

文章编号: 1008-2786-(2020)3-339-10

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000514

近 60 年来嘉陵江流域水沙变化特征

李怡颖^{1,2}, 范继辉^{1*}, 廖莹^{1,2}

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所 山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 嘉陵江是长江上游流量较大的一条支流,也是三峡水库重要的泥沙来源地,近年来,流域内产流产沙规律均发生了显著变化。本文基于 Spearman 相关分析、Mann-Kendall 检验等方法,分析了北碚站 1954—2017 年间径流、泥沙序列变化特征,并结合气象要素、人类活动情况等讨论了主要影响因素。结果表明:(1)近 60 年来嘉陵江流域径流量呈微弱下降趋势,而输沙量呈大幅度下降趋势,近年来的输沙量延续了前 50 年的下降趋势;(2)径流量分别在 1967 年和 1985 年发生突变,输沙量在 1968 年发生突变($p < 0.05$);(3)降水主要影响嘉陵江流域径流量变化,而生态工程建设、水利工程运行等人类活动是输沙量减少的主要因素,在减沙贡献中,水利工程的减沙效益大于生态工程。本文的研究结果对于防洪、河道整治和河流管理具有指导意义。

关键词: 径流量;输沙量;变化特征;影响因素;嘉陵江

中图分类号: P333.4

文献标志码: A

嘉陵江是长江第二大支流,也是三峡水库的重要水沙来源地^[1],流域内水沙动态变化对三峡水利枢纽效益的发挥有重要影响。近年来,嘉陵江流域呈现出气温上升、降水减少且降水年内分配更为集中的趋势^[2],引起流域水循环过程和区域水资源分布发生变化^[3]。与此同时,随着“长江上中游水土保持重点防治工程”^[4]、“天然林资源保护工程”、“退耕还林(草)工程”^[5]等一系列生态工程的实施,嘉陵江流域生态环境得到显著改善,但由于土地利用、植被覆被等下垫面状况的改变,流域产流汇流过程也发生明显变化^[6]。为充分利用水能资源,亭子口、宝珠寺、草街等一批水利工程相继建设并投入使用,这些水利工程在改变径流过程的同时,也拦蓄了泥沙,减少了河道输沙量。可见,近半个世纪以来,在

气候变化和人类活动的影响下,嘉陵江流域产流规律和输沙过程都发生了显著变化,因此开展嘉陵江流域径流、泥沙变化特征分析,并探究主要影响因素,对于防洪、河道整治和河流管理具有重要的指导意义^[7]。

已有学者对嘉陵江流域开展了径流、泥沙变化趋势的相关研究^[8]。北碚站 1956—2000 年的实测数据表明,嘉陵江流域近 50 年来径流量无明显变化趋势,但输沙量显著下降^[9]。径流—输沙双累积曲线结果表明,嘉陵江流域输沙量在 1984 年后呈明显减少的趋势^[10]。不少学者认为北碚站输沙量减少的原因主要有降水变化、水利和水保工程实施、河道泥沙淤积以及不规范的河道采砂等^[11]。已有的研究都是将北碚站长时间序列数据作为一个整体进行分析,未考虑不同时段的发展趋势差异及原因,且研究时

收稿日期(Received date):2019-08-28;改回日期(Accepted date):2020-05-14

基金项目(Foundation item):中科院山地所“一三五”重点培育方向性项目(SDS-135-1702);国家自然科学基金项目(41871072)。[The 135 Strategic Program of the IMHE, CAS (SDS-135-1702); National Natural Science Foundation of China (41871072)]

作者简介(Biography):李怡颖(1996-),女,云南曲靖人,硕士生,主要研究方向:生态水文水资源。[LI Yiyi(1996-), female, born in Qujing, Yunnan province, M. Sc. candidate, research on ecological hydrology and water resources] E-mail:liyiyi18@mails.ucas.ac.cn

* 通讯作者(Corresponding author):范继辉(1980-),男,河南开封人,博士,副研究员,主要研究方向:生态水文学和水文水资源。[FAN Jihui (1980-), male, born in Kaifeng, Henan province, Ph. D., associate professor, research on ecological hydrology and water resource] E-mail: jhfan@imde.ac.cn

段多集中在 2010 年前,近几年的相关研究较少。因此本文基于嘉陵江北碛站 1954—2017 年的径流、泥沙数据,开展长时间序列的变化趋势研究,分析不同时段突变特征,明确突变前后变化趋势与总体变化趋势差异,揭示近 60 年来嘉陵江水沙变化规律,探究引起水沙变化的自然和人为因素,从而更合理地开发利用水沙资源。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

嘉陵江发源于陕西省秦岭山脉,经甘肃、四川,于重庆朝天门汇入长江(见图 1),干流全长 1345 km,集水面积约 15.6 万 km²,多年平均径流量 655.2 亿 m³,多年平均输沙量 967 万 t^[12],河流大部分流经四川盆地,属亚热带季风气候,雨量较为充沛,年均降水量 1000 mm^[9,13]。流域内的嘉陵江干流、涪江、渠江等几大水系汇合于重庆合川并呈扇状分布,干流以广元为界,上部河谷狭窄,广元以下河谷比较开阔^[14],河床比降较大,地形从深丘到浅丘逐步过渡,河曲、阶地等地质构造发育良好^[13-15]。

嘉陵江水能资源储藏量约 1525 万 kW,目前已开发小水电站 91 处,设计总装机 52 万 kW、年发电量 27 亿 kW·h^[16]。位于川中盆地的嘉陵江流域人口稠密、土地垦殖率高,但由于土壤层薄、地层岩石裸露、流域内森林覆盖率较低,大量的工程活动在带来经济效益的同时也使得土壤退化、土地质量下降,导致流域内水土流失严重、地质灾害频发。近年来,随着一系列生态工程的实施,流域内生态环境逐渐变好。据第一次全国水利普查数据^[17],长江流域水土流失面积 38.46 万 km²,在全国第二次水土流失遥感数据的基础上减少了 14.62 万 km²,共营造水土保持林 7264.16 km²,实施生态修复 2.53 万 km²,保土耕作 4178.45 km²。

1.2 数据及来源

本文选取北碛站作为嘉陵江流域控制站点进行研究。北碛站的径流、输沙数据来自《中华人民共和国水文年鉴》;嘉陵江流域 9 个气象站(见图 1)的气象数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>);流域年降水量由 9 个站点数据在 ARCGIS 中采用空间插值的方式获得。所有数据年限均为 1954—2017 年。

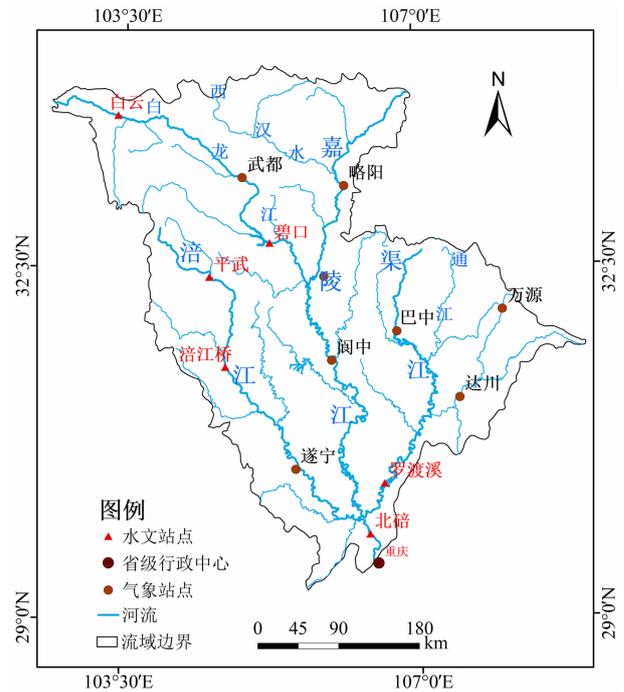


图 1 嘉陵江流域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the Jialing River Basin, China

2 主要研究方法

2.1 Mann-Kendall 趋势检验

Mann-Kendall 趋势检验(以下简称 M-K 趋势检验)能有效区分径流、泥沙是否存在明显的变化趋势^[18-19]。对于时间序列 X , M-K 趋势检验的检验统计量 S 如下:

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n \text{sign}(X_i - X_j) \quad (1)$$

当 $X_i - X_j$ 小于、等于或大于 0 时^[11], $\text{sign}(X_i - X_j)$ 值分别为 -1, 0 或 1。 S 的均值为 0, 当 $n > 10$ 时, 其方差及标准化统计量为:

$$\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18 \quad (2)$$

$$\begin{cases} Z = (S - 1) / \sqrt{\text{Var}(S)}, & S > 0 \\ Z = 0, & S = 0 \\ Z = (S + 1) / \sqrt{\text{Var}(S)}, & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

在一定的置信区间内, $Z > 0$ 序列呈上升趋势, $Z < 0$ 呈下降趋势, $|Z|$ 大于等于 1.28、1.64、2.32 表示分别通过了信度 90%、95%、99% 的显著性检验。

2.2 Mann-Kendall 突变检验

Mann-Kendall 突变检验(以下简称 M-K 突变检验)可确定径流、泥沙发生突变的时间、次数,从而

分析其变化规律,该方法不要求所选取的变量符合特定分布,也避免了异常值的干扰^[20]。

定义原始时间序列 $\{x_k\}$ ($k = 1, 2, 3, \dots, n$) 构建新的序列:

$$d_k = \sum_{i=1}^k m_i \quad (1 \leq k \leq n) \quad (4)$$

式中,序列 $\{m_i\}$ 表示 $x_i > x_k$ ($1 \leq k \leq n$) 的累积数, d_k 的均值、方差和标准化统计量分别为:

$$E(d_k) = k(k-1)/4 \quad (5)$$

$$\text{Var}(d_k) = k(k-1)(2k+1)/72 \quad (6)$$

$$UF_k = (d_k - E(d_k)) / \sqrt{\text{Var}(d_k)} \quad (7)$$

构建逆序列 $UB_k = -UF_k$, 在 95% 置信区间内, 计算临界值 $U_{0.05} = \pm 1.96$ 。将序列曲线 UF 、 UB 绘制于同一坐标系下, $UF > 0$, 序列呈上升趋势; $UF < 0$, 呈下降趋势; 超过临界直线 $U_{0.05}$ 时, 则上升或下降趋势显著; 若曲线 UF 、 UB 在临界直线 $U_{0.05}$ 之间相交, 则交点即为突变点^[21]。

2.3 相关分析

用 Spearman 相关分析嘉陵江流域降水量与径

流量、输沙量的相关关系,进而分析影响水沙变化的原因。在一定的置信区间内,分别计算降水量与径流量、输沙量的相关系数 r ,若 $r > 0$,二者呈正相关; $r < 0$,二者呈负相关; $r = 0$,则二者不相关。

3 结果与分析

3.1 嘉陵江流域径流量变化特征

径流量 M-K 趋势检验结果见图 2a, 在 95% 的置信区间内, $Z = -2.11$, $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$, 表明 1954—2017 年间北碚站径流量呈显著下降趋势。经 M-K 突变检可知, 1954—2017 年间北碚站径流过程发生了两次突变, 突变年份分别为 1967 年、1985 年(图 2b)。径流量不同时段的结果(图 2a、表 1)表明, 突变前后径流量发生了显著变化, 但不同时段径流量变化趋势与总序列不同。3 个时段内均呈上升趋势, 其中 1968—1985 年间上升趋势最为明显, 1986—2017 年间上升趋势较缓。与前 50 年相比, 2010—2017 年径流量发生变化, 呈明显下降趋势。分段趋势上升而总体趋势下降可能是 1986—2017

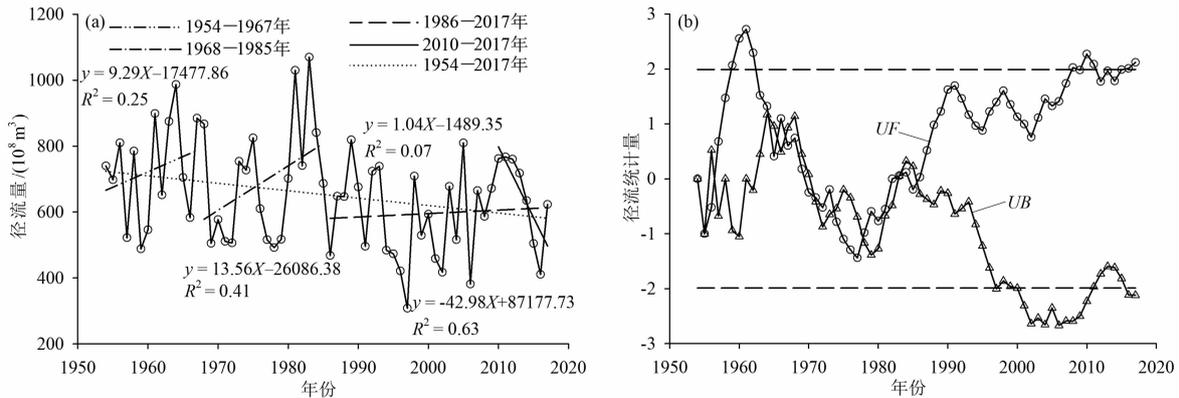


图 2 1954—2017 年嘉陵江流域年均径流量变化:(a)突变前后径流量随时间的变化趋势;(b)径流量 M-K 检验统计图

Fig. 2 Variation of annual runoff in the Jialing River Basin from 1954 to 2017:

(a) variation trend of runoff with time before and after change; (b) statistics of Mann-Kendall test about runoff

表 1 嘉陵江流域 1954—2017 年径流量变化特征

Tab. 1 Characteristics of runoff in the Jialing River Basin from 1954 to 2017

时段	年均径流量/(10 ⁸ m ³)	极值比	变差系数	M-K 趋势检验	显著性水平	变化趋势
1954—2017 年	652.38	3.47	0.25	-2.11	0.05	下降
1954—1967 年	726.79	2.02	0.21	1.04	0.10	上升
1968—1985 年	693.22	2.17	0.26	1.44	0.10	上升
1986—2017 年	596.85	2.66	0.23	0.18	0.10	微弱上升
2010—2017 年	647.56	1.87	0.21	-2.61	0.01	下降

年径流量的上升趋势突然变小,从而抵消了1954—1985年较大幅度的径流量上升趋势,说明1954—2017年间径流量呈波动式的下降趋势。

3.2 嘉陵江流域输沙量变化特征

输沙量 M-K 趋势检验结果见图 3a, 在 95% 的置信区间内, $Z = -6.84$, $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$, 说明 1954—2017 年间北碚站输沙量呈显著下降趋势。M-K 突变检验表明, 1954—2017 年输沙量在 1968 年发生突变 (图 3b)。不同时段统计结果表明 (图 3a、表 2), 突变前后输沙量发生了显著变化, 输沙量减少了 54.5%, 减沙的幅度明显。由突变点确定的 2 个时段输沙量变化趋势与总序列有所不同, 1954—1968 年呈上升趋势, 1969—2017 年呈下降趋势。2010—2017 年输沙量呈明显下降趋势, 与前 50 年的变化趋势一致。一般来说, 在河流泥沙运动中, 输沙量变化与径流量变化具有趋同性^[22-23], 嘉陵江北碚站输沙量与径流量变化趋势并不一致, 充分说明了嘉陵江减沙的事实。

3.3 嘉陵江流域水沙变化影响因素定量分析

为估算 1954—2017 年径流、输沙的变化量, 将

突变年份设为临界年份, 建立临界年份前径流量—降水量、输沙量—降水量双累积曲线拟合方程来估算累积值并与实测累积值进行对比 (图 4), 结果如表 3 所示, 与计算值相比, 径流累积量减少了 7.6%, 输沙累积量减少了 38.5%。将临界年份后的降水以大型水利工程建设年份为节点分段并代入表 3 的回归方程, 得到表 4、表 5 中年均径流和年均输沙的计算值。表中不同时段的实测值之差即为实际减少量, 不同时段计算值之差为降水的影响量, 同一时段计算值与实测值的差值为人类活动的影响量, 其与同期计算值的比值, 即为人类活动的减水/减沙效益。在 1986—1998 年内, 降水对径流的贡献率占据主导地位, 而在 1999 年以后, 降水的减水贡献率逐渐弱化, 最终低于人类活动的减水贡献率, 在 2011 年以后尤为明显, 而人类活动的减水效益从 1985 年以后基本维持在 10% 左右; 在临界年份后, 人类活动始终主导着输沙量的变化, 减沙贡献率均在 80% 以上, 2011 年来人类活动的减沙率逐渐趋近于 1, 减沙效益也呈现递增的趋势。

表 2 嘉陵江流域 1954—2017 年输沙量变化特征

Tab. 2 Characteristics of sediment yield in the Jialing River Basin from 1954 to 2017

时段	年均输沙量/(10^8 t)	极值比	变差系数	M-K 趋势检验	显著性水平	变化趋势
1954—2017 年	0.91	356.00	0.78	-6.84	0.01	下降
1954—1968 年	1.56	3.01	0.31	0.69	0.01	上升
1969—2017 年	0.71	356.00	0.93	-5.49	0.01	下降
2010—2017 年	0.27	56.50	0.85	-2.61	0.01	下降

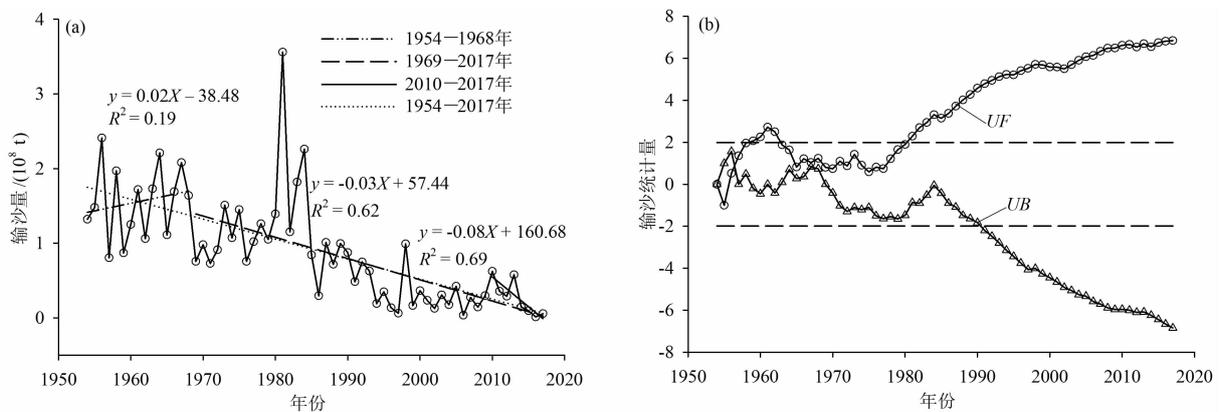


图 3 1954—2017 年嘉陵江流域年均输沙量变化: (a) 突变前后输沙量随时间的变化趋势; (b) 输沙量 M-K 检验统计图

Fig. 3 Variation of annual sediment yield in the Jialing River Basin from 1954 to 2017;

(a) variation trend of sediment yield with time before and after change; (b) statistics of Mann-Kendall test about sediment yield

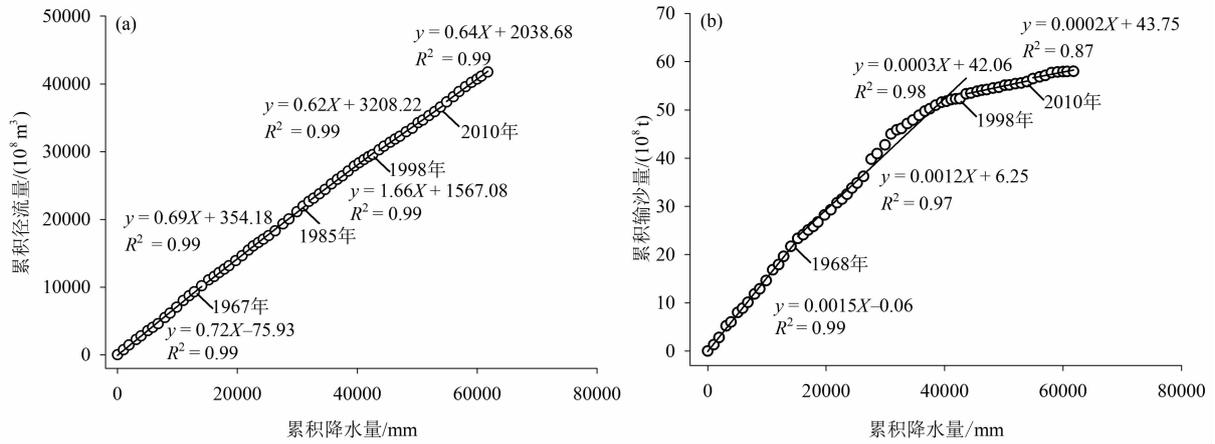


图4 嘉陵江流域水沙双累积曲线:(a)径流量—降水量双累积曲线;(b)输沙量—降水量双累积曲线

Fig.4 Double cumulative curve of streamflow and sediment in the Jialing River Basin:

(a) double cumulative curve of runoff-precipitation; (b) double cumulative curve of sediment yield-precipitation

表3 径流量—降水量、输沙量—降水量双累积曲线线性回归估算

Tab.3 Linear regression of double cumulative curve about runoff-precipitation and sediment yield-precipitation

回归方程	计算累积值	实测累积值	累积减少量	减少百分数/%
$\sum R = 0.73174 \sum P - 7.1241$	45185.30	41752.30	3433.00	7.60
$\sum S = 0.00153 \sum P + 0.005809$	94.50	58.10	36.40	38.50

注:P为年均降水量(mm),R为年均径流量($10^8 m^3$),S为年均输沙量($10^8 t$)。

表4 嘉陵江流域径流量变化原因分析

Tab.4 Analysis on causes about variation of runoff in the Jialing River Basin

时段	实测量/ $(10^8 m^3)$	计算量/ $(10^8 m^3)$	实测减少量/ $(10^8 m^3)$			减水效益/%
			减少总量	降水影响量	人类活动影响量	
1967年前	726.78	726.78				
1967—1985年	693.22	719.99	33.56	6.79	26.77	3.70
1986—1998年	585.54	651.37	141.24	75.41	65.83	10.11
1999—2010年	589.10	680.67	137.68	46.12	91.57	13.45
2011—2017年	631.16	709.42	95.62	17.36	78.26	11.03

表5 嘉陵江流域输沙量变化原因分析

Tab.5 Analysis on causes about variation of sediment yield in the Jialing River Basin

时段	实测量/ $(10^8 t)$	计算量/ $(10^8 t)$	实测减少量/ $(10^8 t)$			减沙效益/%
			减少总量	降水影响量	人类活动影响量	
1968年前	1.56	1.55				
1969—1998年	1.00	1.46	0.56	0.10	0.46	31.31
1999—2010年	0.26	1.44	1.29	0.11	1.18	81.99
2011—2017年	0.22	1.50	1.34	0.05	1.28	85.37

4 讨论

嘉陵江流域近 10 年来输沙量的变化延续了 2010 年前的下降趋势,但径流量的变化与 2010 年前的变化不同,呈明显的下降趋势,可能是近几年的径流量急剧减少造成的;径流量突变特征与陈吉琴等^[24]的结果较接近,但与范利杰、高鹏等^[14,20]的结论差别较大,输沙量突变特征与丁文峰^[11]的结论一致。这些差异可能是资料来源、数据年限、分析方法等不同造成的,需结合影响水沙变化的自然和人为因素去讨论,其中自然因素包括地形地质、植被覆盖、气候条件、自然灾害等^[9],但地形地质等短期不易发生改变,因此主要考虑气候条件,其中对流域径流量和输沙量的影响最大的为降水;人为因素主要有生态工程、水利工程建设^[11]、人类生产生活等。

4.1 降水对径流量和输沙量的影响

降水作为流域径流的主要来源,控制着径流量的大小,同时也是土壤侵蚀的关键驱动因子,影响着侵蚀产沙量。M-K 突变检验结果表明,降水量在 1992 年发生突变,丁文峰^[11]等发现径流量在 1993 年发生突变,说明径流与降水变化具有较大的相似性,但降水出现极值的年份与高鹏等^[14]的结论不一致,可能是数据差异造成的。径流量—降水量、输沙量—降水量的相关分析结果如表 6、图 5 所示,径流、输沙与降水均呈正相关关系($p < 0.01$),二者随

降水的增加而增加,这延续了许炯心、许全喜的研究结果^[8-9],在突变后两两相关关系均发生明显改变,输沙量—降水量关系变化更大,说明降水不是流域输沙量的唯一影响因素。

表 6 嘉陵江流域径流量—降水量、输沙量—降水量相关关系

水文要素	统计年份	相关系数 r	显著性水平	拟合优度 R^2
径流量—	1954—1992 年	0.92	0.0001	0.83
降水量	1993—2017 年	0.79	0.0001	0.72
输沙量—	1954—1992 年	0.74	0.0001	0.57
降水量	1993—2017 年	0.61	0.0100	0.24

4.2 人类活动对径流量和输沙量的影响

近年来,嘉陵江流域的大量生产生活耗水使得流域径流量发生较大变化^[25],房屋、道路建设用砂也必然加快河道采砂速度,导致下游河道泥沙淤积,改变河流的泥沙输移量,同时加快地表蒸散,间接地影响流域径流量^[26-27]。此外,众多库、坝、塘等水利工程及生态保护工程的实施除直接改变水库库容、调节径流和输沙外,还会使得中下游地区石质裸露,河道面受到不同程度的干扰,进而改变下游来水来沙量。为量化工程建设对流域径流量、输沙量的影响,建立图 6 所示的 1954—2017 年输沙量—径流量

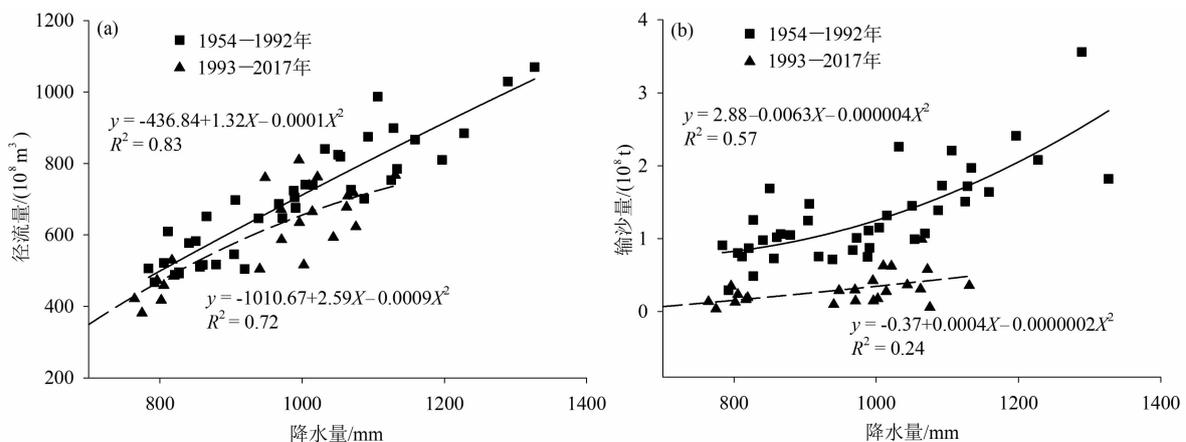


图 5 嘉陵江流域水沙相关关系:(a)径流量—降水量相关关系;(b)输沙量—降水量相关关系

Fig. 5 Correlation of streamflow and sediment in the Jialing River Basin:

(a) correlation of runoff-precipitation; (b) correlation of sediment yield-precipitation

双累积曲线,流域水沙趋势在 1981 年、1989 年、1998 年和 2013 年出现明显转折,这与许全喜^[28]、丁文峰等^[11]发现的转折年份一致,但与齐梅兰^[22]的结果完全不同。结合工程建设情况分析发现,1981 年和 2013 年的变化可能是水利工程建设引起的,1989 年和 1998 年的变化可能分别是“长治”工程、“天保”工程以及大规模的水库、水电站建设造成的^[26]。对流域工程建设后的水沙变化及二者与水库库容的相关分析结果进行统计(表 7、表 8、表 9),结果表明,工程实施后径流量平均减少了 5.06%,输沙量平均减少了 47.49%;库容量与径流量、输沙量均呈明显的负相关关系,与输沙量的相关性更强,说明水利工程的减沙效益在工程建设中占主导地位,生态工程次之,但二者的减水效益还需进一步开展研究。

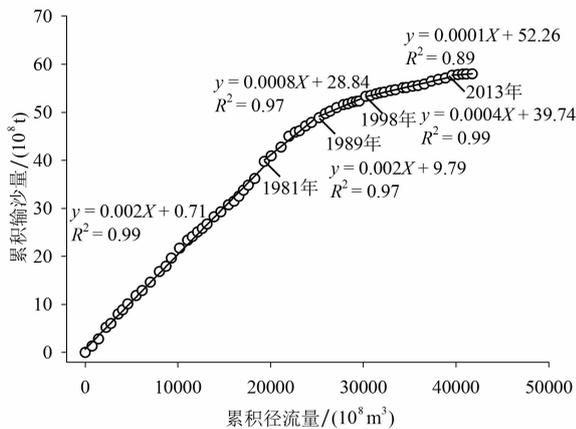


图 6 嘉陵江流域 1954—2017 年输沙量—径流量双累积曲线

Fig. 6 Double accumulation curve of runoff and sediment yield in the Jialing River Basin from 1954 to 2017

表 7 嘉陵江流域工程建设前后径流量对比结果

Tab. 7 Comparative results of runoff under the ecological engineering construction in the Jialing River Basin

统计时段	年均径流量/(10 ⁸ m ³)	建设前后相对差/%
1954—1981 年	689.79	—
1982—1989 年	740.13	-6.81
1990—1998 年	558.89	24.49
1999—2013 年	620.98	-9.99
2014—2017 年	543.15	12.53

5 结论

本文根据嘉陵江流域北碚站 1954—2017 年径流量、输沙量数据,采用 3 种统计学分析方法对嘉陵江北碚站水沙变化特征以及影响因素进行分析,得出以下几个结论:

表 8 嘉陵江流域工程建设前后输沙量对比结果

Tab. 8 Comparative results of sediment yield under the ecological engineering construction in the Jialing River Basin

统计时段	年均输沙量/(10 ⁸ t)	建设前后相对差/%
1954—1981 年	1.41	—
1982—1989 年	1.14	19.15
1990—1998 年	0.51	55.26
1999—2013 年	0.29	43.14
2014—2017 年	0.08	72.41

表 9 嘉陵江流域径流量—库容量、输沙量—库容量相关关系

Tab. 9 Correlation between runoff-reservoir and sediment yield-reservoir in the Jialing River Basin

水文要素	Spearman 相关系数 r	相关性	显著性水平
径流量—库容量	-0.25	负相关	0.05
输沙量—库容量	-0.81	负相关	0.01

(1) Mann-Kendall 趋势检验结果表明:1954—2017 年径流量总体呈微弱的下降趋势但各突变点前后均呈上升趋势;输沙量总体呈大幅度下降趋势,突变前后分别呈上升、下降的趋势,近几年来输沙量延续了前 50 年的下降趋势。

(2) 经 Mann-Kendall 突变检验可知,1954—2017 年间径流量发生了两次突变,突变年份分别为 1967 年、1985 年,输沙量在 1968 年发生突变。

(3) 径流量—降水量、输沙量—降水量双累积曲线拟合估算结果表明,径流实测累积量和输沙实测累积量分别减少了 7.6%、38.5%;降水的减水贡献率在 1999 年以后逐渐弱化,最终小于人类活动的减水贡献率,但人类活动的减沙贡献率始终大于降水的减沙贡献率。

(4) 径流量—输沙量双累积曲线和 Spearman 相关分析结果发现,降水与径流、输沙呈正相关关系 ($p < 0.01$),降水对径流的影响大于对输沙的影响;工程建设后径流量平均减少了 5.06%,输沙量平均减少了 47.49%,在水沙变化贡献中,水利工程的减沙效益大于生态工程。

参考文献 (References)

- [1] 张明波,郭海晋,徐德龙,等. 嘉陵江流域水保治理水沙模型研究与应用[J]. 水土保持学报,2003,17(5):110-113. [ZHANG Mingbo, GUO Haijin, XU Delong, et al. Research and application on runoff and sediment models on Jialing river basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(5): 110-113]
- [2] 向田恬,陈华,郭家力,等. 气候变化对嘉陵江流域降水变化影响分析[J]. 南水北调与水利科技,2010,8(1):75-77. [XIANG Tiantian, CHEN Hua, GUO Jiali, et al. Impact of climate change on prediction of precipitation in Jialing river of the upper Yangtze river basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(1): 75-77]
- [3] 王莺,王劲松,武明,等. 土地利用和气候变化对嘉陵江流域水文特征的影响[J]. 水土保持研究,2019,26(1):135-142. [WANG Ying, WANG Jinsong, WU Ming, et al. Impacts of the land use and climate changes on the hydrological characteristics of Jialing river basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(1): 135-142]
- [4] 乔殿新,鲁胜力,王莹. 贯彻新水土保持法做好水保规划工作[J]. 中国水土保持,2011(10):1-3. [QIAO Dianxin, LU Shengli, WANG Ying. Implement the new "Law of Water and Soil Conservation" and do well the water conservation planning work[J]. Soil and Water Conservation in China, 2011(10): 1-3]
- [5] 王鸽,韩琳,唐信英,等. 金沙江流域植被覆盖时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境,2012,21(10):1191-1196. [WANG Ge, HAN Lin, TANG Xinying, et al. Temporal and Spatial Variation of Vegetation in the Jinsha River Basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(10): 1191-1196]
- [6] 吴燕锋,章光新. 湿地生态水文模型研究综述[J]. 生态学报,2018,38(7):2588-2598. [WU Yanfeng, ZHANG Guangxin. Review of development, frontiers and prospects of wetlands eco-hydrological models[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(7): 2588-2598]
- [7] ZHANG Qiang, XU Chongyu, Becker S, et al. Sediment and runoff changes in the Yangtze River basin during past 50 years[J]. Journal of Hydrology, 2006, 331(3): 511-523.
- [8] 许炯心,孙季. 嘉陵江流域年径流量的变化及其原因[J]. 山地学报,2007,25(2):153-159. [XU Jiogxin, SUN Ji. Temporal variation in annual water yield of the Jialingjiang river and the formative causes[J]. Mountain Research, 2007, 25(2): 153-159]
- [9] 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(2):1-8. [XU Quanxi, CHEN Songsheng, XIONG Ming, et al. Analysis on runoff and sediment characteristics and affecting factors of the Jialing River Basin[J]. Journal of Sediment Research, 2008(2): 1-8]
- [10] 张信宝,文安邦. 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. [ZHANG Xinbao, WEN Anbang. Variations of sediment in upper stream of Yangtze River and its tributary[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(4): 56-59]
- [11] 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. [DING Wenfeng, ZHANG Pingcang, REN Hongyu. Quantitative analysis on evolution characteristics and driving factors of annual runoff and sediment transportation changes for Jialing river[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25(3): 23-27]
- [12] 中华人民共和国水利部. 中国河流泥沙公报[M]. 北京:中国水利水电出版社,2018:2-10. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Chinese River Sediment Bulletin[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2018:2-10]
- [13] 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. [LI Jinlin, WEI Jie. Features of river system morphology and its response to sediment yield in the Jialing river basin, China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(5): 7-13]
- [14] 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,2010,17(4):57-61. [GAO Peng, MU Xingmin, WANG Wei. Trend and driving force analyses of streamflow and sediment discharge in Jialing river[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(4): 57-61]
- [15] 张跃华. 嘉陵江流域径流量变化规律及其对气候变化的响应[D]. 重庆:西南大学,2012:14-16. [ZHANG Yuehua. The runoff change characteristics and their responses to climate change in the Jialing river basin[D]. Chongqing: Southwest University, 2012:14-16]
- [16] 胡碧玉. 流域经济论[D]. 成都:四川大学,2004:259-261. [HU Biyu. On drainage area economy[D]. Chengdu: Sichuan University, 2004:259-261]
- [17] 中华人民共和国水利部,中华人民共和国国家统计局. 第一次全国水利普查公报[M]. 北京:中国水利水电出版社,2013:7-8. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, National Bureau of Statistics of the People's Republic of China.

- Bulletin of First National Census for Water [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2013: 7-8]
- [18] 邱治军. 海南尖峰岭热带山地雨林生态系统水文特征与演变规律[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011: 92-93. [QIU Zhijun. Hydrological characteristics and evolution of tropical mountain rainforest ecosystem in Jianfengling, Hainan [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2011: 92-93]
- [19] 章诞武, 丛振涛, 倪广恒. 基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析[J]. 水科学进展, 2013, 24(4): 490-496. [ZHANG Danwu, CONG Zhenhao, NI Guangheng. Comparison of three Mann-Kendall methods based on the China's meteorological data [J]. Advances in Water Science, 2013, 24(4): 490-496]
- [20] 范利杰, 穆兴民, 赵广举. 近50a嘉陵江流域径流变化特征及影响因素[J]. 水土保持通报, 2013, 33(1): 12-17. [FAN Lijie, MU Xingmin, ZHAO Guangju. Runoff variation and its impacting factor during 1960-2009 in Jialing river basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(1): 12-17]
- [21] 刘新有, 何大明. 怒江流域悬移质输沙时空分布特征及变化趋势[J]. 地理学报, 2013, 68(3): 365-371. [LIU Xinyou, HE Daming. Temporal and spatial distribution and its change trend of suspended sediment transport in the Nujiang River Basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(3): 365-371]
- [22] 齐梅兰, 戴会超. 嘉陵江流域水沙变化趋势及其对长江宜昌站的影响[J]. 水利水电技术, 2005, 36(6): 25-27. [QI Meilan, DAI Huichao. Runoff and sedimentation variation tendency in Jialing River and its effects on Yichang reach of Yangtze River [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36(6): 25-27]
- [23] 孙长安. 香溪河流域土地利用与水土流失的关系研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008: 84-85. [SUN Changan. Study on the relationship between land use and soil and water loss in Xiangxi Watershed [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008: 84-85]
- [24] 陈吉琴, 宋萌勃. 嘉陵江流域北碚站径流变化趋势分析[J]. 黄河水利职业技术学院学报, 2014, 26(4): 18-20. [CHEN Jiqin, SONG Mengbo. Analysis of runoff change trend of Beibei Station in Jialing River Basin [J]. Journal of Yellow River Conservancy Technical Institute, 2014, 26(4): 18-20]
- [25] 徐伟, 董增川, 付晓花, 等. 滦河流域生态流量保证程度分析[J]. 人民长江, 2015, 46(24): 13-16. [XU Wei, DONG Zengchuan, FU Xiaohua, et al. Analysis of guarantee degree of ecological flow in Luanhe River [J]. Yangtze River, 2015, 46(24): 13-16]
- [26] LIU Shangwu, ZHANG Xiaofeng, XU Quanxi, et al. Variation and driving factors of water discharge and sediment load in different regions of the Jinsha river basin in China in the past 50 years [J]. Water, 2019, 11(5): 1109-1129.
- [27] 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. [BAI Hua, MU Xingmin, GAO Peng, et al. Analysis on spatio-temporal variation of precipitation and streamflow in the Jialingjiang river basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(1): 102-106]
- [28] 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. [XU Quanxi, SHI Guoyu, CHEN Zefang. Analysis of recent changing characteristics and tendency runoff and sediment transport in the upper reach of Yangtze River [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(4): 420-426]

Variation Characteristics of Streamflow and Sediment in the Jialing River Basin in the Past 60 Years, China

LI Yiyi^{1,2}, FAN Jihui^{1*}, LIAO Ying^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Jialing River is a major tributary in the upper reaches of the Yangtze River, which is an important sediment source for the Three Gorges Reservoir. The processes of runoff and sediment yield changed significantly over the past years in the Jialing River Basin. Base on Spearman correlation analysis and the Mann-Kendall test, the hydrology data of Beibei Station from 1954 to 2017 were used to study the variation characteristics of runoff and sediment yield, and the major influencing factors were also discussed. The results showed that: (1) There was a

slightly decreasing tendency in annual runoff in the past 60 years, while the descending trend in sediment yield was significantly; (2) 1967 and 1985 were the two catastrophe points of runoff, and 1968 was the catastrophe point at which the sediment yield begins a downward tendency ($p < 0.05$); (3) The decrease of runoff was mainly caused by precipitation in the Jialing River Basin, while the human activities were the dominant factors for sediment yield reduction. The main factor to sediment yield decreasing in the Jialing River Basin was sediment trapping by reservoirs, and the second contribution was water-soil conservation practices. The study results are of great guiding significance for flood control, river regulation and river management.

Key words: runoff; sediment yield; variation characteristics; influencing factors; Jialing River

山 - 原 - 海战略:国家区域发展战略的衔接与拓展

(明庆忠,刘安乐 云南财经大学)

中国是一个海陆兼备的国家,韩非子和《山海经》均指出中国是“山海之国”。改革开放以来,中国进入了“高铁式快速发展”轨道,取得了令人瞩目的成就,同时也出现了以支撑中国可持续发展的资源环境压力、在区域发展上强调了东部率先发展导致的东中西部区域发展差距扩大、多重区域地重点支持发展导致的区域发展不均衡以及与之相关的人地关系矛盾等发展不协调问题,缓和解决这些问题成为新时期的区域发展战略调整的重要目标,需要在“一带一路”倡议下构建涉及沿路、沿江、沿海、沿边的全方位开放格局,协同新时期多个重点性区域发展战略,强化各种战略的衔接、策应、拓展,以构筑中国山 - 原 - 海统筹发展格局。

详见本期《山 - 原 - 海战略:国家区域发展战略的衔接与拓展》一文。