



长江口近期来沙量变化及其对河势的影响分析*

李保¹, 付桂², 杜亚南¹

(1. 长江水利委员会水文局 长江口水文水资源勘测局, 上海 200136;
2. 交通运输部长江口航道管理局, 上海 200003)

摘要: 长江来水来沙变化影响因素众多, 除自然因素外, 人类活动对河流水沙运动影响越来越显著。作为长江流域的终端, 长江口地区既受自然因素影响, 同时也显著地受到流域人类活动的影响。采用Mann-Kendall法分析大通站近几十年的泥沙监测资料, 结果表明: 近几十年来, 大通站的年均输沙量一直呈下降趋势, 2003年大通站的年均输沙量出现显著下降。长江口来沙量减少主要是由于流域来沙量的显著减少, 与水库工程拦沙、长江上游水土保持工程、人工采沙及中游河道泥沙淤积等因素有关。长江口来沙量减少对南支及口外三角洲影响相对明显, 均表现为冲刷特征, 对此长江口综合治理相关部门应当充分给予重视。

关键词: 长江口; 大通; 输沙量; 河势变化

中图分类号: TV 148

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)07-0129-06

Recent variation of sediment transport and its impact on morphological evolution in the Yangtze estuary

LI Bao¹, FU Gui², DU Ya-nan¹

(1. Yangtze River Estuary Survey Bureau of Hydrology and Water Resource, CWRC, Ministry of Water Resources, Shanghai 200136, China; 2. Yangtze Estuary Waterway Administration Bureau, MOT, Shanghai 200003, China)

Abstract: Factors influencing the runoff and sediment changes of the Yangtze River are numerous, and the human activities are affecting the water and sediment movement more and more obviously besides natural factors. Runoff and sediment changes of the Yangtze estuary are influenced by both natural and human activities. This paper uses the Mann-Kendall method to analyze the monitoring information for the current decades at Datong station. The results show that the annual sediment transportation decreases in recent decades at Datong, especially obviously from 2003. The sediment reduction of the Yangtze estuary is mainly due to the significant reduction of sediment supply in the Yangtze River basin, which is caused by the sediment retention by reservoir engineering, soil and water conservation engineering in the upper Yangtze River, sand mining, and sedimentation at the middle reaches in the Yangtze River, etc. It's obvious that the south branch and outlets delta are scouring recently because of the sediment reduction in the Yangtze estuary. More attention shall be paid to this change.

Key words: Yangtze estuary; Datong; sediment transportation; morphological evolution

长江河口是江海相互作用的复杂综合体, 径流和潮流相互消长非常明显, 呈多级分汊格局。

多年来除了自然因素的影响外, 人类活动也以多种方式影响着河口的环境。1988年, 鉴于长江上

收稿日期: 2012-01-19

*基金项目: 国家自然科学基金项目(51079082)

作者简介: 李保(1982—), 男, 工程师, 主要从事河口水文方面研究和勘测工作。

游水土流失的严重性及三峡工程建设的需要，国务院批准将长江上游列为国家水土保持重点防治区，并于1989年开始分期实施以小流域为单元的水土流失综合防治工程。新中国成立60年来，国家在长江流域建成的各类水利工程数量远远超过之前2 000多年的总和，基本形成全流域水资源的综合利用体系，这其中包括三峡工程等一大批综合利用水利枢纽。长江上游梯级电站开发、水土保持与南水北调工程的的逐步建设，各关键河段的河势控制工程、沿江引水工程等，均会对来水来沙的时空分布产生影响。而流域来水来沙的变化，对长江口地区的影响是一个长期的、复杂的、递进的过程。

由于水、沙因子是河流生态系统最活跃的动力学因子，泥沙来沙量的减少将引起长江口环境的变化等^[1]。本文通过总结近几十年的实际监测资料，分析了近年来长江口来沙量的变化特征，以及流域来沙量的变化引起的长江口河势的变化。这对于科学保护河口生态系统的安全、制定合理的综合整治规划和防治对策有着积极的意义。

近年来Mann-Kendall非参数秩次相关检验法（M-K检验）被广泛应用于水文、气象资料的趋势成分与突变成分分析中。M-K检验的应用研究在国内外引起了广泛的关注，在气候、水质、水文要素等方面的应用涌现了一大批成果^[2-4]。

1 Mann-Kendall非秩次相关检验

Mann-Kendall法是一种被广泛用于分析趋势变化特征的检验方法^[5]，最初由Mann和Kendall提出^[6-7]，用于检验时间序列是否存在趋势性。该方法不仅可以检验时间序列是否存在上升与下降的趋势，而且还可以说明趋势变化的程度；在进行突变分析时，可以明确突变开始的时间、指出突变的区域。趋势研究分析是指分析一段时间内某类随机变量的一系列观测值，判断其总体的概率分布是否随时间变化，进而描述变化程度或变化速率。在时间序列趋势分析中，M-K检验是世界气象组织推荐并已广泛使用的非参数检验方法。非参数检验方法也称无分布检验，其优点是不需

要样本遵从一定的分布，也不受少数异常值的干扰，更适用于类型变量和顺序变化，计算也比较简便。许多学者不断应用M-K方法来分析降水、径流、气温和水质等要素时间序列的趋势变化。

在M-K检验中，原假设 H_0 ：时间序列数据 (x_1, x_2, \dots, x_n) 是 n 个独立的、随机变量同分布的样本；备择假设 H_1 是双边检验：对于所有的 $i, j \leq n$ ，且 $i \neq j$ ， x_i 和 x_j 的分布是不相同的。研究对象的实测值可构成一个时间序列，按时间顺序表示为 $x_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ，然后确定随机数列中对偶值 $(x_i, x_j, j > i)$ 中 x_i 与 x_j 的大小关系：

$$S_k = \sum_{i=1}^k R_i, (k=2, 3, 4, \dots, n) \quad (1)$$

式(1)中， R_i 计算式如下：

$$R_i = \begin{cases} 1 & x_j > x_i \\ 0 & x_j = x_i \\ 0 & x_j < x_i \end{cases} (i = 1, 2, 3, \dots, j) \quad (2)$$

由式(2)可知，秩序列 S_k 是第 j 时刻数值 $>$ 第 i 时刻数值个数的累计数 R_i 的累计值。定义统计量（计算公式如下）：

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{[Var(S_k)]^{1/2}} (k = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

式(3)中： $UF_1=0$ ， $E(S_k)$ ， $Var(S_k)$ 分别是累计数 S_k 的均值和方差，在 x_1, x_2, \dots, x_n 相互独立并具有相同连续分布时，可由以下公式求得：

$$E(S_k) = \frac{n(n-1)}{4} (k = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (4)$$

$$Var(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} (k=1, 2, 3, \dots, n) \quad (5)$$

对于随机序列 $x_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ，当 n 增加时（ $n > 10$ ）， UF_k 很快收敛于标准正态分布。当原假设为改序列无趋势时，一般采用双边趋势检验，在给定显著性水平 α 下，于正态分布表中查出临界值 $U_{\alpha/2}$ ，当 $|UF_k| < U_{\alpha/2}$ 时，接受原假设，即趋势不显著；当 $|UF_k| > U_{\alpha/2}$ 时，则拒绝原假设，认为趋势显著。

用M-K检验进行突变分析时，只需要按时间序列 x_i 的逆序 x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 ，再重复上述过程，计算 UB_k ，同时使 $UB_k = -UF_k, k=n, n-1, \dots, 1, UB_1=0$ 。若 UB_k 或 UF_k 的值大于0，表明序列呈上升

趋势;反之,序列呈下降趋势。当 UB_k 或 UF_k 超过临界值时,表明上升或下降趋势显著。超过临界线的范围确定为出现突变的时间区域。如果 UB_k 和 UF_k 两条曲线出现交点,并且交点在临界线之间,则交点对应的时刻便是突变的开始时间。

2 M-K检验在长江口来沙量时间序列分析中的应用

2.1 长江口来沙量概况

长江口是一个丰水、多沙、中等潮汐强度的分汊河口,上至安徽大通(枯季潮区界),下至水下三角洲前缘(30~50 m等深线),全长约700 km。河口分成3个区段,大通至江阴(洪季潮流界),长约400 km。大通水文站是长江下游最后一个干流流量控制站,距长江口门约624 km,位于长江感潮河段最上端,控制流域面积占长江流域总面积的95%,是长江入海水沙的参考站,其水沙特性的变化对下游河口的水流运动、泥沙输移、咸淡水混合的时空分布、河床演变等有着重要的影响。大通站的监测结果表明:长江多年平均进入河口地区的输沙量为3.90亿t,这些泥沙在长江口延伸、演变中发挥重要作用。

2.2 大通站年输沙量趋势特征

1950—2010年大通站的多年平均输沙量为3.90亿t,1950—1985年大通站多年平均输沙量为4.70亿t,1986—2002年大通站多年平均输沙量为3.40亿t,2003—2010年大通站多年平均输沙量为1.53亿t。其中:2006年特枯水文年的年均输沙量仅0.847 8亿t,为1950年以来的最小值;近10 a的年均输沙量比20世纪60年代减少了67%。大通站多年入海输沙量见图1。

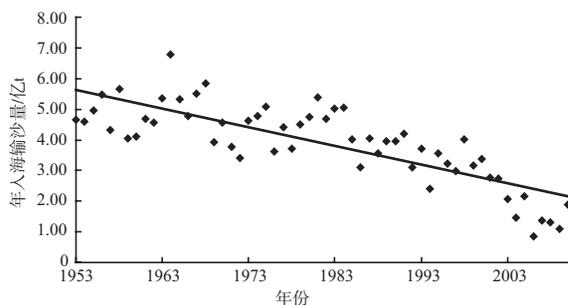


图1 大通站1953—2010年入海输沙量序列趋势

从图1中可以看出,大通站自1951年以来,年

入海输沙量序列一直在波动中下降,其一次线性拟合方程的斜率为-0.606,说明1953—2010年中大通站年入海输沙量总体趋势是下降的。

用M-K检验对大通站1953—2010年输沙量变化情况进行分析,取置信水平为0.05,查正态分布表得临界值为1.96。从图2中可以看出,1953—2003年, $|UF_k| < 1.96$,由于在 $UF_k < U_{\alpha/2}$ 时,接受原假设,即趋势不显著,所以在置信水平0.05下,1953—2003年大通站年入海输沙量序列趋势未达到显著的水平。但是,尽管趋势未达到显著水平,从图2中也可以看到,20世纪70年代以来, UF_k 一直都小于0,故20世纪70年代以来大通站的年入海输沙量序列趋势持续下降。从图2中还可以看出,2003年以来 $|UF_k| > 1.96$,这表明大通站的年入海输沙量出现了显著性下降。总的说来,1951—2010年,大通站年入海输沙量呈下降趋势,这与从图1中所得出的结论是一致的。

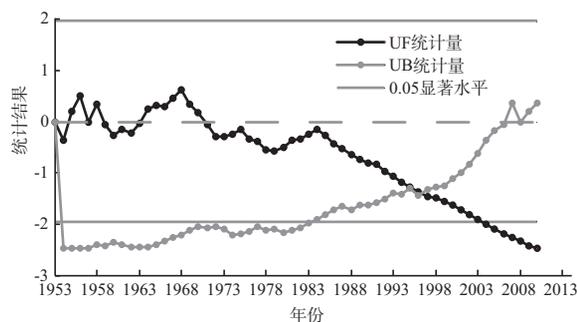


图2 大通站年均输沙量的M-K突变分析

2.3 大通站年输沙量突变特征

就长江口来沙量而言,突变是指时间序列在某时刻发生急剧变化的一种形式,表现为突变点前后平均河流悬沙浓度发生陡升或是陡降。研究突变可以从平均值、方差、自相关系数的统计量中寻找,多由序列的平均值来探讨是否有突变现象的出现。

用M-K法分析检测1953—2010年间大通站年均输沙量的突变(图2),给定置信水平 $\alpha=0.05$,对应的临界值为临界值 ± 1.96 。采用MatLab实现M-K法的计算,结果表明:自20世纪50年代以来,大通站年均输沙量发生了一次突变,突变时

间在1997年；从2003年开始，输沙量开始显著减小。以1997年为界，1953—1996年均输沙量的平均值为4.42亿t，1997—2010年均输沙量的平均值为2.23亿t，减少了49.5%，可见，1997年的突变是年均输沙量由高值向低值跳跃。总体说来，大通站年均输沙量从1971年开始一直呈减小的趋势，2003年大通站年输沙量出现了显著性减小，1953—2002年大通站年均输沙量的平均值为4.27亿t，2003—2010年大通站年均输沙量的平均值为1.53亿t，减少了64.2%。

3 趋势与突变原因分析

长江河口是长江流域的终端，流域的自然条件及长江流域的人类活动均会对长江口来水来沙的时空分布产生影响。其中长江流域自然条件主要包括气候变化及长江河道自然冲淤情况等。而长江流域的人类活动主要包括长江上游水土保持工程、人工采沙和水库工程拦沙等。

3.1 自然因素

3.1.1 气候影响

长江流域产沙量既与人类活动有关，又与气候变化（如降水量变化）的影响有关。许炯心^[8]基于大量实测资料，用经验统计方法研究了人类活动和降水变化对嘉陵江流域侵蚀产沙的影响，分别建立嘉陵江流域产沙量与年降水的指数方程。其中无人类活动、只受降水变化影响情况下，产沙量 Q_s 与降水量 P 函数关系为：

$$Q_s = 707.3e^{0.003P} \quad (6)$$

可见无人类活动情况下，产沙量与降水量的变化成正相关的关系。许继军等^[9]采用M-K法对20世纪50年代以来长江流域154个气象站降水量和26个主要水文站径流量的变化趋势进行了显著性检验。结果显示：长江流域降水量自20世纪50年代以来虽然有波动，但流域年降水总量整体变化趋势不显著。通过上述函数关系，可以认为流域降水量对流域的产沙影响不明显。

3.1.2 中游河道、湖泊、支流淤积

宜昌站近40 a来的丰沙年，按输沙量从大到

小依次为1954年、1981年、1968年、1974年、1984年、1966年和1964年，这些年份中，仅有1981年、1968年、1984年、1964年大通站为丰沙年。上下游丰沙年不一致，说明长江中下游河道和湖泊的冲淤变化，以及支流的输沙量对大通站的输沙量有一定的调节作用。

1980年后洞庭湖和鄱阳湖的沉积速度有所加大，其沉积通量增值分别为7 500 t/km²和1 050 t/km²。下荆江裁弯后，由于城陵矶的输水输沙量减小，下荆江输水输沙量加大，造成城螺河段河床发生淤积。根据1987—1997年同步资料分析^[10]，宜昌到大通河床年均微淤0.35亿t；其中汉口到大通河段，1986年后基本转变为淤积的态势，1986—1996年共淤积8.8亿t；并且长江Ⅱ，Ⅲ级支河道泥沙呈加速堆积态势，部分支流出现辫状河道特点。大量泥沙在长江干流、支流河道和湖泊中沉积，直接减少了大通站输沙量。

3.2 人类活动

3.2.1 长江上游水土保持工程

1988年国务院批准将长江上游列为国家水土保持重点防治区，包括金沙江下游、三峡库区和嘉陵江流域。1989年国家实施长江上游水土保持重点防治工程以来，嘉陵江流域大规模的水土流失治理收到显著成效，植被恢复迅速，北碚站输沙量发生大幅度下降，输沙量从1990年以前的1.33亿 t下降到1990年以后的0.494亿t，下降幅度达62.8%^[11]。金沙江屏山站输沙量虽有增加，但幅度很小，1990年后年均输沙量仅增加1.1%。

金沙江和嘉陵江多年平均含沙量分别占宜昌输沙量的49.6%和27.1%^[12]。若不考虑沿程冲刷恢复的条件下，大通站输沙量中的70%与宜昌站有关^[13]。金沙江屏山站和嘉陵江北碚站输沙量分别约占大通站输沙量的34.7%和19.0%。按照理想情况，北碚站输沙量减少对应大通站约减少11.9%，屏山站对应于大通站输沙量约增加0.4%。故1990年后，长江上游总的来沙量减少使大通站输沙量约减少11.5%。

3.2.2 人工采沙的影响

近年来,江沙采挖量在加大。据2005年不完全统计^[14],宜昌—沙市河段2003—2005年采砂总量在2 070万~3 830万t,年均采砂690万~1 280万t。宜昌—大通河床大量采沙,势必淤积量越大,导致了泥沙在长江干流的淤积,导致供沙的进一步减少,从而减少了大通站的输沙量。

3.2.3 水库工程拦沙

长江上游径流主要来自金沙江、岷江、沱江、嘉陵江和乌江等河流,悬移质泥沙主要来源于金沙江、嘉陵江、岷江。长江流域干流支流上分布了大量的水利工程,尤其是长江中上游地区。从图3及图4的相关性也可以看出,长江入海泥沙的减少跟上游大型水库的建设存在着密切联系,随着上游总库容的扩大,大量流域泥沙被拦截在库区,导致入海泥沙显著减少。对于来沙量减少的原因,据杨世伦等研究成果^[15],尽管长江流域的水土保持、采砂等因素有一定的作用,但流域修建了大量水库才是长江入海泥沙量下降的根本

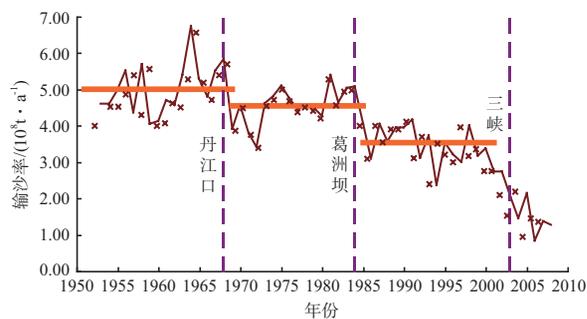


图3 长江大通站历年输沙率

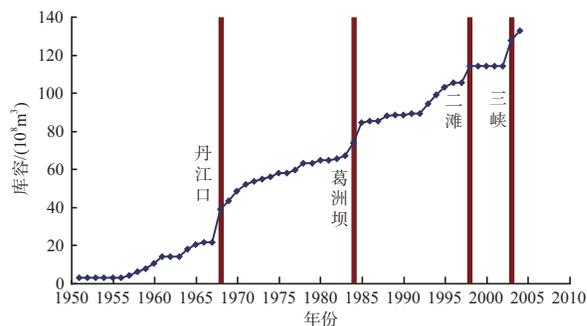


图4 长江流域大型水库累计库容变化

原因。1950年以来,长江流域共修水库近5万座,其中大型水库143座,累计库容约 $2 \times 10^{11} \text{ m}^3$,占流域年径流量的22%。水库的拦沙作用巨大,从2003年6月三峡水库蓄水到2003年12月的7个月中,就有1.24亿t泥沙淤积在库内,占同期入库泥沙的60%。输沙率随着流域累计库容的增多而下降,两者呈显著的负相关关系(图5)。

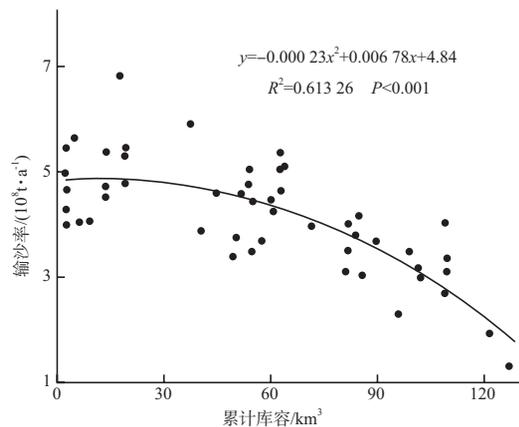
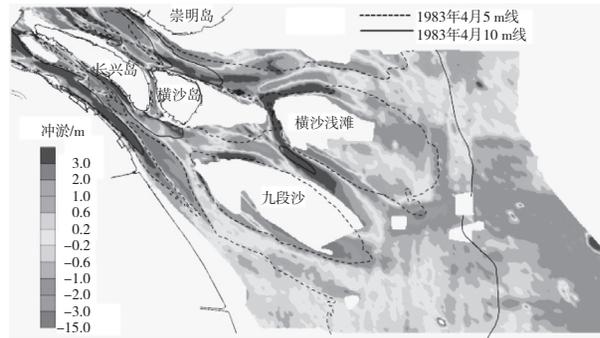


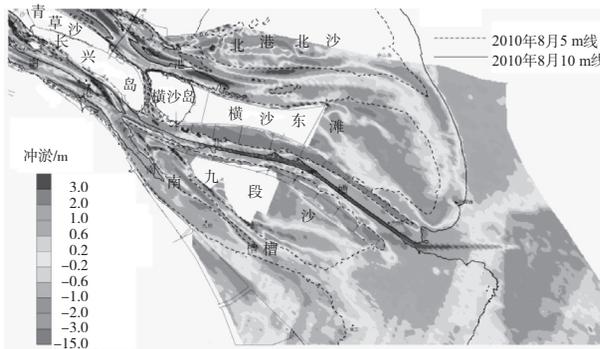
图5 长江流域大型水库累计库容与大通输沙率之间的相关关系

4 来沙量减少对长江口局部冲淤的影响

近年来,由于长江下泄水量变化不大,无特大洪水作用,而沙量持续减少较为明显,因此,流域水沙变化对长江口河势的影响主要体现在供沙不足引起的河口局部冲淤变化。本文以三峡工程建设前后长江口河势变化做对比,发现对南支的影响相对明显,主要体现在河槽容积扩大、江心沙洲冲刷缩小,主槽拓宽、中下段深槽淤积等;在南北港区域,河势变化更多地是由于受上游河势影响及南北港分流口区域相关工程的作用,仅由流域来沙的减少所产生的影响尚不明显;在拦门沙河段,受其特殊水沙环境的影响,流域来沙的变化尚未显现在地形变化上,其中北槽主槽及南槽河槽容积的扩大更多地是来自长江口深水航道治理工程、南汇东滩促淤圈围等周边涉水工程的影响;在口外,长江下泄泥沙的减少,使得水下三角洲部分区域呈现出由淤积转为冲刷的特征(图6)。



a) 1973—1983年



b) 2002—2010年

图6 长江口冲淤情况对比

5 结论

1) 本文采用M-K法分析大通站近几十年的监测资料, 结果表明: 近几十年来, 大通站的年均输沙量一直呈下降趋势, 1997年大通站的年均输沙量出现了突变下降显著, 2003年开始出现了下降显著。

2) 长江口来沙量减少主要是由于流域供沙量的减少, 主要影响因素是人类活动。首先是长江流域各种水库工程拦沙; 其次是长江口上游水土保持重点防治工程的实施; 同时也与人工采砂、长江中下游干流、湖泊和支流淤积加速有关。

3) 长江口来沙量减少对长江口南支及口外三角洲影响相对明显, 均表现为冲刷特征。对此长江口综合治理相关部门应当充分给予重视。

4) 长江口水沙运动复杂, 不仅与上游来水来沙条件有关, 还受时刻变化的海域来水来沙影响。因此, 在长江中上游诸多水利工程建设之

际, 应加强监测, 以现场资料来验证各工程设计阶段的影响分析预测, 当产生不利变化时, 及时采取应对之策。

参考文献:

- [1] 李长安, 殷鸿福, 俞立中, 等. 关于长江流域生态环境系统演变与调控研究的思考[J]. 长江流域资源与环境, 2001, 10(6): 550-557.
- [2] 杨莲梅. 新疆极端降水的气候变化[J]. 地理学报, 2003, 58(4): 577-583.
- [3] 李怡庭, 翁建华. 黄河干流重点河段水质变化趋势分析及水质管理对策探讨[J]. 水文, 2003, 23(5): 16-18.
- [4] 刘春葵. 近50年海河流域径流的变化趋势研究[J]. 应用气象学报, 2004, 15(4): 385-393.
- [5] 丁晶, 邓育仁. 随机水文学[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1988.
- [6] Mann H B. Non-parametric test against trend[J]. Econometrica, 1945, (13): 245-259.
- [7] Kendall M G. Rank Correlation Methods[M]. London: Charles Griffin, 1975.
- [8] 许炯心. 人类活动与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.
- [9] 许继军, 杨大文, 雷志栋, 等. 长江流域降水量和径流量长期变化趋势检验[J]. 人民长江, 2006, 37(9): 63-67.
- [10] 水利部长江水利委员会水文局. 1998年长江洪水及水文检测预报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000: 77-85.
- [11] 马炼, 张明波, 郭海晋, 等. 嘉陵江流域水保治理前后沿程水沙变化研究[J]. 水文, 2002(2): 27-31.
- [12] 林承坤. 长江口泥沙来源分析与数量计算[J]. 泥沙研究, 1984(6): 22-23.
- [13] 陈立, 吴门伍, 张俊勇. 三峡工程蓄水运用对长江口径流来沙的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2003, 12(1): 50-54.
- [14] 熊明, 许全喜, 袁晶, 等. 三峡水库初期运用对长江中下游水文河道情势影响分析[J]. 水力发电学报, 2010(1): 120-125.
- [15] 李明, 杨世伦, 李鹏, 等. 长江来沙锐减与海岸滩涂资源的危机[J]. 地理学报, 2006, 61(3): 282-288.

(本文编辑 武亚庆)