

近 50 a 嘉陵江流域径流变化特征及影响因素

范利杰¹, 穆兴民^{1,2}, 赵广举^{1,2}

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 利用 Mann—Kendall 秩次相关趋势检验和累积平均滤波器及 Mann—Kendall 突变点检验, 对嘉陵江流域北碚、亭子口、武都和武胜 4 个水文站 1960—2009 年的年径流数据分析得出, 4 个水文站年径流量均存在显著的减少趋势, 且均于 1991 年前后存在突变点。对流域 4 个水文站的基准期与措施期建立降雨—径流双累积曲线方程, 分析计算得出 20 世纪 90 年代人类活动和降雨对径流减少的影响程度基本相当, 只有武都站人类活动影响程度稍高。

关键词: Mann—Kendall 秩次相关检验; 累积平均滤波器; 径流; 嘉陵江流域; 双累积曲线方程

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)01-0012-06

中图分类号: P332.4

Runoff Variation and Its Impacting Factor During 1960—2009 in Jialing River Basin

FAN Li-jie¹, MU Xing-min^{1,2}, ZHAO Guang-ju^{1,2}

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

Abstract: The Changes of annual runoff at Beibei, Tingzikou, Wudu and Wusheng hydrological stations in the Jialing River basin from 1960 to 2009 are investigated using Mann—Kendall trends test, Mann—Kendall abrupt changing test and cumulative average filter method. Results indicate that runoff at all the stations have a jumping point in 1991. Double cumulative curve analysis between precipitation and runoff suggests that precipitation and human activities exert almost the same influence to the runoff reduction during the 1990s, except the Wudu Station where the influence by human activities takes a relative higher proportion.

Keywords: Mann—Kendall rank regression test; cumulative average filter; runoff; Jialing River basin; double cumulative curve

流域水文过程一般受自然因素和人类活动的综合影响, 随着科技的不断发展, 人类影响自然的能力不断提高, 对流域径流的影响也愈加显著^[1-2]。20 世纪 90 年代, 国家对长江上游区域实施长治工程, 重点对嘉陵江中下游地区进行了有计划的水土流失综合治理^[3], 嘉陵江流域的人类活动加剧, 引起流域径流发生一系列的变化。杨忠英^[4]对嘉陵江流域径流量的研究表明, 自 20 世纪 90 年代以来, 嘉陵江流域径流量锐减, 并初步分析其原因为气候的改变和人类活动的影响。张跃华等^[5]对嘉陵江时间序列的分析得出降雨量同径流量的变化存在明显的相关性, 认同降雨量减少和人类活动增加是流域径流量发生变化的主要原因。张明波等^[6]对嘉陵江支流西汉水流域进行了研究, 利用水文分析法建立降雨—径流回归模

型, 通过计算得出 20 世纪 90 年代以来, 水土保持措施减水明显, 7 a 平均减水效率达 30% 左右, 并且在 20 世纪 90 年代初减水不明显, 而到 1995, 1996 年减水达 1 倍以上。虽然已有大量研究^[7-9]对嘉陵江流域径流泥沙变化作了很多分析, 但对影响径流量变化因子的定量化研究相对较少, 而定量化研究对流域的综合治理与水源的调控有重要意义。本文利用嘉陵江流域 4 个水文站的径流资料, 分析其变化趋势及突变年份, 建立降雨—径流双累积关系, 分析降雨和人类活动对减少径流量的影响, 并分别计算其影响程度。

1 流域概况

嘉陵江源头, 历来有东、西两源之说。习惯上以东源为正源, 西源称为西汉水。东源起自陕西省凤县

收稿日期: 2012-01-05

修回日期: 2012-03-13

资助项目: 中国科学院重点部署项目“黄土高原及周边沙地近代生态环境的演变与可持续性”(KZZD-EW-04), “近百年黄土高原侵蚀环境与水沙变化”(KZZD-EW-04-03)

作者简介: 范利杰(1986—), 男(汉族), 河南省新乡市人, 硕士研究生, 研究方向为生态水文, 水土保持与沙漠化防治。E-mail: song_xiao87@yahoo.com.cn。

通信作者: 穆兴民(1961—), 男(汉族), 陕西省华阴县人, 博士生导师, 研究员, 研究方向为生态水文, 水土保持与沙漠化防治。E-mail: xmmu@ms.iswc.ac.cn。

西北凉水泉沟,西源起自甘肃省天水市平南川。两源南流,至陕西省略阳白水江镇相会^[10],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 $1.60 \times 10^5 \text{ km}^2$,属于典型的树枝状水系。流域以河源至四川省广元为上游,流经陕西、甘肃、四川 3 省的凤县、两党、徽县、略阳、宁强、广元等县市境内;以广元—合川段为中游,流经广元、苍溪、南部、蓬安、南充、武胜、合川等县市境内;以合川—重庆段为下游,于重庆市的朝天门汇入长江^[11]。

嘉陵江流域的地貌类型复杂多样,地层以中生界侏罗系红色岩层分布最广。土壤类型主要有黄壤土、紫色土、水稻土、冲积土、潮土和红壤等。流域大部分地区属于亚热带湿润季风气候,四季分明,雨水充沛,年内降水主要集中在 5—10 月,其中 7—9 月降水量可占全年的 50% 以上,年降水量在略阳以上山区约 600~800 mm,中下游丘陵区约 1 000 mm,多年平均径流量约 $7.00 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。由于复杂的地貌类型、充沛的降水和易侵蚀的土壤等自然环境及强烈的农业生产活动,嘉陵江上游地区是长江流域的主产沙区之一,而嘉陵江中下游地区则是长江流域的重点土壤侵蚀地区之一^[12]。

2 资料及研究方法

2.1 资料

本文采用数据来源于嘉陵江流域部分控制水文站。降雨采用嘉陵江流域 12 个雨量站的年降雨数据,采用算术平均法计算出流域面降雨量,降雨资料时段为 1960—2009 年。径流数据取自武胜站、亭子口站、武都站和北碚站 4 站,武胜站、亭子口站和武都站数据时段均为 1960—2000 年,北碚站为 1960—2008 年。

2.2 研究方法

(1) Mann—Kendall(简称为“M—K”)非参数秩次相关检验法被广泛应用气候和水文序列的趋势性分析。该统计检验方法的优点是不需要样本遵从一定的分布,也不受异常值的干扰,适用于类型变量和顺序变量,计算比较简单。本文利用 Kundzewicz 等^[13]研发的 Hydrospect 软件进行年降雨及年径流量变化趋势分析^[14]。用 Mann—Kendall 非参数秩次相关检验法作突变点检验,其原理如下:

$$t_k = \sum_{i=1}^k m_i \quad (2 \leq k \leq n) \quad (1)$$

$$\bar{t}_k = E(t_k) = \frac{k(k-1)}{4} \quad (2)$$

$$\text{var}(t_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (3)$$

$$UF = \frac{t_k - \bar{t}_k}{\sqrt{\text{var}(t_k)}} \quad (4)$$

式中: x_1, x_2, \dots, x_n ——随机事件序列; m_i ——第 i 个样本 x_i 大于 x_j ($2 \leq j \leq i$) 的累计数;UF——统计量; $E(t_k), \text{var}(t_k)$ ——累计数 t_k 的均值和方差。在原序列随机独立的前提下,给定一显著水平,显著水平组成一个信度区间,所有 UF 组成一条曲线,将此法引入时间序列数据的反序列中得到另一条曲线 UB,当 UF 和 UB 这 2 条曲线交叉点位于信度区间内时,则交叉点被认为是突变点^[15]。

(2) 累积滤波器法能充分反映时间序列定性的变化趋势^[16],其原理为:

$$S = \left[\sum_{i=1}^k \frac{R_i}{k} \right] / \bar{R} \quad (5)$$

式中: S ——累积平均值; R_i ——水文时间系列值; \bar{R} ——水文时间系列的平均值; k ——序列长度。

本文对流域降雨及部分站点径流资料采用 M—K 突变点检验检测流域年径流量的突变年份,采用 M—K 趋势检验结合累积滤波器法分析流域年径流量的趋势变化。利用降雨—径流双累积曲线对措施期径流计算模拟,从中分离出人类活动和降雨对径流减少的影响程度。

3 结果与分析

3.1 流域径流量年际及年内分配

对嘉陵江流域 4 个控制水文站 1960—2000 年径流量资料进行统计分析,结果如表 1 所示。由表 1 可知,流域 20 世纪 60 年代和 80 年代径流量较多,而 70 年代和 90 年代径流量较少,其中 90 年代年均径流量相对于其他年代减少较多,且从 80 年代到 90 年代的减少幅度较大。

表 1 嘉陵江流域年际平均径流分配统计 10^8 m^3

站名	1960—1970	1971—1980	1981—1990	1991—2000
北碚	734.54	637.38	762.42	547.52
亭子口	232.42	172.07	214.02	143.05
武都	47.28	40.93	44.45	33.12
武胜	302.04	230.80	296.47	196.15

流域径流量年内分配因受降雨、下垫面及植被等影响差异较大,由表 2 可知,流域年内径流量主要集中在 7—9 月,占全年径流量的百分比均在 50% 以上。

3.2 流域径流趋势分析

采用累积平均滤波器法对各个站点径流资料进行处理,结果如图 1—2 所示。由图 1—2 可知,4 站

的年径流量均有减小的趋势,其中北碚站从 1965—1972 年径流减少比较明显,之后的 30 a 中 1990—2000 年减少比较明显,亭子口站和武胜站则是 1965—1980 和 1990—2000 年这 2 个时间段减少比较明显,武都站是 1968—1975 年和 1995—2000 年减

少比较明显。降雨的累积平均曲线整体没有明显的减少趋势,但由其过程线和趋势线知存在减少趋势,但其趋势线的斜率绝对值较小,减少趋势并不明显。经 M—K 趋势检验得出 4 站的年径流量的减少趋势均显著,而年降雨量则不显著。检验结果如表 3 所示。

表 2 嘉陵江流域年内分配统计

10⁸ m³

站名	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
北碚	11.5	8.8	11.7	26.1	51.0	57.7	139.2	101.8	119.2	75.8	33.6	17.0
亭子口	5.0	4.1	5.4	9.2	15.5	16.9	37.0	33.5	34.5	21.7	10.9	6.7
武都	1.5	1.2	1.4	2.1	4.1	4.6	5.9	5.2	5.7	5.2	2.9	1.9
武胜	5.8	4.6	6.2	10.9	20.4	21.5	51.8	43.2	47.0	30.0	14.2	8.2

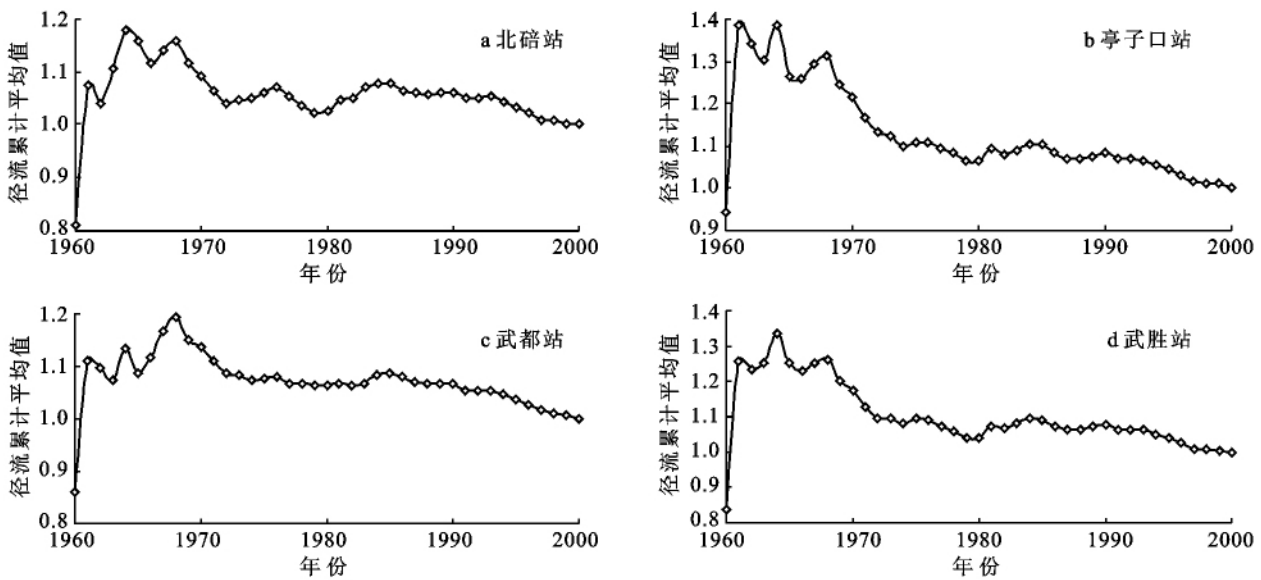


图 1 嘉陵江 4 站年径流累积平均值曲线

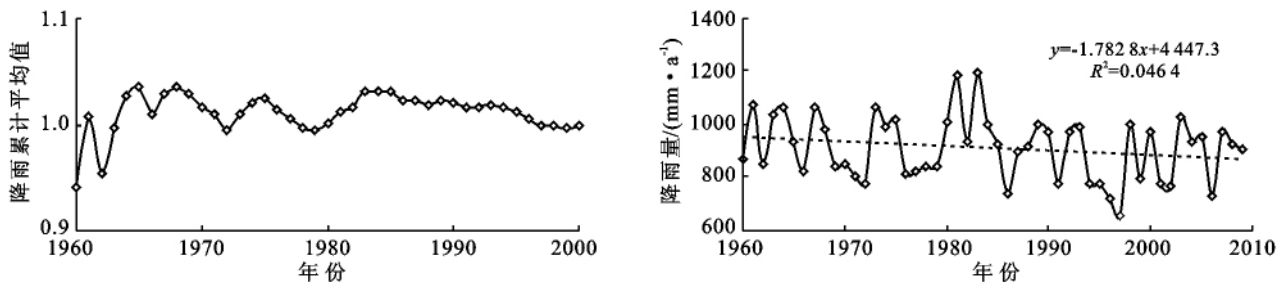


图 2 嘉陵江 4 站年径流降雨累积平均值曲线和降雨过程线

表 3 嘉陵江流域径流及降雨变化趋势

站名	Mann—Kendall 趋势检验				累积滤波器法	
	统计量	上限	下限	趋势	显著性	趋势
北碚	-2.810 07	1.96	-1.96	减少	显著	减少
亭子口	-2.471 03	1.96	-1.96	减少	显著	减少
武都	-2.650 74	1.96	-1.96	减少	显著	减少
武胜	-2.313 78	1.96	-1.96	减少	显著	减少
降雨	-1.212 90	1.96	-1.96	减少	不显著	—

3.3 径流突变点分析

4 站 Mann—Kendall 突变点检验结果如图 3 所示,其置信区间为 0.01 水平。由图 3 可知,北碚站的 UF 和 UB 交叉点位于置信区间内,年份为 1991 年,即自 1991 年北碚站的年径流量发生突变;同理可知亭子口突变点年份为 1971,1972,1991 和 1992 年;武都站突变点年份为 1991 和 1993 年;武胜站突变点年份为 1971,1972 和 1993 年。1992 年前后,嘉陵江流域由于政策原因致使人类活动加剧,引起流域下垫面及植被覆盖等自然因素发生改变,气候因素及人类活动共同导致年径流量时间序列值的突变。

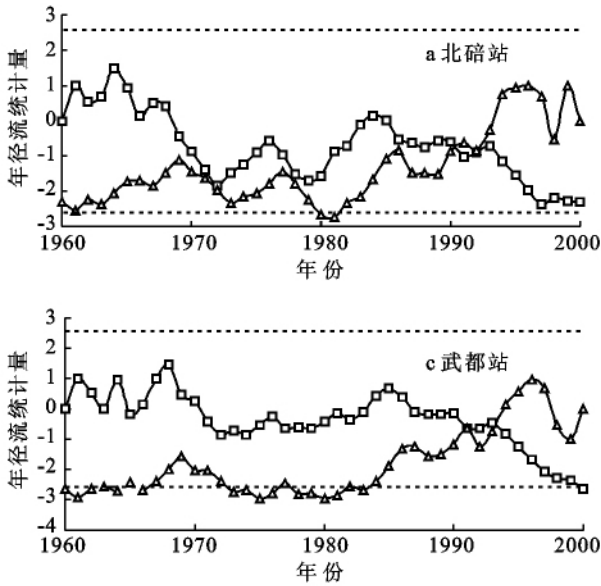


图 3 4 个水文站年径流突变点检验

3.4 降雨阶段性分析

4 站的径流量均有显著的减少趋势,而降雨量减少趋势并不显著,因降雨量的年际变化较为复杂。为进一步了解降雨对径流的影响,需对降雨进行阶段性分析。

由图 4 降雨 5 a 滑动平均曲线及降雨累积距平曲线可知:1960—1968,1972—1975 及 1979—1985 年的累计距平值呈持续上升状态,为丰水期;1968—1972,1975—1979 及 1993—2002 年累积距平值呈持续下降状态,为枯水期;而 1985—1993 年累积距平值变化波动不大,为平水期。

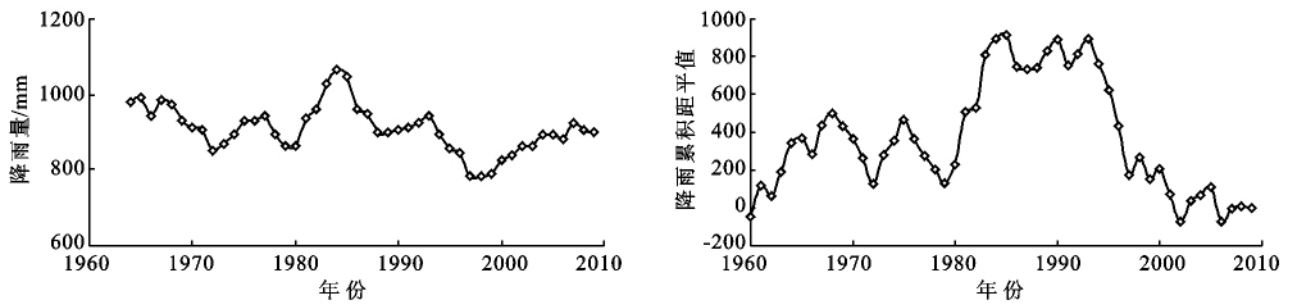


图 4 嘉陵江流域降雨年际变化分析

20 世纪 80 年代以后,降雨于 1993 年开始持续性减少,而经 M—K 检验,4 站的径流突变点年份均发生在 1992 年附近。

3.5 影响因素的定量分析

3.5.1 累积回归方程的建立 经分析流域 4 站点的突变点年均均在 1990,1991,1992,1993 年,虽年径流量在这些年份发生了突变,但由于国家自 1989 年对嘉陵江流域进行了大规模的水土流失综合治理,整个流

域的人类活动较 1989 年以前有所增加,而在 1989 年以前流域内人类活动均相对较少,且多为自发进行,人类活动影响相对较少,因此,可近似将 1989 年以前的嘉陵江流域看作是天然的。对 1989 年以前的年降雨及年径流数据作逐年累积,对累积数据进行回归分析,建立回归方程。本文累积降雨—累积径流回归方程采用 Excel 的加载宏中的回归分析来建立及检验,以北碚站为例进行叙述。

北碚站降雨—径流双累积曲线如图 5 所示。图 5 中基准期和基准期后的累积曲线的斜率发生了一定程度的改变,基准期之后的曲线斜率变小,说明径流相对于降雨有了减少趋势。

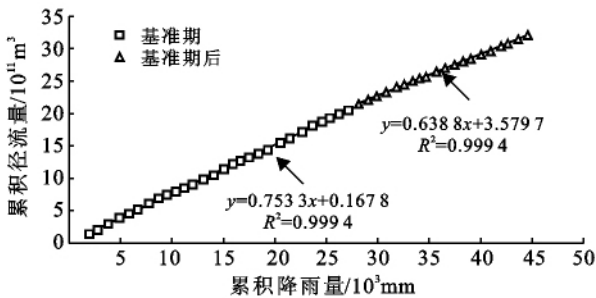


图 5 北碚站降雨—径流双累积曲线

在 Excel 中利用加载宏中的回归分析将 1989 年以前的累积降雨及累积径流量带入进行回归分析,得出相关系数平方 $R^2=0.999$,由此得出北碚站临界年份以前的回归方程为:

$$\sum R=0.753 \sum P+167.797 \quad (6)$$

式中: $\sum R$ ——累积径流量; $\sum P$ ——累积降雨量。

用相同方法求出武胜站、亭子口站、武都站的累积回归方程分别为:

武胜站:

$$\sum R=0.283 \sum P+281.333 \quad (R^2=0.999) \quad (7)$$

亭子口站:

$$\sum R=0.2103 \sum P+272.371 \quad (R^2=0.998) \quad (8)$$

武都站:

$$\sum R=0.047 \sum P+13.690 \quad (R^2=0.999) \quad (9)$$

3.5.2 人类活动和降雨对流域径流量影响的提取

利用上述回归方程对各个站点的累积径流量进行模拟,其方法为:设基准期为 T_1-T_2 时期,上述方程为针对 T_1-T_2 时间段的累计回归线性方程,然后将整个时间序列的累计降雨量带入回归模型,得出整个时间序列的累计径流量的预测值。此时求 T_3-T_4 时期的平均年径流量,用 T_4 时刻的累积值减去 T_3 时刻的累计值,得到 T_3-T_4 时期的累积值 $\sum R$,然后用 $\sum R$ 除以 T_3-T_4 期间的总年数得出 T_3-T_4 时期平均年径流量^[17]。

对 4 站进行回归预测及统计计算得出结果如表 4 所示。

表 4 各站降雨及人类活动对径流影响计算结果

站名	时段	实测年径流量	预测年径流量	实测减少量	降水影响		人类活动影响	
					减少量	比例/%	减少量	比例/%
北碚站	1988 年以前	709.75	710.05	—	—	—	—	—
	1989—1998 年	584.80	649.01	124.95	60.74	48.61	64.21	51.39
	1998—2008 年	563.49	665.72	146.26	44.03	30.10	102.23	69.90
武都站	1988 年以前	44.37	44.59	—	—	—	—	—
	1989—2000 年	34.86	40.81	9.51	3.57	37.50	5.94	62.50
亭子口站	1988 年以前	204.68	206.01	—	—	—	—	—
	1989—2000 年	159.37	181.87	45.31	22.51	49.67	22.81	50.30
武胜站	1988 年以前	273.72	274.29	—	—	—	—	—
	1989—2000 年	218.22	243.74	55.50	28.98	52.22	26.52	47.78

由 4 站点的趋势分析可知,年径流量的总体变化趋势是减少的,并且减少趋势显著,在年均径流量减少的部分中,人类活动和降雨的贡献率分别是多少可以用上述方法求得。由于武都、亭子口、武胜 3 站只有 2000 年以前的径流资料,无法计算 2000 年以后降雨和人类活动对减少径流量的贡献度。由表 4 可看出,2000 年以前,4 站中只有武都站人类活动对减少径流量的影响程度较高,达到了 62.50%,其余 3 站人类活动和降雨对减少径流的影响程度基本持平,而 2000 年以后的北碚站中,人类活动对径流减少的影响达到了 69.90%,在减水效果中起到主导作用。

嘉陵江流域自 1989 年实施长治工程以来,流

域内先后 50 个县市区开展了水土保持重点治理。从 1989—1996 年,流域内实施各种水保措施累计治理水土流失面积 $2.14 \times 10^4 \text{ km}^2$,治理程度 25.8%。其中坡改梯治理 17.49 hm^2 ,水保林治理 $5.34 \times 10^5 \text{ hm}^2$,经果林治理 $2.27 \times 10^5 \text{ hm}^2$,种草治理 $9.64 \times 10^4 \text{ hm}^2$,封禁治理 $5.86 \times 10^5 \text{ hm}^2$,保土耕作治理 $5.19 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。小型水利水保工程方面,修塘堰 70 793 座,谷坊 3 828 座,拦沙坝 908 座,蓄水池 94 998 口,排灌渠 22 787.11 km,截水沟 9 678.68 km,沉沙池 1 567 756 个^[18]。由上述资料可看出,在政策实施以来,嘉陵江流域的人类活动程度加剧,引起流域下垫面的地形、地貌、植被覆盖等发生了改变,增加

了水利工程建设,对流域水资源的分配做了调整,这些措施在治理水土流失中起到了至关重要的作用,而在减水方面也作出了不少的贡献。

4 结论

(1) 通过对嘉陵江流域降雨及径流资料的研究发现,嘉陵江流域面上降雨年际间变化呈减少趋势,经 Mann—Kendall 趋势检验得出虽有减小趋势,但并不显著。由对降雨阶段性分析可知,进入 90 年代以来,年降雨量急剧下降,这对径流量的减少起到了一定的作用。对嘉陵江流域 4 个控制水文站的径流资料进行检验得知 4 站年径流量均存在减少趋势,并且趋势显著,这说明除了降雨以外,人类活动对流域年径流量变化存在一定程度的影响。

(2) 通过对年降雨及年径流资料进行双累积回归分析建立累积回归方程,分别计算出人类活动和降雨对减少径流量的影响程度,结果表明 2000 年以前各个站点的降雨和人类活动对减少径流量的贡献程度基本持平,只有武都站的数据显示水土保持措施对减少径流的影响程度稍大,为 62.5%。而 2000 年之后只有北碚站的径流资料,通过计算得出北碚站人类活动对减少的径流量影响程度达到 69.9%,可见 2000 年之后北碚站控制区域内,人类活动对减少径流量的贡献率有所增加。

(3) 流域产流量是自然条件和人类活动共同作用的结果,本文通过对嘉陵江流域降水及部分控制水文站径流资料的研究发现,2000 年之前嘉陵江流域降雨及人类活动对减少径流量的影响程度基本相当,而 2000 年之后,由流域把口站北碚站的数据分析可知,人类活动在减少径流中起主导作用。

[参 考 文 献]

- [1] 姚治君,管彦平,高迎春. 潮白河径流分布规律及人类活动对径流的影响分析[J]. 地理科学进展, 2003, 22(6): 599-606.
- [2] 高龙华. 径流演变的人类驱动力模型[J]. 水利学报, 2006, 37(9): 1129-1133.
- [3] 李小涛,黄诗峰,李琳,等. 嘉陵江流域土壤侵蚀变化遥感分析[J]. 泥沙研究, 2006(6): 65-69.
- [4] 杨忠英. 嘉陵江 20 世纪 90 年代以来径流量锐减现象分析[J]. 四川水利, 2004(5): 20-22.
- [5] 张跃华,徐刚,张忠训,等. 嘉陵江年径流量时间序列趋势分析[J]. 重庆师范大学学报:自然科学版, 2011, 28(5): 37-40.
- [6] 张明波,黄燕,郭海晋,等. 嘉陵江西汉水流域水保措施减水减沙作用分析[J]. 2003(1): 70-74.
- [7] 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): 3-8.
- [8] 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): 57-66.
- [9] 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.
- [10] 殷建国. 嘉陵江上游暴雨洪水特性分析[J]. 灾害学, 2008(23): 66-70.
- [11] 马以愚. 嘉陵江志[M]. 上海:商务印书馆, 1947.
- [12] 韦杰,贺秀斌. 人类活动对嘉陵江流域泥沙负荷的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(2): 196-201.
- [13] Kundzewicz Z W, Robson A. Detection trend and other changes in hydrological data [R]. WMO/TD-No. 1013. Geneva, 2000.
- [14] 宋小燕,穆兴民,高鹏,等. 松花江流域哈尔滨站降雨径流历史演变及其驱动力分析[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(2): 46-51.
- [15] 徐东霞,章光新,尹雄锐. 近 50 年嫩江流域径流变化及影响因素分析[J]. 水科学进展, 2009, 20(3): 417-421.
- [16] 陈仁升,康尔泗,杨建平,等. 甘肃省河西地区近 50 年气象和水文系列的变化趋势[J]. 兰州大学学报, 2002, 38(2): 163-1701.
- [17] 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(6): 24-25.
- [18] 杨泉,何文社. 嘉陵江水土保持对三峡工程水沙的影响[J]. 兰州交通大学学报:自然科学版, 2006, 24(3): 37-40.