

人类活动对长江上游近期输沙变化的影响

杜 俊^{1,2}, 师长兴¹, 张守红^{1,2}, 张 鸾^{1,2}

(1. 中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室, 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 利用 1956–2007 年径流—输沙序列, 分期定量研究了长江上游近期主要干支流输沙变化及其原因, 结果显示: ①长江上游 1994–2002 年输沙量减少 1.43 亿 t/a, 人为减沙占 91.2%, 主要来自嘉陵江措施减沙; 2003–2007 年减沙 4.50 亿 t/a, 径流减沙占 14.1%, 前期持续的人类活动减沙占 39.8%, 三峡水库蓄水拦沙、金沙江措施减沙等新增人为减沙占 46.2%。②金沙江 1983–2000 年输沙量增加 0.48 亿 t/a, 人为增沙占 74.7%, 主要是工程增沙; 2001–2007 年输沙量减小 1.183 亿 t/a, 全部为人为减沙, 包括二滩等类型水库拦沙、水保减沙和工程增沙减少。③嘉陵江 1985–1993 年输沙减少 0.827 亿 t/a, 人为减沙占 81.4%, 主要人为减沙包括农村社会经济因素变化导致的土壤减蚀和水库拦沙; 1994–2007 年输沙量减少 1.285 亿 t/a, 其中自然径流减沙占 29.6%, 前期持续人类活动减沙占 42.1%, 宝珠寺等新增水库拦沙和水保减沙占 23.4%, 另有 4.9% 的人为减水减沙。

关 键 词: 长江上游; 输沙变化; 时期划分; 影响因素

1 引言

河流输沙是维持陆海作用平衡的基本过程, 也是引发流域生态环境问题的重要方面, 在全球气候变化与日趋强烈的人类活动双重影响下, 河流输沙复杂而深刻的响应过程, 是近年来河流地貌学研究的热点问题^[1–4]。长江上游作为气候类型多样、工农业生产活跃和工程建设较为频繁的地区, 是研究河流输沙对自然及人为作用响应的理想对象, 涌现出大量科研成果。已有研究表明, 长江上游的输沙时空变化与地形地貌、气候、植被覆盖、人口以及水利水保措施有关, 其中地貌、气候以及人口因子对西部“自然”地区输沙模数变化具有较高的解释力, 而对东部人类活动影响较大的地区解释不足^[5–6]。土地利用改变引起的植被覆盖变化以及水利工程特别是水库建设, 是影响输沙的重要因素^[7–9], 其中水库建设是影响长江陆海泥沙通量变化最为重要的因素, 但可能存在尺度效应^[10–12]。

就流域内部差异而言, 近年来长江上游各干支流输沙变化各不相同, 其中嘉陵江和金沙江两重点产沙区表现尤为明显^[13–15]。金沙江流域 1982 年以来输沙量一直呈上升趋势, 原因是该地区近年来交通、

采矿等工程建设频繁, 增沙作用明显, 而流域下游本底生态环境较差, 地势起伏大, 多泥石流冲沟, 加上干热河谷气候, 植被恢复困难, 已有的水利水保措施短期内成效有限; 嘉陵江流域 1984 年以后输沙量则呈下降态势, 主要原因是流域地势起伏小, 植被恢复相对容易, 加上坡面治理、水库拦沙和降水减少, 输沙量显著下降, 并直接影响宜昌站出沙下行。

以上研究很多侧重于对一段时期河流输沙变化及其原因的定性描述、讨论与总体概括, 而对人类活动在各个时期影响输沙的定量分析不多。另一方面, 三峡水库蓄水以来, 长江上游泥沙通量出现了更大幅度的减少, 探明其中各种人为因素的减沙效应, 对水库的功能发挥、寿命延长以及上游水土保持方略的改进, 都具有一定的现实意义。因此, 本文尝试依据长江上游各主要控制站点近期水沙变化趋势, 划分历史时期, 定时定量分析各个阶段人为因素对输沙变化的影响。

2 研究区概况与数据资料

长江上游系指宜昌以上流域范围, 面积 100.5

收稿日期: 2009–05; 修订日期: 2009–07.

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(2007SHZ0901034)。

作者简介: 杜俊(1983–), 男, 安徽马鞍山人, 在读博士, 主要从事长江上游泥沙迁移研究。

通讯作者: 师长兴(1963–), 男, 河北正定人, 研究员, 博士生导师。主要从事流域物质迁移与环境变化研究。

E-mail: shicx@igsnr.ac.cn

万 km²,其中正源沱沱河纳当曲后称通天河,以下过巴塘河口至湖北宜宾称金沙江, 宜宾至宜昌俗称“川江”。除上述干流,较大的支流有雅砻江、岷江、沱江、嘉陵江和乌江(图 1)。干流全长 4511km,流经青海、西藏、云南、贵州、陕西、甘肃、四川、湖北和重庆 8 省 1 市 53 个地区,流域总人口 1.45 亿,其中农业人口 1.26 亿,平均人口密度 144 人/km²。到 20 世纪 90 年代初,长江上游水土流失面积 35.2 万 km²,占上游总土地面积的 35%, 年均地表侵蚀总量达 15.68 亿 t^[6]。金沙江下游和嘉陵江中上游是长江上游的重点产沙区,两地区多年平均输沙量 2.2 亿 t,水土流失面积约 9.2 万 km²,年均地面侵蚀量 5.5 亿 t,分别占整个长江上游相应指标的 43.7%、26.1%和 35.1%。

为研究长江上游干支流输沙变化,收集了金沙江屏山站、嘉陵江北碛站、岷江高场站、乌江武隆站、长江寸滩站以及长江宜昌站 1956–2007 年的输沙量序列(宜昌站自 1950 年起,寸滩站自 1953 年起),由于缺乏推移质资料,本文所指的输沙量均为悬移质输沙量。为考察人为因素对输沙变化的影响,还收集了流域内径流、水利水保及道路工程建设等方面资料。

3 悬移质输沙量的年际变化

图 2 点绘了近期长江上游主要干支流控制站点悬移质泥沙的年均输沙序列,经 Mann–Kendall 趋势检验得知嘉陵江北碛、乌江武隆、长江寸滩和长江宜昌站输沙量均在 0.01 显著性水平上呈下降趋势,金沙江屏山和岷江高场站则无显著性趋势变化,从近年变化看,6 站点除高场站外输沙量均呈下降态势。屏山站输沙量在经历了 80、90 年代的上升期后,于 2000 年开始下降。1956–1999 年该站年均输沙量为 2.55 亿 t, 占同期寸滩站的 58.4%,2000–2007 年下降 29.8%至 1.79 亿 t,占寸滩站比重却上升到 81%,表明其他站点,特别是嘉陵江输沙量下降

更为剧烈。北碛站输沙量自 1984 年以后明显下降, 1985–2007 年年均输沙量仅为 0.45 亿 t, 较之前的年均 1.56 亿 t 下降 71.2%, 占寸滩站的比重也由 1956–1984 年的 34% 下降到 1985–2007 年的 13.5%。2000 年以来,屏山站、北碛站输沙量年均合计 2.03 亿 t,占寸滩站来沙的 92%,其他站点,如横江、岷江、沱江来沙仅占 8%。

长江上游控制站点宜昌站输沙量自 20 世纪 80 年代初开始逐步下降,1998 年因特大洪水出现异常高值,此后剧烈下降,2003 年三峡水库蓄水拦沙,输沙量进一步减少,2007 年只有 0.53 亿 t, 仅为多年均值 5.17 亿 t(1950–1992)的 10.3%。三峡水库蓄水前(1956–2002),寸滩站与武隆站多年平均输沙量合计占宜昌站的 94.6%, 不考虑其他汇流与区间过程,寸滩—宜昌之间河道总体是处于冲刷状态的;水库蓄水以后,宜昌站输沙占寸滩、武隆之和的 32.8%, 即不考虑其他过程,2003–2007 年间寸滩—宜昌河段年均淤沙 1.36 亿 t(输沙率法)。三峡水库的建成使用大幅度改变了流域输沙过程。

4 重点流域人类活动对河流输沙影响分析

4.1 基准期与措施期的划分

利用时间序列研究人类活动对河流输沙的影响,首先需要确定各个时期的主导因素,划分出人

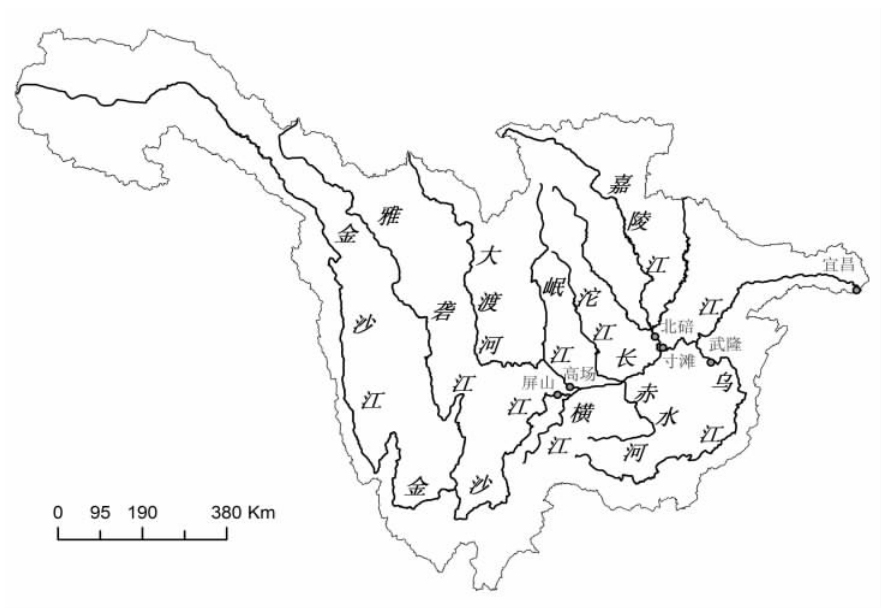


图 1 长江上游流域图
Fig.1 The upper Yangtze River drainage basin

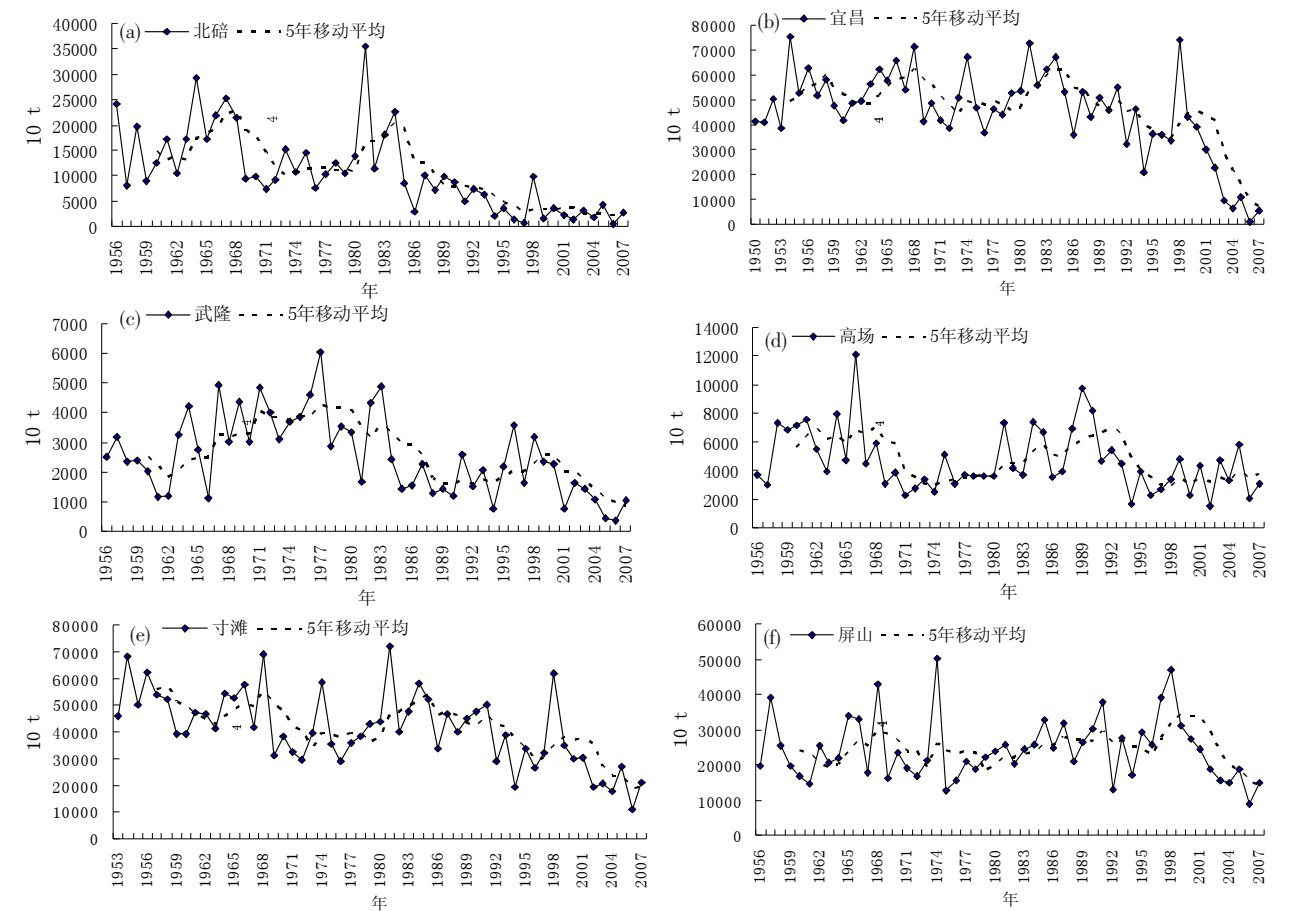


图2 长江上游干支流控制站点悬移质输沙量时间序列
Fig.2 Suspended sediment discharge time series at control hydrological stations of main stream and tributaries of the upper Yangtze River

为干扰较少的基准期与人类活动较强的措施期,双累积曲线法有助于实现这一目的。径流-输沙双累积曲线反映了径流量与输沙量在一定时期内的累积变化趋势,如果输沙量仅受径流变化影响,曲线应是一条直线,如果期间发生偏转,表明除径流变化外,输沙量还受其他因素影响,如果发生多次偏转,表明其他因素的内容与强度也在发生变化。需要说明的是,选择径流而不是降水序列协同研究,主要有两方面考虑,一是径流-输沙序列相关性更高,有利于拟合方程的建立与应用;二是使用径流数据也不影响问题的定性讨论。虽然从理论上讲,引水、水保及工程建设等人为活动会起到一定的减少产流作用,这部分减流也会引起河流输沙量的变化,直接使用径流数据计算得到的人为影响会比实际的偏小,但这方面影响对于水量丰沛的长江上游来说是很小的,有分析结果表明,近 40-50 年来长江上游干流不论全年还是汛期径流量都没有显著的趋势性变化^[17-19]。对 6 站点 1956-2007 年径流量

的 Mann-Kendall 趋势检验也表明,除北碚站径流量在 0.05 水平显著下降外,其他站点趋势性变化均不显著,这种情况下输沙对径流的背离,可以近似反映该时期人类活动的影响。对于近年来径流量和径流系数变小的嘉陵江流域,在计算时会根据有关文献给予相应的订正。

图 3a 中显示了金沙江屏山站 1956-2007 年的径流-输沙双累积曲线,可以看到曲线形态并不平滑,存在多次偏转,但引起曲线走势变化的突变并不多。1982 年以后曲线向输沙轴方向明显偏转,表明过去的径流-输沙系统平衡被其他因素打破,相当的径流增量产生更多的泥沙输出,河流系统进入多沙期,因而 1982 年是该曲线一个重要突变点,这一观点与其他学者的发现一致^[13-14]。2000 年以后,曲线又一次发生明显的趋势偏转,且是向径流一侧偏转,表明此后河道输沙量趋于减小,因而 2000 年也是该序列的一个重要突变点。

据此,可以将屏山站输沙序列分为 1956-1982

年、1983–2000 年和 2001–2007 年三期,其中 1956–1982 年间金沙江流域虽然经受了三线建设和毁林开荒等人为干扰,但输沙–径流累积变化总体仍呈直线,表明这一时期输沙变化受人为因素的影响是次要的,因而将其定为基准期。1983–2000 年和 2001–2007 年是人类活动显著影响的时期,且由于活动的内容与程度不同,分别定为措施一期和措施二期。

同理,依据图 3 中嘉陵江北碛站 b 和长江宜昌站 c 的径流–输沙双累积曲线,可以分别确定各个站点输沙序列的基准期与措施期。对各个时期的径流–输沙序列散点图作指数方程拟合曲线(图 3 右),

可见各时期相同径流对应的输沙量差异明显,表明时期划分的合理性。

4.2 经验统计模型

各时期划分以后,可利用经验模型对径流–输沙关系进行拟合计算,考虑到一般径流–输沙变化呈指数关系,这里使用径流(Q_w)–输沙(Q_s)指数方程进行回归,拟合结果如下,除长江宜昌措施一期显著性水平 P 值小于 0.05 外,其余 P 值均小于 0.01:

嘉陵江北碛 基准期 (1956–1984):

$$Q_s=3586.2e^{0.0019 Q_w} \quad R^2=0.6442$$

措施一期(1985–1993):

$$Q_s=1018.5e^{0.0028 Q_w} \quad R^2=0.7484$$

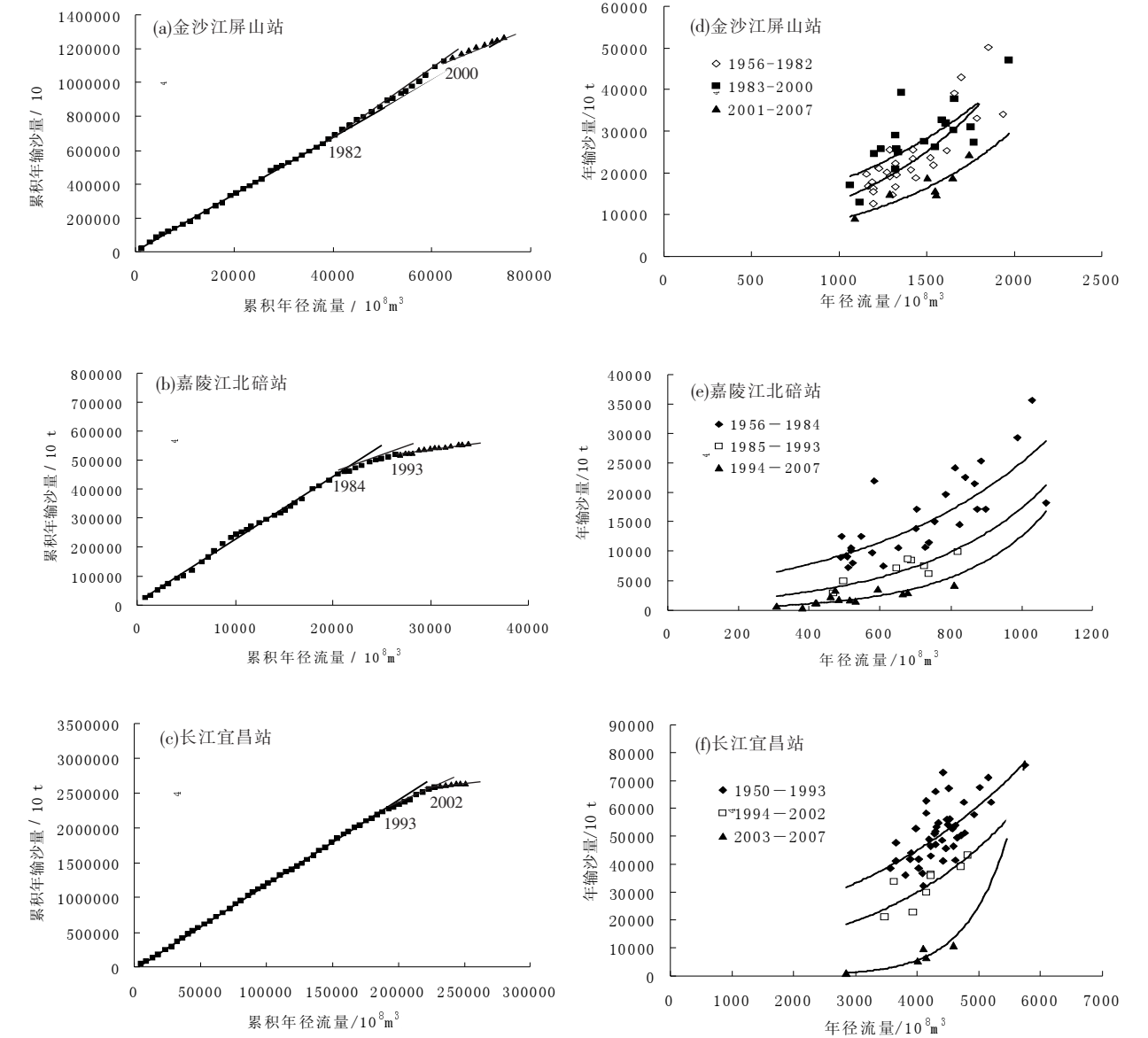


图 3 长江上游主要站点径流–输沙双累积曲线和水沙关系图

Fig.3 Double mass plots and relationships between runoff and sediment discharge at some main hydrological stations in the upper Yangtze River

措施二期(1994–2007):
 $Q_s=221.11e^{0.0040} Q_w \quad R^2=0.5846$

金沙江屏山 基准期 (1956–1982):
 $Q_s=3864.6e^{0.0012} Q_w \quad R^2=0.7128$

措施一期(1983–2000):
 $Q_s=7370.4e^{0.0009} Q_w \quad R^2=0.5604$

措施二期(2001–2007):
 $Q_s=2536.3e^{0.0012} Q_w \quad R^2=0.8144$

长江宜昌 基准期 (1950–1993):
 $Q_s=13297e^{0.0003} Q_w \quad R^2=0.4308$

措施一期(1994–2002):
 $Q_s=5389.3e^{0.0004} Q_w \quad R^2=0.6190$

措施二期(2003–2007):
 $Q_s=13.691e^{0.0015} Q_w \quad R^2=0.9426$

利用上述方程,可对各控制站点各时期径流及措施一、二期人类活动对输沙量的影响进行定量估算。基准期方程表示人类影响可基本忽略,只受径流变化影响下的径流–输沙函数关系,措施期方程表示人类与径流共同影响下的径流–输沙函数关系。措施期只受径流影响下的输沙量,可用措施期径流资料代入基准期方程求得;措施二期只受措施一期影响下的输沙量(研究假设人类活动的影响是持续的),可用措施二期径流资料代入措施一期方程求得。

径流变化导致的减沙量,可用基准期年均输沙量减去措施期只受径流影响的年均输沙量得到;措施一期人类活动导致的减沙量,可用措施一期年均输沙量减去该期只受径流变化影响的年均输沙量得到;措施二期人类活动导致的减沙量,可用措施二期年均输沙量减去该期只受措施一期影响的年均输沙量得到。

措施期总减沙量由径流减沙与措施减沙组成,

各组分占总减沙量的比例即为相应的减沙贡献率。计算结果如表 1 所示。

拟合减沙量与实际值之间存在一定偏差,这里的径流减沙量与措施减沙量均由实测值乘以相应减沙贡献率求得。

4.3 各时期输沙变化的原因分析

4.3.1 金沙江屏山站

金沙江屏山站措施一期(1983–2000)径流量较基准期增加 4%(56.4 亿 m³/a),而输沙量增加 20.3%(0.480 亿 t/a),其中径流量贡献率为 25.3%,大部分增沙由人类活动引起。有报道将这一时期的人为增沙归为该区易于触发的滑坡、泥石流和修路、采伐、采矿等工程增沙的结果^[13–14,20–21]。屏山站措施二期(2001–2007)径流量较基准期增加 5%(74.9 亿 m³/a),输沙量大为减少,若考虑措施一期增沙的持续影响,2001–2007 年减沙量达 1.18 亿 t/a。有学者认为这与 1998 年二滩水库开始蓄水拦沙有关。雅砻江流域属丰水少沙区,多年平均输沙量仅占屏山站的 17.1%,二滩水库 1998–2000 年大量拦沙左右屏山站输沙趋势的可能性不大,另外,文献[22]的研究也表明,该水库 2000 年以后的新增拦沙只占屏山站减沙量的 21.25%,二滩水库拦沙不是近期屏山站输沙量大幅下降的主要原因。

其他减沙因素还包括水土保持工程、工程增沙减少、公路拦沙以及上游的天然林保护工程。1989 年以来坚持实施的长江上游水土流失重点防治工程在金沙江流域主要针对下游坡面侵蚀(也间接治理沟蚀),目前已实施七期。水保工程效益的滞后性使其对措施一期减沙影响十分有限,但在措施二期,植被演替趋于稳定,生态效益也逐渐显现,资料显示 2001–2004 年长治工程金沙江流域年均减沙 0.126 亿 t^[21],占措施二期减沙量的 10.7%。工程增沙

表 1 长江上游主要站点措施期减沙汇总 (单位:亿 t/a、%)

Tab.1 Sediment decrease in monitoring periods at main hydrological stations in the upper Yangtze River (Unit: 100 million tons per year, %)

		嘉陵江北碛		金沙江屏山		长江宜昌	
		1985-1993	1994-2007	1983-2000	2001-2007	1994-2002	2003-2007
径流减沙贡献率		23.3	34.5	-25.3	-14.1	8.8	14.1
人为减沙贡献率	一期贡献	76.7	42.1	-74.7	-37.7	91.2	39.8
	二期贡献	—	23.4	—	100.0	—	46.2
估算总减沙量		0.790	1.264	-0.646	1.298	1.964	4.313
实测总减沙量		0.827	1.285	-0.480	1.183	1.430	4.495
径流减沙量		0.193	0.443	-0.121	-0.167	0.126	0.632
人为减沙量	一期减沙	0.634	0.541	-0.359	-0.446	1.304	1.787
	二期减沙	—	0.301	—	1.183	—	2.076

一直是 90 年代以来金沙江输沙增加的重要因素,然而进入 21 世纪道路建设步伐有所放慢,如四川省 2001–2005 年公路里程仅增加 0.7 万 km,相当于该省 2000–2001 年一年里程增量的 41%。另一方面,90 年代后期《水土保持法》的贯彻落实也在一定程度上减少了工程弃沙。所以措施二期受一期人为增沙的影响可能比估算得小。公路拦沙和 98 年后实施的天保工程也具有一定的减少效益,但目前尚没有定量估算。

4.3.2 嘉陵江北碛站

嘉陵江北碛站措施一期(1985–1993)径流量减少 7.3%(51.7 亿 m^3/a),输沙量下降 53.0%(0.827 亿 t/a),大部分是人为减沙;措施二期(1994–2007)输沙量进一步下降,较基准期减少 82.5%(1.285 亿 t/a),其中径流减沙占 34.5%,考虑到 80 年以后嘉陵江径流系数变小,存在一定的人为干扰,这部分径流减沙也可归为人类活动影响的措施减沙。根据许炯心等的研究^[23],嘉陵江 80 年以后水利水保措施减水量占总减水量的 15.7%,由措施一、二期的径流–输沙指数拟合方程,可对相应径流量的人为减沙进行估算。经计算修正,措施一期人为减沙贡献为 81.4%,措施二期为 70.4%,即水利水保措施减水引起的减沙分别占各时期总减沙量的 4.7%和 4.9%。

措施一期人为减沙主要来自水利工程拦沙、水土保持减沙和农村社会经济因素变化带来的土壤侵蚀减少。水土保持工程实施于 80 年代末且时效上存在滞后性,对措施一期影响不大;90 年以前嘉陵江流域 4542 座各型水库对北碛站减沙量仅为 1200 万 t/a ^[24],占措施减沙量的 18.9%,因而也不是这一时期输沙减少的主要原因;许炯心分析了 1984–1992 年农村社会经济因素对嘉陵江输沙量的影响,发现农村劳动力转移百分比、农民人均纯收入和农民人均购买燃料支出 3 项指标对北碛站输沙量变化的解释贡献率分别为 36.0%、21.6%和 42.4%,认为随着改革开放以后该地区大量农村劳动力进城务工,农民收入水平提高,农村能源结构改善,农民有钱买煤买油,不再砍树和捡拾枯枝落叶,土壤侵蚀相应减小,进而带动河流输沙量的下行^[25]。

除了措施一期人类活动的持续影响外,措施二期新增水土保持措施、退耕还林工程和 96 年以后开闸蓄水的宝珠寺等大中型水库的影响,北碛站输沙量进一步下降,其中新增人类活动减沙 3010 万

t ,占总减沙量的 23.4%。措施一期持续的人类活动减沙 5410 万 t ,占二期总减沙量的 42.1%,依然是这一时期减沙的主要原因。

4.3.3 长江宜昌站

长江上游控制站点宜昌站措施一期 (1994–2002)减沙 1.43 亿 t ,较基准期(1950–1993)年均输沙量 5.16 亿 t 下降 27.7%。金沙江这一时期基本处于增沙阶段,干流减沙主要来自嘉陵江,两流域合计减沙 8050 万 t ,占同期宜昌站减沙量的 56.3%;其他支流如岷江、乌江输沙量也有所减少,减沙量约占宜昌站减沙量的 21.4%。另外,三峡工程 1997 年实现大江截流和葛洲坝水库的蓄水拦沙也起到一定的减沙作用。宜昌站措施二期(2003–2007)年均输沙量较基准期下降 4.495 亿 t ,降幅很大。除三峡水库蓄水导致的大量拦沙以及上游河道淤积增大外^[26],金沙江来沙减少也是重要原因。这一时期嘉陵江与金沙江减沙量合计 2.168 亿 t ,占同期宜昌站减沙量的 54.9%;乌江、岷江减沙约占宜昌站减沙量的 7.6%。

从影响因素来看,宜昌站措施一期径流减沙贡献仅 8.8%,流域人为减沙主要来自嘉陵江措施二期人类活动。宜昌站措施二期人为减沙影响仍占主导,其中一期人类活动继续发挥重要作用,减沙贡献 39.8%;二期人类活动主要是三峡水库拦沙和金沙江流域水利水保及工程节沙等措施导致的输沙减少,减沙贡献达 46.2%,是这一时期宜昌站输沙减少的主要原因。

5 结论

文章利用双累积曲线和经验统计模型对长江上游主要站点 1956–2007 年水沙序列进行分期分析,并对各时期人为减沙因素做了定量估算,根据定量分析定性理解原则,得出以下初步认识:

长江上游主要干支流径流–输沙关系存在显著的阶段性变化,反映了不同强度、内容人类活动对河流输沙的影响,影响效果与程度在各流域、时期不尽相同,进入措施期以后,人类活动的影响均占主导地位。

长江上游措施一期 (1994–2002) 输沙量减少 1.43 亿 t/a ,人为减沙主要来自嘉陵江措施减沙;措施二期(2003–2007)较基准期减沙 4.50 亿 t/a ,人为减沙主要包括三峡水库蓄水拦沙、金沙江措施减沙

和宜昌一期持续措施减沙。

金沙江措施一期(1983–2000)输沙量较之前增加 0.48 亿 t/a, 主要人为增沙是工程增沙, 措施二期(2001–2007)输沙量较基准期减小 1.183 亿 t/a, 主要人为减沙包括二滩等各型水库拦沙、水保减沙和工程增沙减少。

嘉陵江措施一期(1985–1993)输沙量较之前减少 0.827 亿 t/a, 主要人为减沙包括农村社会经济因素变化导致的土壤减蚀和水库拦沙, 措施二期(1994–2007)输沙量进一步下降, 主要人为减沙包括一期持续措施减沙、宝珠寺等新增水库拦沙和水保减沙。

参考文献

- [1] Zhu Y M, Lu X X, Zhou Y. Sediment flux sensitivity to climate change: A case study in the Longchuanjiang catchment of the upper Yangtze River, China. *Global and Planetary Change*, 2008, 60(3–4): 429–442.
- [2] Wilkinson, B H, McElroy, et al. The impact of humans on continental erosion and sedimentation. *Geological Society of America Bulletin*, 2007, 119(1–2): 140–156.
- [3] Xu J X. The water fluxes of the Yellow River to the sea in the past 50 years, in response to climate change and human activities. *Environmental Management*, 2005, 35(5): 620–631.
- [4] Dai S B, Yang S L, Li M. The sharp decrease in suspended sediment supply from China's rivers to the sea: anthropogenic and natural causes. *Hydrological Sciences Journal-Journal -des Sciences Hydrologiques*, 2009, 51(1): 135–146.
- [5] Lu X X, Higgitt D L. Recent Changes of Sediment Yield in the Upper Yangtze, China. *Environmental Management*, 1998, 22(5): 697–709.
- [6] Lu X X, Higgitt. D L. Sediment yield variability in the upper Yangtze, China. *Earth Surface Process and Landforms*, 1999, 24(12): 1077–1093.
- [7] Xu Kehui, Milliman J D. Seasonal variations of sediment discharge from the Yangtze River before and after impoundment of the Three Gorges Dam. *Geomorphology*, 2009, 104(3–4): 1–8.
- [8] Yang Shilun, Zhao Qingying, Belkin IgorM. Temporal variation in the sediment load of the Yangtze River and the influences of human activities. *Journal of Hydrology*, 2002, 263:56–71.
- [9] Chen Zhongyuan, Li Jiufa, Shen Huanting. Yangtze River of China: historical analysis of discharge variability and sediment flux. *Geomorphology*, 2001, 41(2–3): 77–91.
- [10] Walling DE, Fang D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change*, 2004, 39(1–2): 111–126.
- [11] Zhang Qiang, Xu Chongyu, Becker Stefan. Sediment and runoff changes in the Yangtze River basin during past 50 years. *Journal of Hydrology*, 2006, 331: 511–523.
- [12] 师长兴. 长江上游输沙尺度效应研究. *地理研究*, 2008, 27(4): 800–810.
- [13] 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. *水利学报*, 2002, 4: 56–59.
- [14] 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. *地理研究*, 2008, 27(2): 332–342.
- [15] 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. *水科学进展*, 2004, 15(4): 420–426.
- [16] 国务院三峡工程建设委员会办公室泥沙专家组等编. 长江三峡工程泥沙问题研究(2001–2005)第一卷. 北京: 知识产权出版社, 2008.9. 165–166.
- [17] 陈正洪, 杨宏青, 任国玉, 等. 长江流域面雨量变化趋势及对干流流量影响. *人民长江*, 2005, 36(1): 22–30.
- [18] 董耀华, 惠晓晓, 蔺秋生. 长江干流河道水沙特性与变化趋势初步分析. *长江科学院院报*, 2008, 25(2): 16–20.
- [19] 秦年秀, 姜彤, 许崇育. 长江流域径流趋势变化及突变分析. *长江流域资源与环境*, 2005, 14(5): 589–594.
- [20] Lu X X. Spatial variability and temporal change of water discharge and sediment flux in the lower Jinsha tributary: impact of environmental changes. *River research and applications*, 2005, 21: 229–243.
- [21] 陈松生, 张欧阳, 陈泽方, 等. 金沙江流域不同区域水沙变化特征及原因分析. *水科学进展*, 2008, 19(4): 475–482.
- [22] 冯秀富, 杨青远, 张欧阳, 等. 二滩水库拦沙作用及其对金沙江流域水沙变化的影响. *四川大学学报(工程科学版)*, 2008, 40(6): 37–42.
- [23] 许炯心, 孙季. 嘉陵江流域年径流量的变化及其原因. *山地学报*, 2007, 25(2): 153–159.
- [24] 许全喜, 陈松生, 熊明, 等. 嘉陵江流域水沙变化特性及原因分析. *泥沙研究*, 2008, 4(2): 1–8.
- [25] 许炯心. 农村社会经济因素变化对嘉陵江产沙量的影响. *山地学报*, 2006, 24(4): 385–394.
- [26] 戴仕宝, 杨世伦, 李鹏. 长江干流河道对流域输沙的调节作用. *地理学报*, 2006, 61(5): 461–470.

Impact of Human Activities on Recent Changes in Sediment Discharge of the Upper Yangtze River

DU Jun^{1,2}, SHI Changxing¹, ZHANG Shouhong^{1,2}, ZHANG Luan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The upper Yangtze River is the main sediment source of the Yangtze River basin and its sediment yield is closely related with its ecological environment. In recent decades, as human activities intensified strongly, sediment yield in the upper Yangtze River underwent profound changes. Using annual runoff-sediment records in the period of 1956–2007, this paper made a quantitative analysis of characteristics and causes of changes in sediment discharge of main stream and tributaries of the upper Yangtze River in different periods based on double mass curves and empirical models. Our findings are: 1. The relationship between runoff and sediment load of the main stream and tributaries of the upper Yangtze River had obvious phase characteristics, which reflected the impacts of different kinds and intensities of human activities on fluvial sediment yield and transport. The sediment discharge of the upper Yangtze River in 1994–2002 reduced 143 million tons per year and the contribution from human activities accounted for 91.2%. The main decrease was from the Jialing River. The sediment load in 2003–2007 was lowered by 450 million tons per year, of which 14.1% was induced by the reduction of runoff, 39.8% by sustaining human activities appearing in the earlier period, and 46.2% by sediment trapping in the Three Gorges Reservoir and by the decrease of sediment load in the Jinsha River. 2. The sediment discharge of the Jinsha River in the period of 1983–2000 increased by 48 million tons per year, of which 74.7% was associated with human activities, mainly construction of projects. In the period of 2001–2007, the annual sediment load of the Jinsha River was reduced by 118.3 million tons per year, all due to human activities, including various types of reservoirs among which Ertan Reservoir was the biggest one, soil and water conservation practices and decrease of sediment yield from construction projects. 3. The sediment load of the Jialing River decreased by 82.7 million tons per year in 1985–1993, of which 81.4% was related to human activities, such as the changes in rural socio-economic factors and construction of reservoirs. The reduction of sediment load reached 128.5 million tons per year in the period of 1994–2007, of which the decrease of natural runoff accounted for 29.6%, the sustaining human activities appearing in the earlier period for 42.1%, the newly-built reservoirs, such as Baozhusi reservoir, and soil and water conservation project for 23.4%, and human-induced runoff reduction for 4.9%.

Key words: upper Yangtze River; sediment discharge variation; period division; influencing factors

本文引用格式:

杜俊,师长兴,张守红,等. 人类活动对长江上游近期输沙变化的影响. 地理科学进展, 2010, 29(1): 15–22.