

长江支流嘉陵江水沙变化趋势及其驱动因素分析

高 鹏, 穆兴民, 王 伟

(西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

摘 要:近 20 年来,嘉陵江流域输沙量明显减少,其变化将对长江三峡库区水沙运动以及泥沙冲淤变化等产生重要影响。根据嘉陵江控制水文站实测水沙资料,采用定量分析的方法,分析了嘉陵江流域年降水量、河道径流量和输沙量的变化趋势及其发生显著变化的临界年份。结果表明:嘉陵江流域的径流量和输沙量都有显著的减少趋势;年降水量没有表现出明显的变化趋势。年径流量及输沙量发生显著趋势性减小的临界年份分别为 1993 年和 1984 年。同时,利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与输沙量的减少量,定量分析了降水和人类活动对嘉陵江径流及输沙量的影响,进一步探讨了嘉陵江流域水沙变化的驱动因素。

关键词:嘉陵江;径流;输沙;流量曲线

中图分类号:P332.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2010)04-0057-05

Trend and Driving Force Analyses of Streamflow and Sediment Discharge in Jialing River

GAO Peng, MU Xing-min, WANG Wei

(Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The sediment discharge in Jialing River basin has decreased significantly over the past 20 years. This change will have a major impact on the Yangtze River Three Gorges reservoir area of water and sediment movement and changes in sediment yield and deposition. The objectives of this study are to quantify the decreasing trends of precipitation, streamflow and sediment discharge during 1956—2008 and to statistically identify change points or transition years in the changing trends. Results showed that strong decreasing trends in annual streamflow ($P=0.05$) and sediment discharge ($P=0.01$) have existed since the late 1950s at Beibei hydrologic station of the Jialing River. Change point analysis reveal that more rapid declines for streamflow began in 1993, and sediment discharge began in 1984 at the stations ($P=0.05$). Two kinds of methods, namely duration curve and double mass curves, were applied to analyze change of streamflow and sediment discharge in Jialing River basin. The reasons for the trends and change-points in streamflow and sediment discharge were analyzed finally.

Key words: Jialing River; streamflow; sediment discharge; flow duration curve

长江上游水沙变化是流域多种自然因素和人为因素综合作用的结果。近年来,长江上游水沙变化出现了新的变化特点^[1]。嘉陵江流域是长江上游重点产沙区之一,也是水土保持实施强度最大的支流流域之一。近 20 年来,嘉陵江流域输沙量明显减少,其变化将对长江三峡库区水沙运动以及泥沙冲淤变化等产生重要影响。张信宝利用双累积曲线方法分析认为嘉陵江流域径流输沙在 1984 年后出现明显减少的

趋势^[2]。戴明龙等利用双累积曲线方法研究认为嘉陵江流域水沙系列在 1990 年前后发生了重大变异^[3]。许炯心利用经验统计分析认为 1982 年前为嘉陵江流域受人类影响较轻的基准期^[4]。不同的研究方法以及资料时间序列,导致不同的研究结果。

本研究从水文时序的统计学分析入手,分析了嘉陵江流域的降水及径流、输沙变化趋势以及水沙变化的临界年份,定量分析了其变化原因,并对其驱动因

收稿日期:2010-02-01

资助项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目“中国主要水蚀区土壤侵蚀过程与调控研究”(2007CB407203)

作者简介:高鹏(1976—),男,陕西扶风人,助理研究员,博士,主要从事流域生态水文和水土保持研究。E-mail: gaopeng@ms.iswc.ac.cn

通信作者:穆兴民(1961—),男,陕西华阴人,博士,研究员,主要从事生态水文研究。E-mail: xmmu@ms.iswc.ac.cn

素进行了探讨分析,为深入进行河流水沙变化及其可能影响因素提供了一定的基础。

1 研究流域概况

嘉陵江为长江第二大支流,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,是长江支流中流域面积最大的河流。流域包括嘉陵江干流、渠江、涪江三大水系,干流自北向南,渠江自东北向西南,涪江自西北向东南,三大水系在合川附近汇合,构成扇形向心水系。流域地势,东、北、西三面较高,向东南高程逐渐降低,地势渐趋平缓。各水系上游均为山区,河谷狭窄,河床比降大,两岸耕地少。干流自广元以下河谷逐渐开阔,地形从深丘逐步过渡到浅丘,河曲、阶地和冲沟发育,与涪江、渠江中下游构成川中盆地,人口稠密,农业发达。流域内地质构造十分复杂,横跨三大构造单元,土壤组成除西汉水上游分布有少量的黄土区外,其它均为紫色土和土石山区^[5-6]。嘉陵江流域是长江各大支流中水土流失比较严重的地区,据 1988 年全国遥感普查结果,全流域水土流失面积为 8.28 万 km²,占流域总面积的 51.75%,土壤侵蚀总量为 3.66 亿 t/a,侵蚀模数为 4 419 t/(km²·a),是长江上游重点产沙区域之一。

2 资料与方法

2.1 资料

本研究选择嘉陵江流域出口控制站北碚水文观测站,1956—2008 年逐年实测径流量和输沙量资料摘抄自《中国河流泥沙公报》。所涉及的降水资料,来自中国气象局的全国基本气象站资料,选用位于嘉陵江流域内的 12 个站点的逐年降水量数据,采用算术平均方法计算流域面平均年降水量。

2.2 研究方法

2.2.1 要素的变化趋势及临界年份分析 某一要素

表 1 嘉陵江流域不同年代水文要素特征值

系列	面平均降水/(mm·a ⁻¹)			径流量/(亿 m ³ ·a ⁻¹)			输沙量/(亿 t·a ⁻¹)		
	平均	极值比	变差系数	平均	极值比	变差系数	平均	极值比	变差系数
多年平均	908.0	1.8	0.1	650.1	3.5	0.3	1.1	104.7	0.8
1950 年代	846.7	1.4	0.2	651.5	1.7	0.3	1.5	3.0	0.5
1960 年代	970.8	1.4	0.1	750.3	2.0	0.2	1.8	3.2	0.4
1970 年代	878.0	1.4	0.1	603.3	1.7	0.2	1.1	2.1	0.2
1980 年代	979.3	1.6	0.1	765.0	2.3	0.2	1.4	12.1	0.7
1990 年代	841.1	1.5	0.2	555.9	2.4	0.3	0.5	16.3	0.7
2000 年代	893.8	1.4	0.1	567.3	2.1	0.2	0.2	12.4	0.5

嘉陵江流域面平均降水量、径流量和输沙量等要素的时序变化的 Mann—Kendall 和 Spearman 秩相

的时间序列是否存在某种趋势性变化?本研究采用 Spearman 秩相关和 Mann—Kendall 秩相关分析方法^[7]进行统计分析。如果存在趋势性变化,那么,在什么时间发生变化?本研究采用 Pettitt 在 1979 年提出的一种非参数统计检验方法进行统计分析检验^[8]。这些统计学方法的核心是通过检验时间序列要素均值变化的确切时间来确定跃变变化的确切时间。

2.2.2 历时曲线法 源于分析流域某一给定流量与发生频次关系的流量历时曲线^[9],表示某一流量超过所有历史记录的时间比例,反映了从低流量到洪水的各个流量状态下的径流特征,是一种简单而全面地、图示化地反映整个研究时段流域径流变化特征的方法。Clemens Herschel 在 1880 年第一次使用流量历时曲线方法分析流域流量变化特征^[10]。从 20 世纪上半叶开始,随着计算机技术的发展和应用,该方法则被广泛的用于水电、水资源供给、灌溉规划、无资料地区径流、水文模型结果的校验、区域水文特征分析。本文将流量历时曲线的方法拓展用于分析流域年径流量和年输沙量的变化。

3 结果与讨论

3.1 降雨量、径流量、输沙量及其变化趋势

嘉陵江流域不同年代 3 个水文要素特征值如表 1。嘉陵江流域 1956—2008 年面平均降雨量及其变化如图 1,流域控制站北碚水文站 1956—2008 年实测径流量、输沙量如图 2、图 3。嘉陵江流域年均降水量为 908.0 mm,北碚控制水文站年均径流量为 650.1 亿 m³,年均输沙量为 1.1 亿 t。代际间,面平均降水量 1980 年代最大,1990 年代最小,代际间变化幅度不大。径流量在 1980 年代最大,1990 年代最小,与流域降水量基本同步变化。流域输沙量,在 1960 年代达到最大的 1.8 亿 t,到 1990 年代,骤降至 0.4 亿 t,到 2000 年代,已经减少到 0.2 亿 t。

关系数如表 2。表明:输沙量的秩相关系数达到 0.01 信度的显著性水平,秩相关系数为负值;径流量的秩相关系

数达到 0.05 信度的显著性水平,秩相关系数为负值。说明:随着时间的推移,输沙量与径流量有减小趋势,年均递减系数,输沙量为-0.03 亿 t/a,径流量为-3.50 亿 m³/a。而流域降水量没有表现出明显的下降趋势。

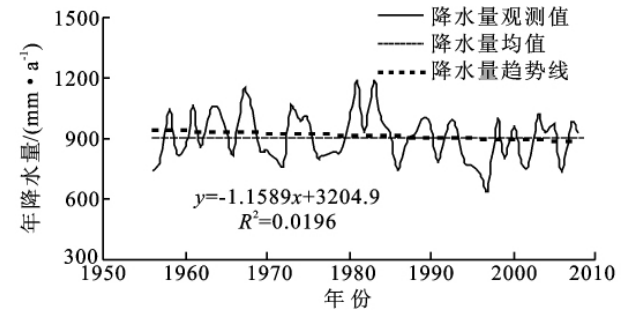


图 1 嘉陵江流域 1956—2008 年降水量

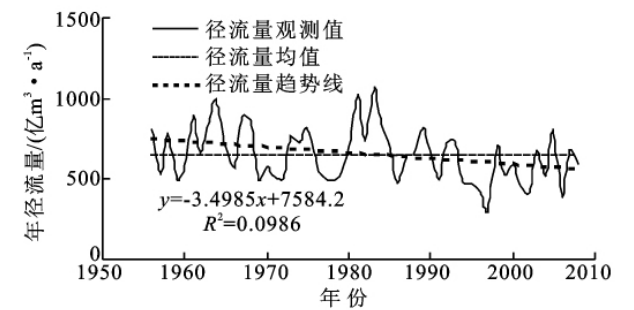


图 2 嘉陵江流域北碚 1956—2008 年实测径流量

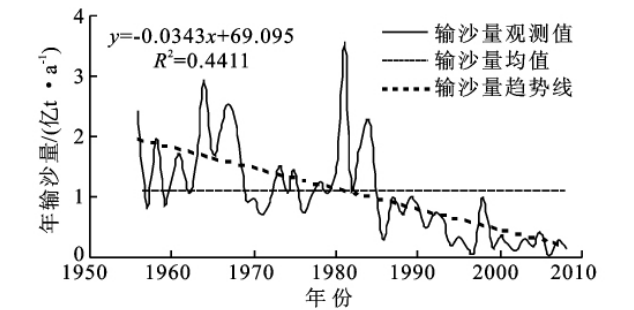


图 3 嘉陵江流域北碚 1956—2008 年实测输沙量

表 2 嘉陵江流域水文三要素年际变化趋势的秩相关分析

变量	Mann—Kendall		Spearman	
	Z 检验	显著性	t 检验	显著性
	统计量	水平	统计量	水平
年径流量	-1.289	—	-1.297	—
年径流量	-2.447	0.05	-2.341	0.05
年输沙量	-5.845	0.01	-5.432	0.01

采用 Pettitt's 方法分析的区间降雨量、径流量和输沙量发生趋势性跃变的临界年份如图 4—6。可以看出,在 95% 信度水平下,1956—2008 年间嘉陵江流域降雨量并未达到阈值水平;而径流量和输沙量的统计检验指标分别在 1993 年和 1984 年出现最低点并超出临界水平线,说明从此年份开始发生明显变化,临界年份前后平均径流量分别为 695.4 亿 m³、535.3 亿 m³,输沙量分别为 1.56 亿 t、0.44× 亿 t。

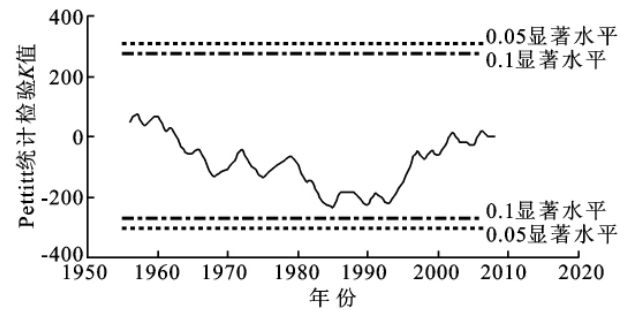


图 4 嘉陵江流域年降水量变化趋势的 Pettitt's 检验

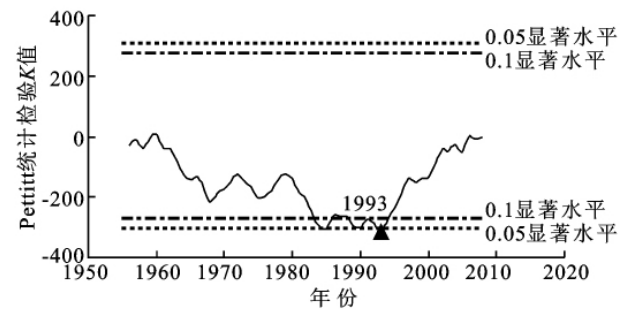


图 5 北碚水文站年径流量变化趋势的 Pettitt's 检验

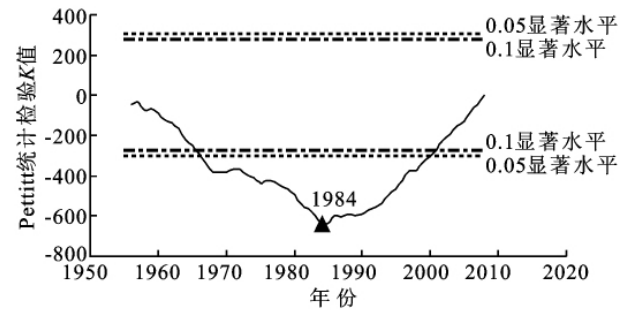


图 6 北碚水文站年输沙量变化趋势的 Pettitt's 检验

3.2 不同时期径流、输沙量差异

在趋势分析和临界年份分析的基础上,运用历时曲线对径流量和输沙量进行了分析。分别分析了临界年份前后两个时期的径流量和输沙量发生的频率。年径流量历时曲线和年输沙量历时曲线分别见图 7 及图 8。在同一频率下,历时曲线都基本向下平移,说明径流量和输沙量有减少趋势。

选择 5%、50%、95% 分别表示丰、平、枯 3 种不同的典型年份,对径流和输沙的减少进行了量化分析,详见表 3。对于年径流量和年输沙量,相对于临界年份之前,枯年的减少幅度较丰年及平年的减少幅度要大。从图中可以看出,不同降雨年型下的径流及输沙量减小幅度的较大差异;输沙量的减少幅度明显大于径流量的减少幅度。

3.3 降水量与径流量及输沙量关系演变

嘉陵江流域的径流量与输沙量呈现出减少趋势。为了更好的量化临界年份前后径流量与输沙量的变化情况,这里应用双累积曲线进行分析。降水—径流和降水—输沙双累积曲线,以及相应的线性回归曲线

见图 9、图 10。从图中可以看出,降水—输沙量双累积曲线出现了明显的转折点,而降水—径流量双累积

曲线的转折点不太明显。临界年份之后的回归曲线的斜率小于临界年份前的曲线斜率。

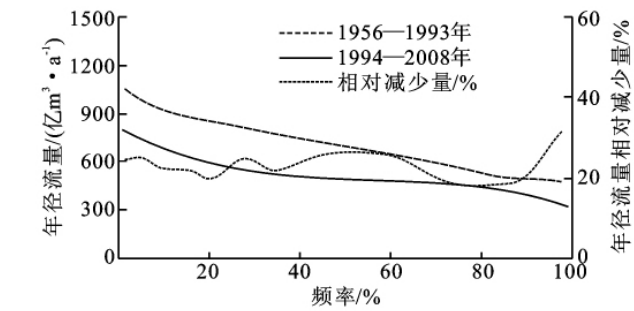


图 7 临界年份前后年径流量历时曲线

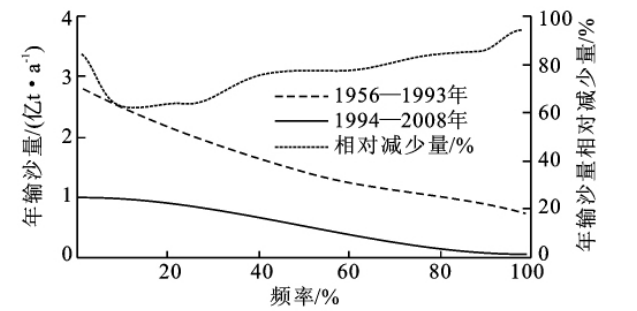


图 8 临界年份前后年输沙量历时曲线

表 3 北碚水文站临界年份前后丰、平、枯水平年径流量与输沙量变化

水平年	临界年份前		临界年份后		变化百分数/%	
	径流量/ (亿 m³ · a⁻¹)	输沙量/ (亿 t · a⁻¹)	径流量/ (亿 m³ · a⁻¹)	输沙量/ (亿 t · a⁻¹)	径流量	输沙量
丰年 (P=5%)	993.1	2.8	739.2	1.0	25.6	64.1
平年 (P=50%)	694.5	1.4	515.9	0.3	25.7	76.5
枯年 (P=95%)	491.4	0.8	359.3	0.1	26.9	90.9

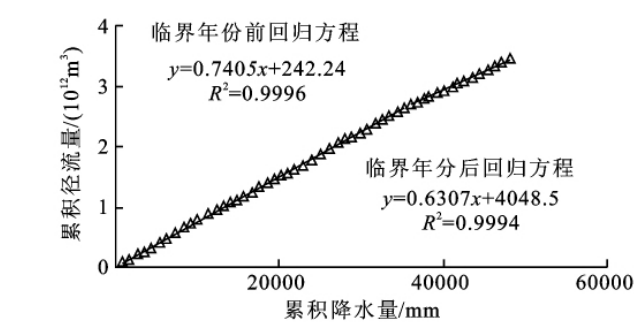


图 9 1956—2008 年嘉陵江流域降水量—径流量双累积曲线

为了估算径流量和输沙量在跃变年份后的减少量,通过拟合临界年份前的降水—径流以及降水—输沙双累积曲线方程来计算临界年份后的累积径流量和累积输沙量。相比计算的累积径流量,实测累积径流量减少了 3.7%,实测输沙量比计算的累积输沙量减少了 28.9%(表 4)。累积输沙量的减少幅度远大于累积径流量的减少幅度。

3.4 嘉陵江流域水沙变化原因定量分析

将临界年后的各年降水资料代入表 4 由双累积曲线建立的回归方程,得到计算年径流量和年输沙量。不同时段计算值之间的差异,即为降水变化的影响量;同期计算值与实测值之差,即为人类活动减水

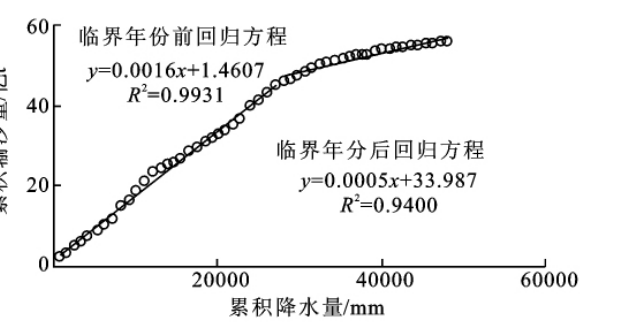


图 10 1956—2008 年嘉陵江流域降水量—输沙量双累积曲线

减沙量;其与同期计算值相比,即为人类活动的减水减沙效益。分析结果见表 5—6。从表中可以看出,人类活动对嘉陵江径流量的影响在临界年份后逐渐增大,在 1990 年代,降水对嘉陵江的径流影响还是占主导地位,从 2000 年代开始,人类活动的减水贡献率开始超越降水的贡献率,达到了 72.35%。1990 年代和 2000 年代人类活动减水效益分别为 16.0%和 14.0%,基本稳定。人类活动对流域输沙量的影响在临界年份后始终占据着主导地位,减水贡献率维持在 80%以上。1980 年代后期至 2000 年代,各年代人类活动减沙效益分别为 46.2%、65.7%和 83.9%,呈递增趋势。

表 4 降水量—径流量、降水量—输沙量双累积曲线线性回归估算

回归方程	计算累积值	实测累积值	累积减少量	减少百分数
$\sum R = 0.7384 \sum P + 263.75 (R^2 = 0.9993, N = 30)$	35797.7	34455.7	1342.0	3.7%
$\sum S = 0.0016 \sum P + 1.4607 (R^2 = 0.9931, N = 29)$	78.5	55.8	22.7	28.9%

注:R:年径流量(亿 m³); S:年输沙量(亿 t); P:年降水量(mm)。

表 5 北碚水文站各年代年径流量变化原因分析结果

时段	实测 年径流量	计算 年径流量	实测年减水量		降水影响		人类活动影响		人类活动 减水效益
			减少量/ (亿 m ³ · a ⁻¹)	%	减少量/ (亿 m ³ · a ⁻¹)	%	减少量/ (亿 m ³ · a ⁻¹)	%	
1993 年前	695.44	694.13							
1994—1999 年	487.23	580.08	208.21	29.94	115.36	55.41	92.85	44.59	16.0
2000—2008 年	567.29	660.01	128.15	18.43	35.43	27.65	92.72	72.35	14.0

表 6 北碚水文站各年代年输沙量变化原因分析结果

时段	实测 年输沙量	计算 年输沙量	实测年减沙量		降水影响		人类活动影响		人类活动 减沙效益
			减少量/ (亿 t · a ⁻¹)	%	减少量/ (亿 t · a ⁻¹)	%	减少量/ (亿 t · a ⁻¹)	%	
1984 年前	1.56	1.54							
1985—1989 年	0.77	1.43	0.79	50.6	0.12	15.8	0.66	84.2	46.2
1990—1999 年	0.46	1.35	1.10	70.5	0.21	19.4	0.88	80.6	65.7
2000—2008 年	0.23	1.43	1.33	85.3	0.13	9.7	1.20	90.3	83.9

3.5 讨论

影响流域径流和泥沙的因素主要是自然和人为两个方面^[11]。自然因素主要包括地质地貌、土壤、植被以及气候(主要是降水)等;人为因素主要包括水利工程拦沙,水土保持,工程建设增沙及河道采沙等。在这些影响因素中,地质地貌、土壤和植被因子相对稳定,对不同时间侵蚀产沙量的变化影响较小;气候(降水)和人类活动通常具有不同时间尺度的周期性,对流域侵蚀产沙有重要影响,是泥沙变化的重要影响因素。

由前述分析可知,嘉陵江流域 1956—2008 年降水量没有表现出显著的变化趋势;降水对流域减水减沙的影响力在逐步减弱。人类活动是影响嘉陵江流域泥沙减少的主要驱动力,同时,人类活动也正在逐步成为影响嘉陵江流域径流量变化的主要因素。

20 世纪 80 年代以来,长江上中游地区严重的水土流失状况引起社会广泛关注。从 1989 年起,嘉陵江中下游和陇南陕南地区被列为长江上游水土保持重点防治区之一,流域内先后有 50 个县(市、区)开展了水土保持重点治理(“长治”工程)。治理措施主要包括坡改梯、水保林、经果林、种草、封禁治理、保土耕作和小型水利水保工程等。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 万 km²,治理程度 25.8%。其中坡改梯治理 17.9 hm²,水保林治理 533 900 万 hm²,经果林治理 226 500 hm²,种草治理 96 400 万 hm²,封禁治理 585 600 hm²,保土耕作治理 518 700 万 hm²。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 2.79 万 km,截水沟 9 678 km,沉沙池 1 567 756 个^[12]。截至 2000 年底,流域内累计治理水土流失面积 3.32 万 km²(较 1996 年增加了 55%)。根据全国 1999—2000 年第二次遥

感调查资料,嘉陵江流域水土流失面积 79 445 km²,占土地总面积的 49.65%。与 1988 年遥感普查资料相比,水土流失面积减小 4.09%^[13]。

通过近 20 a 的综合治理,嘉陵江流域在控制水土流失、改善生态环境、发展区域经济、实现可持续发展等方面取得了显著成效。水土流失治理已经使嘉陵江的侵蚀环境发生了显著的变化,使得流域的侵蚀输沙量大幅减少。

4 结论

通过以上研究及分析,得出以下结论:

(1)通过对嘉陵江流域年降水、径流量和输沙量的趋势检验及临界年份分析,嘉陵江流域年径流量和输沙量在 1956—2008 年间呈显著的减少趋势。并通过 Pettitt 临界年份阈值水平检验,得到年径流量临界年份发生在 1993 年,年输沙量临界年份发生在 1984 年;年降水量没有表现出明显的变化趋势。

(2)利用历时曲线,量化了丰平枯 3 种典型年的径流量与输沙量变化情况。相对于临界年份之前,年径流量在临界年份后减少幅度为 16.7%~33.1%;年输沙量在临界年份后减少幅度为 60.3%~94.5%。

(3)利用双累积曲线,量化了流域累积径流量与累积输沙量的变化情况。截至 2008 年,实测累积径流量比计算的累积径流量减少了 3.7%;实测累积输沙量比计算的累积输沙量减少了 28.9%。

(4)定量计算了嘉陵江人类活动及降水的减水减沙贡献率。人类活动的减水贡献率由 1990 年代后期不足 44.59%上升到 2000 年代的 72.35%,人类活动正逐渐成为嘉陵江流域径流减少的主要因素;人类活动的减沙贡献率始终维持在 80%以上,人类活动是嘉陵江流域输沙量减少的主导因素。

与本试验用土为第四纪红色黏土发育的红壤有关,其土壤黏粒含量接近于 50%;(2)至于沟槽和沟缘,可能主要是因为浅沟存在改变了地表微地形,增加了地表面积,提高了土壤蒸发,致使沟头和沟缘处土壤含水量降低;(3)对于香根草小区,根系吸收水分必然会引起土壤水分垂直和水平变化,加之降雨过程径流和土壤水分向下坡分异性,土壤水分发生再分配。这也在一定程度上说明与香根草绿篱耗水相比,上坡红壤的持水性对土壤水分的影响居于次要地位。

本研究中浅沟微地形明显地影响到土壤水分的横向分布(图 5),郑纪勇等^[15]对黄土高原侵蚀冲沟沟壁侧面蒸发研究结果也表明沟壁蒸发是客观存在的,距沟缘 20 cm 处土壤水分损失最快,500 cm(沟中)处土壤水分损失最慢。潘成忠和上官周平^[3]对黄土半干旱丘陵区陡坡坡地土壤水分研究发现,在坡面有浅沟微地形存在的情况下,纵向和横向坡位对坡面土壤水分分布均存在影响,且纵向坡位的较横向显著,与本试验的结果一致(表 3)。等高种植香根草绿篱一定程度上影响了土壤水分沿横向坡位的变化。

参考文献:

- [1] 南方红壤退化机制与防治措施研究专题组. 中国红壤退化机制与防治[M]. 北京:中国农业出版社, 2001:1-7.
- [2] Ng Sai Leung, Cai Qiang Guo, Ding Shu Wen, et al. Effects of contour hedgerows on water and soil conservation, crop productivity and nutrient budget for slope farmland in the Three Gorges Region (TGR) of China [J]. *Agroforestry System*, 2008, 74(3): 279-291.
- [3] 潘成忠,上官周平. 黄土半干旱丘陵区陡坡地土壤水分空间变异性研究[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(6): 5-9.

(上接第 61 页)

参考文献:

- [1] 张信宝. 长江上游河流泥沙近期变化、原因及减沙对策[J]. *中国水土保持*, 1999(2): 22-24.
- [2] 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, 27(4): 56-59.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 李铁松,张桥英. 嘉陵江的起源及流域自然环境研究[J]. *四川师范学院学报:自然科学版*, 1999, 20(2): 105-108.
- [6] 丁文峰,张平仓,任红玉. 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.

- [4] 许峰,蔡强国,吴淑安. 等高植物篱在南方湿润山区坡地的应用:以三峡库区紫色土坡地为例[J]. *山地学报*, 1999, 17(3): 193-199.
- [5] 郑粉莉,唐克丽,周佩华. 坡耕地细沟侵蚀发生、发展和防治途径的探讨[J]. *水土保持学报*, 1987, 1(1): 36-48.
- [6] 钟五常. 江西红壤丘陵浅沟侵蚀的成因及其治理[J]. *江西师范学院学报*, 1966(1): 51-60.
- [7] 郑粉莉,武敏,张玉斌,等. 黄土陡坡裸露坡耕地浅沟发育过程研究[J]. *地理科学*, 2006, 26(4): 438-442.
- [8] 许峰,蔡强国,吴淑安,等. 坡地等高植物篱带间距对表土养分流失影响[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, 5(2): 23-29.
- [9] 郑粉莉. 不同侵蚀条件下浅沟微地形坡面土壤水分分布研究[C]//邵明安. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业. 西安:陕西科学技术出版社, 1999: 51-56.
- [10] TenBerge HFM, Stroosnijder L, Burrough P A, et al. Spatial variability of physical soil properties influencing the temperature of the soil surface[J]. *Agricultural Water Management*, 1983, 6(2/3): 213-226.
- [11] 刘梅,蒋定生,黄国俊,等. 不同坡面位置土壤水分差异规律分析[J]. *水土保持通报*, 1990, 10(2): 16-20.
- [12] 胡伟,邵明安,王全九. 黄土高原退耕地坡地土壤水分空间变异性研究[J]. *水科学进展*, 2006, 17(1): 74-81.
- [13] 唐彬,谢小立,彭英湘,等. 红壤丘岗地坡地土地利用与土壤水分的时空变化关系[J]. *生态与农村环境学报*, 2006, 22(4): 8-13.
- [14] 柳云龙,胡宏涛. 红壤地区地形位置和利用方式对土壤物理性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(1): 22-26.
- [15] 郑纪远,李裕元,邵明安,等. 沟壁侧面蒸发与黄土高原环境干旱化关系研究[J]. *中国水土保持科学*, 2006, 4(3): 6-10.

- [7] 穆兴民. 黄土高原水土保持对河川径流及土壤水文的影响[D]. 陕西杨陵:西北农林科技大学, 2002.
- [8] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change point problem[J]. *Applied statistics*, 1979, 28(2): 126-135.
- [9] Vogel R M, Fennessey N M. Flow Duration Curves I: A New Interpretation and Confidence Intervals[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1994, 120(4): 210-215.
- [10] Foster H A. Duration curves[J]. *American Society of Civil Engineers Transactions*, 1934, 99: 1213-1267.
- [11] 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, 29(7): 420-426.
- [12] 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*, 2005, 24(3): 37-40.
- [13] 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.