

长江供沙量减少对水下三角洲发育影响的初步研究

——近期证据分析和未来趋势估计

杨世伦¹, 朱 骏¹, 赵庆英¹

(1. 华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 根据 1951~2000 年大通站实测水文资料和长江口地形图, 分析了长江入海泥沙量的变化趋势及其对水下三角洲冲淤演变的影响. 从 20 世纪 60 年代末开始, 长江入海泥沙量出现减少趋势, 90 年代输沙量相对于 60 年代下降了 1/3. 流域大量修建水库是导致河流入海泥沙减少的根本原因. 在此背景下, 长江口门外的水下三角洲淤积速率从 1958~1978 年时段的 55 mm/a 下降为 1978~1998 年时段的 11 mm/a. 考虑三峡工程等多种人类活动的可能影响, 估计本世纪上半叶和下半叶的河流入海泥沙量将分别减少约 60% 和 40%. 尝试建立了三角洲冲淤对河流供沙量响应的概念公式, 并据此对本世纪长江三角洲的演变趋势做了初步预测: 三角洲的总体淤涨速率将急剧下降, 口门外水下三角洲将出现严重侵蚀.

关键词: 河流输沙量; 三角洲; 水坝; 三峡工程; 长江

中图分类号: P343.5

文献标识码: A

文章编号: 0253-4193(2003)05-0083-09

1 引言

现代三角洲的发育演变往往受到河流入海泥沙量的控制. 近几十年受流域人类活动的影响, 许多河流的入海泥沙量急剧减少, 使三角洲环境发生重大变化^[1~3]. 20 世纪初尼罗河的入海泥沙量曾达 0.12~0.14 Gt/a, 但沿流域修建一系列水坝(特别是 1964 年修建的阿斯旺高坝)后, 河流泥沙绝大部分被拦截在水库里, 导致三角洲强烈蚀退^[4]. 流域人类活动使密西西比河入海泥沙减少 40%, 是三角洲蚀退的重要原因之一^[2]. 美国的 Skokomish 河流域调水

收稿日期: 2001-10-24; 修订日期: 2003-08-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40076027); 国家重大基础研究发展项目课题资助项目(2002CB412407); 上海市重点学科资助项目.

作者简介: 杨世伦(1954—), 男, 四川省乐山市人, 教授, 博士, 博士生导师, 从事河口海岸沉积动力过程的研究.

40% 使其三角洲外侧(the outer delta)出现 1.1~3.3 cm/a 的蚀低速率^[5]. 类似的例子还有西班牙的埃布罗河三角洲^[2]和我国的滦河^[6]、南渡江三角洲^[7]等. 黄河曾是世界上输沙量最大的河流(年输沙量曾高达 1.6 Gt/a), 近年由于频频断流, 入海泥沙量仅为 0.2~0.3 Gt/a, 原来快速淤涨的三角洲出现了强烈侵蚀现象^{[8], 1)}

长江输沙量居世界第四位^[9], 由它塑造的三角洲不仅在我国经济中占有重要地位, 而且在世界范围内具有独特的学术价值. 过去国内外对长江输沙量的介绍基本上都是基于 20 世纪 80 年代以前的资料, 普遍认为长江输沙量为 0.468~0.486 Gt/a^[9~12]. 以上两个数据分别相当于 1951~1979 和 1951~1971 年两个时段的输沙量平均值. 作为国际陆海相互作用研究计划的最新成果所涉及的长江泥沙资料也只是到 1990 年为止, 得出的平均输沙量为 0.46 Gt/a^[13]. 实际上 20 世纪 90 年代的长江输沙量已下降至 50 年代以来的最低值. 长江三角洲过去呈现迅速淤涨^[14]. 在河流供沙减少(特别是三峡工程后)的新形势下三角洲会发生怎样的变化, 这不仅是一个重要的理论问题, 也是三角洲经济可持续发展规划中亟待解决的课题, 而该研究的基础是对长江入海泥沙变化趋势和水下三角洲响应机制的认识.

2 流域和河口概况

宜昌和大通是长江干流上两个重要的水文站, 前者控制着占流域总面积 55.6% 的上游, 约一半的河流水量和绝大部分的河流泥沙来源于该站以上区域. 大通是离海最近的一个综合性水文站, 虽然它距海尚有 600 多千米(约 6% 的流域面积位于该站以下), 但它是枯季河口的潮区界所在(图 1), 国内外都将它作为长江入海水沙的参考站. 大通站从 1951 年开始有年输

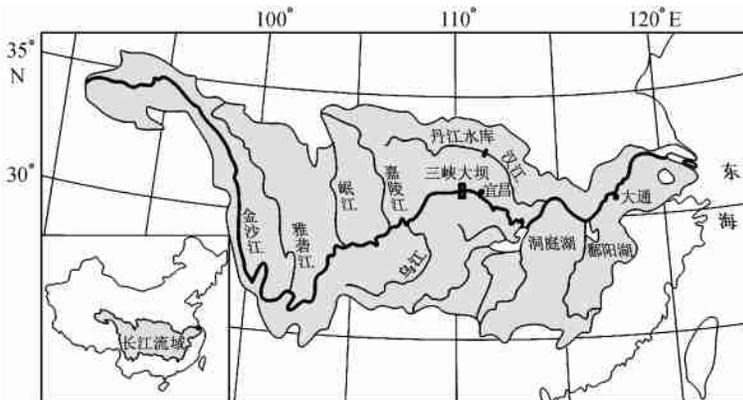


图 1 长江流域示意图

沙量资料(1950 和 1952 年仅有个别月份资料). 现代长江口口门宽约 90 km, 自徐六泾以下出现三级分叉、四口入海的格局, 但长江 95% 以上的水沙从南支系统的北港、北槽和南槽三口入海. 研究区位于此三口口门外的水下三角洲, 它南北长 77 km, 东西宽 71 km, 面积近 5 500 km²(见图 2).

1) 杨作升, 孙效功. 2000 年 10 月在北京香山科学讨论会(河口海岸主题)上的发言.

3 入海泥沙量的减少

1951~2000年大通站平均年输沙量为0.432 Gt/a(表1)。从20世纪50年代到60年代,大通输沙量略有增加(从表1可见60年代较之50年代增加了10%)。由于这段时间内流量并没有增加(表1),故输沙量的增加可能与流域植被破坏引起的土壤流失加剧有关。长江上游的地表侵蚀从20世纪50年代至80年代中期一直呈增强趋势^[15]。

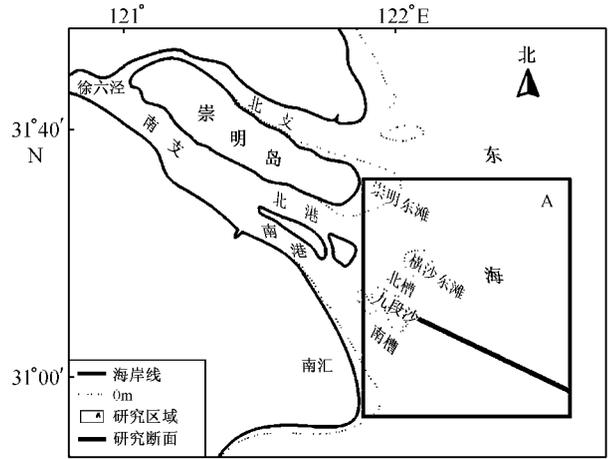


图2 长江口及研究区域示意图

表1 长江大通站各年代平均年入海水量和泥沙量

指标	1951~1960年	1961~1970年	1971~1980年	1981~1990年	1991~2000年
入海水量/ $Tt \cdot a^{-1}$	0.914	0.898	0.851	0.891	0.958
入海泥沙量/ $Gt \cdot a^{-1}$	0.466*	0.513	0.421	0.428	0.337

* 缺1952年资料。

尽管流域修建水库在70年代就已达高潮,宜昌站输沙量的增长趋势直到80年代中期才发生逆转^[15],但大通站输沙量的减少从60年代末就已开始(图3)。大通站90年代的输沙量比60年代减少34%,比70~80年代减少21%(表1)(由于表1的统计时段为10a,故泥沙量的下降只能显示从70年代开始)。丹江水库的修建可能是造成60年代末至80年代中期大通站输沙量减少的重要原因之一(因为同期宜昌站的输沙量保持着增长趋势^[15])。

丹江水库建于1967年,位于宜昌和大通间的重要支流汉江之上(见图1)。水库建成后的20a间,约93%的汉江来沙被拦截在水库中,平均淤积量为0.05 Gt/a(据参考文献[16]数据计算),此值与同期大通站输沙量相对于宜昌站输沙量的减少值基本一致。河流输沙量的变化取决于地表进入河系(包括与河流相连接的水库和湖泊)的泥沙量和河系中冲淤量之间的抗衡。以宜昌站以上区域为例,从20世纪50年代至80年代中期,进入河系的泥沙量增加了0.135 Gt/a,而水库淤积量约增加了0.094 Gt/a^[17],结果宜昌站输沙量约增长了0.041 Gt/a^[15]。相反,从80年代中期至90年代末,由于水库淤积量的增加以及地表进入河系的泥沙量的减少(因植被有所恢复,地表侵蚀减缓),宜昌站输沙量明显下降(见图4)。自50年代以来,流域水库的淤积量伴随着库容呈指数增长,并在90年代

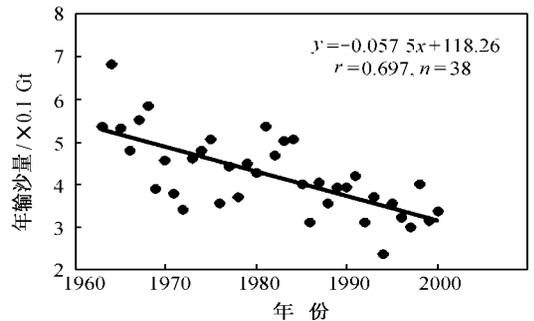


图3 大通站年输沙量的下降趋势
($\alpha < 0.01$ 水平下显著)

达到 0.230 Gt/a (图 5)。这是大通站入海泥沙量自 60 年代以来(特别是自 80 年代中期以来)出现趋势性下降的主要原因。

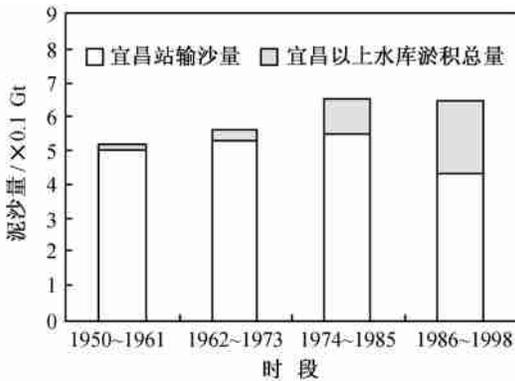


图 4 宜昌站输沙量和上游水库淤积量
(据参考文献[15]和[16]等的的数据编制)

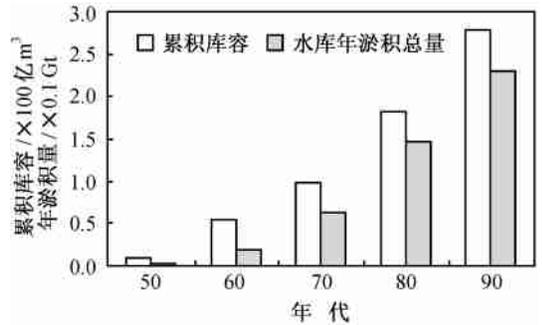


图 5 长江上游库容和水库淤积量的迅速增长
(据参考文献[15]和[16]等的的数据编制)

4 水下三角洲对河流来沙减少的响应

水下三角洲冲淤对河流来沙变化响应研究的理想条件是同步、系列的来沙资料和地形资料。由于上游来水来沙在河口各汉道的分配比例和口外动力条件经常发生变化,故水下三角洲不同部位的冲淤存在差异。只有滤掉这些差异,才能建立良好的响应关系,而滤掉上述差异的最有效方法是将三角洲作为一个整体来研究,即地形资料在空间上能覆盖整个三角洲。本研究可获得系统的河流输沙量资料,但“系统”的地形资料难以获得,原因是长江三角洲的面积有数万平方千米,过去的所有地形测量都未能覆盖“整个”三角洲(因耗资太大),除重要通海航道(如南、北槽)外,其他区域地形都不是逐年测量,尽管如此,我们还是能提取水下三角洲对河流来沙减少变化的响应信息。在覆盖面积最大的几版地形图中,我们选择了 1958(最早的大范围测图)、1978 和 1998 年三版(1:12 000 地形图),两个时间间隔都是 20 a。图上数据间隔为 1 cm 左右。采用地形图扫描—Mapinfo 软件处理(数字化)—自编程序—Surfer 软件处理,计算出研究区不同时期的冲淤量并绘制出冲淤平面图;利用 Excel 软件处理读出的地形资料,绘制典型岸段的冲淤剖面。长江大通站输沙量在 1958~1978 年时段为 0.472 Gt/a ,在 1978~1998 年时段为 0.392 Gt/a ,后者较之前者减少了 17%。

如表 2 所示,在 1958~1978 年时段,水下三角洲研究区平均垂向淤积速率为 55 mm/a ,而

表 2 长江水下三角洲演变对河流来沙量减少的响应实例计算结果

时段	冲淤面积(%)		净淤积		平均垂向淤积速率 / $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$	河流来沙状况	
	淤积	冲刷	泥沙体积 / km^3	泥沙量 / Gt		总重量 / Gt	平均含沙量 / $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$
1958 年 7 月至 1978 年 6 月	77.7	22.3	5.554	7.331*	55.35	9.447**	0.543
1978 年 7 月至 1998 年 6 月	60.5	39.5	1.139	1.503*	11.35	7.832**	0.450

* 泥沙体积转换为重量时所采用的泥沙容重为 1.32 t/m^3 。 ** 由于地形测图是在夏季跨月完成,故 1958~1978 年时段河流来沙量取 1958 年 7 月至 1978 年 6 月的资料,而 1978~1998 年时段河流来沙取 1978 年 7 月至 1998 年 6 月的资料。

在 1978~1998 年时段平均垂向淤积速率下降至 1.1 mm/a 。

图 6 是一典型断面(位置见图 2)在两个时段的冲淤变化,与前一时段的迅速淤涨相比,后一时段(来沙减少后)淤积速率锐减或可说是冲淤接近平衡。

由上述资料可见,水下三角洲对河流来沙减少的反应是十分敏感的。值得注意的是,研究区平均淤积速率的变化与河流来沙量的变化虽然呈正相关,但两者未成比例(前者降低 80%,而后者仅降低 17%),其根本原因在于河流带来的泥沙不是全部都沉积在研究区内,除研究区外,河流泥沙还有以下归宿:(1) 口内潮滩(如崇明东滩、横沙东滩、九段沙、南汇东滩和崇明北岸等);(2) 杭州湾和浙江海岸;(3) 北支及江苏海岸;(4) 外海陆架。前一时段研究区的沉积量能解释 78% 的河流来沙,而后一时段的沉积量仅能解释 19% 的河流来沙(见表 2)。前后两时段的显著差异可能与口门外海洋动力条件的变化和滩涂围垦工程等有关。海洋动力条件存在不同时间尺度的周期性变化,这些变化会影响河口泥沙向外海和沿岸的输运能力。此外,随着全球气温的上升,海岸风力(特别是风暴)有增强趋势,这可能导致后一时期河口泥沙更多地向外扩散。1978 年后上海的滩涂围垦越来越多地与促淤工程结合,如 80 年代初的崇明岛团结沙促淤工程、90 年代的浦东国际机场、南汇人工半岛、漕泾化工城等滩涂促淤工程。这类工程一般是先将海堤筑在低滩上,堤上留有缺口,由于堤内波浪弱,涨潮进入圈围区的泥沙大量沉积并保存下来(沉积后不易遭受侵蚀),从而起到促淤的作用。工程的后期往往进行吹填。“九五”期间上海促淤滩涂 167 km^2 ^[18]。若按平均促淤厚度 1.5 m 计,就需泥沙约 0.33 Gt ,相当于同期大通站入海泥沙量的 20%。此外,后一时段河流含沙量降低 17%(见表 2)也可能有利于河口悬沙向外扩散。有资料表明,当河流入海的含沙量下降至 0.24 g/L 时,三角洲就难以形成(即泥沙被带到三角洲以外沉积)^[19]。在以上影响因素中,海洋动力条件可能是首要的,但由于目前资料缺乏,这方面的研究有待深入。

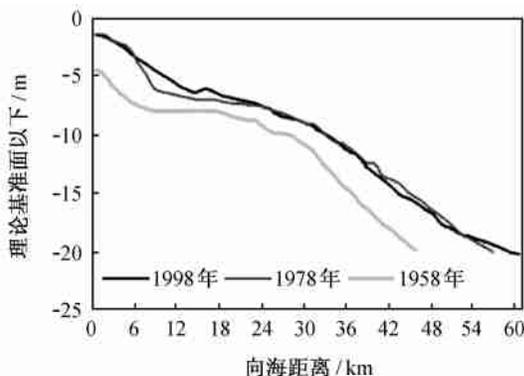


图 6 长江口典型断面对河流来沙量减少的响应

5 未来长江来沙减少趋势和三角洲演变的讨论

5.1 今后 100 a 内河流入海泥沙量的估计

正如过去的半个世纪一样,21 世纪人类活动将是长江入海泥沙量变化的控制因子,三峡工程无疑是最重要的影响因素。三峡水库的库容达 39.3 Gm^3 ,比目前流域中所有水库的总库容还要大。三峡水库已于 2003 年 6~7 月开始正式蓄水并拦沙,而发电机组全部投入运行要到 2009 年^[20]。三峡水库的死库容为 17.15 Gm^3 ,在死库容被泥沙填满之前,部分上游来沙将被拦截在库区(尽管水库对年平均流量几乎没有影响)。熊治平^[21]根据三峡工程的设计方案和 1961~1970 年的长江泥沙资料(宜昌站)预测了工程后 100 a 内的出库泥沙量(见表 3 中“指标”第 2 行),据此换算出水库排沙比(见表 3 中“指标”第 3 行),其他预测值与之近似^[16,22]。笔者认为,用 90 年代的泥沙资料(悬沙浓度为 1.03 g/L)来代表工程前的情况比用 60 年代的资

表 3 三峡工程后长江悬沙粒径、输沙量($\times 0.1 \text{ Gt/a}$)和悬沙浓度(g/L)

指 标	工程前	工程后时间/a									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
悬沙中值粒径 ¹ / mm	0.030 0	0.009 2	0.009 0	0.009 7	0.011 6	0.015 1	0.018 3	0.021 7	0.023 2	0.023 6	0.024 0
年出库泥沙量 ^④ (60 年代资料 基础)/ $\text{Gt}\cdot\text{a}^{-1}$	0.556	0.171	0.166	0.188	0.219	0.270	0.342	0.394	0.433	0.447	0.456
排沙比 ^④ (60 年 代资料基础) (%)	1.0	30.8	29.9	33.8	39.4	48.6	61.5	70.9	77.9	80.4	82.0
排沙比 ^④ _{1/2} (90 年代资料基 础)(%)	1.0	25.5	24.7	27.9	32.6	40.2	50.8	58.6	64.4	66.5	67.8
年出库泥沙量 ^⑥ (90 年代资料 基础)/ $\text{Gt}\cdot\text{a}^{-1}$	0.408	0.104	0.101	0.114	0.133	0.164	0.207	0.239	0.263	0.271	0.277
年入海泥沙量 ^{1/2} (90 年代资料 基础)/ $\text{Gt}\cdot\text{a}^{-1}$	0.337	0.171	0.168	0.180	0.197	0.223	0.257	0.279	0.296	0.301	0.305

¹ 宜昌站,中值粒径变化的计算参考熊治平^[21]的粒径分布表。④据熊治平^[21]。⑥指宜昌站。1/2 排沙比与悬沙浓度呈正比(宜昌站 90 年代的悬沙浓度是 60 年代的 82.8%)。1/2 根据宜昌站出库泥沙量和宜昌-大通输沙量相关关系计算。

料(悬沙浓度为 1.24 g/L)更为合理。过去人们忽视了一个问题,那就是到三峡水库建成运行时,上游来沙条件已经(较 60~70 年代)发生了重要变化。根据公认的水库排沙比与悬沙浓度呈正比的原则和熊治平^[21]的计算方法,我们求得基于 90 年代河流泥沙条件的水库排沙比(表 3 中“指标”第 4 行),并根据 90 年代的宜昌站输沙率水平(0.408 Gt/a)算出工程后各时段的出库泥沙量(表 3 中“指标”第 5 行)。由于宜昌和大通间河段对河流泥沙起着调节作用,当上游来水的悬沙浓度很小时河床可能发生冲刷,从而使大通站输沙量大于宜昌站。据我们计算,大通站年输沙量与宜昌站年输沙量之间存在显著的相关性,尤其在两者的输沙量小于 0.40 Gt/a 的情况下:

$$y = 1.667x^{0.592} \quad (r = 0.80, n = 46, \alpha < 0.01), \quad (1)$$

式中, y 为大通站输沙量($\times 0.1 \text{ Gt}$); x 为宜昌站输沙量($\times 0.1 \text{ Gt}$); r 为相关系数; n 为资料年数(宜昌站的资料截止于 1998 年); α 为显著水平。

根据式(1)和工程后宜昌站的输沙量预测值(表 3 中“指标”第 5 行)算出工程后大通站的输沙量(表 3 中“指标”第 6 行),可见工程后前 50 a 的输沙量平均值将为 0.188 Gt/a 左右,仅为工程前 50 a 平均值(0.432 Gt/a)的 44%;工程后前 100 a 的输沙量平均值将为 0.238 Gt/a ,仅为工程前 50 a 平均值的 55%,这与原来的三峡工程对环境影响论证报告中的预测值(工程后前 50 a 大通站输沙量平均为 0.372 Gt/a ,工程后前 100 a 为 0.404 Gt/a)^[23~24] 相差甚远。差异的原因之一是报告依据的资料(工程前的大通输沙量)是 0.486 Gt/a (相当于 1951~1971 年的资料系列)而不是表 1 中的 0.337 Gt/a 。在我们的估算中,之所以参考 90 年代的资料而不是前

50 a的资料平均值,是基于以下假定:即今后河流的来沙不可能再恢复到80年代以前的水平(鉴于上游的众多水库和生态环境的保护).若工程前的泥沙条件不参考90年代的资料,就可能出现预测的工程后输沙量大于工程前(90年代)实测输沙量的结果(见表3和上述参考文献[23~24]的数据),这显然是不合理的.将大通站在三峡工程前的实测值(见表1)和工程后的预测值(见表3)结合起来考虑可知,工程后的10~20 a中将是长江入海泥沙量下降的最低谷,之后将是缓慢的回升过程.

除了三峡工程之外,下列因素也将导致长江入海泥沙减少:(1)作为西部生态环境建设重要内容的流域植被保护和恢复会减少地表土壤的流失;(2)“南水北调”工程(已部分上马)可能使入海泥沙减少3%~5%^[25];(3)除三峡工程外流域还将修建其他一些水库^[15].因此,今后大通站的实际入海泥沙量还可能低于表3中的预测值,但是这些因素与三峡工程相比可能是次要的.综合以上各种人类活动的影响,本世纪前半叶的长江入海泥沙量可能下降至20世纪后半叶的40%(约0.17 Gt/a),而本世纪后50 a的入海泥沙量可能相当于20世纪后半叶的60%(约为0.26 Gt/a).

5.2 水下三角洲的冲淤展望

水下三角洲垂向淤积速率同河流入海泥沙量之间的关系在理论上可表示为

$$R = (S_{in} - S_{out}) / (\rho M) \quad (S_{out} \propto LFTW), \quad (2)$$

式中, R 为所选水下三角洲研究区的平均垂向淤积速率(m/a); S_{in} 为从河流输入研究区的输沙率(t/a); S_{out} 为从研究区向外海和沿岸输出泥沙的速率(t/a); ρ 为泥沙的容重(bulk density)(t/m^3),它将泥沙的重量单位转换为体积单位; M 为研究区面积(m^2); L, E, T, W 分别代表沿岸流、入海径流、潮流和波浪的能量,它们的值越大,泥沙向研究区外扩散的能力越强. S_{in} 和 S_{out} 都对 R 有重要影响,即 R 与 S_{in} 呈正相关而与 S_{out} 呈负相关.当 $S_{out} = 0$ 时, R 与 S_{in} 的正相关关系成为正比例关系.对 S_{out} 可以理解为水下三角洲冲淤转换的临界值.当 $S_{in} > S_{out}$ 时,水下三角洲淤涨;当 $S_{in} = S_{out}$ 时,水下三角洲处于冲淤平衡状态;当 $S_{in} < S_{out}$ 时,水下三角洲将遭受侵蚀.亚马孙河年入海泥沙量达1.0 Gt以上,但由于沿岸流强劲,大量河流来沙被带往远达几百千米以外的地方,使三角洲的增长非常缓慢^[9].虽然前人曾估计约有一半的长江来沙沉积在口门附近^[26],但对“口门附近”的范围缺乏详细的描述.由表2数据计算可知,研究区在1958~1998年的40 a中净沉积泥沙为8.834 Gt(0.22 Gt/a),相当于同期长江入海泥沙量(大通站)的51%.换句话说,40 a中约共有8.5 Gt(0.21 Gt/a)泥沙在研究区以外沉积.沈焕庭等^[27]对1890~1980年南支口外(相当于本文图2所示研究区)平均年淤积量的计算结果是0.084 Gt/a,与本文1978~1998年的平均年淤积量0.075 Gt/a(据表2数据计算)相近.这说明,就百年时间尺度而言,长江来沙量的大部分(0.3 Gt/a以上)沉积在本文研究区以外的区域(主要是杭州湾、北支及其近海^[27]).可见,对本文的水下三角洲研究区而言,三峡工程后的长江来沙量(见表2)很可能小于式(2)中所表示的向外海和沿岸输出泥沙的速率.

虽然研究区向外海和沿岸输出泥沙的速率是判断河流来沙量变化后三角洲冲淤演变的一个重要概念,从动力学角度计算它还有待进一步探讨,因为涉及的因素十分复杂,但从“黑箱”理论出发可求得研究区向外海和沿岸输出泥沙的速率的经验值(即某一时段的河流来沙量与水下三角洲研究区的淤积量差值).利用这一经验值和对未来河流来沙量的估计值可推断研究区今后的冲淤大体趋势.

鉴于上述水下三角洲冲淤对河流来沙量的响应和本世纪河流来沙量的估计,长江三角洲的总体淤涨速率将急剧下降,口门外水下三角洲将出现大范围侵蚀,有关部门在制定三角洲的利用和保护规划时应该重视这一问题。

6 结语

同世界上的许多河流一样,长江近 20~30 a 的入海泥沙量出现了显著下降,其根本原因是流域筑坝等人类活动。从解放至改革开放的 30 a 可能是有史以来长江流域在垦植压力下土壤流失最严重的一段时期。人口的猛增和“以粮为纲”的国策使那段时间的流域植被毁坏达到空前的程度,而 20 世纪 60 年代末以来水库的修建使大量泥沙被拦截在库区,从而使河流入海泥沙量呈不可逆转的下降趋势。长江口口门外的水下三角洲对河流来沙减少有敏感的反应。本世纪在三峡工程等的影 响之下,长江的入海泥沙量将进一步锐减,出现前所未有的低值,这将使水下三角洲(特别是口门附近)环境面临严峻挑战。

审稿人对文章提出了宝贵的修改意见,特致谢忱!

参考文献:

- [1] POULOS S, PAPAPOPOULOS A, COLLINS M B. Deltaic progradation in Thermaikos Bay, northern Greece and its socio-economical implications[J]. *Ocean and Coastal Management*, 1994, 22(3): 229—247.
- [2] TRENHAILE A S. *Coastal Dynamics and Landforms*[M]. Oxford: Clarendon Press, 1997. 365.
- [3] CHEN J-yu, CHEN Shen-liang. Estuarine and coastal challenges in China[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 20(2): 174—181.
- [4] FANOS A M. The impacts of human activities on the erosion and accretion of the Nile Delta coast[J]. *Journal of Coastal Research*, 1995, 11(3): 821—833.
- [5] JAY D A, SIMENSTAD C A. Downstream effects of water withdrawal in a small, high gradient basin: erosion and deposition on the Skokomish River Delta[J]. *Estuaries*, 1985, 19(3): 501—517.
- [6] 钱春林. 引滦工程对滦河三角洲的影响[J]. *地理学报*, 1994, 49(2): 158—166.
- [7] 龚文平, 王宝灿. 南渡江三角洲北岸的海岸演变及其机制分析[J]. *海洋学报*, 1998, 20(3): 140—148.
- [8] 周永青, 陈宗团. 黄河断流与黄河三角洲环境[J]. *海洋通报*, 1998, 17(5): 58—63.
- [9] EISMA D. *Intertidal Deposits: River Mouths, Tidal Flats and Coastal Lagoons*[M]. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1998. 459.
- [10] 程天文, 赵楚年. 我国沿岸入海河川径流量与输沙量的估算[J]. *地理学报*, 1984, 39(4): 418—427.
- [11] MILLIMAN J D, SHEN Hua-ting, YANG Zu-sheng, et al. Transport and deposition of river sediment in the Changjiang Estuary and adjacent continental shelf[J]. *Continental Shelf Research*, 1985, 4(1~2): 37—45.
- [12] 陈吉余, 沈焕庭, 恽才兴. 引言[Z]. 陈吉余, 沈焕庭, 恽才兴. 长江河口动力过程和地貌演变[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1988. 1—5.
- [13] 胡敦欣, 韩舞鹰, 章 申. 长江、珠江及邻近海域陆海相互作用[M]. 北京: 海洋出版社, 2001. 250.
- [14] 陈吉余, 恽才兴, 徐海根, 等. 两千年来长江河口的发育模式[J]. *海洋学报*, 1983, 1(1): 1—13.
- [15] 朱鉴远. 长江沙量变化和减沙途径探讨[A]. 刘兴年, 曹叔尤. 面向 21 世纪的泥沙研究——第四届全国泥沙基本理论学术讨论会论文集[C]. 成都: 四川大学出版社, 2000. 226—236.
- [16] 林秉南. 三峡工程丛书: 工程泥沙[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1992. 84.
- [17] 水利部科技教育司, 交通部三峡工程航运领导小组办公室. 长江三峡工程泥沙与航运关键技术研究专题报告[R]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1993.
- [18] 金忠贤. 没有滩涂就没有上海[N]. *城市导报*, 2001-03-20(2).

- [19] 吕炳全、孙志国. 海洋环境与地质[M]. 上海: 同济大学出版社, 1996. 224.
- [20] WANG R S. The environment and resettlement of TGP (Three Gorges Projector) [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2000, 9(1): 1-13.
- [21] 熊治平. 三峡建库后水沙条件变化及其对下游河道的影响[J]. 泥沙信息, 1996, (1): 5-12.
- [22] 长江科学研究院. 三峡水库泥沙冲淤计算分析报告[B]. 长江三峡工程泥沙与航运关键技术研究报告集[R]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1993.
- [23] 罗秉征, 沈焕庭. 三峡工程与河口生态环境[M]. 北京: 科学出版社, 1994. 35-58.
- [24] 沈焕庭, 李九发, 肖成猷. 人类活动对长江河口过程的影响[J]. 气候与环境过程研究, 1997, 2(1): 48-54.
- [25] 杨世伦, 赵庆英, 朱骏. 长江口岸滩的近期演变及南水北调工程的可能影响[J]. 上海地质, 2001, (2): 7-11.
- [26] CHEN Ji-yu, ZHU Hui-fang, DONG Yong-fa, et al. Development of the Changjiang Estuary and its submerged delta [J]. Continental Shelf Research, 1985, 4(1-2): 47-56.
- [27] 沈焕庭, 吴华林, 黄清辉. 长江河口入海物质通量[A]. 沈焕庭, 等. 长江河口物质通量[M]. 北京: 海洋出版社, 2001. 119-153.

A preliminary study on the influence of Changjiang River sediment supply on subaqueous delta

—Evidences in late 20th century and an expectation for the coming decades

YANG Shi-lun¹, ZHU Jun¹, ZHAO Qing-ying¹

(1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Data of sediment discharge from 1951 to 2000 and bathymetric maps of a major portion to the subaqueous delta surveyed in 1958, 1978 and 1998 are utilized to study variation in river sediment supply and morphological response to the subaqueous delta. Since the end of 1960s, sediment discharge at Sta. Datong has shown a significant decreasing trend, one third lower in the 1990s than in the 1960s. The reduction in sediment supply is found to have resulted from dam construction in the drainage. As a response to this reduction, vertical accretion rate of the subaqueous delta front has been decreased from 55 mm/a during 1958~1978 to 11 mm/a during 1978~1998. Meanwhile, severe erosion has occurred on the outer margin of the subaqueous delta. It is predicted that river sediment discharge will probably be reduced to 40% and 60% of the present (the average of the past 50 a) respectively in the first half and the second half of this century due to human activities especially the Three Gorges Project. As a result, the total progradation rate of the delta will be dramatically reduced and local severe erosion may be inevitable.

Key words: river sediment discharge; subaqueous delta; dam; Three Gorges Project; Changjiang River