

金沙江流域水沙变化及其驱动机制

柳宏才¹, 张会兰^{1,2}, 夏绍钦¹, 庞建壮¹

(1.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2.重庆缙云三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站, 重庆 400711)

摘要:为了探究金沙江流域控制水文站屏山站水沙序列的趋势及突变特性,量化不同驱动因素对水沙变化的贡献。基于金沙江流域 1954—2016 年径流和输沙数据,从长时期及场次事件两个角度揭示了水沙关系的动态变化特征。结果表明:(1) 63 年间,径流量年均变化速率为 $-1.16 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$;输沙量年均变化速率为 $-2.0 \times 10^8 \text{ t/a}$;1998 年长江流域发生特大洪水,水沙序列在该年发生突变;(2) 水沙关系的特征参数 a 值在 1998 年前后由上升改为下降趋势,退耕等坡面水保措施在 1998 年后发挥了重要作用; b 值始终下降,河道影响因素始终发挥减沙作用;在场次降雨尺度上,流域径流-悬移质泥沙环路(C-Q 环路)以顺时针针形环路为主,表明坡面泥沙物源充足,是影响流域产沙的重要因素;(3) 流域内降水、温度及 NDVI 与径流和输沙之间有明显的相关性,人类活动与降水因素对径流量的贡献比为 $-1:2$,而输沙量主要受人类活动影响,对应的贡献比为 $-6:1$ 。综上,金沙江流域 63 年间的径流输沙受多种因素综合影响,径流量的变化主要由于降水的变化,输沙量受人类活动影响更大。

关键词:金沙江流域;水沙序列;水沙关系

中图分类号:P333.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)02-0107-09

Runoff and Sediment Discharge Variations and Corresponding Driving Mechanism in Jinsha River Basin

LIU Hongcai¹, ZHANG Huilan^{1,2}, XIA Shaoqin¹, PANG Jianzhuang¹

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2.Three-Gorges Reservoir Area (Chongqing) Forest Ecosystem Research Station, Chongqing 400711, China)

Abstract: The relationship between runoff and sediment discharge in Jinsha River basin has undergone remarkable variations over recent years, which played significantly role in regional ecological sustainable development and the control of water and sediment in the upper reaches of the Yangtze River. To investigate the trend and abrupt characteristics of runoff and sediment discharge sequences at the controlled hydrological station-Pingshan Station, and to quantify the contribution rates of different driving factors on runoff and sediment discharge, this study carried out statistical analyses on the records of runoff and sediment discharge during 1954 and 2016, and presented the dynamic variations of runoff and sediment discharge relationships from perspectives of long-term observations and shor-term events. The results showed that: (1) during the 63 years, the average annual change rate of runoff was -116 million m^3 , the average annual change rate of sediment discharge was $-0.02 \text{ billion tons}$; a catastrophic flood occurred in the Yangtze River Basin in 1998, and the turning point of runoff and sediment sequence occurred in that year; (2) the featured parameter a value of the runoff-sediment discharge relationship changed from increasing trend to decreasing trend in the abrupt year 1998, which was potentially due to the Returning Rarmland to Forest Project after 1998; the featrued b value presented decreasing trends for both time stages, exhibiting the import role of river channels

收稿日期:2021-11-18

修回日期:2022-01-15

资助项目:西南高山峡谷区水土流失综合治理技术与示范(2022YFF130009505);国家自然科学基金(51309006);国家重大水利资助项目三峡工程泥沙重大问题研究课题(12610100000018J129-01)

第一作者:柳宏才(1999—),男,甘肃平凉人,硕士,研究方向为流域水沙过程。E-mail:1780377405@qq.com

通信作者:张会兰(1984—),女,河北保定人,博士,教授,主要从事流域水沙过程和流域水文研究。E-mail:zhanghl@bjfu.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

played on sediment reduction; on the rainfall event scale, the runoff-suspended sediment loop (C-Q loop) presented mainly clockwise type, indicating sufficient sediment source from the slope; (3) precipitation, temperature and NDVI showed obvious correlation with runoff and sediment discharge sequences; precipitation played dominate role in runoff, and the contribution ratio of human activities and precipitation on runoff is $-1:2$, while the contribution ratio on sediment discharge is $-6:1$. In summary, the runoff and sediment transport of the Jinsha River Basin in 63 years were comprehensively affected by a variety of factors. The change of runoff was mainly due to the change of precipitation, and the sediment transport was more affected by human activities.

Keywords: Jinsha River Basin; runoff-sediment discharge sequence; runoff-sediment relationship

河流系统是受到多方面因素共同影响的复杂动态系统^[1],水沙关系是水沙研究中最关键的问题,为河道泥沙沉积与输移以及土壤侵蚀提供重要信息^[2-4]。气候因素中降水的影响最为显著,表现在降水强度、降水历时等对入渗、汇流等水文过程的影响,进而引起侵蚀和输沙过程的改变;人类活动主要通过水土保持工程、植被覆盖等拦蓄地表径流、减少土壤侵蚀,而水库等建筑工程亦可调控河道水沙关系^[5]。泥沙输移过程的定量分析和归因研究,对探究泥沙时空演变规律至关重要。

水沙关系是反映流域水沙变化特征的重要方面。张冠华等^[6]用线性倾向估计法和 Mann-Kendall 趋势检验法分析了水沙序列的趋势性,王渺林等^[7]用累积距平方法将金沙江流域石鼓和屏山站径流量和输沙量的变化情况进行了阶段性划分;万晓丹等^[8]通过绘制水沙关系曲线指出皇甫川流域径流深和输沙模数存在较好的线性关系;Fan 等^[9]对不同洪水事件中的水沙关系 (Concentration-Discharge, C-Q) 环路特征进行了探究;史霏雨等^[10]采用 Kriging 插值及小波分析等方法,指出金沙江流域年及四季平均气温呈显著性上升趋势;刘强等^[11]应用水文分析法定量评估了降水变化和人类活动对皇甫川流域径流量和输沙量变化的贡献率,采用输沙归因诊断分析判断了降水、产流能力和产沙能力在皇甫川输沙量比例变化率上的贡献。以上研究对系统分析流域水沙资源特征、有效指导水沙调控及实现流域水沙资源可持续发展具有重要指导意义。

金沙江作为长江上游区域,其径流变化对整个长江流域水资源的分布有重要影响。近年来,气候变化和人类活动的影响愈演愈烈,金沙江流域的年径流量随之发生了改变^[12]。金沙江作为长期以来三峡入库泥沙的最主要来源地之一^[13-14],近年来,在人类活动和气候变化的共同影响下,金沙江来沙量占寸滩站沙量的比重大幅减小,其他支流则有所增大^[15]。然而,

该流域水沙序列的动态变化规律以及水沙关系的驱动机制并不清晰。因此,本研究将采用长时间序列水沙资料,对流域径流输沙的演变规律进行分析,并量化不同驱动因素对水沙变化的贡献。研究可为长江上游流域水沙资源管理提供科学依据。

1 研究区概况

金沙江位于长江上游流域(90° — 105°E , 24° — 36°N),流域面积 $4.586 \times 10^5 \text{ km}^2$,约占长江流域面积 26.3%,发源地位于青海省唐古拉山主峰东北部的一座无名山^[14],流域内地形复杂,由于谷深坡陡,上下落差较大,金沙江两岸常有滑坡、崩塌、泻溜等情况发生。金沙江右岸支流小江流域是中国暴雨型泥石流集中发育的地区之一。金沙江流域尤其是下段的植被演变过程关乎长江流域生态安全。1998 年起金沙江流域植被恢复情况取得巨大进展,长江特大洪水事件后,金沙江中下开展了天然林保护工程(“天保”工程),以及 1999 年开始的“退耕还林”工程建设对金沙江流域的植被恢复均产生积极影响^[16]。金沙江多年平均流量 $4\,750 \text{ m}^3/\text{s}$,其年降水量、年径流量以及年输沙量均集中在汛期 6—10 月。实测年最大径流量为屏山站 $1.952 \times 10^{11} \text{ m}^3$ (1954 年),最小径流量为石鼓站 $2.9 \times 10^9 \text{ m}^3$ (1959 年)。屏山站多年平均年输沙量为 $2.55 \times 10^8 \text{ t}$,1974 年输沙量达到最大值 $5.01 \times 10^8 \text{ t}$,占宜昌 $6.76 \times 10^8 \text{ t}$ 的 74.2%。图 1 为金沙江流域地理位置及屏山水文站和主要气象站点位置。

2 数据与方法

2.1 数据来源

屏山站建站于 1939 年 8 月,位于四川省屏山县锦屏乡,东经 $104^{\circ}10'$,北纬 $28^{\circ}38'$,所在流域为长江流域金沙江水系。本文所用数据为金沙江流域内部 27 个气象站点(图 1)1960—2016 年的日降水数据,降水数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。以

及流域出口控制水文站屏山站 1954—2011 年的日尺度径流量、输沙量及含沙量数据,2012—2016 年屏山站水沙资料采用向家坝水文站的水沙资料。

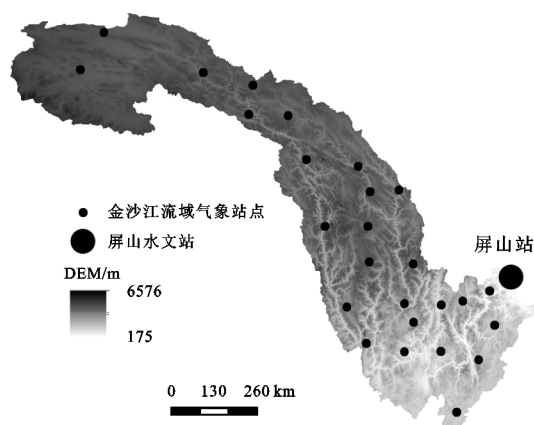


图1 金沙江流域屏山水文站和主要气象站点位置

2.2 研究方法

2.2.1 水沙关系曲线 水沙关系表达式为:

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

式中: Q 为流量; S 为悬沙量浓度。或者表示为:

$$\lg S = \lg a + b \lg Q \quad (2)$$

式中: a 为回归系数; b 为指数。

部分学者认为,水沙关系曲线是一个“黑匣子”模型,其参数由回归分析估计出来,没有任何物理意义^[17]。然而,越来越多的研究将 a, b 的取值赋予一定的物理意义,认为 a, b 分别与流域产沙特性和河道输沙特性相关^[18-19]。 a 值反映坡面泥沙来源量的大小,与径流产流产沙特性密切相关,易受水土保持工程措施、退耕还林(草)等工程措施影响^[3], a 值越大,表示流域内易被侵蚀的风化沉积物越多; b 值反映河流的沙量输移特性,受河流流速、流量等内部影响因素较大, b 值越大,代表流量的小幅增加即可引起水流侵蚀力的大幅增强^[20]。

2.2.2 C-Q 环路分析 水沙环路即径流-悬移质泥沙环路(C-Q 环路),是由于流域水沙含量的峰值滞后现象,而在图中呈现出有不同类型的环路^[21],用以解释沉积物的运移过程^[22]。C-Q 环路的类型一般包括:顺时针、逆时针、正“8”字形、逆“8”字形和线形^[3]等。顺时针环路表示泥沙含量早于流量达到峰值,主要是由于物源物质增多引起^[23];逆时针环路表示流量早于泥沙含量达到峰值,即河道泥沙输移速率降低,含沙量峰值出现滞后现象;正“8”字形环路的特点为,径流量较低时为顺时针曲线,而径流量较高时为逆时针;逆“8”字形环路的特征与正“8”字形环路正好相反;线形环路代表流量和泥沙含量的输移时间和变化比例同步。

2.2.3 基于差分法的贡献率分析 本研究用差分法对流域内气候变化和人类活动进行量化分析,差分法认为人类活动因素(如水土保持工程、水利枢纽等)和自然因素(如降水等)是导致水沙量变化的根本原因^[24]。为了消除降水的影响,令:

$$D = \frac{W}{P} \quad (3)$$

式中: P 为降水量(mm); D 为径流率(m^3/mm); W 为径流量(10^4 m^3)。

令基准期平均径流量为 W_1 ,平均降水量为 P_1 ,径流率为 D_1 ,各变化期的平均径流量为 W_2 ,平均降水量为 P_2 ,径流率为 D_2 。对径流取全微分且以差分的形式表示为:

$$\Delta W = W_1 - W_2 = \frac{P_1 + P_2}{2} (D_1 - D_2) + \frac{D_1 + D_2}{2} (P_1 - P_2) = \bar{P} \cdot \Delta D + \bar{D} \cdot \Delta P \quad (4)$$

若降水量 P 不变,则基准期与各变化期的径流量差值 $\Delta W = \bar{P} \cdot \Delta D$ 为人类活动影响;若径流率 D 不变,则 $\Delta W = \bar{D} \cdot \Delta P$ 为降水影响。

同理可令,

$$E = \frac{W_s}{P} \quad (5)$$

式中: E 为侵蚀率或产沙系数(t/mm); W_s 为输沙量(10^4 t); P 为降水量(mm)。

令基准期平均输沙量为 W_{s1} ,平均降水量为 P_1 ,侵蚀率为 E_1 ,各变化期的平均输沙量为 W_{s2} ,平均降水量为 P_2 ,侵蚀率为 E_2 。对输沙量 $W_s = E \cdot P$ 取全微分,并以差分的形式表示:

$$\Delta W_s = W_{s1} - W_{s2} = \frac{P_1 + P_2}{2} (E_1 - E_2) + \frac{E_1 + E_2}{2} (P_1 - P_2) = \bar{P} \cdot \Delta E + \bar{E} \cdot \Delta P \quad (6)$$

若降水量 P 不变,则 $\Delta W_s = \bar{P} \cdot \Delta E$ 为人类活动影响;若侵蚀率 E 不变,则 $\Delta W_s = \bar{E} \cdot \Delta P$ 为降水影响。

3 结果与分析

3.1 水沙序列的动态变化特征

3.1.1 水沙序列趋势性分析 据屏山站数据统计显示,金沙江流域在 1954—2016 年的年径流量和年输沙量见图 2。1954—2016 年,年均径流量为 $1.43 \times 10^{11} \text{ m}^3$,年均输沙量为 $2.20 \times 10^{11} \text{ t}$;63 年间,年均径流量 2016 年相对 1954 年减少 $4.26 \times 10^{10} \text{ m}^3$,年均变化速率为 $-1.16 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{a}$;年均输沙量 2016 年相对 1954 年减少 $3.23 \times 10^8 \text{ t}$,年均变化速率为 $-0.02 \times 10^8 \text{ t/a}$ 。

采用 M-K 趋势检验法^[25] 计算金沙江流域 1954—2016 年径流量、输沙量的变化趋势。年均径流量 $|Z_c|$ 值为 0.13, β 值为 -0.19,表明年径流量呈

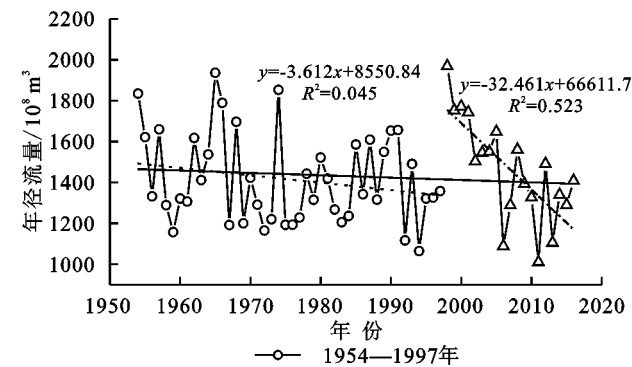


图 2 年径流量和输沙量年的变化趋势

3.1.2 水沙序列阶段性分析 采用双累积曲线法^[26] 诊断水沙序列的阶段特性(图 3)。根据图 3 中曲线斜率的变化,将全时段划分为 1954—1997 年、1998—2016 年两个阶段。进一步采用 M-K 趋势检验法分别对两个阶段的显著性进行分析,结果见图 2。第一个阶段内的径流量 $|Z_c| = 0.68, \beta < 0$,呈非显著性下降趋势;年输沙量 $|Z_c| = 1.57, \beta > 0$,呈非显著性下降趋势。第 2 个阶段内径流量 $|Z_c| = 3.08, \beta < 0$,在 0.01 的水平上极显著下降;输沙量 $|Z_c| = 4.48, \beta < 0$,同样在 0.01 的水平上极显著下降。

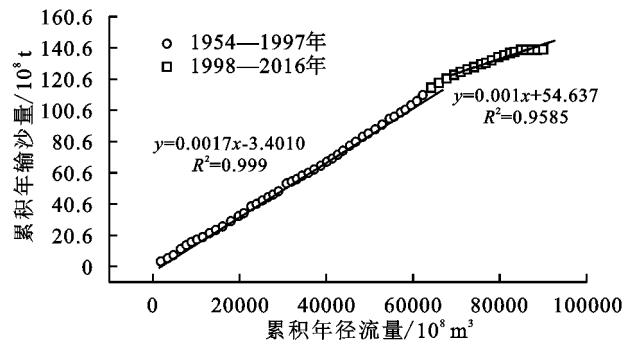
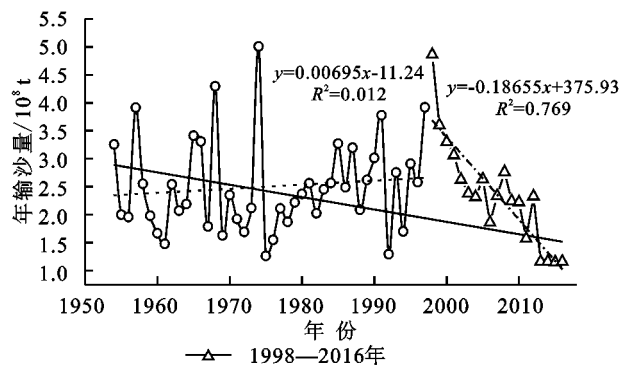


图 3 径流—输沙量双累积曲线

当累积曲线无明显的斜率变化,即图像呈一条直线时,则表明径流量与输沙量无明显变化;当累积曲线的斜率在某点发生明显变化,则表明气候因素和人类活动对水沙关系有明显影响^[26]。1998 年在全国范围内的“长治工程”的影响下,截至 2005 年末,共完成治理面积约 $1.23 \times 10^4 \text{ km}^2$,占金沙江水土流失面积 $1.359 \times 10^5 \text{ km}^2$ 的 7.7%^[27],水土保持措施引起的下垫面变化成为影响流域水沙的关键因素;同时,大型水库的拦沙作用,是屏山站输沙量显著下降的另一重要的潜在因素^[28],例如,“西电东送”的骨干坝向家坝和洛溪渡电站建于屏山站上游,分别于 2012 年和 2013 年蓄水发电,库容分别为 $5.16 \times 10^9 \text{ m}^3, 1.27 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ^[29],投

下降趋势,但不呈现显著性变化。年均输沙量 $|Z_c|$ 值为 2.08, β 值为 -0.01,表明年输沙量在 0.05 的水平上呈显著下降趋势。



入使用后,2013—2016 年溪洛渡和向家坝水库的年平均联合拦沙量为 $1.05 \times 10^8 \text{ t}$,拦沙率达到金沙江总来沙量的 98% 以上^[30-31]。此外,降水数据显示,2013 年以后的径流量变化趋势和降水量同步,因此降水的突增可能是导致径流高于前期平均水平的重要因素之一。1998 年长江流域发生特大洪水事件,在持续性降雨作用下径流量和输沙量突增,亦是水沙序列发生突然变化的主要原因。降雨等自然因素和退耕还林、水利工程措施等人为因素共同影响金沙江流域的水沙特性。

3.2 水沙关系的动态变化特性

3.2.1 长时间序列内的水沙关系曲线 1954—2016 年屏山站年径流量—年输沙量的水沙关系曲线分析结果见图 4,水沙关系决定系数 R^2 为 0.451 1,拟合效果一般。径流—泥沙特征系数 a 和 b 值在不同阶段的变化趋势见图 5。第一个阶段, a 值 $|Z_c| = 3.73, \beta > 0$,呈极显著上升趋势; b 值 $|Z_c| = 2.90, \beta < 0$,呈极显著下降趋势。第 2 个阶段, a 值 $|Z_c| = 1.50, \beta < 0$,呈非显著下降趋势; b 值 $|Z_c| = 1.26, \beta < 0$,呈非显著性下降趋势。

1954—1997 年, a 值显著上升,表明坡面提供了越来越多的物质来源。根据研究,龙街到屏山段的干流河道两岸和部分中小支流,为金沙江泥沙的重要产沙区。该河段地处康滇构造带的中部,地震活动频繁,坡度大且河流流速快,植被覆盖率较低,泥石流现象发生频繁,致使该期间产沙严重,为河流提供沙物质源^[32]。 b 值显著下降,表明在水动力因素、来沙综合条件等河道内部因素影响下,河道泥沙输移速率降低。1998 年后, a 值转变为下降趋势,可能是由于第 2 个阶段的“天保”“长治”等水土保持措施发挥作用,使得坡面上的可侵蚀性物源减少;对于 b 值,1998—2016

年 b 值下降,表明河流泥沙搬运能力下降。此年间,二滩水库、洛溪渡等水库群大量建成,有可能成为影响河流泥沙搬运能力的主要原因。比较前后两个阶段, b 值在全时段内均呈现下降趋势,河道影响因素始终发挥减沙作用。相反, a 值由上升改为下降趋势,说明坡面上的主要影响因素(如降雨、植被覆盖等)对流域产沙从促进作用改为抑制作用,这和近 70 年来该流域的水保措施和植被变化密切相关。

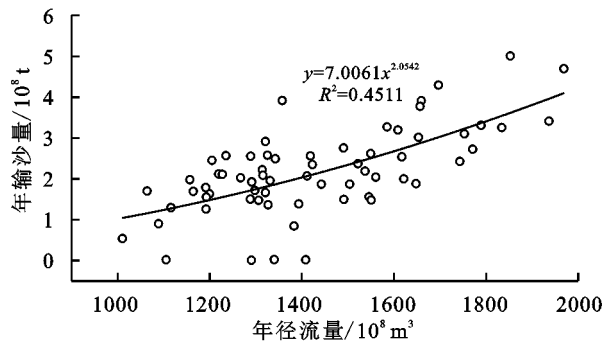


图4 年径流量—年输沙量的水沙关系曲线

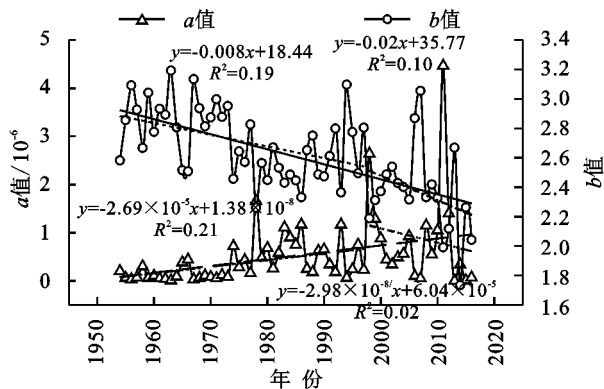


图5 a 、 b 值的变化趋势

3.2.2 径流—悬移质环路特性及统计分析 根据流域内有记载的 1954—2016 年洪水场次的资料,该时段内洪峰总量为 538 个。其中 1954—1997 年洪峰次数为 370 个,占洪峰总量的 69%;1998—2016 年洪峰次数为 168 个,占洪峰总量的 31%。流域内由于水沙关系的峰值滞后现象^[33]形成的 5 种不同类型的环路曲线见图 6。

将 1954—2016 年按年径流量的丰枯程度划分为特枯水年、偏枯水年、平水年、偏丰水年、特丰水年 5 种类型,分别占 7.69%,16.92%,49.23%,13.85%,12.31%。并分别对不同丰枯级别下的洪峰个数和环路个数进行统计,结果见表 1。其中顺时针环路在所有丰枯程度的年份中占比最大,其次是逆时针环路,正“8”字形、逆“8”字形以及线形环路占比较少。顺时针环路随着年径流量的降低呈下降趋势,表明流域物源充足,输沙量主要受径流量影响;逆时针环路同样

随年径流量的降低呈下降趋势,表明随流量减少,河流输沙能力下降,泥沙输移速率降低。而其他 4 种环路的数量相对较少,环路数量并未随着径流量的变化呈现明显变化。

1954—1997 年顺时针环路占该时段内总 C-Q 环路数量的 53.33%,1998—2016 年所占的比例为 64.71%。数据显示顺时针环路在两个阶段的比率相似,而第 2 个阶段内逆时针环路所占比例相对逆时针环路在第一个阶段的占比有所上升。1954—1997 年逆时针环路占该时段内总 C-Q 环路数量的 15.83%,1998—2016 年所占的比例为 22.58%,可见前两个时间段内逆时针环路比例上升,与 b 值变化一致,说明泥沙输移速率降低使得泥沙较径流更晚达到峰值;正“8”字形环路在 1954—1997 年所占的比例为 12.50%,1998—2016 年所占比例为 9.68%;逆“8”字形环路在 1954—1997 年所占的比例为 15.00%,1998—2016 年所占的比例为 6.45%,说明泥沙在径流之前达到峰值或二者同时达到峰值的概率增大;线形环路在 1954—1997 年所占的比例为 3.33%,1998—2016 年所占的比例为 3.23%,在总时间段内,该种环路为出现较少且无变化规律。各环路所占比例为顺时针>逆时针>“8”字形>线形环路。

3.3 水沙变化驱动因素的贡献率分析

3.3.1 关键驱动因素时空特征分析 气候变化和人类活动是导致流域水沙变化的两类主要驱动因素。对于气候因素,因金沙江流域主要是水力侵蚀为主,故将降雨和温度作为气象因素的主要因子。在坡面上,近 70 年来,植被覆盖发生显著变化,可作为人类活动的典型代表因子。

金沙江流域降水量的变化趋势及 1998—2016 年的气温变化趋势见图 7。通过 M-K 趋势分析,可知降水量在 1960—1997 年的 $|Z_c| = 2.99, \beta > 0$,表明 1960—1997 年降水量在 0.05 的水平上显著上升;1998—2016 年 $|Z_c| = 1.05, \beta < 0$,表明在 1998—2016 年呈非显著下降趋势。在 1954—2016 年内,降水量上升而径流量呈下降趋势,原因是出现了降水和径流的滞后现象;第 2 个阶段降水量与径流量同步下降。且流域 1997—2016 年平均气温为 2.63℃,温度增加速度为 0.026 7℃/10 a。M-K 分析结果为 $|Z_c| = 1.07, \beta > 0$,气温在 1997—2016 年呈上升趋势,无显著性变化。

金沙江流域 2000—2016 年年均 NDVI 的值见图 8,流域内的 NDVI 值总体上呈增长趋势,增速为 0.001 5/10 a,植被覆盖面积总体上呈现增加趋势,在一定程度上成为流域产沙量减少的重要因素。

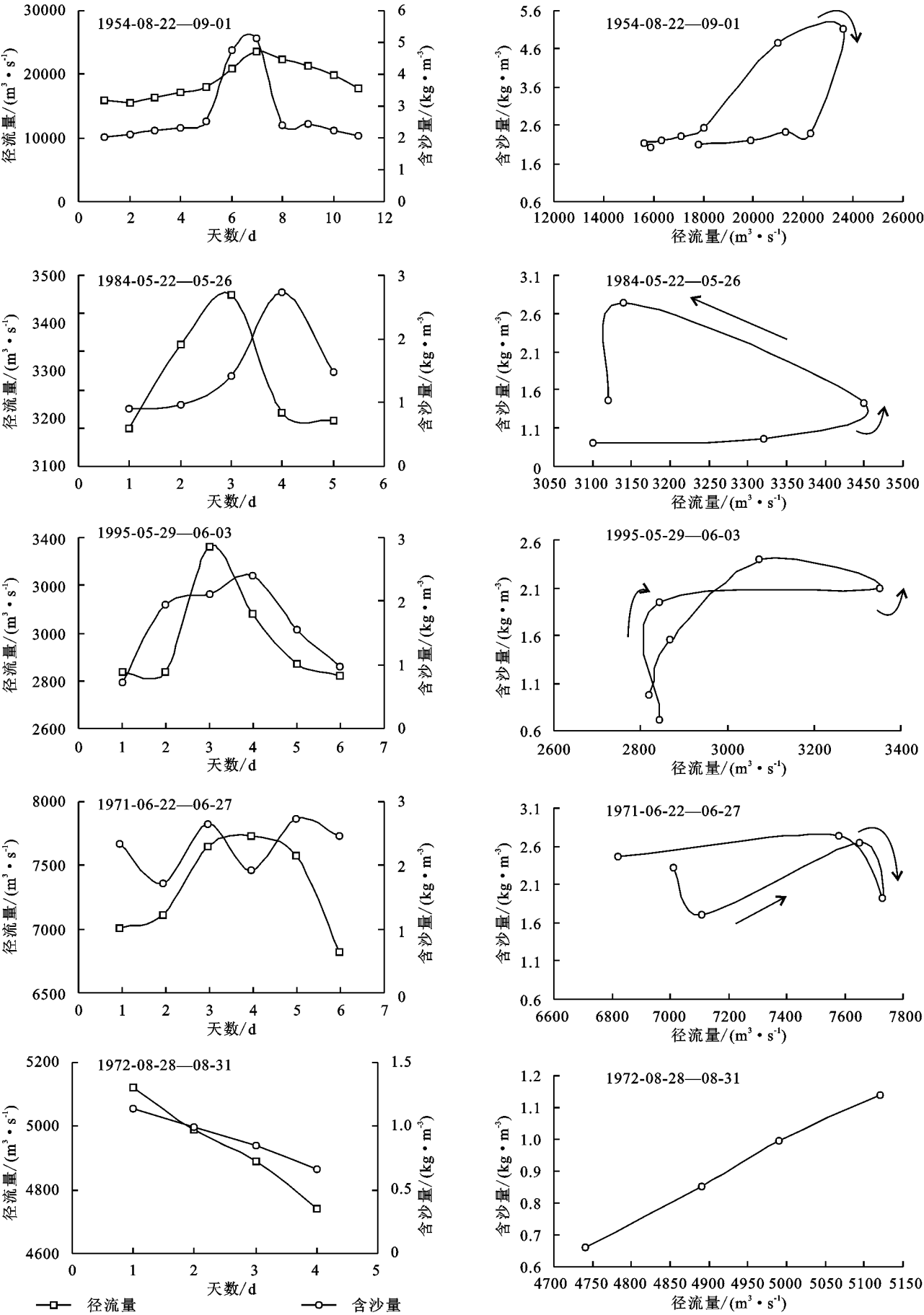


图 6 5 种水沙关系及其对应的 C-Q 环路类型

表 1 不同丰枯级别下的洪峰个数和环路个数 个					
环路类型	特丰水年	偏丰水年	平水年	偏枯水年	特枯水年
顺时针	0.6	0.608696	0.552632	0.586207	0.444444
逆时针	0.266667	0.086957	0.144737	0.172414	0.111111
正“8”字形	0.133333	0	0.144737	0.068966	0.333333
逆“8”字形	0	0.26087	0.118421	0.137931	0.111111
线形	0	0.043478	0.039474	0.034483	0

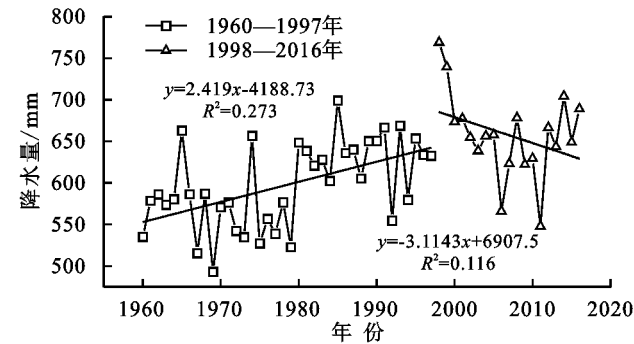


图 7 研究期间年降水量与年气温值的变化趋势

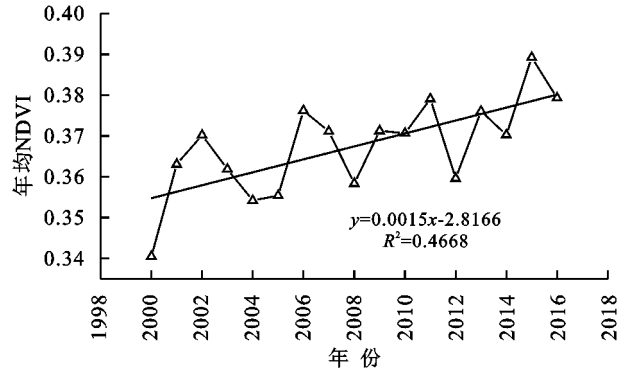


图 8 2000—2016 年生长季年均 NDVI 值

选取初始数据 2000 年、中间年份 2010 年、截至年份 2016 年以及 2000—2016 年的平均 NDVI 图进行植被分类,2000 年、2010 年、2016 年以及平均 NDVI

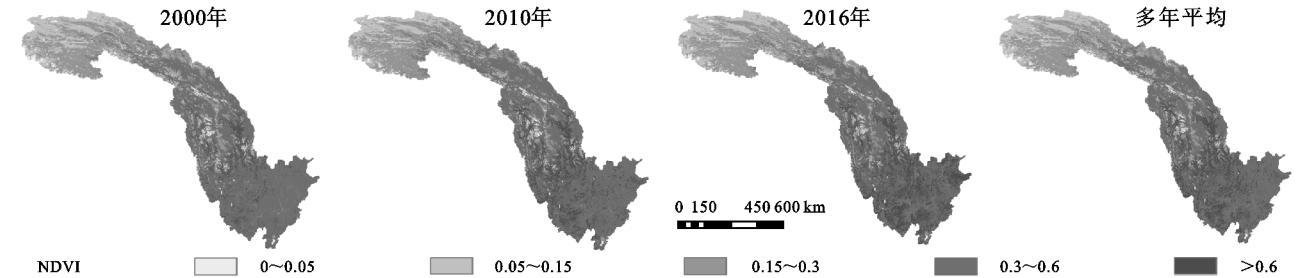


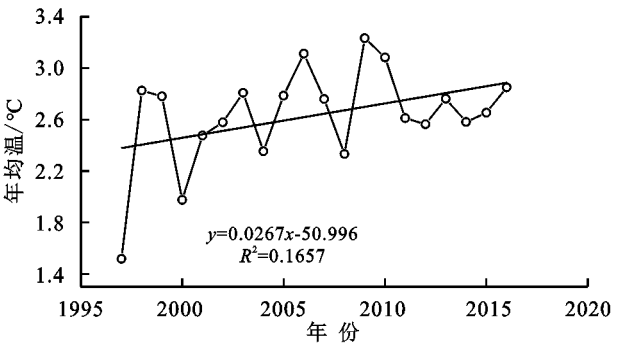
图 9 金沙江流域 2000 年、2010 年、2016 年以及多年平均 NDVI 分布

表 3 2000 年、2010 年、2016 年的各级植被覆盖面积及所占流域总面积的比例

级别	2000 年		2010 年		2016 年		平均	
	面积/10 ⁴ km ²	百分比/%	面积/10 ⁴ km ²	百分比/%	面积/10 ⁴ km ²	百分比/%	面积/10 ⁴ km ²	百分比/%
一级	2.050746	4.60	4.551476	10.22	7.108212	15.96	5.460278	12.26
二级	24.024132	53.93	23.68298	53.17	20.058651	45.03	21.671640	48.65
三级	11.456574	25.72	10.44481	23.45	11.133570	24.99	10.947470	24.58
四级	6.006076	13.48	5.073518	11.39	5.536748	12.43	5.655081	12.70
五级	1.006915	2.26	0.791273	1.78	0.706875	1.59	0.809983	1.82

对不同类型的 C-Q 环路曲线在两个阶段的占比进行统计,结果见表 2。

表 2 不同类型的 C-Q 环路曲线占比 %					
时段	顺时针	逆时针	正“8”字形	逆“8”字形	线形
1954—1997	53.33	15.83	12.50	15.00	3.33
1998—2016	58.06	22.58	9.68	6.45	3.23



分布见图 9;依据植被分类标准^[34],将金沙江流域 NDVI 划分为 5 个等级,1 级植被为优等覆盖,5 级植被为劣等覆盖,覆盖级别越高,覆盖等级越差。流域 2000 年、2010 年、2016 年的各级植被覆盖面积及所占流域总面积的比例见表 3。发现金沙江流域低植被覆盖区域主要集中在金沙江上游,从上游到下游植被覆盖情况逐渐变好,造成上游植被覆盖低的原因是金沙江上游海拔高,温度低,山体裸露岩石较多,地质结构松散,不利于植被生长;下游植被覆盖普遍较高,植被覆盖主要以 2 级植被覆盖为主,1 级植被 2000 年低于全时间序列内的平均水平;从 2000—2016 年,1 级植被有明显的增长趋势,5 级植被呈明显下降趋势。

3.3.2 基于差分法的水沙变化驱动因素的定量分析

以 1960—1997 年的径流量和降水量为基准,1998—2016 年降水因素和人类活动因素对径流量、输沙量的影响见表 4。全时段的降水量呈增加趋势,1998—2016 年,降水因素影响增加的年均径流量为 $1.36 \times 10^{10} \text{ m}^3$,人类活动因素影响减少的年均径流量为 $7.79 \times 10^9 \text{ m}^3$,两者总共增加 $5.84 \times 10^9 \text{ m}^3$,且降水因素和人类活动因素各占 233.47%,−133.47%。1998—2016 年内的径流量相对 1960—1997 年呈增加趋势,主要原因是“1998 年长江特大洪水”导致径流量的突增使得 1998—2016 年平均径流量变大,尽管后期“二滩水库”“洛溪渡水库”“向家坝水库”的相继建成以及其他人类活动使得径流量发生明显降低,总体变化期的径流量相较基准期有所增加。降水因素在 1998—2016 年占主导作用,其人类活动和降水因素对径流量的贡献比为 −1 : 2;降水因素影响增加的年均输沙量为 $1.93 \times 10^7 \text{ t}$,人类活动因素影响减少的年均输沙量为 $1.14 \times 10^8 \text{ t}$,两者总共减少 $9.47 \times 10^7 \text{ t}$;1998—2016 年由于人类活动减少的输沙量远远大于由降雨影响增加的输沙量,变化期内的输沙量下降明显。因此变化期内的人类活动对输沙量的影响占主导作用,其人类活动和降水因素的贡献比为 −6 : 1。

表 4 1954—1997 年金沙江流域输沙量、径流量贡献率计算结果

指标	数值	指标	数值
$W_s/10^4 \text{ t}$	24759.90	$W/10^4 \text{ m}^3$	14042223.66
P/mm	597.64	P/mm	597.64
$E/(10^4 \text{ t} \cdot \text{mm}^{-1})$	41.43	$D/(10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{mm}^{-1})$	23496.10
$\Delta W_s/10^4 \text{ t}$	9473.80	$\Delta W/10^4 \text{ m}^3$	−583545.60
$\Delta P/\text{mm}$	−59.56	$\Delta P/\text{mm}$	−59.56
$\Delta E/(10^4 \text{ t} \cdot \text{mm}^{-1})$	18.17	$\Delta D/(10^4 \text{ t} \cdot \text{mm}^{-1})$	1241.35
$\bar{E} \cdot \Delta P/10^4 \text{ t}$	−1926.34	$\bar{D} \cdot \Delta P/10^4 \text{ m}^3$	−1362392.01
$\bar{P} \cdot \Delta E/10^4 \text{ t}$	11400.17	$\bar{P} \cdot \Delta D/10^4 \text{ m}^3$	778846.41
降水 $\bar{E} \cdot \Delta P/\%$	20.33	降水 $\bar{D} \cdot \Delta P/\%$	233.47
人类活动 $\bar{P} \cdot \Delta E/\%$	−120.33	人类活动 $\bar{P} \cdot \Delta D/\%$	−133.47

表 5 1998—2016 年金沙江流域径流量贡献率计算结果

指标	数值	指标	数值
$W_s/10^4 \text{ t}$	15286.00	$W/10^4 \text{ m}^3$	14625769.26
P/mm	657.20	P/mm	657.20
$E/(10^4 \text{ t} \cdot \text{mm}^{-1})$	23.26	$D/(10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{mm}^{-1})$	22254.75

4 结论

本研究以金沙江为研究对象,利用金沙江流域屏山

站 1954—2016 年的径流、输沙以及流域平均降水资料,采用双累积曲线法、Mann-Kendall 趋势检验法等分析方法研究了流域的径流输沙变化特征,分析了人类活动和气候变化对流域水沙的影响,主要结论如下:

流域全时段水沙序列划分为 1954—1997 年、1998—2016 年两个阶段。趋势检验结果表明第一个阶段内的径流量呈非显著性下降趋势,输沙量呈非显著增长趋势;第 2 个阶段内径流量在 0.01 的水平上呈极显著下降趋势,输沙量同样在 0.01 的水平上呈极显著下降趋势。1998 年长江流域发生特大洪水事件,在持续性降雨作用下径流量和输沙量突增,亦是水沙序列发生突然变化的主要原因。降雨等自然因素和水利水保措施等人为因素共同影响水沙序列的突变。

金沙江流域屏山站 1954—2016 年年径流量-年输沙量的水沙关系符合幂函数关系,决定系数 R^2 为 0.451 1。1954—1997 年, a 值显著上升, b 值显著下降;1998 年后, a 值转变为下降趋势, b 值仍显著下降,在全时段内,河道影响因素始终发挥减沙作用,且坡面上的主要影响因素(如降雨、植被覆盖等)对流域产沙从促进作用改为抑制作用。1954—1997 年顺时针环路占该时段内总 C-Q 环路数量的 53.33%,1998—2016 年所占的比例为 64.71%。数据显示顺时针环路在两个阶段的比率相似,而第 2 个阶段内逆时针环路所占比例相对逆时针环路在第一个阶段的占比有所上升;正“8”字形环路在 1954—1997 年所占的比例为 12.50%,1998—2016 年所占比例为 9.68%,同时逆“8”字形环路在 1954—1997 年所占的比例为 15.00%,1998—2016 年所占的比例为 6.45%。各环路所占比例为顺时针>逆时针>“8”字形>线形环路。

差分法分析的结果表明,1998—2016 年内的径流量相对 1960—1997 年呈增加趋势,1998 年降水突增使得 1998—2016 年平均径流量变大。降水因素在 1998—2016 年占主导作用,人类活动和降水因素对径流量的贡献比为 −1 : 2;1998—2016 年三大水库的建成导致输沙量下降明显。变化期内的人类活动对输沙量的影响占主导作用,其人类活动和降水因素的贡献比为 −6 : 1。

参考文献:

[1] 仁宗萍,张光辉,杨勤科.近 50 年延河流域水沙变化特征及其原因分析[J].水文,2012,32(5):81-86.

[2] 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.

[3] 黎铭,张会兰,孟铨铨.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.

- [4] Hu B, Wang H, Yang Z, 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): 34-43.
- [5] 刘红英.降水变化和人类活动对北洛河上游水沙特性的影响研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学, 2012.
- [6] 张冠华,喻志强,易亮,等.近70年长江干流滩站以上流域水沙关系变化及其驱动因素[J].水土保持学报, 2021, 35(1): 79-84.
- [7] 王渺林,夏成阳,卢春生,等.金沙江流域水沙变化趋势分析[J].人民长江, 2008, 39(19): 15-22.
- [8] 万晓丹,周晓岚,赵丽霞,等.皇甫川流域水沙变化趋势及影响因素分析[J].中国农村水利水电, 2019(12): 90-93.
- [9] Fan X, Shi C, Zhou 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.
- [10] 史霏雨,李增永,李娜,等.金沙江流域1957—2016年气温时空变化特征[J].水土保持研究, 2019, 26(1): 162-167.
- [11] 刘强,尉飞鸿,常康飞,等.皇甫川流域水沙变化特征及其影响因素[J].干旱区研究, 2021, 38(6): 1506-1513.
- [12] 张小峰,闫昊晨,岳遥,等.近50年金沙江各区段年径流量变化及分析[J].长江流域资源与环境, 2018, 27(10): 2283-2292.
- [13] 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, 15(4): 420-426.
- [14] 张信宝,王安邦.长江上游干流和支流河流泥沙近期变化及其原因[J].水利学报, 2002(4): 56-59.
- [15] 姜利玲,董炳江,汤成友.长江上游三峡水库入库泥沙峰传播时间研究[J].人民长江, 2021, 52(7): 9-16.
- [16] 丁文荣.金沙江下段植被NDVI变化趋势及其归因[J].南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 107-112.
- [17] Asselman N E M. Fitting and interpretation of sediment rating curves[J]. Journal of Hydrology, 2000, 234: 228-248.
- [18] 王冰洁,李二辉,王彦君,等.黄河中游日和年输沙率-流量关系空间变化及影响因素[J].清华大学学报:自然科学版, 2020, 60(5): 440-448.
- [19] 谢发兵,赵广举,穆兴民,等.黄河干流近70年来水沙关系变化[J].中国水土保持科学(中英文), 2021, 19(5): 1-9.
- [20] Gao P, Deng J, Chai X, 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.
- [21] 王随继,范小黎.黄河内蒙古不同河型段对洪水过程的响应特征[J].地理科学进展, 2010, 29(4): 501-506.
- [22] Oeurng C, Sauvage S, Sánchez-Pérez J M. Dynamics of suspended sediment transport and yield in a large agricultural catchment, southwest France[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35(11): 1289-1301.
- [23] Klein M. Anti clockwise hysteresis in suspended sediment concentration during individual storms: Holbeck catchment; Yorkshire, England[J]. Catena, 1984, 11(2/3): 251-257.
- [24] 夏绍钦,张会兰,郝佳欣,等.长江涪江小河坝站水沙关系特性及其驱动因素研究[J].长江流域资源与环境, 2021, 30(7): 1603-1613.
- [25] 姚文艺,冉大川,陈江南.黄河流域近期水沙变化及其趋势预测[J].水科学进展, 2013, 24(5): 607-616.
- [26] 张建,陈松伟,彭阳县小河流域水沙变化趋势及影响因素分析[J].中国水土保持, 2020(12): 47-49.
- [27] 水利部长江水利委员会.金沙江干流综合规划报告[R].武汉:水利部长江水利委员会, 2006.
- [28] 王延贵,胡春宏,刘茜,等.长江上游水沙特性变化与人类活动的影响[J].泥沙研究, 2016(1): 1-8.
- [29] 陆传豪,董先勇,唐家良,等.金沙江流域大型梯级水库对水沙变化的影响[J].中国水土保持科学, 2019, 17(5): 36-43.
- [30] 秦蕾蕾,董先勇,杜泽东,等.金沙江下游水沙变化特性及梯级水库拦沙分析[J].泥沙研究, 2019, 44(3): 24-30.
- [31] 刘尚武,张小峰,许全喜,等.近50年来金沙江流域悬移质输沙特性研究[J].泥沙研究, 2020, 45(3): 30-37.
- [32] 邓贤贵.金沙江流域产沙区和泥沙输移特性分析[J].四川水力发电, 1997, 16(1): 23-26.
- [33] 王随继,范小黎.黄河内蒙古不同河型段对洪水过程的响应特征[J].地理科学进展, 2010, 29(4): 501-506.
- [34] 韩继冲,喻舒琳,杨青林,等.1999—2015年长江流域上游植被覆盖特征及其对气候和地形的响应[J].长江科学院院报, 2019, 36(9): 51-57.