

左书华, 杨春松, 付桂, 等. 长江口入海水沙通量变化及其影响分析[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(11): 56-64.

ZUO Shuhua, YANG Chunsong, FU Gui, et al. Variation of water and sediment flux and its influence on the Yangtze River Estuary[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(11): 56-64.

长江口入海水沙通量变化及其影响分析

左书华^{1,2}, 杨春松³, 付桂^{4*}, 谢华亮²

(1 交通运输部天津水运工程科学研究所 港口水工建筑技术国家工程研究中心, 天津 300456;

2 交通运输部天津水运工程科学研究所 工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456;

3 国家发展与改革委员会国家投资项目评审中心, 北京 100037;

4 上海航鸿工程管理有限公司, 上海 200137)

摘要:基于大通站 1960—2020 年长系列的径流量和输沙量资料, 研究了长江口入海水、沙通量的季节变化、年际变化和趋势性, 并讨论了其影响因素。研究结果显示: 多年长江口入海平均径流量为 8 906 亿 m³, 各年的平均径流量值围绕着多年平均值上下摆动, 没有明显的变化趋势; 入海径流量的季节性变化明显, 每年的 5—10 月的径流量占全年的 70.3%; 多年平均年输沙量为 3.35 亿 t, 输沙量过程总体呈现减小的趋势; 长江口入海水沙通量变化受中上游的水土保持和水库建设等因素影响明显, 其中三峡水库蓄水后, 大通站输沙量与之前相比减少了 62.8%; 受长江流域来沙锐减的影响, 长江口河势也发生了明显变化, 出现了河口含沙量明显减小、河口总体上由淤积环境向冲刷环境转化、长江口水下三角洲前缘大面积冲刷河口拦门沙及水下三角洲泥沙补给出现“源汇转化”的结构变化等现象。

关键词:长江口; 大通站; 径流量; 输沙量; 三峡水库

中图分类号: P737.121

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.076

0 引言

河流输水输沙入海是地表过程的一个重要表现, 不仅对研究河口的演变及对海洋环境的影响有重要意义, 且有助于对全球陆海相互作用的研究^[1-3]。河口区域作为陆海相互作用区的一部分, 是河与海交互作用的过渡地带, 径流与潮流、淡水与盐水相互作用, 滩槽之间不断发生着变化。

据国内外众多学者的研究结果, 近年来世界范围内河流入海泥沙均存在减少问题, 有的还发生了急剧的下降^[1,4], 中国主要河流如长江、黄河、淮河等也呈现出明显的下降趋势^[5-9]。流域的大量梯级

水库被认为是导致河流入海泥沙锐减的最重要因素, 据推算, 水库拦蓄了全球河流近 26% 的入海泥沙^[1]。流域入海水沙的变化势必导致径流与潮流、盐水与淡水之间的抗衡态势, 泥沙与滩槽之间的调整发生相应改变, 进而影响河口演变趋势。长江是中国第一大河流、世界第三大河流, 平均每年有 9 000 亿 m³ 以上的水量和 4 亿 t 泥沙经大通站进入长江口, 成为河口三角洲发育的物质基础。长江河口属于世界级的大型河口, 其水沙变化备受学界关注^[10-17]。长江大通站位于长江河口潮区界附近, 距长江入海口约 640 km, 该站控制着上游 1.71×10⁶ km² 的集水面积, 是长江河口的流域侧边界控制水文站。大通站的水文情势及其变化对长江河口过程有着至关重要的控制作用, 也是河口资源开发和河口治理的重要决策依据。基于大通站多年径流和输沙资料, 本文将着重研究长江入河口区水、沙通量的季节变化、年际变化以及水、沙通量之间的关系, 为进一步研究长江入海水、沙通量提供基础信息。

收稿日期: 2022-03-22

资助项目: 交通运输部交通科技建设重点项目; 国家重点研发计划项目 (2019YFB1600605)

作者简介: 左书华(1979—), 男, 博士, 研究员, 主要从事河口海岸动力地貌研究工作. E-mail: zsh0301@163.com

* 通讯作者: 付桂(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事航道工程科研规划及工程管理工作. E-mail: glss456@qq.com

1 研究资料与方法

1.1 区域概况

长江源远流长, 全长 6 300 km, 流域面积约 $1.94 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。大通水文站是长江干流上最接近河口的一个水文观测站, 位于广义长江河口区的一个重要界面——枯季潮区界, 其径流基本代表了全流域的径流状况和长江口入海水沙情况。长江河口从大通站到口门, 包括几个关键界面, 如潮区界(大通河段)、潮流界(江阴河段)、盐水入侵界(徐六泾河段)、最大浑浊带(拦门沙区域)等。长江口自徐六泾以下, 被崇明岛、长兴岛和九段沙形成三级分汊四口入海的格局; 由崇明岛分为南支和北支, 由长兴岛分为南港和北港, 由九段沙分为南槽和北槽(图 1)。

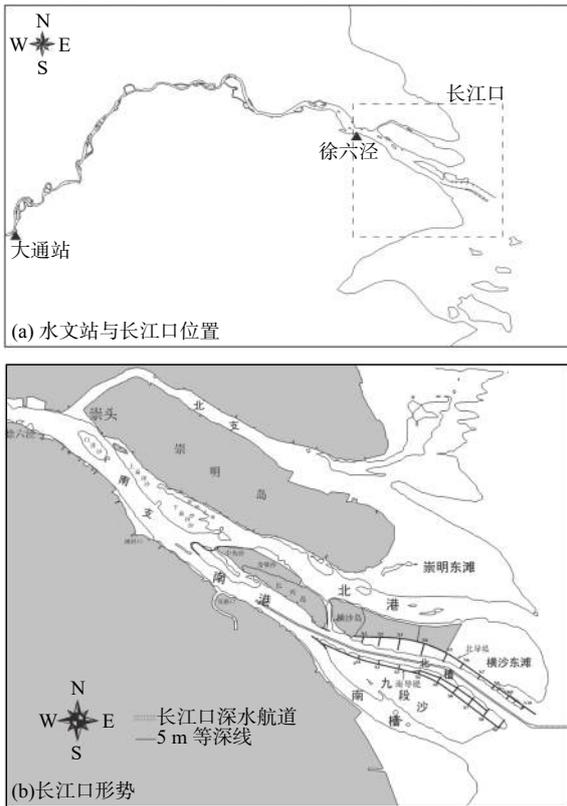


图 1 研究区域形势示意图

Fig.1 Situation map of the study area

1.2 资料与方法

收集了大通水文站 1960—2020 年逐年和逐月的径流量资料和输沙量资料。

为定量表征水沙通量年内分配情况, 引入时间序列分析中的变差系数 (C_V) 来说明水沙在年内分配的不均匀性。

$$C_V = \delta / \bar{R} = \sqrt{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (R(i) - \bar{R})^2} / \left[\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} R(i) \right]} \quad (1)$$

式中: $R(i)$ 为各月/年径流量或输沙量;

\bar{R} 为月/年平均径流量或输沙量。

C_V 值越大, 年内各月/年径流流量或输沙量相差越悬殊, 即年内/年际分配越不均匀。本文将基于年水沙通量数据计算得到 C_V 值时间序列, 以分析水沙通量年际分配不均匀性及其变化情况。

趋势性变化分析方法有很多种, Kendall(肯德尔)秩相关检验是其中的一种, 此方法的基本要点^[17-18] 如下:

$$\text{Kendall秩统计量: } \tau = \frac{4P}{N(N-1)} - 1 \quad (2)$$

$$\text{标准化变量: } M = \tau \cdot \sqrt{\frac{9N(N-1)}{2(2N+9)}} \quad (3)$$

式中: P 为系列中所有对偶观测值 ($x_i, x_j, i < j$) 中 $x_i < x_j$ 出现的次数;

N 为系列长度。

若序列为上升趋势, 则 $P=N(N-1)/2$; 若为下降趋势, 则 $P=0$ 。因此对于无趋势的序列 $E(P)=N(N-1)/4$; 当 $P < E(P)$ 时表示序列可能有下降趋势; 当 $P > E(P)$ 时表示序列可能有上升趋势。当 N 增加时, M 很快收敛于标准正态分布。当原则假设为该序列无趋势时, 一般采用双层检验, 在给定显著水平 α (一般为 0.05~0.01) 以后, 若 $|M| < |M|_{\alpha/2}$, 接受原假设, 则序列趋势不显著, 否则趋势显著。

2 结果

2.1 径流量变化

2.1.1 年际变化

图 2 显示了 1960—2020 年长江大通站多年来的年均径流量变化。60 年来由大通站进入河口的多年平均径流量为 8 906 亿 m^3 , 其中 1960—1980 年均径流量为 8 695 亿 m^3 、1981—2002 年均径流量为 9 213 亿 m^3 、2003—2020 年均径流量为 8 780 亿 m^3 , 最大和最小年径流量分别为 1998 年的 12 425 亿 m^3 和 2011 年的 6 671 亿 m^3 , 两者比约为 1.86。各年的平均径流量值围绕着多年平均值作上下摆动, 年径流量序列的变差系数 C_V 为 0.13(表 1), 除了 1998 年的特大洪水使得该年径流量与多年平均径流量有较大的偏差外, 其他年份均在平均值附近

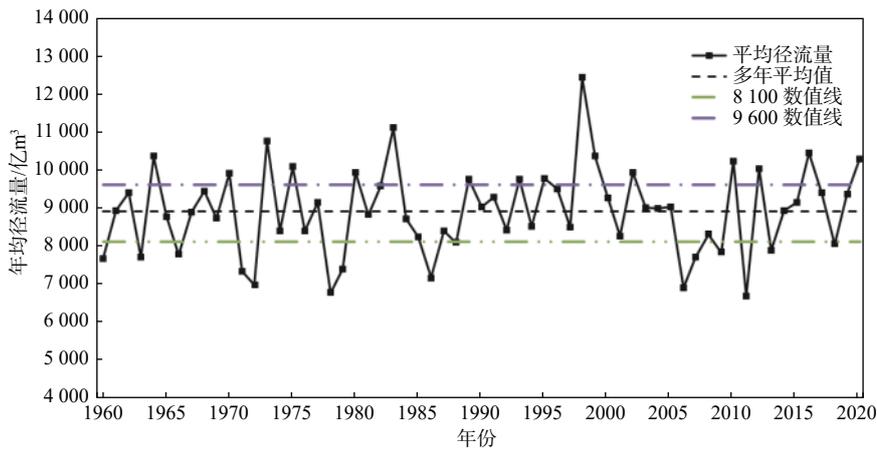


图 2 长江大通站多年径流量过程

Fig.2 Annual runoff process at Datong Station of the Yangtze River

表 1 长江大通站年径流量的统计特征

Table 1 Statistic characteristics in mean annual discharge at Datong Station

特征量	多年平均/亿m ³	变差系数	最大年径流			最小年径流			最大与最小年径流比
			年份	年径流量/亿m ³	与多年平均比	年份	年径流量/亿m ³	与多年平均比	
数值	8 906	0.13	1998	12 425	1.39	2011	6 671	0.75	1.86

跳跃性不大。

另外,从三峡水库蓄水以后(2003—2020年)年均径流量与其前2个阶段(1960—1980年、1981—2002年)相比,分别增加了0.9%和减少了7.2%,变化幅度并不明显。

根据水文学中对河历年径流量丰、枯的标准划分,即保证率 $P < 25\%$ 为丰水年, $P > 75\%$ 为枯水年; $25\% < P < 75\%$ 为平水年^[18]。根据大通站实测多年年径流量资料得出的累积经验频率曲线显示(图3),相应丰水年和枯水年的径流量为9600亿m³及8100亿m³。统计表明,自1960年以来,出现过16次丰水年、15次枯水年;不管是丰水年还是枯水年均很少连续出现,一般以间隔2~3a的形式出现,丰水年中最长间隔时间为7a(2002年、2010年),

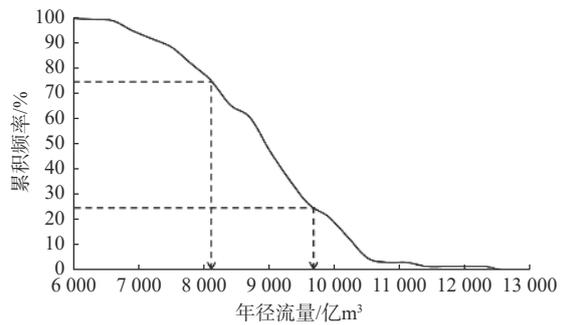


图 3 长江大通站年径流量累积频率

Fig.3 Cumulative frequency of annual runoff at Datong Station of the Yangtze River

枯水年中最长间隔时间达17a(1988年、2006年)。

2.1.2 季节性变化

图4显示了大通站月径流量的季节性变化。

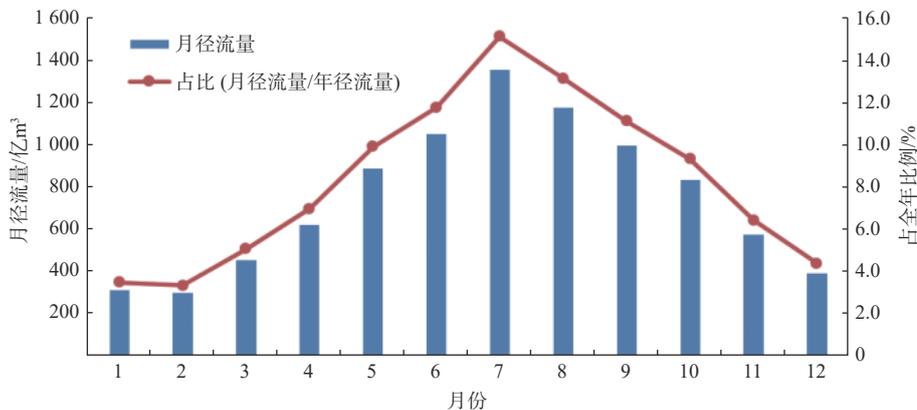


图 4 大通站多年平均月径流量变化

Fig.4 Variation of average monthly runoff at Datong Station

可以看出, 长江口入海水量主要集中在每年的 5—10 月(汛期), 径流量占全年 70.3%, 11 月—次年 4 月(非汛期)期间径流量总和较小, 占全年总量的不足 30%。

另外, 从三峡水库蓄水以后(2003—2020 年)月径流量与其前 2 个阶段(1960—1980 年、1981—2002 年)相比, 5—10 月径流量占比由 72.0%、70.0%, 降低到 67.7%。2003 年以后, 长江口入海水量总体上仍呈现为 5—10 月期间径流量大、11 月—次年 4 月径流量小的特点, 但汛期期间, 特别是 7—10 月径流量有所减少, 削减 7 月的径流量峰值比较明显, 而非汛期的 12 月、1—3 月径流量有所增加(图 5)。

2.2 输沙量变化

2.2.1 年际变化

经统计(表 2), 大通站多年平均年输沙量为 3.35 亿 t(1960—2020 年), 最大输沙量为 6.78 亿 t, 年份为 1964 年, 最小年输沙量为 0.72 亿 t, 年份为 2011 年, 两者之比为 9.42。输沙量过程总体呈现为减小的趋势, 序列的变差系数 C_V 为 0.45。

自 1960 年以来, 年输沙量的变化大体可分为几个不同的阶段(图 6), 其中 1960—1968 年年均输沙量为 5.22 亿 t; 1969—1985 年年均输沙量为 4.49 亿 t, 较上一个时期减小约 15%; 1986—2000 年年均输沙量为 3.49 亿 t, 较上一个时期减小约 20%; 2000—

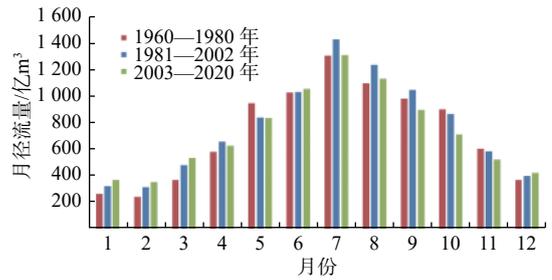


图 5 不同时期的大通站月径流量变化

Fig.5 Monthly runoff changes at Datong Station in different periods

2004 年, 输沙量呈现直线下降趋势, 由年输沙量 2.76 亿 t 减小到 1.47 亿 t; 而 2005—2020 年期间年均输沙量仅有 1.3 亿 t, 较上一个时期(1986—2000 年)减小幅度达 62.8%。

与丰水年和枯水年划分相似, 多沙和少沙年按照年输沙量的累计 25%、75% 的频率曲线来划分。根据大通站实测多年年输沙量资料得出的累积经验频率曲线显示, 相应多沙年和少沙年的输沙量对应值分别为 4.6、1.70 亿 t, 其值分别对应图 6 中的“多沙年线”和“少沙年线”。从图 6 中可以看出, 多沙年均发生在 1985 年以前, 以 20 世纪 60 年代和 80 年代为主, 70 年代中期、90 年代和 21 世纪初基本上处于中沙年, 而少沙年则发生在 2003 年三峡工程蓄水以后。

结合丰水、枯水年, 将 1960—2020 年大通站水沙过程特征进行了分类(表 3)。

表 2 长江大通站年输沙量的统计特征

Table 2 Statistic characteristics in mean annual sediment discharge at Datong Station

特征量	多年平均/亿 t	变差系数	最大年输沙			最小年输沙			最大与最小年输沙比
			年份	年径流量/亿 t	与多年平均比	年份	年径流量/亿 t	与多年平均比	
数值	3.35	0.45	1964	6.78	2.02	2011	0.72	0.21	9.42

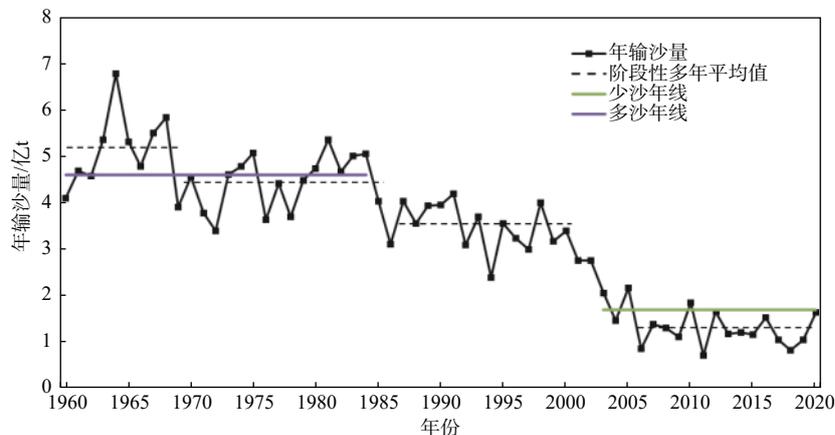


图 6 多年来大通站年输沙量变化过程

Fig.6 Process of annual sediment discharge at Datong Station in recent years

表 3 长江大通站水沙过程特征分类

Table 3 Characteristics and classification of water-sediment processes at Datong Station of the Yangtze River

输水性质	输沙性质		
	多沙年	中沙年	少沙年
丰水年	1964、1970、1973、1975、1980、1983	1989、1993、1995、1998、1999、2002、2010	2012、2016、2020
中水年	1961、1962、1965、1967、1968、1974、1981、1982、1984	1969、1976、1977、1985、1987、1990、1991、1992、1994、1996、1997、2000、2001、2003、2005	2004、2008、2014、2015、2017、2019
枯水年	1963、1966	1960、1971、1972、1978、1979、1986、1988	2006、2007、2009、2011、2013、2018

2.2.2 季节性变化

月输沙量与月经流量变化规律相似,长江口入海沙量主要集中在每年的 5—10 月(图 7),该时期

输沙总量占全年输沙量的 86.7%,而 11 月—次年 4 月期间输沙仅占全年总量的 13.3%。

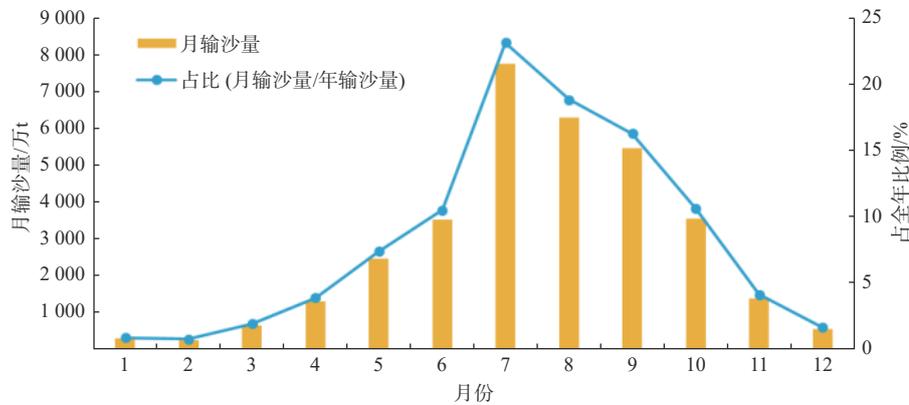


图 7 大通站多年平均月输沙量变化

Fig.7 Variation in perennial mean of monthly sediment transport at Datong Station

在多年输沙总量总体呈锐减趋势的情况下,以 2003 年为重要节点划分的 3 个阶段(1960—1980、1981—2002 和 2003—2020 年)对比(图 8),可以看出:随着年输沙量总体锐减,月输沙量减小亦非常明显,5—10 月的输沙总量分别为 4.05、3.34 和 1.07 亿 t,2003 年以后相比前 2 个阶段的输沙量总量分别减小 73.6% 和 68.0%;年内输沙量的分配特点没有明显变化,但总体呈现出 5—10 月期间的月输沙量减小,而 1 月—次年 4 月期间的月输沙量增加,即年内分配渐趋平缓(图 9)。

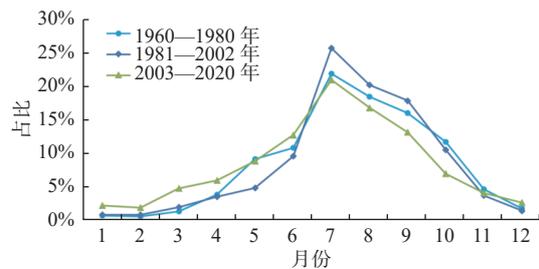


图 9 不同时期大通站月输沙量占年输沙量的比例

Fig.9 Proportion of monthly sediment transport to annual sediment transport at Datong Station in different periods

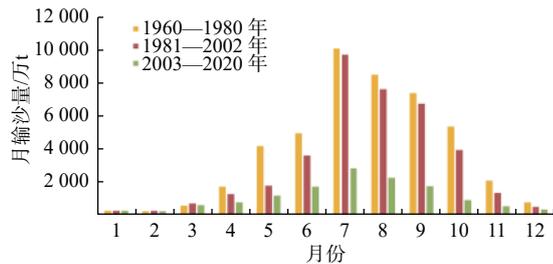


图 8 不同时期的大通站月输沙量变化

Fig.8 Monthly sediment transport at Datong Station in different periods

2.3 水沙通量的趋势性分析

2.3.1 径流量趋势分析

基于大通站 1960—2020 年逐年径流量资料,采用 Kendall 秩趋势分析法,假设该序列无显著趋势,计算得: $P=979$, $E(P)=915$, $\tau=0.070$, $Var(\tau)=0.008$, $M=0.784$ 。设置信水平 $\alpha=0.01$,查正态分布统计表得, $M_{0.05/2}=1.96$, $M_{0.01/2}=2.58$,所以 $|M| < M_{0.05/2} < M_{0.01/2}$,当置信水平在 0.05 和 0.01 时同时接受趋势无显著的假设。

2.3.2 输沙量趋势分析

基于大通站 1960—2020 年 61 年逐年输沙量资料, 采用 Kendall(肯德尔)秩趋势分析法, 假设该序列无趋势, 计算得: $P=1\ 551$, $E(P)=915$, $\tau=-0.695$, $M=-7.794$ 。设置信水平 $\alpha=0.01$, 查正态分布统计表得, $M_{0.05/2}=1.96$, $M_{0.01/2}=2.58$, 所以 $|M|>M_{0.01/2}>M_{0.05/2}$, 即在置信水平 0.05 和 0.01 时均拒绝接受序列无趋势的假设, 因而该序列有显著变化趋势。由 $P<E(P)$ 可知, 大通站年输沙量序列具有显著下降的趋势。进一步采用线性回归拟合的方法, 对其下降趋势进行拟合, 拟合关系如下:

$$Y_i = 5.7264 - 0.0768X_i (R^2 = 0.789)$$

式中: Y_i 为第 i 年的输沙量;

X_i 为某年份, $X_1=1960$ 。

3 讨论

3.1 水文站代表性

长江口自徐六泾以下呈“三级分汊、四口入海”的格局。徐六泾是长江河口“三级分汊”中第 1 级分汊前的节点, 其水文站测得的水沙资料更能准确地反映进入河口区的水沙特性。但由于徐六泾站水沙资料系列较短, 难以系统地说明流域来水来沙的变化特征。

大通水文站位于长江感潮河段最上段, 距长江河口约 640 km, 是长江干流最下游的总控制水文站, 控制流域面积占长江总流域面积的 95%, 具有长期的水沙资料, 是长江入海水沙的参考站。图 10、11 显示了徐六泾站月净泄潮量和大通站月径流量的过程和相关关系, 两站在水量变化过程中存在着良好的相关性。图 12 显示了徐六泾站月净泄沙潮量和大通站月输沙量的相关关系, 由此可知, 两站的短期输沙数据相关性良好。综合可知, 徐六泾站与大通站的水沙过程趋势一致, 且具有良好的正相关性, 因此, 大通站水沙资料可以作为长江口入海水沙情势变化的控制站, 用其资料分析入海水沙通量的变化。

3.2 影响水沙通量因素

自然因素和人为因素影响长江口入海水沙通量变化, 其中自然因素主要以流域降水影响为主, 人为因素主要是指人类活动, 如中上游的水土保持

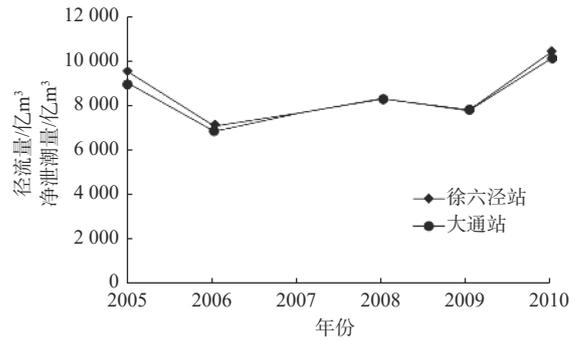


图 10 大通站月径流量和徐六泾站月净泄潮量过程 (2005—2010 年)

Fig.10 Process of monthly runoff at Datong Station and monthly net tidal discharge at Xuliujing Station (2005—2010)

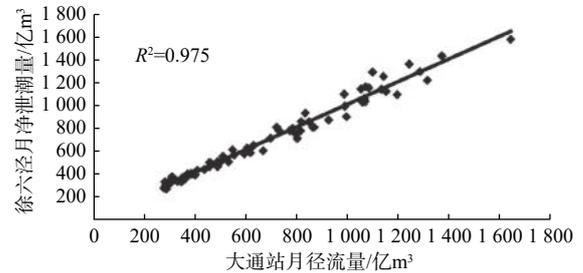


图 11 大通站月径流量和徐六泾站月净泄潮量关系 (2005—2010 年)

Fig.11 Relationship between monthly runoff at Datong Station and monthly net tidal discharge at Xuliujing Station (2005—2010)

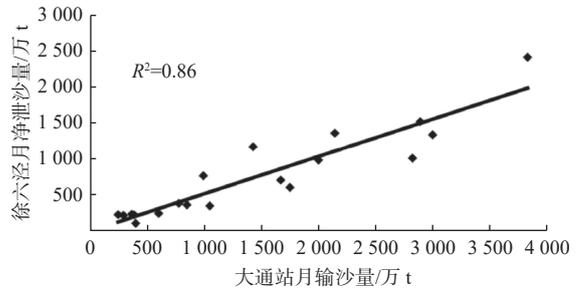


图 12 大通站月输沙量和徐六泾站月净泄沙量关系 (2009—2010 年)

Fig.12 Relationship between monthly sediment transport at Datong station and monthly net sediment discharge at Xuliujing Station (2009—2010)

和水库建设等^[9-11, 19]。

3.2.1 降水量对径流的影响

降水量的变化是影响长江口入海水量的最直接因素。根据长江大通站控制流域范围内降水量资料显示, 1955—2013 年平均降水量范围为 926~1 350 mm 之间波动, 平均降水量为 1 150 mm, 虽有一些波动但没有明显的变化趋势。结合许继军等^[20]基于 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资料统计分

析,综合认为长江流域降水量自 20 世纪 50 年代以来虽有波动,但流域年降水总量整体变化趋势不显著。该结果也是和长江口入海径流量多年总体保持变化不明显的趋势一致。

3.2.2 水土保持对流域产沙的影响

水土保持工程或措施改变了流域下垫面的状况,使产流和汇流过程发生变化。由上述分析可以看出,大通站输沙量的趋势性变化主要发生在 3 个时期(20 世纪 60 年代末、80 年代中期和 21 世纪初),其中一个就是在 20 世纪 80 年代中期,输沙量减少约 20%,这与 1988—1989 年在长江上游实施的“国家水土保持重点防治工程”有关(另 2 个时期则与水库建设有关,详见 3.2.3 节)。该工程实施后,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,北碚站输沙量由 1990 年以前的 1.33 亿 t 下降到 0.494 亿 t,下降幅度达 62.8%;金沙江屏山站也下降了 1.1%。根据统计分析^[21-22],金沙江屏山站和嘉陵江北碚站输沙量分别为约占大通站输沙量的 34.7% 和 19.0%,由此可以估算长江上游来沙量的减少使得大通站输沙量约减少 12%。

3.2.3 水库建设对拦沙的影响

自 20 世纪 60 年代开始,长江流域的大坝数量和水库总库容量不断增加。大通站输沙量 3 个趋势性变化也与其有关,其中 20 世纪 60 年代末的减沙与丹江口水库有关;20 世纪 80 年代中期的减沙与葛洲坝水利枢纽有关;21 世纪初的大量减沙则与三峡工程有关。根据相关研究显示^[11,19],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%,理论分析,在不考虑沿程冲刷恢复的条件下,由于三峡水库建设的拦沙的影响,宜昌站来沙量减少了 71.7%,大通站的输沙量较建库前减少了 40%。实测资料显示,三峡工程实施后的 2005—2020 年期

间年均输沙量与实施前的 1986—2000 年期间相比,输沙量减少幅度达 62.8%。

3.3 流域来沙减少的影响

长江流域来沙为长江口河床冲淤变化和沙洲、边滩运动创造了条件。随着长江流域来沙的锐减,对长江口河势变化也产生了深远影响。根据相关研究^[23-28]其主要表现在:

(1)长江口南支、南港和北港河道中上段含沙量减少 40%~60%,拦门沙河段水体含沙量也是有所下降,其中北槽、南槽,2003—2007 年期间,洪季水体含沙量普遍下降约 20%(图 13)。

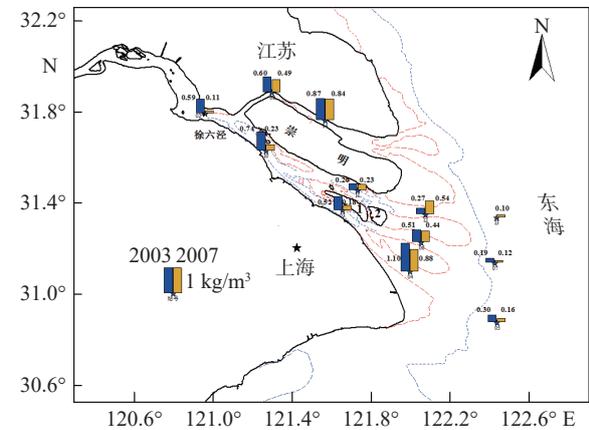


图 13 长江口 2003 年和 2007 年洪季含沙量年际对比^[28]

Fig.13 Comparison in sediment concentration in flood season between 2003 and 2007 in the Yangtze River estuary^[28]

(2)河口总体上由淤积环境向冲刷环境转化(图 14),并在对河口新水沙环境下缓慢地适应性自动调整,出现河槽断面扩大,主槽平均水深增深的趋势,尤以南支、南港、北港中上游河段和河口口门外邻近海域冲刷最为突出,其中长江口水下三角洲前缘(-10~-20 m)大面积冲刷,1997—2016 年期间,

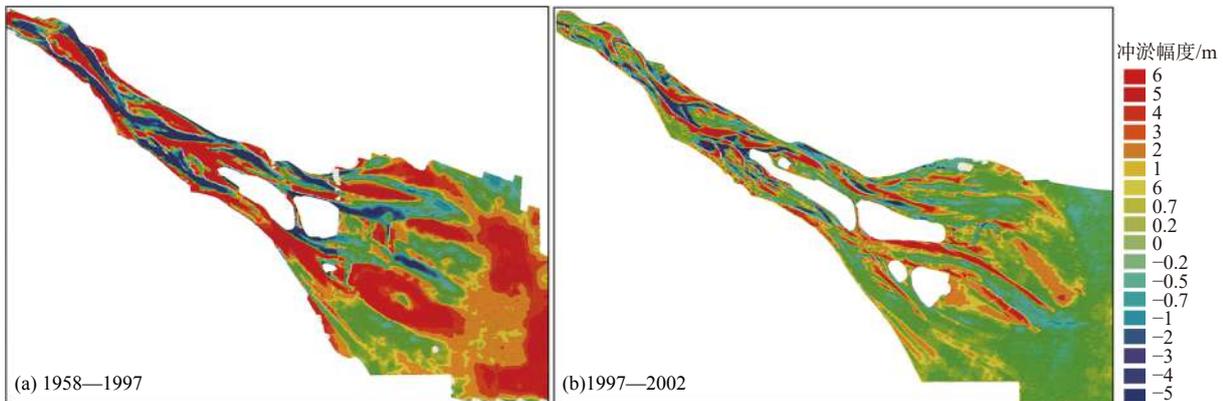


图 14 不同时期长江口冲淤趋势变化^[27]

Fig.14 Change of scouring and silting trend in the Yangtze River estuary in different periods^[27]

冲刷区面积达 700~900 km², 累计冲刷量 16.8 亿 m³, 累计冲刷深度达 2.0 m(图 15)。

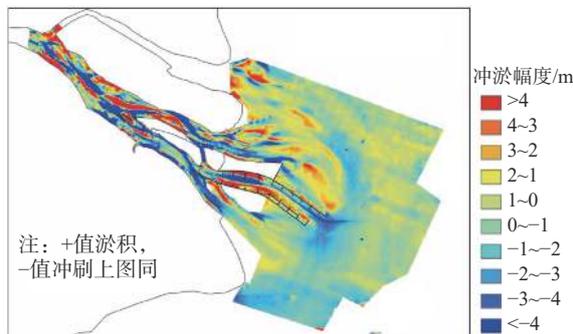


图 15 1997—2016 年长江口冲淤变化^[28]

Fig.15 Changes of scouring and silting in the Yangtze River estuary from 1997 to 2016^[28]

(3)河口拦门沙及水下三角洲泥沙补给出现“源汇转化”的结构性变化,变化来源于流域的来沙补给减少,来源于水下三角洲前缘和潮滩冲刷的海域来沙补给增加。拦门沙区段悬沙颗粒细化,多年来,洪季悬沙 D_{50} 下降约 20%, 枯季持平,拦门沙区段悬沙粒径更加接近于口外悬沙粒径(图 16)。

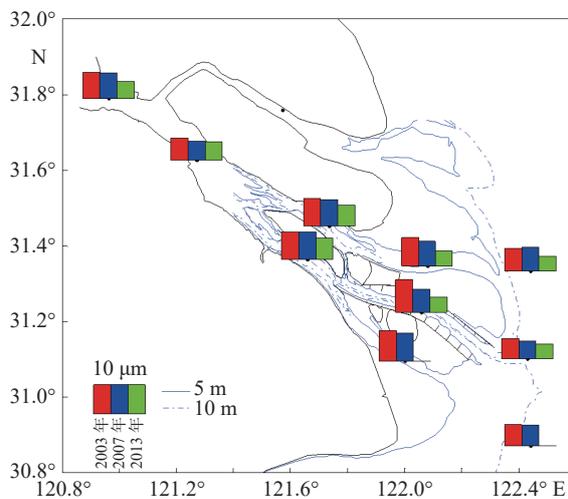


图 16 不同时期长江口悬沙中值粒径变化^[28]

Fig.16 Variation of median grain size of suspended sediment in the Yangtze River estuary in different periods^[28]

4 结论

(1)大通站多年平均径流量为 8906 亿 m³, 最大和最小年径流量分别为 12 425 亿 m³(1998 年)和 6 671 亿 m³(2011 年)。各年的平均径流量值围绕着多年平均值作上下摆动,没有明显的变化趋势。大通站径流量的季节性变化明显,每年 5—10 月的径流量占全年 70.3%。自三峡水库蓄水以后径流量的季节

性变化特征未变,但削减 7 月的径流量峰值比较明显。

(2)大通站多年平均年输沙量为 3.35 亿 t, 最大输沙量为 6.78 亿 t(1964 年), 最小年输沙量为 0.72 亿 t(2011 年)。多年来输沙量过程总体呈现为减小的趋势,其中 3 个时期出现了明显趋势性减少的变化,分别是 20 世纪 60 年代末、80 年代中期和 21 世纪初。

(3)影响长江口入海水沙通量变化的主要包括自然因素和人为因素,包括流域降水量、中上游的水土保持和水库建设等。长江流域降水量自 20 世纪 50 年代以来虽有波动,但流域年降水总量整体变化趋势不显著;长江流域大坝和水库的建设对流域减沙影响明显,三峡水库蓄水后,大通站输沙量与之前相比减少了 62.8%。

(4)受长江流域来沙锐减的影响,长江口河势也发生了明显变化:河口含沙量明显减小;河口总体上由淤积环境向冲刷环境转化,河槽断面扩大,主槽平均水深加深;长江口水下三角洲前缘大面积冲刷;河口拦门沙及水下三角洲泥沙补给出现“源汇转化”的结构性变化,流域来沙补给减少,海域来沙补给增加。

参考文献:

- [1] SYVITSKI P M, VOEROESMARTY C J, KETTNER A J, et al. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean[J]. *Science*, 2005, 308(5720): 376-380.
- [2] WALLING D E, FAND D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world rivers[J]. *Global and Planetary Change*, 2003, 39(2): 111-126.
- [3] 沈焕庭,张超,茅志昌. 长江入河口区水沙通量变化规律[J]. *海洋与湖沼*, 2000, 31(3): 288-294.
- [4] MILLIMAN J D. Delivery and fate of fluvial water and sediment to the sea: a marine geologist's view of European rivers[J]. *Scientia Marina*, 2001, 65(suppl. 2): 121-132.
- [5] YANG S L, ZHAO QY, BELKIN I M. Temporal variation in the sediment load of the Yangtze River and the influences of the human activities[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 263(1): 56-71.
- [6] YANG S L, BELKIN I M, BELKINA A I, et al. Delta response to decline in sediment supply from the Yangtze River: evidence of the recent four decades and expectations for the next half-century[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 57(5): 589-599.
- [7] YANG S L, SHI Z, ZHAO H Y, et al. Effects of human activities on the Yangtze River suspended sediment flux into the estuary in the last century[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2004, 8(6): 1210-1216.

- [8] XU J X. Sediment flux to the sea as influenced by changing human activities and precipitation: example of the Huanghe River, China[J]. *Environmental Management*, 2003, 31(3): 328-341.
- [9] 侯志军, 由宝宏, 茹玉英. 黄河入海口水沙通量变化规律[J]. *泥沙研究*, 2007(5): 60-67.
- [10] 陈显维. 长江三峡以上流域主要测站年平均流量、年输沙量随机模拟分析[J]. *水文*, 1991(6): 16-21.
- [11] 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.
- [12] 应铭, 李九发, 万新宁, 等. 长江大通站输沙量时间序列分析研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2005, 14(1): 83-87.
- [13] 左书华, 李九发, 万新宁, 等. 长江河口年平均流量的灰色拓扑预测与趋势分析[J]. *水力发电*, 2005, 31(12): 19-21.
- [14] 戴仕宝, 杨世伦, 郜昂, 等. 近50年来中国主要河流入海泥沙变化[J]. *泥沙研究*, 2007(2): 49-58.
- [15] 窦希萍, 缴健, 储廉, 等. 长江口水沙变化与趋势预测[J]. *海洋工程*, 2020, 38(4): 2-10.
- [16] 付桂. 长江口近期来水来沙量及输沙粒径的变化[J]. *水运工程*, 2018(2): 105-110.
- [17] 王盼成, 贺松林. 长江大通站水沙过程的基本特征—径流过程分析[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2004(2): 72-80.
- [18] 黄锡荃, 李慧明, 金伯欣. 水文学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.
- [19] 李保, 付桂, 杜亚南. 长江口近期来沙量变化及其对河势的影响分析[J]. *水运工程*, 2012(7): 129-134.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 刘杰, 程海峰, 韩露, 等. 流域减沙对长江口典型河槽及邻近海域演变的影响[J]. *水科学进展*, 2017, 28(2): 249-256.
- [24] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 流域来水来沙量变化对长江口航道的影响研究综合分析报告[R]. 上海, 2012.
- [25] 张晓鹤, 李九发, 朱文武, 等. 近期长江河口冲淤演变过程研究[J]. *海洋学报*, 2015, 37(3): 134-143.
- [26] 李九发, 蒋陈娟, 刘启贞, 等. 长江河口水沙输移与河床演变[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [27] 恽才兴. 图说长江河口演变[M]. 北京: 海洋出版社, 2010.
- [28] 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室. 长江口南北槽口水沙输移特征分析报告[R]. 上海, 2018.

Variation of water and sediment flux and its influence on the Yangtze River Estuary

ZUO Shuhua^{1,2}, YANG Chunsong³, FU Gui^{4*}, XIE Hualiang²

(1 National Engineering Research Center of Port Hydraulic Construction Technology, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China; 2 Key Laboratory of Engineering Sediment of Ministry of Transport, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China;

3 National Investment Project Evaluation Center, National Development and Reform Commission, Beijing 100037, China;

4 Shanghai Hanghong Engineering Management Co., Ltd., Shanghai 200137, China)

Abstract: Based on the runoff and sediment discharge data of Datong Station from 1960 to 2020, the seasonal and interannual variations and trends of seawater and sediment flux into the Yangtze River estuary were studied, and the influencing factors and their effects were discussed. Results show that during the data coverage period: the annual average runoff was 890.6 billion m³, and the annual average runoff fluctuated around the annual average with no obvious variation trend; seasonal variation of runoff into the sea was obvious, and the annual runoff from May to October accounted for 70.3% of the whole year; the annual average sediment transport was 335 million tons, and the sediment transport process showed generally a decreasing trend; the change of sediment flux into the Yangtze River estuary was obviously affected by the factors of water and soil conservation and reservoir construction. After the impoundment of the Three Gorges Reservoir, the sediment flux at Datong Station decreased by 62.8% compared with that before; the river regime of the Yangtze River estuary had also changed obviously due to the decrease of sediment flux in the Yangtze River basin. The sediment concentration in the estuary decreased significantly, the estuary changed from siltation environment to scour environment, the subaqueous delta front of the Yangtze River estuary occurred the large area of scour, and the estuary sandbar and the subaqueous delta sediment supply occurred the structural change of "sourcing-sink transformation".

Key words: Yangtze River Estuary; Datong Station; runoff; sediment transport; Three Gorges Reservoir