

新情势下黄河口出汉流路三角洲体系的演化模式

徐丛亮¹, 陈沈良^{2*}, 陈俊卿¹

(1. 黄河河口海岸科学研究所, 山东 东营 257000; 2. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

摘要:1855 年以来, 黄河近现代三角洲堆积快速, 经历了 3 个阶段 11 次大的流路改道变迁。分析了期间流路的改道、出汉与摆动的影响机制, 并以自然改道、人工改道和尾间出汉的不同性质划分了三级流路三角洲的演变。1996 年清 8 流路是黄河口首次人工出汉流路, 1988 年至今形成以清 8 为顶点由人工干预或出汉流路组成的第三级出汉流路三角洲。新情势下每一个人工出汉流路三角洲体系具有百年以上的行水年限, 可保证潮区界以上河道的长期稳定。人工出汉流路三角洲是新情势下黄河口多级三角洲演变的重要模式, 该体系的认识与使用对今后河口流路精准安排并保持顶点以上长期稳定, 节约日益受限的海岸资源, 优化港口布局, 以及维持河口自然健康生命等具有重要的战略意义。

关键词:黄河河口; 改道; 出汉流路三角洲; 演化机制

中图分类号: P736

文献标识码: A

文章编号: 1002-3682(2018)04-0035-09

doi: 10.3969/j.issn.1002-3682.2018.04.005

作为三角洲系统的重要组成部分, 河口流路是河流向三角洲提供陆源物质补给的直接通道, 不仅组成了三角洲地貌的基本骨架, 而且在三角洲形成与演变过程中起着主要的驱动作用^[1]。流路变迁对三角洲地貌演变、河口治理规划具有直接的影响^[2]。1855 年以来, 近现代黄河三角洲经历了 11 次大的流路改道变迁与 50 余次小的改道及出汉过程, 经历了三角洲顶点下移和三级三角洲的形成^[3]。明确区分改道与出汉的机理, 梳理各级三角洲之间的依存关系, 从而深入认识新时期河口流路及三角洲演变新的规律, 对于新情势下黄河口治理规划具有重要的战略意义。

1 河口流路的改道与出汉

历史上黄河河口改道频繁, 约 10 a 发生一次大的改道, 而每一次大的改道流路行河过程中, 又有众多小的改道或出汉、分汉, 以及河口主流的摆动; 而近期, 1996 年清 8 出汉流路的行水年限已远大于过去大改道流路的年限, 河口演变出现了新的情势。怎样才算一条流路、流路改道与尾间出汉的区别, 目前还无系统的梳理。因此, 对流路的改道、尾间出汉与河口主流摆动进行界定区分, 明确其定义、形成机制、影响因素及其作用, 可以为河口演变研究和流路稳定治理找出新的思路。

1.1 流路的改道

改道是指自然径流冲决或人为干预导致河流放弃原河道而另觅新路, 改道后径流一般完全偏离原河道, 重

收稿日期: 2018-06-08

资助项目: 国家重点研发计划“水资源高效开发利用”专项——黄河口演变与流路稳定综合治理研究(2017YFC0405500); 国家自然科学基金委员会—山东省人民政府联合资助项目——黄河三角洲地貌演变的动力机制与环境效应(U1706214)

作者简介: 徐丛亮(1969-), 教授级高级工程师, 主要从事河口水文水资源方面研究. Email: hhkxcl@163.com

* 通讯作者: 陈沈良(1964-), 教授, 博士, 主要从事河口海岸学方面研究. Email: slchen@sklec.ecnu.edu.cn

(陈 靖 编辑)

新选择低洼地势形成新的流路^[4]。改道点完全受制于径流作用。因此,改道点位置可以发生在河流作用的上中下游河道,变化范围极广,距离河口可以数十甚至几千千米。历史上黄河下游决口改道十分频繁。据统计,自周定王五年(公元前 602 年)至清咸丰五年(1855 年)铜瓦厢决口改道期间,大的改道共有 26 次^[2],小的改道无以计数,期间大部分为自然改道,少数为人工改道。大体上形成了以孟津为零级顶点北抵津沽,南达江淮的广阔黄淮海大平原。近现代黄河传统修防到利津,利津以下河岸薄弱易决易徙。因此,把传统修防下界以下不稳定的善决善徙的河口河段称为河口尾间,把该区间除去近口门段潮区界以上部分的改道称为河口尾间的改道。

自然改道的机制主要是径流弯道环流裁弯取直裁穿悬河河岸,与地下河裁弯取直原理基本一致^[3];其影响因素主要是洪水;影响区域往往发生在人口经济稠密地区,严重危及生产力水网、路网、电网格局以及生命安全。黄河历史上的改道大部分是自然冲决改道,1855—1934 年入渤海的近现代三角洲 7 条流路全是自然凌汛或伏汛冲决改道。

而人工决口改道则主要由人为干预和径流作用所致。黄河历史上由于战争战乱发生人工扒口改道往往造成惨重的灾难,甚至影响黄河的千年历史格局。如 1128 年,为阻止金兵南下,南宋东京留守杜充决口南堤,黄河从此南泛夺淮入海 700 余年;1938 年国民党军花园口扒口改道阻敌,形成千里黄泛区等^[5]。

1.2 尾间的出汉

出汉特指在河口尾间受潮汐作用的近口门河段,受径流与潮流的双重作用,或是人工开挖汉道,使主流偏离原河道沿着新的汉道及口门入海,原主流河道淤废或为人工截流,影响区域主要发生在自然海岸地域,不影响地区生产力基本格局。我们把出汉点在潮汐影响区的所有出汉河道称为河口尾间的出汉,河口尾间出汉亦分为自然出汉和人工出汉。

自然出汉主要发生在潮区界近口门段,洪峰径流下泄受潮流顶托,水流冲破薄弱河岸选择潮沟或低洼潮滩冲刷出河槽重新入海。自然出汉是黄河口流路演变的重要环节,无论改道流路还是人工出汉流路基本上每次洪峰都会有自然出汉现象发生,其所处的潮滩系统特别是潮沟演变对自然出汉流路的形成具有重要作用。汉道的发育有 2 种形态:1)洪峰径流面流漫溢洲面自上而下冲刷潮滩滩面形成沟汉;2)潮流沿潮滩自下而上不断掏蚀刷深形成潮沟,而这两者任何一种动力单一的强大作用或者二者的共同作用都会发生自然出汉。图 1 显示 2007-06—07 黄河调水调沙期间,在汉 3 断面以下 1.5 km 处出现自然出汉,出汉点距离口门 12 km,出汉新口门宽 1.9 km,形成一近南北向的汉道。该汉道在距分汉处 1.7 km 分为 3 股,西股流速水深均较大,水深大约为 1.3~2.5 m,渔船出入多行此河。2008 年后三汉合一,东北汉扩展成为主流河口。自然出汉频繁发生在近口门段,是三角洲叶瓣的重要形成机制,并不具备一条独立流路的特征。

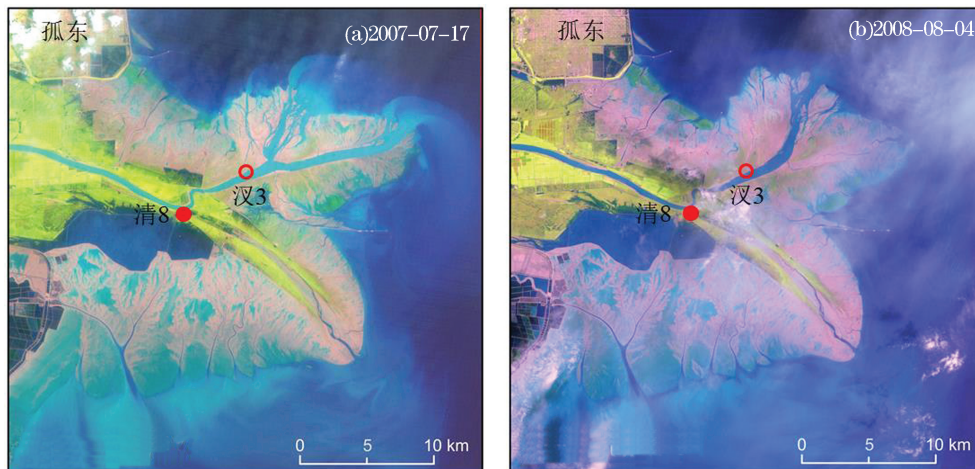


图 1 2007 年黄河调水调沙期间河口尾间由东向北的自然出汉

Fig.1 The naturally bifurcating from east to north at the Yellow River Estuary during the period of water-sediment regulation in 2007

人工出汉,即在潮区界附近人工干预进行开挖截流、决口开汉形成新河入海,由于人工出汉要开挖新河道,要形成一条新的独立流路,还需要较大的工程费用,因此出汉顶点位置要适中,一般选在潮区界略上位置的原因:1)此处荒野开挖无迁移成本,开挖河道长度及费用可控;2)入海方向可控;3)形成一条新的出汉流路可以有较长时间的行水年限来保障工程的价值。人工出汉类似于人工改道,不同之处是改汉点位置不同,人工改道顶点位置大都选在尾间河道潮区界或潮流界上端位置。1996年,为适当调整清水沟流路入海口门用黄河泥沙淤海造陆,胜利油田新滩海域油区海上开采改为陆地开采,调整河口位置选择新海域容沙,破解清水沟流路1988—1996年一直单一延伸造成的不利局面,在汛前实施了清8人工出汉工程^[6]。1996-05-11—07-18清8出汉工程完成引河开挖、截流坝、两岸导流堤修筑,新河较原河道缩短入海流程16.6 km^[6]。1996-07-18河口恢复过流至9月整个出汉河段顺直通畅,显示了人工出汉形成一条新流路的成功案例(图2)。1996年清8出汉流路是随着河口治理开发的需要产生的,纵观黄河口历史治理发展过程,可以说是清8出汉流路是黄河口历史上首次人工出汉流路,在河口演变中具有重要的地位与作用。

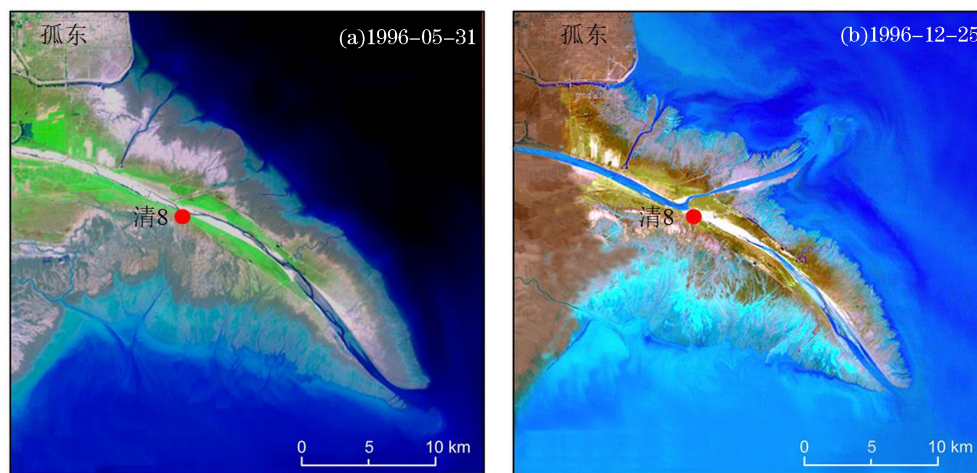


图2 1996年Q8出汉工程前后遥感影像

Fig.2 Remote-sensing images before and after Q8 artificial bifurcation project in 1996

综上所述,河口尾间的流路可分为改道流路与人工出汉流路两种,决口点的位置决定了是出汉还是改道。1855年至今黄河的11条流路包括以宁海为顶点的前7条自然改道流路、以渔洼为顶点的3条人工改道流路和1条以清8为顶点的1996年人工出汉流路组成。而期间其他小的数十次短暂改道或自然出汉都应归结为这11条流路的短时空变化过程环节。

2 河口尾间演变与多级三角洲划分

2.1 河口尾间的演变进程

庞家珍等归纳出了黄河河口尾间每一条流路都遵循“淤积漫流、延伸归一、分汉摆动、改道行河”四个环节的自然单循环演变规律^[7]:1)改道初期,水流散乱,主流不定,漫流入海,溯源堆积,然后滩面淤高,在新的滩面上形成多个河槽,分汉入海;2)第二阶段,逐渐形成单一河道,沉积造床形成高滩深槽,河势趋于稳定,口门摆动范围相对变小,河道具有较好的挟沙能力,对黄河下游产生溯源冲刷;3)第三阶段,随着沙嘴持续延伸,河道伸长,河道自上而下地逐步由单一顺直向弯曲性过渡,溯源冲刷转为溯源堆积,由下而上发展,滩槽高差变小,悬河形势加剧,河势向不稳定过渡;4)第四阶段,河道向蜿蜒曲折发展,自上而下边滩、心滩发育,

河道比降减小淤积壅水,河弯凹岸塌岸,有可能发展为出汉位置靠下的出汉夺流,甚至是决口位置靠上的新的改道。

不论是改道流路还是人工出汉流路,基本上都遵循着以上 4 个阶段。期间口门段发生洪峰的短时间的自然分汉,因时间短,下一次洪峰过程又会再次分汉或者回归故道,这些汉道还来不及完成以上 4 个环节流程,还是属于原流路范畴。只有超过数年比如 10 a 行水时间以上出汉流路,河道流路属性完整,河道完整经历以上 4 个环节发育,则属于新的流路范畴,不再属于原流路。如 2007 年的自然出汉,由于出汉点在清 7 (大约潮区界位置)以下 13 km,一开始就为清 8 出汉流路的一次自然分汉,下一次洪水有可能再一次分汉夺流消失,但由于近年来水枯沙少,该自然分汉已行河虽然超过 10 a,但河口延伸发育并不大,2016—2017 年还短暂夺东汉口入海,但 2018 年主流又回归北口门,其作用是发育了清 8 出汉流路叶瓣,因此其仍然划分为 1996 出汉流路范畴,不属于一条新的出汉流路。

黄河下游悬河自东汉时期就已经形成,黄河改道机制比较固定。而黄河河口尾闾段流路改道发生了一个十分有趣的现象:每一次河口尾闾从行河初期到行河末期都再现由地下河到悬河的演变进程,如图 3 显示了刁口河流路改道顶点附近罗 5 断面 1964—1976 年地下河到悬河的自然演变进程。

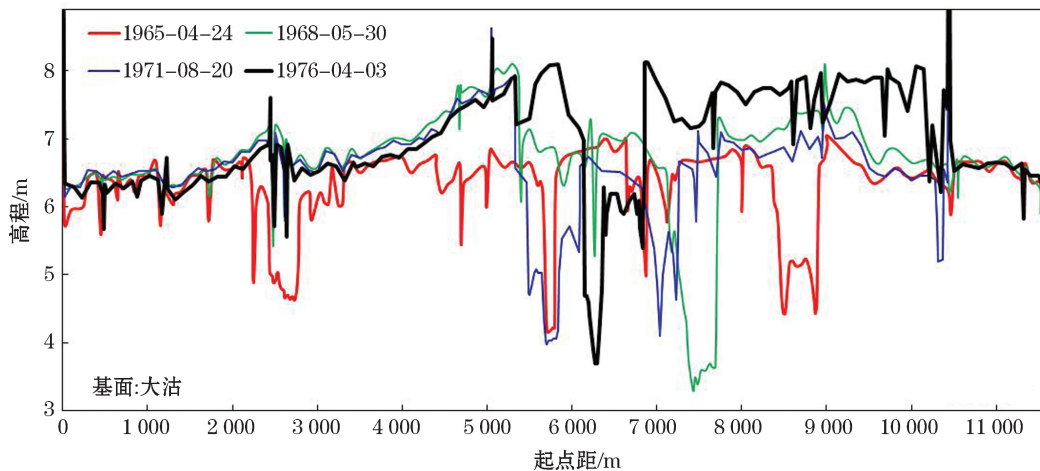


图 3 1964—1976 年刁口河流路罗 5 断面比较(位置见图 4)

Fig.3 Comparison of L5 cross-sections of the Diaokou River channel in the period from 1964 to 1976 (see Fig.4 for the location)

图 3 中还揭示了黄河河口尾闾悬河改道机制重要特性。黄河尾闾流路中期后开始发育为弯曲性淤滩型悬河河道,弯道水流的运动规律使凹岸成为决口险点;弯道环流裁穿无约束悬河河岸导致河口尾闾周期性改道。河道弯段水流特性,不断凹冲凸淤,在地下河导致裁弯取直,但在地上悬河致使水流裁穿凹岸以致大堤决口。这也是几千年来黄河下游河道所有大堤决口的根本原因,从河道治理来讲薄弱的河道凹岸险点即是大堤修防重点。

2.2 三角洲演进过程

每一条流路河口的自然分汉及形成的叶瓣组成一个陆上潮滩三角洲。流路行河过程中一般一次大洪水就会产生一次或多次自然出汉或分汉过程,因此一年中如有多次大洪水,就会有多次自然出汉^[8]。而流路行河年限历史上平均为 10 a,而每条流路 10 a 行河过程中有多次出汉、分汉摆动范围的叠加形成了一条流路的陆上三角洲^[9]。尾闾的出汉一般沿着初始微弱潮沟进行,潮沟的发育由径流漫流自上而下撕裂冲刷型,也有潮流自下而上撕裂冲刷深潮滩发育型,更多的是径流漫流与潮流双向撕裂冲刷型。沟汉的撕裂促使叶瓣发育,其机制过程对河口具有重要影响。

每一个入海河口主流在水下发生摆动,形成水下三角洲。现场观测发现^[10],调水调沙期间的河口入海主流并不是稳定在一个固定流向上,而是随洪峰、潮流和地形影响在水下发生摆动,形成水下三角洲。导致主流摆动的原因大致有 2 个方面: 1) 短时间内河口主流与河口地形的强烈互动,河口拦门沙区域地形的快速变化,形成水深较浅的拦门沙坎群导致河口主流不稳定,不断摆动以寻找入海最为通畅的路径; 2) 洪水入海期间河口径流量有可能发生快速变化,不同流量导致不同的水力半径,影响河口冲淡水主流轴线方向变化。而主流随洪峰与地形、潮流的变化在水下的摆动又形成了水下三角洲。

黄河河口就是三角洲流路不断演进的过程。一条流路往往由一次改道或大的人工出汉产生,而以同一顶点不同方向组成的多条改道或出汉入海就组成一个出汉流路三角洲体系。因此,黄河河口尾闾的改道、出汉与主流摆动构成了河口演变的基本过程。不仅涵盖了 1855 年以来近代黄河三角洲 11 次尾闾改道、50 多条出汉流路、无数次主流摆动的综合影响,也涵盖禹河以来以孟津为零级顶点北抵津沽、南达江淮所有黄河流路变化形成的黄淮海冲积平原的历史过程。

2.3 近现代黄河多级三角洲的认识与划分

1855 年以来黄河铜瓦厢改道入渤海至今形成了近现代黄河三角洲(图 4,表 1)。其中,1855—1938 年以宁海为顶点的 7 次改道形成第一级三角洲;1953 年以来三角洲顶点下移至渔洼,3 次大的流路改道(1953—1964 年神仙沟流路,1964—1976 年刁口河流路,1976 年以来清水沟流路)形成第二级三角洲;1988 年以来主河道截支强干、1996 清 8 人工出汉流路,规划北汉以及后续 2~4 条人工出汉流路将形成以清 8 为顶点的第三级三角洲^[8]。黄河三角洲总体呈行河流路河口海岸淤进、废弃流路河口海岸蚀退的三角洲演变格局^[11]。

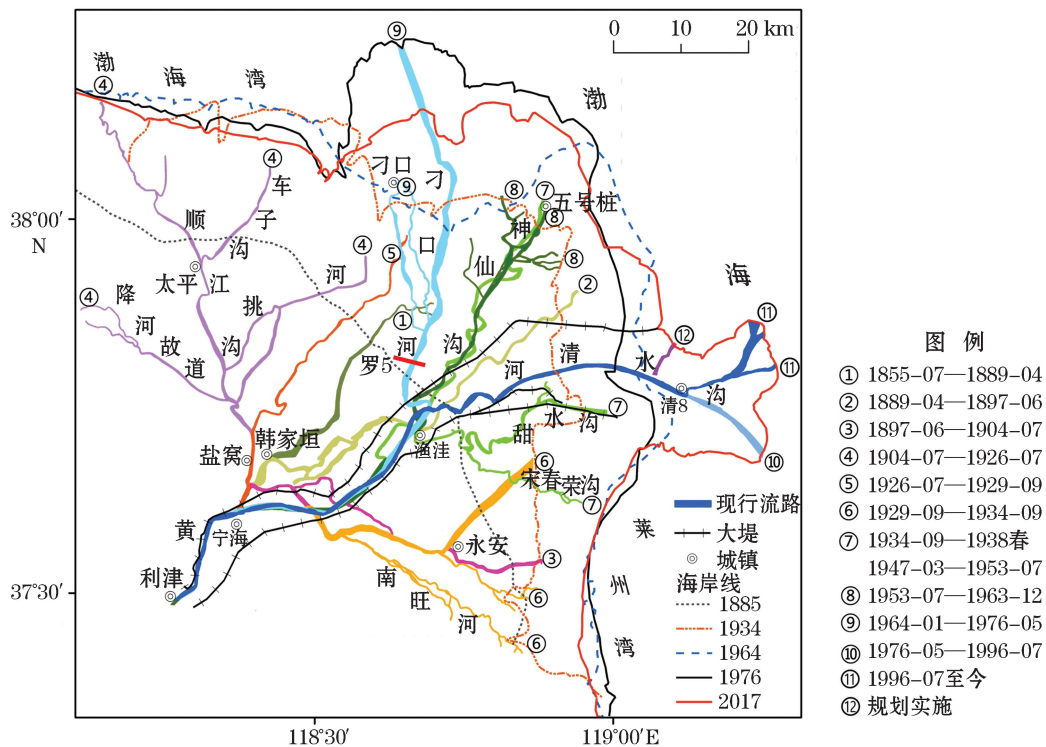


图 4 1855 年以来黄河宁海—渔洼—清 8 三级三角洲流路变迁

Fig.4 Channel migrations in the three staged deltas, i.e. the Ninghai-Yuwa-Q8 deltas, in the area of the Yellow River Estuary since 1855

表 1 近现代黄河口多级三角洲的划分
Table 1 Division of multi-staged deltas in the modern Yellow River Estuary

三角洲分级	海岸范围	顶 点	河长/km	河口流路	使用年限/a	淤海造陆速度 /(km ² ·a ⁻¹)	造陆面积 /km ²
第一级 近代三角洲	以宁海为半径的渤海海岸最大的范围	宁海	70~100	1855—1938 年期间 7 次自然改道	83	23.6	1 510
第二级 近现代三角洲	占用第一级三角洲中部 1/3 岸线	渔洼	50~60	1953—1988 年神仙沟、刁口河、清水沟 3 次人工改道	35	22.1	841
第三级 出汉流路三角洲	人工出汉摆动点在第一级三角洲海岸上;摆动点以上河道可规划预留及开发;摆动点以下三角洲自然保护区,可自然摆动行河	清 7—清 8	20~30	清水沟延伸河道、清 8 出汉、规划北汉以及其他 3~5 条人工出汉	约 100	9.5(1988—2001)	
		刁口河流路湖区界桩埋路		刁口河主干河道与 4~6 条规划人工出汉流路		3.8(2001—2015)	
		马新河远期预备流路湖区界		马新河主干河道与规划 4~6 条人工出汉流路		-2.6(2015—2017)	
		十八户远期预备流路湖区界		十八户主干河道与规划 4~6 条人工出汉流路			

注:空白表示无数据

其中,第三级出汉流路三角洲目前可以安排清水沟第三级三角洲、刁口河预备流路第三级三角洲,远期可以规划马新河、十八户两个远期预备流路第三级三角洲河口行河。将来数百年后整个三角洲海岸整体行河一遍后,还可以在新的海岸上再一次规划使用人工出汉流路三角洲,这样形成了多级三角洲河口依次使用或并行使用的局面。

历史上黄河下游河道变迁的范围,大致北到海河,南达江淮。据历史文献记载,黄河下游决口泛滥 1 500 余次,禹河东出以来数十次较大的改道形成 10 次较大三角洲体系。较远的体系统计较复杂,较近 1128-11 东京留守杜充决开黄河南堤御敌,黄河从此南泛夺淮入海,大致 700 a 间淤积 7 000 km² 海岸平均延伸 70 km,是 1855 年铜瓦厢改道前的第 9 次黄河河口三角洲体系^[5]。统计历史上前 9 次三角洲体系全部由第一级自然改道或少量第二级人工改道形成,河口一直处于未开发状态。只有 1855 年至今的第 10 次三角洲体系经历了三级三角洲的三级过程,并且在目前河口开发大势环境下第三级三角洲将是更长时期的状态过程。

3 人工出汉流路三角洲体系认识与使用的战略意义

3.1 人工出汉流路三角洲体系的认识

自然改道形成的第一级三角洲时期,正处于中国近代史的清末民国乱世,利津以下无任何民埝官埝。这一时期发生的改道 30 余次,较大的统计数以宁海附近为摆动点有 7 条,全部属于自然改道流路,1855—1938 年实际行水 63 a。这一阶段的显著特点是三角洲处于原始状态,河口尾闾没有修防,人迹罕至,河口流路在自然状态下横扫三角洲,基本可作为自然规律的反映。因此,该时期以宁海为顶点的 7 次流路全部是自然改道流路,展现了河口流路自然演变状态。但因缺乏观测数据,无法准确还原河口的最自然状态变化。

人工改道形成的第二级三角洲时期,正值胜利油田 1960 年开始的会战开发,以及 1983 年东营市建市,黄河三角洲进入了初期有序规划开发时期,因此人工控制顶点下移到渔洼附近,历时 30 余 a,实际行水 36 a。这期间除流路第一个环节为人工干预措施成功地进行一系列改道外,流路行河期间均处于自然演变状

态,而这时国家河口水文、滨海区观测工作的建立,取得了连续性的、宝贵的河口变迁演变监测资料,庞家珍等^[7]还归纳出了“具体到每一条流路,黄河河口尾间变迁又基本遵循着淤积、延伸、分汉、改道的自然条件下单循环演变规律”。

人工出汉形成的第三级三角洲时期,黄河三角洲开发建设进入了精准规划高速全面发展的新时期,特别是1983年东营市建市以后,黄河三角洲的开发已列入国家、山东省发展战略规划。黄河河口尾间的长期稳定对于三角洲地区的油地开发、国家基础重点建设等具有重要的意义。因此,1988—1992年实施的疏浚试验工程致使河口强力延伸算为清8第三代三角洲的第一条主干河道,再加上1996年清8出汉流路、规划北汉以及后续规划行河的3~5条人工出汉流路,将共同组成清8附近为顶点的人工出汉流路的第三级三角洲。

出汉流路三角洲,即第三级三角洲全部是由围绕同一顶点的数条人工出汉流路组成。人工出汉顶点在潮区界上界,该位置以上是主干河道或预备流路,可以精准规划长期使用,出汉点以下数条人工汉道的使用年限代表着一条出汉流路三角洲的行水年限。由于日益受限的三角洲海岸资源以及三角洲水网、路网、电网等经济格局的影响,现行河口与刁口河等预备流路以及远期规划马新河、十八户的使用都需要人工出汉流路三角洲的精准规划设计使用。

鉴于流路的频繁改道泛滥对社会经济破坏巨大,三角洲的开发规划已无法承受潮区界以上的任何频繁自然或人工改道。如果现有自然海岸第三级人工出汉流路三角洲整体延伸一遍后,也只能再次用人工出汉流路三角洲的形态进行第四级延伸。只要黄河仍是多沙河口,每条流路都具有一定的行水年限,河口摆动以至于发生溯源淤积自然决口改道仍具有可能性,这时人工出汉安排新流路就是自然规律的需求与反应。因此人工出汉流路三角洲将是近现代多级三角洲演变到新情势下现代黄河口的重要长期使用模式。

3.2 人工出汉流路三角洲使用的战略意义

人工出汉流路三角洲的使用对河口治理以及三角洲开发具有不可替代的重大作用,需要从战略上重视并纳入长期河口研究规划。

1)人工出汉流路三角洲的使用可以科学精准规划使用海岸线资源。反之,日益受限的海岸资源也需要精准安排出汉流路三角洲。出汉流路三角洲体系行水年限长。自1988年起清8出汉流路三角洲有85~100余a的行水年限。远期多级三角洲行河形成的河口远期规划流路行水年限将不可限量。

2)人工出汉流路三角洲的规划有利于整个黄河三角洲社会经济生态的持续发展。清晰界定黄河行河与经济发展对三角洲土地的分属,保持黄河河口尾间出汉摆动属性。潮区界出汉点以上主干河道两侧都是安全稳定国土环境,不影响水网、电网、路网等经济格局;出汉点以下三角洲区域是可以自然行河的保护区湿地,不仅满足三角洲流路恣肆泛滥行河,而且可以形成我国沿海非常重要的湿地生态自然保护区。

3)人工出汉流路三角洲的发育可以长期维持黄河河口的健康自然生命。黄河尾间摆动是河口几千年来天性,要保障黄河河口的健康自然生命,须为黄河河口尾间留出一块可以摆动的出汉、自由泛滥空间。

4)人工出汉流路三角洲体系的深入认识对稳定黄河口流路、保护预备流路具有重要的价值。黄河预备流路启动使用代价巨大,不能轻易启用,但要坚决保护。刁口河流路启动至少需要数百亿资金。需要两岸大堤修建,高速公路桥、铁路桥、公路桥、浮桥基础重建,树木、耕地、民居等赔偿,水网、电网格局重建,开挖河槽扩展基本行洪能力的工程费用等。其他远期流路如马新河、十八户预备流路启动可能需要近千亿经费,代价则更大。

4 结 语

通过梳理研究提出了河口尾间人工出汉流路三角洲体系,及其对黄河口流路稳定治理的重要战略意义。然而,新情势下黄河河口演变新的规律还有待进一步揭示和探索,如沟汉撕裂发育过程与出汉的关系,河口

拦门沙与主流摆动机制联系,潮区界以及口门段切变锋的深入观测,以及出汊流路行水年限的准确计算等。特别是其他情势下河口演变新的模式仍需要进一步探讨:1)未来黄河泥沙治理“黄河清”情势下河口演变模式;2)黄河三角洲强力工程控导模式下河口单一流路控导与多流路轮替或同时行河模式;3)基于河口海洋生态调度的洪水调控到春季运用的模式等。

目前,黄河入海水沙情势发生了显著变异,由少水多沙向枯水少沙转变^[12],黄河河口流路变迁也相应发生了重大变化。河口流路由过去平均 10 a 一改道,转变为潮区界以上河道需要长期稳定;96 清 8 出汊流路是黄河口治理史上首次人工出汊流路,如同莱茵河三角洲汊道工程、密西西比河西南汊道工程等发挥的骨干工程作用一样,黄河 96 清 8 出汊工程 22 a 的成功实践运行,开启了黄河河口出汊流路三角洲这一新时期河口演变进程。随着河口精细治理研究开发的需要以及水沙等新情势变化,河口流路演变机制必然从过去的大改道(自然或人工)机制,改变为潮区界位置规划人工出汊形成人工出汊流路三角洲。人工出汊流路三角洲体系研究符合基于自然过程的三角洲治理新模式。

参考文献 (References):

- [1] ZHENG S, WU B S, WANG K R, et al. Evolution of the Yellow River Delta, China: impacts of channel avulsion and progradation[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2017, 32: 34-44.
- [2] WANG K R, RU Y Y, WANG K C. Research and management of the Yellow River Estuary[M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2007. 王开荣, 茹玉英, 王恺忱. 黄河口研究及治理[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2007.
- [3] XU C L, LI J P, LI G X. Evolution processes and mechanism of the Yellow River Delta and its delta channel[J]. *Yellow River*, 2013, 35(4): 3-5. 徐丛亮, 李金萍, 李广雪, 等. 黄河河口尾闾与三角洲演变过程机制解析[J]. *人民黄河*, 2013, 35(4): 3-5.
- [4] SLINGERLAND R L, SMITH N D. River avulsions and their deposits[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2004, 32(1): 257-285.
- [5] Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources. Overview of the Yellow River[EB/OL]. (2011-08-04)[2018-06-01]. http://www.yellowriver.gov.cn/hhyl/hhgk/hd/ls/201108/t20110814_103446.html. 水利部黄河水利委员会. 黄河概况[EB/OL]. (2011-08-04)[2018-06-01]. http://www.yellowriver.gov.cn/hhyl/hhgk/hd/ls/201108/t20110814_103446.html.
- [6] GU Y Z, JIANG M X, XU C L. The impact on the project of the Yellow River estuary Qing 8 and its influence on estuary evolution[J]. *Journal of Sediment Research*, 2000(5): 57-61. 谷源泽, 姜明星, 徐丛亮, 等. 黄河口清 8 出汊工程的作用及对河口演变的影响[J]. *泥沙研究*, 2000(5): 57-61.
- [7] PANG J Z, SI S H. Fluvial process of the Huanghe River estuary II: Hydrographical character and the region of sediment silting[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1980, 11(4): 3-8. 庞家珍, 司书亨. 黄河河口演变 II——河口水文特征及泥沙淤积分布[J]. *海洋与湖沼*, 1980, 11(4): 3-8.
- [8] XU C L, HAO X W, ZHAO Y F, et al. Natural bifurcation mechanism and its implication of Qing 8 channel in the Yellow River Mouth [J]. *Yellow River*, 2007, 29(4): 1-4. 徐丛亮, 郝喜旺, 赵艳芳, 等. 清 8 出汊流路首次自然分汊摆动机理与启示[J]. *人民黄河*, 2007, 29(4): 1-4.
- [9] GU Y Z, XU C L, YUAN D L, et al. The complex cycle evolution of the Yellow River estuary and its management[J]. *Yellow River*, 2001, 23(Suppl 1): 28-29. 谷源泽, 徐丛亮, 袁东良, 等. 黄河河口复循环演变及该时期河口治理的特点[J]. *人民黄河*, 2001, 23(增刊 1): 28-29.
- [10] WANG H J, YANG Z S, BI N S, et al. The rapid swing of mainstream into the sea during the water and sediment regulation of Yellow River in 2005[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(23): 2656-2662. 王厚杰, 杨作升, 毕乃双, 等. 2005 年黄河调水调沙期间河口入海主流的快速摆动[J]. *科学通报*, 2005, 50(23): 2656-2662.
- [11] CHEN S L, ZHANG G A, GU G C. Mechanism of heavy coastal erosion on Yellow River Delta and its countermeasures[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35(7): 1-7. 陈沈良, 张国安, 谷国传. 黄河三角洲海岸强侵蚀机理及治理对策. *水利学报*[J]. 2004, 35(7): 1-7.
- [12] HU C H, CAO W H. Variation, regulation and control of flow and sediment in the Yellow River estuary II: regulation countermeasures [J]. *Journal of Sediment Research*, 2003(5): 9-14. 胡春宏, 曹文洪. 黄河口水沙变异与调控 II——黄河口治理方向与措施[J]. *泥沙研究*, 2003(5): 9-14.

Evolution Mode of Channel Bifurcation Delta System at the Yellow River Estuary Under the New Situation

XU Cong-liang¹, CHEN Shen-liang², CHEN Jun-qing¹

(1. *Institute of the Yellow River Estuary and Coast Science*, Dongying 257000, China;

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

Abstract: The modern Yellow River Delta is deposited rapidly and has experienced three stages and 11 times of major avulsions since 1855. The mechanisms of influencing the avulsions, bifurcating and swings of river channel are analyzed and three stages of the channel delta evolution are divided based on the different properties of the natural avulsion, the artificial avulsion and the tail-channel bifurcation. Channel Q8 was the first artificially bifurcated channel at the Yellow River Estuary in 1996. From 1988 to the present, the third stage channel bifurcation delta system which takes Q8 as its apex has been formed by artificially or naturally bifurcating. Each of the artificial channel bifurcation delta systems will have a life span of development over a century under the new situation, which can ensure the long-term stability of the channels above the tidal zone. The artificial channel bifurcation delta system is the important evolution mode of multi-stage deltas present at the Yellow River Estuary under the new situation. The understanding and application of such delta systems will be of great strategic significance for future accurate arrangement and long-term stability of the river courses in the area of the Yellow River Estuary, as well as for saving increasingly restricted coastal resources, optimizing port layout and keeping healthy natural life of the river estuary.

Key words: Yellow River Estuary; river avulsion; bifurcation delta; evolution mechanism

Received: June 8, 2018