

近50年来长江河口分汊型河槽水体和泥沙容量的变化过程

姚俊, 施野, 张国安

(华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 根据1958-2013各年代长江河口河槽海图水深资料, 利用Arcmap地图分析软件建立不同时期的水深数据库, 以河口河槽水体和泥沙容量为研究对象, 结合典型潮汐过程和典型年代水沙同步实测资料, 计算长江口各分汊河槽最大理论进潮量和悬沙含量, 探讨近50年来长江分汊型河口河槽水体和泥沙容量的变化过程和影响因素。结果表明: ① 北港河槽总体稳定, 南港河槽仍处于发育阶段, 南港河槽发育中心在南港下段, 北港河槽上段区域略有萎缩; ② 目前, 南、北槽河槽由于工程影响仍处于持续调整过程中, 进潮量主增区域在南港和南槽, 北槽发育模式已经被固定和限制。③ 近30年来, 由于流域来水来沙减少, 同时北槽深水航道工程的建设, 使南、北槽进潮量和悬沙通量及其比例均发生了显著变化; ④ 南北港水道悬沙量主要集中于北港下段及南北槽区域, 其洪枯季悬沙含量的变化主要受冬夏季风和海洋动力条件的影响。

关键词: 最大进潮量; 河槽水体容量; 河槽悬沙量; GIS; 长江河口

DOI: 10.11821/dlxb201505013

长江河口是世界上典型的沙岛型多级分汊中等潮汐河口^[1], 长江流域丰富的水沙资源为长江口沙岛的形成提供了较为稳定的物质基础, 长江口复杂的动力要素, 又造就了其三级分汊, 四口入海的独特格局。随着近年来长江上游来水来沙的减少和人造工程的影响, 河口也出现了相应的响应。陈吉余等^[2]通过对长江河口历史变迁过程的研究, 提出长江河口近两千年来北岸沙岛并岸、南岸边滩推展的发育模式。高进^[3]认为河床演变具有宏观无序而微观有序的特性, 由于初始条件和边界条件的差异会形成形态各异的河口与河流, 并通过水动力因素的角度来探讨长江河口发育的局部规律性。潘雪峰等^[4]利用GIS技术对南支河道的冲淤和沙体迁移进行了探讨。刘杰等^[5-9]探讨了北槽深水航道工程实施后南、北槽分流比与河床冲淤的关系, 预测了未来南、北槽进口段水深变化情况。国内外已有研究成果对潮滩容积量的叙述较为丰富^[10-14], 但有关分汊型河槽环境容量的时空对比研究尚有待深入。本文将根据历年海图资料的数值处理, 结合河口区各段典型潮汐过程进行分析计算, 研究南港水道(含南港上段、南槽和北槽)和北港水道(含北港上段、北港下段)最大进潮量变化以及南槽、北槽的最大进潮量变化。依据20世纪80年代长江口资源调查和2013年长江口本底调查数据, 分析洪枯季悬沙区域性分布特征和规律, 探讨南北港及南北槽河槽环境容量的变化过程, 为河口河槽治理与工程规划提供依据。

收稿日期: 2015-02-09; 修订日期: 2015-03-26

基金项目: 国家自然科学基金(41376098); 科技部基础性工作专项重点项目(2013FY112000) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41376098; The Key Program for Fundamental Work, Ministry of Science and Technology, No.2013FY112000]

作者简介: 姚俊(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事海岸动力地貌研究。E-mail: junior199188@163.com

通讯作者: 张国安, 博士, 副教授。E-mail: gazhang@sklec.ecnu.edu.cn

828-836 页

1 区域概况、资料来源与研究方法

长江口为多级分汊河口,在科氏力作用下,长江河口存在明显的落潮流偏南、涨潮流偏北的流路分异现象。在涨落潮流路之间的缓流区,泥沙容易淤积形成水下沙洲、沙岛,促使水道分汊。在徐六泾以下被崇明岛分为南支和北支,南支在浏河口以下被长兴岛和横沙岛分为南港和北港,为第二分汊口,南港在横沙以下被九段沙分为南槽和北槽,为第三分汊口。据此本文将南北港水道分为北港上段(Ⅰ),北港下段(Ⅱ),南港上段(Ⅲ),南港下段(含北槽(Ⅳ)和南槽(Ⅴ))5个区域进行研究(图1)。

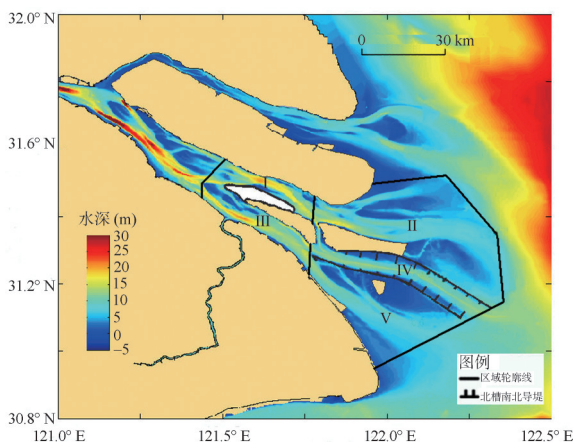


图1 研究区示意图

Fig. 1 Sketch of the study area

根据1958-2013年近半个多世纪的海图资料,利用地图分析软件ArcMap对其进行数字化处理,通过克里金插值建立半个多世纪以来不同时期南、北港水道的水深数据库。求出各区域的平均水域面积,对应相应年份不同区域的大潮升,从而计算出各个年份的最大进潮量。因计算时使用海图0 m等深线作为潮汐所能到达的最低点,故计算所得进潮量为理论上各个区域所能容纳进潮量的最大值。不同河槽所能容纳的潮水体积是不断变化的,它不仅揭示了河口区河槽区段的变化,亦将反映河槽对潮流作用的适应与反馈。基于上述5个区域,来研究近50年来长江分汊型河口河槽水体和泥沙容量的变化过程。

具体来说,以长江口多级分流点为节点、以垂直过水断面为边界划定区域轮廓。其中,以南北港二级分流点为节点,据水下沙体分布情况和海图实际范围划定南北港河槽起始断面,以三级分流点为节点提取断面将南、北港分为上、下段。研究区域的计算范围涵盖起始断面向下游延伸至拦门沙外围5 m等深线的区域。在拦门沙区域,通过水深数据库绘制等深线,将等深线上最大曲率点连接绘成分水脊线,从而对整体研究区域进行区段划分。

此外,结合1982、2013年长江口洪枯季综合调查的站点数据,选取了区域内同步站点连续观测资料,将对应区域站点的悬沙数据进行处理得到相应大小潮的悬沙含量。大小潮悬沙值进行平均,得到相应洪季和枯季的悬沙含量平均数值。各个区域的悬沙含量与其水体容量的乘积就是该区域的悬沙量,区域悬沙量代表的是该区域内悬沙总体质量。

进潮量变化的计算根据港湾型水域进潮量的计算方法,其计算公式为:最大进潮量=1/2(0 m区域面积+河槽区域面积)×大潮升,考虑到本文是讨论进潮量年际间的变化,因此采用上述方法做分析讨论是可行的。0 m以下的水体是以盐水楔的形式存在,随着涨落潮过程而摆动,难以区分潮汐和径流的分界面,因此引入水体容量概念来表征该部分的变化过程。水体容量的计算基于该区域面积和水深,通过ArcGIS进行数据分析和处理,得到不同河槽区段的水体容量值,可以反映该区域容纳水体的能力。

2 结果和分析

2.1 南、北港水道河槽最大进潮量变化

2.1.1 南港变化特征 南港水道在近半个多世纪内进潮量变化较为显著。在1958-1994年

间进潮量呈持续增加的态势，1958-1989年的30年间进潮量增长了9.06%，年均增长速率约为0.29%。1989-1994进潮量增长了2.21%，年均增长速率约为0.44%（表1），可见这五年间增长速率有所提高，河槽水体容纳量呈增加态势。但在1994-2004年间进潮量骤然间减少了26.40%。进潮量的骤降表明南港水道整体或者局部区域经历了较大的变化，才会引起进潮量如此大的改变。2004-2013年近十年来南港水道进潮量有所回升，增长速率为4.35%，年均增长速率为0.48%，与1989-1994年间年增长速率大致相当。

2.1.2 北港变化特征 北港水道在近半个多世纪内进潮量变化总体稳定，在1958-1989年间进潮量略有增加，增加幅度为5.29%，年均增加速率为0.17%。1989-1994年进潮量为缩减态势，减小幅度为3.52%，年均缩减速率为0.70%。1994-2004年进潮量基本持平，有0.49%的微弱增幅，年均增幅仅为0.05%（表2）。2004-2013年相比于前十年增幅较大，增幅为4.95%，年均增量达到了0.55%，进潮量已基本回升至1989年水平。1994-2013年的进潮量回升，因与南港水道在此段时间进潮量大幅度减小有关。

2.1.3 南北港对比 通过南港上段与北港上段、南港下段与北港下段对比得出：南北港进潮量主要产生区域位于南北港下段（图2）。北港上段自1958-1989年进潮量增加之后，从1989年至今进潮量一直为递减趋势，南港上段1958-1989年进潮量略有减少，1989-

表 1 不同时期南港水道最大理论进潮量
Tab. 1 The largest tidal volume of south channel in different periods

年		区域面积(km ²)	0 m 区域面积(km ²)	平均面积(km ²)	大潮升(km ²)	最大进潮量(km ²)
1958	南港上段	325.883	260.790	293.337	3.10	0.909
	北槽	588.206	527.451	557.829	3.70	2.064
	南槽	569.927	459.387	514.657	4.50	2.316
1989	南港上段	259.586	219.363	239.475	3.50	0.838
	北槽	700.341	620.947	660.644	3.80	2.510
	南槽	645.351	520.761	583.056	4.15	2.420
1994	南港上段	259.094	219.496	239.295	3.55	0.849
	北槽	762.929	648.476	705.703	3.60	2.541
	南槽	692.344	545.160	618.752	4.05	2.506
2004	南港上段	243.163	206.194	224.679	3.55	0.798
	北槽	342.872	297.659	320.266	4.03	1.291
	南槽	642.118	469.559	555.839	4.05	2.251
2013	南港上段	236.958	207.836	222.397	3.60	0.801
	北槽	370.112	302.278	336.195	4.03	1.355
	南槽	678.718	507.723	593.221	4.00	2.373

表 2 不同时期北港水道最大理论进潮量
Tab. 2 The largest tidal volume of north channel in different periods

年		区域面积(km ²)	0 m 区域面积(km ²)	平均面积(km ²)	大潮升(m)	最大进潮量(km ³)
1958	北港上段	285.056	186.898	235.977	3.10	0.732
	北港下段	821.123	758.819	789.971	3.90	3.081
1989	北港上段	240.098	196.825	218.462	3.60	0.786
	北港下段	862.716	751.084	806.900	4.00	3.228
1994	北港上段	242.669	187.285	214.977	3.60	0.774
	北港下段	843.359	745.782	794.571	3.90	3.099
2004	北港上段	242.911	186.515	214.713	3.60	0.773
	北港下段	857.788	741.621	799.705	3.90	3.119
2013	北港上段	220.018	202.515	211.267	3.60	0.761
	北港下段	925.307	779.198	852.253	3.90	3.324

2013年进潮量时增时减总体比较平稳。北港下段从1958-2013年进潮量变化一直较为稳定,而南港下段变化则较为显著:1958-1994年间南港下段进潮量呈持续增加态势,根据最大进潮量计算原理分析,在大潮升相近情况下,由于泥沙沉积使河槽不断向外延伸发展,分流节点上提致使南港下段区域面积的增大,则会相应增加区域的进潮量。对比南港下段进潮量变化,其趋势与南港水道整体变化趋势较为相似,且1994-2004年间进潮量减小幅度更为明显,而相同时间段内南港上段进潮量的减少量较小,说明在此期间南港水道进潮量的大幅减少是由于南港下段进潮量骤减引起的。北港上段在1989-2013年间进潮量都为递减趋势,可见在此期间北港上段区域略有萎缩。

陈吉余等^[2]在两千年来长江河口发育的模式中提出的南岸边滩推展,北岸沙岛并岸观点,应用于南港水道,其1958-1994年以来的发育趋势是比较吻合的,但在之后一段时间内则不尽相同。1994-2004是一个关键的转折期,期间应是由于自然或者人为因素对河道产生了比较大的变化。而自然因素如洪水作用时,一方面由于上游径流量的急剧增大对进潮量会有抑制作用,另一方面洪水对河床会有一个再塑造的过程,洪水过程往往会对河床产生冲刷,使河槽拓展加深从而促进进潮量的增加,例如1998年大洪水促使了新浏河沙通道形成,横沙通道10 m等深线贯通等^[15]。前者影响的是进潮量年内间的变化,而后者影响的是进潮量年际间的变化。在这十年当中南港进潮量缩减幅度达到了四分之一,不会是洪水等突发性环境因素的影响。考虑到近年来人为因素对长江口影响越来越显著,1998年开工建设的北槽深水航道工程,南、北导堤及丁坝束窄了河槽,在很大程度上缩减了北槽进潮量,可能是导致整个南港水道的进潮量大幅减少的原因之一。在外海潮汐作用一定的情况下,南港水道进潮量的缩减,相应的则会导致北港水道进潮量的增加,以期达到一个新的平衡。

2.2 南、北槽水道河槽最大进潮量变化

2.2.1 南槽变化特征 南槽的进潮量变化趋势与南港水道的变化趋势基本是一致的(图3),1958-1994年间进潮量持续增加,增幅较南港为大。1958-1989年进潮量增幅为4.48%,年均增幅0.15%。1989-1994年间进潮量增幅为3.57%,年均增幅达0.71%。1994-2004进潮量减少幅度为10.17%,年均减少1.02%。之后又有所回升,近十年回升幅度为5.41%,年均增幅0.60%。对比南港数据可以看出:南槽与南港进潮量1958-1994年均增长速率均为先小后大,因统计的是年均增长速率,难以看出逐年的增长速率。但从现有数据与趋势分析,在这36年间南港与南槽的进潮量增长速率呈逐年增大的态势。

2.2.2 北槽变化特征 北槽变化趋势与南槽总体趋势是一样的,但变化幅度有很大差别。1958-1989年进潮量增幅达21.63%,年

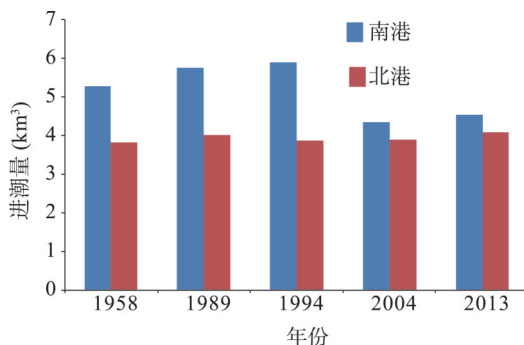


图2 南北港水道进潮量变化对比

Fig. 2 The change of tidal volume in South and North Channel

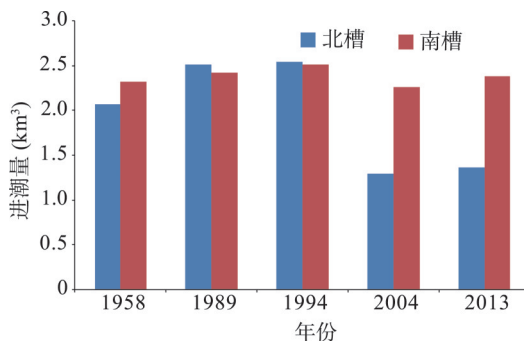


图3 南北槽进潮量变化

Fig. 3 The change of tidal volume in south and north passages

均增幅为0.70%。1989-1994年进潮量小幅增长,增幅为1.20%,年均增幅0.24%。1994-2004年进潮量急转直下,缩减幅度达到了49.20%。致使2004年进潮量仅有1994年的一半左右,之后十年略有回升,2013年进潮量相比2004年增长了4.97%,年均增长速率0.55%。可见在1994-2004年间南港水道进潮量的大幅度减少主要还是由于北槽进潮量的萎缩造成的。

2.2.3 南北槽对比 南、北槽进潮量的变化在一定程度上具有一致性,即1958-2013年间两者进潮量增减趋势相同,但两者的发育形势却有所区别。在1958-1994年间,南槽进潮量年均增幅呈逐年增大态势,而北槽进潮量年均增幅却呈逐年减少的态势。说明南槽发育状况要胜于北槽,但两者仍都是处于持续发育的阶段。在1994-2004年间经历了大变故之后,近十年来,北槽的进潮量增长速率要优于1994年以前的水平,但相比于南槽来说,其年均增长速率还是稍弱于南槽。北槽经历深水航道工程以后,发育模式受到了工程的限制,并且近年来由于上游径流带来的泥沙沉降堆积,其进潮量回涨速率应会降低。而南槽进潮增长速率并未达1994年之前水平,且北槽发育被限制后,会促使南槽的发育过程,进潮量回涨速率也会进一步增加。

2.3 南北港、南北槽河槽最大进潮总量变化对比

从南北水道进潮总量图中可以看出(图4),由于20世纪90年代以前人为工程建设较少,南北港水道基本处于一个自然发育的状态,南北港最大进潮量总和处于一个比较稳定的数值。20世纪90年代以后南北港分流口系列工程,北槽深水航道工程等开工建设,进潮总量开始缩减,但是从2013年进潮总量可以看出,工程建设完工后进潮量又开始回升了。对比南北槽进潮总量图可以发现(图5),南北槽1958-1994年间进潮总量一直稳步增加,并没有维持一个比较稳定的数值,表明南北槽发育尚未达到稳定状态。虽然自1994年之后由于人为工程的影响打断了它的一个发育进程,当它通过自然的自我调节作用之后,进潮量依旧会按着自然的发育状态持续增加,直到达到如南北港水道这样一个稳定状态。

因此在下一阶段的发育过程中,南北港水道进潮总量会重新回升至一个稳定数值。而北港水道进潮量变化较为稳定,虽然因人为因素造成了近年来进潮量增加,但在河口的自调节作用下,会重新进入自然发育的进程。进潮量主增区域在南港水道,而北槽经过深水航道工程之后,发育模式已经被固定和限制,因此南槽会成为长江河口下一阶段发育的中心。

2.4 河槽悬沙容量时空分布特征

2.4.1 河槽悬沙容量变化 从2013和1982年5个区域的平均悬沙量对比中(表3)可以看出:2013年悬沙含量值比1982年显著降低了(表4),分析其主要影响因素应是长江

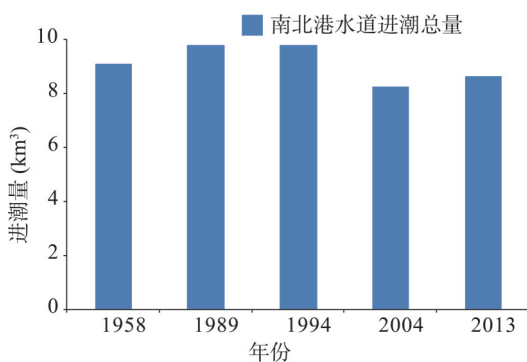


图4 南北港水道进潮总量变化

Fig. 4 The change of the total tidal volume in south and north channels

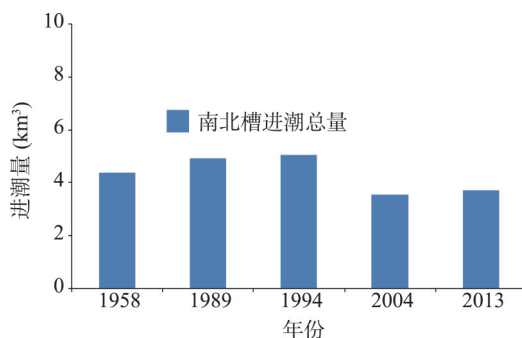


图5 南北槽进潮总量变化

Fig. 5 The change of the total tidal volume in north passage

流域水利工程建设, 拦截了上游来沙, 特别是三峡工程完工后, 入海泥沙量锐减。据杨世伦等^[16-17]的研究, 三峡水库蓄水以来 (2003-2008) 上游入库悬沙 73% 以上被拦截在坝前, 由于大坝下游河床冲刷和支流来沙补给, 大通站输沙率下降幅度为 49%。可见长江河口急剧减沙的首要原因还是由于流域内大坝的建设, 再加上南水北调, 长江流域的水土保持工作等使入海泥沙进一步减少。其中, 北港上段 2013 相比于 1982 年悬沙量减少了 67.72%, 北港下段减少百分比为 85.10%, 南港上段 38.27%, 南北槽分别为 73.24% 和 85.25%。北港下段和南北槽区域悬沙量减少值都超过了 70%, 北槽和北港下段更是达到了 85% 以上, 这三个区域都位于河口与海洋交界处, 是长江河口最大浑浊带^[18]活动区域。其泥沙含量受流域和海域来沙共同影响, 海域来沙对河槽塑造的贡献主要是通过风浪对浅滩泥沙的掀沙作用, 泥沙进入水体以后随潮流向口内输运, 因此海域来沙主要取决于水体含沙量的变化。两个年份之间各区域的悬沙量分布趋势还是较为一致的, 即悬沙量较大区域位于北港下段及南北槽区域。然而 1982 年北槽悬沙含量是要高于南槽的, 到了 2013 年悬沙量反而低于南槽了, 北槽经深水航道之后致使河槽水体容量减小固然是其中一个重要原因, 两侧导堤对于掀沙动力的阻挡作用也是不可忽略的因素。

2.4.2 悬沙量洪枯季对比 洪季悬沙量分布主要集中于南北槽和北港下段 (表 5), 北港和南港水道上段只占了较小的一部分。南槽占的比重较大约为 38.1%, 北槽次之约为 27.2%, 北港下段也占了 22% 的比重。整个南港水道悬沙量占了总量的 71.7%, 是洪季水体高含沙区。

枯季悬沙量分布也集中于北港下段 (表 6) 和南北槽区域, 北港和南港水道上段比例增加。北港下段比重最大, 为总量的 37.9%, 北槽次之约为 24.6%, 南槽比重降为 17.8%。枯季南北港水道悬沙含量占总量比值差距不大 (图 6)。

通过洪枯季悬沙量对比可以看出 (图 7), 南北港水道悬沙量主要集中于北港下段及南

表 3 1982 年各区域悬沙量

Tab. 3 The regional amount of suspended sediment in 1982

	水体容量(10^9 m^3)	区域平均含沙量(kg/m^3)	悬沙总量(kt)
北港上段	1.059	0.8173	865.521
北港下段	3.161	1.3872	4384.987
南港上段	1.409	0.6508	916.977
北槽	2.279	2.8255	6439.246
南槽	1.997	1.8845	3763.356

表 4 2013 年各区域悬沙量

Tab. 4 The regional amount of suspended sediment in 2013

	水体容量(10^9 m^3)	区域平均含沙量(kg/m^3)	悬沙总量(kt)
北港上段	1.18	0.2368	279.389
北港下段	2.757	0.2370	653.464
南港上段	1.306	0.3311	566.017
北槽	1.511	0.7271	949.582
南槽	1.709	0.6665	1007.143

表 5 2013 年洪季各区域悬沙量

Tab. 5 The regional amount of suspended sediment in flood season of 2013

	水体容量(10^9 m^3)	区域平均含沙量(kg/m^3)	悬沙总量(kt)
北港上段	1.180	0.2002	236.236
北港下段	2.757	0.2968	818.534
南港上段	1.306	0.1844	240.902
北槽	1.511	0.6730	1016.96
南槽	1.709	0.8344	1426.087

表 6 2013 年枯季各区域悬沙量

Tab. 6 The regional amount of suspended sediments in dry season of 2013

	水体容量(10^9 m^3)	区域平均含沙量(kg/m^3)	悬沙总量(kt)
北港上段	1.180	0.2733	322.542
北港下段	2.757	0.6591	1817.129
南港上段	1.306	0.4779	624.186
北槽	1.511	0.7811	1180.309
南槽	1.709	0.4986	852.150

北槽区域,南北港上段区域悬沙量所占比重较小。北港下段、北槽、南槽三个高含沙区域,其洪季悬沙含量呈递增关系,而枯季恰恰相反,为递减趋势。洪季长江口外盛行夏季风,风向以东南风为主,与南槽入海口方向基本一致,因此南槽受夏季风影响最大,北槽次之,北港下段稍弱。而枯季时盛行冬季风,风向以西北风为主,因此北港下段受冬季风作用最为明显,北槽次之,南槽相对较弱。季风推动水流形成风浪,风浪搅动水体促进泥沙的再悬浮过程,受季风影响越大泥沙再悬浮过程越剧烈,加上海洋波浪、潮流等动力作用是导致这3个高含沙区出现洪枯季悬沙量差异的主要原因。南北港上段悬沙量枯季要高于洪季,说明在这两个区域潮流作用相对径流作用更占优势,这与陈沈良等^[19-21]对于悬沙浓度季节变化研究结果较为一致。

2.4.3 南北港、南北槽悬沙容量对比 南港水道悬沙容量无论是洪季还是枯季都高于北港水道(图8),且洪枯季悬沙容量都较为稳定。而北港水道枯季悬沙容量为洪季悬沙容量的2.02倍,其中北港下段区域枯季受海洋动力条件和冬季风作用导致的泥沙再悬浮过程,是导致此现象的决定性因素。相比于南北槽,南槽洪季同样形成了相比于枯季悬沙量较高的情况,其形成原因应有两方面:一是由于自北槽深水航道工程之后,北槽落悬沙分沙比总体呈增加的趋势,北槽上断面和下断面落潮悬沙分流已小于50%^[5],致使泥沙输运比重南槽要高于北槽;二是由于海洋动力条件与夏季风作用影响,使南槽泥沙再悬浮过程加剧,悬沙含量加大。

3 结论

(1) 南北港水道1958-1994年河槽水体容量变化趋势表明:北港水道总体稳定,南港水道仍处于持续发育阶段。通过南北港上下段进潮量对比可知:南北港进潮量主要产生区域位于南北港下段,南港水道发育中心在南港下段,北港水道上段区域略有萎缩。1994年之后由于人为工程的影响,暂时性打断了南北港水道自然的发育过程,至今仍处于持续调整过程中。

(2) 由于20世纪90年代以前人为工程建设较少,南北港水道基本处于一个自然调控

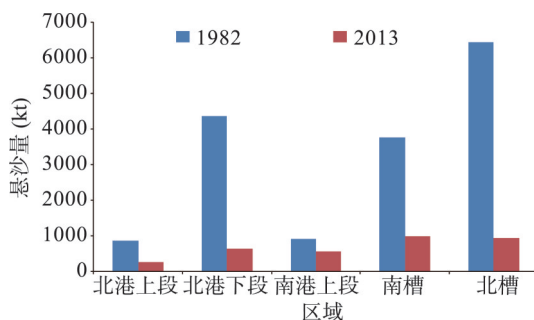


图6 1982和2013年各区域悬沙量

Fig. 6 The regional amount of suspended sediment in 1982 and 2013

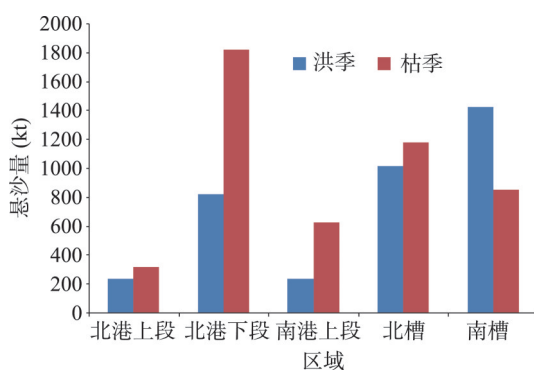


图7 2013年各区域洪枯季悬沙量

Fig. 7 The regional amount of suspended sediment in flood and discontinuous season in 2013

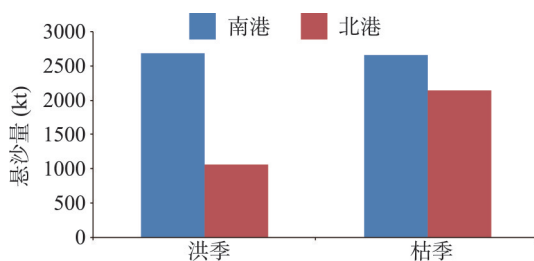


图8 南北港洪枯季悬沙量

Fig. 8 The amount of suspended sediment in flood and dry seasons in south and north channels

的状态,每年的最大进潮量总和处于一个比较稳定的数值,而南北槽1958-1994年间进潮量一直稳步增加,南北槽发育尚未达到如南北港水道一增一减的动态稳定。南槽进潮量年均增幅呈逐年增大态势,而北槽进潮量年均增幅却呈逐年减少的态势,说明南槽发育状况要胜于北槽,但两者仍都是处于持续发育的阶段。在接下来发育过程中进潮量主增区域在南港水道,而北槽经过深水航道工程之后,发育模式已经被固定和限制,南槽会成为长江河口下一阶段发育的中心。

(3) 通过对比2013和1982年悬沙量,可以看出近30年来,由于水利工程拦沙作用和长江流域的水土保持工作,使南北港悬沙含量锐减,同时北槽深水航道工程使南北槽悬沙通量及其比例发生了显著变化。

(4) 南北港水道悬沙量主要集中于北港下段及南北槽区域,其洪枯季悬沙含量的变化主要受冬夏季风和海洋动力条件的影响。

参考文献(References)

- [1] Yun Caixing. Recent Developments of the Changjiang Estuary. Beijing: China Ocean Press, 2004: 1-20. [恽才兴. 长江河口近期演变基本规律. 北京: 海洋出版社, 2004: 1-20.]
- [2] Chen Jiyu, Yun Caixin, Xu Haigen. The development model of the Changjiang Estuary during the last 2000 years. *Acta Oceanologica Sinica*, 1979, 1(1): 103-111. [陈吉余, 恽才兴, 徐海根. 两千年来长江口发育的模式. 海洋学报, 1979, 1(1): 103-111.]
- [3] Gao Jin. The evolutionary rule of Changjiang River mouth and hydrodynamic effect. *Acta Geographica Sinica*, 1998, 53(3): 264-269. [高进. 长江河口的演变规律与水动力作用. 地理学报, 1998, 53(3): 264-269.]
- [4] Pan Xuefeng, Zhang Ying, Zhang Dong. Discuss the evolution trend of the South Branch of Yangtze Estuary based on water depth remote sensing. *Harbor Engineering Technology*, 2007(2): 57-61. [潘雪峰, 张鹰, 张东. 基于水深遥感的长江口南支演变趋势探讨. 港工技术, 2007(2): 57-61.]
- [5] Liu Jie, Chen Jiyu, Xu Zhiyang. River-bed evolution in the braided reach of the south and north passage after implementing Yangtze estuary deepwater navigational improvements. *Advances in Water Science*, 2008, 19(5): 605-612. [刘杰, 陈吉余, 徐志扬. 长江口深水航道治理工程实施后南北槽分汊段河床演变. 水科学进展, 2008, 19(5): 605-612.]
- [6] Liu Jie, Xu Zhiyang, Zhao Dezhao, et al. Change of re-siltation in the Yangtze Estuary deepwater channel during 1st and 2nd stages. *Journal of Sediment Research*, 2009(2): 22-28. [刘杰, 徐志扬, 赵德招, 等. 长江口深水航道(一、二期工程)回淤变化. 泥沙研究, 2009(2): 22-28.]
- [7] Zhou Hai, Zhang Hua, Ruan Wei. Distribution of maximum turbidity and its influence on the sedimentation of North Passage before and after the construction of the first stage of Yangtze Estuary Deepwater Channel Regulation Project. *Journal of Sediment Research*, 2005(5): 58-65. [周海, 张华, 阮伟. 长江口深水航道治理一期工程实施前后北槽最大浑浊带分布及对北槽淤积的影响. 泥沙研究, 2005(5): 58-65.]
- [8] Liu Jie, Chen Jiyu, Le Jiahai, et al. Effect of the implementation of the first-stage project of the deepwater channel regulation in the Yangtze River Estuary on the erosion and deposition in the South Passage. *Journal of Sediment Research*, 2005(5): 40-44. [刘杰, 陈吉余, 乐嘉海, 等. 长江口深水航道治理一期工程实施对南槽冲淤演变的影响. 泥沙研究, 2005(5): 40-44.]
- [9] Liu Jie, Chen Jiyu, Le Jiahai, et al. Erosion-deposition analyses on the north passage after implementing the first stage project of the Yangtze estuary deepwater channel regulation. *Journal of Sediment Research*, 2004(5): 15-22. [刘杰, 陈吉余, 乐嘉海, 等. 长江口深水航道治理一期工程实施后北槽冲淤分析. 泥沙研究, 2004(5): 15-22.]
- [10] Mao Zhichang, Yu Zhiying, Xu Haigen. The Research of Tidal Flat in Shanghai. Shanghai: East China Normal University Press, 2014. [茅志昌, 虞志英, 徐海根. 上海潮滩研究. 上海: 华东师范大学出版社, 2014.]
- [11] Alexander S Kolker, Michael D Miner, Dallan Weathers H. Depositional dynamics in a river diversion receiving basin: The case of the West Bay Mississippi River Diversion. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2012(106): 1-12.
- [12] Li Ming, Yang Shilun, Li Peng, et al. Drastic decrease in sediment supply from Yangtze River and coastal crisis. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(3): 282-288. [李明, 杨世伦, 李鹏, 等. 长江来沙锐减与海岸滩涂资源的危机. 地理学报, 2006, 61(3): 282-288.]
- [13] Wu Hualin, Shen Huanting, Mao Zhichang. Calculation of the amount of siltation and erosion in the South and North

- channel in the Changjiang Estuary and its evolution. *Journal of Sediment Research*, 2004(3): 75-80. [吴华林, 沈焕庭, 茅志昌. 长江口南北港泥沙冲淤定量分析及河道演变. *泥沙研究*, 2004(3): 75-80.]
- [14] Liu Jie, Chen Jiyu, Chen Shenliang. Study on geomorphology evolution of Nanhui eastern mudflat. *Journal of Sediment Research*, 2007(6): 47-52. [刘杰, 陈吉余, 陈沈良. 长江口南汇东滩滩地地貌演变分析. *泥沙研究*, 2007(6): 47-52.]
- [15] Gong Cailan, Yun Caixing. Floods rebuilding the riverbed of the Changjiang Estuary. *The Ocean Engineering*, 2002, 20(3): 94-97. [巩彩兰, 恽才兴. 长江河口洪水造床作用. *海洋工程*, 2002, 20(3): 94-97.]
- [16] Yang Shilun, Zhu Jun, Zhao Qingying. A preliminary study on the influence of Changjiang River sediment supply on subaqueous delta. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003, 25(5): 83-91. [杨世伦, 朱骏, 赵庆英. 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. *海洋学报*, 2003, 25(5): 83-91.]
- [17] Li Peng, Yang Shilun, Dai Shibao, et al. Accretion/erosion of the subaqueous delta at the Yangtze Estuary in recent 10 years. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(7): 707-716 [李鹏, 杨世伦, 戴仕宝, 等. 近 10 年来长江口水下三角洲的冲淤变化: 兼论三峡工程蓄水的影响. *地理学报*, 2007, 62(7): 707-716.]
- [18] Shen Huanting, Pan Ding'an. *Turbidity Maximum in the Changjiang Estuary*. Beijing: China Ocean Press, 2001. [沈焕庭, 潘定安. 长江河口最大浑浊带. 北京: 海洋出版社, 2001.]
- [19] Chen Shenliang, Zhang Guoan, Yang Shilun, et al. Temporal and spatial changes of suspended sediment concentration and resuspension in Yangtze River Estuary and its adjacent waters. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(2): 260-266. [陈沈良, 张国安, 杨世伦, 等. 长江口水域悬沙浓度时空变化与泥沙再悬浮. *地理学报*, 2004, 59(2): 260-266.]
- [20] Zang Guoan, Yu Zhiying, He Qing, et al. Primary analysis on sediment motion before & after 1st phase engineering of the deep waterways in Changjiang Estuary. *Journal of Sediment Research*, 2003(2): 31-38. [张国安, 虞志英, 何青, 等. 长江口深水航道治理一期工程前后泥沙运动特性初步分析. *泥沙研究*, 2003(2): 31-38.]
- [21] Li Zhanhai, Chen Shenliang, Zhang Guoan. The study on grain-size distribution of suspended sediment and resuspension process on the Chongming east intertidal and subtidal zones in the Changjiang Estuary in China. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, 30(6): 154-163. [李占海, 陈沈良, 张国安. 长江口崇明东滩水域悬沙粒径组成和再悬浮作用特征. *海洋学报*, 2008, 30(6): 154-163.]

The change process of water and sediment volume of branching channel in the Yangtze River during 1958-2013

YAO Jun, SHI Ye, ZHANG Guoan

(State Key Laboratory of Estuary and Coast, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Based on the materials of water depth of 1958-2013 in the Yangtze Estuary channel, this article established the database of water depth during different periods with the aid of the Arcmap analysis software. The results showed that: (1) The state of the north passage channel was basically stable, and the river channel in the south passage was experiencing a developing stage. The developing center of the south passage channel was observed in the lower reach, while the upper reach of the north passage channel had slightly shrunk. (2) Currently, the south and north passages were still shifting under the effect of the project. The area where the tidal increased was mainly found in the south passage and south channel. The developing pattern in the north passage was fixed and confined. (3) In the study period, with the reduced amount of sediments from the catchment and the construction of the deep sea waterway project in the north passage, the tidal volume, suspended sediment flux and the ratio of them changed obviously. (4) The sediments in the north and south channels are concentrated in the lower part of the north channel and also in the south and north passages.

Keywords: tidal volume; water capacity of channel; sediment volume of channel; GIS; Yangtze Estuary