

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.201800259

长江口河段近期冲淤演变过程及未来趋势预测

栾华龙^{1,2}, 刘同宦^{1*}, 丁平兴³

(1.长江科学院 河流研究所, 湖北 武汉 430010; 2.港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏 南京 210024;
3.华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

摘要:随着三峡及其上游梯级水库的相继运行使用, 长江中下游输沙量锐减, 坝下游河道发生长时段、长距离的冲刷, 并快速向河口地区发展。研究长江口近期冲淤演变过程及主控因子, 并对未来演变趋势进行合理可靠的预测, 是当前河口演变及治理研究的一大难题。利用GIS方法定量分析了长江口河段(徐六泾至横沙)1997年以来的冲淤演变特征, 在此基础上使用经充分率定和验证后的长江口年代际冲淤演变数学模型(Delft3D), 预测至2030年和2050年长江口河段冲淤演变趋势。根据实测冲淤过程定量分析可知, 1997—2015年长江口河段局部河势发生显著调整, 整体呈冲刷下切态势, 冲刷强度随来沙量减少而增大; 其中, 2010—2015年年均净冲刷量达0.75 亿m³, 且冲刷主要分布于10 m以下的深槽, 浅滩以淤积为主。数值模拟预测结果表明: 现状来沙量(1.25 亿t/a)条件下该河段2015—2030年保持强烈冲刷; 2030—2050年冲刷有所减弱, 但在极端低来沙量(1.00 亿t/a)条件下维持强烈冲刷, 且存在由“淤滩刷槽”转变为“刷滩刷槽”的趋势。在自然条件及人类活动的双重影响下, 河口冲淤演变过程复杂多变, 作者所给出的演变趋势预测结果可为长江口综合整治提供技术支撑。

关键词:冲淤演变; 河流来沙减少; 数值模拟; 演变趋势预测; 长江口

中图分类号:TV148.3

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2019)02-0021-07

Recent Morphological Evolution Processes and Prediction on Future Evolution Trend of the Changjiang Estuary

LUAN Hualong^{1,2}, LIU Tonghuan^{1*}, DING Pingxing³

(1.River Dept., Changjiang River Scientific Research Inst., Wuhan 430010, China; 2.Key Lab. of Port, Waterway and Sedimentation Eng. of Ministry of Transport, Nanjing 210024, China; 3.State Key Lab. of Estuarine and Coastal Research, East China Normal Univ., Shanghai 200062, China)

Abstract: With the operations of the Three Gorges Dam and its upstream cascade reservoirs, sediment load in the middle and lower reaches of the Changjiang River has decreased sharply, and the long-term and long-distance riverbed erosion has been extending towards the Estuary. Understanding the controlling factors of morphological processes and future evolution trend of the Changjiang Estuary is a major question for estuarine evolution and regulation. Using GIS techniques, morphological evolution of the Changjiang Estuary (Xuliujing to Hengsha) since 1997 were quantitatively analyzed, and the evolution trends till 2030 and 2050 were predicted by a well calibrated and validated numerical model (Delft3D). The results indicated that the study area shows overall erosion with significant local changes in 1997—2015. The erosion gradually increases as the sediment discharge decreases sharply, and the net erosion volume in 2010—2015 is as high as 75 million m³. Erosion mainly occurs at deep channel lower than 10 m, while the shallow shoals are dominated by accretion. Model predictions indicated that the study area would maintain strong erosion in 2015—2030 under present sediment supply condition (125 million t/a) and the erosion may decrease in 2030—2050 due to the increased resistance of river bed erosion. However, strong erosion still occurs under extremely low sediment supply (100 million t/a) with conversion from accretion to erosion at shallow shoals. Under the combined natural and human impacts, estuarine evolution processes are complex, and the evolution trend could be an important guidance to the integrated regulation of the Changjiang Estuary.

Key words: morphological evolution; fluvial sediment decline; numerical modeling; evolution trend prediction; Changjiang Estuary

收稿日期:2018 - 03 - 09

基金项目:国家重点研发计划项目资助(2016YFC0402307); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助(CKSF2019167/HL); 港口航道泥沙工程交通行业重点实验室开放基金资助项目(Yn918005); 国家自然科学基金项目资助(51679010; 51339001)

作者简介:栾华龙(1988—), 男, 工程师, 博士。研究方向:河口海岸动力地貌。E-mail: luanhualong@126.com

* 通信联系人 E-mail: liuth@mail.crsri.cn

网络出版时间:2019 - 03 - 13 10 : 56 : 34

网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20190312.1048.003.html

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

河口在径流、潮汐、波浪等动力因子的作用下被塑造造成不同的地形、地貌形态^[1]。世界范围内的河口三角洲因其重要的社会经济和生态环境价值而受到广泛关注。近几十年来,在流域及河口大型工程的双重影响下,河口自然演变过程受到不同程度的干预。如何合理预测未来演变趋势以应对不断变化的新形势已成为学者、政府和社会共同关注的焦点^[2]。

长江河口作为世界第三、亚洲第一大河的河口,受巨量的河流水沙输入及中等强度潮汐的作用,徐六泾以下河道展宽、分汊,近半个世纪以来一直维持“三级分权、四口入海”的地貌格局^[3]。北支水道逐渐淤积萎缩,1958年以后实测分流比普遍低于5%,目前已成为典型的潮控河槽^[4]。南支及下游受径潮流相互作用,由滩槽交错的复式河槽过渡到水下三角洲开敞水域(图1)。

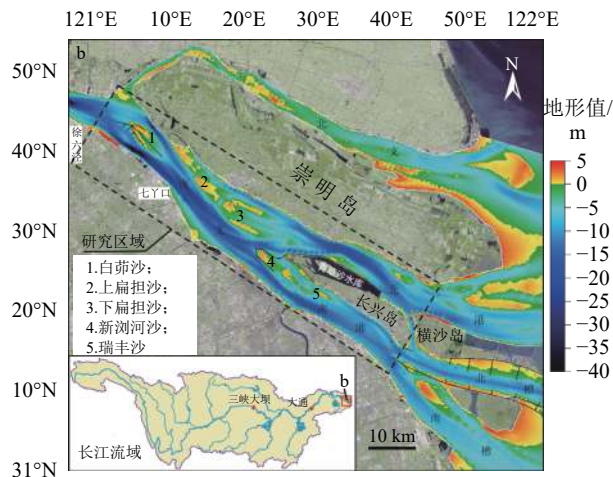


图1 研究区域概况

Fig. 1 Overview of study area

近几十年,随着河流来沙量的不断下降,长江口局部区域已经发生冲刷^[5],其中徐六泾至横沙岛之间的长江口河段自20世纪80年代就已呈净冲刷态势^[6]。前人对该河段的冲淤演变机制开展了大量研究:陈吉余等^[3]认为该河段在落潮优势流的作用下床面易冲,悬沙落淤较少;刘杰等^[7]发现北支泥沙倒灌是近期南支河床冲淤演变的主要驱动因子;赵娟^[8]通过定性分析认为未来南支河段将保持冲刷,同时河槽向窄深发展;刘杰等^[9]基于2010—2015年不同水深河槽容积的变化得出了同样结论。河道岸线及主槽深泓趋向潮波传播方向,表明该河段正向平衡状态发展^[10]。然而,目前对长江口河段近期冲淤机制和未来趋势的定量预测还缺少深入研究。

在新水沙形势下,长江口河段将发生相应的冲淤演变及河势调整。为确保已建重大工程的安全及

长江口综合整治的顺利推进,迫切需要对未来演变趋势进行合理可靠的预测。首先,作者通过长江口河段1997—2015年多个年份地形资料的定量计算,分析冲淤量与河流来沙量的相关性;其次,结合基于过程的数学模型(Delft3D)预测低来沙条件下长江口河段至2030年和2050年的冲淤趋势,根据对冲淤分布和冲淤量的分析,为长江河口综合整治和可持续开发利用提供科学依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

研究区域为徐六泾至横沙岛之间的长江口河段,包括南支、北港上段和南港,全长约80 km(图1)。该河段为长江入海水沙的主要通道,以落潮优势流为主,床面泥沙组成主要为细砂和极细砂,中值粒径约为150~220 μm ,且主槽大于浅滩,上游大于下游^[11]。该河段涉水工程及沿岸码头众多,为长江口深水航道上延至南京的重要组成部分,已建成新浏河沙、白茆沙等洲滩整治工程。同时,青草沙水库、陈行水库、东风西沙水库等为上海市重要的水源地。

长江入海水沙通量巨大,1951—2015年多年平均径流量8 931 亿 m^3 ,输沙量3.68 亿t。近半个多世纪以来,径流量没有发生显著的趋势性变化;来沙量经历了20世纪50、60年代的高输沙量、80年代以后逐渐减少、近十几年急剧减少这3个阶段,减少幅度近70%^[12]。来沙量的减少主要受流域内水土保持、大坝拦蓄等人类活动的影响。1997年以来,大通站逐月累积径流量接近于直线,累积输沙量在2003年三峡大坝拦蓄以后出现明显向下偏转,表明来沙量显著减少(图2)。从季节性分布特征来看,洪季来沙量约占全年总量的87%,输沙量的减少主要体现源于洪季来沙量的减少。这种新的水沙形势将持续影响长江口河段的冲淤演变。

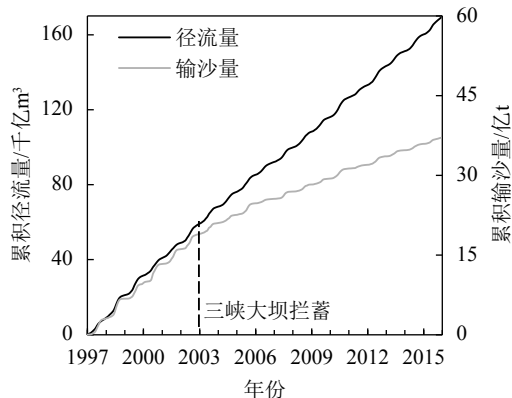


图2 大通站自1997年逐月累积径流量和输沙量

Fig. 2 Accumulated monthly runoff and sediment load at Datong station since 1997

1.2 资料与方法

1.2.1 实测冲淤过程分析

通过收集1997、2002、2010和2015年研究区域1:50 000的地形资料,借助Surfer软件通过Kriging插值技术将水深散点插值为分辨率100 m×100 m的网

格,建立不同年份的数字高程模型(DEM)。研究区域面积约1 023 km²,受青草沙水库和滩涂围垦的影响,2010年以后面积减小至947 km²(图3)。基于相邻年份DEM的差值得到冲淤分布,并计算不同水深范围内的泥沙冲淤量和冲淤厚度。

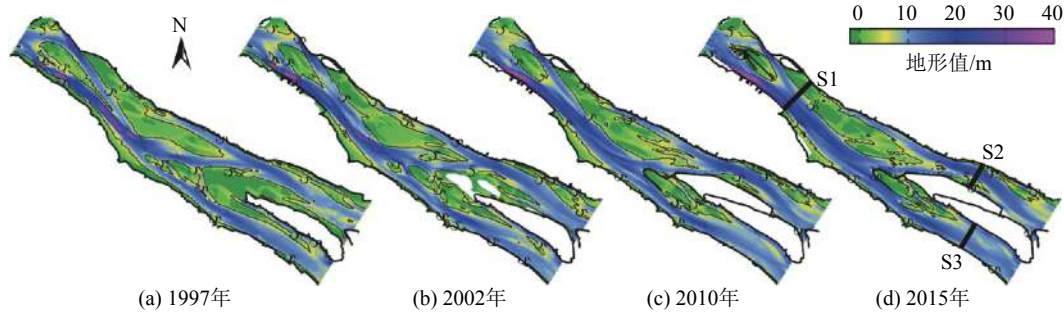


图3 长江口河段不同年份地形
Fig. 3 Bathymetry of the Changjiang Estuary in different years

1.2.2 冲淤演变数值模拟

基于冲淤定量分析,使用数学模型(Delft3D)对长江口河段演变趋势进行预测。Delft3D模型系统包括水动力、波浪、物质运输和地貌演变等模块,其中,地貌模块率先引入“地貌加速因子”方法^[13],在保证计算效率和水动力及床面更新实时反馈的同时,实现中长周期地貌模拟,因此被广泛应用于近岸、河口、河流等地区的动力地貌模拟^[14]。

所建立的模型计算区域覆盖长江口、杭州湾及邻近海域,考虑天文潮、径流、风、波浪等驱动力及非黏性沙和黏性沙运动,并基于月均径流量和输沙量组合对季节性的水沙过程进行概化。具体来讲,月均径流量峰值发生在7月,月均来沙量峰值为7—9月,12、1、2月为枯水期,12、1、2、3月为少沙期,剩余月份均为中水中沙。基于上述水沙年内分布特征,将研究期内多年月均水量沙量概化为6个不同水沙组合的时段(P1~P6,见表1),用于该时期冲淤演变的后报模拟。这种概化处理不仅使模型考虑了水沙的季节性变化,还能够保证一年内水沙总量与实测值保持一致。不同径流量条件选取不同的地貌加速因子,并通过敏感性试验确定最终取值。Luan等^[15]已给出详细的模型参数设置,并提供了径潮流动力和冲淤验证,1958—1978年、1986—1997年和2002—2010年3个时期冲淤演变的模拟结果与实测结果对比吻合较好,因此能够用于未来演变趋势预测模拟。

选取2015年为预测模拟的起始年份,分别模拟至2030年和2050年的冲淤演变趋势。2010—2015年平均输沙量为1.28亿t,前人研究表明,至2050年平均输沙量最低将降至约1.00亿t^[16]。据此,共设置3组

预测模拟情景,分别为:1)2015—2030年,年输沙量为1.25亿t;2)2030—2050年,年输沙量为1.25亿t;3)2030—2050年,年输沙量为1.00亿t。其中,1.25亿t代表现状输沙量,1.00亿t代表未来可能发生的极低输沙量。由于缺少关于未来输沙量季节性变化的证据,因此,预测模拟与近期实测来沙量年内变化特征保持一致,即按照2002—2010年月均来沙量占全年总量的比重分配2015—2030年和2030—2050年来沙量的年内变化过程。由于径流量变化幅度较小,且其变化量对冲淤的影响程度远小于输沙量的变化,因此预测模拟使用三峡蓄水后多年月均径流过程。

表1 大通站季节性水沙条件概化

Tab. 1 Schematization of seasonal water and sediment discharge at Datong station

概化时段	月份	径流量特征	输沙量特征
P1	12、1、2	枯水	少沙
P2	3	中水	少沙
P3	4、5、6	中水	中沙
P4	7	丰水	丰沙
P5	8、9	中水	丰沙
P6	10、11	中水	中沙

2 结果分析

2.1 冲淤演变过程分析

2.1.1 河势变化及冲淤分布

长江口河段自1997年以来,滩槽格局保持相对稳定,但在径潮流动力作用及河口整治工程的影响下,局部区域的河势发生显著调整(图3)。上段白茆沙及其南水道冲刷,沙体5 m等深线范围不断缩小,至2015年沙尾冲刷消失(图3(d))。七丫口断面对南支主

槽河床变形和南北港分流分沙起到一定控制作用^[4],主流出白茆沙南水道经七丫口断面时动力轴线北偏,引起扁担沙右缘冲刷,南支主槽冲刷展宽。新浏河沙包冲刷消失,同时新浏河沙整体下移并在护滩工程修建后位置趋于稳定(图3)。下扁担沙沙尾淤积推移,挤压新桥水道同步下移,在中央沙圈围和青草沙水库工程建成后新桥水道位置趋于稳定。

从冲淤分布上看,2002—2015年河床冲刷范围相较蓄水前的1997—2002年有所增大,但整体冲淤格局基本不变,表现为主槽冲刷和沙体淤积下移(图4)。总体上,1997年以来,南支河段呈冲刷下切态势,三峡蓄水后整体冲淤格局变化不大,但河槽冲刷强度有所增大,近年来的护滩工程使沙体下移趋势得到控制。

受新桥水道下移的影响,北港上段主槽逐渐北偏,贴近崇明岛南岸,同时青草沙水库的修建大幅缩窄河宽,主槽最大水深增大约2.5 m(图5,断面位置见图3)。北港上段主槽由顺直演变为微弯的平面形态,这一变化对下段河床演变产生一定影响。南港河道的冲淤演变主要表现为瑞丰沙脊的冲刷,沙尾5 m等深线缩短超过10 km。受河道采砂影响^[17],瑞丰沙的冲刷破坏了南港涨落潮复式河槽的河势,主槽过流

减少、流速减慢,导致主槽淤浅,尤其南港右侧发生严重淤积(图5)。

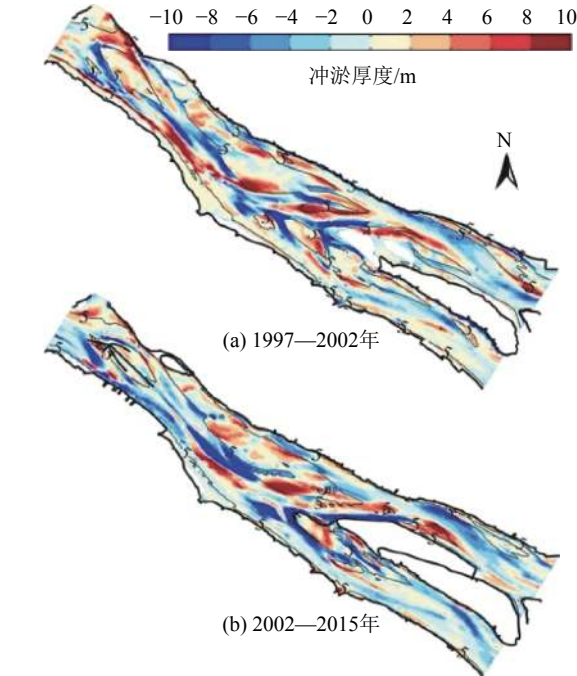


图 4 长江口河段冲淤分布

Fig. 4 Erosion and deposition patterns of the Changjiang Estuary

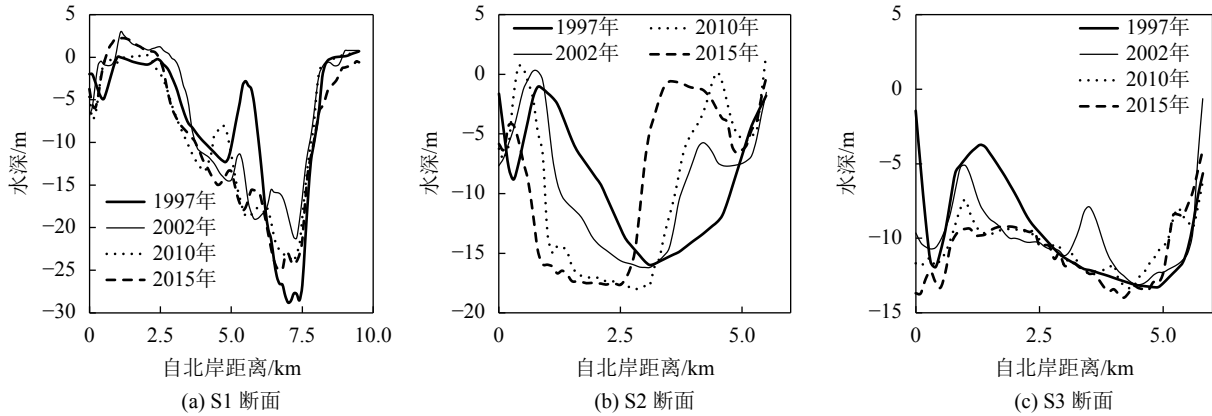


图 5 典型断面变化

Fig. 5 Variations of typical sections

2.1.2 冲淤量变化

不同时段冲淤量的计算结果表明自1997年以来长江口河段为持续冲刷,且冲刷强度随河流来沙量的下降而明显增大,两者呈较强的相关性。由表2可知,1997—2002年年均净冲刷量为0.26 亿 m^3 ,2010—2015年年均净冲刷量达0.75 亿 m^3 ,年均刷深也从25.8增大至79.1 mm(计算区域见图1虚线框)。1997—2002年冲刷区域的面积略小于淤积区域面积,占比48%,但年均冲刷量为3.07 亿 m^3 ,年均淤积量为2.81 亿 m^3 ,两者在3个时段内均为最大,这种河床的大冲大淤与该时段内1998和1999年的特大洪水

有关。2002—2010年和2010—2015年河床淤积量变化不大,但在来沙量减少的条件下冲刷量增大,因此净冲刷量相应增大。1997—2015年研究区域内累积冲刷泥沙9.35 亿 m^3 ,平均每年冲刷0.52 亿 m^3 。

分析不同水深范围内的冲刷量可以看出,冲刷主要发生在10 m以下的深槽区域,其中,10~15 m水深范围内最为显著,且以5 m水深为界呈“淤滩刷槽”的格局(图6,其中负数为冲刷,计算区域见图1虚线框),这与人研究结果一致^[9]。研究期内浅滩淤积呈减弱趋势,这不仅受来沙量减少影响,还与工程建设导致高滩面积减少有关。

表 2 不同时段冲淤量计算

Tab. 2 Calculations of erosion and deposition volumes in different periods

时段	大通年均 输沙量/($\text{亿t}\cdot\text{a}^{-1}$)	冲淤定量计算						
		计算 面积/ km^2	冲刷		淤积		净冲淤	
			面积 百分比/%	体积/ ($\text{亿m}^3\cdot\text{a}^{-1}$)	面积 百分比/%	体积/ ($\text{亿m}^3\cdot\text{a}^{-1}$)	体积/ ($\text{亿m}^3\cdot\text{a}^{-1}$)	厚度/ ($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)
1997—2002年	3.14	1 023	48	-3.07	52	2.81	-0.26	-25.8
2002—2010年	1.65	947	56	-1.83	44	1.30	-0.53	-56.1
2010—2015年	1.28	947	58	-2.03	42	1.28	-0.75	-79.1

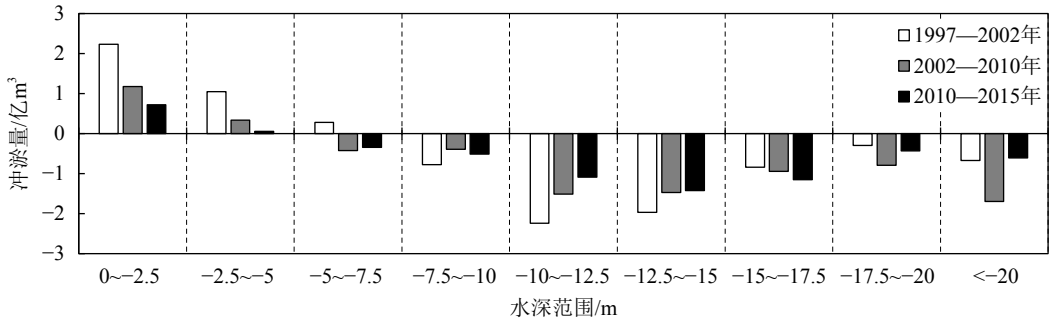


图 6 不同水深范围内的冲淤量

Fig. 6 Volume of erosion and deposition in different depths

2.2 演变趋势预测模拟

预测模拟结果给出了3种情景下长江口河段冲淤演变趋势。由图7的冲淤分布结果可知,2015—2030年整体上以冲刷为主,“淤滩刷槽”的格局依然存在(图7(a)),白茆沙、扁担沙和新浏河沙均保持淤积为主,尤其在白茆沙头、扁担沙尾和新浏河沙头位置泥沙淤积明显,包括白茆沙南水道、

扁担沙右缘南支主槽和新桥水道在内的深槽区域发生冲刷,局部区域最大刷深近10 m。扁担沙发生切滩,5 m等深线被冲开并形成2个冲刷沟,其中下沙体的冲刷沟更大。青草沙水库使北港上段河槽大幅缩窄,引起相邻主槽的冲刷在模拟时期内还将持续。南港主槽淤积,长兴水道冲刷,整体冲淤幅度较小。

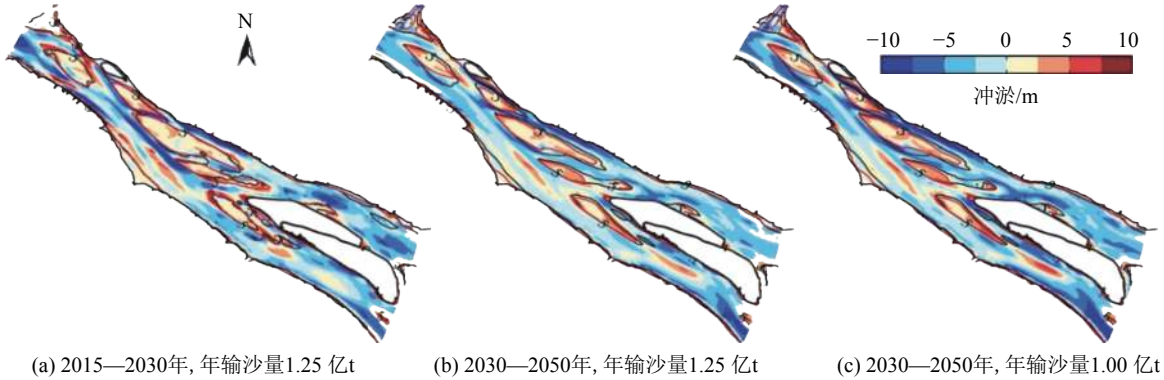


图 7 冲淤分布预测模拟结果

Fig. 7 Model predictions of erosion and deposition patterns

不同来沙条件下,2030—2050年仍以冲刷为主,在现状来沙量条件下(1.25 亿t),其冲刷强度相较于2015—2030年有所减弱(图7(b)),但在极端低来沙量条件下(1.00 亿t)河床冲刷依然显著,尤其在新桥水道、北港上段主槽和南港下段(图7(c))。2种来沙条件下白茆沙尾被冲刷,5 m等深线收缩;扁担沙冲刷沟进一步扩大,沙体下段5 m等深线范围缩小。

由表3冲淤量预测模拟结果可知,2015年至2030和2050年研究区域长江口河段保持净冲刷。2015—2030年年均净冲刷量为0.80 亿 m^3 ,年均冲刷厚度84.4 mm,与2010—2015年相比稍有增大;现状来沙量条件下,2030—2050年年均净冲刷量减小到0.60 亿 m^3 ,但在低来沙量条件下年均净冲刷量为0.78 亿 m^3 ,与2015—2030年基本相当。

表 3 冲淤量及冲淤厚度预测模拟结果

Tab. 3 Model predictions of volume and bed thickness changes

时段	大通年均输沙量/ (亿t·a ⁻¹)	冲刷体积/ (亿m ³ ·a ⁻¹)	淤积体积/ (亿m ³ ·a ⁻¹)	净冲淤体积/ (亿m ³ ·a ⁻¹)	净冲淤厚度/ (mm·a ⁻¹)
2015—2030年	1.25	-1.41	0.62	-0.80	-84.4
2030—2050年	1.25	-0.99	0.39	-0.60	-62.9
2030—2050年	1.00	-1.24	0.46	-0.78	-82.6

3 讨 论

长江口河段出现持续净冲刷的主要原因是流域来沙量锐减,三峡拦蓄以后年平均输沙量降幅约为67.4%。来沙量的减少使南支、南港和北港上段水体含沙量也明显下降^[9],水流为不饱和输沙状态。南支河段在落潮优势流作用下通常作为上游来沙的过沙通道,水体悬浮泥沙较少直接参与造床^[3],因此河床净冲刷量随来沙量的下降逐渐增大(表2)。目前,长江口河段正处于对来沙量锐减的自适应调整阶段^[18],河槽冲刷、浅滩淤积,活动沙体平稳下移,整体河势保持相对稳定。

长江口河段的河床主要为松散易冲的现代沉积物,最厚达数十米^[3],这为1997年以来的持续冲刷和2015年到2030年乃至2050年提供了丰富的物质基础。预测模拟结果表明,在相同输沙量条件下,2030—2050年冲刷强度相对于2015—2030年有所减弱,这可能与河槽持续冲刷下切使河床抗冲性增大有关,局部深槽(如白茆沙南水道)不断刷深最终将达到冲刷极限。

目前,长江河口已建青草沙水库、东风西沙水库、陈行水库、白茆沙固沙潜堤工程、新浏河沙固沙潜堤工程等,这些整治建筑物对河槽局部冲淤演变产生重要影响^[6]。如:白茆沙整治工程起到固定沙体的作用,故预测结果中沙尾冲刷将有所缓解;新浏河沙固沙潜堤也能在一定的程度上阻止北侧冲刷沟的发育。国务院2008年批复的《长江口综合整治开发规划》对白茆小沙、扁担沙、瑞丰沙等沙体也规划有固沙潜堤工程,将起到稳定河势的作用,进而影响工程局部区域的冲淤演变趋势。

预测模拟结果还表明,如无工程防护措施,持续低来沙量条件下长江口河段“淤滩刷槽”的整体格局有向“刷滩刷槽”转变的趋势。根据2030—2050年的冲淤分布模拟结果发现,白茆沙尾和扁担沙尾出现明显冲刷萎缩,说明在足够长时间的低来沙量条件下江心浅滩和沙体的尾部首先发生冲刷,最终可能演变为该河段内滩槽的全面冲刷。尽管河床具有一定的自适应调整机制,但当未来长时间冲刷至临界状态时,势必会影响整体河势的稳定^[19]。因此,建议

对现有综合整治规划开展新水沙条件和冲刷格局下的适应性和整治效果研究。

4 结 论

长江口徐六泾至横沙岛之间的河段自1997年以来呈持续冲刷状态,局部河势发生显著调整,白茆沙尾、新浏河沙包和瑞丰沙尾被冲刷消失,扁担沙右缘冲刷且沙体整体下移。该河段1997—2015年年均净冲刷量0.52 亿m³,冲刷强度随来沙量减少而逐渐增大,2010—2015年年均净冲刷量达0.75 亿m³。冲刷主要分布于10 m以下深槽,浅滩以淤积为主,表现为“淤滩刷槽”的整体格局。

基于充分率定、验证后的长江口年代际冲淤演变模型预测了未来演变趋势,模拟结果表明,2015年至2030年和2050年河床仍以冲刷为主,且持续低来沙量条件下整体格局有“淤滩刷槽”向“刷滩刷槽”转变的趋势。现状来沙量条件下,2030—2050年冲刷强度有所减弱,这可能与持续刷深后河床抗冲性增大有关,但在可能的极低来沙量条件下仍维持高冲刷强度。此外,长江口未来冲淤演变趋势还将受到河口整治工程的影响,本文研究成果可为长江口保护与合理利用提供技术支撑。

参考文献:

[1] Galloway W E.Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems[M]//Broussard M L.Deltas:Models for exploration. Houston:Houston Geological Society,1975:87-98.

[2] 丁平兴,王厚杰,孟宪伟,等.气候变化影响下我国典型海岸带演变趋势与脆弱性评估[M].北京:科学出版社,2016.

[3] 陈吉余,虞志英,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.

[4] 恽才兴.长江河口近期演变规律[M].北京:海洋出版社,2004.

[5] Yang S L,Milliman J D,Li P,et al.50 000 dams later: Erosion of the Yangtze River and its delta[J].Global and Planetary Change,2011,75(1/2):14-20.

[6] Luan H L,Ding P X,Wang Z B,et al.Decadal morphological evolution of the Yangtze Estuary in response to river input changes and estuarine engineering projects[J].Geomorphology,2016,265:12-23.

- [7] Liu Jie,Zhao Dezha,Cheng Haifeng.Recent erosion-accretion evolution mechanism of south branch in the Yangtze Estuary[J].[Port and Waterway Engineering](#),2011(7):113–118.
[刘杰,赵德招,程海峰.长江口南支河床近期冲淤演变机制[J].[水运工程](#),2011(7):113–118.]
- [8] Zhao Juan. Research of the response of the morphological process at Yangtze River Estuary to the changes of water and sediment discharges[D].Nanjing:Hohai University, 2006.[赵娟.长江河口(南支)冲淤变化对流域来水来沙的响应研究[D].南京:河海大学,2006.]
- [9] Liu Jie,Cheng Haifeng,Han Lu,et al.Influence of fluvial sediment decline on the morphodynamics of the Yangtze River Estuary and adjacent seas[J].*Advances in Water Science*,2017,28(2):249–256.[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.]
- [10] Wang Y H,Dong P,Oguchi T,et al.Long-term (1842—2006) morphological change and equilibrium state of the Changjiang (Yangtze) Estuary,China[J].*Continental Shelf Research*,2013,56:71–81.
- [11] Liu Hong,He Qing,Wang Yuanye,et al.Temporal and spatial characteristics of surface sediment grain-size distribution in Changjiang Estuary[J].[Acta Sedimentologica Sinica](#), 2007,25(3):445–455.[刘红,何青,王元叶,等.长江口表层沉积物粒度时空分布特征[J].[沉积学报](#),2007,25(3):445–455.]
- [12] Yang S L,Xu K H,Milliman J D,et al.Degradation of Yangtze River water and sediment discharge:Impact from natural and anthropogenic changes[J].[Scientific Reports](#),2015,5:12581.
- [13] Roelvink J A.Coastal morphodynamic evolution techniques[J].*Coastal Engineering*,2006,53(2/3):277–287.
- [14] Deltares.Delft3D-Flow user manual[M].Delft:Netherlands, 2014.
- [15] Luan H L,Ding P X,Wang Z B,et al.Process-based morphodynamic modeling of the Yangtze Estuary at a decadal timescale:Controls on estuarine evolution and future trends[J].[Geomorphology](#),2017,290:347–364.
- [16] Yang S L,Milliman J D,Xu K H,et al.Downstream sedimentary and geomorphic impacts of the Three Gorges Dam on the Yangtze River[J].[Earth-Science Reviews](#),2014,138: 469–486.
- [17] Yan Longhao,Yang Shilun,Li Peng,et al.The change of the amount of accretion/erosion of the south channel at the Yangtze Estuary from 2000 to 2008:Moreover demonstrate the strong accretion in Waigaoqiao new harbor[J].[Marine Science Bulletin](#),2010,29(4):378–384.[闫龙浩,杨世伦,李鹏,等.近期(2000—2008年)长江口南港河槽的冲淤变化——兼议外高桥新港区岸段强烈淤积的原因[J].[海洋通报](#),2010,29(4):378–384.]
- [18] Zhang Xiaohe,Li Jiufa,Yao Hongyi,et al.Recent evolution and self-adjustment processes of south branch of Yangtze River Estuary[J].*Yangtze River*,2015,46(17):1–6.[张晓鹤,李九发,姚弘毅,等.长江河口南支河道近期演变与自动调整过程研究[J].*人民长江*,2015,46(17):1–6.]
- [19] Wang Z B,Van Maren D S,Ding P X,et al.Human impacts on morphodynamic thresholds in estuarine systems[J].*Continental Shelf Research*,2015,111(Part B):174–183.

(编辑 李轶楠)

引用格式: Luan Hualong,Liu Tonghuan,Ding Pingxing.Recent morphological evolution processes and prediction on future evolution trend of the Changjiang Estuary[J].*Advanced Engineering Sciences*,2019,51(2):21–27.[栾华龙,刘同宦,丁平兴.长江口河段近期冲淤演变过程及未来趋势预测[J].*工程科学与技术*,2019,51(2):21–27.]