

长江上游干支流近期水沙变化及其与水库修建的关系

许炯心

(中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院水循环与地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘要: 基于水文站实测的长系列水沙资料, 运用统计方法研究了长江上游干支流的近期水沙变化。屏山站年输沙量的变化自 1999 年以后开始减小, 扭转了 1980~1998 年的增加趋势。高场站年输沙量由 1990~2000 年的减小趋势, 变化为 2000~2007 年的增大趋势。北碚站的年输沙量呈进一步减少的趋势。武隆站年输沙量改变了 1990~2000 年的增加趋势, 2000~2007 年显著减小。宜昌站的年输沙量延续了从 20 世纪 80 年代中期以来的减少趋势, 2002~2007 年急剧减小。采用输沙量-径流量双累积曲线方法进行了分析, 发现各站双累积曲线上最近一次转折点的出现, 均与水库的修建有关。基于双累积曲线估算了近期各站的减沙量(或增沙量)。研究还发现, 近期屏山、北碚、武隆、宜昌 4 站含沙量均呈现减小趋势, 与水库的拦沙作用密切相关。但是, 岷江近期水电梯级开发的大规模展开, 巨量弃土、弃渣进入河道, 导致了 2002~2007 年间含沙量的增大。建立了宜昌站年输沙量与长江上游流域内累计水库库容量及宜昌站年径流量之间的回归方程, 估算出它们对于长江上游产沙量变化的贡献率分别为 71.4% 和 28.6%。这表明, 水库拦沙是导致长江上游产沙量减小的主要原因。

关键词: 水沙变化; 水库; 双累积曲线; 长江上游

中图分类号: P333

文献标识码: A

2000 年以来, 随着大量水库的修建, 长江上游干支流的水沙变化出现了新的特点。对于长江上游的水沙变化, 已有不少研究成果问世^[1-7]。研究近期水沙变化, 对于深入认识长江水能资源开发利用产生的环境效应, 更好地进行流域管理, 有重要的意义。近 50 年来, 长江上游水库的修建经历了阶段性发展, 由在较小的支流上修建水库, 发展到在较大的支流上修建水库; 由在大支流上修建水库, 发展到在干流上修建水库; 由个别水库的修建发展到梯级式水库群的修建; 最后发展到各大支流高密度梯级开发的实施。在这一过程中, 水库减沙在人类活动对河流泥沙的影响中所占的比重越来越大。通过近期长江上游水沙变化的研究, 可以更好地揭示包括三峡水库在内的水库的修建, 对于长江泥沙输移的影响。

1 研究区概况与资料来源

长江上游是指宜昌以上的广大流域, 面积为 $100.5 \times 10^4 \text{ km}^2$, 是长江流域系统的主要侵蚀产沙带。据 1950~2000 年的水文资料统计, 长江宜昌站的年平均径流量为 $4382 \times 10^8 \text{ m}^3$, 输沙量为 $5.01 \times 10^8 \text{ t}$ 。长江上游的主要支流为金沙江、岷江、嘉陵江和乌江, 它们的年平均径流量分别占宜昌站的 32.6%, 19.8%, 15.25% 和 11.4%, 它们的年平均输沙量分别占宜昌站的 50.9%, 9.5%, 24.0% 和 5.6%^[6]。因此, 金沙江流域(主要是其下游)和嘉陵江流域是长江上游的主要产沙区。

长江上游大量水库群的修建, 是产沙量变化的重要原因。据统计, 截至 20 世纪 80 年代末, 长江上

收稿日期 (Received date): 2009-02-24

基金项目 (Foundation item): 水利部公益性行业专项经费项目 (编号: 2007SHZ090134) 和国家自然科学基金项目 (编号: 40788001) 成果。

[Supported by Chinese Ministry of Water Resources (No. 2007SHZ090134) and National Natural Science Foundation of China (No. 40788001).]

作者简介 (Biography): 许炯心 (1948-), 男, 四川人, 研究员。主要研究方向: 河流地貌、侵蚀产沙。[Xu Jiongxin (1948-), male, was born in Sichuan, professor. Fluvial geomorphology & erosion and sediment yield.] E-mail: xuj@igsnrr.ac.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

游地区已建成各类水库 11 931 座, 总库容 $205 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其中大型水库 13 座, 总库容 $97.5 \times 10^8 \text{ m}^3$; 中型水库 165 座, 总库容 $39.6 \times 10^8 \text{ m}^3$; 小(一)型水库 1 766 座, 总库容 $41.8 \times 10^8 \text{ m}^3$; 小(二)型水库 9 987 座, 总库容 $26.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。1990~2000 年间, 上游已建成水库 56 座, 以大中型水库为主, 总库容 $125.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其中, 金沙江流域 15 座, 总库容 $71.88 \times 10^8 \text{ m}^3$; 嘉陵江流域 13 座, 总库容 $35.82 \times 10^8 \text{ m}^3$; 乌江流域 2 座, 总库容 $14.45 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2000 年以后, 更有三峡水库建成蓄水, 总库容为 $393 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。继三峡工程之后, 未来 20 a 金沙江干流还将兴建向家坝(库容 $51.85 \times 10^8 \text{ m}^3$)、溪落渡(库容 $126.7 \times 10^8 \text{ m}^3$)、白鹤滩(库容 $193.8 \times 10^8 \text{ m}^3$)、乌东德(库容 $39.4 \times 10^8 \text{ m}^3$)等众多大型水库。如果规划的工程全部实施, 仅金沙江干流水库总库容就可达到 $800 \times 10^8 \text{ m}^3$, 这将大大减少金沙江的输沙量, 显著改变长江的河流特性^[4]。目前, 率先开发的溪落渡、向家坝水电站已开始组织建设。同时, 岷江、嘉陵江、乌江等大支流上的水库修建, 也正在大规模的展开。我们从不同的来源收集了长江上游各支流和干流水库修建的资料^[7, 8]。

为了研究长江干上游的水沙变化, 我们利用了金沙江屏山站、岷江高场站、乌江武隆站、嘉陵江北碛站和长江宜昌站的输沙量、径流量和含沙量资料, 均来自上述水文站, 资料年限为 1950~2007 年, 来自“中国河流泥沙公报”。由于缺乏推移质泥沙资料, 本文所指的输沙量, 均为悬移质输沙量。各条河流的产沙量, 用流域出口控制站的输沙量来表示。

2 结果与分析

2.1 长江上游干支流近期输沙量和径流量的变化

图 1 中分别点绘了长江上游金沙江屏山站、岷江高场站、嘉陵江北碛站、乌江武隆站和长江宜昌站的年输沙量 (Q_s) 和年径流 (Q_w) 量随时间的变化。为了揭示趋势性变化, 采用 5 次多项式进行拟合, 图中分别给出了拟合曲线和回归计算所得相关系数平方 R^2 值, 即决定系数值。统计检验表明, 其显著性概率 p 均小于 0.01。对于各站而言, 年输沙量拟合曲线的决定系数均大于年径流量的决定系数, 说明年输沙量变化比年径流量的变化更为显著; 换言之, 前者变化的趋势性比后者变化的趋势性更强。

图 1(a) 显示, 屏山站年输沙量的变化扭转了 1980~1998 年间的增加趋势, 自 1999 年以后开始

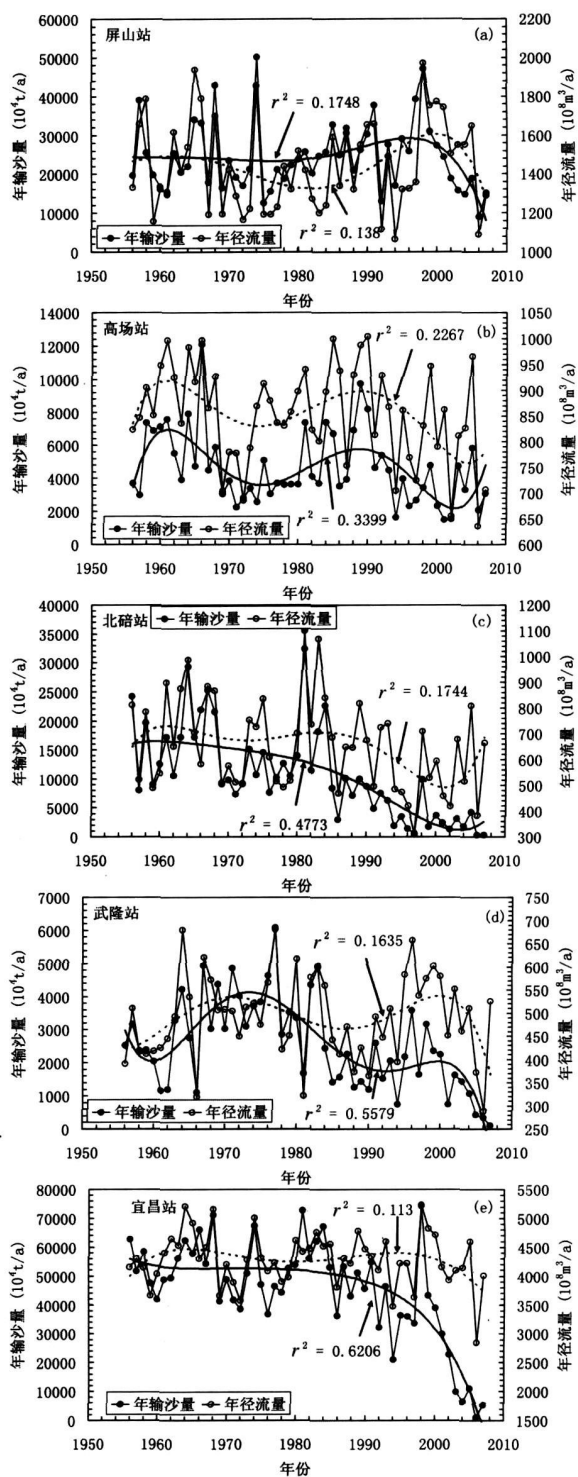


图 1 长江上游金沙江屏山站 (a)、岷江高场站 (b)、嘉陵江北碛站 (c)、乌江武隆站 (d) 和长江宜昌站 (e) 的年输沙量和年径流量随时间的变化 (图中除绘出了时序连线外, 还绘出了年径流量的 5 次多项式拟合趋势线 (粗虚线) 和年输沙量的 5 次多项式拟合趋势线 (粗实线))

Fig 1 Temporal variations in annual runoff and suspended sediment load at Pingshan station on the Jinsha River (a), Gaochang station on the Minjiang River (b), Beibei station on the Jialing River (c), Wulong station on the Wujiang River (d) and Yichang station on the Changjiang River (e)

减小。图 1(b)显示,高场站年输沙量的变化趋势也发生了改变。由 1990 年前后至 2000 年的减小趋势,变为 2000~2007 年的增大趋势。图 1(c)表明,北碚站的年输沙量延续了自 20 世纪 80 年代中期以来的减小趋势,总体上呈继续减少的趋势。从图 1(d)中可以看到,武隆站从 1990~2000 年,年输沙量具有增大的趋势,但从 2000 年开始,年输沙量出现了显著的减少。图 1(e)显示,宜昌站的年输沙量延续了从 20 世纪 80 年代中期以来的减少趋势,近期加速减小。因此,长江上游干支流的输沙量近期均出现了不同于前期的趋势,值得深入研究。

2.2 产沙量的变化及其原因

上文中对于各站的输沙量变化趋势进行了讨论。输沙量与降水量所决定的径流量有密切关系,输沙量变化的一部分来自气候变化如降水量变化的影响,其余部分则是人类活动导致的结果。因此,在图 1 中显示的年输沙量的变化,可能还包含着降水量(径流量)变化的影响。为了更好地揭示人类活动的影响,需要将降水量变化的影响予以消除。双累积曲线方法是一种研究降水(或径流)变化以外的因素对河流输沙量变化影响的方法。点绘累积输沙量与累积径流量的关系,若输沙量的变化只与径流量的变化有关,则二者的关系为一直线;若该直线在某一时间发生偏转,则表明降水以外的因素(通常是人类活动)对年输沙量产生了影响。

图 2 中分别点绘了上述各站的累积输沙量与累积径流量的关系,并绘出了双累积曲线。各条曲线表明,上述各站的输沙量都发生了趋势性变化,与上文中基于年输沙量时间变化所得到的分析结果基本上一致,说明径流量的变化对输沙量的影响是次要的,人类活动的改变是近期长江上游干支流输沙量变化趋势发生改变的主要原因。

在下文中,我们基于各条双累积曲线进行分析,揭示水库修建与双累积曲线上最近一次转折点的对应关系,以期查明水库修建对各主要支流输沙量变化的影响。按 $Q_s - Q_w$ 双累积曲线,对于近期(最近一个转折点)以后至 2007 年的累积输沙量的变化进行粗略估算,求得近期的减沙量(或增沙量)。这一变化量实际上就是转折点以后的拟合直线到时段结束(如 2007 年)时对于转折点以前的一条拟合直线的累积偏离量,这一偏离量可以用回归方程来计算。具体方法是,分别建立最近一次转折发生前的一段直线和发生后的直线的线性拟合方程:

$$\text{前一时段: } y_1 = a_1x + b_1 \quad (1)$$

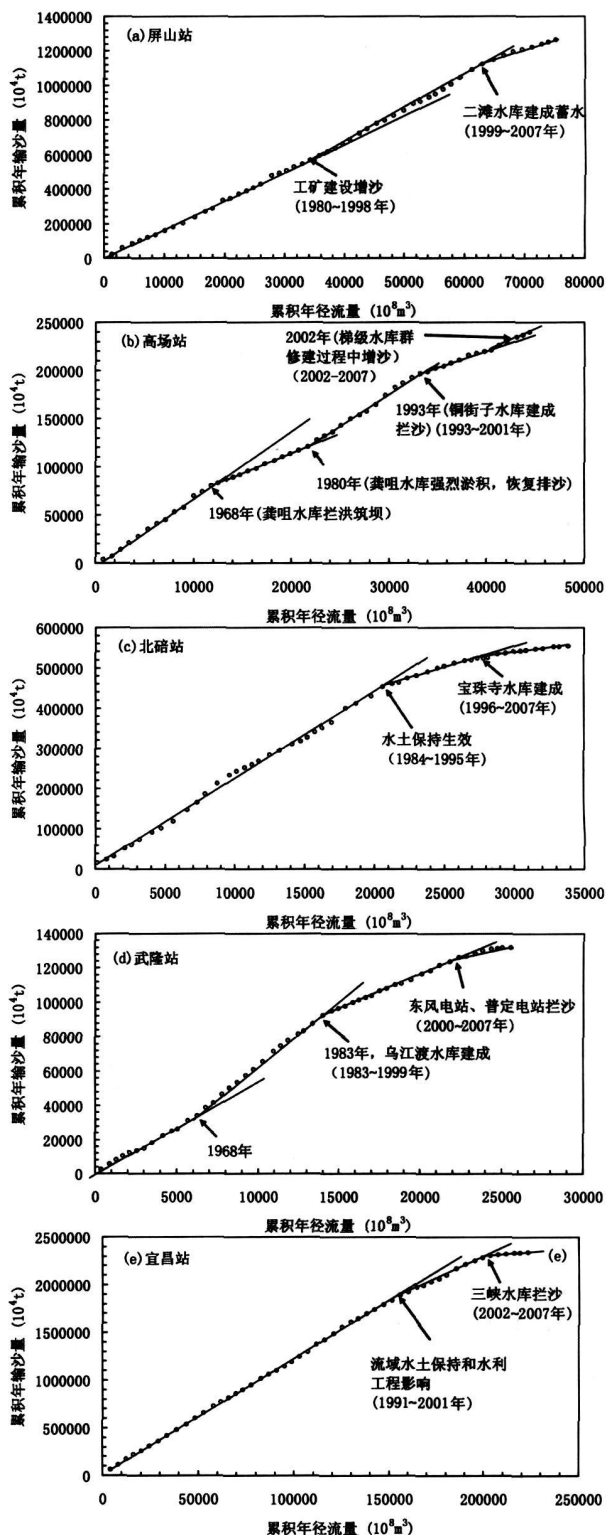


图 2 长江上游金沙江屏山站(a)、岷江高场站(b)、嘉陵江北碚站(c)、乌江武隆站(d)和长江宜昌站(e)的输沙量-径流量双累积曲线

Fig 2 Double mass plots between suspended sediment load and runoff for Pingshan station on the Jinshajiang River (a), Gaochang station on the Minjiang River (b), Beibei station on the Jialing River (c), Wulong station on the Wujiang River (d) and Yichang station on the Changjiang River (e)

$$\text{后一时段: } y_2 = a_2x + b_2 \quad (2)$$

若无人活动影响, 后一阶段结束时的累积产沙量可以按 (1) 式求出。加上人类活动影响后, 后一阶段结束时的累积产沙量则只能由 (2) 式求出。后一时段中人类活动影响导致的产沙量变化, 可以表示为按 (1) 式计算结果减去按 (2) 式计算结果的差值。这一差值表示后一阶段因人类活动而导致的累积减沙量 (或增沙量)。以后一时段的年数除之, 则得到平均每年的减沙量 (或增沙量)。对于各站的计算结果如下。

2.2.1 屏山站

从屏山站输沙量径流量双累积曲线上, 可以看到两个转折点。第一个转折点发生于 1980 年, 拟合直线右偏, 意味着在假定降水量不变时, 输沙量增加, 这主要与工矿建设的增沙作用有关^[1,9]。第二次也是最近一次, 转折点发生于 1998 年, 该年为二滩水库建成蓄水的时间。1998 年, 拟合直线右偏, 意味着在假定降水量不变时, 输沙量减少。显然, 由于这一转折点与二滩水库建成蓄水时间的吻合, 可以认为, 水库拦沙应该是 1998 年后发生输沙量减小的主要原因。1989 年以前, 金沙江流域修建水库不多, 总库容为 $28.13 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中大型水库仅有 1 座, 库容为 $5.53 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[7]。1990 年以后, 水库大量修建, 这一时段已建大型水库为雅砻江二滩水库和安宁河大桥水库, 前者库容 57.9 m^3 , 于 1998 年开始蓄水; 后者库容 $6.58 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。此外, 位于金沙江支流盘龙江的松华坝水库, 1958 年建成时库容为 $6.832 \times 10^4 \text{ m}^3$, 1995 年库建后, 库容扩大到 $2.19 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。已建中型水库 12 座, 总计库容 $2.14 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[7]。因此, 这 10 a 间水库拦沙作用越来越强, 逐渐抵消了工矿建设的增沙作用, 使得双累积曲线在 1998 年以后发生了根本性的变化, 输沙量由增大趋势变为减小趋势。同时, 金沙江下游水土流失重点治理区水土保持措施的逐渐生效, 也使得屏山站输沙量有所减少。

为了估算近期输沙量的减少, 建立了最近两个阶段 (1980~1998 年和 1999~2007 年) 的双累积直线拟合方程如下:

$$\begin{aligned} 1980 \sim 1998 \text{ 年: } y &= 19.006x - 90359 \\ (r^2 &= 0.9983) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} 1999 \sim 2007 \text{ 年: } y &= 11.459x + 407784 \\ (r^2 &= 0.9930) \end{aligned} \quad (4)$$

以 2007 年的屏山站累积径流值 75.170×10^8

m^3 代入前式, 得到在假定不受 1999~2007 年人类活动影响时 2007 年该站的累积输沙量为 $1.338.322 \times 10^4 \text{ t}$; 代入后式, 得到在受到 1999~2007 年人类活动影响时的 2007 年该站累积输沙量为 $1.269.157 \times 10^4 \text{ t}$ 。二者之差为 $58.137 \times 10^4 \text{ t}$ 即 1999~2007 年总减沙量为 $6.92 \times 10^8 \text{ t}$ 平均每年减沙为 $0.86 \times 10^8 \text{ t}$ 。可以认为, 这一减沙量主要是水库拦沙所致, 水土保持的作用是次要的。

2.2.2 高场站

高场站的输沙量-径流量双累积曲线表现出复杂的变化。存在着 4 个转折点, 将水沙变化过程分为 5 个阶段。第一次转折点发生于 1968 年, 与龚咀水库于 1967 年拦洪筑坝导致输沙量减少有关, 拟合直线向右偏转。龚咀水库于 1978 年建成后, 发生强烈淤积, 到 1980 年已因淤积而丧失了大部分库容, 水库恢复排沙, 故在 1980 年出现了第二个转折点, 拟合直线向左偏转, 意味着输沙量增大。1993 年, 修建于在龚嘴水电站下游 33 km 处的铜街子水库建成蓄水, 导致了第三个转折点的出现, 拟合直线向右偏转, 输沙量减小。2000 年以后, 流域内水电开发进入新的阶段, 包括紫坪铺和瀑布沟枢纽在内的大量梯级水电站在岷江和大渡河干流修建, 总库容达到 $61.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[7], 建设过程中巨量弃土、弃渣进入河道, 导致 2002 年出现了第四个转折点, 拟合直线向左偏转, 输沙量开始增大。

为了估算近期输沙量的增大, 建立了最近两个阶段 (1993~2001 年和 2002~2007 年) 的双累积直线拟合方程如下:

$$\begin{aligned} 1993 \sim 2001 \text{ 年: } y &= 3.706x + 72916 \\ (r^2 &= 0.993) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} 2002 \sim 2007 \text{ 年: } y &= 4.8339x + 25704 \\ (r^2 &= 0.994) \end{aligned} \quad (6)$$

以 2007 年的高场站累积径流值 $44.417 \times 10^8 \text{ m}^3$ 代入前式, 得到在假定不受 2002~2007 年人类活动影响时 2007 年该站的累积输沙量为 $237.525 \times 10^4 \text{ t}$; 代入后式, 得到在受到 2002~2007 年人类活动影响时的 2007 年该站累积输沙量为 $240.411 \times 10^8 \text{ t}$ 。二者之差为 $-2.427 \times 10^4 \text{ t}$ 说明 2002~2007 年增沙量为 $2.886 \times 10^4 \text{ t}$ 即平均每年增沙为 $577 \times 10^4 \text{ t}$ 。可以认为, 这主要是近期水电开发建设过程中导致的结果。

2.2.3 北碚站

北碚站的输沙量-径流量双累积曲线存在着两

个转折点, 将水沙变化过程分为 3 个阶段。第一个转折点发生于 1983 年, 拟合直线向右偏转, 与流域内水库的修建 (如嘉陵江支流白龙江上的碧口水库)、农村剩余劳动力的大量转移以及水土保持的开展有关, 导致了嘉陵江输沙量的减少^[10-11]。第二个转折点发生于 1995 年, 与宝珠寺水库的拦沙有关。该水库修建于白龙江上, 库容为 $25.5 \times 10^8 \text{ m}^3$, 控制白龙江流域面积的 89.4%^[7], 而白龙江是嘉陵江重点产沙区的主要泥沙来源之一。宝珠寺水库的蓄水拦沙, 使得嘉陵江的输沙量进一步减少。

为了估算近期输沙量的减少, 建立了最近两个阶段 (1984~1995 年和 1996~2007 年) 的双累积直线拟合方程如下:

$$1984 \sim 1995 \text{ 年: } y = 10.763x + 232688 \quad (r^2 = 0.991) \quad (7)$$

$$1996 \sim 2007 \text{ 年: } y = 4.8939x + 391712 \quad (r^2 = 0.9437) \quad (8)$$

以 2007 年的北碚站累积径流值 $33\,879 \times 10^8 \text{ m}^3$ 代入前式, 得到在假定不受 1996~2007 年人类活动影响时 2007 年该站的累积输沙量为 $597\,328 \times 10^4 \text{ t}$ 代入后式, 得到在受到 1996~2007 年人类活动影响时的 2007 年该站累积输沙量为 $557\,512 \times 10^4 \text{ t}$ 。二者之差为 $39\,815 \times 10^4 \text{ t}$ 说明 1996~2007 年总减沙量为 $3.98 \times 10^8 \text{ t}$ 平均每年为 $0.36 \times 10^8 \text{ t}$ 。

2.2.4 武隆站

武隆站的输沙量-径流量双累积曲线存在着三个转折点, 将水沙变化过程分为 4 个阶段。第一个转折点发生于 1968 年, 拟合直线向左偏转, 乌江输沙量增加, 可能与文化大革命时期“以粮为纲”、破坏植被、陡坡地开垦有关。第二个转折点发生于 1983 年, 与乌江渡水库的拦沙有关。该水库控制流域面积的 33%, 总库容为 $23 \times 10^8 \text{ m}^3$, 于 1979 年蓄水, 1983 年竣工^[6]。乌江渡水库的蓄水拦沙, 使得乌江输沙量显著减少。第三个转折点发生于 2000 年, 与一系列水库的修建有关。例如, 洪家渡水电站总库容 49.47 m^3 , 位于乌江北源六冲河下游, 2001 年截流, 2004 年蓄水; 普定电站位于乌江南源三岔河上, 总库容为 $4.2 \times 10^8 \text{ m}^3$, 1994 年蓄水, 1995 年全部建成; 东风电站位于乌江干流, 控制流域面积 21%, 总库容为 $10.25 \times 10^8 \text{ m}^3$, 1994 年蓄水, 1995 年全部建成。此外, 构皮滩水库位于乌江中游, 控制流域面积的 49.2%, 正常蓄水位以下库容 $55.64 \times$

10^8 m^3 , 于 2004 年实施截流^[7]。所有这些水库, 都拦截了大量泥沙, 导致了 2000 年以后拟合直线的向右偏转。

为了估算近期输沙量的减少, 建立了最近两个阶段 (1983~1999 年和 2000~2007 年) 的双累积直线拟合方程如下:

$$1983 \sim 1999 \text{ 年: } y = 3.9449x + 37302 \quad (r^2 = 0.9983) \quad (9)$$

$$2000 \sim 2007 \text{ 年: } y = 2.0188x + 81205 \quad (r^2 = 0.9481) \quad (10)$$

以 2007 年的武隆站累积径流值 $25\,539 \times 10^8 \text{ m}^3$ 代入前式, 得到在假定不受 2000~2007 年人类活动影响时 2007 年该站的累积输沙量为 $138\,068 \times 10^4 \text{ t}$ 代入后式, 得到在受到 2000~2007 年人类活动影响时的 2007 年该站累积输沙量为 $132\,763 \times 10^4 \text{ t}$ 。二者之差为 $5\,306 \times 10^4 \text{ t}$ 即 2000~2007 年总减沙量为 $5\,306 \times 10^4 \text{ t}$ 平均每年为 $758 \times 10^4 \text{ t}$ 。

2.2.5 宜昌站

宜昌站的输沙量-径流量双累积曲线存在着两个转折点, 将水沙变化过程分为 3 个阶段。第一个转折点发生于 1991 年, 拟合直线向右偏转, 意味着在径流量不变时, 输沙量减小。这与 1988 年开始实施的长江上游水土流失治理工程有关, 也与流域内大量水库的修建有关。据统计, 截至 1989 年, 长江上游干支流共修建各类水库 11 981 座, 总库容 $205.04 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[12]。同时, 农村剩余劳动力的大量转移, 减轻了人口对土地的压力, 有利于植被的自然恢复, 也会减轻土壤侵蚀。第二个转折点发生于 2002 年, 显然是三峡水蓄水拦沙所导致的结果。三峡水库总库容 $393 \times 10^8 \text{ m}^3$, 第一阶段 (1993~1997 年) 为施工准备及一期工程, 以实现大江截流为标志。第二阶段 (1998~2003 年) 为二期工程, 以实现水库初期蓄水、第一批机组发电和永久船闸通航为标志。实现初期蓄水之后, 大量泥沙被水库拦截, 导致了宜昌站输沙量的显著减少。

为了估算近期输沙量的减少, 建立了最近两个阶段 (1991~2001 年和 2002~2007 年) 的双累积直线拟合方程如下:

$$1991 \sim 2001 \text{ 年: } y = 9.3767x + 418284 \quad (r^2 = 0.9953) \quad (11)$$

$$2002 \sim 2007 \text{ 年: } y = 1.7026x + 2E+06 \quad (r^2 = 0.9744) \quad (12)$$

以 2007 年的宜昌站累积径流值 $223\,136 \times 10^8$

m^3 代入前式, 得到在假定不受 2002~2007 年人类活动影响时 2007 年该站的累积输沙量应为 $2\,510\,563 \times 10^4 t$ 代入后式, 得到在受到 2002~2007 年人类活动影响时的 2007 年该站累积输沙量为 $2\,379\,911 \times 10^4 t$ 二者之差为 $130\,652 \times 10^4 t$ 即 2002~2007 年总减沙量为 $13.06 \times 10^8 t$ 平均每年为 $2.61 \times 10^8 t$

2.3 含沙量变化

我们曾经系统地研究了长江上游干支流含沙量的变化, 揭示了不同流域中含沙量变化的不同趋势^[13]。鉴于资料, 当时的分析只涉及 2000 年以前的变化。由于目前已能得到 2007 年的资料, 故本文研究了 2000 年以后长江上游干支流含沙量的变化趋势。

图 3(a)~(e) 中分别点绘了长江上游金沙江屏山站 (a)、岷江高场站 (b)、嘉陵江北碛站 (c)、乌江武隆站 (d) 和长江宜昌站 (e) 含沙量的时间变化。图中绘出了年平均含沙量的 5 次多项式拟合趋势线。可以看到, 各站含沙量变化曲线与与图 1 中所示的输沙量变化曲线的趋势十分相似, 说明含沙量的变化主要受输沙量变化的影响。图中显示, 近期长江宜昌站、金沙江屏山站、嘉陵江北碛站、乌江武隆站的含沙量均呈减小趋势, 但高场站呈增大趋势。这与上文中双累积曲线揭示的各站输沙量的变化是一致的。

近期各站含沙量的减小趋势, 均与水库的拦沙作用有关。由于二滩等水库的拦沙作用, 改变了金沙江含沙量增大的趋势, 自 1999 年以来出现了减小趋势。由于岷江近期水电梯级开发工程的大规模展开, 建设过程中巨量弃土、弃渣进入河道, 改变了 1993 以后含沙量减小的趋势, 导致 2002~2007 年含沙量有所增大。由于嘉陵江流域中宝珠寺等水库的修建拦沙, 使得北碛站含沙量继续减小。由于洪家渡、普定、东风、构皮滩等一系列水库的修建和拦沙, 使得乌江的含沙量自 2000 年以后呈现显著的减小趋势。

2.4 水库修建对长江上游产沙量的影响

上文中对长江上游近期产沙量的变化进行了分析, 表明水库的修建是近期水沙变化的重要原因, 因为基于宜昌站和 4 条主要支流的资料点绘出的输沙量-径流量双累积曲线上近期出现的转折点, 均与大型水库的修建存在较好的对应关系。因此, 我们进一步分析了长江上游水库对累计库容量与宜昌站年输沙量的关系, 以揭示水库修建对长江上游产沙

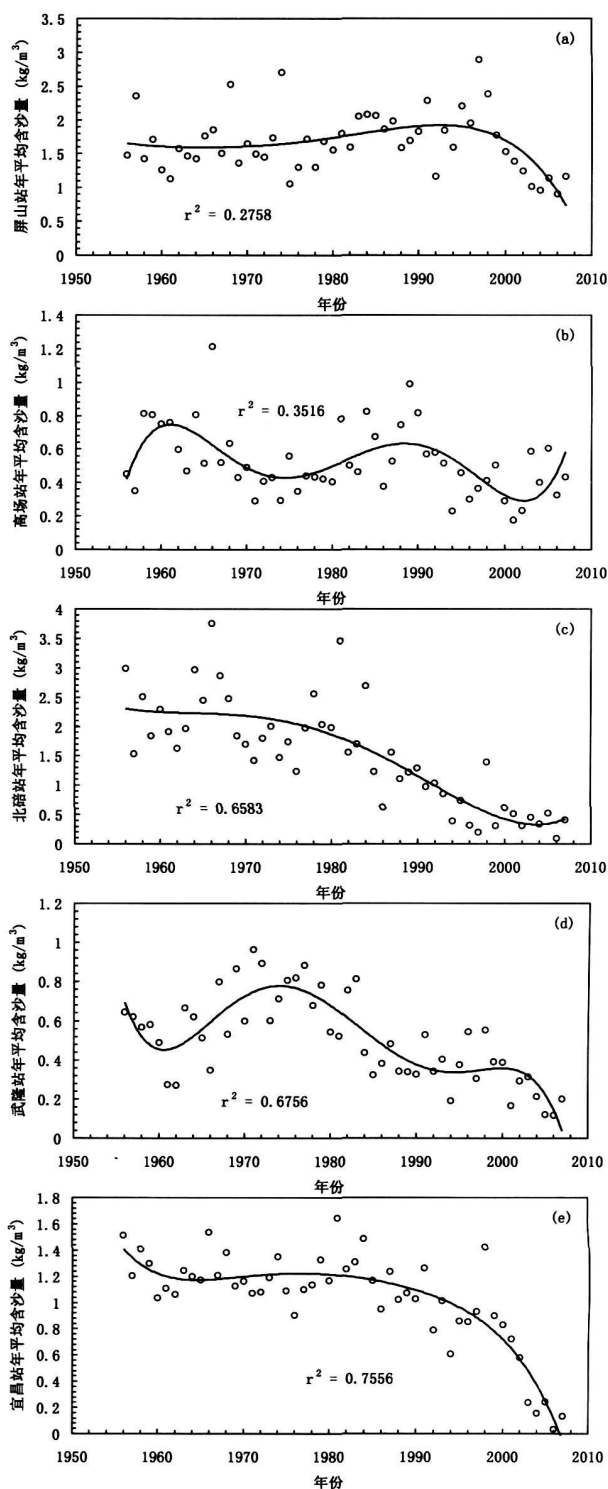


图 3 长江上游金沙江屏山站 (a)、岷江高场站 (b)、嘉陵江北碛站 (c)、乌江武隆站 (d) 和长江宜昌站 (e) 含沙量的时间变化 (图中绘出了年平均含沙量年的 5 次多项式拟合趋势线)

Fig. 3 Temporal variations in suspended sediment concentrations at Pingshan station on the Jinshajiang River (a), Gaochang station on the Minjiang River (b), Beibei station on the Jialing River (c), Wulong station on the Wujiang River (d) and Yichang station on the Changjiang River (e)

量的影响。这里, 水库累计库容量是指在某一时间, 长江上游已建成水库库容量的总和。

为了表征水库对河流径流的影响, 常以库容系数为指标, 定义为总库容 (C_t) 和流域控制水文站的多年平均径流量 (Q_w) 之比, 也可称为多年径流调节系数。由于年际间径流量有较大差异, 具体到不同的年份, 以上述库容系数来表示水库的径流的实际调节作用并不准确, 故我们以某一年份的年径流量与该年水库的总库容之比来表示水库的调节作用, 称为实际径流调节系数。

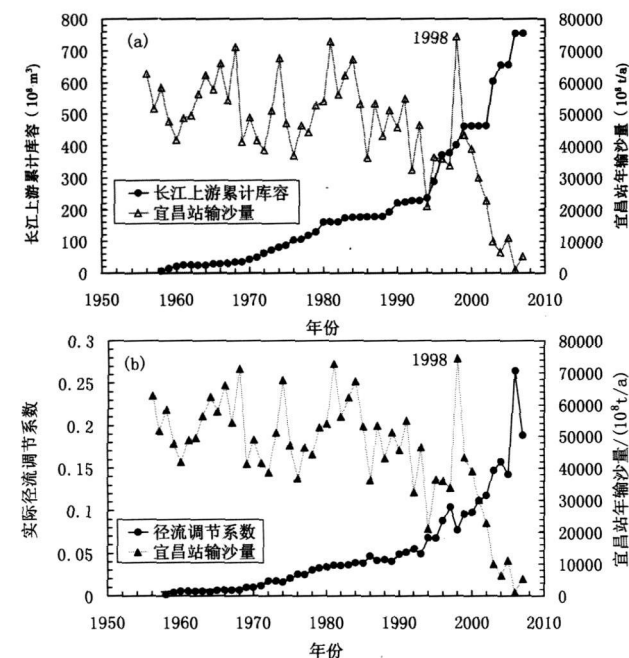


图 4 长江上游水库累计库容和宜昌站年输沙量随时间的变化 (a) 以及水库对实际径流调节系数和宜昌站年输沙量随时间的变化的比较

Fig. 4 Temporal variations in total capacity of reservoirs in the upper Changjiang River basin and suspended sediment load at Yichang station (a) and temporal variations in coefficient of actual runoff regulation by reservoirs in the upper Changjiang River basin and suspended sediment load at Yichang station

图 4 中点绘了长江上游水库总库容和实际径流调节系数随时间的变化。可以看到, 在总体的增大趋势中, 1980 年代中后期增速加快。2000 年以后更是急剧增大, 与三峡、二滩等水库的修建和蓄水有关。为了揭示水库对产沙的影响, 图中还点绘了宜昌站的年输沙量随时间的变化。1998 年宜昌站的输沙量显著偏高, 与该年的特大洪水有关。若不计这一年, 则可以看到, 1980 年代中期以前, 宜昌站的输沙量无趋势性变化, 此后则呈减小趋势。输沙量

在 80 年代中期的转折点, 可以与水库累计库容 1980 年代中后期增速加快相联系; 而 2002 年以后宜昌站输沙量的快速减小, 则可以与水库库容的急剧增大相联系。因此可以认为, 水库拦沙是近期长江上游产沙量减小的主要原因。

为了进一步论证水库对于宜昌站输沙量的影响, 图 5 中分别点绘了宜昌站年输沙量与长江上游水库累计库容和水库对实际径流调节系数的关系, 均呈极显著的正相关, 决定性系数分别为 0.662 和 0.772, 意味着宜昌站输沙量变化的 66.2% 可以用长江上游水库累计库容的变化来解释, 其变化的 77.2% 可以用水库对实际径流调节系数的变化来解释。

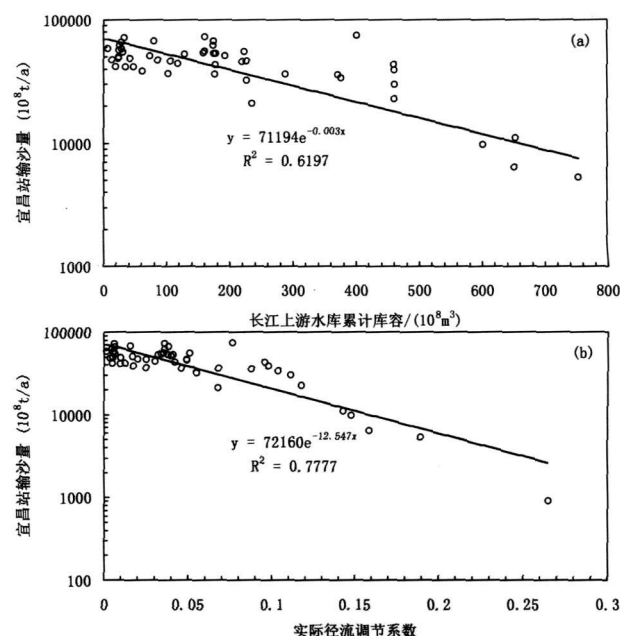


图 5 宜昌站年输沙量与长江上游水库累计库容 (a) 和水库对实际径流调节系数 (b) 的关系

Fig. 5 Plots of annual suspended sediment load against total capacity of reservoirs in the upper Changjiang River basin (a) and the coefficient of actual runoff regulation by reservoirs (b)

长江上游产沙量的变化, 与自然因素和人为活动有关。自然因素的变化主要是降水量的变化。由于长江流域径流丰沛, 人类净用水量占天然年径流的比例很小, 故年径流量的变化可以间接反映年降水量的变化。人类活动主要表现为三个方面, 即水库修建、公路、铁路建设、城市建设以及水土保持。由于难以得到长系列的水土保持措施面积资料和工矿、交通、城市建设增沙的资料, 这里暂时只考虑水库修建的影响和降水变化的影响, 降水变化间接用年径流的变化来表示。以宜昌站的年输沙量 Q_s 为

因变量,以长江上游流域历年水库累计库容 C_t ($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)和宜昌站的年输沙量 Q_w (10^8 t/a)为影响变量,运用 1956~2007年间的资料,经计算后得到如下方程

$$\ln(Q_s) = -14.54 - 0.002599C_t + 3.066 \ln(Q_w) \quad (13)$$

上式的复相关系数 $R = 0.898$ 检验结果 $F = 97.878$ 显著性概率 $p = 1.75 \times 10^{-17}$, 剩余标准差 $SE = 0.350$ 。由于上式中各变量的数量级相差很大,不能直接根据回归系数的大小来判定各变量贡献的大小。为了定量评价各因素的变化对于 Q_s 的相对贡献率,我们对数据进行了标准化,建立了常数项为 0 的多元回归方程,并依据各变量回归系数的大小来进行判定其对因变量变化的贡献率。所建立的常数项为 0 的回归方程如下

$$\ln(Q_s) = -0.687C_t + 0.444 \ln(Q_w) \quad (14)$$

上式中各变量系数绝对值的大小反映该变量对因变量贡献率的大小。 C_t 和 $\ln(Q_w)$ 的变化对 $\ln(Q_s)$ 变化的贡献率之比 $0.687:0.444$ 。由此可以求得,当这两个变量的总贡献率为 100% 时, C_t 和 $\ln(Q_w)$ 的变化对 $\ln(Q_s)$ 变化的贡献率分别为 60.8% 和 39.2%。因此,水库拦沙作用是导致长江上游产沙量的减小的主要原因。

3 结论

基于水沙资料研究了长江上游干支流的近期水沙变化,得到以下结论:

1. 屏山站年输沙量的变化扭转了 1980~1998 年间的增加趋势,自 1999 年以后开始减小。高场站年输沙量的变化趋势发生了改变,由 1990 年前后至 2000 年的减小趋势,变化为 2000~2007 年的增大趋势。北碚站的年输沙量呈进一步减少的趋势。武隆站年输沙量改变了 1990~2000 年的增加趋势,从 2000 年开始显著减小。宜昌站的年输沙量延续了从 20 世纪 80 年代中期以来的减少趋势,2002 年以后急剧减小。

2. 基于各站资料,采用输沙量-径流量双累积曲线方法进行了分析,发现各站双累积曲线上最近一次转折点的出现,均与水库的修建有关。基于双累积曲线估算了近期各站的减沙量(或增沙量)。屏山站 1999~2007 年总减沙量为 $6.92 \times 10^8 \text{ t}$ 平均每年减沙为 $0.86 \times 10^8 \text{ t}$ 高场站 2002~2007 年增沙量为 $2.886 \times 10^4 \text{ t}$ 即平均每年增沙为 $577 \times 10^4 \text{ t}$ 北碚站 1996~2007 年总减沙量为 $3.98 \times 10^8 \text{ t}$ 平均每

年为 $0.36 \times 10^8 \text{ t}$ 武隆站 2000~2007 年总减沙量为 $5.306 \times 10^4 \text{ t}$ 平均每年为 $758 \times 10^4 \text{ t}$ 宜昌站 2002~2007 年总减沙量为 $13.06 \times 10^8 \text{ t}$ 平均每年为 $2.61 \times 10^8 \text{ t}$ 。高场站增沙主要是近期水电开发建设过程中大量弃土弃渣导致的结果,其余各站减沙则与水库拦沙有关。

3. 近期屏山、北碚、武隆、宜昌 4 站含沙量呈现减小趋势,均与水库的拦沙作用有关。但由于岷江近期水电梯级开发工程的大规模展开,巨量弃土、弃渣进入河道,导致 2002~2007 年含沙量有所增大。

4. 建立了宜昌站年输沙量与长江上游流域内累计水库库容量及宜昌站年径流量的回归方程,计算出它们对于长江上游产沙量变化的贡献率分别为 60.8% 和 39.2%。因此,水库拦沙作用是导致长江上游产沙量减小的主要原因。

参考文献 (References)

- [1] Zhang Xinba, Wen Anbang. Variations of sediment in upper stream of Yangtze River and its tributary [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, (4): 56~59 [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 [J]. 水利学报, 2002, (4): 56~59]
- [2] Zhang Li, Chen Jin. Analysis on Change of Water flow and Sediment in Upstream of Yangtze River [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2007, 24(6): 34~37 [张莉莉, 陈进. 长江上游水沙变化分析 [J]. 长江科学院院报, 2007, 24(6): 34~37]
- [3] Fu Renshou, Qi Meilan, Fang Hongwei, Chen Xiqing. Incoming runoff and sediment runoff to Yichang hydroelectric station affected by the projects on the upstream of Yangtze River [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2006, 25(2): 103~111 [符仁寿, 齐梅兰, 方红卫, 陈西庆. 长江上游工程对宜昌来水来沙变化的影响 [J]. 水力发电学报, 2006, 25(2): 103~111]
- [4] Dai Huishao, Wang Lingling, Jiang Dingguo. Recent variation of water flow and silt concentration of Yangtze River before and after impounding of Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, (Suppl.): 226~231 [戴会超, 王玲玲, 蒋定国. 三峡水库蓄水前后长江上游近期水沙变化趋势 [J]. 水利学报, 2007(增刊): 226~231]
- [5] Xu Quanxi, Shi Guoyu, Chen Zefang. Analysis of recent changing characteristics and tendency runoff and sediment transport in the upper reach of Yangtze River [J]. *Advances In Water Science*, 2004, 15(4): 420~426 [许全喜, 石国钰, 陈泽方. 长江上游近期水沙变化特点及其趋势分析 [J]. 水科学进展, 2004, 15(4): 420~426]
- [6] Chen Jin, Huang Wei. Preliminary study on the change of water flow and sediment process in the Changjiang River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14(6): 786~792 [陈进, 黄薇. 梯级水库对长江水沙过程影响初探 [J]. 长江流域资源与环境, 14(6): 786~792]
- [7] Hydrological Bureau of Changjiang River Water Conservancy Com-

- mission A study of sediment trapping by reservoirs in the upper Changjiang river basin during 1990s[A]. In Experts Group on Sediment Issues of the Three Gorges Project (ed.). A Study of Sediment Issues of the Three Gorges Project Vol. 1 [C], Beijing Press of Intellectual Property Right 2008: 250~300[长江水利委员会水文局. 长江上游 20 世纪 90 年代大中型水库蓄水拦沙作用的调查与分析[A]. 见: 国务院三峡工程建设委员会办公室泥沙专家组. 中国长江三峡工程开发总公司三峡工程泥沙专家组编. 长江三峡工程泥沙问题研究(2001~2005), 第 1 卷, 长江水库来水来沙的变化及其影响研究[C]. 北京: 知识产权出版社, 2008: 250~300]
- [8] Yang S. L., Zhang J., Zhu J., *et al.* Impact of dams on Yangtze River sediment supply to the sea and delta wetland response [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110, F03006, doi: 10.1029/2004JF000271
- [9] Xu Jiongxin, Sun Ji. Sediment yield in major sediment source areas of the upper Changjiang River basin in response to human activities [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(2): 211~218 [许炯心, 孙季. 长江上游重点产沙区产沙量对人类活动的响应[J]. 地理科学, 2007, 27(2): 211~218]
- [10] Xu Jiongxin. Effect of the Changing rural Socio-economic Factors on Sediment yield of the Jialiangjiang River Basin[J]. *Journal of Mountain Science* 2006, 24(4): 385~394 [许炯心. 农村社会经济因素变化对嘉陵江产沙量的影响[J]. 山地学报, 2006, 24(4): 385~394]
- [11] Xu Jiongxin. Effect of human activities and precipitation on sediment yield of the Jialiangjiang River[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(4): 432~437 [许炯心. 人类活动和降水变化对嘉陵江流域侵蚀产沙的影响[J]. 地理科学, 2006, 26(4): 432~437]
- [12] Experts Group on Sediment Issues of the Three Gorges Project. A Study of Sediment Issues of the Three Gorges Project [C]. Beijing Press of Intellectual Property Right 2002 Vol. 8: 5~8 [国务院三峡工程建设委员会办公室泥沙课题专家组. 中国长江三峡工程开发总公司工程泥沙专家组编. 长江三峡工程泥沙问题研究(1996~2000), 第八卷, 长江三峡工程“九五”泥沙研究综合分析[C]. 北京: 知识产权出版社, 2002: 5~8]
- [13] Xu Jiongxin, Sun Ji. Temporal variation in suspended sediment concentration of the upper Changjiang River and its tributaries in the past 50 years and the formative cause [J]. *Geographica Research*, 2008, 27(2): 332~342 [许炯心, 孙季. 长江上游干支流悬移质含沙量的变化及其原因[J]. 地理研究, 2008, 27(2): 332~342]

Recent Variations in Water and Sediment in Relation with Reservoir Construction in the Upper Changjiang River Basin

XU Jiongxin

(Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Key Laboratory for Water Cycle and Related Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract Based on hydrometric data and using statistical method, the recent variations in water and sediment in the upper Changjiang River basin have been dealt with. The results indicate that annual sediment load at Pingshan station decreased after 1999, which changed the increasing trend during the period 1980–1998. Annual sediment load at Gaochang station increased after 2002, which changed the decreasing trend during the period 1990–2000. Annual sediment load at Beibei station decreased, which continued the decreasing trend. Annual sediment load at Wulong station markedly decreased after 2000, which changed the increasing trend during the period 1990–2000. Annual sediment load at Yichang station decreased sharply, which continued the decreasing trend since the mid-1990s. It has been found that the occurrence of the recent break on all the double-mass curves for the above five stations can well be related with reservoir construction. Based on the double-mass curves, the amount of sediment reduction (or increase) has been estimated for each river. In recent years, suspended sediment concentration at Pingshan, Beibei, Wulong and Yichang stations shows a decreasing trend, which was caused by reservoir construction. However, the huge amount of rock and soil dumped to the river during the construction of a number of dams on the Minjiang River resulted in an increasing trend in suspended sediment concentration. A regression equation has been established between annual sediment load at Yichang station and the total capacity of reservoirs in the upper Changjiang River basin and annual runoff at Yichang station, based on which that the contribution of these two influencing variables to the variation in annual sediment load at Yichang station were estimated as 60.8% and 39.2%, respectively. Thus, the sediment trapping by reservoirs is the major cause for sediment reduction in the upper Changjiang River.

Key words water and sediment changes, reservoir, double-mass curve, upper Changjiang River