

嘉陵江流域泥沙输移量变化影响因素分析

郑艳霞¹, 陈步青²

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010; 2. 嘉兴市水利水电勘察设计院, 浙江 嘉兴 314033)

摘要:影响嘉陵江流域悬移质水沙输移的因素众多,且不同规模的河流水沙输移量级差异很大。采用水沙经验关系幂函数公式、多元回归分析和主成分分析法,基于流域内 12 个代表性水文站长序列日平均水沙、气象数据以及 GIS 技术等,分析得到了该流域在天然状态下和受水库拦沙作用后的水沙输移关键影响因子和相互关系。通过参数敏感度计算,揭示了不同因素对该流域水沙输移的影响程度和机理,为未来流域产流产沙的变化趋势研究提供科学参考依据。

关键词:水沙关系式;多元回归;主成分分析法;悬移质输沙量;嘉陵江流域

中图法分类号: T14

文献标志码: A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.21.010

1 研究背景

嘉陵江发源于陕西秦岭南麓,流经陕西、甘肃、四川 3 省,于重庆市汇入长江,干流全长 1 120 km,流域面积约 16 万 km²,属典型的树枝状水系。嘉陵江是长江的一条重点产沙河流,其含沙量居众支流之首,来沙量仅次于金沙江。嘉陵江泥沙有 2/3 以上来自支流,干流区间来沙量不足 1/3。支流来沙量较多的有西汉水、白龙江、渠江和涪江 4 条河流,但其中渠江和涪江河长面广水量大,含沙量并不大。位于嘉陵江上游的西汉水和白龙江是该流域的重点产沙区,流域面积约为 4.2 万 km²,这两条河水少沙多,含沙量高,其中又以西汉水含沙量为最大。按 1950~1979 年的资料统计,嘉陵江流域面积只占长江上游的 15.5%,其径流量占长江上游的 14.7%,但来沙量占长江上游的 30.5%。控制嘉陵江水土流失,对减少三峡库区的淤积、保持水库库容的长期使用具有重要意义^[1]。近年来,嘉陵江输沙量明显减少,年均输沙量减少到约 9 850 万 t^[2],亭子口、紫兰坝、宝珠寺等水库的兴建使大量泥沙淤积在水库内,加之嘉陵江干、支流航电枢纽的拦沙和径流偏少等因素,年均输沙量进一步减少到 2003~2012 年的 2 920 万 t。本文以嘉陵江流域水文

站监测数据为基础,对该流域在受人为干扰(修建水库)之前的自然状态下(1980 年以前)的悬移质长期输沙率变化趋势和修建水库拦沙后的输沙减少趋势(1980 年以后)进行分析。嘉陵江流域水系及水文站网见图 1^[2]。

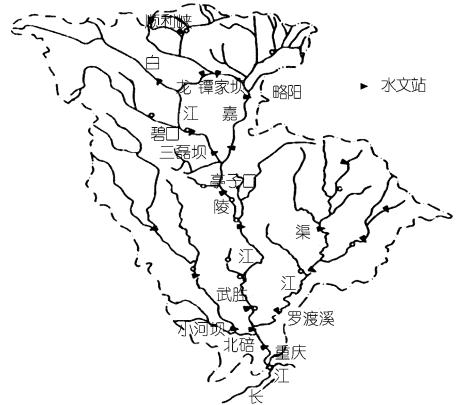


图 1 嘉陵江流域水系及主要水文站网示意

影响嘉陵江流域水沙输移的因素众多而且复杂,在悬移质输沙量的研究方面,许炯心等采用经验法分析人类活动和降水变化对嘉陵江流域侵蚀产沙的影响,分基准期(1956~1982 年)和措施期(1983~2000 年)分别建立了流域产沙量与年降水的指数方程^[3]。

戴明龙等采用双累积曲线法分析水沙地区组成、含沙量等的年内变化分析,揭示了嘉陵江流域的水沙变异过程规律^[4]。高鹏等采用历时曲线和双累积曲线两种方法量化了嘉陵江流域径流量和输沙量的减少量^[5]。以上方法均为目前常用的水沙径流输移趋势分析方法,缺乏影响因子定量分析和机理方面的分析。

师长兴选取高程、降雨、土地利用和土壤类型等数据,计算出通用土壤流失方程中代表影响侵蚀产沙的各因子,选取长江上游 268 个水文站实测数据,建立了这些因子和流域面积与流域输沙模数回归关系,探讨了流域侵蚀输沙的尺度效应^[6]。J. P. Syviski 等选取了世界范围内的 57 条不同尺度河流的水文站数据(其中中国地区仅包括金沙江屏山水文站),根据水文站的经度、纬度、流域面积、流量和输沙率等 15 个流域特性物理量,分析了影响流域水沙输移的主要影响因子和定量关系^[7]。可见,选取尽可能多的影响流域产沙输沙的因子,并建立其相互之间的定量关系是研究流域水沙侵蚀输移的研究方向。

以上研究都是着眼于流域泥沙输移的时空变化,对泥沙输移量进行了变化趋势分析,但是对悬移质泥沙输移的自然物理机理和年内年际波动规律(未受明显的人类活动干扰)还需要深入了解,为分析修建水库等人类干扰后的水沙输移变化趋势奠定基础。本文将基于水文、气象数据分析以及多元回归和主成分分析法(PCA),以嘉陵江流域内有代表性的 12 个水文站的水文、气象数据和流域地形数据分析参数为基础,分析嘉陵江流域地貌地质条件、气象因子、水库拦沙等因素对输沙的影响。

2 研究方法

2.1 水沙经验关系参数拟合

悬移质泥沙输移受到很多因素的影响,包括:季节性径流变化、流域下垫面条件、人类活动干扰、洪水期河床冲刷以及枯水期泥沙沉积等,所以流域内不同尺度河流的悬移质输沙量级悬殊很大。目前,描述水沙输移关系的方法均采用幂函数形式:

$$C_s = aQ^b \quad (1)$$

$$Q_s = aQ^c \quad (2)$$

式中, C_s 为悬移质泥沙浓度, kg/m^3 ; Q 为流量, m^3/s ; Q_s 为悬移质输沙率, kg/s ; a 为系数, b, c 为指数, $c = b + 1$ 。

本文将利用式(2)对嘉陵江流域武胜、北碚、罗渡溪、小河坝、武都、碧口、三磊坝、顺利峡、东林、谭家坝、略阳和亭子口等 12 个水文站的水文气象数据进行拟

合,得到参数 a 和 c 的年际变化值,并统计嘉陵江流域近年的气象数据(包括气温和降雨量),利用 DEM 数据(来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站)和 ArcGIS9.0 软件,计算得到嘉陵江流域的地貌特征参数,如子流域落差、坡度等基本地形因子。

此外,由于洪水脉冲(非恒定流量过程)对河流输沙过程影响很大,还选择另外 2 个影响悬移质输沙的重要参数:较大流量持续时间 FD 和年最大流量与年平均流量之比 PFA ,其计算式如下:

$$FD = T_{Fi}/T_s \quad (3)$$

$$PFA = \overline{Q_p}/\overline{Q} \quad (4)$$

式中, T_{Fi} 为当日流量大于 $1/2$ 年平均流量的天数, d ; T_s 为统计时段内的天数, d ; $\overline{Q_p}$ 为最大洪峰流量多年平均值, m^3/s ; \overline{Q} 为多年平均流量, m^3/s 。

2.2 主成分分析法

主成分分析是将多个指标化为少数相互无关的综合指标的统计方法。将 p 个指标做线性组合,作为新的综合指标,记第一个综合指标为 $F1$,选取这个线性组合的原则是 $\text{Var}(F1)$,即 $F1$ 的方差最大, $F1$ 就是第一主成分,依此类推,构造余下的主成分^[8-9]。

3 分析过程及结果

3.1 水沙关系参数及水沙输移变化

选取嘉陵江干流控制水文站——武胜站 1960 ~ 2012 年实测日均流量和含沙量数据,采用式(1)拟合得到参数 a 和 b 的年均值。由图 2 可知,嘉陵江干流水沙输移可大致以 1980 年为界分为两个阶段,1980 年后受上游干、支流水库拦沙作用等影响,输(含)沙量均呈明显减小。1980 年以前,经验关系参数 $\ln a$ 和 b 分别处于下降和增加的趋势,1980 年后则受水库拦沙作用后分别进入增加和下降的过程。

河流的水沙经验关系式的系数 a 和指数 b 的月内变化主要是受到气候因素的影响,比如干旱、暴雨和季风等。系数 a 和指数 b 的季节性变化反映水源和沙源的不同,其年际变化一般是受到气候变化或一些极端事件(如长期的干旱或大洪水)或者流域内人类干扰(如修建水坝、修路等)的影响。已有研究表明:对于干旱地区的河流,系数 a 的值较大(100 ~ 80 000),而指数 b 的值较低(0.2 ~ 0.7);在湿润地区的河流,系数 a 的值在 0.004 ~ 40 之间,指数 b 在 1.4 ~ 2.5 之间,指数 b 随着水源不同而变化。图 2 表明,嘉陵江流域数据拟合的 b 值在 1 ~ 3 之间,表明该流域属于湿润地区, b 值的下降表明水沙输移过程越来越集中,而 a 值

的物理意义还需要进一步深入研究。

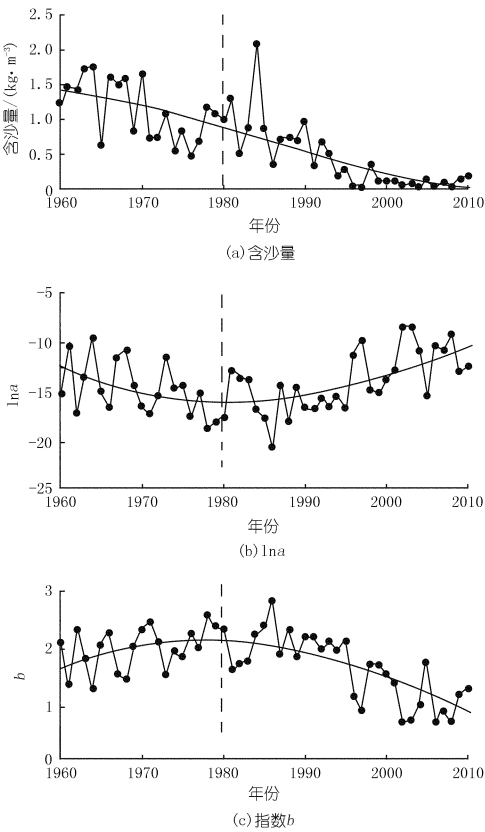


图 2 武胜站水沙径流分析参数变化 (1960 ~ 2012 年)

3.2 拟合参数分析和主成分分析

采用主成分分析法分析经验关系式的系数 a 与指数 b 与相关因子的相关性,见图 3。指数 b 与 $\ln a$ 之间存在显著的负相关性,且越接近流域出口, c 与 $\ln a$ 的拟合直线越向左下方偏移,即 b 与 $\ln a$ 值减小,表明受水库拦沙作用越明显。受河床冲淤演变调整、区间来水来沙和人类活动干扰(修建水坝),河流的水沙输移达到相对平衡,水沙关系参数变化不大。

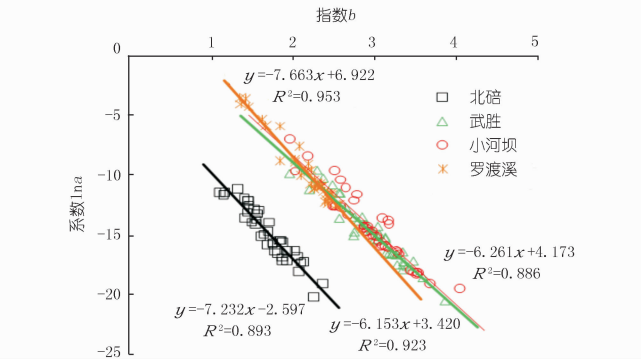


图 3 水沙关系参数 b 与 $\ln a$ 的关系拟合

表 1 说明,流量、集水面积、河道落差和气温、降雨量是嘉陵江泥沙变化的重要因子。随着集水面积的增大,流域内的地质条件和气候等区域差异性也随之增

大,水沙输移特性之间的差别也越大。

表 1 影响因子相关关系矩阵

相关关系 系数	$\ln Area$	$\ln Q$	$\ln Q_s$	落差	气温	降雨量	b	$\ln a$	FD	PFA
$\ln Area$	1.000									
$\ln Q$	0.875	1.000								
$\ln Q_s$	0.891	0.930	1.000							
落差	0.121	0.197	0.188	1.000						
气温	0.724	0.629	0.526	0.057	1.000					
降雨量	0.566	0.650	0.475	0.370	0.632	1.000				
b	0.585	0.524	0.499	0.167	0.614	0.655	1.000			
$\ln a$	-0.625	-0.526	-0.574	-0.254	-0.562	-0.486	-0.854	1.000		
FD	-0.130	-0.265	-0.211	-0.009	-0.314	-0.151	0.037	-0.224	1.000	
PFA	0.175	0.295	0.134	-0.054	0.315	0.367	0.181	0.225	-0.797	1.000

3.3 流域影响因子分析

武都、碧口和三磊坝站均位于嘉陵江上游主要产沙区——白龙江流域,用线性拟合的方法对 3 个水文站的统计数据分析表明,流量大小 (b) 和洪水过程指数 (PFA) 对其输沙量影响最为明显。从多年统计来看,位于碧口水库下游、武都与三磊坝站之间的碧口站输沙量明显小于武都、三磊坝站。由于碧口、宝珠寺水电站的拦沙作用,碧口年均含沙量较武都站减小了 56%,而位于最下游的三磊坝站则较武都站减小了 44%。

位于嘉陵江上游干流的顺利峡、谭家坝、略阳和亭子口站实测资料分析表明,流域落差、 FD 和 PFA 对输沙量影响最为明显。嘉陵江上游地区主要受流域下垫面条件影响,上游地区植被覆盖面积较少,含沙量受单次洪水的影响非常大。该区域降水虽少,但是由于山区丘陵、植被覆盖不足,水力侵蚀较为严重。

干流武胜站水沙数据分析表明,近年年均含沙量持续下降,输沙率标准差也不断下降,表明上游干、支流水库的建成使用,使其水、沙过程年内变化幅度有所减小,造成指数 b 向左偏移(减小),洪水特征参数则无明显改变,表明在嘉陵江干流人类干扰对洪水的影响较小。

从嘉陵江流域出口水文控制站——北碚站 1960 ~ 2011 年(1974 年和 1979 年资料缺失)中历年 4 ~ 11 月平均含沙量变化来看(见图 4),嘉陵江流域含沙量呈现明显下降趋势,从 1999 年起年平均含沙量都低于 0.2 kg/m^3 。

由上分析可知,随着流域集水面积的增大,不同产沙区域的地质地貌、气候(降雨、气温)等对输沙量影响的差异性也随之增大。但当河流上修建较大水库时,水库拦沙将对河流水沙输移过程和输沙量产生显

著影响。

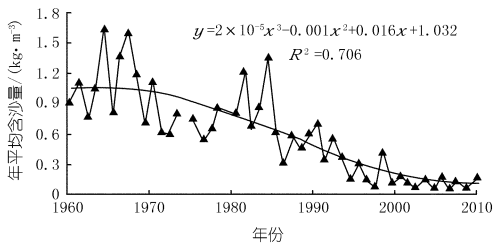


图 4 嘉陵江北碛站年平均含沙量

4 结论

本文基于嘉陵江流域内的 12 个水文站的水沙、气象数据,并采用 GIS 技术分析地貌特征参数,结合多元回归及主成分分析法对输沙量变化特征作了分析,可以得到以下几点结论。

(1) 嘉陵江流域产输沙条件十分复杂。随着流域集水面积的增大,不同产沙区域的地质地貌、气候(降雨、气温)等对输沙量影响的差异性也随之增大。1980 年以来,干、支流水库对水沙径流的调节,使水沙过程更为集中。

(2) 嘉陵江上游地区主要受 PFA 影响很大,洪水次数多会导致输沙量明显增大;下游则主要受水库拦

沙影响,水沙变化过程波幅减小,但洪水集中输沙特征无明显改变,且越靠近流域出口,趋势愈加明显。

参考文献:

- [1] 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,(4):420-426.
- [2] 马炼,张明波,郭海晋,等.嘉陵江流域水土保持前后沿程水沙变化研究[J].水文,2002,22(1):27-31.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 高鹏,穆兴民,王炜.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,(4):57-62.
- [6] 师长兴.长江上游输沙尺度效应研究[J].地理研究,2008,(4):800-810.
- [7] Syvitski J P, Morehead M D, Bahr D B, et al. Estimating fluvial sediment transport: The rating parameters [J]. Water Resources Research, 36(9):2747-2760.
- [8] 罗应婷,杨钰娟. SPSS 统计分析 [M]. 北京:电子工业出版社,2011.
- [9] Morehead M D, James P. Modeling the temporal variability in the flux of sediment from ungauged river basins [J]. Global and Planetary Change, 2003, (39):95-110.

(编辑:李慧)

Analysis of influential factors of variation trend of sediment transport of Jialing River Watershed

ZHENG Yanxia¹, CHEN Buqing²

(1. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China; 2. Water Resources & Hydroelectric Prospecting & Design Research Institute of Jiaying City, Jiaying 314033, China)

Abstract: The sediment transport in Jialing River Watershed is influenced by many factors, the runoff and sediment transport of different scale rivers varies significantly. The empirical power function formula of runoff and suspended sediment and the multi-regression and Principal Component Analysis (PCA) were used to analyze the key factors of runoff and suspended sediment transport and the relationship among them, in the natural condition and the condition after the sedimentation interception by reservoir respectively, on the basis of daily hydrologic and meteorological data of 12 stations in Jialing River Watershed. The research discovered the influential degree of various factors on runoff and suspended sediment transport and the mechanism, which can provide information for assessing the long-term suspended sediment varying trend of Jialing River Watershed in the future.

Key words: empirical formula of runoff and suspended sediment; multi-regression; Principal Component Analysis (PCA); suspend sediment transport amount; Jialing River Watershed