

三峡库区香溪河流域水沙关系变化及其驱动因素

刘惠英¹, 鲁向晖¹, 张平仓², 张长伟², 赵建民¹, 白桦¹

(1. 南昌工程学院 水利与生态学院, 江西 南昌 330099; 2. 长江科学院 水土保持研究所, 湖北 武汉 430012)

摘要: [目的] 分析降水量及水土保持措施等人类活动对流域水沙关系的响应, 为水土保持措施效益评价提供科学依据。[方法] 以香溪河流域兴山站输沙量数据为基础, 采用 Mann—Kendall 趋势检验、线性回归、水文频率曲线及双累积曲线等方法, 分析了 1973—2010 年香溪河流域面降雨量、径流量和输沙量变化, 并进一步量化分析了流域水沙变化极其驱动因素。[结果] 香溪河流域年降水量、年径流量和年输沙量均呈下降趋势, 年降水量和年径流量变化趋势不显著, 但年输沙量减少趋势显著; 年输沙显著减少开始的年份是 1994 年, 流域径流量开始减少的年份是 1991 年。[结论] 水土保持等人类活动是香溪河流域水沙变化的主要驱动因素。

关键词: 水沙关系; 香溪河流域; 人类活动; 三峡水库区间

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)05-0017-05

中图分类号: TV148, P333.4

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.05.069

Variation of Runoff and Sediment Discharge and Its Driving Factors in Xiangxi River Watershed in Three Gorges Reservoir Area

LIU Huiying¹, LU Xianghui¹, ZHANG Pingcang², ZHANG Changwei², ZHAO Jianmin¹, BAI Hua¹

(1. College of Water Conservancy and Ecological Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang, Jiangxi 330099, China; 2. Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430012, China)

Abstract: [Objective] The objective of this study is to analyze the influences of precipitation and human activities on runoff and sediment load in order to provide basis for the benefits evaluation in soil and water conservation. [Methods] The variations of precipitation, runoff and sediment load during 1974—2010 were analyzed in Xiangxi river watershed, by using Mann—Kendall test, linear regression, hydrological frequency curve and double mass curves. Factors that drive the variation of runoff and sediment discharge were quantified. [Results] There was a slightly declining trend in annual precipitation and annual runoff, while there was a significant decreasing trend ($\alpha=0.05$) in sediment load. Mutation point analyses revealed that abrupt reduction in annual sediment discharge occurred in 1994, while the rapid reduction in annual runoff happened in 1991. [Conclusion] Human activity is the main factor that drives the changes of runoff and sediment loads.

Keywords: characteristics of runoff and sediment load; Xiangxi river watershed; human activity; Three Gorges reservoir area

水沙变化是影响河流生态环境的最活跃的因素之一, 对河道冲淤、水质、生物等都会产生直接影响, 并进一步影响人类对水资源利用。泥沙是影响三峡工程成败的关键因素, 备受学术界和公众的重视。三峡库区支流是入库泥沙及非点源污染物重要来源地之一, 并且与水库蓄水调度关系密切, 对水库淤积和水质都有直接的影响^[1-2]。香溪河流域是三峡坝区的第一条长江一级支流, 具有一定的典型性和代表性,

自 1989 年以来, 流域内开展了一系列的水土保持治理工作, 包括“长治”工程、“天保”工程及退耕还林草工程, 使流域下垫面以及产流产沙规律发生阶段性变化^[3-5]。因此, 对香溪河流域泥水沙输移特征变化及驱动因素进行深入分析, 对于揭示三峡水库区间土壤侵蚀产沙机制、影响因素和变化趋势, 水土保持治理成效, 减缓库区泥沙淤积, 延长水库使用寿命具有重大的实际意义。为了深刻认识这些问题, 本研究基于

收稿日期: 2014-07-01

修回日期: 2014-07-26

资助项目: 江西省土壤侵蚀与防治重点实验室开放基金“赣江上游水沙时空演变及其对植被恢复的响应”(JXSB201303); 水利部公益性行业专项(201201048); 水利部公益性行业专项(201301059)

第一作者: 刘惠英(1973—), 女(汉族), 陕西省凤翔县人, 博士研究生, 讲师, 研究方向为坡面土壤侵蚀和流域水体监测方面研究。E-mail: jlfx7401@163.com。

通信作者: 张平仓(1961—), 男(汉族), 陕西省渭南市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: zhangpc@mail.crsri.cn。

水文统计,对香溪河流域 1974—2010 年的降水、径流和输沙变化及相关关系进行分析,并对其驱动因素进行分析。本研究不仅对该区水土流失治理、水土保持效益评价具有重要意义,同时可为三峡水库区间流域水沙锐减研究提供一定的理论支持。

1 研究区概况

香溪河流域地处长江流域上游,发源于神农架南麓,系长江三峡大坝坝区第 1 条支流,位于湖北省西北部,流域总面积 3183 km²,其中神农架林区 865 km²,兴山县 2106 km²,秭归县 212 km²,自然落差 1540 m。兴山境内流长 78 km,秭归境内流 11.1 km,为峡谷型河流。由北向南纵贯兴山县全境,至游家河入秭归县后又汇屈平河之水,于香溪镇东注入长江,汇长江之水流入西陵峡,下泄至三峡大坝^[6]。流域内兴山水文站位于香溪河畔的兴山县高阳镇。流域土地资源短缺,因多年盲目垦荒、毁林造田、乱砍滥伐,20 世纪 80 年代末森林植被破坏严重,土壤、岩石裸露加剧,造成水土流失,大量泥沙入河,为了防治水土流失,保障三峡工程正常运行,1989 年起,香溪河流域开展了一系列水土保持治理。

2 资料和方法

2.1 数据来源

兴山水文站地理位置为东经 110°45′,北纬 31°13′,为 II 类精度国家重要站。该站径流监测始于 1958 年、泥沙始于 1974 年、降雨监测目前现存完整资料始于 1935 年,降雨量连续观测日始于 1951 年

12 月。本文所用降雨、径流和泥沙数据均来自长江水利委员会编撰的水文年鉴。文中所有雨量为流域内 10 个雨量站按泰森多变形计算所得。

2.2 研究方法

2.2.1 Mann—Kendall 检验法 Mann—Kendall 趋势检验法是世界气象组织推荐并已广泛使用的非参数检验方法,是由 Mann 和 Kendall 提出的。非参数检验亦称为无分布检验,其优点是样本不需要遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,更适合用于类型变量和顺序变量。广泛应用于水文和气象要素时间序列的趋势变化和突变检测。详细方法参照文献[7-8]。

2.2.2 其他分析方法 采用变差系数 C_v 值、极值比 K 等表征降水量、径流量及输沙量的年际变化;采用水文频率曲线和年降雨量—年输沙量双累积曲线反映输沙量的波动情况。

3 结果与分析

3.1 流域降雨量、径流量和输沙量变化的基本特征

径流、输沙和流域降水密不可分。在不受人类活动干扰的情况下,流域径流的大小直接由流域降水决定;同时输沙的大小也受流域降水的影响。

香溪河流域不同年代的降雨、径流和输沙量的统计特征值见表 1。流域 1974—2010 年年均降水量 1109.3 mm,变差系数为 0.15,降水极值比为 2.50。年代际间,20 世纪 80 年代降雨为最多,而后呈先减后增趋势,90 年代是研究期降雨最少的时段,较降雨最多时段减少了近 20%。

表 1 香溪河流域不同年代水文要素特征

年份	面平均降水/(mm·a ⁻¹)			径流量/(10 ⁸ m ³ ·a ⁻¹)			输沙量/(10 ⁴ t·a ⁻¹)		
	均值	极值比	变差系数	均值	极值比	变差系数	均值	极值比	变差系数
1974—1980	1113.0	1.49	0.05	11.41	1.8	0.17	40.9	5.1	0.70
1981—1990	1219.3	1.59	0.14	13.21	2.3	0.28	103.7	5.4	0.54
1991—2000	1023.2	2.08	0.15	9.76	2.4	0.22	24.2	49.3	0.79
2001—2010	1082.6	1.89	0.16	9.63	2.4	0.27	16.9	58.1	0.93
1974—2010	1109.3	2.50	0.15	10.97	3.4	0.28	46.9	221.6	1.04

香溪河流域多年平均年径流量为 1.10×10^9 m³,变差系数 C_v 为 0.28,接近降雨变差系数的 2 倍,最大年和最小年径流比 3.4,年际间径流变化悬殊。从年代际特征来看,20 世纪 80 年代流域径流最大,和降雨特征一致,以后各年代径流量逐渐减少,在 2000 年后径流量达到最少,仅为 9.63×10^8 m³/a,比 80 年代减少 37.2%。

香溪河流域多年平均输沙量为 4.69×10^5 t,变差系数为 1.04,远远大于降雨和径流的变化,输沙极

值比达到了 221.6,是径流极值比的 65.2 倍,是降雨极值比的 88.6 倍。输沙大小年代际特征和径流相近,80 年代最大,2000 年后最小,但变差系数变化和均值变化正好相反,2000 年后最大,80 年代最小。输沙量的年代际变化和径流特征一样,最大出现在 1981—1990 年,最少时段为 2001—2010 年,前者均值是后者的 6.14 倍,同时 1981—1990 年输沙量的变差系数为 0.54,为整个时段最小值,而 2001—2010 年为 0.93 为最大值,分析认为 1981—1990 年为稳定的

高产沙时段,而 2001—2010 年为低产沙时段,但年际间变化较大。

流域 1974—2010 年面平均降水量及其变化如图 1 所示,降水量整体上呈微弱下降趋势,平均减少量为 2.84 mm/a,对流域降水进行 Mann—Kendall 秩相关检验,统计值 $Z = -0.90$,表明流域降水呈下降趋势,没有通过信度为 90% 的显著性检验,下降不显著。香溪河流域兴山站实测径流的年变化图及线形拟合关系见图 1。年径流整体上为减小趋势,平均减少量为 $9.50 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$,Mann—Kendall 统计值 $Z = -1.70$,说明随时间变化流域径流量呈下降趋势,但下降趋势没有通过 95% 信度为的显著性检验,只通过了 90% 信度显著性检验。香溪河流域多年输沙量变化的线形拟合表明流域年输沙减少量为 $1.99 \times 10^4 \text{ t/a}$,年输沙量的 Mann—Kendall 统计值 $Z = -2.28$,年输沙量的减少通过显著性 0.05 的水平,流域年输沙量的减少趋势显著。

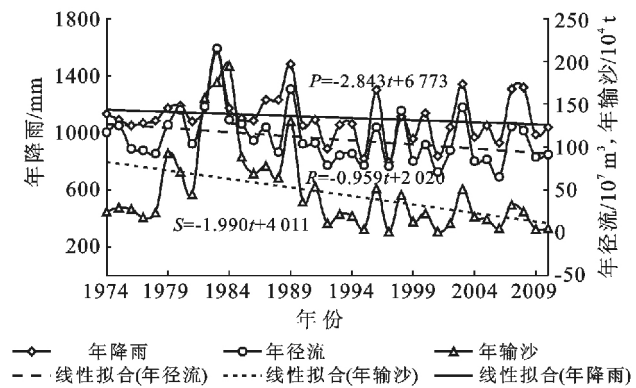


图 1 香溪河流域 1974—2010 年实测降水量、径流量和输沙量

3.2 流域径流和输沙突变点确定

从 Mann—Kendall 秩检验原理可知,统计值 UF 大于零表示系列有增加趋势,小于零序列有减小趋势^[7-8]。香溪河流域年径流从 1980—1991 年为增大趋势,1991 年后为减少趋势,从 2000 年后流域径流的减少超过了 0.05 的显著性水平。从流域年输沙的 M—K 检验图上 UF 曲线值的变化发现,突变开始发生的时间是 1994 年;1979—1994 年 UF 统计值大于零(图 2),从 1995—2010 年 UF 统计值小于零,表明 1979—1994 时段输沙量为增加趋势,从 1995—2010 为减少趋势,并且从 1983—1989 年 UF 值都大于 1.96(0.05 显著性水平),表明增加趋势显著(图 3);同时 2001—2010 年 M—K 统计值均值为 -2.68,其绝对值大于了 0.01 显著性水平统计值 2.58,表明 2000 年后流域输沙下降及其显著。比较径流和输沙发生突变时间,发现输沙突变晚于径流 3 a 左右,这

比流域实施大规模治理开始时间 1989 年晚大概 5 a 左右,与水保措施开始发挥效益时间一致。

线形拟合及 Mann—Kendall 检验均表明香溪河流域径流量和输沙量有不同程度的减少趋势。为了定量确定香溪河流域径流和输沙的突变时间,采用 Mann—Kendall 突变检验法来确定流域径流和输沙的突变点。从图 3 上 UF 和 UB 的交点确定流域输沙量的突变发生在 1994 年,而径流的突变发生在 1991 年(图 2),输沙相对于径流而言突变具有滞后性。但突变并不显著。

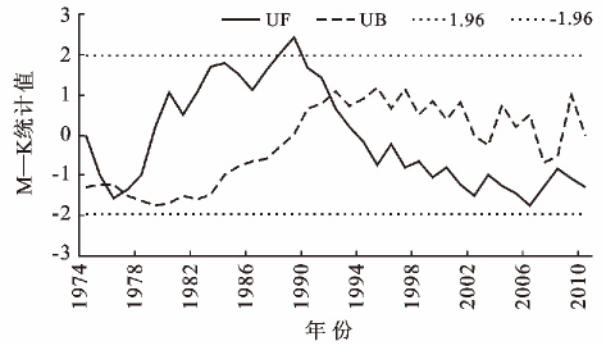


图 2 兴山站年径流的 Mann—Kendall 突变点检测

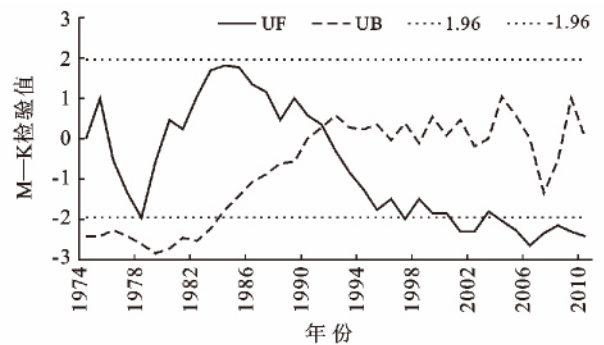


图 3 兴山站年输沙 Mann—Kendall 突变点检测

以输沙量突变年份为界,将这个研究期分为 2 个时段,比较分析突变年份前后 2 个时段输沙量的发生频率,在同一频率下年输沙量变化,可说明输沙量的变化趋势^[9]。分别选择频率为 5%、50%和 95%分别表示丰、平、枯 3 种不同典型年份,对量化分析输沙的减小和临界年份之前相比(表 2),按照丰、平、枯顺序,输沙量的减少幅度依次增大,分别是 57.33%、73.90%和 95.60%。

表 2 兴山水文站突变年份前后丰、平、少水平年输沙量变化

水平年	突变年份前输沙量/($10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$)	突变年份后输沙量/($10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$)	突变百分数/%
丰沙年	195.20	83.30	57.33
平沙年	43.30	11.30	73.90
枯沙年	20.0	0.88	95.60

3.3 输沙量阶段性变化及其成因分析

双累积曲线(DMC)在水文气象要素一致性及其长期演变趋势研究中以简单、直观、实用而被广泛应用,是常用的一种用来判断是否有突变发生的方法。一般情况下,流域水沙特性如发生系统变化,在水沙量双累积关系线上将表现出明显的转折,即累积曲线斜率会发生明显变化,也由此来判断其是否受人类活动影响^[9-10]。建立香溪河流域降雨—输沙的双累积曲线并拟合各时段曲线方程,通过双累积曲线分析(图 4)发现,输沙量存在明显的阶段性特征,通过线形拟合可分为 4 段,分别是 I:1974—1978 年;II:1979—1990 年;III:1991—2002 年;IV:2003—2010 年。各段拟合方程和相关系数见图 4,各段相关系数均通过了显著性检验。线形回归方程的斜率表示在降雨变化一定的情况下相应增加的输沙量,斜率反映了各时段侵蚀输沙程度。从 4 个回归方程发现其斜率分别是 I:220 t/mm,II:890 t/mm,III:200 t/mm 和 IV:140 t/mm。II 段最大,IV 最小,I 和 III 接近。

结合流域实际调查,对图 4 进行分析:将 1974—1978 年定为没有人类活动干扰的本底期,分别将不同时段降水代入本底期降水输沙关系,得到不同时段在没有人类活动干扰时的流域输沙量,不同时段计算

输沙量差值即为降水变化对输沙的影响量;同期实测值和计算值之间的差即为人类活动干扰输沙量,人类活动干扰输沙量与同期计算输沙量的比值即为人类活动对输沙的影响效益,各时段实测输沙量及相对于本底期降水和人类活动对输沙的影响量见表 3。从表中可以发现相对于本底期,1979—1990 段降水量增加,导致流域输沙量增大的效益仅为 7.2%,而人类活动对于流域输沙的增沙效益达到了 276.2%,检验结果为显著。贡献率超过 100%,说明 II 人类活动程度及其强烈,远远大于 I 段本底值,这一结果也可以从回归方程的斜率上得到反映,II 段斜率时是 I 段的 4 倍。

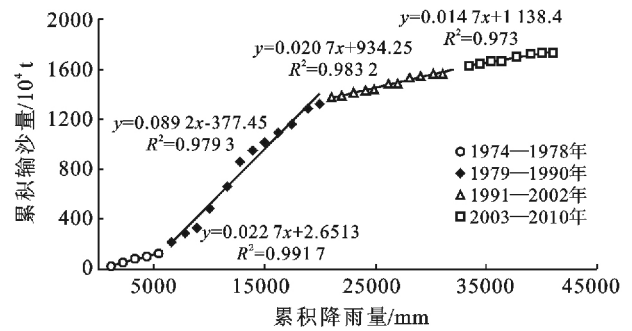


图 4 香溪河降水量—输沙量双累积曲线

表 3 香溪河流域兴山站各时段年输沙量变化原因分析(1974—1978 为本底期)

时段	实测输沙量/ (10 ⁴ t·a ⁻¹)	计算输沙量/ (10 ⁴ t·a ⁻¹)	实测年输沙变化 量/(10 ⁴ t·a ⁻¹)	降水影响量/ (10 ⁴ t·a ⁻¹)	人类活动影响输沙 量/(10 ⁴ t·a ⁻¹)	人类活动 减沙效益/%	t 检验
I	24.67	24.67	0.00	0	0	0	
II	100.00	26.58	75.33	1.91	73.42	276.2	显著
III	21.26	22.20	-78.74	-4.38	-0.94	-4.2	不显著
IV	19.62	24.63	-1.64	2.43	-5.01	-20.3	不显著

同时发现,相对于本底期,III 段及 IV 段年人类活动对流域输沙量的影响是正向的,减沙效益分别 4.2%和 20.3%,表明经过了治理,III 段和 IV 段在本底期基础上,不仅使流域达到了未破坏的本底期状况,并且和本底期相比流域健康状况更加向良性发展。

为了更进一步研究水土保持措施的效益,将人类活动强烈干扰 II 段定为基准期,分别研究 III 段和 IV 段的减少效益(表 4)。通过计算,III 段及 IV 段水保措施对水沙关系的贡献率分别达到了 77.9%和 80.3%,并且随时间推移水保措施将会发挥越来越大的效益,t 检验结果为显著。

表 4 香溪河流域兴山站各时段年输沙量变化原因分析(1979—1990 为本底期)

年份	实测输沙量/ (10 ⁴ t·a ⁻¹)	计算输沙量/ (10 ⁴ t·a ⁻¹)	实测输沙量变化/ (10 ⁴ t·a ⁻¹)	降水影响/ (10 ⁴ t·a ⁻¹)	人类活动影响输沙 量/(10 ⁴ t·a ⁻¹)	人类活动减 沙效益(%)	t 检验
1979—1990	100.00	100.00	0.00	—	—	—	—
1991—2002	21.26	96.24	-78.74	-3.76	-74.98	-77.9	显著
2003—2010	19.62	99.62	-1.64	3.38	-80.00	-80.3	显著

同理,如果以 III 段为基准,来研究 IV 段的人类活动的减少效益,结果为 18.9%。

从以上计算可以看出,香溪河流域自 20 世纪 70 年代后期开始,一直受到人类活动的强烈扰动。20

世纪70年代后期由于国家实施改革开放后,土地承包到户,当地群众受利益驱使,大肆砍伐分得的森林,使流域森林植被大幅度降低,加剧水土流失加剧^[3],80年代兴山站实测年输沙达 103.7×10^4 t/a,比70年代年均输沙增大了154%,输沙模数达到 546 t/(a·km²),如果以输移比 0.23 ^[11]来算的话,侵蚀模数达到了 $2\ 374$ t/(a·km²),属中度侵蚀。流域自1989年开始列入“长治”工程实施计划,从1989—2006年先后实施了“长治”1期、2期、3期、5期和7期,香溪河流域累计治理面积达 646.27 km²,占流域总面积的28.1%,占流域水土流失面积的37%^[3-5];2000年后国家又在该流域实施了天然林保护工程和退耕还林工程;天然林保护工程在2001—2005年人工造林 69.03 km²封山造林 148.17 km²^[4];退耕还林工程在2002—2004年3年间就以退耕还林和封山育林措施实施了 107.38 km²的治理面积^[5]。三大工程在兴山县合计治理面积占兴山总面积的46%,这些水土保持措施的实施将流域水土流失治理发展到了一个新的阶段。水土流失治理已使香溪河的侵蚀环境发生了显著的变化,土壤植被状况好转,流域的侵蚀输沙量大幅减少并呈减少态势,水土保持渐显成效。对在控制流域水土流失、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。这些都解释了人类活动对流域径流泥沙变化的影响。

4 结论与讨论

(1) 通过对香溪河流域1974—2010年降水、径流和泥沙的趋势检验和突变分析可知:流域降水呈缓慢减少趋势,但没有超过任何显著性水平;流域径流量亦呈下降趋势,超过0.10显著性水平检验,但没有通过0.05显著性检验,泥沙减少趋势显著,超过了0.05显著性检验;流域年径流量突变发生在1991年,年输沙量突变发生在1994年;泥沙时间滞后和水保措施一般3~5 a发挥减沙效益时间一致。

(2) 利用水文的频率曲线,以输沙量突变点1994年为界,分别求得在丰、平、枯3个不同水平年下,流域年输沙减少量为分别是57.33%,73.90%和95.60%,表明经过水土保持治理,流域侵蚀状况得到极大改善。

(3) 双累积曲线量化研究了香溪河流域年输沙

的变化情况,以1974—1978年作为本底期,80年代滥砍滥伐对流域破坏的贡献率为276.2%;在突变年份1994年以后,水土保持措施减少贡献率接近80%。

在诸多研究中^[10-12],均证明人为原因导致的流域径流输沙减少的贡献率已远远超过气候变化的影响。本文对输沙量变化的分析结果证实了“长治”工程、“天保”工程及退耕还林工程等人类活动对香溪河流域减沙的巨大贡献作用。同时,本研究显示,枯水年份水土保持措施的减沙效益较大,达90%以上;而丰水年份相对减沙效益小于60%,说明香溪河流域的水土保持措施质量还需要进一步提高,以应对大的暴雨洪水。

[参考文献]

- [1] 李凤清,叶麟,刘瑞秋,等. 香溪河流域水体环境因子研究[J]. 生态科学,2007,26(3):199-207.
- [2] 蔡庆华,孙志禹. 三峡水库水环境与水生生态研究的进展与展望[J]. 湖泊科学,2012,24(2):169-177.
- [3] 长江上游水土保持委员会,长江水土保持局. 长江上游水土保持重点防治工程科研论文集[C]. 北京:中国水利水电出版社,2010.
- [4] 朱远军,兴山县退耕还林现状与建设对策探讨[J]. 湖北林业科技,2006,138(2):59-63.
- [5] 陈光宇,彭洪林. 兴山县天保工程资源监测及实施对策探讨[J]. 湖北林业科技,2006,142(6):49-52.
- [6] 惠阳,张晓华,陈珠金. 香溪河流域资源开发状况及开发策略探讨[J]. 长江流域资源与环境,2000,9(1):27-33.
- [7] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,2007.
- [8] Yue S, Pilon P, Phinney B, et al. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series[J]. Hydrological Processes, 2002,16(9):1807-1829.
- [9] 穆兴民,张秀勤,高鹏,等. 双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题水文[J]. 2010,30(4):47-51.
- [10] 高鹏,穆兴民,王飞. 近60 a赣江水沙变化及其驱动因素分析[J]. 中国农村水利水电,2012(1):56-59.
- [11] 史德明,杨艳生. 三峡库周地区土壤侵蚀对库区泥沙来源的影响极其对策[C]//长江三峡工程对生态与环境的影响极其对策研究论文集. 北京:科学出版社,1987.
- [12] 任宗萍,张光辉,杨勤科. 近50 a延河流域水沙变化特征及其原因分析[J]. 水文,2012,32(5):81-86.