

● 白玉川 著

河口泥沙运动力学

Hekou Nisha Yundong lixue



TIANJIN UNIVERSITY PRESS

河口泥沙运动力学

白玉川 著



内 容 简 介

本书介绍了河口泥沙运动力学的核心研究内容和前沿问题。全书共 14 章,内容包括绪论、河口泥沙特性及分类、河口黏性泥沙沉降规律、河口泥沙的固结与流变特性、河口泥沙起动规律与河床稳定条件、河口推移质输沙及床面形态判别、河口振荡流理论模式、振荡流作用下推移质运动过程非线性动力学特性、河口淤泥运动特性、河口潮汐动力与潮流作用下泥沙运动、河口波浪掀沙规律与波浪作用下的泥沙运动、河口外延海区波浪掀沙及沿海泥沙的运动、台风浪作用下的河口泥沙运动及航道骤淤以及海底沙波的形成和运移规律。本书构建了河口泥沙运动力学的基本理论体系,由浅入深,力求做到通俗易懂。

本书可供河流与治河工程、港口海岸与近海工程、海洋工程、环境工程及其他相关专业本科高年级学生和研究生学习之用,也可供从事以上专业的工程技术人员参考之用。

图书在版编目(CIP)数据

河口泥沙运动力学/白玉川著. —天津:天津大学出版社,2011.7

ISBN 978 - 7 - 5618 - 3990 - 4

I. ①河… II. ①白… III. ①河口 - 泥沙运动 - 流体动力学 IV. ①TV142

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 150920 号

出版发行 天津大学出版社

出 版 人 杨欢

地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)

电 话 发行部:022—27403647 邮购部:022—27402742

网 址 www.tjup.com

印 刷 廊坊长虹印刷有限公司

经 销 全国各地新华书店

开 本 185mm × 260mm

印 张 15.5

字 数 387 千

版 次 2011 年 8 月第 1 版

印 次 2011 年 8 月第 1 次

印 数 1 - 2000

定 价 32.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

前 言

我国海岸线长一万二千多千米。北起鸭绿江、辽河、海河、黄河,经中部长江、钱塘江、闽江,直至南部的韩江、珠江等,在这广阔的地域内,大中型入海河流达数十条。各河口均存在不同程度的泥沙淤积问题。我国近年沿海地区经济建设的发展,诸如,长江口深水航道建设、天津滨海新区建设、渤海湾大规模围海造陆等,都对河口泥沙研究提出了新的挑战。王光谦院士在 2005 年全国泥沙基本理论学术讨论会上,对传统泥沙研究也提出“上岸”与“下海”的拓展要求。

河口地区是河流终段,是河流与海洋的交接过渡地段,是海陆交互地区,其位置重要,环境特殊。泥沙运动是海岸河口地区一种重要的自然现象。泥沙运动的结果会产生岸滩冲刷、淤积、岸线变形、港口航道淤积、防波堤等建筑物根底部淘刷等问题。这些问题也是海岸河口地区海岸工程、港口航道工程建设所必须考虑和解决的问题。

河口泥沙运动力学是河口动力学和河口动力演变学的重要组成部分和核心研究内容。本书内容包括三个方面。①河口泥沙来源与性质,特别是河口泥沙的群体特性,与河流泥沙(无黏性泥沙)相比,床面泥沙粒径不再是控制泥沙的可动性和输移能力的主要因素,河口黏性泥沙混合物整体性质是确定与控制泥沙主要特性的因素,如河口细颗粒泥沙的颗粒特性、河口细颗粒泥沙的群体特性、河口细颗粒泥沙的理化特性等。②河口泥沙运动规律,包括河口泥沙冲刷、输运、沉降、固结等运动过程中的规律。③河口泥沙研究的前沿问题探讨,如河口河床稳定条件、河口外延海区波浪掀沙与沿岸输沙运动、台风浪作用下的河口泥沙运动及航道骤淤计算、河口外延陆架海底沙波形成机理等。

自 20 世纪 90 年代初,本书作者师从周恒教授、王尚毅教授、顾元棣教授、韩其为教授等,学习流体力学、泥沙运动理论、泥沙数学模型等专业知识,从事河口泥沙研究工作。通过学习整理、工程实践和科研项目积累,逐步完善了河口泥沙运动力学理论体系。

在研究和撰写过程中,得到国家重点基础研究发展计划(973 计划,课题编号:2007CB714101)和国家自然科学基金项目(课题编号:40376028、49776045)的资助,也得到了天津大学水利工程国家一级重点学科学术带头人钟登华院士的关怀,书中参考了一些兄弟院校和科研单位的最新优秀研究成果,在此一并致以谢意。

本书可作为水力学及河流动力学、港口海岸及近海工程、海洋科学与工程、自然地理等有关专业研究生的教材和教学参考书,亦可作为与上述专业有关的设计、科研和教学人员的参考书。

白玉川
2011 年 5 月

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 河口分类与河口水沙动力过程	(1)
1.2 河口泥沙运动的特点	(6)
1.3 河口水文现象及其物理过程	(7)
1.4 河口泥沙运动力学的研究内容	(7)
参考文献	(8)
第2章 河口泥沙特性及分类	(9)
2.1 河口细颗粒泥沙的颗粒特性	(9)
2.2 河口细颗粒泥沙的群体特性	(12)
2.3 河口细颗粒泥沙的物理与生化过程	(19)
2.4 河口淤泥与污染物的关系	(21)
2.5 河口淤泥和浮泥的划分标准	(22)
参考文献	(24)
第3章 河口黏性泥沙沉降规律	(26)
3.1 河口浑水的性质	(26)
3.2 河口单一细颗粒泥沙在静水中的沉降	(27)
3.3 河口群体细颗粒泥沙在静水中的沉降	(30)
3.4 河口细颗粒泥沙的絮凝	(34)
3.5 影响细颗粒泥沙静水沉降的因素	(37)
参考文献	(45)
第4章 河口泥沙的固结与流变特性	(46)
4.1 河口淤泥结构及其最大孔隙率	(46)
4.2 河口细颗粒泥沙的固结特性	(49)
4.3 河口淤泥的流变特性	(51)
4.4 河口黏性泥沙非牛顿流体理论模型	(65)
参考文献	(67)
第5章 河口泥沙起动规律与河床稳定条件	(68)
5.1 塑性与固性河床的定义	(68)
5.2 河口固性床面泥沙起动规律	(69)
5.3 河口淤泥起动实验	(72)
5.4 固性床面的抗冲引力	(78)
5.5 塑性床面的抗冲引力	(79)
5.6 床面的不冲条件	(82)
5.7 床面的不淤条件	(82)
5.8 河口河床稳定性指标	(83)

5.9 河床稳定性指标的实测资料验证	(83)
参考文献	(85)
第6章 河口推移质输沙及床面形态判别	(87)
6.1 接触型(滚动、滑动、层移)推移质泥沙受力模型	(87)
6.2 接触型推移质运动的动力学方程	(88)
6.3 河口推移质运动过程的非线性动力学特性分析	(92)
6.4 接触型推移质动力机理及平衡输沙方程	(98)
6.5 推移质泥沙运动状态的分析	(102)
6.6 关于推移运动特性的一些结论	(109)
参考文献	(110)
第7章 河口振荡流理论模式	(111)
7.1 河口动力基本方程	(111)
7.2 河口边界层量级分析	(112)
7.3 河口振荡流边界层流速	(114)
参考文献	(118)
第8章 振荡流作用下推移质运动过程非线性动力学特性	(119)
8.1 振荡流作用下散体海床面临界运动分析及泥沙起动希尔兹曲线的确定	(119)
8.2 散体海床面动力系统的不动点讨论及平衡情况下推移质运动特性分析	(126)
参考文献	(132)
第9章 河口淤泥运动特性	(133)
9.1 作用于河口淤泥动力条件的概化	(133)
9.2 淤泥的冲刷	(140)
9.3 泥的悬浮	(145)
9.4 浮泥的输运	(146)
参考文献	(149)
第10章 河口潮汐动力与潮流作用下泥沙运动	(150)
10.1 潮汐	(150)
10.2 平衡潮理论	(154)
10.3 潮流	(158)
10.4 潮汐河口输沙平衡方程	(159)
10.5 潮汐河口悬移质紊动扩散方程	(160)
10.6 推移质输沙方程	(161)
10.7 潮汐河口浮泥运动方程	(164)
10.8 潮汐河口河床演变方程	(165)
参考文献	(166)
第11章 河口波浪掀沙规律与波浪作用下的泥沙运动	(167)
11.1 波浪作用下的泥沙运动	(167)
11.2 波浪作用下的悬移质输移	(171)
11.3 波浪作用下的底沙输送	(172)

11.4 波流共同作用下的底沙输移·····	(175)
参考文献·····	(176)
第12章 河口外延海区波浪掀沙与沿海泥沙的运动 ·····	(178)
12.1 波浪掀沙·····	(178)
12.2 波浪平衡挟沙模型·····	(185)
12.3 波浪不平衡挟沙模型·····	(191)
12.4 沿海泥沙运动概述·····	(194)
12.5 海滩剖面及泥沙横向运动·····	(194)
12.6 沿岸流及沿岸输沙·····	(201)
参考文献·····	(212)
第13章 台风浪作用下的河口泥沙运动及航道骤淤 ·····	(213)
13.1 风浪的载沙能力·····	(214)
13.2 平衡假设条件下风浪输沙率及挟沙能力·····	(221)
13.3 风浪作用下河口泥沙骤淤机理分析·····	(223)
13.4 风浪作用下黄骅港泥沙运动规律及航道骤淤成因分析和骤淤计算·····	(226)
13.5 风浪作用下含沙浓度沿水深分布的验证·····	(228)
参考文献·····	(232)
第14章 海底沙波的形成和运移规律 ·····	(234)
14.1 沙波概述·····	(234)
14.2 准共振界面波理论·····	(235)
14.3 沙波形态及运移规律的计算·····	(236)
14.4 实验数据验证·····	(238)
参考文献·····	(239)

第 1 章 绪 论

广义的河口是指河流的终段,是河流和受水体的接合地段。就入海河口而言,河口是河流与海洋交接的过渡地段,与海洋自由连通。在河口地段河水被上溯的海水所咸化,海水则被陆域来河水所冲淡,构成一咸淡混掺的区域。河口地理位置重要,自然环境特殊,很早就引起了人类的关注,公元前 5 世纪古希腊就有许多有关河口的记载。

中国入海河口众多且类型复杂,自 1950 年以来,围绕河口开发和治理,我国学者对长江、黄河、珠江、钱塘江等巨江大河的河口,进行了较系统的现场调研、室内模型实验和深入的科学理论分析。

1.1 河口分类与河口水沙动力过程

1.1.1 河口的定义与分类

广义河口泛指河流与其受水区域交叉地段。本书主要探讨入海河口。它是陆域与海洋的重要物质通道,在自然地理环境演化及人类社会方面,入海河口区域起着重要的作用。随着人类社会经济发展对滨海区域开发的需要以及河口海岸学科自身的发展要求,迫切需要对入海河口分类有清晰的概念。

现代河口的分类是以河口河床演变为依据。河口河床演变是由来水来沙不平衡所引起的,许多研究工作者都试图用径流、潮流及其含沙量为指标,进行河口类型的划分。

河口水流是由径流和潮流共同组成的,为周期性往复非恒定水流,径流有洪枯季的变化,潮流有大小潮汛的区别。大潮汛,河口外低潮潮位降得很低,排水排沙量较大;小潮汛,河口外低潮潮位降低较小,排水排沙量也小。一般河口都有小潮汛储水储沙,大潮汛排水排沙的情况。当洪峰下泄遇小潮汛时,往往历时数日才能把洪水泄出;当多年平均径流量下泄,又与多年平均涨潮量相遇时,则一个全潮内进入河口区的径流量和涨潮量在落潮时可以全部泄出。因此,以多年平均径流量和多年平均涨潮量之比,来描述河口径流与潮流的强弱是比较合理的。

此外,影响河口河床冲淤演变的主要因素,除径流的大小、潮流的强弱外,还有径流与潮流含沙量的高低,所以划分河口类型要从水流和泥沙两个方面来综合考虑。

我国著名河口学者黄胜教授指出,采用咸淡水混合类型作为我国河口的分类方法,比较符合我国河口的实际情况。根据我国 20 个河口的资料,在对径流与潮流、流域来沙与海域来沙进行综合分析的基础上,可确定分类指标进行分类。

根据注入河口的径流量和潮水量之比,引入 Simmons 混合参数

$$M = \frac{\text{径流量}}{\text{潮流量}} = \frac{Q_m T}{Q'_m T'} \quad (1-1)$$

式中: Q_m 为多年平均径流量, Q'_m 为多年平均涨潮平均流量, T 为全潮周期, T' 为涨潮流平均

历时。

根据注入河口的径流输沙量和潮流输沙量之比,引入另一分类指标

$$\alpha = \frac{\text{径流输沙量}}{\text{潮流输沙量}} = \frac{Q_m TS_m}{Q_m' T' S_m'} \quad (1-2)$$

式中: Q_m 、 Q_m' 、 T 、 T' 含义同前, S_m 为多年平均径流含沙量, S_m' 为涨潮流平均含沙量。

①混合指数 $M < 0.1$ 时为强混合型河口,若泥沙主要来自海域,且 $\alpha < 0.01$,则称为**强混合海相河口**。强混合型河口的潮差较大,潮流作用较强,径流作用较弱;咸淡水之间存在着强烈的掺混,因此在水平方向存在明显的密度梯度,而在垂直方向的密度梯度甚小(图 1-1(a)),如钱塘江河口。

②混合指数范围为 $0.1 < M < 0.2$ 时为缓混合型河口,若泥沙仍然以海域来沙为主,且 $0.01 < \alpha < 0.05$,则称为**缓混合海相河口**。缓混合型河口的潮流和径流作用都较强,混合程度中等,咸淡水之间不存在明显的交界面,但在水平和垂直两个方向都存在密度梯度,等盐度线似楔状向上游延伸,淡水主要从上层下泄,而底部则有咸水上溯(图 1-1(b)),如我国辽河河口。

③混合指数范围为 $0.2 < M < 1.0$ 仍属缓混合型河口,但陆相来沙增加与海相来沙共同参与造床,且 $0.05 < \alpha < 0.5$,称为**缓混合陆海双相河口**,如长江口。

④当混合指数 $M > 1.0$ 时属弱混合型河口,若泥沙主要来自流域,且 $\alpha > 0.5$,则称为**弱混合陆相河口**。弱混合型河口一般发生在潮差较小,潮流较弱,而径流较大的河口。河口咸淡水之间混合程度较低,有明显的交界面(图 1-1(c)),中国珠江口的磨刀门、美国密西西比河口西南水道都存在这种现象。我国典型的弱混合陆相河口如黄河口。

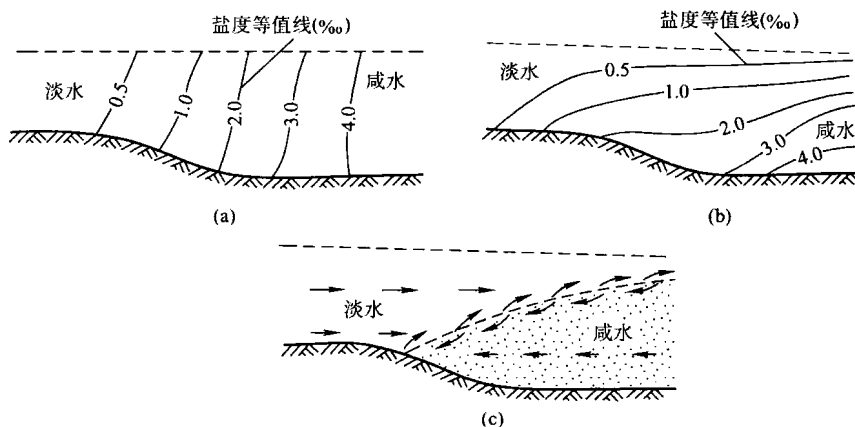


图 1-1 河口咸淡水混合类型

(a) 强混合型; (b) 缓混合型; (c) 弱混合型

除此之外,根据不同的标准,河口还有不同的分类方法。

按照河口的地质历史成因则可分为溺谷型河口、三角洲河口和峡湾型河口。溺谷型河口为第四纪最后一次冰期后,因气候转暖冰川融化,海面抬升,造成许多河谷末端淹没形成的河口;溺谷型河口在后期,由于流域泥沙来源丰富,泥沙沉积于河口区域,又逐步淤积形成三角洲河口,在拥有宽广内陆平原的海岸,溺谷型河口最多,我国多数河口属于这种类型;峡湾河口是受冰川的冲蚀而成,其横断面多呈 U 形,河口段一般有很高的门坎,是由冰川带到

河口的物质堆积而成的。峡湾河口门坎水浅,门坎以内则水很深,有的可达到 300 ~ 400 m;峡湾的顶端常有河川流入,湾内咸淡水汇合,具有河口特征;在门坎很高的情况下,峡湾下部水体长期处于停滞状态。有些峡湾河口在口外存在一系列沙岛,径流和潮流从沙岛的缺口进出,沙岛之内为与海洋平行的狭长水域,往往不只一条河流流入,这些河流的流域一般均不太大,它们的下游由于洋面上升而被淹没,因此也可认为是一种复合河口,即部分是由沙岛包围的外湾,部分是溺谷河口。沙岛内的水域通常比较宽浅,且潮差不大。我国大清河河口外有一系列沙岛,有几条小河同时流入外湾,属于沙岛河口。

在三角洲河口范畴内,按照影响河口的主要作用动力可分为河流作用优势型河口、潮汐作用优势型河口和波浪作用优势型河口;按照盐度分布和水流特性,可分为高度分层型河口、部分混合型河口和均匀混合型河口;按照潮汐的大小,可分为强潮型河口、中潮型河口、弱潮型河口和无潮型河口等。

1.1.2 河口的分段

河口动力过程以河口泥沙运动为基础,可分为河口弱动力过程和河口强动力过程。河口弱动力过程主要是指微观尺度上海底沙波的演变,而河口强动力过程主要是指河口区域河床的大幅度发展演变及河口的改道。

河口河床演变是指河口水流与河床相互作用下的河口河床变化过程,这种变化是通过河口泥沙运动来完成的。挟沙水流情势决定河口泥沙的动态,引起河口河床的冲刷和淤积,使河床形态发生变化;河口河床发生变化又会影响河口挟沙水流的情势。根据河口动力条件和地貌形态的差异,一般把河口分为河流近口段、河流河口段和口外海滨段。河流近口段以河流特性为主;口外海滨段以海洋特性为主;河流河口段则由于河流因素和海洋因素强弱交替相互作用,兼具二者性质。

1. 河流近河口段的河床演变

河流近河口段是指潮区界与潮流界之间的河段。其特点是潮汐作用主要体现在水位有规律地周期性涨落,但水流方向始终指向下游。近口段河床演变主要表现为,除山区性河口河线受基岩控制不能充分发育外,在冲积平原上的河流近河口段,河线蜿蜒曲折,特别是缓混合型陆海双相河口,因流域来水量丰沛,河流近口段弯曲尤为显著。河线趋弯,河岸容易崩塌,这是河流近口段河床演变的特点。

2. 河流河口段的河床演变

河流河口段是指潮流界与河口口门之间的河段。在河流河口段水流开始由单向水流转变为往复双向水流,河流开始分汊并形成水下浅滩,径流与潮流相互消长,在洪季小潮汛时以径流作用为主,枯季大潮汛时则以潮流作用为主。含沙量一方面随枯季流域来沙量大小而变,另一方面又随大小潮汛而变;在此河段内由上往下,含盐量逐渐增加。含盐量的沿程变化反应了径流与潮流两种力量强弱交替的过渡形态。水流情势发生改变,必然会对河床演变造成影响。以缓混合型河口为例,河口段河床演变的特点大体上可归纳为:沙岛和暗沙使水流分汊以及涨落潮主泓摆动汊道交替兴衰。

3. 口外海滨段的河床演变

河流河口外海滨段是指河口以外到海滨浅滩的外界为止的区域。在大陆架较窄的地区,口外海滨的下界直接与大陆坡相接,所受径流作用较弱,主要以海水作用为主,除潮流

外,还受波浪和河口附近海流的影响。

口外海滨段含沙量的变化,除了受洪枯水和大小潮动力因素的影响外,风浪对含沙量的影响也十分显著,且风浪越大,含沙量越大。此外,流域来沙中的细颗粒泥沙作为冲泻质在口外海滨段遇盐水絮凝沉降,向底层集聚,在底层上溯流作用下又向滞流点集聚,因此在滞流点附近常出现高含沙量区,称为最大浑浊带,这是形成拦门沙浅滩的原因之一。此外,当河流注入开阔的水域后,因水流扩散、流速降低,水流中携带的泥沙就会发生沉淀,时间一久便会堆积成为水下暗沙,其部位常处于河口段与口外海滨段的交接地区(即口门附近),故称之为拦门沙。拦门沙的演变规律为洪淤枯冲、位置不固定,随着洪季平均流量的大小而上下变动,洪水期平均流量越大,则拦门沙的位置越向下游移动,反之则向上游移动。此外,一些中小河口由于径流和潮流较弱,在波浪作用下会形成沿岸漂沙;与沿岸漂沙相对应,垂直于岸线的横向泥沙运动,则形成滩脊或水下沙坝,迫使入海水道转向,并使局部水道淤浅,也形成横亘河口的拦门沙,从而产生碍航区段。

1.1.3 各种类型河口产生的动力学原因

河口产生的动力因素主要是以河流(径流)动力为代表的陆地因素和以潮汐波浪因素为代表的海洋因素,不同类型河口产生的动力因素各不相同。

1. 强混合海相河口

冲积平原上的强混合海相河口,河床发育充分、河槽容积大、潮差也大,因而潮流作用甚强。在强潮作用下,咸淡水混合的河口属强混合型。河口外海滨区域受潮流冲刷形成侵蚀区,不存在常见的水下三角洲。当海相泥沙补给丰富时,泥沙会随涨潮流上溯至河口段沉积,使河床淤高形成沙坎。同样,在强潮作用下,河口段滩地与河槽冲淤交替,常出现大塌大淤,导致河槽迁徙无常;而近口段由于受沙坎顶托的影响,水深较大、底坡平缓,河床比较稳定。

山溪性强混合海相河口,河床的发育受山区地质地貌条件的限制。在潮流界以上,河床一般由沙砾或岩石组成,底坡陡,潮区界与潮流界十分接近。潮波上溯受河床阻滞、河岸约束和径流顶托作用,强烈反射,潮波变形剧烈。涨落潮最大流速都出现在中潮位附近,而沿程高低潮位也同时出现,具有驻波的性质。山溪性强混合海相河口的特征如下。

①洪水暴涨暴落,径流量变幅大。

②流域来沙以底沙为主,数量不大,以推移的形式向下游移动;而海域来沙以悬沙为主,随涨潮流进入河口而构成河口河床的主体。

中国钱塘江河口是典型的强混合型海相河口,其径流变幅达1 900倍,平均潮差达5.45 m,平均大潮进潮量约50亿 m^3 。大尖山至激浦是钱塘江河口的口外海滨段,受涨潮流的侵蚀和长江口泥沙扩散影响,涨潮平均含沙量在3~4 kg/m^3 。海域来沙远大于流域来沙,因而会在闻家堰以下形成一个长100多千米,宽达27 km,高度高出基线约10 m,体积达425亿 m^3 的庞大的沙坎。闻家堰以上至窄溪为近口段,其平均水深比河口段深5~10 m。(见图1-2)

强混合海相河口枯季在强潮作用下,口外海滨受涨潮流冲刷,泥沙在河口段以上淤积,洪季落潮流加强,河段以上落淤的泥沙受冲刷而下移。因此河床的纵向冲淤演变比较剧烈,河口段有明显的洪冲枯淤规律,而口外海滨段则为洪淤枯冲。从横向摆动来看,山溪型强混合海相河口由于受山体的约束,其摆动幅度较小,与平原型强混合海相河口是有显著的区别。

2. 缓混合海相河口

缓混合海相河口的特征是:径流经过湖泊或河网的调节,变幅甚小,潮差中等;流域来水来沙少,泥沙主要来自口外海滨;河床纵比降极其平缓,河线比较弯曲,一般进潮量和过水断面面积沿程变化不大;涨潮流速大小随浅海潮位与湖沼水位差而变,洪季湖沼水位高,进潮量和进沙量都偏小,枯季反之,故有洪季冲刷、枯季淤积的规律。当然也有例外,如中国黄浦江洪水季节因长江水位比太湖高而淤积,枯季反之。

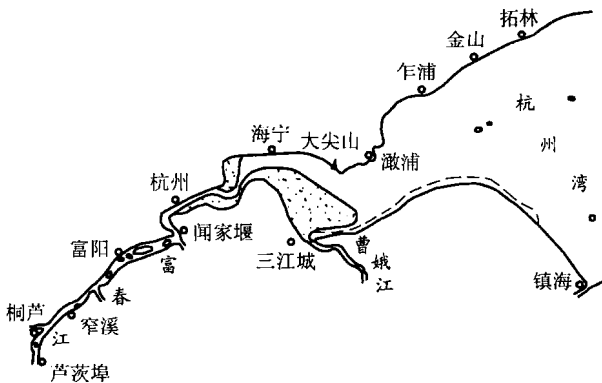


图 1-2 钱塘江河口

另外,缓混合海相河口口外沿岸漂沙或干流输沙较大,与河口落潮水流成一定交角后,流速减缓,泥沙容易落淤,形成口外拦门沙,如射阳河、黄浦江、新洋港等河口,其进潮量不大,咸水界变动范围小,涨潮流主要是淡水的回溯,河床断面沿程变化小,河床底坡平缓,潮波上溯沿程衰减和变形都很缓慢,河床的冲淤主要取决于涨落潮流速的对比。洪季上游水位较高,落潮流速大于涨潮流速,河床偏冲;枯季则相反,涨潮流速大于落潮流速,涨潮流从口外带进的泥沙亦多,河床偏淤,故河床有洪冲枯淤的规律。

3. 缓混合陆海双相河口

缓混合陆海双相河口径流和潮流相互消长,力量相当,流域来沙和海域来沙都较丰富,对河床演变均起显著作用。这种类型的河口又可分为以下两种。

①冲积平原上的陆海双相河口,其河床得到充分发育,河槽容积较大,虽然口外海滨平均潮差属于中等,但有较大的潮流量,如长江、辽河、珠江口伶仃洋等河口。基于径流与潮流不同的组合,咸淡水混合过程亦不相同,枯季大潮汛面层与底层含盐度差别不大,接近强混合,洪季小潮汛亦有可能出现短时间的分层流现象,但大部分时间是属缓混合型。

②山区性陆海双相河口,径流年内分配很不均匀,洪枯季流量变幅较大,流域来沙集中在洪季,如闽江和鸭绿江等河口。其河床的发育受到山体和基岩的限制,断面比较窄深,河床多为中细沙组成,形成犬牙交错的边滩。在河深展宽处,宽深比增加,水流分散,泥沙堆积,形成心滩和边滩;在上下边滩的过渡段,河床隆起;水深变浅,成为碍航浅滩。该类河口咸淡水混合的特点是枯季大潮汛时接近强混合,洪季小潮汛有时出现高度分层现象,但大部分时间属缓混合。海域来沙以悬沙为主,流域来沙以底沙为主。当洪峰下泄时,带来大量底沙,整个河口段的沙洲浅滩普遍发生淤积;枯水期在潮流作用下,沙洲浅滩冲刷而深槽落淤。在一年中随着季节的变化,河床有洪淤枯冲的规律。

4. 弱混合陆相河口

弱混合陆相河口的特点是:潮差较小,潮流较弱,径流相对较强,受潮汐影响的河段较短,洪季潮汐影响只在海口附近;泥沙主要来自流域,在来沙比较丰富的情况下,径流挟带的大量泥沙,往往就在口门附近淤积,使河床抬高,河床的纵剖面向上游倾斜,呈显著的倒比降。

中国黄河口是典型的弱混合陆相河口,多年平均年径流总量仅约 423 亿 m^3 ,而多年平均输沙量约 11 亿 t。黄河口潮汐弱,平均潮差仅 0.5 m,潮区界距海口 30 km 左右;大量流

域来沙在海口附近沉积,形成河口沙嘴(即水下三角洲),沙嘴以年平均 2.5 km 的速度向外延伸,沙嘴两侧水流平静,细粒悬移泥沙扩散后容易在此沉积,形成烂泥滩;海口附近河床淤高后,使河口内河床迅速溯源淤浅,当淤积发展到一定程度后,河口河床不能适应洪水的宣泄,势必改道另寻出口。黄河由江苏北部改道流入渤海湾以来,河口按淤积抬高—河道弯曲延伸—决口改道的规律发展。

1.2 河口泥沙运动的特点

1.2.1 河口泥沙来源

河口泥沙来源主要包括三个部分:

- ①由河流径流自流域带入和因河岸崩塌而被带入河口的陆相泥沙;
- ②由海水挟带随潮流上溯进入河口的海相泥沙,包括海岸带受风浪侵蚀而形成的沿岸输沙、河口入海泥沙受风浪掀动而再次随潮流进入的泥沙;
- ③河口区内由于滩槽和河床冲淤而局部搬移的泥沙。

1.2.2 河口泥沙运动特点

河口泥沙运动具有以下特点。

①频繁地悬扬和落淤。周期性往复水流的涨落过程要经历涨急、涨憩、落急和落憩,即流速由最大降低为零的阶段。在这一过程中,泥沙随着潮势的涨落,频繁地悬扬与落淤、前进或后退,与内河泥沙运动和沿海的泥沙运动相比,河口泥沙运动活跃得多。

②存在絮凝现象。在咸淡水混合过程中,径流挟带的细粒悬移泥沙,遇到含有电解质的海水,颗粒表面便形成双电层水膜,颗粒间水膜彼此黏结,进而絮凝成团,然后加速沉降,称为絮凝现象。

③产生最大浑浊带。在咸淡水密度梯度的作用下,河底某处往往出现涨落潮流速相抵,净流速接近于零的滞流点。在滞流点以上,泥沙向下游运移;在滞流点以下,泥沙向上游运移;而在滞流点附近,悬沙会聚,形成高含沙区,即最大浑浊带。底沙迂回停滞使河床淤浅,形成特有的拦门沙浅滩。

④有浮泥运动。河口外海滨和沿海地区,含沙量随风浪和潮汛的大小而变。在大风浪平息之后如遇小潮汛,则悬沙下潜,容易形成浓度较大的悬浮体,简称浮泥。浮泥在水流或自重的作用下可以流动,这是河口和沿海泥沙运动的特殊形态,亦称之为河口异重流。

⑤产生团聚现象。径流携带的微生物是河口地区海洋鱼类的主要食物。鱼类吞进浑水,分泌黏液,吸收浑水中微生物,使泥沙黏聚成团,排出体外,加速沉淀,这种现象称为团聚现象。

1.2.3 河口各河段的泥沙运动

河口泥沙运动与河口水流运动密切相关。河口各段水流情势不同,泥沙运动的情况也不相同。

①在近口段,悬移泥沙中的冲泻质不易沉降,含沙量沿垂线分布与无潮河流的情况基本一致,仍然遵循对数分布规律。但因径流受涨潮水位的顶托,流速减小,推移质泥沙的运移

速度也相应降低。

②在河口段,水流周期性往复,泥沙来回运移;但在一个涨落全潮过程中,泥沙总的运移方向是指向下游。随着涨落潮流速大小的变化,含沙量也起变化,在涨急或落急出现最大流速时,床面泥沙被掀起,悬沙含量增加。在涨憩落憩时,悬沙含量相应减少,但因含沙量适应水流的这种变化需要一个过程,因此最大含沙量的出现往往要比最大流速的出现滞后1~2 h;而最小含沙量的出现也比憩流出现时间推迟一些。河口段内悬移泥沙遇咸水后,受电化作用而絮凝沉降;同时,在咸淡水混合过程中,由于水流有分层现象,使含沙量在垂线上分布也有分层现象,含沙量的分布规律与近口段的情况显著不同。

③在口外海滨段,含沙量主要随风浪和潮汛大小而变。如大潮汛伴随大风浪,则含沙量显著增加;小潮汛的含沙量则相应减小。同时由于咸淡水混合和悬沙絮凝沉降等因素,口外海滨的泥沙运动较为复杂,且由于冲淤频繁,悬移泥沙与床面泥沙的颗粒组成差别不大。

1.3 河口水文现象及其物理过程

河口段水文现象受河流及其注入水体的影响,其水文特性有别于河流、海洋与湖泊,对河口段的防洪、航运、建港、城市给水、农田排灌、护岸围垦、油田开发及水产业生产等均有重要意义。20世纪50年代后期,国外河口水文研究已发展成河流水文学的一个分支,我国于60年代初开始,侧重对入海河口水文进行专门研究。通常所指的人海河口区,其上界是枯季大潮时咸水所及之处,下界为洪水小潮时淡水所及之处。河口水文情势受河流动力过程与海洋动力过程的双重影响,空间分布和时间变化均较复杂,主要水文现象如下。

①河口潮汐。河口潮汐是指由外海潮波向河口传播而引起的河口水位、流量的周期性升降和流动。

②河口咸水和淡水的混合及环流。由于密度的差异,河水与海水在径流潮汐和地形影响下,发生咸水和淡水的混合作用,并在交界面发生内部环流。

③河口泥沙运动。随涨落潮,河口泥沙运动十分活跃,泥沙出现频繁的悬扬和落淤。泥沙颗粒间彼此黏结而絮凝成团,产生絮凝和团聚现象。在河底形成高含沙区,沉积成特有的拦门沙浅滩;在河口的口外海滨和沿海,由悬浮细沙形成的浮泥可自由流动。

④河口河床演变。河口挟沙水流的运动引起河口河床的冲刷和淤积,使河口河床形态发生变化,因各河口上游来水来沙条件不同,潮汐和波浪的强弱各异,故不同类型的河口有各自的发育特点和演变规律。

此外,河口区化学物质的输入和输出、河口区的化学过程等,均是河口区特有的水文现象。河口水文现象的变化受河流水文特性、河口地貌、气候等自然因素及人类活动影响。河口水文研究除采用一般河流水文与海洋水文测验方法外,还应用遥感和遥测技术、同位素测定方法等。近年来,国内外利用河口数值模型与现场综合测量相结合的方法,作为研究河口水文现象及其物理过程的重要手段。

1.4 河口泥沙运动力学的研究内容

河口泥沙运动力学是河口动力学和河口动力演变学的重要组成部分和核心研究内容,

包括:

①河口泥沙的来源与性质,如探讨河口泥沙是陆源泥沙还是海相来沙及其产生的原因河口泥沙的颗粒特性及群体特性等;

②河口泥沙运动规律,包括河口泥沙冲刷、输运、沉降、固结等运动过程中的规律;

③河口泥沙研究的前沿问题探讨等。

基于以上内容,将河口泥沙研究内容划分为若干章节,努力做到通俗易懂、由浅入深,逐步加以介绍。

河口泥沙来源与特性,内容包括:河口分类、河口泥沙运动的特点,河口细颗粒泥沙的颗粒特性,河口细颗粒泥沙的群体特性,河口细颗粒泥沙的理化特性等。

河口泥沙运动规律,内容包括:河口泥沙沉降规律;河口泥沙的固结与流变规律、河口泥沙起动规律与河床稳定条件、河口推移质输沙规律、河口淤泥的运动规律、河口潮流作用下的泥沙输运、河口波浪作用下的泥沙运动、河口外延海区波浪掀沙与泥沙沿岸运动。

河口泥沙研究的前沿问题探讨,内容包括:台风浪作用下的河口泥沙运动及航道骤淤计算、河口外延陆架海底沙波形成机理等。

参考文献

- [1] GERHARD MASSELINK, MICHAEL G HUGHES. Introduction to coastal processes and geomorphology [M]. New York: Oxford University Press, 2003.
- [2] RICHARD WHITEHOUSE, RICHARD SOULSBY, W ROBERTS, et al. Dynamics of estuarine muds [M]. London: Thomas Telford Publications, 2000.
- [3] 黄胜, 卢启苗. 河口动力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [4] 严恺, 梁其荀. 海岸工程[M]. 北京: 海洋出版社, 2002.
- [5] 严恺. 中国海岸工程[M]. 南京: 河海大学出版社, 1992.
- [6] 赵今声, 赵子丹, 等. 海岸河口动力学[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
- [7] 李春初. 中国南方河口过程与演变规律[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [8] 罗肇森. 河口治理与大风骤淤[M]. 北京: 海洋出版社, 2009.

第2章 河口泥沙特性及分类

河口按其物质组成,大致可分为淤泥质河口和沙质河口。对于组成沙质河口的粗颗粒泥沙特性,在传统的《河流动力学》(张瑞瑾,武汉大学出版社,2007)、《泥沙运动力学》(钱宁、万兆惠,科学出版社,1983)等著作中均有论述,本章则主要针对组成淤泥质河口的河口细颗粒泥沙特性进行论述。

2.1 河口细颗粒泥沙的颗粒特性

河口细颗粒黏性泥沙,通常出现在河口、海湾以及潮流和波浪作用力相对较弱的大陆架区域,如中国的长江河口、黄河河口、珠江河口以及渤海湾的大部分岸边海域。在人们的概念中,淤泥通常是一种较脏的、湿软的、有黏性的深颜色物质,有时还带有难闻的气味;而沙则是一种资产,通常使人联想到黄金度假海滩的画面,如广西北海海滩、海南三亚海滩等。在这里我们以专业的角度,对海滩河口的泥沙特性作出解释和物理描述。

黏性是对淤泥特性的一种描述,通常专业上将淤泥归类为黏性泥沙。淤泥比较深的颜色和气味则是由于有机物的厌氧分解,而这种有机物通常是淤泥的主要成分。

对于沙质泥沙,即无黏性泥沙,床面泥沙粒径是控制泥沙的可动性和输移能力的主要因素;而对于黏性泥沙,混合物整体性质是确定与控制泥沙主要特性的因素。

黏性与非黏性泥沙的区分方法:按照质量来统计计算,如果泥沙中含有超过10%的细颗粒泥沙(即筛分材料细于 $63\text{ }\mu\text{m}$)就可显示出黏性特性。黏性和非黏性的简单区分方法:通过一个潮湿样品来看,如果样品是容易分开的则为无黏性泥沙;如果是黏附在一起的,则是黏性泥沙。

细颗粒泥沙特性包括泥沙的颗粒特性和群体特性,本节主要阐述其颗粒特性。组成泥沙的个别颗粒,其性质常直接或间接反映泥沙过去的历史,例如:泥沙的大小与移动介质及流动速度有关;泥沙的形状和圆度与移动介质、移动距离有关。泥沙淤积的方位决定于水流运动的方向和泥沙沉淀时的受力,表面组织则反映了泥沙受磨损的程度。

泥沙的颗粒特性包括颗粒的大小、形状、表面组织、物化特性等。

2.1.1 颗粒的大小

对于形状规则的几何体,其大小具有明确意义,测量也不困难。但是对于泥沙颗粒,由于其形状不规则,仅仅指出它们的大小是不足的,还必须说明量测所用的方法以及大小的定义,这样其结果才有实用价值。

河口泥沙颗粒大自卵石,小至黏粒,其粒径大小相差较大,因此测量颗粒大小的方法也不尽相同。

对于卵石以上的泥沙,一般直接测量其在三个正交方向的直径,求出它们的平均值。

对于卵石以下直至细沙,筛分法是常用的泥沙颗粒大小测定方法,由此所得到的结果只

能指出泥沙大小介于上下两筛孔之间,亦即只能知道大小的范围,而不知其绝对值。在这一范围内的平均尺寸,可以采用代数平均 $\left(\frac{D_1 + D_2}{2}\right)$ 计算,也可以采用几何平均 $\sqrt{D_1 D_2}$ 计算,还可以采用混合平均 $\left(\frac{D_1 + D_2 + \sqrt{D_1 D_2}}{3}\right)$ 计算。筛分法所提供的粒径,既不是泥沙颗粒的最大粒径,也不是最小粒径,而是介于这两者之间的中间粒径。

对于细沙及其以下泥沙,其颗粒大小可用显微镜法或沉降法测量。前者所测得的只是某一个投影面上的尺寸;后者则根据泥沙的沉降速度反求出与该颗沙粒密度相同、沉降速度相等的球体直径,这一直径又称为沙粒的有效粒径或沉降粒径。有效粒径不仅和颗粒大小的绝对值有关,而且还包含了颗粒的形状及密度等因素。除此之外,也有用同体积球体直径来表示泥沙颗粒大小的,这样求出的粒径称为等容粒径。

泥沙的沉降速度可以下列公式确定:

$$\omega = \sqrt{\frac{4}{3C_D} \frac{\rho_s - \rho}{\rho} g D} \quad (2-1a)$$

$$C_D = f(Re), Re = \frac{\omega D}{\nu} \quad (2-1b)$$

式中: ω 为球体沉降速度; C_D 为阻力系数,它与雷诺数 Re 有关; ρ_s 及 ρ 分别为泥沙及液体的密度; g 为重力加速度; D 为粒径; ν 为液体的运动黏性系数。

鉴于泥沙粒径变化幅度很大,在工程中常采用对数粒径:

$$\phi = -\lg D \quad (2-2)$$

其中 D 为粒径,以“mm”计。这样的表示方法可以适应广阔的粒径变化范围,便于引进统计方法来处理粒径资料。

2.1.2 形状和圆度

形状和圆度代表泥沙颗粒的两种不同性质。泥沙的圆度是指颗粒棱角的尖钝程度,而形状则指颗粒整体的几何形态。

球度表示颗粒的形状,其定义如下:

$$\Lambda = \frac{A'}{A} \quad (2-3)$$

式中: Λ 为泥沙的球度; A' 为与沙粒同体积的球体的表面面积; A 为沙粒的表面面积。

对于不易量测的不规则物体表面面积,球度也可以近似地表示为

$$\Lambda = \frac{D_n}{D_s} \quad (2-4)$$

式中: D_n 为等容粒径; D_s 为外接球体直径,一般相当于泥沙颗粒的最大粒径。

也有不少研究工作者试图用泥沙颗粒的最大、中间及最小粒径,即用颗粒三个主轴的长度 a 、 b 、 c 估算不规则颗粒的球度系数,则有

$$\psi = \sqrt[3]{\left(\frac{b}{a}\right)^2 \left(\frac{c}{b}\right)} \quad (2-5)$$

圆度是表示泥沙颗粒棱角尖钝程度的参数,其定义如下: