

近 70 年长江干流寸滩站以上流域水沙关系 变化及其驱动因素

张冠华^{1,2}, 喻志强³, 易亮⁴, 雷旭⁴, 钱峰^{1,2}, 李建明^{1,2}, 孙宝洋^{1,2}

(1.长江科学院水土保持研究所,武汉 430010;2.水利部山洪地质灾害防治工程技术研究中心,武汉 430010;
3.长江科学院科研计划处,武汉 430010;4.中南安全环境技术研究院股份有限公司,武汉 430071)

摘要:以长江干流寸滩水文站以上流域为研究对象,基于 1953—2018 年的实测水沙资料,采用线性回归、Mann-Kendall 趋势检验和水沙关系曲线分析径流、输沙的时间趋势及其关系变化,并采用双累积曲线法分析水沙变化的驱动因素。结果表明:寸滩站以上流域多年平均径流量为 3 425 亿 m³,多年平均输沙量为 3.61 亿 t;多年平均月径流量为 294.8 亿 m³,多年平均月输沙量为 3 013 万 t,且主要分布在 6—10 月,分别占年径流泥沙总量的 70%和 95%以上。趋势分析显示,流域年降雨量和径流量变化趋势不明显,年输沙量呈极显著减小趋势;月径流量在 1—4 月显著增加,其他月份变化不显著,而各月输沙量均呈显著减少趋势。水沙关系曲线均可用幂函数拟合,拟合参数受时间尺度影响,统计检验显示悬移质输沙量实测值与水沙关系曲线的估算值差异不显著。双累积曲线分析发现水利工程建设和水土保持等人类活动是寸滩水文站输沙减少的主要原因,其作用占 69%~93%,其中 2000 年以来人类活动的贡献超过 90%。

关键词:水沙关系曲线;双累积曲线;悬移质输沙量;驱动因素;人类活动

中图分类号:S157.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2021)01-0079-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.01.011

Variation of Water-Sediment Relationship and the Driving Factors Above the Cuntan Station of the Yangtze River Main Stream in Recent 70 Years

ZHANG Guanhua^{1,2}, YU Zhiqiang³, YI Liang⁴, LEI Xu⁴,

QIAN Feng^{1,2}, LI Jianming^{1,2}, SUN Baoyang^{1,2}

(1.*Soil and Water Conservation Department, Changjiang River Scientific Research Institute,*

Wuhan 430010; 2.Research Center on Mountain Torrent & Geologic Disaster Prevention of Ministry of

Water Resources, Wuhan 430010; 3.Research and Planning Division, Changjiang River Scientific Research

Institute, Wuhan 430010; 4.Central-Southern Safety & Environment Technology Institute Co., Ltd., Wuhan 430071)

Abstract: Based on the measured runoff and sediment data of Cuntan hydrologic station that at upper situating Yangtze River's main stream, this study analyzed the temporal trends of runoff and sediment transport as well as the variations of their relationships during 1953—2018 by statistical methods including linear regression, Mann-Kendall test, and sediment rating curve. Double mass curve was further used to analyze the driving factors of water and sediment variation. The results showed that the average annual water and sediment discharge of Cuntan station was 342.5 billion m³ and 361 million tons, respectively. The average monthly water and sediment discharge was 29.48 billion m³ and 30.13 million tons, respectively, which mainly distributed in June to October, accounting for more than 70% and 95% of the total annual runoff and sediment, respectively. The trend analysis indicated that the variation trends of annual precipitation and runoff were not obvious, however, annual sediment discharge showed a significantly decreasing trend. The monthly runoff increased significantly from January to April and the changes in other months were not significant, while the monthly sediment discharge showed a significantly decreasing trend in each month. In this

收稿日期:2020-07-22

资助项目:国家自然科学基金项目(41877082,41701316,51909011);水利技术示范项目(SF-201905);中央级公益性科研院所基本科研业务
费项目(CKSF2019410TB)

第一作者:张冠华(1983—),女,博士,高级工程师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:zgh83113@126.com

通信作者:易亮(1984—),男,硕士,高级工程师,主要从事水土保持与流域水文研究。E-mail:shanzi2002stbc@126.com

study, the relationships between water and sediment could be fitted by power functions, and the fitting parameters were affected by the time scale. Statistical test detected that there was no significant difference between the measured value suspended sediment load and the estimated values by sediment rating curve. Double mass curve analysis found that human activities, such as water conservancy construction and soil and water conservation, were the main factors driving the sediment reduction in Cuntan station, accounting for 69%~93% in different decades, among which human activities had contributed more than 90% since 2000.

Keywords: sediment rating curve; double mass curve; suspended sediment load; driving factor; human activities

流域径流泥沙的形成和演变受气候变化和人类活动等因素影响,而水沙关系变化则是其中最活跃的部分^[1],多年来一直是流域侵蚀产沙动力学和河流动力学等相关领域的研究热点^[2],悬移质泥沙(悬沙)的输移、估算及预测也因此备受关注^[3-4],已成为全球河流泥沙输移机制的核心内容^[5]。定量研究河流水沙关系和输移过程,对揭示泥沙时空演变规律和来源至关重要,也是制定水资源保护策略和发展生态水利的根本^[6-7]。

悬移质是河流系统的天然组成部分,也是河流输沙的主要类型,在景观构建、生态栖息地创造和污染物运移等方面发挥着重要作用^[8]。悬移质是依赖于源的,相对容易测量,但却很难预测^[5]。因此,已有学者^[8]常采用一些经验模型或方法(如水沙关系曲线、滞回模型、多变量数据挖掘技术、指纹识别法)来分析和量化河流悬沙量及其来源,并评估不同驱动因素的贡献作用。其中,水沙关系曲线是目前最常用的方法,在世界上许多大江大河输沙量估算中均被采用^[5,9-19]。该模型经验地描述含沙量/泥沙量与流量/径流量之间的关系^[9,20],通常表达为幂函数形式或基于其对数变形转化为线性形式。水沙关系模型因构建简单,只需 1 个离散的、相对较小的数据系列而被广泛采用^[21],且这种经典的统计方法考虑了所有观测结果在空间上和时间上是独立的,不存在结构相关,从而可产生 2 个变量间的总体响应方程^[22-23]。

长江是我过第一大河,全长约 6 300 km,流域面积约 180 万 km²,年径流量和输沙量分别位居世界第 5 位和第 4 位^[24]。长江干流宜昌以上为上游,地形非常复杂,是我国气候变化的敏感区域。近年来,受气候变化和人类活动的影响,长江流域输沙量大幅减少,特别是 2000 年以来,水库修建、水土保持、河道采砂等人类活动的频发,致使长江流域干支流水沙关系发生重大调整^[25]。已有研究^[26]显示,长江干流屏山、朱沱、寸滩、宜昌、汉口、大通 6 个主要水文控制站年输沙量均呈显著减小趋势,寸滩站近 10 年(2009—2018)平均输沙量仅为 1.10 亿 t。基于此,本文以长江上游寸滩站以上流域为例,采用近 70 年(1953—

2018 年)实测水文资料,分析其不同时间尺度(年际、年代际、月)径流泥沙的多年趋势、阶段性变化和和水沙关系变化特征,并进一步分析水沙变化的驱动因素,研究结果有助于深入理解悬移泥沙动态,也可流域可持续发展和水沙调控宏观决策提供科学依据。

1 研究区概况

以长江上游干流寸滩站以上流域为研究区(24°30′—35°45′N,90°33′—109°11′E),面积约 86.66 万 km²,涉及四川、重庆、云南、青海和西藏等省。该区由于受季风气候和青藏高原的影响,冬春降水少,夏季受暖湿海洋气流及西太平洋副高的影响,降水较多,秋季也多为秋雨绵绵,多年平均降水量 1 004 mm,年平均气温为 12.5 ℃。寸滩水文站是长江上游干流重要控制站,控制长江流域近 1/2 的面积,同时也是三峡水库干流入库控制站,多年平均径流量为 3 434 亿 m³,多年平均输沙量为 3.74 亿 t。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文所用降雨、径流和泥沙数据(1953—2018 年)均来自于长江水利委员会长江流域水文年鉴^[27],部分数据摘自长江泥沙公报^[28]和长江流域水资源公报^[29]。

2.2 研究方法

2.2.1 趋势分析 分别采用线性倾向估计法和 Mann-Kendal(M-K)趋势检验法分析降雨、径流、泥沙的时间变化趋势。M-K 法是一种非参数统计检验方法,亦称无分布检验,其优点是样本不需要遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,因此被世界气象组织推荐并广泛应用于水文气象系列的变化趋势分析中,具体步骤可参见文献^[30]。M-K 检验法根据其统计量 Z 的大小和正负表征系列的时间趋势,当 $Z > 0$ 时表示上升趋势;当 $Z < 0$ 时表示下降趋势;当 Z 的绝对值分别大于 1.960, 2.576 时,表示变化趋势显著性水平分别达 0.05, 0.01。

2.2.2 水沙关系曲线 水沙关系曲线传统上最常表达为流量(Q)与悬沙浓度(S_c)间的幂函数形式^[4],即

$S_c = aQ^b$ 。式中: a 、 b 分别为回归系数和指数。许多研究^[11-12,14,17]也常采用其转换式,建立径流量(W)和输沙量(S)的数学关系,即 $S = aW^{b+1}$ 。由于水沙关系曲线属于“黑箱”模型,回归参数 a 、 b 并无实际物理意义^[9],但却被赋予了一些专业解释,认为它们分别与侵蚀阻力(土壤可蚀性)和侵蚀动力(水流侵蚀力)密切相关^[9-10], a 值越大,表明流域内易被径流侵蚀和输移的风化沉积物较多, b 值越大,表明流量增加很小即可导致水流侵蚀力的剧增^[17,20]。

传统的水沙关系模型是基于“水沙之间存在一定关系”假设,实际上,由于季节效应、水流动力、泥沙有效性和人类活动等流域条件的变化,这种关系通常是异质的^[31]。因此,已有学者^[15,32]常根据年代、季节、流量等级、流量阶段(上升、下降)、坝库建设前后等对水沙数据进行分组,将传统的水沙关系模型进一步发展衍化,以改进输沙量的估算结果。基于此,本文通过建立月、年、年代尺度上水沙关系曲线,估算不同尺度悬移输沙量,并与实测值比较,以探索水沙关系的尺度变化。

表 1 寸滩站径流输沙量及流域年降雨量统计特征

参数	最小值	最大值	均值	极值比	标准差	变异系数	Z	r	b	p	趋势
径流量/ 10^9 m^3	247.9	447.5	342.5	1.81	39.84	0.116	-1.748	-0.251	-0.520	0.102	↓
输沙量/ 10^6 t	32.8	713.0	361.0	21.74	167.54	0.464	-6.674	-0.755	-6.594	0.000	↓**
降雨量/mm	628.1	1506.9	1026.7	2.40	184.18	0.179	-0.321	-0.038	-0.363	0.763	↓

注: Z 为 M-K 趋势分析参数; r 、 b 和 p 分别为线性趋势检测 Pearson 相关系数、回归系数和回归方程显著性; ** 和 * 表示显著性概率达 99% 和 95%; ↓ 表示下降的趋势。

3.1.2 年代际变化 为了分析水沙变化的阶段性特征,本文将时间系列按年代划分。从图 1 可知,径流呈波动变化,无明显的年代际趋势,而输沙量整体呈下降趋势,特别是 2000 年以来,较 2000 年以前和 1953—2018 年平均值减少约 1/3,2000s 和 2010s 平均输沙量仅为 $103 \times 10^6 \text{ t}$ 和 $215 \times 10^6 \text{ t}$,这一结果与前文年代际变化分析一致,同样体现了输沙逐渐减少的趋势。

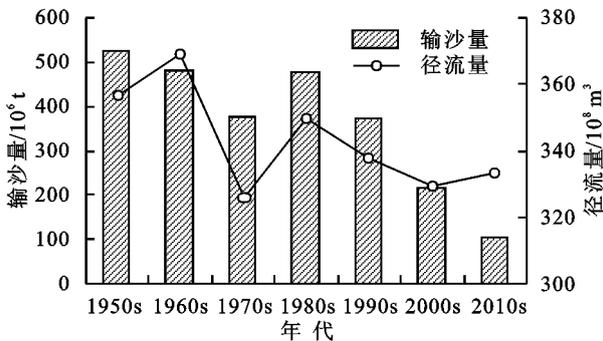


图 1 寸滩站不同年代径流输沙量

3.1.3 年内变化 由表 2 可知,寸滩站 1953—2018 年平均月径流量为 294.8 亿 m^3 ,变异系数为 0.757,属中度变异;平均月输沙量为 3 013 万 t,变异系数为 1.626,属强度变异。从图 2 可以看出,寸滩站径流输沙主要集中在 6—10 月,分别占年径流泥沙总量的

3 结果与分析

3.1 寸滩站水沙变化基本特征和趋势分析

3.1.1 年际变化 对 1953—2018 年寸滩站水沙时间系列的统计分析(表 1)显示,寸滩水文站多年平均径流量为 $342.5 \times 10^9 \text{ m}^3$,多年平均输沙量为 $361.0 \times 10^6 \text{ t}$;年径流量最小值为 $247.9 \times 10^9 \text{ m}^3$,出现在 2006 年,最大值为 $447.5 \times 10^9 \text{ m}^3$,出现在 1954 年,极值比和变异系数分别为 1.81 和 0.116,说明径流量的变化波动幅度较小;年输沙量最小值为 $32.8 \times 10^6 \text{ t}$,出现在 2015 年,最大值为 $713.0 \times 10^6 \text{ t}$,出现在 1981 年,极值比和变异系数分别为 21.74 和 0.464,说明输沙量的年际波动较大;水沙变化均属于中度变异,输沙量变异程度高于径流量变异程度。进一步通过 M-K 和线性趋势检验发现(表 1),研究时段内寸滩站径流泥沙均呈减小趋势,其中年径流量变化趋势不显著($|Z| = 1.748, p > 0.05$),年输沙量减小趋势达极显著水平($|Z| > 2.576, p < 0.01$),平均减少率为 $6.594 \times 10^6 \text{ t/a}$ 。

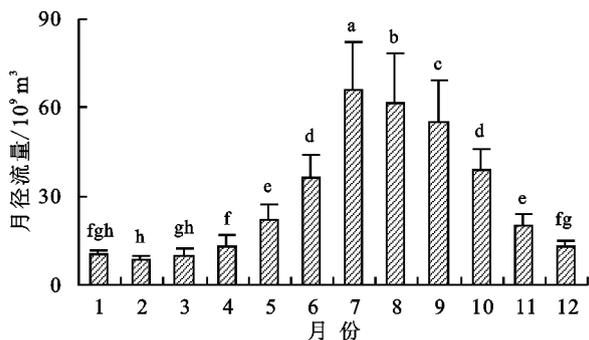
70% 和 95% 以上,显著高于其他月份。同样采用 M-K 检验对 1953—2018 年寸滩水文站月径流输沙量序列进行趋势分析(图 3)发现,各月输沙量均呈显著下降趋势,与年尺度变化趋势一致;月径流量在 1—4 月显著上升,其他月份变化不显著。

表 2 寸滩站月径流、输沙量统计特征

参数	最小值	最大值	中值	均值	标准差	变异系数
径流量/ 10^9 m^3	5.66	121.87	20.61	29.48	22.32	0.757
输沙量/ 10^6 t	0.091	266.769	4.242	30.13	49.00	1.626

3.2 寸滩站水沙关系曲线

建立寸滩站径流—泥沙关系曲线,拟合得到参数 a 和 b ,从表 3 可以看出,不同尺度上水沙关系均达显著水平($p < 0.05$)。年尺度上回归参数 a 和 b 分别为 0.000 04 和 1.735,月尺度上分别为 0.000 70 和 1.843,不同年代回归系数 a 在 0.000 05~0.144 00,回归指数 b 在 0.381~2.245。从表 3 还可看出,参数 a 随着年代不断减小,参数 b 不断增大,同样反映了输沙量(物源供应)和水流侵蚀、输移能力的变化情况。已有研究^[10,14]表明,参数 a 和 b 具有较大的时空变异性,参数 b 通常在 0.5~1.5 变化,很少超过 2,而参数 a 可以在几个数量级上变化。Li 等^[23]对我国西南喀斯特地区的研究得到 a 为 0.005, b 为 1.39。



注:图柱上方不同小写字母表示不同月份间差异显著($p < 0.05$)。

图 2 寸滩站 1953—2018 年月平均径流量和输沙量

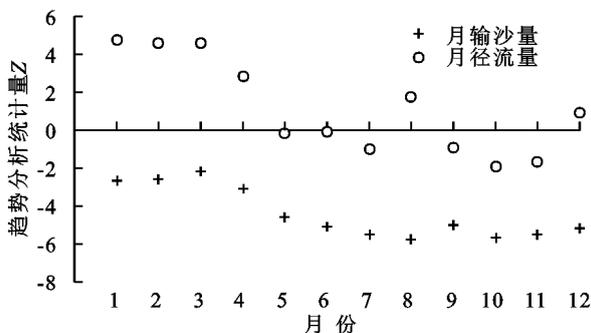
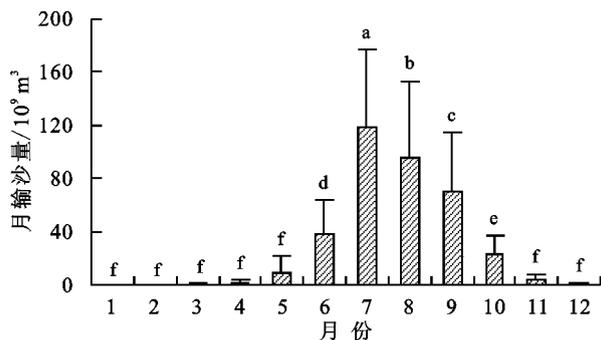


图 3 寸滩站月径流输沙量趋势分析统计量(Z)

表 3 寸滩水文站不同时间尺度水沙关系曲线参数

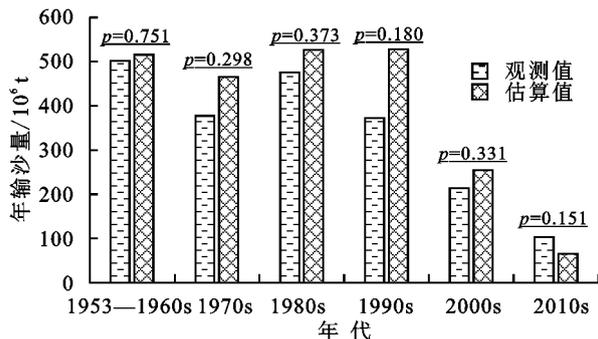
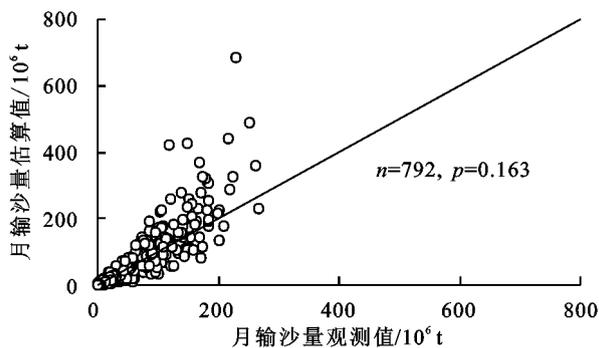
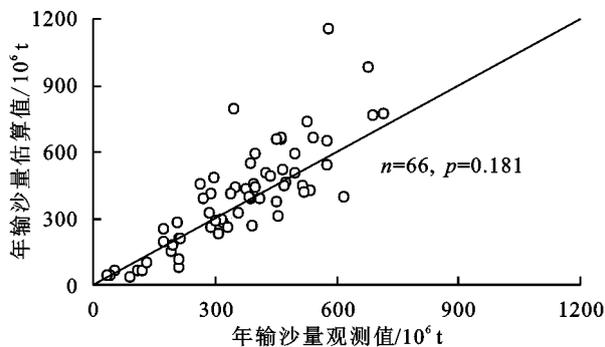
尺度	a	b	R^2	p
年(1953—2018)	0.00004	1.735	0.213	0
月	0.00070	1.843	0.892	0
1953—1960s	0.14400	0.381	0.661	0
1970s	0.03610	0.597	0.647	0.005
1980s	0.00610	0.921	0.463	0.030
1990s	0.00180	1.101	0.717	0.002
2000s	0.00090	1.142	0.757	0.001
2010s	0.00005	2.245	0.350	0.036

采用上述水沙关系曲线估算悬移质输沙量,独立样本 T 检验显示不同时间尺度上实测值和估算值之间差异不显著($p > 0.05$,图 4)。年尺度上悬移质输沙量测点较分散,且年输沙量越大分散越明显;月尺度上,当月输沙量越低时估算值与观测值越接近,但当月输沙量较大时,测点分散,水沙关系曲线高估了输沙量;年代际尺度上,2000s 以前表现为估算值高于实测值,且以 1990s 最为明显,1953—1960s 二者最为接近,2010s 表现为低估输沙量。本研究结果说明了水沙关系模型中的统计方法会导致相当大的时间不确定性,因此会低估或高估输沙量^[5,8,11,28],有待进一步探索。

3.3 水沙变化驱动因素

由于输沙量呈显著减小趋势,本研究进一步通过双累积曲线分离、量化气候变化和人类活动对寸滩站输沙变化的贡献。通常,若流域水沙特性发生变化,双累积曲线将表现出明显的转折,即累积曲线斜率会发生明显变化,据此判断其是否受人类活动影响。由图 5 可知,输沙量存在明显的阶段性特征(年代际变化),各段累积曲线拟合优度均达显著水平,累积斜率随着年代发生变

化,且以 2000 年以来最为显著(表 4)。以 1953—1969 作为人类活动较少的基准期分析发现,寸滩站输沙的减少主要受人类活动的影响,其作用占 69%~93%,其中 2000 年以来人类活动的影响超过 90%(表 4)。有研究^[26]显示,2000 年以来长江干流包括寸滩在内的几个主要水文站点多年平均输沙量较 2000 年以前显著降低,下降幅度均高于 56%,且输沙的减少主要受坝库建设和水土保持生态环境建设等人类活动的影响。



注: p 为独立样本 T 检验显著性概率水平, $p > 0.05$ 表示实测值与估算值之间差异不显著。

图 4 不同时间尺度悬移质输沙量实测值和估算值比较

长江上游规划建设 417 座大、中型水电站^[33],寸滩站以上流域占据长江上游绝大部分区域,也是梯级水电开发的重地,目前金沙江中游已经实现了梯级开发,而金沙江下游继向家坝、溪洛渡水电站建成并运行多年后,白鹤滩和乌东德电站即将完工,均对流域水沙过程产生巨大影响。实测资料^[26]分析发现,2008 年 2 月至 2018 年 10 月,溪洛渡水库干、支流共淤积泥沙 5.559 亿 m³;2017 年 11 月至 2018 年 10 月,溪洛渡库区共淤积泥沙 7 668 万 m³。

目前,水土流失已成为长江经济带主要生态环境问题之一,坡耕地亦是整个长江流域水土流失的策源地,自 1989 年以来,国家相继实施长江上中游水土保持重点防治工程(“长治”工程)和六大国家水土保持重点工程,大大减轻流域水土流失,是近年来长江干流输沙量显著减小的重要原因之一。从 1999 年国家启动退耕还林(草)工程试点实施开始至今,长江中上游地区实现退耕还林面积 924.06 万 hm²,

显著加快流域植被的恢复速度,有效固持土壤、涵养水源、减轻水土流失强度,从而维护和改善了长江中上游地区的生态环境^[34]。特别是 2000 年以后,耕地减少及林地、建设用地增加成为长江流域土地利用的最显著变化,2000—2015 年,退耕还林使得长江流域的土壤保育能力增加了 6.0 亿 t,占 2000 年土壤侵蚀量的 19.5%^[35]。

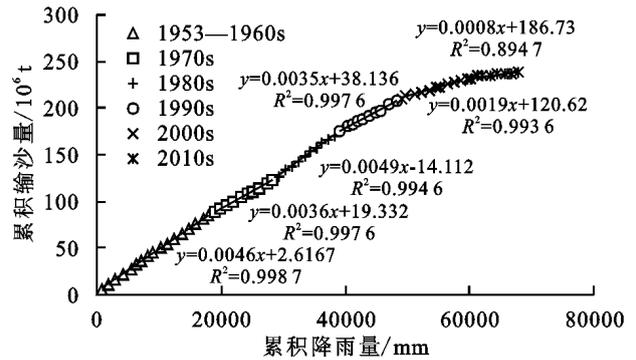


图 5 寸滩站以上流域降雨量—输沙量双累积曲线

表 4 气候变化和人类活动对寸滩站输沙变化的影响

年代	实测 输沙量/亿 t	计算 输沙量/亿 t	输沙量 变化/亿 t	降水 影响/亿 t	降水 贡献/%	人类活动 影响/亿 t	人类活动 贡献/%	累积曲线 斜率
1953—1960s	5.00	5.00						0.0046a
1970s	3.77	4.80	-1.24	-0.20	16.5	-1.03	83.5	0.0036b
1980s	4.76	4.93	-0.24	-0.07	29.0	-0.17	71.0	0.0049a
1990s	3.72	4.60	-1.28	-0.40	30.9	-0.89	69.1	0.0035b
2000s	2.15	4.80	-2.85	-0.20	6.9	-2.66	93.1	0.0019c
2010s	1.03	4.66	-3.97	-0.34	8.5	-3.63	91.5	0.0008d

注:1953—1960s 为基准期;同列不同小写字母表示采用一般线性模型斜率之间差异显著($p < 0.05$)。

4 结论

(1)寸滩站多年平均径流量为 3 425 亿 m³,多年平均输沙量为 3.61 亿 t,输沙量变异程度高于径流量变异程度。该站多年平均月径流量为 294.8 亿 m³,多年平均月输沙量为 3 013 万 t,且主要分布在 6—10 月,分别占年径流泥沙总量的 70%和 95%以上。

(2)年尺度趋势分析显示,流域年降雨量和径流量无明显的时间变化趋势,年输沙量呈极显著减小趋势。月尺度趋势分析显示,月径流量在 1—4 月显著增加,其他月份变化不显著,而各月输沙量均呈显著减少趋势。

(3)研究时段内,人类活动是寸滩站输沙锐减的主要驱动因素,贡献率可达 90%以上。其中,水利工程建设和水土保持措施实施对于流域泥沙锐减具有重要影响。

参考文献:

[1] 赵玉,穆兴民,何毅,等.1950—2011 年黄河干流水沙关系变化研究[J].泥沙研究,2014(4):32-38.
[2] 黎铭,张会兰,孟铖铖.黄河皇甫川流域水沙关系特性及关

键驱动因素[J].水利水电科技进展,2019,39(5):27-35.

[3] Fan X L, Shi C X, Zhou Y Y, et al. Sediment rating curves in the Ningxia-Inner Mongolia reaches of the upper Yellow River and their implications [J].Quaternary International,2012,282:152-162.
[4] Hu B Q, Wang H J, Yang Z S, et al. Temporal and spatial variations of sediment rating curves in the Changjiang (Yangtze River) Basin and their implications [J].Quaternary International,2011,230(1/2):34-43.
[5] Zhang W, Wei X Y, Zheng J H, et al. Estimating suspended sediment loads in the Pearl River Delta region using sediment rating curves [J].Continental Shelf Research,2012,38:35-46.
[6] Marttila H, Kløve B. Dynamics of erosion and suspended sediment transport from drained peatland forestry [J].Journal of Hydrology,2010,388(3/4):414-425.
[7] Fan X L, Shi C X, Shao W W, et al. The suspended sediment dynamics in the Inner-Mongolia reaches of the upper Yellow River [J].Catena,2013,109:72-82.
[8] Verduyck K, Grabowski R C, Rickson R J. Suspended

- sediment transport dynamics in rivers: Multi-scale drivers of temporal variation [J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 166:38-52.
- [9] Asselman N E M. Fitting and interpretation of sediment rating curves [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 234: 228-248.
- [10] Syvitski J P, Morehead M D, Bahr D B, et al. Estimating fluvial sediment transport: The rating parameters [J]. *Water Resources Research*, 2000, 36:2747-2760.
- [11] Wang H J, Yang Z S, Wang Y, et al. Reconstruction of sediment flux from the Changjiang (Yangtze River) to the sea since the 1860s [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 349(3/4):318-332.
- [12] Rajae T, Mirbagheri S A, Zounemat-Kermani M, et al. Daily suspended sediment concentration simulation using ANN and neuro-fuzzy models [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407:4916-4927.
- [13] Rajae T. Wavelet and ANN combination model for prediction of daily suspended sediment load in rivers [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409:2917-2928.
- [14] Sheridan G J, Lane P, Sherwin C B, et al. Post-fire changes in sediment rating curves in a wet Eucalyptus forest in SE Australia [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 409:183-195.
- [15] De Girolamo A M, Pappagallo G, Lo Porto A. Temporal variability of suspended sediment transport and rating curves in a Mediterranean river basin: The Celone (SE Italy) [J]. *Catena*, 2015, 128:135-143.
- [16] Harrington S T, Harrington J R. An assessment of the suspended sediment rating curve approach for load estimation on the Rivers Bandon and Owenabue, Ireland [J]. *Geomorphology*, 2013, 185:27-38.
- [17] Gao P, Deng J C, Chai X K, et al. Dynamic sediment discharge in the Hekou-Longmen region of Yellow River and soil and water conservation implications [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 578:56-66.
- [18] Ladegaard-Pedersen P, Sigsgaard C, Kroon A, et al. Suspended sediment in a high-Arctic river: An appraisal of flux estimation methods [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 580:582-592.
- [19] Zeng C, Zhang F, Lu X X, et al. Improving sediment load estimations: The case of the Yarlung Zangbo River (the upper Brahmaputra, Tibet Plateau) [J]. *Catena*, 2018, 160:201-211.
- [20] Yang G F, Chen Z Y, Yu F L, et al. Sediment rating parameters and their implications: Yangtze River, China [J]. *Geomorphology*, 2007, 85:166-175.
- [21] Horowitz A J, Clarke R T, Merten G H. The effects of sample scheduling and sample numbers on estimates of the annual fluxes of suspended sediment in fluvial systems [J]. *Hydrological Processes*, 2014, 29(4):531-543.
- [22] Yang Y, Wendroth O. State-space approach to analyze field-scale bromide leaching [J]. *Geoderma*, 2014, 217: 161-172.
- [23] Li Z W, Xu X L, Xu C H, et al. Monthly sediment discharge changes and estimates in a typical karst catchment of southwest China [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 555:95-107.
- [24] Zhao Y F, Zou X Q, Liu Q, et al. Assessing natural and anthropogenic influences on water discharge and sediment load in the Yangtze River, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 607/608: 920-932.
- [25] 王延贵, 史红玲, 刘茜. 水库拦沙对长江水沙态势变化的影响 [J]. *水科学进展*, 2014, 25(4):467-476.
- [26] 张冠华, 丁文峰, 王一峰, 等. 2000 年以来长江流域水沙情势变化及成因分析 [J]. *水土保持学报*, 2020, 34(3): 98-104.
- [27] 中华人民共和国水利部水文局. 中华人民共和国水文年鉴: 长江流域水文资料 [M]. 武汉: 长江水利委员会, 1953-2018.
- [28] 水利部长江水利委员会. 长江泥沙公报 [Z]. 武汉: 长江出版社, 2000-2018.
- [29] 水利部长江水利委员会. 长江流域及西南清河水资源公报 [Z]. 武汉: 长江出版社, 2000-2018.
- [30] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [31] Horowitz A J. An evaluation of sediment rating curves for estimating suspended sediment concentrations for subsequent flux calculations [J]. *Hydrology Processes*, 2003, 17:3387-3409.
- [32] Delmas M, Cerdan O, Cheviron B, et al. River basin sediment flux assessments [J]. *Hydrol of Process*, 2011, 25:1587-1596.
- [33] 杨丽虎, 陈进, 黄薇, 等. 长江上游梯级水电开发情况及对生态环境的影响初探 [J]. *中国农村水利水电*, 2007(3):79-81.
- [34] 刘祖英, 王兵, 赵雨森, 等. 典型区域退耕还林工程生态区划 [J]. *北京林业大学学报*, 2018, 40(3):93-100.
- [35] Kong L Q, Zheng H, Rao E M, et al. Evaluating indirect and direct effects of eco-restoration policy on soil conservation service in Yangtze River Basin [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 631/632:887-894.