

2000 年以来长江流域水沙情势变化及成因分析

张冠华^{1,2}, 丁文峰^{1,2}, 王一峰^{1,2}, 肖海³, 杨悦舒⁴

(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; 3.三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 4.三峡大学土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 基于长江干流屏山、朱沱、寸滩、宜昌、汉口、大通 6 个水文站的实测水沙资料, 采用线性回归、Mann-Kendall 趋势分析和突变检验、Sen's 估计以及累积距平法, 分析长江干流 2001—2018 年径流输沙年际、年内变化趋势及其成因。结果表明: 2000 年以来长江干流各水文站年输沙量较 2000 年前显著降低, 降幅高于 56%; 年径流量下降不明显, 降幅低于 8%; 输沙量变异程度高于径流量变异程度。2001—2018 年, 长江流域平均月径流量为 $718 \times 10^8 \text{ m}^3$, 平均月输沙量为 $1\ 247 \times 10^4 \text{ t}$, 且主要分布在 6—9 月。趋势分析显示, 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, 其中屏山、朱沱、寸滩站分别在 2010 年和 2012 年左右发生突变, 宜昌、汉口、大通站在 2005 年发生突变; 屏山站月径流量无明显变化趋势, 大通站 1 月径流量显著增加, 其他 4 个水文站均在 1—4 月呈显著增加趋势; 各水文站月输沙量主要在 6—10 月呈显著减少趋势。水利工程和水土保持生态环境建设等人类活动是长江流域输沙减少的主要原因。

关键词: 水沙情势; 多时间尺度; 驱动因素; 人类活动; 长江

中图分类号: S157.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)03-0098-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.03.016

Analysis on Water and Sediment Variation and the Driving Factors in Yangtze River Basin Since 2000

ZHANG Guanhua^{1,2}, DING Wenfeng^{1,2}, WANG Yifeng^{1,2}, XIAO Hai³, YANG Yueshu⁴

(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. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang,

Hubei 443002; 4. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002)

Abstract: Based on the measured runoff and sediment data of six hydrologic stations (Pingshan, Zhutuo, Cuntan, Yichang, Hankou and Datong) situated at Yangtze River's main stream, this study analyzed the inter- and intra- annual variation trends of runoff and sediment during 2001—2018 and their causes using statistical methods including linear regression, Mann-Kendall test, Sen's estimation and accumulative anomaly. The results showed that since 2000, the annual sediment discharge of each hydrologic station significantly declined compared with that before 2000, with the decreasing amplitude higher than 56%, while annual runoff decreased insignificantly with the decreasing amplitude lower than 8%. The variability of sediment discharge was higher than that of runoff. For the Yangtze River basin, from 2001 to 2018, the average monthly runoff and sediment discharge was $718 \times 10^8 \text{ m}^3$ and $1\ 247 \times 10^4 \text{ t}$, respectively, and mainly distributed between June and September. The trend analysis indicated that annual precipitation and runoff had no remarkable changes, however, annual sediment discharge showed a significantly decreasing trend. The change-points for Pingshan, Zhutuo and Cuntan station were in 2010 and 2012, and those for Yichang, Hankou, and Datong station were in 2005. Monthly runoff for Pingshan station had no obvious trends; for Datong station, runoff only increased significantly in January, that of the other four stations increased significantly between January and April. Monthly sediment discharge from June to October for the six stations showed significant decreasing trends. In this study, human activities such as water conservancy construction and soil and water conservation were the primary causes of sediment reduction in the Yangtze River basin.

收稿日期: 2019-10-23

资助项目: 国家自然科学基金项目(41877082, 41807068, 41701316); 水利技术示范项目(SF-201905); 国家重点研发计划项目(2017YFE0118100-2, 2017YFC050530302)

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

Keywords: water and sediment regime; multitime scale; driving factor; human activities; Yangtze River

江河水沙变化问题一直是全球关注的重点,气候变化和人类活动影响下的河流水沙情势变化解析,对于水资源合理利用、流域管理及水土流失治理等均具有重要意义,已成为当前水文研究的热点和难点^[1]。长江是我国第一大河,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^[2],其丰富的水资源和水能资源为流域经济和社会可持续发展提供保障^[3]。然而,近几十年,受气候变化和人类活动的影响,长江流域输沙量大幅减少,其入海泥沙由 1951—1968 年的 4.80 亿 t/年下降到 2003—2015 年的 1.39 亿 t/年,下降幅度为 71%^[4]。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情势变化更趋明显^[5]。有研究^[6]显示,三峡大坝 2003 年蓄水后,下游各站的输沙量呈显著减小趋势,宜昌站 2003—2013 年平均输沙量较 2002 年减少约 1.814 亿 t,减幅达 80%,大通站近 10 年(2009—2018)平均输沙量仅为 1.22 亿 t。据统计^[7-8],截至 2010 年,在长江干流和主要支流上修建的大型水库有 84 座,总库容达 1 535 亿 m³,包括金沙江下游梯级水电工程,这必然引起水沙关系发生重大调整,进而引发下游河道一系列新的生态环境问题^[9]。此外,在长江流域内,国家实施长江上游水土保持重点防治工程和六大国家水土保持重点工程,其水土保持工作的持续进行,对 2000 年以来长江流域的来水来沙状况同样产生深刻影响^[6,10]。

前人^[2,4,6,10-11]对 2000 年前长江流域的水沙变化关注较多,且多以年际为尺度,对水沙的年内变化涉及甚少,因此可能会掩盖水沙在季节或月尺度上的明显变化。有研究^[12]表明,长江月径流量呈显著减小趋势,但在年尺度上并未发现明显变化;Jiang 等^[13]分析了长江干流 1961—2000 年降雨和径流的月变化,发现长江上游(以宜昌水文站控制)径流量在 2,7 月呈显著上升趋势,在 5,10,11 月呈下降趋势;整个流域(以大通水文站控制)径流量在 1—3 月和 7—8 月呈显著上升趋势,仅在 5 月呈下降趋势,并将这种变化趋势归因于气候变化。由此可见,深入研究江河水沙多时间尺度变化趋势、总量分配及其驱动因素,对河川径流管理及土壤侵蚀防控至关重要^[14]。

综上所述,针对当前水沙变化研究热点及目前研究中存在的不足,本研究以长江流域为研究对象,基于干流屏山、朱沱、寸滩、宜昌、汉口、大通 6 个水文站 2001—2018 年 18 年的水文数据,对长江干流水沙情势年际、年内变化特征进行分析,并探讨其成因,研究

结果为长江流域水土资源优化配置及流域生态环境建设提供科学依据。

1 研究区概况

长江(24°30′—35°45′N,90°33′—122°25′E)发源于青藏高原,干流流经我国 11 个省、自治区、直辖市,全长约 6 300 km,面积约 180 万 km²;干流宜昌以上为上游,宜昌到湖口为中游,湖口至长江入海口为下游。长江上游为高原山地气候,海拔高,气温低;中下游地区位于秦岭—淮河以南地区,属于亚热带季风气候,受海陆位置和季风等因素的影响,气候温和,降雨丰沛,年平均气温 18℃,年平均降水量 1 067 mm,降水多集中在 5—10 月。

2 材料与方法

2.1 数据来源

本研究选取长江干流屏山、朱沱、寸滩、宜昌、汉口、大通 6 个主要水文控制站,来反映整个流域上中下游的水沙年际、年内变化过程和趋势。其中,屏山、朱沱、寸滩位于上游,宜昌站为上游控制站,控制流域面积约 100.55 万 km²;汉口站位于中游,控制流域面积 148.8 万 km²;大通站是干流总控制站,控制流域面积 170.5 万 km²,反映长江流域总的水沙变化。各水文站点 2001—2018 年的年、月径流量和输沙量数据来源于长江流域水文年鉴和长江泥沙公报,降水量数据来源于历年长江流域水资源公报;受向家坝水库蓄水影响,2012—2018 年屏山站水沙资料采用向家坝水文站的水沙资料。

2.2 研究方法

采用的数据分析方法包括:线性倾向估计法、Mann—Kendal 趋势分析法、Sen's 估计法、Mann—Kendall 突变检测和累积距平法。

2.2.1 趋势分析 采用 Mann—Kendall(M—K)检验法和 Sen's 倾斜度估计法分析降雨、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^[14-15]。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 1.645,1.960 和 2.576 时,表示变化趋势显著性水平分别达 0.1,0.05,0.01。

为了消除时间系列可能存在的自相关对趋势分析的影响,在进行 M—K 检验前首先进行自相关检验,本文采用 Durbin—Watson 检验法。Durbin—

Watson 检验统计量介于 0~4, 接近 2 表示数据系列不存在自相关, 越接近 0 表示正相关性越强, 越接近 4 表示负自相关性越强。如果检测到数据系列存在自相关, 则进行去趋势预置白处理 (trend-free prewhitening, TFPW), 再执行 M-K 趋势分析。

Sen's 估计法是一种粗略的估计系列趋势变化幅度的一种方法, 同样被广泛应用在气象水文时间序列中, 其通过对时间序列计算倾斜度指标 β , 得到单调趋势度量因子。 β 表示时间系列的单调变化率, 当 $\beta > 0$ 时表示趋势上升, 当 $\beta < 0$ 时表示趋势下降。此外, 本文采用线性回归进行结果比较。

2.2.2 突变分析 通过 Mann-Kendall (M-K) 突变检验法和累积距平法进行突变点识别, M-K 法在进行突变分析时不仅能识别突变发生的时间, 还能确定突变发生的区域, 具体分析步骤可参见文献 [14-15]。累积距平的核心是判断离散数据对其均值的离散幅度, 累积距平值增大, 表明离散数据大于其平均值, 反之则小于其平均值; 如果曲线由上述 2 个部分组成, 则可确定变化趋势的拐点; 从曲线明显的上下起伏, 可以判断其长期显著的演变趋势及持续性变化, 甚至还可以诊断出发生突变的大致时间。

2.2.3 统计分析 基本统计描述、方差分析、线性回归以及 Durbin-Watson 检验通过 SPSS 21.0 软件, Mann-Kendall 趋势分析和突变检验通过 MATLAB R2016a 软件。

3 结果与分析

3.1 长江流域水沙变化基本特征

3.1.1 水沙年际变化 单一样本 T 检验显示, 2000 年以来长江干流各水文站多年平均径流量较 2000 年以前略有下降 (表 1), 下降幅度低于 8%, 与前人 [10] 研究结果一致; 方差分析显示, 从上游到下游, 径流量显著增加; 各站点极值比为 1.44~1.72, 变异系数为 10.1%~12.8%, 根据 Nielsen 等 [16] 分类, 属于中度变异。然而, 2000 年以来各站点多年平均输沙量较 2000 年以前则显著降低, 下降幅度均高于 56%, 特别是上游控制站宜昌, 年均输沙量由 2000 年前的 5 亿 t 下降到 2000 年后的 0.6 亿 t, 下降幅度达 87%; 方差分析同样显示, 宜昌站多年平均输沙量显著低于其他站点; 各站点极值比为 3.84~243, 变异系数为 41%~132%, 属于中到强度变异, 其中屏山站极值比最高, 宜昌站变异系数最高, 表明 2000 年以来长江流域水沙状况发生变化, 年输沙量显著减少, 年径流量变化不明显, 输沙量变异程度高于径流量变异程度。

3.1.2 水沙年内变化 由表 2 可知, 长江流域 (大通控制站) 多年平均月径流量为 718 亿 m^3 , 各水文站同样呈现从上游到下游逐渐增加, 变异系数为 49%~73%, 属中度变异; 流域多年平均月输沙量为 1 247 万 t, 宜昌站为 509 万 t, 显著低于其他水文站, 各站点变异系数为 100%~284%, 属强度变异。

表 1 长江干流主要水文站年径流量和年输沙量统计值

站点	控制面积/ 万 km^2	时段/年	多年平均 径流量/ $10^8 m^3$	多年平均 输沙量/ $10^8 t$	2001-2018 年径流量				2001-2018 年输沙量					
					最小值/ $10^8 m^3$	最大值/ $10^8 m^3$	均值/ $10^8 m^3$	极值比	变异 系数/%	最小值/ $10^8 t$	最大值/ $10^8 t$	均值/ $10^8 t$	极值比	变异 系数/%
屏山	45.88	1956-2000	1426	2.55	1010	1742	1410a	1.72	14.3	0.01	2.43	1.03a	243.00	81
朱沱	69.47	1954-2000	2700	3.05	1934	3161	2583b	1.63	12.5	0.212	2.81	1.34ab	13.25	60
寸滩	86.66	1950-2000	3397	4.18	2479	3887	3292c	1.57	10.7	0.328	3.01	1.54ab	9.18	53
宜昌	100.55	1950-2000	4382	5.01	2848	4738	4086d	1.66	11.3	0.033	2.99	0.61ab	90.61	132
汉口	148.80	1954-2000	7112	4.04	5341	7687	6836e	1.44	10.1	0.576	2.85	1.18bc	4.95	53
大通	170.54	1950-2000	9051	4.33	6671	10450	8652f	1.57	12.8	0.718	2.76	1.50c	3.84	41

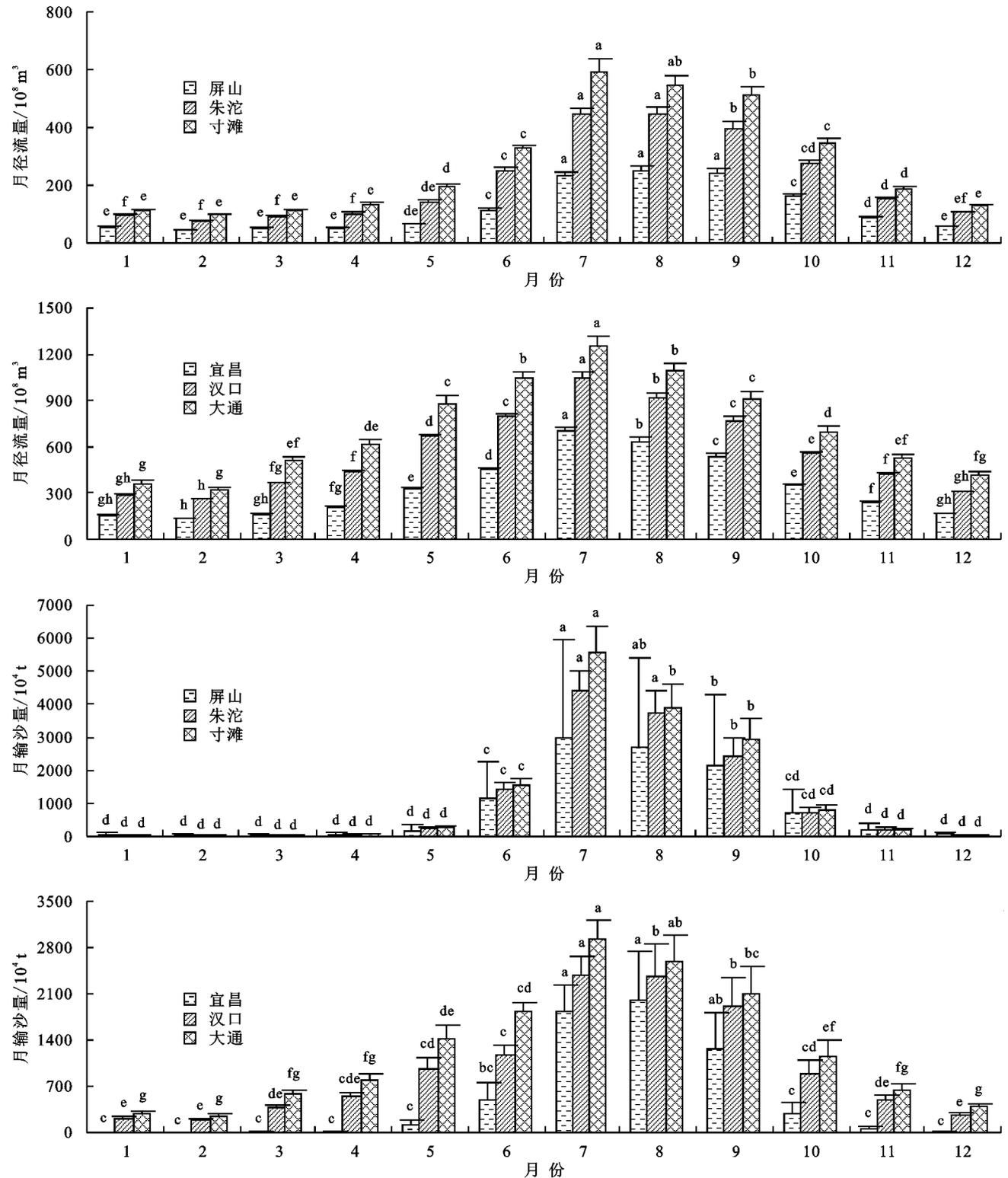
注: 加下划线数字表示与 2000 年前相应均值进行比较, t 检验显著水平 ($p < 0.05$); 同列不同小写字母表示不同水文站间存在显著差异 ($p < 0.05$); 2000 年以前时段数据摘自长江泥沙公报和文献 [10]。

表 2 2000 年以来长江干流主要水文站月径流、输沙量统计特征值

站点	月径流量					月输沙量						
	最小值/ $10^8 m^3$	最大值/ $10^8 m^3$	中值/ $10^8 m^3$	均值/ $10^8 m^3$	标准差	变异 系数/%	最小值/ $10^4 t$	最大值/ $10^4 t$	中值/ $10^4 t$	均值/ $10^4 t$	标准差	变异 系数/%
屏山	30	386	75	118	86	73.0	0	7848	79	859	1628	189
朱沱	58	723	142	215	149	69.2	0	8892	128	1113	1984	178
寸滩	75	1007	184	275	195	71.0	12	10580	149	1287	2336	182
宜昌	85	1053	259	339	214	63.2	2	10955	16	509	1445	284
汉口	195	1330	471	570	281	49.4	100	7700	558	981	1214	124
大通	152	1755	637	718	339	47.2	78	7078	800	1247	1254	100

长江流域降水主要集中在 5—10 月,占年降水量的 80%左右。本研究分析表明,流域径流输沙主要集中在 5—10 月,其中 6—9 月径流量和输沙量显著高于其他月份(图 1);干流几个主要水文站 5—10 月径流量占全年总径流量的 65%~75%,6—9 月径流

量占年径流总量的 50%左右;而 5—10 月输沙量占全年总输沙量的 85%以上,6—9 月输沙量占年输沙量的 75%左右,说明年土壤流失受控于关键的几个月,进一步说明在月尺度上分析水沙变化的重要性,为有针对性的进行防控提供参考。



注:同一系列不同小写字母表示不同月份间差异显著($p < 0.05$)。

图 1 2000 年以来长江干流主要水文站月平均径流量和输沙量

3.2 长江流域水沙变化趋势分析

3.2.1 年尺度变化趋势分析 对 2001—2018 年长江

干流主要水文站年径流输沙量序列分别采用 M—K 趋势检验、Sen's 斜率估计和线性回归 3 种方法计算统计

量 Z 、 β 、 b ，并取 95% 置信度进行显著性检验(表 3)。由表 3 可知,3 种方法分析结果一致,即年降雨量和径流量无明显的时间变化趋势,而各水文站年输沙量呈极显著

减小趋势($|Z| > 2.576$, $p < 0.01$),其中屏山、朱沱、寸滩平均减少率为 0.12~0.13 亿 t/年,宜昌、汉口、大通平均减少率为 0.06~0.07 亿 t/年。

表 3 长江干流主要水文站年径流、输沙量及流域降雨量趋势分析统计参数

参数	屏山		朱沱		寸滩		宜昌		汉口		大通		长江流域
	径流	泥沙	径流	泥沙	径流	泥沙	径流	泥沙	径流	泥沙	径流	泥沙	降雨
Durbin-Watson	1.757	2.070	2.302	2.368	2.662	2.282	2.698	1.717	2.648	1.745	2.552	1.908	2.742
Z	-0.909	-3.901	0.303	-3.409	0.227	-2.878	1.136	-3.560	0.000	-3.333	0.606	-2.879	1.288
β	-10.692	-0.133	5.250	-0.125	5.571	-0.116	20.154	-0.062	2.500	-0.075	29.091	-0.078	6.030
r	-0.290	-0.868	0.083	-0.833	0.138	-0.755	0.291	-0.722	0.055	-0.764	0.162	-0.682	0.356
b	-10.988	-0.137	5.006	-0.125	9.140	-0.115	25.199	-0.109	7.142	-0.090	33.662	-0.078	5.080
p	0.243	0.000	0.744	0.000	0.585	0.000	0.242	0.001	0.827	0.000	0.522	0.002	0.147
趋势	↓	↓**	↑	↓**	↑	↓**	↑	↓**	↑	↓**	↑	↓**	↑

注: Z 和 β 为 M-K 趋势分析参数; r 、 b 和 p 分别为线性回归 Pearson 相关系数、回归系数和回归方程显著性;Durbin-Watson 值越接近 2 表示数据系列不存在自相关; ** 和 * 表示显著性概率达 99% 和 95%。

对各水文站年输沙量的突变分析结果表明,屏山站年输沙量在 2010 年发生突变,自 2012 年显著减小,变幅约 83.6%;朱沱站年输沙量在 2010 年发生突变,2013 年后显著减小,变幅 66.2%;寸滩站在 2012 年左右发生突变,自 2014 年显著减小,变幅 64.8%;宜昌、汉口、大通站均在 2005 年左右发生突变,2006 年开始显著降低,变幅分别为 85.5%,56.9%,45.9%(表 4)。

表 4 年输沙量 Mann-Kendall(M-K)突变分析结果

站点	突变点	变化前/ 亿 t	变化后/ 亿 t	变化率/ %
屏山	2010	1.641	0.269	-83.6
朱沱	2010	1.893	0.639	-66.2
寸滩	2012	1.970	0.693	-64.8
宜昌	2005	1.597	0.232	-85.5
汉口	2005	1.998	0.861	-56.9
大通	2005	2.240	1.210	-45.9

3.2.2 月尺度变化趋势分析 采用 M-K 检验对 2000 年以来长江干流主要水文站月径流输沙量序列进行趋势分析(表 5,表 6),发现屏山站月径流量 6—10 月呈下降趋势,11 月至翌年 5 月呈上升趋势,但均未达显著水平;朱沱站 12 月至翌年 4 月呈显著上升趋势,6 月呈显著下降趋势,其他月份变化趋势不明显;寸滩和宜昌分别在 1—4 月和 1—5 月显著上升,其他月份变化趋势不明显;汉口站 1,2,4 月呈显著上升,其他月份变化不显著;大通站仅 1 月显著上升,其他月份变化不显著。本研究中的几个水文站径流量在年尺度上变化都不显著,但朱沱、寸滩、宜昌、汉口和大通站在月尺度上存在显著变化趋势(表 5),且变化趋势与年尺度变化一致(表 3),说明径流量的年内变化主要发生在这几个月份。

对月输沙量的趋势分析(表 6)表明,上游屏山、朱沱、寸滩、宜昌站 5—11 月均呈显著下降趋势,中游汉口站 6—10 月显著下降,下游大通站 8—10 月显著

下降,变化趋势与年尺度变化一致,同样说明输沙量的变化受控于几个关键月份。

3.3 水沙变化驱动因素

3.3.1 气候变化和人类活动对长江流域输沙量的影响 通常认为,气候变化和人类活动是水沙变化的主要原因^[2,14,17-19],量化和评价这 2 个驱动力的贡献作用已成为当前水文研究的热点^[20-23]。特别最近几十年,全球气候变化加速了水文循环并影响降水的时空分布^[24],继而影响土壤侵蚀过程和径流、泥沙的传输^[25-26]。人类活动如水库建设、水土保持、土地利用变化、取水采砂等对水沙变异的作用,亦有广泛报道^[14,18-19,24]。

前文分析表明,2000 年以来长江流域年降雨量呈不显著上升趋势(表 3),Sen's 斜率估计和线性回归显示流域降雨分别以 6,5 mm/a 增加,这可能是干流几个主要水文站径流增加的主要原因。由于各水文站年输沙量呈显著减小趋势,本研究将大通站年输沙量作为长江流域输沙量,建立年降水量和输沙量的双累积曲线^[14],基于 M-K 突变检验和累积距平曲线分析结果,进一步分离、量化气候变化和人类活动对长江流域输沙变化的贡献。由表 7 可知,长江流域输沙的减少主要受人类活动的影响,其作用占 81%,气候变化的影响仅占 19%,与以往的研究^[11,13,24]结果一致。

3.3.2 水库建设 水库的主要作用是调节河道径流过程,不会减少总径流量,但会拦截大量泥沙,改变进入下游的水沙过程。根据 2018 年长江流域水资源公报统计,长江流域共建有 271 座大型水库和 1 443 座中型水库,蓄水总量达 2 006 亿 m^3 ,必然对下游来水来沙条件产生巨大作用。2018 年长江泥沙公报显示,丹江水库自 1968 年蓄水至 2018 年,累计淤积泥沙 14.227 亿 t,2018 年淤积泥沙 183.3 万 t;三峡水库自 2003 年 6 月蓄水至 2018 年,累计淤积泥沙 17.733 亿 t,2018 年淤积泥沙 1.042 亿 t,这是三峡水库下游年输沙量

显著减小和宜昌、汉口、大通站年输沙量于 2005 年发生突变的主要原因。此外,溪洛渡和向家坝水电站分别于 2007 年和 2008 年实现截流,使得其下游年输沙量显著下降,屏山(向家坝)、朱沱、寸滩站年输沙量分别于 2010

年和 2012 年左右发生突变。实测地形资料分析表明,2008 年 2 月至 2018 年 10 月间,溪洛渡水库干、支流共淤积泥沙 5.559 亿 m^3 ;2017 年 11 月至 2018 年 10 月,溪洛渡库区共淤积泥沙 7 668 万 m^3 。

表 5 长江干流主要水文站月径流量趋势分析统计量

站点	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
屏山	1.098	0.265	0.644	1.212	1.023	-1.742	-1.288	-1.023	-1.818	-0.114	0.151	0.227
朱沱	<u>2.765</u>	<u>2.500</u>	<u>2.803</u>	<u>2.500</u>	0.454	<u>-2.273</u>	0.417	-0.720	-1.250	1.288	0.682	<u>2.083</u>
寸滩	<u>2.727</u>	<u>2.841</u>	<u>2.954</u>	<u>2.651</u>	0.682	-1.439	1.023	-0.871	-0.985	0.303	0.152	0.682
宜昌	<u>3.560</u>	<u>4.470</u>	<u>3.561</u>	<u>2.803</u>	<u>2.159</u>	0	0.606	-0.720	-1.629	-0.492	0.947	2.273
汉口	<u>2.310</u>	<u>1.970</u>	1.061	<u>2.235</u>	-0.114	-0.417	0.644	-0.303	-1.667	-0.227	0.682	1.515
大通	<u>2.462</u>	0.038	1.061	1.288	-0.568	0.833	0.985	0.227	-1.591	-0.606	0.833	1.780

注:下划线数字表示趋势变化显著($p < 0.05$)。下同。

表 6 长江干流主要水文站月输沙量趋势分析统计量

站点	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
屏山	<u>-2.197</u>	<u>-2.348</u>	-1.136	-1.742	<u>-2.879</u>	<u>-3.182</u>	<u>-2.651</u>	<u>-3.485</u>	<u>-3.940</u>	<u>-3.863</u>	<u>-3.409</u>	<u>-2.879</u>
朱沱	-0.152	0.134	-0.076	-0.341	<u>-2.424</u>	<u>-3.788</u>	<u>-2.197</u>	<u>-2.803</u>	<u>-3.560</u>	<u>-3.750</u>	<u>-2.765</u>	-1.591
寸滩	-1.023	-0.871	1.098	0.151	<u>-2.197</u>	<u>-3.636</u>	-0.833	<u>-2.878</u>	<u>-3.333</u>	<u>-3.788</u>	<u>-3.182</u>	<u>-2.651</u>
宜昌	<u>-2.651</u>	<u>-2.386</u>	-1.932	-1.894	<u>-2.689</u>	<u>-3.030</u>	<u>-2.651</u>	<u>-2.878</u>	<u>-3.788</u>	<u>-3.106</u>	<u>-3.257</u>	<u>-2.613</u>
汉口	0	-0.568	-0.871	0	-1.932	<u>-2.916</u>	<u>-2.007</u>	<u>-2.727</u>	<u>-3.636</u>	<u>-2.121</u>	-0.606	0.341
大通	-0.303	-1.477	0.189	0.568	-1.288	-1.477	-1.061	-2.424	-3.636	-2.197	-0.909	-0.795

表 7 气候变化和人类活动对长江流域年输沙量的影响

单位:亿 t

时期	时段/年	实测均值	计算均值	总变化量	降水影响	人类活动影响
基准期	2001—2005	2.24				
变化期	2006—2018	1.21	2.05	-1.03	-0.19(-19%)	-0.84(-81%)

3.3.3 水土保持 实施水土保持措施主要是改变流域下垫面条件,增加流域植被覆盖或增强土壤抗侵蚀能力,蓄水保土,最大限度地控制水土流失,从而达到保护和合理利用水土资源的目的。根据第一次全国水利普查数据(2013 年),长江流域水土流失面积 38.46 万 km^2 ,占流域土地总面积 21.37%。水土流失已成为目前长江经济带生态环境所面临的主要问题之一,制约着长江经济带的可持续发展。坡耕地是长江流域水土流失的主要策源地,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(水土流失重点治理工程、坡耕地水土流失综合治理工程、丹江口水库及上游水土保持工程、岩溶地区石漠化治理工程、国家农业综合开发水土保持项目、国家水土保持重点建设工程),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。根据长江流域水土保持公报,2006—2015 年,全流域累计治理水土流失面积 14.73 万 km^2 ,其中,六大国家水土保持重点工程共治理水土流失面积 5.97 万 km^2 。2018 年,长江流域实施的中央财政水利发展资金水土保持项目和中央预算内投资坡耕地水土流失治理工程 2 类国家水土保持重点工程,共涉及 319 个项目县,完成水土流失治理面积 4 662 km^2 。

此外,大规模生态环境建设工程的实施驱动流域土壤、生态、侵蚀、水文过程等发生改变,从而影响流域生态系统服务功能^[27]。有研究^[28-29]显示,从 1999 年国家启动退耕还林(草)工程试点实施开始至今,长江流域中上游地区实现退耕还林面积 924.06 万 hm^2 ,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流域中上游地区的生态环境。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 年间,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%^[30]。

3.3.4 用水和采砂 近年来,随着经济社会的迅速发展,对长江的开发力度也在不断加大,长江流域用水量、河道采砂规模随之增大。本研究通过 M—K 趋势分析发现,2000 年以来,长江流域总用水量呈极显著增加趋势($Z=5.15, p < 0.001$),总用水量从 2001 年的 1 746.7 亿 m^3 增加到 2018 年的 2 071.7 亿 m^3 ,增加了 18.6%;其中,生活用水和工业用水分别呈极显著增加($Z=3.18, p < 0.01$)和不显著增加($Z=1.51, p > 0.05$)趋势,农业用水相对有所下降($Z=-0.45, p > 0.05$)。另外,跨流域调水如南水北调工程也对流域内的水沙变化产生一定影响。根据统计,2018 年长江干流河道总采砂量约 1 301 万 t,

其中建筑采砂约 135 万 t,吹填造地采砂 1 166 万 t,开采量较前几年大大降低。

4 结论

(1)2000 年以来长江干流 6 个水文站多年平均输沙量较 2000 年前显著降低,降幅均高于 56%,特别是上游控制站宜昌,降幅达 87%;多年平均径流量下降不明显,降幅均低于 8%;输沙量变异程度高于径流量变异程度。2001—2018 年,长江流域多年平均月径流量为 718 亿 m³,多年平均月输沙量为 1 247 万 t,且主要分布在 6—9 月,6—9 月径流量和输沙量分别占年径流输沙量的 50%和 75%。

(2)年尺度趋势分析显示,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,其中屏山、朱沱、寸滩站分别在 2010 年和 2012 年左右发生突变,宜昌、汉口、大通站均在 2005 年发生突变。月尺度趋势分析显示,屏山站月径流量无明显变化趋势,大通站 1 月径流量显著增加,其他 4 个水文站均在 1—4 月呈显著增加趋势;各水文站月输沙量主要在 6—10 月呈显著减少趋势。

(3)坝库建设、水土保持生态环境建设等人类活动是长江流域输沙减少的主要原因。

参考文献:

- [1] Fu B J, Wang S, Liu Y, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, 45: 223-243.
- [2] 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.
- [3] 武旭同,李娜,王腊春.近 60 年来长江干流水沙特征分析[J].*泥沙研究*, 2016(5): 40-46.
- [4] 彭涛,田慧,秦振雄,等.气候变化和人类活动对长江径流泥沙的影响研究[J].*泥沙研究*, 2018(6): 54-60.
- [5] 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.
- [6] 柴元方,李义天,李思璇,等.长江流域近期水沙变化趋势及成因分析[J].*灌溉排水学报*, 2017, 36(3): 94-101.
- [7] Wang Y G, Hu C H, Liu X, et al. Study on changes of oncoming runoff and sediment load of the Three Gorges Project and influence of human activities[C]//Proceedings of 12th ISRS. Kyoto: CRC Press Taylor & Francis Group, Japan, 2013.
- [8] 张信宝,文安邦, Waling D E, 等.大型水库对长江上游主要干支河流输沙量的影响[J].*泥沙研究*, 2011(4): 59-66.
- [9] 赵阳,胡春宏,张晓明,等.近 70 年黄河流域水沙情势及其成因分析[J].*农业工程学报*, 2018, 34(21): 112-119.
- [10] 杨维鹤,代茹,张雁,等.2000—2015 年长江干流水沙变化及成因分析[J].*中国水土保持科学*, 2019, 17(1): 16-23.
- [11] Dai Z, Fagherazzi S, Mei X, et al. Decline in suspended sediment concentration delivered by the Changjiang (Yangtze) River into the East China Sea between 1956 and 2013[J].*Geomorphology*, 2016, 268: 123-132.
- [12] Chen J, Wu X D, Finlayson B L, et al. Variability and trend in the hydrology of the Yangtze River, China: Annual precipitation and runoff[J].*Journal of Hydrology*, 2014, 513: 403-412.
- [13] Jiang T, Su B D, Hartmann H. Temporal and spatial trends of precipitation and river flow in the Yangtze River Basin, 1961—2000 [J]. *Geomorphology*, 2007, 85: 143-154.
- [14] Li Z W, Xu X L, Yu B F, et al. Quantifying the impacts of climate and human activities on water and sediment discharge in a karst region of southwest China [J].*Journal of Hydrology*, 2016, 542: 836-849.
- [15] 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.
- [16] Nielsen D R, Bouma J. Soil spatial variability[M]. Wageningen: PUDOC, 1985.
- [17] Li Z Y, Fang H Y. Modeling the impact of climate change on watershed discharge and sediment yield in the black soil region, northeastern China[J].*Geomorphology*, 2017, 293: 255-271.
- [18] Wang S, Fu B J, Liang W, et al. Driving forces of changes in the water and sediment relationship in the Yellow River [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 576: 453-461.
- [19] Yang X N, Sun W Y, Li P F, et al. Reduced sediment transport in the Chinese Loess Plateau due to climate change and human activities [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 642: 591-600.
- [20] Li Z Y, Fang H Y. Impacts of climate change on water erosion: A review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 163: 94-117.
- [21] Vercauteren 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.
- [22] Zhao G J, Mu X M, Jiao J Y, et al. Assessing response of sediment load variation to climate change and human activities with six different approaches [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 639: 773-784.
- [23] Huang X, Fang N F, Zhu T X, et al. Hydrological response of a large-scale mountainous watershed to rain-storm spatial patterns and reforestation in subtropical China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 645: 1083-1093.

- [6] 尹光华,佟娜,郝亮,等.不同材料膜覆盖对土壤水分和花生产量的影响[J].水土保持学报,2012,26(4):204-207,250.
- [7] 任江波,李钠钾,秦平伟,等.不同覆盖材料对土壤理化性状和微生物量碳氮含量的影响[J].西南农业学报,2018,31(10):2140-2145.
- [8] Dong Q, Dang T H, Guo S L, et al. Effect of different mulching measures on nitrate nitrogen leaching in spring maize planting system in south of Loess Plateau[J].Agricultural Water Management,2019,213:654-658.
- [9] 曹寒冰,王朝辉,师渊超,等.渭北旱地冬小麦监控施氮技术的优化[J].中国农业科学,2014,47(19):3826-3838.
- [10] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [11] 尹飞,王俊忠,孙笑梅,等.夏玉米根系与土壤硝态氮空间分布吻合度对水氮处理的响应[J].中国农业科学,2017,50(11):2166-2178.
- [12] 李银坤,郝卫平,龚道枝,等.减氮配施有机肥对夏玉米——冬小麦土壤硝态氮及氮肥利用的影响[J].土壤通报,2019,50(2):348-354.
- [13] 彭正萍,刘亚男,李迎春,等.持续氮素调控对小麦/玉米轮作系统氮素利用和表观损失的影响[J].水土保持学报,2015,29(6):74-79.
- [14] 屈会峰,刘吉飞,赵护兵.减氮结合不同覆盖对冬小麦产量、水氮利用及根系的影响[J].西南农业学报,2017,30(10):2270-2276.
- [15] 杜雄,张永升,王磊,等.不同种植制度与土下微膜覆盖的小麦玉米水分利用效果[J].水土保持学报,2018,32(3):226-234.
- [16] 屈会峰,赵护兵,刘吉飞,等.不同覆盖措施下旱地冬小麦的氮磷钾需求及其生理效率[J].植物营养与肥料学报,2017,23(4):874-882.
- [17] 解文艳,周怀平,杨振兴,等.旱地春玉米地表覆盖对土壤硝态氮残留的影响[J].水土保持学报,2015,29(4):158-164.
- [18] 付鑫,王俊,赵丹丹.地膜覆盖对黄土高原旱作春玉米田土壤碳氮组分的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):239-243.
- [19] 彭正凯,李玲玲,谢军红,等.不同耕作措施对旱地作物生育期农田耗水结构和水分利用效率的影响[J].水土保持学报,2018,32(5):214-221.
- [20] 解文艳,周怀平,杨振兴,等.不同覆盖方式对旱地春玉米土壤水分及作物生产力的影响[J].水土保持学报,2014,28(4):128-133.
- [21] 李廷亮,谢英荷,高志强,等.周年覆盖对黄土旱塬冬小麦产量及降水利用率的影响[J].水土保持学报,2018,32(1):332-338.
- [22] 辛思颖,翁玲云,吕敏娟,等.施氮量对冬小麦—夏玉米土壤氮素表观盈亏的影响[J].水土保持学报,2018,32(2):257-263,269.
- [23] 张勉,孙敏,高志强,等.年际间周年覆盖保水对旱地小麦植株氮素利用的调控研究[J].水土保持学报,2017,31(2):253-261.
- [24] 何刚,王朝辉,李富翠,等.地表覆盖对旱地小麦氮磷钾需求及生理效率的影响[J].中国农业科学,2016,49(9):1657-1671.
- (上接第104页)
- [24] Zhao Y F, Zou X Q, Gao J H, et al. Quantifying the anthropogenic and climatic contributions to changes in water discharge and sediment load into the sea: A case study of the Yangtze River, China[J].Science of the Total Environment,2015,536:803-812.
- [25] Han J Q, Gao J E, Luo H. Changes and implications of the relationship between rainfall, runoff and sediment load in the Wuding River basin on the Chinese Loess Plateau[J].Catena,2019,175:228-235.
- [26] Hu J F, Gao P, Mu X M, et al. Runoff-sediment dynamics under different flood patterns in a Loess Plateau catchment, China[J].Catena,2019,173:234-245.
- [27] 孔令桥,张路,郑华,等.长江流域生态系统格局演变及驱动力[J].生态学报,2018,38(3):741-749.
- [28] 高俊刚,吴雪,张懿铨,等.基于等级层次分析法的金沙江下游地区生态功能分区[J].生态学报,2016,36(1):134-147.
- [29] 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.
- [30] 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.