长江涪江小河坝站水沙关系特性及其驱动因素研究

夏绍钦 张会兰 郝佳欣 杨军[1]

(北京林业大学水土保持学院重庆缙云三峡库区

森林生态系统国家定位观测研究站，北京 100083)

【摘 要】：涪江流域是三峡入库水沙的主要来源地之一。基于涪江流域出口水文站 1980～2018 年的日径流、输沙率实测数据，从不同时间尺度分析水沙序列、水沙关系特性，并量化气象条件和人类活动两类驱动因素的影响。结果表明：(1)年尺度上，流域多年平均径流量、年输沙量呈显著下降趋势，以 1997 和 2012 年为转折年，呈典型的三阶段特性；月尺度上，径流和输沙量主要集中在 7、8、9 月；日尺度上，径流和输沙的集中度指数分别为 0.5、0.91,表明“大水大沙”现象日益突出。(2)基于长时期序列的水沙关系曲线分析结果显示，外界影响因子(a)呈显著上升趋势，河流输沙能力因子(b)呈显著下降趋势；基于洪水场次事件的水沙环路曲线分析结果显示，顺时针和逆时针环路为两类主要的 C-Q 环路类型，分别呈下降和上升趋势，表明人类活动因素的增加和河流输沙能力的降低。(3)人类活动因素是影响涪江流域水沙变化的主要驱动因素，对径流和产沙量的贡献率占到 86%和 97%以上。以上结果可为长江流域水沙资源管理提供基础数据和科学依据。

【关键词】：涪江流域 水沙关系 水沙序列 C-Q 环路 驱动因素

【中图分类号】:P333.4**【文献标识码】**:A**【文章编号】**:1004-8227(2021)07-1603-11

水沙序列是观测得到的关于径流量和输沙量的非平稳离散等时间间距序列[1],通过分析，有助于掌握序列的多时间尺度变化特征、变化规律、突变点等；水沙关系则反映径流量和输沙量的内在联系，是流域多种自然因素和人为因素综合作用的反映，水沙关系变化研究可以为河流水文循环和河道泥沙沉积提供重要参考[2]。人类活动方面，水利、水保工程等能拦蓄地表径流、增加地表覆盖，从而影响下垫面性质，调控流域水沙关系；自然因素方面，降水、入渗、蒸发等水文要素的变化能影响河川径流和产沙过程[3,4]。水沙关系的建立需要对水沙序列进行特征分析，并合理分段[5],从而分析水沙规律和驱动因素，这对于流域水沙运动、泥沙冲淤变化、生态安全以及水资源开发利用有重要意义。

针对水沙序列基本特征，许多学者展开了诸多研究，包括如下 3 个方面：(1)趋势性，主要基于 Mann-Kendall 检验法检测水沙的变化趋势及其显著性[6,7];(2)阶段性，一般采用双累积曲线[8,9],将研究期划分为不同阶段，水沙累积曲线的突变年份被认为是不同阶段的转折点；(3)集中度，该概念最初被用来描述不同强度降水过程非均匀分配特征[10],后被引入到河流的径流泥沙年内分配规律分析中[11,12],但一般用于月径流、泥沙量，很少基于日尺度来研究其集中分布情况。对于水沙关系的研究，可分为

[1]**作者简介**：夏绍钦(1997～),男，硕士研究生，主要研究方向为流域水沙过程.E-mail:Xiasq33@bjfu.edu.cn
张会兰 E-mail:zhanghl@bjfu.edu.cn
基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金(2021ZY50);国家自然科学基金项目(51309006);国家重大水利基金项目(126101000000018J129-01)

基于长时期序列的水沙关系曲线分析和基于洪水场次事件的水沙环路曲线分析。其中，水沙关系曲线是一种评估河流水沙变化的有效方法[13],需要通过公式 $S=aQ^b$(Q 为流量，S 为悬沙浓度)来体现，参数 a 和 b 是反映河流水沙变化指标[14],可分别代表人为扰动的大小和水流挟沙能力的强弱[15]。在洪水场次事件下，水沙环路曲线(又称 C-Q 环路曲线)反映径流量和含沙量之间的峰值滞后现象，许多研究[16~18]基于洪水场次下的水沙数据对径流-悬移质泥沙环路进行探究分析，极大地丰富了水沙关系在机理分析和定量分析方面的成果。

人类活动和气候变化被证实是影响流域水沙序列和水沙关系变化的主要驱动因素[2,19,20]。为深入分析其驱动因素，Li 等[21]对全球 4307 条河流长时间序列下的水沙变化趋势及其成因进行研究，发现 71%的河流输沙量变化主要受灌溉、水库等人类活动的影响，而径流量变化主要受气候变化(主要是降水)的影响；田清[22]对国内黄河、长江和珠江的水沙数据进行研究，表明人类活动是三大河流输沙量显著下降的主要原因；彭涛等[23]对长江干流的多年水沙变化趋势进行研究，发现相较于气候变化，流域输沙量和径流量的变化主要受人类活动的影响，且影响逐渐增强。

涪江是三峡水库的主要产沙策源地，也是嘉陵江(三峡水库泥沙的重要来源地)产沙量最高的一级支流。目前，由于人类活动和气候变化的影响，长江上游输沙量显著下降，三峡水库泥沙淤积也有明显变化[24]。本研究拟对涪江流域水沙序列进行分析，构建多年尺度水沙关系曲线，探讨典型洪水场次下水沙环路曲线的特性，并分析驱动因素及其贡献率，从而加强对长江上游水沙变化规律的认识，为三峡未来入库水沙的变化提供依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

涪江是长江上游嘉陵江右岸的一级支流，发源于四川省松潘县黄龙乡岷山雪宝顶，地跨 103.73° E～106.27° E、29.3° N～33.05° N,集水面积约 36400km^2,河长 670km,位于青藏高原东麓，形状狭长，流域地形西北高、东南低。流域属亚热带湿润性气候，多年平均气温为 17.8～18.1℃,气温南高北低，多年平均降水量为 800～1400mm,其土壤种类丰富(包括黄壤和紫色土)、植被资源丰富，上游山区有完整的植被垂直带，中下游地区以经济林木为主。涪江流域地理位置和气象、水文站点位置如图 1 所示。

从 20 世纪 60 年代起，涪江流域人口密度大，长时间滥垦滥伐，水资源减少，森林覆盖率大幅降低，到 80 年代末，工农业迅速发展，人类活动日益频繁，水土流失加剧，后来兴建水利工程和水土保持工程来蓄水减沙，包括天保工程(1998 年),退耕还林工程(1999 年)和武都引水工程等。气候方面也有较大变化，年降水量呈下降趋势，气温总体上呈上升趋势，上游地区气温显著增加，中下游地区气温小幅减少[25]。在人类活动和气候变化的共同影响下，涪江流域的径流和输沙特性发生了显著变化。

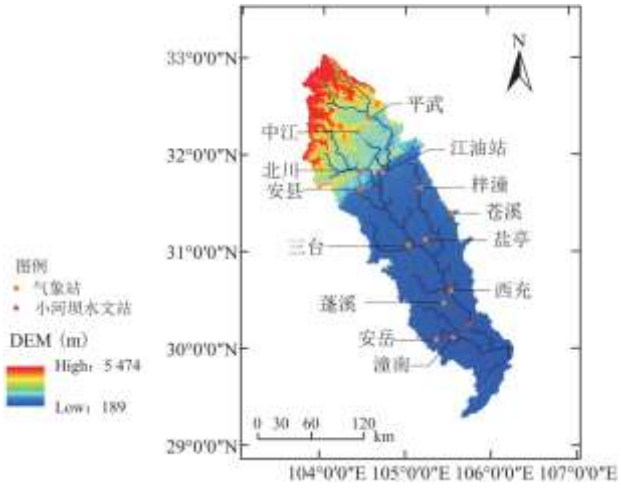

图 1 涪江流域地理位置及站点示意图

1.2 数据来源

本研究数据来自涪江流域出口控制站-小河坝水文站，包括 1980～2018 年的日径流、日输沙率和降水量。该水文站建于 1951 年，位于重庆市潼南县，集水面积 28901km^2,105° 50′ E,30° 11′ N,为嘉陵江支流涪江的主要控制站，属国家基本水文站，一类精度流量站、二类精度泥沙站[26]。另外，流域内的气象站点包括平武站、中江站、北川站、安县站、江油站、梓潼站、苍溪站、盐亭站、三台站、西充站、蓬溪站、潼南站以及安岳站等，气象数据包括降水、温度、风速等。

2 研究方法

2.1 集中度分析

集中度 CI[27](Concentration Index)可以用来表征日降水量对于总降水量的贡献程度，本研究将集中度 CI 引入径流泥沙中，表示日尺度的年内径流、输沙量的集中分布情况。计算步骤：首先将年径流量按照等级划分(0～0.09 为一级，0.1～0.19 为一级，…),然后统计出每个径流等级下的天数和径流量，接着计算各径流等级的累积径流量百分比(Y,%)和累积径流天数百分比(X,%),输沙量计算也是一样。其中 Y、X 符合以下的洛伦兹曲线分布：

$$Y = aXe^{bX} \tag{1}$$

其中，a 和 b 值可以通过最小二乘法进行计算得到。

$$\ln a = \frac{\sum Xi^2 \sum \ln Yi + \sum Xi \sum Xi \ln Xi}{N\sum Xi^2 - \left(\sum Xi\right)^2} - \frac{\sum Xi^2 \sum \ln Xi + \sum Xi \sum Xi \ln Yi}{N\sum Xi^2 - \left(\sum Xi\right)^2} \tag{2}$$

$$b = \frac{N\sum Xi \ln Yi + \sum Xi \sum \ln Xi}{N\sum Xi^2 - \left(\sum Xi\right)^2} - \frac{N\sum Xi \ln Xi + \sum Xi \sum \ln Yi}{N\sum Xi^2 - \left(\sum Xi\right)^2} \tag{3}$$

则该曲线下所包围的面积 S(如图 5)可由下得出：

$$S = \int_0^{100} \left(X - aXe^{bX}\right) dX \tag{4}$$

最后得出全年集中度：

$$CI=\frac{2S}{1000} \tag{5}$$

集中度 CI 值越靠近 1 代表年径流、输沙量在日尺度上越集中分布，也就越集中在一个时间点上，而 CI 越靠近 0 代表越平均分布。

2.2 水沙关系曲线

水沙关系曲线(Rating Curve)用来反映流域产沙特征及河流输沙特性[28],被定义为流量(Q)与悬移质泥沙输沙率(S)间的幂指数关系，表达形式为：

$$S=aQ^{b} \tag{6}$$

式中：a 为系数，b 为指数。a 表示流域产流产沙特性，受人类活动等外界因素较大，与水库、农业生产、水土保持工程、退耕还林还草工程等相关[19,29];b 表示河流本身的输沙特性，受水流速度、流量、沙级配比等内部因素影响，与河床形态、河流剖面有关[15]。a 和 b 的值表示沙源供应情况和水流影响下的泥沙输移的变化情况[30]。

2.3 贡献率分析

流域水沙关系的两类主要驱动因素包括人类活动和气候变化，定量区分两者对水沙变化的贡献率有多种方法，本研究采用差分法[9]。差分法中，径流率 D 表达式为：

$$D=\frac{W}{P} \tag{7}$$

式中：D 为径流率(万 m^3/mm),W 为径流量(万 m^3),P 为降水量(mm)。

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 W=D·P 取全微分，并以差分的形式表示：

$$\begin{aligned}\Delta W &= W_1-W_2\\ &=\frac{(P_1+P_2)}{2}(D_1-D_2)+\frac{(D_1+D_2)}{2}(P_1-P_2)\\ &=\overline{P}\cdot\Delta D+\overline{D}\cdot\Delta P\end{aligned} \tag{8}$$

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

同理，令

$$E=\frac{W_s}{P} \tag{9}$$

式中：E 为侵蚀率或产沙系数(万 t/mm),W_s为输沙量(万 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：

$$\begin{aligned}\Delta W_s &= W_{s1}-W_{s2}\\ &=\frac{(P_1+P_2)}{2}(E_1-E_2)+\frac{(E_1+E_2)}{2}(P_1-P_2)\\ &=\overline{P}\cdot\Delta E+\overline{E}\cdot\Delta P\end{aligned} \tag{10}$$

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

3 结果与讨论

3.1 水沙序列的时间变化特性

3.1.1 年际尺度

据小河坝站数据统计显示，涪江流域在 1980～2018 年的年径流量和年输沙量如图 2 所示。由图 2 可得研究区的实测径流量多年均值为 132.21 亿 m^3,输沙量多年均值为 0.118 亿 t。采用 Mann-Kendall 趋势检验法[31~34],计算研究期间流域年径流量和年输沙量的变化趋势，年径流量的|Z_c|值为 1.742,β 值为-0.914,呈显著性下降趋势并通过 90%的显著性检验，年输沙量的|Z_c|值为 2.565,β 值为-0.003,呈显著性下降趋势并通过 95%的显著性检验。

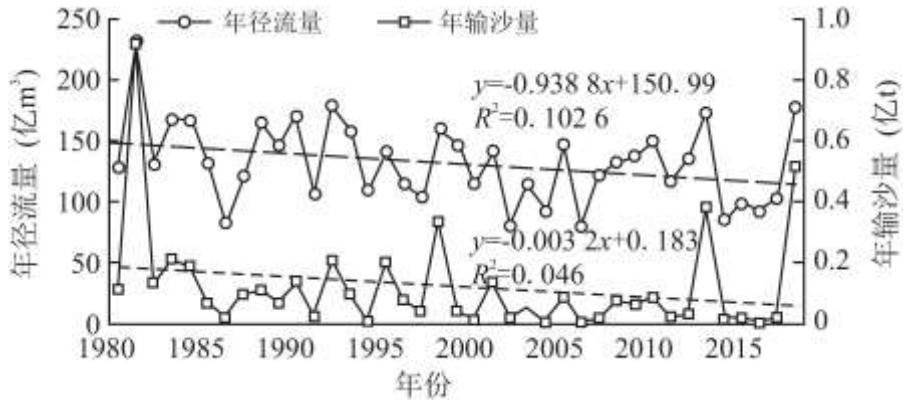

图 2 年径流量和年输沙量变化趋势

进一步，采用双累积曲线法[18,35]来分析长时间尺度下径流和输沙量序列的阶段特性。从小河坝站径流-输沙量双累积曲线(图3)可以看出，双累积曲线在1997、2012年出现转折点，即划分为1980～1997、1998～2012、2013～2017年等3个典型阶段，且3个阶段的线性拟合趋势线的斜率逐步降低，这与流域内的大型水利、水保工程措施的发生时间基本相符。第1个阶段，涪江所在的嘉陵江流域自80年代末90年代初以来作为长江上游水土保持重点防治工程的一部分，广泛地开展了水土保持工作，采取了坡改梯、水保田、保土耕作、小型水利水保工程等措施，截止到2000年，初步治理水土流失面积约3.3万 m^2,对涪江和嘉陵江的减沙效果较为显著[8]。第2个阶段，水沙序列发生突变，这与1998年长江特大洪水有密切联系，从1998年起陆续开展的天保工程和退耕还林工程，在一定程度上降低了曲线斜率，另外该阶段有多个典型拦沙水库建成[36],包括水牛家水库(库容1.4亿 m^3)、富金坝水库(库容1.5亿 m^3),这些水库能不同程度地拦截部分河流输沙量。第3个阶段，2013年7月，涪江发生大洪水[37],径流序列急剧增加，同时上游地区芦山地震提供了大量的泥沙来源从而导致当年小河坝观测到的输沙量的迅速增加[38],2013年后，武都(库容5.7亿 m^3)等大(I)型水库的先后运行有效发挥蓄水减沙等功能，使得该阶段曲线斜率有所下降。

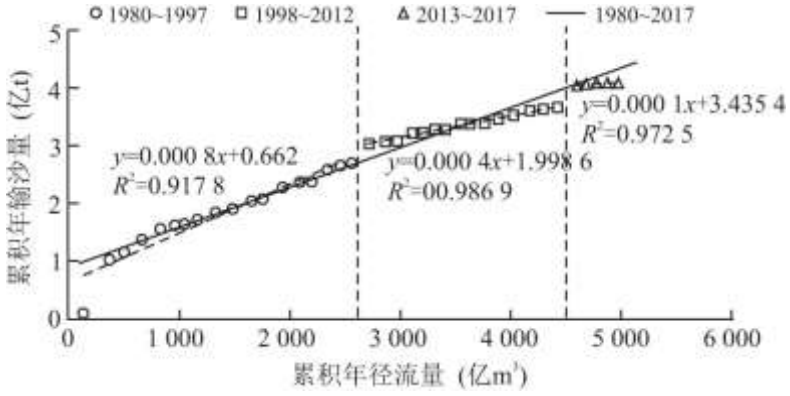

图3 径流-输沙量双累积曲线

3.1.2 月际尺度

如图4所示，统计1980～2017年的月径流量、输沙量数据，利用箱形图分析这两个量的年内分配情况，发现，径流量和输沙量的年内分配十分集中，每年的6～10月为丰水期，就近39年的总时段而言，丰水期径流量占全年的77.18%,同时这一期间也伴随着大量的泥沙输移，尤其是7、8、9月最为显著，丰水期输沙量占全年的89.80%。每年的12月至4月为枯水期，尽管缺乏每年12～3月的输沙量数据，但是可以从11月、4月的输沙量情况可以看到，枯水期的输沙量并不充裕。

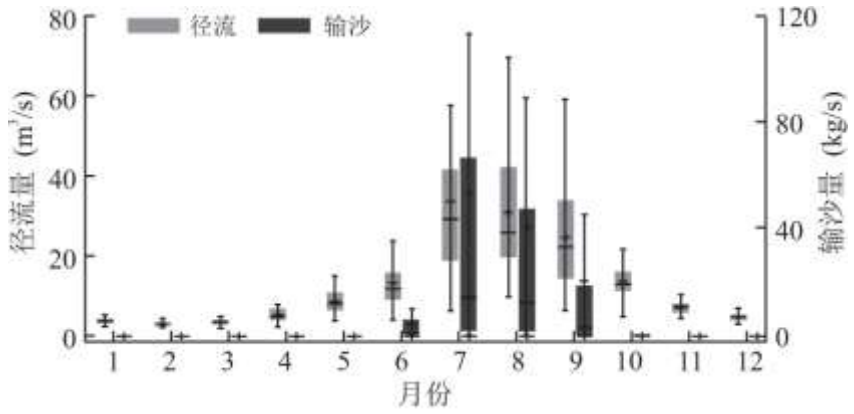

图4 径流、输沙的年内分配情况

3.1.3 日际尺度

在日际尺度里，采用集中度这一概念分析日径流和日输沙量在年内的分配情况。首先，验证洛伦兹曲线能否如实反映径流集中度的分布情况，基于小河坝站 1998 年径流相关数据以及公式(1),将累积径流量百分比和径流天数百分比进行洛伦兹曲线的拟合，决定系数 R^2 为 0.98836,符合拟合要求。统计 1980～2018 年径流集中度的洛伦兹曲线，并计算出决定拟合效果的决定系数 R^2,最大值、最小值、平均值分别为：0.9989、0.9814、0.9950,决定系数 R^2 的数值接近 1。

1980～2018 年的径流、输沙量的集中度 CI 值的计算结果见图 5。径流和输沙量的 CI 均值分别为 0.5 和 0.91,输沙量分布较径流量更加集中。采用 Mann-Kendall 趋势检验法进行径流集中度的变化趋势研究，发现径流和输沙集中度的$|Z_c|$值分别为 0.460 和 0.726, β 值分别为-0.0007 和 0.0003,分别呈不显著下降和不显著上升趋势。径流在年内的分布趋向均匀趋势，而输沙量趋向更加集中的趋势。

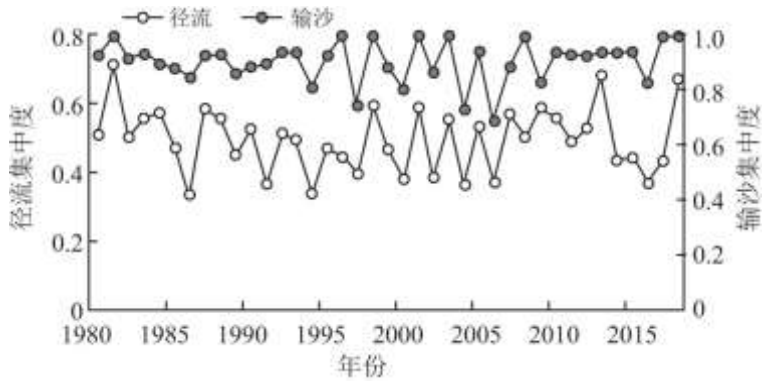

图 5 年径流、输沙集中度分布

特别地，输沙量 CI 值的最大值为 0.99,且在多个年份出现，表示年内输沙主要集中在某一个时间段。以 1998 年为例(如图 6),8 月 21～22 日两天的输沙量约占全年统计量的 71%。流域在总输沙量大幅减少的情况下仍出现集中度增加的现象，表明极端产沙事件呈现增加趋势，是未来流域水沙管理中应重点加强防护的事件。

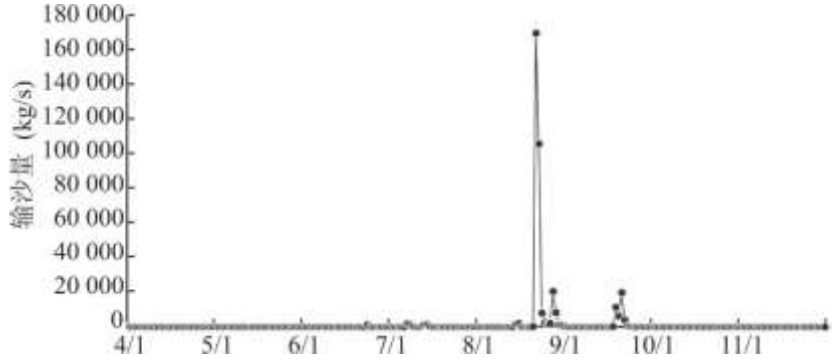

图 6 极端产沙情况下 1998 年逐日输沙量分布

3.2 水沙关系的时间变化特性

3.2.1 水沙关系曲线

1980～2018 年，涪江流域水沙关系符合幂指数关系(图 7)，决定系数 R^2 为 0.7355。39 年间，约有 90%的点集中在年输沙量≤0.2 亿 t、年径流量≤180 亿 m^3 的区域内。在水沙关系曲线中，表征外界影响的因子(a)数值为 3×10^{-12}，表征河流本身输沙能量的因子(b)数值为 4.8694。

为了解涪江流域 1980～2018 年水沙关系曲线中各参数的变化情况，按采用公式(6)计算径流-泥沙特征系数 a 和 b 值的变化规律。如图 8 所示，a 值在 1980～1997 年的平均值为 5.33×10^{-6}，1998～2012 年的平均值为 1.40×10^{-4}，2013～2018 年的平均值为 3.51×10^{-4}，总体均值为 1.10×10^{-4}，并逐年增加；b 值在 1980～1997 年的平均值为 2.84，1998～2012 年的平均值为 2.14，2013～2018 年的平均值为 1.91，总体均值为 2.43，并逐年下降。经 Mann-Kendall 趋势检验法判断，a 值呈显著性上升趋势并通过 99%的显著性检验，表明外界人为因素对涪江流域产流产沙特性的影响逐渐增加，这些因素可能包括水利水保工程、退耕还林还草工程[39]；b 值呈显著性下降趋势并通过 99%的显著性检验，说明河流本身的能量不断减少、河流的输沙能力和输沙特性逐渐降低，这与水动力因素、来沙综合条件、河道纵比降、土壤可蚀性、断面形态和糙率等内部因素相关[16]。

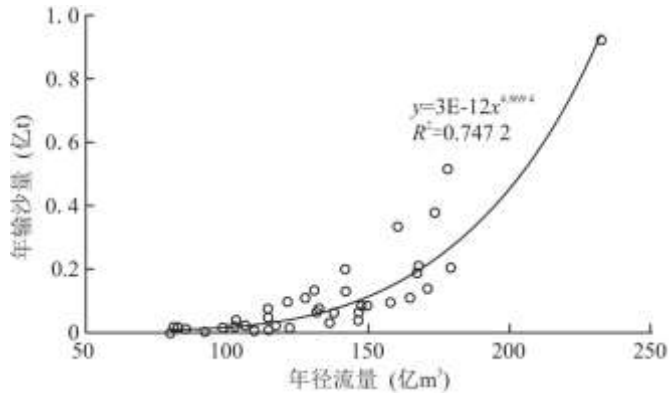

图 7 年径流量-年输沙量的水沙关系曲线

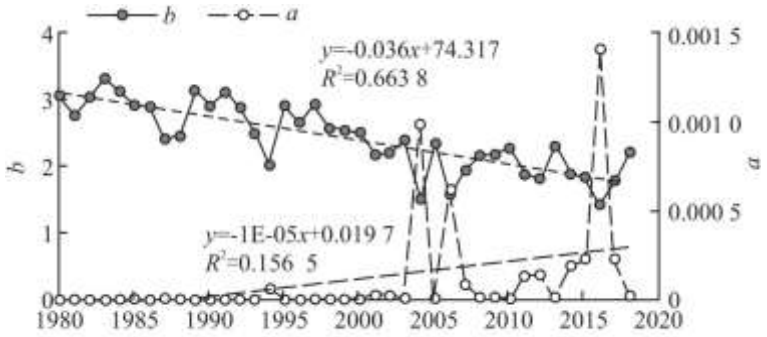

图 8 参数 a 和 b 的变化趋势

将参数 a 和参数 b 之间按照 3 个时间阶段分析二者关系(图 9)。1980～1997 年，b 值大而 a 值较小，1998～2012 年，b 值减小，a 值增大，2013～2018 年间，b 值变化不大而 a 值继续增加。a 值的持续增加表明外界因素对于涪江流域的影响在逐渐增加，例如天保工程、涪江水电站、武都水库工程的先后建成等人类活动因素，截止到 2019 年，涪江干支流兴建 10 多个电站、上千处防洪堤以及多个湿地公园，表明人类活动的影响不断增加。

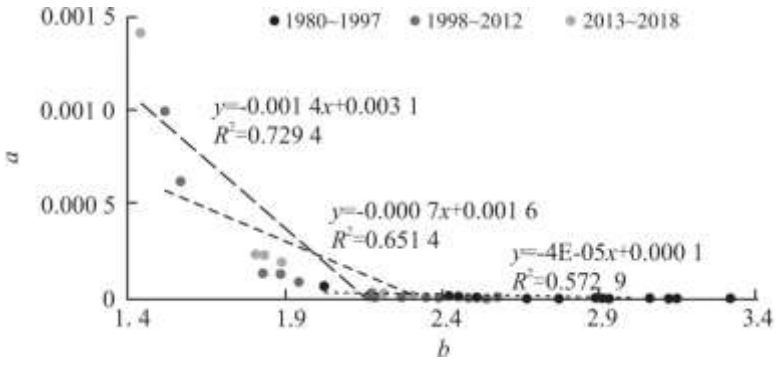

图 9 参数 a 和 b 的相关性

3.2.2C-Q 环路曲线

在洪水场次事件中，C-Q 环路曲线由于水沙关系的峰值滞后现象，会形成不同的 C-Q 环路类型[40],这可以解释泥沙输移过程在时空方面的联系和泥沙供给在时空方面的来源[41]。分析涪江流域的洪水场次事件，共发现五种 C-Q 环路类型：顺时针环路、逆时针环路、正“8”字形环路、逆“8”字形环路和线形环路。其中顺时针环路表示河流携带的泥沙增多，含沙量早于径流量达到峰值，逆时针环路表示河流输沙能力和传播速率降低，径流量早于含沙量达到峰值，正“8”字形环路表示洪水期的环路既在高径流时表现为逆时针，同时又在低径流时表现为顺时针，代表平缓且长久的泥沙，逆“8”字形环路代表短而急促的泥沙，与正“8”字形环路相反，两者是径流和泥沙的输移时间不同步造成的；线形环路代表径流量和含沙量的输移时间和变化比例同步。五种环路曲线见图 10 所示。

经统计，涪江流域在 1980～2018 年间的洪峰总量(4～11 月)为 234 个，三个不同时段的洪峰数分别为 125 个、77 个、32 个。分别计算三个时段内不同 C-Q 环路所占的洪水场次比例，结果如表 1 所示。在全时段内，C-Q 环路以顺时针环路为主，该环路呈下降趋势，表明支流供给更多沉积物的能力减弱，导致泥沙早于径流达到峰值的频率下降，这与图 8 中参数 a 的上升趋势相对应，外界人为因素对涪江流域产流产沙特性的干预力度加强，使得泥沙来源减少；逆时针环路呈上升趋势，表明流域的泥沙输送能力下降，导致泥沙晚于径流达到峰值的频率增大，这与图 8 中参数 b 的下降趋势相对应，即河流本身的输沙能力影响逐渐减弱，河流能量下降，沉积物的传播速率下降；“8”字形环路呈上升趋势，表明平缓长久和短暂急促的泥沙类型均有所增加；线形环路为偶然发生的小概率事件。综上可得，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

本研究采用差分法来定量计算各时段内降水因素和人类活动因素对该流域径流、输沙的影响程度。根据式(7)、(8)和(9)、(10),以 1980～1997 年的径流量、输沙量和降水量为基准，分别计算 1998～2012、2013～2017 年两个阶段内降水因素和人类活动因素对径流量、输沙量的影响程度。

首先在径流方面，1998～2012 年，降水因素影响减少的年均径流量为 23656.1 万 m^3,人类活动因素影响减少的年均径流量为 146429.9 万 m^3,两者总共减少 170086 万 m^3,并且降水因素和人类活动因素各占 13.91%、86.09%;2013～2017 年，降水因素影响减少的年均径流量为 34584.3 万 m^3,人类活动因素影响减少的年均径流量为 274315.3 万 m^3,两者总共减少 308899.6 万 m^3,并且降水因素和人类活动因素各占 11.20%、88.80%。可以看到，不管是在第一个阶段，还是在第二个阶段，涪江流域开发利用率都较高，人类的生产活动较多，对径流产生较大影响，是径流减少的主要因素。其次在输沙量方面，1998～2012 年，降水因素影响减少的年均输沙量为 24.5 万 t,人类活动因素影响减少的年均输沙量为 844.8 万 t,两者总共减少 869.3 万 t,并且降水因素和人类活动因素各占 2.81%、97.19%;2013～2017 年，降水因素影响减少的年均输沙量为 17.8 万 t,人类活动因素影响减少的年均输沙量

为 603.2 万 t,两者总共减少 621 万 t,并且降水因素和人类活动因素各占 2.87%、97.13%。尽管人类活动因素对输沙量减少的贡献率略微下降，但是在每个变化期，人类活动因素一直是输沙量减少的最主要因素，占主导地位。

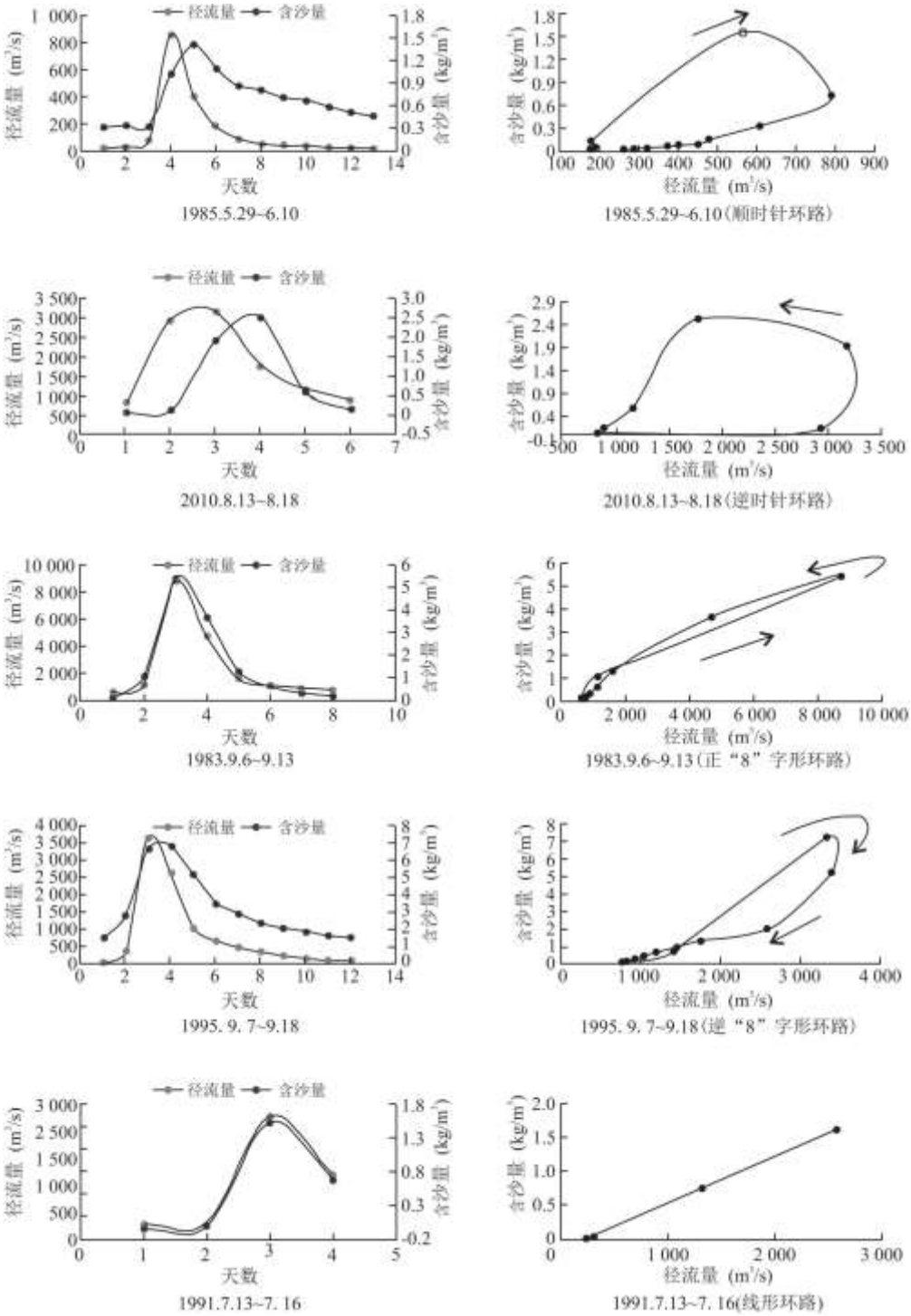

图 10 五种 C-Q 环路类型及其水沙趋势

表 1 不同时段 C-Q 环路所占比例

时段	顺时针	逆时针	逆“8”字形	正“8”字形	线形
1980～1997	50.4	27.2	8.8	11.2	2.4
1998～2012	44.2	28.6	11.7	15.5	0
2013～2018	40.6	31.3	12.5	15.6	0

4 结论

通过涪江流域 1980～2018 年径流量、输沙量数据，分析水沙序列和水沙关系在多时间尺度下的基本特性，并深入研究水沙变化的驱动因素和贡献率，得到的主要结论如下：

(1)涪江的年径流量、年输沙量均呈显著下降趋势，采用双累积曲线，发现突变年份，并将水沙时间序列分成 3 个阶段(1980～1997、1998～2012、2013～2018 年)。另外从月尺度和日尺度上，分别了解流域水沙的年内分配情况，发现流域径流和输沙量主要发生在 7、8、9 月，并且极端产沙事件呈现一定的增加趋势。

(2)从水沙关系曲线的角度来看，外界影响因子(a)呈显著上升趋势，河流输沙能力因子(b)呈显著下降趋势，说明外界因素对流域的影响逐渐增加，河流的输沙能力逐渐降低。从水沙环路曲线的角度来看，典型洪水场次下呈五种环路类型：顺时针、逆时针、正“8”字形、逆“8”字形和线形，其中，“8”字形环路和线形环路出现频次相对较少，水沙关系存在明显的滞后性，并以顺时针环路为主，表明河流携带更多泥沙量的能力减弱，逆时针环路其次，表明流域内泥沙输送能力下降。结合水沙关系曲线，顺时针环路的下降和逆时针环路的上升，分别对应人类活动、气候变化等外界因素(a)的增加和河流输沙能力(b)的降低。

(3)通过差分法来量化影响流域水沙变化的人类活动和气候变化两个因素，发现无论是对年径流量还是对年输沙量，人类活动因素始终是涪江流域水沙变化的主要驱动因素，占主导地位。

针对涪江流域的实际情况，本研究对于科学理解当前流域水沙关系特性和驱动因素以及未来水沙优化调控等具有重要意义，并为减少下游水库泥沙淤积、开展下游河流治理、水资源的开发利用等提供参考。

参考文献：

[1]邵雪杰，顾圣平，曹爱武，等.多沙河流水沙变化特征小波分析[J].长江科学院院报，2017,34(5):5-8.

[2]李朝月，方海燕.泰国蒙河流域水沙变化趋势及影响因素[J].应用生态学报，2020,31(2):590-598.

[3]陈真.大理河流域降雨及土地利用对水沙变化的影响研究[D].郑州：郑州大学，2019.

[4]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].杨凌：西北农林科技大学，2012.

[5]王霞，吴加学.基于小波变换的水沙关系特征分析：以长江大通站为例[J].海洋学研究，2009,27(2):16-22.

[6]隆院男，唐蓉，蒋昌波，等.近 60 年湘江流域水沙特性及其对人类活动的响应[J].农业工程学报，2018,34(24):132-143.

[7]罗蔚，张翔，邓志民，等.1956-2008年鄱阳湖流域水沙输移趋势及成因分析[J].水科学进展，2014,25(5):658-667.

[8]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.

[9]王小军，蔡焕杰，张鑫，等.皇甫川流域水沙变化特点及其趋势分析[J].水土保持研究，2009,16(1):222-226.

[10]周亮广，戴仕宝.近60年来淮河流域强降雨时空变化特征[J].南水北调与水利科技，2015,13(5):847-852.

[11]ZHANG L J,QIAN Y F.Annual distribution features of the yearly precipitation in China and their interannual variations[J].Acta Meteorological Sinica,2003,17(2):146-163.

[12]刘新有，何大明，袁树堂，等.怒江干流水沙年内分配特征及其变化趋势[J].水资源与水工程学报，2015,26(4):132-135.

[13]WARRICK JONATHAN A.Trend analyses with river sediment rating curves[J].Hydrological Processes,2015,29(6):936-949.

[14]刘彦，张建军，张岩，等.三江源区近数十年河流输沙及水沙关系变化[J].中国水土保持科学，2016,14(6):61-69.

[15]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):34-43.

[16]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(19):152-162.

[17]YANG C C,LEE K T.Analysis of flow-sediment rating curve hysteresis based on flow and sediment travel time estimations[J].International Journal of Sediment Research,2018,33(2):171-182.

[18]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.

[19]丁文峰，张平仓，任洪玉.近50年来嘉陵江流域径流泥沙演变规律及驱动因素定量分析[J].长江科学院院报，2008,25(3):23-27.

[20]姜泓旭，田鹏，穆兴民，等.不同时间尺度孤山川流域水沙关系变化及驱动因素[J].水土保持学报，2020,34(2):86-92.

[21]LI L,NI J R,CHANG F,et al.Global trends in water and sediment fluxes of the world’s large rivers[J].Science Bulletin,2020,65(1):62-69.

[22]田清.近60年来气候变化和人类活动对黄河、长江、珠江水沙通量影响的研究[D].上海：华东师范大学，2016.

[23]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，2018,43(6):54-60.

[24]任实，刘亮.三峡水库泥沙淤积及减淤措施探讨[J].泥沙研究，2019,44(6):40-45.

[25]王渺林，郭丽娟，朱辉.涪江流域气候及径流变化趋势[J].人民长江，2006,37(12):44-46.

[26]张馨文，黄河.小河坝水文站浊度与含沙量比测的分析研究标准[J].中国标准化，2016,15:248-249.

[27]MARTIN-VIDE J.Spatial distribution of a daily precipitation concentration index in peninsular Spain[J].International Journal of Climatology,2004,24(8):959-971.

[28]ASSELMAN N.Fitting and interpretation of sediment rating curves[J].Journal of Hydrology,2000,234(3-4):228-248.

[29]SYVITSKI J P,MOREHEAD M D,BAHR D B,et al.Estimating fluvial sediment transport:The rating parameters[J].Water Resources Research,2000,36(9):2747-2760.

[30]YANG G F,CHEN Z Y,YU F L,et al.Sediment rating parameters and their implications:Yangtze River,China[J].Geomorphology,2007,85(3):166-175.

[31]ZHANG H L,MENG C C,WANG Y Q,et al.Comprehensive evaluation of the effects of climate change and land use and land cover change variables on runoff and sediment discharge[J].Science of the Total Environment,2020,702,134401.

[32]PANG J Z,ZHANG H L,XU Q X,et al.Hydrological evaluation of open-access precipitation data using SWAT at multiple temporal and spatial scales[J].Hydrology and Earth System Sciences,2020,24,3603-3626.

[33]ZHANG H B,LI Z H,XI Q Y,et al.Modified over-whitening process and its application in Mann-Kendall trend tests[J].Journal of Hydroelectric Engineering,2018,37(6):34-46.

[34]MENG C C,ZHANG H L,WANG Y J,et al.Contribution analysis of the spatial-temporal changes in streamflow in a typical elevation transitional watershed of southwest China over the past six decades[J].Forests,2019,10(6):495.

[35]许全喜，陈松生，熊明，等.嘉陵江流域水沙变化特性及原因分析[J].泥沙研究，2008,33(2):1-8.

[36]袁晶，许全喜，熊明，等.嘉陵江流域水库拦沙及其减沙贡献权重研究[J].人民长江，2019,50(11):24-29.

[37]张地继，董炳江，杨霞，等.三峡水库库区沙峰输移特性研究[J].人民长江，2018,49(2):23-28.

[38]董炳江，张欧阳，许全喜，等.2018 年汛期三峡水库上游暴雨产沙特性研究[J].人民长江，2019,50(12):21-25.

[39]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.

[40]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.

[41]AICH V,ZIMMERMANN A,ELSENBEER H.Quantification and interpretation of suspended-sediment discharge hysteresis patterns:How much data do we need?[J].Catena,2014,122(12):120-129.