- 6 Chen Z, Li J F, Shen H T. Historical analysis of discharge variability and sediment flux. In: Chen Z, Yu L Z, Gupta A, eds. *Yangtze River, China. Geomorphology*, 2001, 41 (2-3): 77~91[DOI]
- 7 Shen Z L, Liu Q, Zhang S M, et al. A Nitrogen Budget of the Changjiang River Catchment. *Royal Swedish Academy of Sciences*, 2003, 32: 65~69
- 8 Wang P X, Tian J, Cheng X R. Carbon reservoir changes preceded major ice-sheet expansion at the mid-Brunhes event. *Geology*, 2003. 31(3): 239~242[DOI]
- 9 水利部长江水利委员会编. 长江流域地图集. 北京: 中国地图出版社, 1999. 54~61
- 10 Yang S, Zhao Q Y, Belkin I M. Temporal variation in the sediment load of the Yangtze River and the influences of human activities. *Journal of Hydrology*, 2002, 263: 56~71[DOI]
- 11 张顺利, 陶诗言, 张庆云, 等. 长江中下游致洪暴雨的多尺度条件. *科学通报*, 2002, 47(6): 467~473[摘要][PDF]
- 12 潘树荣, 伍光和, 陈传康, 等. 自然地理学. 北京: 高等教育出版社, 1978. 182~183

(2004-06-03 收稿, 2004-11-15 收修改稿)