

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.030.

蒋蒙, 田鹏, 穆兴民, 等. 嘉陵江流域输沙时空变化及归因分析[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 116-121.

JIANG Meng, TIAN Peng, MU Xingmin, et al. Spatiotemporal Variation and Attribution Analysis of Sediment Load in Jialing River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 116-121.

嘉陵江流域输沙时空变化及归因分析

蒋蒙¹, 田鹏^{1,2}, 穆兴民^{1,3}, 赵广举^{1,3}

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学
资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:河流输沙过程变化对河流系统的功能发挥具有重要意义, 因此探究嘉陵江流域输沙时空变化及其驱动因素, 对嘉陵江流域进一步治理具有重要指导作用。基于嘉陵江流域实测降雨输沙资料, 采用 Mann-Kendall 趋势检验、Pettitt 突变检验分析输沙时空变化特征, 采用双累积曲线法定量分析了典型区间内水文站点气候变化与人类活动对输沙变化贡献率。结果表明:嘉陵江流域各子流域年代输沙模数整体呈减少趋势, 2007—2015 年, 仅武都—碧口区间输沙模数高达 3 323.48 t/(km² · a)。典型区间内北碚、武胜、罗渡溪、小河坝 4 站 1960—2015 年输沙量呈极显著下降趋势, 分别以 3.40×10^6 , 1.80×10^6 , 4.0×10^5 , 3.40×10^5 t/a 的速率下降, 以水土保持与水利工程措施为主的人类活动减沙贡献率为 75.93%~96.43%, 其输沙序列分别于 1990 年、1990 年、1988 年、1984 年发生极显著突变。嘉陵江流域各子流域年代输沙模数整体呈减少趋势, 干流修建多座大型控制性水库对河道输沙的影响尤为明显, 武都—碧口区间应视为未来水土流失重点治理区域。

关键词:输沙模数; 时空变化; 驱动因素; 嘉陵江

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)02-0116-06

Spatiotemporal Variation and Attribution Analysis of Sediment Load in Jialing River Basin

JIANG Meng¹, TIAN Peng^{1,2}, MU Xingmin^{1,3}, ZHAO Guangju^{1,3}

(1. *Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*; 2. *College of Nature Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*; 3. *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract: The variation of river sediment transport process is of great significance to the function of river system. Therefore, exploring the temporal and spatial changes of sediment transport and its driving factors in the Jialing River Basin plays an important guiding role in the further governance of the Jialing River Basin. Based on the measured rainfall and sediment transport data in the Jialing River Basin, the temporal and spatial variation characteristics of sediment transport were analyzed by Mann-Kendall trend test and Pettitt mutation test, and the double mass curve was used to quantitatively analyze the contribution rate of climate change and human activities to sediment transport change at hydrological sites in typical intervals. The results showed that: the overall trend of sediment transport modulus in each sub-basin of Jialing River Basin decreased; from 2007 to 2015, the sediment transport modulus in the Wudu—Bikou interval alone was as high as 3 323.48 t/(km² · a); from 1960 to 2015, the sediment transport volume of Beibei, Wusheng,

收稿日期: 2022-01-24

修回日期: 2022-02-21

资助项目: 国家科技基础资源调查项目“中国南北过渡带综合科学考察”(2017FY100904)

第一作者: 蒋蒙(1997—), 男, 内蒙古通辽人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail: MJ@nwfufu.edu.cn

通信作者: 田鹏(1982—), 女, 黑龙江佳木斯人, 博士, 副教授, 主要从事流域水沙过程研究。E-mail: pengtian@nwsuaf.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

Luoduxi and Xiaoheba stations in the typical interval showed a very significant downward trend, decreasing at the rates of 3.40×10^6 , 1.80×10^6 , 4.0×10^5 , 3.40×10^5 t/a, respectively, and the contribution rate of human activities to sediment reduction based on soil and water conservation and hydraulic engineering measures was 75.93%~96.43%, and the sediment transport sequence underwent very significant mutations in 1990, 1990, 1988 and 1984 respectively. The overall trend of the chronological sediment transport modulus of each sub-basin of the Jialing River Basin was decreasing, and the impact of the construction of multiple large control reservoirs on the main stream on the river sediment transport was particularly obvious, and the Wudu-Bikou interval should be regarded as the key control area of soil erosion in the future.

Keywords: sediment transport modulus; temporal and spatial variation; influencing factors; Jialing River Basin

河流输沙量是表征流域水土流失、河道整治及水土保持等的重要指标。近几十年来,受全球气候变化和人类活动加剧的影响,全球多数河流输沙量呈减少趋势,导致河流输沙时空分布与流域产沙输沙过程发生了显著的变化^[1-4]。严重的水土流失导致大量泥沙进入河道、湖库,进而在输移过程中发生沉积^[5],由此导致河床不断淤积抬升,给下游河道行洪带来巨大压力,同时严重缩短了下游的水利工程的使用寿命及安全运行^[6]。

嘉陵江流域是长江上游支流中流域面积最大、输沙量最大的支流,是长江上游的重点产沙区,也是三峡水库的主要泥沙来源区之一。19世纪60年代,嘉陵江流域输沙量发生了明显变化^[7]。Shao等^[8]通过对嘉陵江流域近60年来径流输沙资料分析,发现年径流量无明显突变趋势,而年输沙量则呈现显著下降趋势。高鹏等^[9]分析了嘉陵江流域出口的北碚站实测水沙序列变化,采用双累积曲线分析了气候与人类活动对输沙的影响,发现20世纪80年代后期至2008年,各年代人类活动减沙效益分别为46.2%,65.7%,83.9%,人类活动贡献不断增强。

较多的研究分析了流域出口水文站输沙变化及其驱动因素的影响,但鲜有研究根据流域水文站分布深入分析流域输沙空间分布及变化特征。因此,本研究在全面搜集嘉陵江流域水文站监测数据的基础上,系统分析1960—1987年、2007—2015年流域内输沙强度时空分异特征,探明流域输沙的空间变化,量化气候变化和人类活动对输沙的贡献,为嘉陵江流域水土流失治理提供科学依据。

1 研究区概况

嘉陵江是长江第二大支流,发源于陕西秦岭南麓($102^{\circ}30'$ — $109^{\circ}00'E$, $29^{\circ}40'$ — $34^{\circ}30'N$) (图1),流经陕西、甘肃、四川、重庆4省市,干流全长1119 km,流域面积约 1.6×10^5 km²,由渠江、涪江和嘉陵江3个支流组成,是三峡水库泥沙的主要来源地,来沙量

仅次于金沙江^[10]。流域内地质构造复杂,地貌类型多样,土壤类型主要有紫色土、黄壤土、冲积土、水稻土、潮土和红壤等。流域地处亚热带湿润季风气候区,多年平均降雨量为931 mm,年内降水主要集中在5—10月,占全年降水量的82%,多年平均最高气温和最低气温分别为19.4℃,4.3℃,多年平均日照时间为1450 h^[11]。截至20世纪80年代末,嘉陵江流域内已建成各类水库4542座,总库容 5.6×10^9 m³。

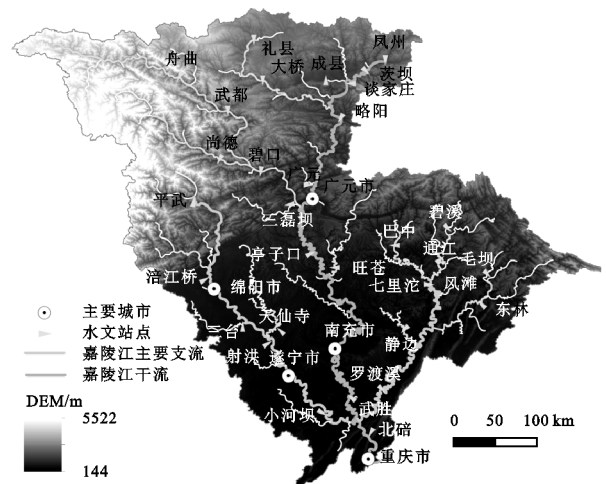


图1 嘉陵江流域概况

2 数据与方法

2.1 数据搜集与整理

本文收集并整理嘉陵江流域32个水文站年输沙监测数据,其中包括1960—2015年武胜、北碚、罗渡溪、小河坝4站,其余28个水文站为1960—1987年和2007—2015年,基于30 m分辨率的ASTER GDEM数字高程数据提取流域边界和水系并划分子流域,计算嘉陵江流域输沙模数。其中,DEM数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),输沙数据来源于《中华人民共和国水文年鉴》,降雨量数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),并采用泰森多边形法计算研究区内的平均降雨量。

2.2 研究方法

2.2.1 输沙模数计算 利用 ArcMap 10.2 进行河网提取,依据流域内水文站点将嘉陵江流域划分为 32 个子流域,根据选取水文控制站点的空间关系,计算每一块子流域的面积以及输沙量,从而得到流域内各区间各年代内的平均输沙模数(指在某一时间段内某区域的来沙量与对应集水区间的面积之比)来表示嘉陵江流域内各子流域不同时间段的输沙强度。

2.2.2 趋势及突变分析 本文采用 Mann-Kendall (M-K)趋势检验及 Pettitt 突变检验分析年输沙量变化趋势及突变年份。M-K 趋势检验通过建立统计量 Z 分析其趋势, $Z>0$ 序列呈上升趋势, $Z<0$ 呈下降趋势, $|Z|\geq 1.64$,2.32 分别表示通过了信度 95%,99%的显著性检验;Pettitt 突变检验利用输沙序列所对应秩序列构造统计检验量 S_k ,当 S_E 绝对值为该序列内最大值且大于临界 Pettitt 检验值 S_α ,则证明序列于第 E 年发生显著突变,已有较多研究介绍该方法^[12-13],本文不再赘述。

2.2.3 双累积曲线 双累积曲线^[14]是基于两个变量在直角坐标系中连续累积值的关系曲线,常用来反映流域水沙系统变化特征曲线,若关系曲线的斜率在某一点发生变化,则该点所对应的年份即为突变的时间,可用于定量区分气候变化和人类活动对流域水沙变化的影响。

3 结果与分析

3.1 1960—2015 年输沙强度时空变化特征

从图 2 可以看出,整体而言,1960—2015 年嘉陵

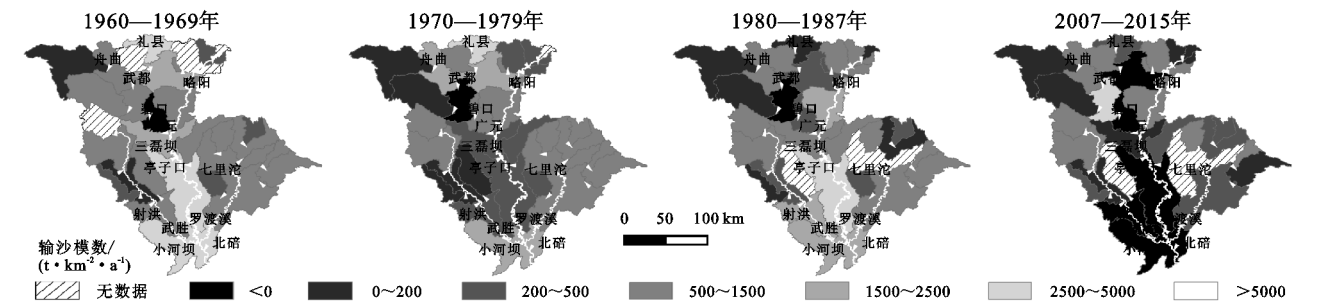


图 2 嘉陵江流域不同时段内的输沙模数时空变化分布

通过对比上述区间输沙模数的年代变化,所选取的 6 个输沙强度变化剧烈的典型区间及其年代输沙强度变化见图 3。武胜—北碚区间年代输沙强度由 1960—1969 年的 3 970.42 t/(km²·a)下降 51.03%,1980—1987 年同上一年代相差 13.35%,而后降为负值。亭子口—武胜区间 1960—1969 年输沙强度为 2 622.69 t/(km²·a),1970—1979 年与其相比降低了 92.23%,于 1980—1987 年增至 3 849.67 t/(km²·a),是 1970—1979 年的近 18 倍,而后降至负值。1960—1969 年,三磊坝—亭子口区间输沙强度为 2 167.05 t/(km²·a),

江流域输沙模数呈现减小趋势,尤其干流亭子口—北碚区间减少最为剧烈,该区间输沙模数虽于 1980—1987 年再次增加,但仍小于 1960—1969 年,两侧主要支流渠江、涪江流域上游输沙模数较为稳定。

就空间分布而言,1960—1969 年,上游支流及干流输沙强度较高,其中武胜—北碚、礼县以上、亭子口—武胜、广元—亭子口、大桥—略阳区间输沙强度分别为 3 970.42,3 469.56,2 622.69,2 167.05,1 829.69 t/(km²·a),碧口—三磊坝区间输沙模数为负值,其余子流域均低于 1 500 t/(km²·a)。1970—1979 年,西汉水与白龙江支流内及嘉陵江下游出口处输沙强度较高,其中礼县以上、舟曲—武都、武胜—北碚、大桥—略阳区间输沙强度分别为 2 525.88,1 933.38,1 944.18,1 752.50 t/(km²·a),武都—碧口区间输沙模数为负值,其余子流域均小于 1 200 t/(km²·a)。1980—1987 年,输沙强度较高子流域集中于干流,其中由高到低依次为亭子口—武胜、射洪—小河坝、武胜—北碚、略阳—广元区间,输沙模数分别为 3 849.67,1 946.62,1 645.72,1 511.79 t/(km²·a),武都—碧口区间输沙模数为负值,其余子流域均小于 1 400 t/(km²·a)。2007—2015 年,输沙强度相对较强的区域为干支流上游,其中亭子口—北碚区间、大桥—略阳区间输沙强度减弱为负值,2013 年武都—碧口区间输沙模数骤增至 3 318.97 t/(km²·a),进而导致该区间年代输沙模数高达 3 323.48 t/(km²·a),因此将该区间视为未来水土流失重点治理区域。

1970—1979 年已降低了 77.94%,于 1980—1987 年增至 1 179.54 t/(km²·a),2007—2015 年较 1980—1987 年降低 85.07%。武都—碧口区间输沙强度呈现减小趋势,1960—1969 年输沙强度为 1 206.49 t/(km²·a),1970—1979 年降为负值后继续减小,2007—2015 年骤增至 3 323.48 t/(km²·a),相比 1960—1969 年增长了 63.70%。射洪—小河坝区间输沙模数由 1960—1969 年的 846.85 t/(km²·a)减少 59.75%至 1970—1979 年的 340.82 t/(km²·a),于 1980—1987 年增至 1 946.62 t/(km²·a),相比 1970—1979 年增长 4.71 倍,而后降为

负值。七里沱—罗渡溪区间 1960—1969 年至 1970—1979 年输沙模数减幅为 1.72%,于 1980—1987 年增至 1 144.22 t/(km²·a),2007—2015 年已减少 73.29%。

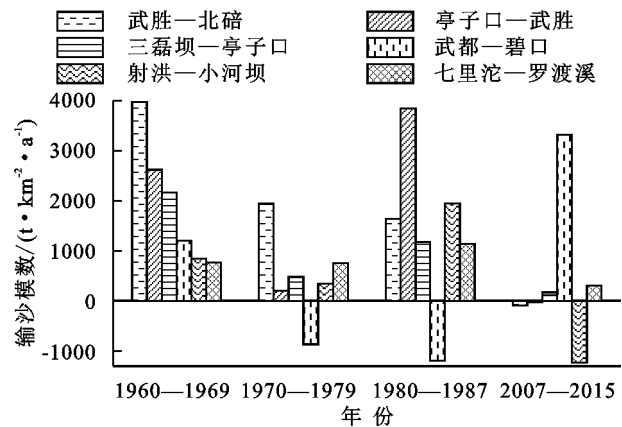


图 3 不同年代典型区间输沙强度变化

就其时空关系而言,1970—1979 年,除舟曲—武都区区间输沙模数增加外,白龙江流域其余区间输沙强度均降低,上游礼县—略阳区间仍维持前一年代输沙强度,但亭子口—武胜区间输沙模数却由 1960—1969 年的 2 622.69 t/(km²·a)降至 203.66 t/(km²·a),这表明白龙江流域输沙强度的减弱一定程度降低了干流的输沙强度。1980—1987 年,上游白龙江、西汉水流域各区间输沙模数已小于 1960—1979 年,但此时干流亭子口—武胜区间输沙模数却由 203.66 t/(km²·a)增至 3 849.67 t/(km²·a),这说明当上游支流输沙强度下降时,下游输沙强度将会增强。

典型区间输沙模数与出口站点输沙量相关性(表 1)表明输沙模数与该区间出口站点输沙量显著正相关,根据各区间输沙模数的计算关系及输沙模数出现负值的区间,选择对典型区间的北碚、武胜、罗渡溪、小河坝 4 个站点输沙量变化及其成因进行深入探究。

表 1 典型区间输沙模数与出口站点输沙量

Pearson 相关性分析

水文站	相关系数	水文站	相关系数
北碚	0.57**	小河坝	0.39*
武胜	0.61**	武都	0.15
罗渡溪	0.95**	碧口	0.92**

注:未标注即不显著;*表示信度达 0.05 水平,**表示信度达 0.01 水平。

3.2 典型区间输沙量变化特征

根据北碚站、武胜站、罗渡溪和小河坝 4 个水文站点的输沙量年际变化曲线(图 4)可知,1960—2015 年北碚站、武胜站、罗渡溪站、小河坝站年输沙量分别以 3.4×10⁶,1.8×10⁶,4.0×10⁵,3.4×10⁵ t/a 的速率减少。采用 M-K 趋势检验发现流域 4 个水文站的输沙量的统计值 Z 均为负值,且均小于-2.32,表明输

沙量极显著减少($p<0.01$)。

Pettitt 突变检验结果表明,北碚站、武胜站、罗渡溪站、小河坝站输沙过程分别极显著突变于 1990 年、1990 年、1988 年、1984 年(表 2)。输沙量不同时段的发展趋势变化见图 4,4 站影响期输沙序列变化趋势较基准期更为平稳,其中北碚、武胜、小河坝 3 站不同时段输沙量均呈下降趋势与总序列一致,但罗渡溪站却在 2 个时段内均呈上升趋势,其中 1960—1988 年上升趋势最为明显,1989—2015 年上升趋势较缓,两段时期输沙量平均值相差近 1.8×10⁷ t,以此抵消基准期的上升趋势,因此,罗渡溪站输沙量总序列的波动也较其他 3 个站点更为剧烈,呈现周期下降趋势。

表 2 1960—2015 年输沙量 M-K 趋势及 Pettitt 突变分析

水文站	趋势统计值(Z)	突变年份
北碚	-6.40**	1990**
武胜	-5.74**	1990**
罗渡溪	-2.90**	1988**
小河坝	-4.07**	1984**

注:未标注即不显著,*表示信度达 0.05 水平,**表示信度达 0.01 水平。

根据输沙实测值的年值变化(图 4)可知,20 世纪 80 年代初 4 个站输沙量均达到最大值,北碚、武胜、罗渡溪和小河坝 4 站的输沙量峰值分别为 3.56×10⁸ t(1981 年),2.03×10⁸ t(1981 年),6.7×10⁷ t(1984 年),9.2×10⁷ t(1981 年)。武胜站虽与北碚站相距较近,但输沙量峰值却与北碚站相差近 50%,这表明嘉陵江的泥沙来源不仅仅来源于干流,渠江和涪江泥沙贡献也占较大比例。

3.3 典型区间输沙量变化驱动因素分析

在气候变化和人类活动的影响下,嘉陵江流域呈现输沙模数时空分异显著及典型区域输沙量锐减等特征,为识别典型区间输沙变化的主要驱动因素,根据突变年份将 1960—2015 年分为基准期与人类活动影响变化期,并建立临界年份前后的输沙量-降水量双累积曲线拟合方程(图 5)。表 3 中不同时段实测值之差即为实测输沙变化量,不同时段实测值与计算值之差为降水影响量,同一时段实测输沙变化量与降水影响量的差值为人类活动影响量,其与实测输沙变化量的比值,即为人类活动的减沙效益。不同时段各站不同因素的减沙贡献中人类活动始终主导着输沙量的变化,其贡献由高到低依次为 96.43%(罗渡溪站),93.84%(北碚站),88.81%(武胜站)和 75.93%(小河坝站),由此可见,人类活动是这 4 站输沙量锐减的主要原因,也由此进一步减弱了亭子口—北碚区间的输沙强度。

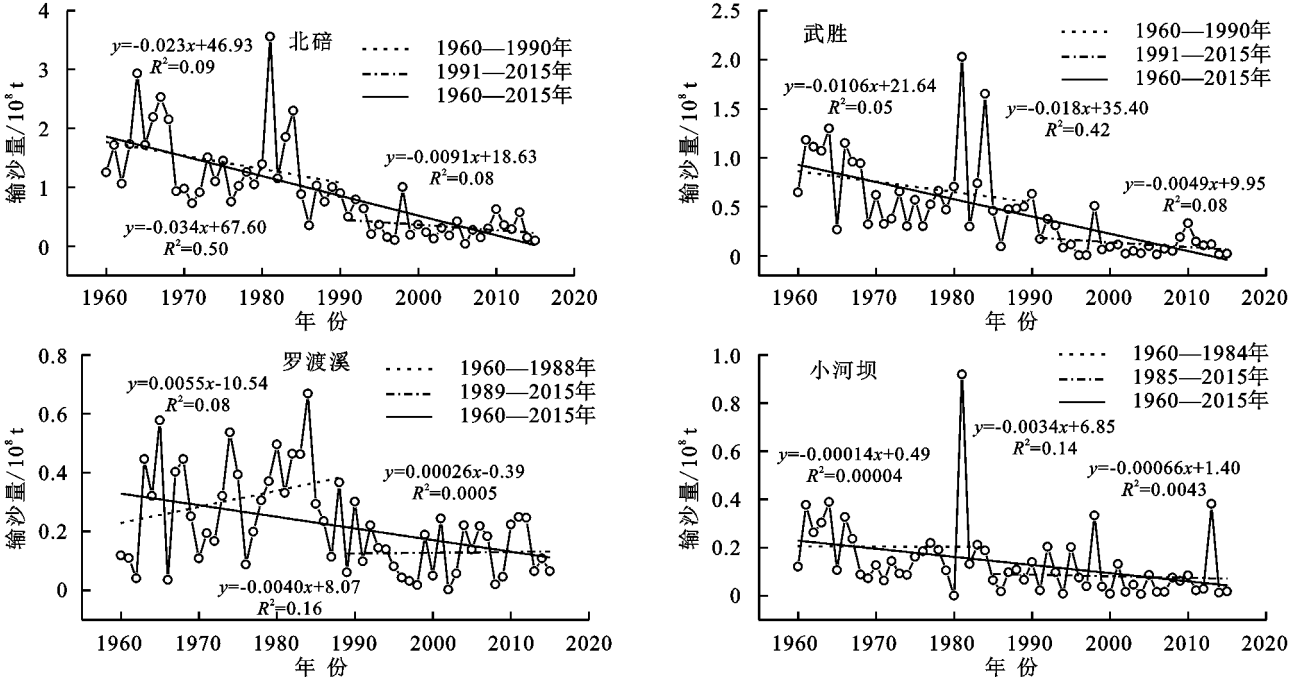


图 4 典型区间 4 个典型站点输沙量突变前后变化趋势

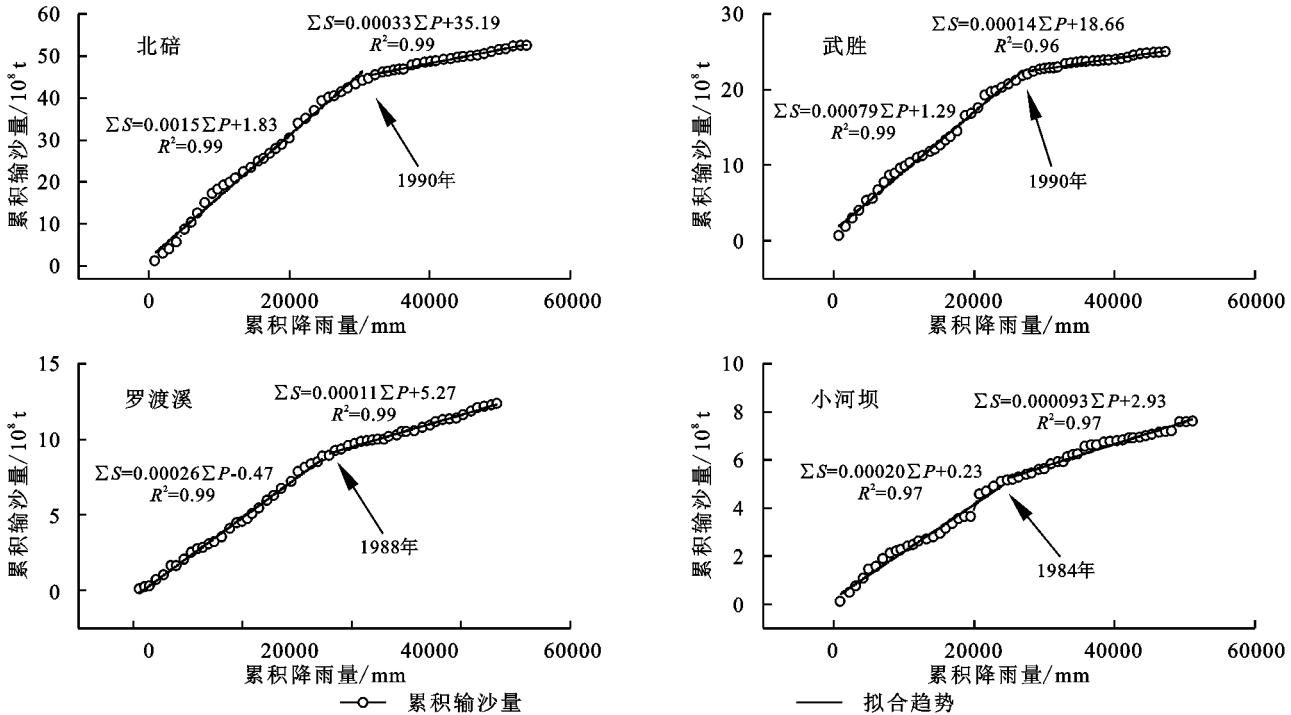


图 5 典型站点降雨量—输沙量双累积曲线

4 讨论

近几十年来,嘉陵江流域呈现出气温上升、降水减少且年内降水分配更为集中的趋势,流域水循环过程和区域水资源分配的显著变化^[15]。随着嘉陵江水土保持综合治理面积的增加,水利工程建设,上游生态环境恢复均对地表侵蚀、输沙产生较大的影响^[16]。因此,水土保持综合治理和水利工程建设是导致河流输沙锐减的主要因素之一。

河流输沙过程是气候变化与人类活动综合作用

的反映。在近些年来嘉陵江流域综合治理过程中发现,工程措施减蚀作用最为明显,超过 80%^[17]。雷孝章等^[18]在分析嘉陵江中下游区“长江上中游水土保持重点防治工程”效果时,发现不同水土保持措施中,坡改梯减沙效益最高,达 61.5 t/hm²,加之流域内建设数量众多的小型水利水保工程,坡面侵蚀与入河泥沙均发生显著减少。除此之外,嘉陵江流域内已建成各类水库 4 542 座,总库容 5.6×10⁹ m³,年淤积率约为 0.86%,即年均淤积泥沙约 4.81×10⁷ m³,合 6.25×10⁷ t。尤其碧口水库、升钟水库、宝珠寺水库、亭子

口水库等一批大中水利工程拦沙作用造成了亭子口以上区间的输沙量减小^[19-20],河道携沙减少,输沙强度降低,势必增加下游河道冲刷强度,反而致使输沙模数增加,因此亭子口—武胜区间输沙强度发生了剧

烈变化。而舟曲作为“5·12 地震”的重灾区之一,山体松动尚未恢复,于 2013 年发生“8·7 特大泥石流”,大量砂石汇入河道,因此 2007—2015 年武都—碧口区间输沙强度骤增。

表 3 典型区间站点输沙量变化归因分析

水文站	时段	实测值/ 10 ⁶ t	计算值/ 10 ⁶ t	实测输沙变化		降水影响		人类活动	
				变化量/10 ⁶ t	占比/%	变化量/10 ⁶ t	占比/%	变化量/10 ⁶ t	占比/%
北碚	1960—1990	142.36	157.22						
	1991—2015	31.54	135.54	110.83	70.49	6.82	6.16	104.00	93.84
武胜	1960—1990	68.34	74.59						
	1991—2015	11.77	62.02	56.57	75.84	6.33	11.19	50.24	88.81
罗渡溪	1960—1988	30.16	30.64						
	1989—2015	12.62	29.53	17.54	57.23	0.63	3.57	16.91	96.43
小河坝	1960—1984	19.91	20.76						
	1985—2015	7.89	17.01	12.01	57.87	2.89	24.07	9.12	75.93

伴随着“长江上中游水土保持重点防治工程”“天然林资源保护工程”“退耕还林(草)工程”等一系列生态工程的实施,全流域约有 69.5%的面积植被覆盖呈上升趋势^[21]。截至 2000 年底,嘉陵江流域水土流失治理面积已达 3.31×10⁴ km²。刘尚武等^[22]统计分析了三峡水库蓄水前后 1955—2002 年、2003—2012 年入库沙量特征,发现嘉陵江北碚站输沙占三峡入库沙量的比例已明显减小。

5 结 论

(1) 嘉陵江流域输沙强度具有显著的时空异质性,整体而言输沙强度 1960—2015 年呈减少趋势,其中,亭子口—武胜区间减少最为剧烈。随着上游白龙江、西汉水流域输沙强度降低,同时期内亭子口—武胜区间输沙强度将增强。1960—1969 年,亭子口—北碚区间输沙强度为不同时段内最强,达 3 970.42 t/(km²·a); 2007—2015 年,亭子口—北碚区间输沙强度降为负值,仅武都—碧口区间输沙模数高达 3 323.48 t/(km²·a),应视为未来水土流失重点治理区域。

(2) 典型区间内北碚、武胜、罗渡溪、小河坝 4 站 1960—2015 年输沙量呈极显著下降趋势,分别以 3.40×10⁶, 1.80×10⁶, 4.0×10⁵, 3.40×10⁵ t/a 的速率下降,于 1990 年、1990 年、1988 年、1984 年发生极显著突变。

(3) 输沙量-降水量双累积曲线拟合估算结果表明,人类活动是典型区间输沙量锐减的主要因素,减沙贡献率为 75.93%~96.43%,远高于降雨变化贡献。

本文研究发现嘉陵江流域近 50 余年来受水土保持综合治理和大型水利工程的影响,流域生态环境整体向好,河流输沙已发生显著减少,但西汉水、白龙江和涪江上游部分区域水土流失治理依然需要加强。本文针对人类活动对输沙的贡献分析不够深入,未来仍需探讨不同措施对输沙过程与减沙贡献的探究。

参考文献:

[1] Latrubesse E M, Arima E Y, Dunne T, et al. Damming the rivers of the Amazon basin[J]. Nature, 2017, 546 (7658): 363-369.

[2] Darby S E, Hackney C R, Leyland J, et al. Fluvial sediment supply to a mega-delta reduced by shifting tropical-cyclone activity[J]. Nature, 2016, 539(7628): 276-279.

[3] Meade R H, Moody J A. Causes for the decline of suspended-sediment discharge in the Mississippi River system, 1940—2007[J]. Hydrological Processes, 2010, 24 (1): 35-49.

[4] Wang H, Xiao W, Bi N, et al. Impacts of the dam-orientated water-sediment regulation scheme on the lower reaches and delta of the Yellow River (Huanghe): A review[J]. Global and Planetary Change, 2017, 157: 93-113.

[5] Yang S L, Milliman J D, Xu K H, et al. Downstream sedimentary and geomorphic impacts of the Three Gorges Dam on the Yangtze River[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 138: 469-486.

[6] 颜明,贺莉,王彦君,等.1950—2015 年黄河下游河道排洪输沙时空演变[J].水土保持研究,2019,26(4): 1-6,12.

[7] 李怡颖,范继辉,廖莹.近 60 年来嘉陵江流域水沙变化特征[J].山地学报,2020,38(3): 339-348.

[8] Shao Y, Mu X, He Y, et al. Variations in runoff, sediment load, and their relationship for a major sediment source area of the Jialing River basin, southern China [J]. Hydrological Processes, 2021, 35(7): e14297.

[9] 高鹏,穆兴民,王伟.长江支流嘉陵江水沙变化趋势及其驱动因素分析[J].水土保持研究,2010,17(4): 57-61,66.

[10] 胡云华,冯精金,王铭峰,等.气候及下垫面变化对嘉陵江流域径流与输沙的影响[J].中国水土保持科学, 2016, 14(4): 75-83.

[11] 李进林,韦杰.嘉陵江流域水系形态特征与侵蚀产沙响应[J].水土保持研究,2016,23(5): 7-13.

- 变化情势分析[J].气象与环境科学,2009,32(2):1-6.
- [7] 赵广举,穆兴民,田鹏,等.近60年黄河中游水沙变化趋势及其影响因素分析[J].资源科学,2012,34(6):1070-1078.
- [8] 胡春宏,张晓明,赵阳.黄河泥沙百年演变特征与近期波动变化成因解析[J].水科学进展,2020,31(5):725-733.
- [9] 冯家豪,赵广举,穆兴民,等.黄河中游区间干支流径流变化特征与归因分析[J].水力发电学报,2020,39(8):90-103.
- [10] 薛彩琴.北洛河流域水资源管理调度工作形势与对策[J].陕西水利,2011(5):40-42.
- [11] 董起广,周维博,刘雷,等.北洛河径流量变化特征分析[J].人民黄河,2014,36(2):20-29.
- [12] 古明兴.北洛河流域水沙演变情势分析[J].水资源与水利工程学报,2008,19(5):120-122.
- [13] 蒋观滔,高鹏,穆兴民,等.退耕还林(草)对北洛河上游水沙变化的影响[J].水土保持研究,2015,22(6):1-6.
- [14] 张亨亭,张建军,郭敏杰,等.北洛河流域不同地貌和植被类型区径流演变特征及控制因素[J].水土保持学报,2014,28(4):78-84.
- [15] 吴琳娜,杨胜天,刘晓燕,等.1976年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的影响[J].地理学报,2014,69(1):54-63.
- [16] Weber, Kenneth, Stewart, et al. A critical analysis of the cumulative rainfall departure concept[J]. Ground Water, 2004,42(6):935-938.
- [17] Mann H B. Nonparametric test against trend [J]. Econometrica, 1945,13(3):245-259.
- [18] Kendall M G. Rank correlation methods[J]. British Journal of Psychology, 1990,25(1):86-91.
- [19] 樊晶晶,黄强,刘登峰,等.人类活动和气候变化对北洛河径流变化的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2016,44(2):221-234.
- [20] Morlet J. Wave propagation and sampling theory[J]. Geophysics, 1982,47:203-236.
- [21] 王文圣,丁晶,向红莲.水文时间序列多时间尺度分析的小波变换法[J].四川大学:学报工程科学版,2002,34(6):14-17.
- [22] 衡彤.小波分析及其应用研究[D].成都:四川大学,2003.
- [23] 穆兴民,张秀勤,高鹏,等.双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J].水文,2010,30(4):47-51.
- [24] 冉大川,刘斌,付良勇,等.双累积曲线计算水土保持减水减沙效益方法探讨[J].人民黄河,1996,18(6):24-25.
- [25] 张连鹏,刘登峰,张鸿雪,等.气候变化和人类活动对北洛河径流的影响[J].水力发电学报,2016,35(7):55-66.
- [26] 赫晓慧,郑紫瑞,高亚军.降水和人类活动对北洛河径流变化的定量化研究[J].水土保持研究,2017,24(3):125-129.
- [27] Tang C, Crosby B T, Wheaton J M, et al. Assessing streamflow sensitivity to temperature increases in the Salmon River Basin, Idaho[J]. Global & Planetary Change, 2012,88/89:32-44.
- [28] 邓振镛,张强,王润元,等.河西内陆河径流对气候变化的响应及其流域适应性水资源管理研究[J].冰川冻土,2013,35(5):1267-1275.
- [29] 黄河水资源保护科学研究院.北洛河流域综合规划环境影响报告书[R].郑州:黄河水资源保护科学研究院,2015.
- [30] 张建云,王国庆,贺瑞敏,等.黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应[J].水科学进展,2009,20(2):153-158.
- [31] 何亮.1980—2019年北洛河流域土地利用和土地覆被变化分析[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [32] 秦伟,朱清科,刘广全,等.北洛河上游生态建设的水沙调控效应[J].水利学报,2010,41(11):1325-1332.
- [33] 陈攻君,穆兴民,高鹏,等.北洛河上游径流变化特征及其驱动因素研究[J].中国水土保持科学,2018,16(6):1-8.

~~~~~

(上接第121页)

- [12] Kendall M G. Rank correlation methods[J]. British Journal of Psychology, 1990,25(1):86-91.
- [13] Mann H B. Nonparametric test against trend[J]. Econometrica, 1945,13(3):245-259.
- [14] 田小靖,赵广举,穆兴民,等.水文序列突变点识别方法比较研究[J].泥沙研究,2019,44(2):33-40.
- [15] 孟铖铖.嘉陵江流域径流时空变化特征及其驱动因素研究[D].北京:北京林业大学,2019.
- [16] 刘孝盈.嘉陵江流域不同尺度水土保持减沙效果研究[D].北京:北京林业大学,2008.
- [17] 黄双喜,石国钰,许全喜.嘉陵江流域水保措施蓄水减蚀指标研究[J].水土保持学报,2002,16(5):38-42.
- [18] 雷孝章,曹叔尤,戴华龙,等.川中丘陵区“长治”工程的减沙效益研究[J].泥沙研究,2003(1):52-58.
- [19] 戴明龙,张明波,叶莉莉.长江流域典型河流水沙过程变异研究[J].水文,2009,29(2):55-58.
- [20] 白桦,穆兴民,高鹏,等.嘉陵江流域降水及径流演变规律分析[J].水土保持研究,2012,19(1):102-106.
- [21] 刘洪鹄,张平仑,刘宪春,等.嘉陵江流域植被覆盖时空变化特征[J].长江流域资源与环境,2011,20(1):111-115.
- [22] 刘尚武,张鹏,苗蔚,等.嘉陵江不同区域场次洪水输沙规律[J].水科学进展,2022,33(1):38-47.