

三峡水库进出库水沙特征及其影响因素分析

李海宁¹, 张燕菁²

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048; 2. 国际泥沙研究培训中心, 北京 100048)

摘要:受气候变化和人类活动的影响,近年来三峡水库进出库水沙条件发生了很大变化。运用 Mann-Kendall 方法及小波分析方法,研究了三峡水库入出库主要控制站近 60 a 的实测径流量和输沙量时间序列。结果表明:进出库径流量存在减小趋势但减幅不大,入库输沙量明显减小;主要控制站径流量和输沙量序列均具有明显的多时间尺度特征,径流量和输沙量的第一主周期分别为 12~28 a, 15~25 a;水土保持、上游修建水利工程、河道采砂等人类活动是输沙量明显减小的主要原因,而其对径流量的影响相对较小。

关键词:水沙特征;趋势检验;周期规律;影响因素;三峡水库

中图分类号: P332.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.05.003

三峡水库作为世界第一大水库,自开始修建以来其泥沙问题就备受关注。为此,众多专家学者进行了大量研究。黄仁勇、张细兵研究了三峡水库进出库水沙的年际变化趋势和年内分布特征^[1];刘同富等分析了三峡水库进出库水沙序列的变化特性,并利用小波分析方法分析了年径流量序列的多时间尺度特征^[2];张强等研究了长江流域水沙变化的周期特征及其影响因素^[3]。本文在前人研究的基础上,利用最新的水沙资料,运用 Mann-Kendall 方法及小波分析方法系统地分析了三峡水库进出库水沙的变化特征,并对其影响因素进行了较全面的分析,以期揭示进出库水沙变化的内在机理,为长江三峡水库的调度运用提供参考。

1 水沙时空变化

1.1 三峡水库入库水沙及其年际变化过程

本研究以长江干流朱沱站、嘉陵江北碛站、乌江武隆站水沙量之和代表三峡水库入库水沙,各水文控制站不同年代水沙统计特征值如表 1 所示。

从表 1 可以看出,朱沱站多年平均径流量以 20 世纪 60 年代最大,达 2 808 亿 m³,比多年平均值偏大 6.7%,2000 年后比多年平均值减小 77 亿 m³,减幅 3%;多年平均输沙量以 20 世纪 60、80 年代较大,分别为 3.25 亿 t 和 3.29 亿 t,分别比多年平均值偏大

17.2% 和 18.8%。三峡水库蓄水运用后(2003~2013 年),朱沱站多年平均径流量和输沙量分别为 2 502 亿 m³ 和 1.59 亿 t,与 1956~2002 年比,分别偏小 6% 和 47%。北碛站年径流量以 20 世纪 80 年代最大,为 764 亿 m³,比多年平均值偏大 16.1%,1990~2002 年多年平均径流量为 544 亿 m³,比多年平均值减小 114 亿 m³,减幅 17.3%;输沙量以 20 世纪 60 年代最大,为 1.82 亿 t,比多年平均值偏大 82%。三峡水库蓄水运用后,北碛站多年平均径流量和输沙量各自为 665 亿 m³ 和 0.32 亿 t,与 2002 年前相比,年径流量小幅增加,输沙量偏小 72.2%。

表 1 三峡入库各站径流量、输沙量统计特征值

统计年份	朱沱站		北碛站		武隆站		三峡水库总入库	
	径流量/ 亿 m ³	输沙量/ 亿 t	径流量/ 亿 m ³	输沙量/ 亿 t	径流量/ 亿 m ³	输沙量/ 亿 t	径流量/ 亿 m ³	输沙量/ 亿 t
	径流量/ 亿 m ³	输沙量/ 亿 t	径流量/ 亿 m ³	输沙量/ 亿 t	径流量/ 亿 m ³	输沙量/ 亿 t	径流量/ 亿 m ³	输沙量/ 亿 t
1956~1959	2581	3.04	651	1.51	432	0.26	3664	4.81
1960~1969	2808	3.25	750	1.82	503	0.28	4095	5.35
1970~1979	2533	2.73	603	1.06	509	0.39	3646	4.19
1980~1989	2654	3.29	764	1.40	480	0.25	3899	4.94
1990~2002	2696	2.96	544	0.41	518	0.20	3759	3.57
1956~2002	2664	3.00	656	1.15	497	0.27	3818	4.48
2003~2013	2502	1.59	665	0.32	414	0.05	3582	1.96
1956~2013	2633	2.77	658	1.0	482	0.23	3773	4.00

武隆站年径流量围绕平均值上下波动,20 世纪 80 年代后输沙量减小,2000 年后输沙量减小显著,2000

~2013 年多年平均输沙量为 0.06 亿 t,仅为多年平均值的 21%。三峡水库蓄水运用后,武隆站多年平均径流量和输沙量分别为 414 亿 m³ 和 0.05 亿 t,与 2002 年前相比,分别偏小 16.7% 和 81.5%。

2003~2013 年,三峡水库入库年均径流量为 3 582 亿 m³,比多年平均值减小 191 亿 m³,减幅 5%,比 1956~2002 年多年平均值减小 236 亿 m³,减幅 6.2%;2003~2013 年多年平均输沙量为 1.96 亿 t,比多年平均输沙量减小 2.04 亿 t,减幅 51%,比 2002 年以前多年平均值减小 2.52 亿 t,减幅 56.25%。

1.2 三峡水库出库水沙及其年际变化过程

本研究以宜昌站水沙实测序列代表三峡水库出库水沙系列,其多年平均统计特征值如表 2 所示。

由表 2 可以看出,宜昌站多年平均径流量以 20 世纪 60 年代最大,为 4 535 亿 m³,比多年平均值偏大 5.5%;多年平均输沙量以 20 世纪 60、80 年代最大,均为 5.49 亿 t,比多年平均值偏大 32.2%。

三峡水库 135~139 m 运行期,宜昌站多年平均径流量和输沙量分别为 3 919 亿 m³ 和 0.7 亿 t,与 1956~2002 年相比,分别偏小 10.3% 和 85.8%;2007 年径流量和输沙量分别为 4 004 亿 m³ 和 0.527 亿 t,比 2002 年以前分别减小 8.3% 和 89.3%;三峡水库 175m 试验性蓄水期,其多年平均径流量和输沙量分别为 3 975 亿 m³ 和 0.298 亿 t,与 1956~2002 年多年平均值相比,分别偏小 9% 和 93.9%;三峡水库蓄水运行以来,宜昌站多年平均径流量和输沙量分别为 3 957 亿 m³ 和 0.466 亿 t,与 1956~2002 年多年平均值相比,分别偏小 9.4% 和 90.5%。可见,三峡水库在 135~139 m 运行期,对宜昌站径流量影响最大,而在 175 m 试验性蓄水运行期,对宜昌站输沙量影响最大。

表 2 宜昌站径流量、输沙量统计特征值 亿 m³

统计时间	多年平均	
	径流量	输沙量
1950~1959 年	4428	5.19
1960~1969 年	4535	5.49
1970~1979 年	4145	4.75
1980~1989 年	4448	5.49
1990~2002 年	4300	3.97
1950~2002 年	4367	4.92
2003~2006 年(135~139m 运行期)	3919	0.70
2007 年(156m 运行期)	4004	0.527
2008~2013 年(175m 试验性蓄水期)	3975	0.298
2003~2013 年(蓄水运行期)	3957	0.466
1950~2013 年	4297	4.15

1.3 水沙空间分配

朱沱站、北碚站和武隆站多年平均径流量分别占

三峡水库总入库的 70.0%,17.3% 和 12.7%;输沙量分别占三峡水库总入库的 69.5%,25.0% 和 5.5%。可见,长江干流来水来沙占三峡水库入库水沙最多,嘉陵江流域来沙量占三峡水库入库泥沙较多。

2 水沙变化趋势性分析

利用 Mann-Kendall 检验对 4 个站近 60 a 水沙实测序列进行趋势及突变点分析,其方法理论参见文献[4]。由图 1 可知,朱沱站年径流量总体没有显著变化趋势,20 世纪 60 年代和 2006 年以后年径流量变化相对明显,分别呈增加和减小趋势;北碚站年径流量从 1993 年开始呈减小趋势,2000~2010 年径流量显著减小;武隆站径流量在 2009 年和 2011 年径流量发生突变;宜昌站年径流量在 2000 年后呈持续减小趋势。

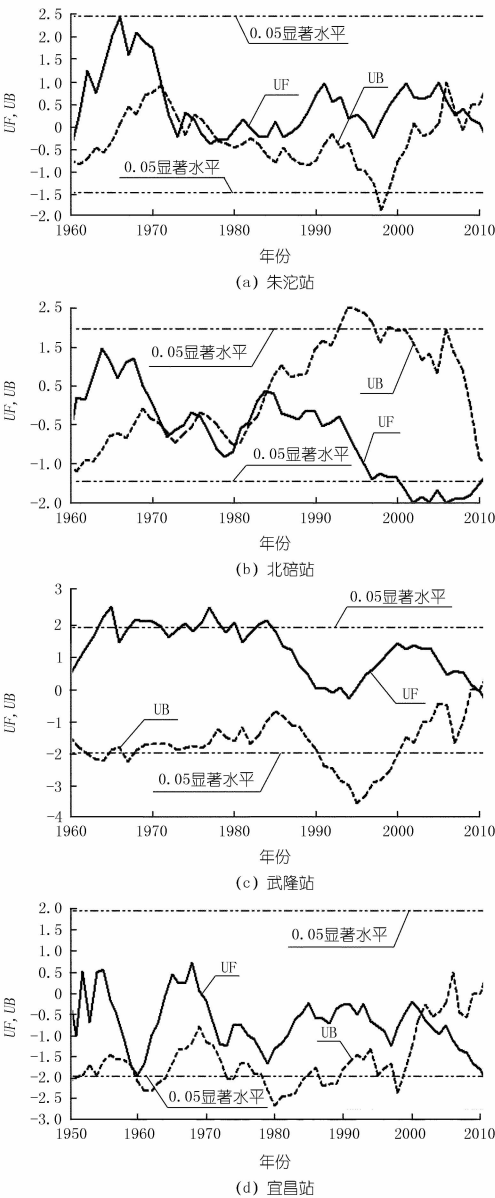


图 1 径流量 Mann-Kendall 分析

由图 2 可见,2001 ~ 2013 年朱沱站输沙量呈减小趋势,2009 年后输沙量减小显著,2005 年为朱沱站输沙量的突变点;北碚站输沙量从 1984 年开始呈减小趋势,1990 年后显著减小,1989 年为输沙量突变点;武隆站输沙量在 1973 ~ 1983 年显著增加,1987 ~ 2013 年输沙量呈减小趋势,2002 年后显著减小;宜昌站输沙量从 1990 年开始呈减小趋势,2000 年后显著减小。

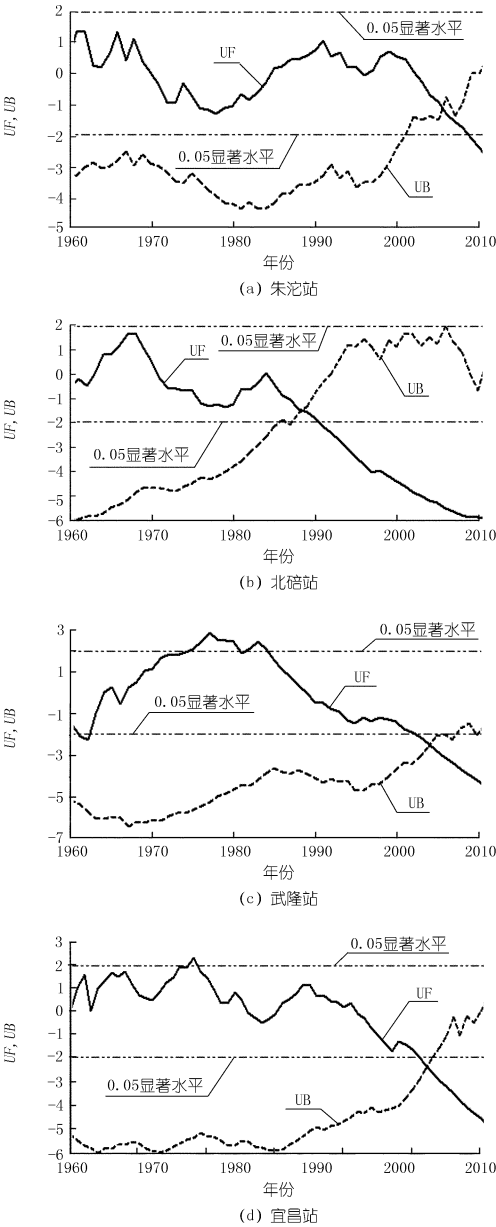


图 2 输沙量 Mann - Kendall 分析

3 水沙变化周期分析

3.1 年径流量变化周期

小波分析可用来研究多时间尺度周期变化问题,其分析理论、方法参考文献[5]。从图 3 可见,朱沱站径流量序列周期变化类型主要包括 15 ~ 25, 8 ~ 15, 5 a

以下,在 15 ~ 25 a 和 8 ~ 13 a 尺度上各出现 3 次和 5 次明显丰水 - 少水振荡,这 3 个时间尺度占据整个分析时域。北碚站径流量序列存在 18 ~ 32, 5 ~ 12 a 及低于 5 a 时间尺度的周期变化规律,18 ~ 32 a 时间尺度周期变化最为清晰,存在 2 次分布在整个研究时域的明显丰 - 枯振荡。武隆站径流量序列主要包括 21 ~ 32, 10 ~ 20 a 及低于 5 a 的周期变化类型,21 ~ 32 a 和 10 ~ 20 a 时间尺度周期变化在整个时间域显示清晰,分别存在 2 次和 4 次明显丰水 - 少水振荡期。宜昌站径流量序列显出现 14 ~ 22, 7 ~ 14 a 及 5 a 以下时间尺度的周期变化规律,14 ~ 22 a 和 7 ~ 14 a 时间尺度周期变化最为清晰,分别存在 4 次和 5 次明显的丰水 - 少水振荡期。

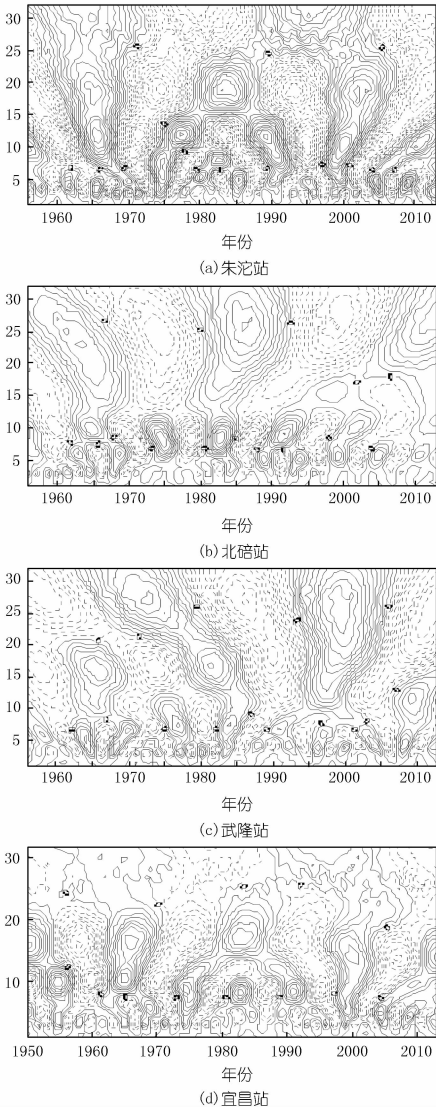


图 3 径流量小波系数实部等值线

3.2 年输沙量变化周期

由图 4 可知,朱沱站输沙量序列周期变化类型大致有 15 ~ 24 a 和 5 ~ 14 a 及低于 5 a 三类,均分布散

乱,15~24 a 时间尺度上存在 3 次明显的输沙量多-输沙量少振荡期,主要分布于 1970 年后的时域,5~14 a 时间尺度主要分布于 1980 年后的时域。北碚站输沙量序列周期变化类型主要有 15~20,5~10 a 及低于 5 a 3 类,其中,15~20,5~10 a 时间尺度的周期变化十分清晰,分别出现 3 次和 4 次明显的输沙量多-输沙量少振荡。武隆站输沙量序列显示出 20~32,5~8 a 和低于 5 a 时间尺度的周期变化类型,20~32 a 时间尺度周期变化十分清晰,在全域出现 2 次明显沙多-沙少振荡,5~8 a 和 5 a 以下时间尺度输沙量序列周期变化频率较快且分布散乱。宜昌站输沙量序列周期变化类型主要为 12~20,5~10 a 及 5 a 以下,12~20 a 时间尺度上存在 3 次明显的输沙量多-输沙量少振荡,主要分布于 1970 年后的时域,5~10 a 时间尺度上存在 5 次明显的输沙量多-输沙量少振荡,主要分布于 1970 年后的时域。

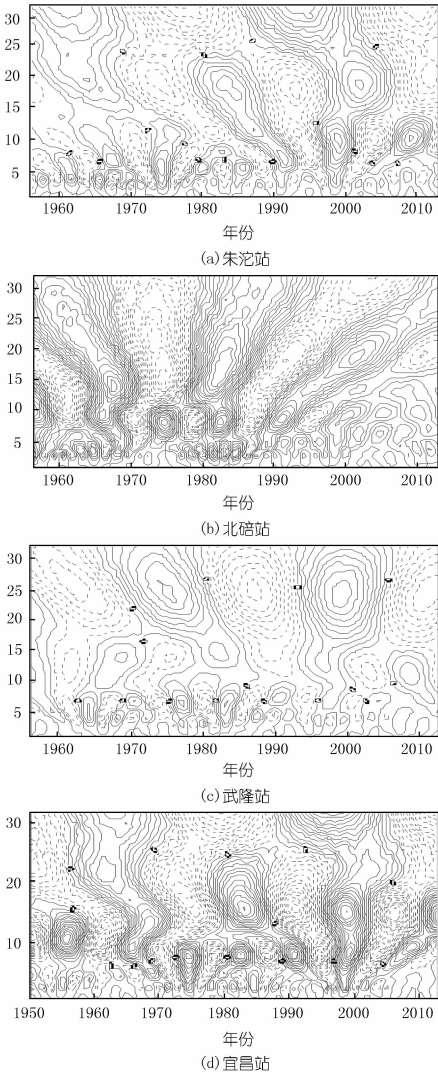


图 4 输沙量小波系数实部等值线

从小波方差分析结果(表 3)看,各控制站径流量

主要时间尺度在整个时间域上的丰枯交替变化基本一致,且基本充满整个研究时域,表明径流量受气候变化影响较大而受人为因素影响较小。在 12 a 时间尺度上,朱沱站径流量处于等值线图中未闭合的实线部分,表明其径流量正处于来水偏多的丰水期,北碚站和宜昌站分别在 26 a 和 16 a 时间尺度上与朱沱站情况相同。在 28 a 时间尺度上,武隆站径流量处于等值线图中未闭合的虚线部分,表明其径流量正处于来水偏少的枯水期。各控制站输沙量序列在整个时域上周期变化差异较大,且只有部分时间尺度充满整个研究时域,说明输沙量受人为因素影响,其规则的周期变化规律受到破坏。近期,4 个控制站主要时间尺度上输沙量都处于等值线图中未闭合的虚线部分,表明其输沙量均处于少沙时期。

表 3 三峡水库进出库各站年径流量、输沙量变化周期 a

控制站	时段	径流量变化周期			输沙量变化周期		
		第 1	第 2	第 3	第 1	第 2	第 3
朱沱	1956~2013 年	12	19	5	19	11	4
北碚	1956~2013 年	26	9	3	19	15	9
武隆	1956~2013 年	28	18	4	25	7	4
宜昌	1950~2013 年	16	10	3	15	9	2

4 水沙变化影响因素分析

4.1 气候变化

气候变化引起流域水循环的变化,使异常多雨地带迁移,发生流域异常降雨事件,引起蒸发、降水、径流的重新分布,导致径流量的变化及输沙量总量的改变及其在时间空间上的重新分布。长江上游年均降雨量维持在 800~1 000 mm,占全流域降雨总量 46.5%,其中,金沙江占 18%,岷江、沱江占 9.3%,嘉陵江占 7.9%,乌江占 5.2%,长江上游干流占 6.1%,降雨量与入库沙量成正相关关系。近 60 a 来,汛期和非汛期降雨量均呈现减小趋势^[6],降雨量减小直接导致径流量减小。近年来,三峡入库径流量的减小趋势与长江上游降雨量的减小密切相关。

降雨强度、历时、分布范围和暴雨中心等随机因素直接影响产沙区产沙量,这一规律在长江上游的产沙区表现明显。在月径流量相差不大情况下,受随机影响因素的制约,嘉陵江西汉水流域最大月输沙量是最小月输沙量 4~9 倍不等。流域径流量和输沙量具有 $W_s = KW_q^\alpha$ (W_s 为年输沙量, W_q 为径流量, K 和 α 为拟合系数和指数)的相关关系。图 5 为三峡水库入库水沙 1956~1980 年径流量-输沙量关系模型,以其为基准期,分别计算 1981~2002 年和 2003~2013 年三峡水库由于入库径流量变化导致输沙量变化的量,分

别为 0.0713 亿 t 和 0.503 亿 t,占 1981 ~ 2002 年和 2003 ~ 2013 年输沙量变化总量的 11.55% 和 17.9%。同样,以 1950 ~ 1980 年为基准期对宜昌站建立模型,分析 1981 ~ 2002 年和 2003 ~ 2013 年径流量变化对输沙量变化的影响,分别为 0.080 7 亿 t 和 0.638 6 亿 t,占 1981 ~ 2002 年和 2003 ~ 2013 年输沙量变化总量的 14.53% 和 13.64%。由此可见,径流量的变化对输沙量的变化影响并不大,输沙量变化主要受人为因素影响。

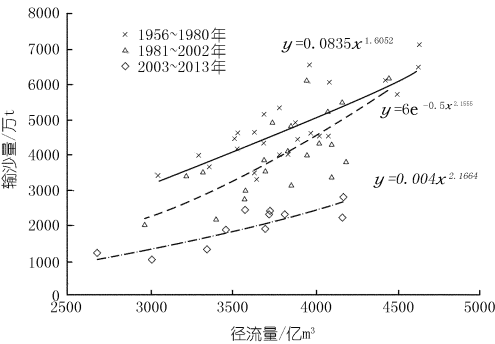


图 5 三峡入库径流量 - 输沙量关系

4.2 水土流失治理

自 20 世纪 80 年代起,长江上游产沙较多的区域开展了水土保持工作,并均取得了很好的减沙效益。1989 年长江上游水土保持重点防护工程开始稳步实施,1989 ~ 2008 年累计治理小流域 5 000 余条,修复水土流失面积达 9.58 万 km²。计算结果显示,1989 ~ 2003 年嘉陵江流域北碚站平均年减沙 0.208 亿 t,大约占北碚站减沙总量的 20.6%。可见,在嘉陵江流域实施水土保持措施后泥沙减少效益明显。乌江地区水土保持措施年均减沙量为 0.25 亿 t,主要影响东风电站和普定电站的入库泥沙,对武隆站输沙量影响不大。

4.3 河道采砂

随着经济的发展,国家基础设施建设力度不断加强,建筑用沙量不断增加,而其来源主要是河道采砂。采砂量过大的河段,一遇暴雨洪水,其河床遭到猛烈冲刷下切,导致过水断面面积增大,暴雨洪水水位下降,水流流速减小,大量泥沙在采砂河段发生淤积,直接造成下游来沙量明显减小。嘉陵江流域存在大规模的沙石等建筑材料开采,据统计,沙石年均开采量达 3.8 万 t/km²,卵石年均开采量达 1 万 t/km²。1993 年,朝天门至盐井河段 75 km 范围内,采砂量达 245 万 t、砾卵石开采量达 105 万 t;2002 年,朝天门至渠河嘴 104 km 河段内,采砂量达 290 万 t,砾卵石开采量达 67 万 t^[6]。1993 年,长江长寿至大渡河段 337 km 范围内,采砂量达 555 万 t,砾卵石开采量达 310 万 t,2002 年,长江铜

锣峡至泸州 277 km 河段,采砂量达 507 万 t,砾卵石开采量达 386 万 t。

4.4 水利工程建设

三峡水库 60% 左右的来沙量来自上游金沙江流域。1956 ~ 1990 年,金沙江流域水库年均拦沙量为 774 万 t,1991 ~ 2005 年,年均拦沙量为 3 344 万 t,是 1990 年前的 4.32 倍;1956 ~ 1990 年,岷江流域水库年均拦沙量为 1 166 万 t,1991 ~ 2005 年年均拦沙量增至 1 912 万 t;沱江 1956 ~ 1990 年均拦沙量为 587 万 t,1991 ~ 2005 年年均拦沙量为 406 万 t。上游水库拦截了大量泥沙,使朱沱站输沙量明显减少,进入三峡水库的悬移质泥沙也随之大量减少。

1990 年后,嘉陵江流域大中型水库建设进入高峰期。1991 年建成洲河江口水库和渠江四九滩工程,1996 年底宝珠寺水库下闸蓄水,1997 年涪江武都引水工程建成,2005 草芥航电枢纽主体工程开工建设,2009 年亭子口水利枢纽工程开始兴建。据统计,1991 ~ 2005 年嘉陵江流域小型水库拦沙量为 0.542 亿 m³,大中型水库拦沙量为 5.51 亿 m³,其中,1990 年后新建大中型水库拦沙 3.34 亿 m³^[7-8]。与 1956 ~ 1990 年相比,1991 ~ 2005 年嘉陵江流域所有水库年均拦沙量增加 0.281 亿 t。亭子口水利枢纽和草街航电枢纽建成后,嘉陵江流域进入长江的泥沙进一步减少。据估算,两个水库同时运用 1 ~ 10 a,北碚站年输沙量减小到 0.194 亿 t,为未建两水库时来沙量的 46.7%;两库同时运用至 20 a 末时,北碚站均来沙量为 0.211 亿 t,为未建两水库时来沙量的 51.5%。

乌江流域 1991 ~ 2005 年新建水库 183 座,主要有东风电站(总库容 10.25 亿 m³)、普定水电站(总库容 4.2 亿 m³)、引子渡水电站(总库容 5.27 亿 m³)、洪家渡水电站(总库容 49.47 亿 m³)等。据统计,1956 ~ 1990 年近 40 a 乌江流域水库拦沙总量为 2.795 亿 m³,而 1991 ~ 2005 年仅 15 a 间水库拦沙总量就达 2.087 亿 m³^[8]。

研究结果表明,1956 ~ 1990 年长江上游水库总拦沙量为 18.98 亿 m³,1990 ~ 2005 年总拦沙量为 19.75 亿 m³^[8]。可见,20 世纪 90 年代以后水库拦沙作用显著,导致三峡水库各入库站及三峡水库总入库泥沙量大幅减少。宜昌站输沙量与不同年代段水库库容关系如图 6 所示,2002 年前,其输沙量主要受长江上游修建水库拦沙的影响,2003 年后受三峡大坝蓄水运行影响其输沙量大幅减小。三峡水库蓄水运行后水库年均拦沙量如表 4 所示,各运行阶段水库拦沙作用明显,其中 175m 蓄水运行期拦沙效果最为显著,年均拦沙量 1.595 亿 t,占三峡水库总入库来沙量的 82.8%,对宜

昌站输沙量影响最大。

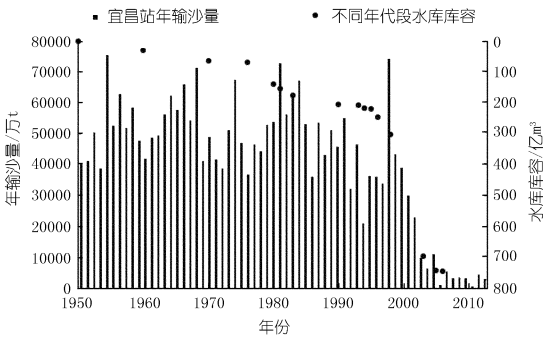


图 6 宜昌站输沙量与水库库容关系

表 4 三峡水库拦沙量统计特征值

统计年份	三峡水库年均 拦沙量/亿 m ³	占三峡入库 沙量/%	宜昌站多年平均悬移质 输沙量/亿 m ³
2003 ~ 2006 (135 ~ 139 m 运行期)	1.175	49.8	0.70
2007 (156 m 运行期)	1.700	71.2	0.527
2008 ~ 2012 (175 m 试验性蓄水期)	1.595	82.8	0.298
2003 ~ 2012 (蓄水运行期)	1.437	70.8	0.482

5 结 论

通过对三峡水库进出库站的水沙变化特征及影响因素分析,可以得到以下几点认识。

(1) 三峡水库蓄水运行后,进出库径流量与其运用前多年平均值相比变化不大,但输沙量明显减小。与 2002 年前多年平均值年相比,朱沱站、北碚站、武隆站、宜昌站多年平均输沙量分别偏小 47% , 72.2% , 81.5% , 90.5% 。

(2) 朱沱站、北碚站、武隆站和宜昌站径流量和输沙量时间序列分别存在 12, 26, 28, 16a 及 19, 19, 25,

15 a 的变化第一主周期。各站径流量和输沙量主要时间尺度在研究时域表现为交替振荡,径流量丰枯变化基本一致,但由于人类活动的干扰,各控制站输沙量多-输沙量少交替变化规律不一致。

(3) 长江上游降雨量减小导致三峡进出库径流量减小,长江上游实施水土保持措施、修建水利工程拦沙及河道采砂使三峡入库泥沙减少。三峡水库 175 m 蓄水运行期拦沙效果最为显著,水库拦沙作用使宜昌站来沙量明显减小。三峡水库进出库输沙量可通过植树造林、规范采砂、上游修建水库等来调控。

参考文献:

[1] 黄仁勇,张细兵.三峡水库运用前后进出库水沙变化分析[J].长江科学院院报,2011,28(9):75-79.

[2] 刘同宜.三峡工程蓄水前后进出库水沙特性及径流量时间序列变化周期分析[J].四川大学学报:工程科学版,2011,43(1):58-63.

[3] 张强,陈桂亚,许崇育,等.长江流域水沙周期特征及可能影响因素[J].水科学进展,2009,20(1):80-85.

[4] 孙甲岚,雷晓辉,蒋云钟,等.长江流域上游气温、降水及径流变化趋势分析[J].水电能源科学,2012,30(5):1-4.

[5] 山成菊,董增川,付晓花,等.近 50 年来滦河流域径流演变规律研究[J].南水北调与水利科技,2013,(4):5-8.

[6] 李春龙,张方伟,管丽,等.长江流域降水多年变化特征分析[J].人民长江,2013,44(15):11-14.

[7] 胡春宏,王廷贵,张燕菁,等.中国江河水沙变化趋势与主要影响因素[J].水科学进展,2010,21(4):524-532.

[8] 国务院三峡工程建设委员会办公室泥沙专家组,中国长江三峡集团公司三峡工程泥沙专家组.长江三峡工程泥沙问题研究(2006-2010,第一卷)一三峡水库近期(2008-2027)入库水沙系列研究[M].北京:中国科学技术出版社,2013.

(编辑:常汉生)

Analysis of characteristics of inflow and outflow runoff and sediment in Three Gorges Reservoir and its influential factors

LI Haining¹, ZHANG Yanjing²

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 2. International Sediment Research and Training Center, Beijing 100048, China)

Abstract: The runoff and sediment condition of Three Gorges Reservoir has changed significantly in recent years due to the effects of climate changes and human activities. The Mann - Kendall method and wavelet transform method are applied to analyze the annual runoff and sediment discharge data of the main controlling hydrological stations in recent 60 years. The results show that the runoff has a slight decreasing trend, while the sediment decreases sharply. Both runoff and sediment series of the main stations have an obvious properties of multiple time scale, the dominant period of runoff and sediment are 12 - year to 28 - year and 15 - year to 25 - year respectively. The impact of runoff changes on the sediment changes is small, while the soil and water conservation measures, construction of hydraulic engineering projects on upstream and the sand mining are the main causes for the sediment reduction.

Key words: runoff and sediment characteristics; trend analysis; periodic laws; influential factors; Three Gorges Reservoir