

南方多沙河流水沙演变特征及水库的影响分析

孔 兰¹, 陈俊贤^{1,2}, 陈晓宏^{3,4}

(1. 中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东 广州 510610; 2. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098;
3. 中山大学水资源与环境研究中心, 广东 广州 510275;
4. 华南地区水循环和水安全广东普通高校重点实验室(中山大学), 广东 广州 510275)

摘要: 以我国南方一多沙河流控制性水文站 1959~2010 年共 52 年的实测水沙资料为基础, 运用 Mann-Kendall 法、变差系数、类比法和灰色系统理论等分析了该河的水沙演变特征及其梯级开发的影响。结果表明: ①该河的水沙演变特征具有明显的年代际差异; 在梯级开发前水沙均呈上升趋势, 在梯级开发建库后呈下降趋势; 输沙量的变化较径流量的变化显著。②水沙变化呈正相关关系; 梯级开发后径流量和输沙量都明显小于梯级开发前; 在 1986 年和 2008 年水沙关系有较明显的变化。③梯级开发会使径流量和输沙量减少; 梯级开发是该河 2008 年水沙关系发生变化和输沙量明显减小的主要原因。

关键词: 水沙变化; 梯级开发; 双累积曲线

中图分类号: TV697.25; TV143

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2012)04-0049-05

流域的水沙变化是河流地貌、水利工程等领域普遍关注的科学问题^[1-4]。近年来, 随着河流梯级开发的进行, 水沙变化出现了新的特点。河流梯级开发会改变河流原有的水沙过程, 其导致的水沙输移变化、河床边界调整具有多种时间、空间尺度内的复杂性, 具表现形式多样, 不仅引发河流生态系统的各种响应, 还会影响河流系统各项服务功能, 这些变化的结果进一步决定着河流系统的健康状态^[5,6]。因此, 深入研究河流水沙过程变化和梯级开发的影响, 对于维护河流系统健康, 更好地进行流域管理, 具有重要的意义^[7-8]。

本研究所选多沙河流的代表性水文站设立于 1956 年, 集水面积 19 320 km², 已收集 1959~2010 年共 52a 的长系列水沙观测资料, 由于 2007 年底水文站上上游约 60 km 处建成了一大型水库, 因此 1959~2007 年的系列可以代表天然河道状况下的水沙特性, 2008~2010 年的水沙观测资料能反映梯级开发的影响。目前, 该河上已建成两座大型水库。在梯级水库开发过程中, 梯级水库减沙在人类活动对河流泥沙的影响中所

占的比重越来越大。本文通过多种方法对该河流控制性水文站的水沙特征进行研究, 探讨近 52a 来水沙演变特征及梯级开发的可能影响。

1 研究方法

1.1 M-K 突变分析方法

Mann-Kendall 法(以下简称 M-K 法)以气候序列平稳为前提, 并且序列是随机独立的, 其概率分布等同。M-K 法的优点在于不需要样本遵从一定的分布, 也不受少数异常值的干扰, 更适用于水文气象等非正态分布的数据。具体计算方法为^[9-10]:

对于具有 n 个样本量的时间序列, 构造一秩序列:

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k=2, \dots, n) \quad (1)$$

其中

$$r_i = \begin{cases} +1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (j=1, 2, \dots, i) \quad (2)$$

在时间序列随机独立的假定下, 定义统计量:

收稿日期: 2011-10-25

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201001022); 国家自然科学基金重点项目(50839005); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB428405)

作者简介: 孔兰 (1973-), 女, 山东曲阜人, 博士, 主要研究方向为水资源与环境变异。E-mail: konglan2006@126.com

$$UF_k = \frac{[s_k - E(s_k)]}{\sqrt{\text{Var}(s_k)}} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中: $UF_k=0$, $E(s_k)$ 、 $\text{Var}(s_k)$ 分别为累计数 s_k 的均值和方差, 在 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 相互独立, 有相同连续分布时, 可由下式算出:

$$\begin{cases} E(s_k) = \frac{n(n-1)}{4} \\ \text{Var}(s_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \end{cases} \quad (4)$$

1.2 趋势分析方法

常用的研究时间序列长期趋势变化的方法有线性倾向估计、滑动平均、累积距平、二次平滑、三次平滑、三次样条函数以及 Kendall 秩次相关法等。Mann-Kendall 趋势检验是提取趋势变化的有效工具, 以适用范围广、人为性少、定量化程度高而著称, 是一种被广泛用于分析趋势变化特征的检验方法^[1]。M-K 趋势分析方法是用来评估气候要素时间序列趋势的常用检验方法之一, M-K 统计量 z 的绝对值在大于等于 1.28、1.64、2.32 时分别表示通过了信度 90%、95%、99% 显著性检验。

1.3 变差系数

在水文统计中, 变差系数 C_v 是一个重要参数, 用来说明水文变量长期变化的稳定程度。 C_v 值大说明变量变化剧烈, 否则变化平缓稳定。公式如下:

$$C_v = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2 / \bar{x}} \quad (5)$$

式中: x_i 为年水文要素; $\bar{x}$ 为多年平均水文要素; n 为年数。

1.4 灰色关联分析法

灰色系统关联分析方法是对系统所包含的相互影响、相互联系、相互制约的因素之间关联程度进行定量比较的一种研究方法。其基本思想是根据序列曲线几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密。曲线越接近, 相应序列之间的灰关联度就越大, 反之就越小。关联度分析主要研究动态过程, 而相关分析则以静态研究为主。因此, 灰关联度分析在水文时间序列分析中具有其独到之处, 适应性更广^[12]。灰色关联分析法的具体计算步骤请见文献[8]。

2 流量的演变特征

收集了该河控制性水文站 1959~2010 年近 52a 的水文实测资料, 由图 1 可以看出径流量有明显的丰枯变化, 长系列呈弱下降趋势。

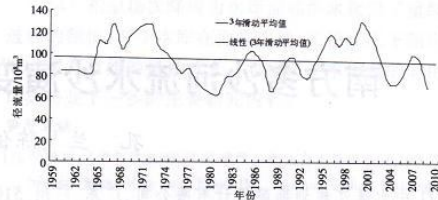


图1 1959~2010年径流量变化过程
Fig.1 The runoff process from 1959 to 2010

利用 M-K 法对径流量序列进行计算分析(图 2), 结果表明: 径流量序列在 1964~1979 年和 1999~2008 年具有上升趋势, 其中 1973~1974 年的上升趋势通过了 95% 的置信度检验, 上升非常显著; 1980~1998 年和 2009 年以来具有下降趋势。径流量在 20 世纪 70 年代初期的上升是一突变现象, 根据 UF 和 UB 曲线交点的位置, 突变现象是从 20 世纪 60 年代初期开始的。



图2 径流量序列的 M-K 法检测结果
Fig.2 M-K test of the runoff series

图 3 显示: 1960~2010 年不同年代年径流量平均值具有明显丰枯变化, 20 世纪 70 年代和 90 年代年径流量平均值较大, 20 世纪 60 年代和 21 世纪以来年径流量平均值次之, 20 世纪 80 年代年径流量平均值最小; 梯级开发建库后(2008~2010 年)的年径流量平均值低于梯级开发建库前(1960~2007 年)的年径流量平均值。

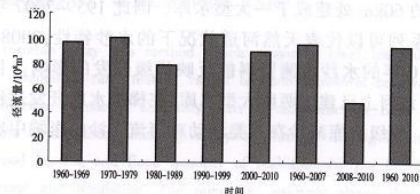


图3 不同时间段年径流量平均值
Fig.3 The average annual runoff in different durations
注: 1960~2007 为梯级开发建库前, 2008~2010 为梯级开发建库后

3 河道泥沙的演变特征

该河控制性水文站 1959~2010 年的输沙量变化如图 4,可以看出输沙量有明显的波动上升趋势。图 1 显示梯级开发后的 2009~2010 年与梯级开发前 1980 年的径流量大小相近,对降雨量资料分析发现 2009~2010 年的平均降雨量比 1980 年降雨量约多 10%,但是 2009~2010 年的平均输沙量比 1980 年约低 30%,通过类比法也可以看出梯级开发对水沙有较明显减少效应。

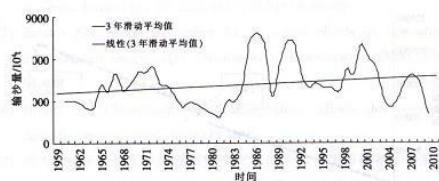


图 4 1959~2010 年输沙量变化过程
Fig.4 The sediment load process from 1959 to 2010

图 5 表明:输沙量序列以上升趋势为主,其中 1971 年、1973~1974 年和 2001~2002 年的上升趋势通过了 95% 的置信度检验,上升非常显著,这些时段的上升是突变现象,具体是从 20 世纪 60 年代中期开始的。

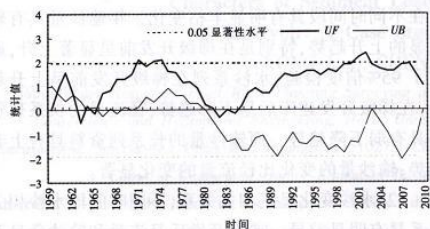


图 5 输沙量序列的 M-K 法检测结果
Fig.5 M-K test of the sediment load series

图 6 显示:1960~2010 年不同年代年输沙量平均值具有明显差异,20 世纪 90 年代年输沙量平均值最大,20 世纪 80 年代和 21 世纪以来年输沙量平均值次之,20 世纪 60 年代和 70 年代年输沙量平均值最小;梯级开发建库后(2008~2010 年)的年输沙量平均值明显低于梯级开发建库前(1960~2007 年)的年输沙量平均值。

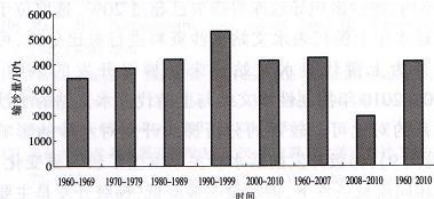


图 6 不同时间段年输沙量平均值
Fig.6 The average annual sediment load in different durations
注:1960~2007 为梯级开发建库前,2008~2010 为梯级开发建库后

表 1 显示:年径流的年际变化较小,年输沙量的年际变化较大,梯级开发建库后的水沙年际变化大于梯级开发建库前;径流量在 20 世纪 70 年代和 21 世纪 00 年代有较明显的下降趋势,输沙量在 20 世纪 70 年代下降趋势明显,在 20 世纪 80 年代和梯级开发前上升趋势较明显;水沙序列在梯级开发建库前呈上升趋势,在梯级开发建库后呈下降趋势;径流量的长系列资料具有弱下降趋势,而输沙量的长系列资料具有上升趋势。

表 1 水沙 C_v 与 Mann-Kendall 统计结果

Tab.1 The statistical results of C_v and Mann-Kendall test of the runoff and sediment load

时间	径流量		输沙量	
	C_v	z	C_v	z
1960~1969	0.277	0.716	0.495	0.715
1970~1979	0.279	-2.504	0.446	-1.610
1980~1989	0.284	0.000	0.862	1.252
1990~1999	0.207	1.073	0.471	-0.894
2000~2009	0.286	-1.342	0.552	-0.537
梯级开发建库前 1959~2007	0.278	0.233	0.607	1.871
梯级开发建库后 2008~2010	0.422	-1.045	0.804	-1.044
长系列 1959~2010	0.292	-0.395	0.628	1.018

4 水沙关系特征分析

为了探讨水沙关系,对年径流量与年输沙量序列分别进行相关分析和灰色关联分析。研究发现年径流量与年输沙量的相关系数为 0.75,在 0.01 的显著性水平下高度相关,水沙的灰关联度为 0.7543,大于 0.7,说明水沙关系密切,由图 7 亦可看出这种密切相关关系。图 8 显示:水沙呈正相关关系;不同时间段水沙相关关系具有明显差异;相同流量条件下,20 世纪 80 年代输沙量最大,60、70 年代较小;梯级开发后的水沙关系类似于 20 世纪 60、70 年代,总体上说梯级开发后输沙量有下降趋势。据统计该河流大型水库建成后的

3年内,泥沙淤积导致库容损失已超过20%。选取位于已建水库上游代表水文站水沙资料进行对比分析,可以认为上游代表水文站还未受梯级开发的影响,2008~2010年控制性水文站与上游代表水文站的水沙关系的对比可以较好的分析梯级开发对水沙的影响(见图9),梯级开发前后水沙关系发生了较明显变化,在相同流量条件下,输沙量明显降低,梯级开发是主要的影响因素。

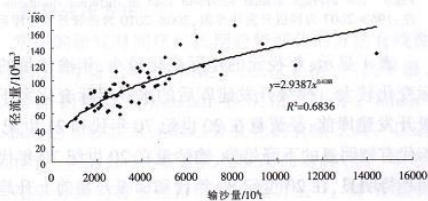


图7 径流量-输沙量相关关系
Fig.7 The correlation between the sediment load and runoff

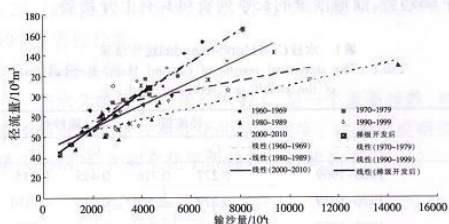


图8 不同时间段径流量-输沙量相关关系
Fig.8 The correlation between the sediment load and runoff in different durations

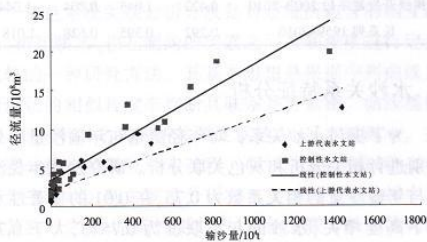


图9 控制性水文站与上游代表站的径流量-输沙量相关关系
Fig.9 The correlation between the sediment load and runoff at the control stations and upstream representative stations

由图10看出:水沙关系在1986年和2007年有较明显的变化。影响水沙变化的主要因素可能来自于气候和人类活动两个方面。人类活动对水沙的影响主

要包括:第一,随着经济社会的发展,河道外引用消耗的水量不断增加,直接造成年径流量的减少,梯级开发使水面面积增加,增加了水面蒸发量;第二,工农业生产、基础设施建设、梯级开发等活动使流域的下垫面条件发生了改变,造成年径流量的变化^[13-14]。植被破坏、水土流失等会使含沙量和输沙量增大,梯级开发使大量泥沙淤积在库区等会减少含沙量和输沙量^[15-16],如图10中显示的20世纪中期开始的输沙量增大主要是与植被破坏、水土流失等有关,而梯级开发是2008年以来的输沙量明显减小的重要原因。

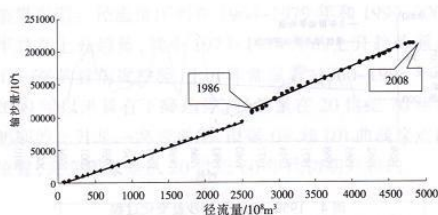


图10 年径流量和年输沙量的双累积曲线
Fig.10 The double-mass curve between the sediment load and runoff

5 结论

利用多种较成熟的理论方法对我国南方一多沙河流的水沙资料进行研究,主要得到以下结论:

(1)水沙演变特征具有明显的年代际差异;年径流量在不同时间段具有明显丰枯变化,年输沙量具有较明显的上升趋势,特别是在梯级开发前呈显著上升,通过了95%信度检验;水沙系列在梯级开发前呈上升趋势,在梯级开发建库后呈下降趋势;径流量的长系列资料具有弱下降趋势,而输沙量的长系列资料具有上升趋势;输沙量的变化比径流量的变化显著。

(2)水沙变化呈正相关关系,不同时间段水沙相关关系具有明显差异;梯级开发后径流量和输沙量显著小于梯级开发前,梯级开发后的水沙关系类似于20世纪60、70年代;水沙关系在1986年和2008年有较明显的变化。

(3)梯级开发使水面面积增加,由于水面蒸发量的增加会导致流量的较小;梯级开发使大量泥沙淤积在库区等会减少含沙量和输沙量;梯级开发是2008年水沙关系发生变化及梯级开发建库以来的输沙量明显减小的重要原因。

参考文献:

- [1] CHEN Zhongyuan, LI Jiufa, SHEN Huating, et al. Yangtze River of China: historical analysis of discharge variability and sediment flux [J]. *Geomorphology*, 2001, 41: 77-91.
- [2] LU Xixi, Peter Ashmore, WANG Jinfei. Seasonal water discharge and sediment load changes in the upper Yangtze, China[J]. *Mountain Research and Development*, 2003, 23(1):56-64.
- [3] 许炯心.长江上游干支流的水沙变化及其与森林破坏的关系[J]. *水利学报*, 2000 (1): 72-80. (XU Jiongxin. Relations between sediment load and deforestation in the upper Yangtze river [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000(1): 72-80.(in Chinese))
- [4] 谢淑琴.红河流域水文特性[J]. *水文*, 2002, 22(4):57-58.(XIE Shuqin. The hydrological characteristics of the Red River basin [J]. *Journal of China Hydrology*, 2002, 22(4):57-58.(in Chinese))
- [5] Shields FD, Simon A, Steffen LJ. Reservoir effects on downstream river channel migration[J]. *Environmental Conservation*. 2000, 27(1): 54-66.
- [6] Brandt SA. Classification of geomorphologic effects downstream of dams[J]. *Catena*. 2000, (40):375-401.
- [7] 张为. 水库下游水沙过程调整及对河流生态系统影响初步研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2006. (ZHANG Wei. Flow & Sediment Regime Alteration Downstream Dam and Its Impact on Riverine Ecosystem[D]. Wuhan: Wuhan University, 2006. (in Chinese))
- [8] Yangtze River Scientific Research Institute. Analysis and computation about riverbed erosion process downstream Three Gorge reservoir by 1-D numerical model [A]. In: *Sediment Research of Tree Gorge Project*(Vol. 7)[C]. Beijing: Intellectual Property Press, 2002:258-311.
- [9] ZHANG Qiang, XU Chongyu, Stefan B, et al. Sediment and runoff changes in the Yangtze River basin during past 50 years [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 331:511-523.
- [10] Mann HB. Nonparametric tests against trend [J]. *Econometrica*, 1945, 13:245-259.
- [11] Kimpel Ichiyangl, Mandabu D. Yamanaka. Yoshitaka Muraji, et al. Precipitation in N.Cpell between 1987 and 1996 [J]. *International Journal of Climatology*, 2007, 15(2): 245- 256.
- [12] 邓聚龙.灰色系统理论教程[M]. 武汉:华中理工大学出版社, 1992:33-78. (DENG Julong. Grey System Theory [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1992:33-78. (in Chinese))
- [13] 李艳,陈晓宏,王兆礼.人类活动对北江流域径流系列变化的影响初探[J]. *自然资源学报*, 2006, 21(6):910-915. (LI Yan, CHEN Xiaohong, WANG Zhaoli. A tentative discussion on the impact of human activities on the variability of runoff series of the Beijiang river basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(6):910-915. (in Chinese))
- [14] 叶长青,甘淑,王文玲,等.元江—红河径流时序特性及突变分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2008, 17 (6):886-891. (YE Changqing, GAN Shu, WANG Wenling, et al. Analysis on the runoff distribution and variability in the downstream of Honghe river [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, 17(6):886-891.(in Chinese))
- [15] 许炯心. 长江上游干支流近期水沙变化及其与水库修建的关系[J]. *山地学报*, 2009, 27(4): 385-393. (XU Jiongxin. Recent variations in water and sediment in relation with reservoir construction in the upper Changjiang river basin [J]. *Journal of Mountain Science*, 2009, 27(4): 385-393.(in Chinese))
- [16] 许炯心,孙季.长江上游干支流悬移质含沙量的变化及其原因[J]. *地理研究*, 2008, 27(2): 332-342. (XU Jiongxin, SUN Ji. Temporal variation in suspended sediment concentration of the upper Changjiang river and its tributaries in the past 50 years and the formative cause[J]. *Geographica Research*, 2008, 27(2): 332-342.(in Chinese))

Characters of Sediment Load and Runoff Evolution and Influence of Reservoir: A Case Study on Sandy River in South China

KONG Lan¹, CHEN Junxian^{1,2}, CHEN Xiaohong^{3,4}

(1. China Water Resources Pearl River Planning Surveying and Designing Co., Ltd., Guangzhou 510610, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Center for Water Resources and Environment, SunYat-sen University, Guangzhou 510275, China; 4. Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong Higher Education Institutes, SunYat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: In this study, based on the 52 years observed data of runoff and sediment load series at a important control station of a sandy river in the south China, the characteristics of the runoff and sediment load and the influence of cascade development have been analyzed by using Mann-Kendall method, coefficient of variation, analogy method and gray system theory. The results show that: 1) The characteristics of the sediment load and runoff evolution of the river have obvious decadal differences, the sediment load and runoff had upward trend before the cascade development, however, those have downward trend after the cascade development, the sediment load has more significant changes than runoff; 2) The sediment load and runoff evolution have positively related, the sediment load and runoff are less after the cascade development than before the cascade development of the former, the sediment load and runoff had significant changes in 1986 and 2008; 3) The cascade development can lead to reducing sediment load and runoff, the cascade development is the main reason for the significant change of the relationship between the sediment load and runoff in 2008 and significantly decreasing of the sediment load and runoff in the mainstream of the river.

Key words: changes of runoff and sediment load; cascade hydropower development; double-mass curve