



海岸河口工程研究论丛

崎岖列岛

洋山港海域泥沙输移

左书华 肖 辉 李 蓓 杨 华 著

SEDIMENT TRANSPORT
IN YANGSHAN PORT SEA AREA OF
QIQU ARCHIPELAGO



人民交通出版社
China Communications Press



海岸河口工程研究论丛

崎岖列岛

洋山港海域泥沙输移

左书华 肖 辉 李 蓓 杨 华 著

SEDIMENT TRANSPORT
IN YANGSHAN PORT SEA AREA OF
QIQU ARCHIPELAGO



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

本书是《海岸河口工程研究论丛》之一,以崎岖列岛洋山港海域为例,采用多种分析方法,全面分析了该岛群水域的动力特征,泥沙输移特征。为当地岛群岸线深水开发利用提供了准确和必要的科学依据。

本书可供海岸河口工程研究人员使用,也可供在校师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

崎岖列岛洋山港海域泥沙输移/左书华等著. —北京:人民交通出版社,2013.3

ISBN 978-7-114-10228-8

I. ①崎… II. ①左 III. ①港口—海岸—泥沙输移—杭州市 IV. ①TV148

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 291303 号

海岸河口工程研究论丛

书 名: 崎岖列岛洋山港海域泥沙输移

著 作 者: 左书华 肖 辉 李 蓓 杨 华

责任编辑: 尤晓晔 刘永芬

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 720×960 1/16

印 张: 7.75

字 数: 123 千

版 次: 2013 年 3 月 第 1 版

印 次: 2013 年 3 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-10228-8

定 价: 35.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

序

海岸、河口是陆海相互作用的集中地带,自然资源丰富,是经济发达、人口集居之地。以我国为例,我国大陆海岸线北起辽宁省的鸭绿江口,南至广西的北仑河口,全长 18000km;我国海岸带有大大小小的入海河流 1500 余条,入海河流径流量占全国河川径流总量的 69.8%,其中流域面积广、径流大的河流主要有长江、黄河、珠江、钱塘江、瓯江等。海岸河口地区居住着全国 40% 左右的人口,创造了全国 60% 左右的国民经济产值,长三角、珠三角、环渤海等海岸河口地区是我国经济最为发达的地区,是我国的经济引擎。

人类在海岸河口地区从事经济开发的生产活动涉及到很多的海岸河口工程,如建设港口、开挖航道、修建防波堤、围海造陆、保护滩涂、治理河口、建设人工岛、修建跨(河)海大桥、建造滨海火电厂和核电厂等等,为了使其经济、合理、可行,必须要对环境水动力泥沙条件有一详细的了解、研究和论证。人类与海岸河口工程打交道是永恒的主题和使命。

交通运输部天津水运工程科学研究院海岸河口工程研究中心的前身是天津港回淤研究站,是专门从事海岸河口工程水动力泥沙研究的专业研究队伍。致力于为港口航道(水运工程)建设和其他海岸河口工程等提供优质的技术咨询服务,多年来,海岸河口工程研究中心科研人员的足迹遍布我国大江南北及亚洲的印尼、马来西亚、菲律宾、缅甸、越南、柬埔寨、伊朗和非洲的几内亚等国家,研究范围基本覆盖了我国海岸线上大中型港口及各种海岸河口工程及亚洲、非洲一些国家的海岸河口工程,承担了许多国家重大科技攻关项目和 863 项目,多项成果达到国际先进水平和国际领先水平并获国家及省部级科技

进步奖。海岸河口工程研究中心对淤泥质海岸泥沙运动规律、粉沙质海岸泥沙运动规律和沙质海岸泥沙运动规律有深刻的认识,在淤泥质海岸适航水深应用技术、水动力泥沙模拟技术、悬沙及浅滩出露面积卫星遥感分析技术等方面无论在理论上还是在实践经验上均有很高的水平和独到的见解。中心的一代代专家们为大型的复杂的项目上给出正确的技术论证和指导,使经优化论证的工程方案得以实施。如珠江口伶仃洋航道选线研究、上海洋山港选址及方案论证研究、河北黄骅港的治理研究、江苏如东辐射沙洲西太阳沙人工岛可行性及建设方案论证、瓯江口温州浅滩围涂工程可行性研究、港珠澳大桥对珠江口港口航道影响研究论证、天津港各阶段建设回淤研究、田湾核电站取排水工程研究等等,事实证明这些工程是成功的。在积累的成熟技术基础上,主编了《淤泥质海港适航水深应用技术规范》、《海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程》、《海港水文规范》泥沙章节、参编《海港总体设计规范》和《核电厂海工构筑物设计规范》等。

本论丛是交通运输部天津水运工程科学研究所海岸河口工程研究中心老一辈少一辈专家学者多年来的水动力泥沙理论研究成果、实用技术和实践经验的总结,内容丰富、水平先进、科学性强、技术实用、经验珍贵,涵盖了水动力泥沙理论研究,物理数学模型试验模拟技术研究,水沙研究新技术、水运工程建设、河口治理、人工岛开发建设实例介绍等海岸河口工程研究的方方面面,对从事本行业的技术人员学习和拓展思路具有很好的参考价值,是海岸河口工程研究领域的宝贵财富。

本人在交通运输部天津水运工程科学研究院工作 20 年(1990~2009 年),曾经是海岸河口工程研究中心的一员,我深得老一代专家的指导,同辈人的鼓励和青年人的支持,我深得严谨治学、求真

务实氛围的熏陶、留恋之情与日俱增。今天,非常乐见同事们把他们丰富的研究成果、实践经验、成功的工程范例著书发表,分享给广大读者。相信本论丛的出版将会进一步丰富海岸河口水动力泥沙学科内容,对提高水动力泥沙研究水平,促使海岸河口工程研究再上新台阶有推动作用。希望海岸河口工程研究中心的专家们有更多的成果出版发行,使本论丛的内容越来越丰富,也使广大读者能大受裨益。

交通运输部科技司司长

Handwritten signature in black ink, appearing to read '赵明' (Zhao Ming).

2012 年 11 月

前 言

河口海岸地区是陆海相互作用的集中地带,各种过程耦合多变,在这些相互作用过程中,泥沙运动通常起到纽带的作用,这使得对河口海岸地区泥沙运动规律的研究成为相关学科共同关心的问题之一。泥沙是河口海岸环境中重要的物质载体,对河口海岸海域生态环境和人类活动有着重要的影响。随着人类活动对河口海岸地区的高强度开发,加上全球气候变化,如海平面上升引起的海岸侵蚀,导致了严重的环境恶化、资源破坏和灾害频发,对人类生存环境安全和生存质量构成严峻的挑战。

泥沙的运动(起悬、沉降和输移)影响着海床的冲淤变化,影响着潮滩地貌环境的变化;同时人类活动的开发,也使得河口海岸地区的泥沙再分配,泥沙运动、海床冲淤以及机制也发生了相应的改变。因此充分了解河口海岸海域泥沙运移规律,对于河口海岸资源利用和环境保护等具有重要的实际意义。

长江口、杭州湾海域是我国河口海岸泥沙研究热点区域,洋山深水港即位于长江口、杭州湾口外的崎岖列岛海域,海域岛屿多,岛屿之间相互关联影响(岛屿效应);岛屿之间的潮汐汊道流速大,最大流速高达 2m/s 以上;水道内水深大;水体含沙量高。洋山港港区陆域面积主要是通过封堵汊道、大面积填海而成,开创了远离大陆、依靠外海岛礁群,在强潮流、高含沙量海域建港史的先例。汊道的封堵和填海成陆无疑是改变了海域原本的边界条件,影响到海区的动力变化,进而影响到海区的泥沙输移。

本书以崎岖列岛洋山港海域为例,以多年实测资料为基础,采用多种分析方法相结合,全面分析崎岖列岛洋山港海域水动力特征、泥

沙输移特征。通过对本书的研究,实现对典型岛群海域环境下泥沙输移的研究,可以更清晰地认识复杂海域环境下泥沙运动规律,拓展泥沙运动理论研究,而且可以为当地岛群岸线深水资源的开发利用和港口工程建设等提供必要和更加准确地科学依据。

本书中的大量实测资料均来源于实地调查和观测,是作者和其团队共同努力的成果。本书的撰写中得到了张宁川教授、曹祖德研究员、邵荣顺教授级高工等人的指导和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

由于经验不足,水平有限,书中错误和不足之处在所难免,恳请读者批评指正,不吝赐教。

作 者

2012 年 11 月

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 研究区域、资料及方法	11
1.4 研究内容	13
参考文献	14
2 研究海域水动力特征	20
2.1 地貌特征	20
2.2 水动力基本特征	21
参考文献	29
3 海域含沙量变化及动力因素研究	31
3.1 宏观泥沙背景	31
3.2 含沙量总体分布特征	33
3.3 各层实测含沙量变化过程	44
3.4 实测资料含沙量垂线分布特征	47
3.5 岛链群内水域含沙量的分布特点	50
3.6 含沙量变化与水动力要素的关系初探	51
3.7 小结	55
参考文献	55
4 悬沙输移机制及底层悬沙输移过程研究	57
4.1 通量机制分解法的涵义	57
4.2 悬沙输运通量机制分解研究	57
4.3 基于单宽通量的悬沙净输移机制分解	58
4.4 近底层悬沙输移过程	62
4.5 小结	70
参考文献	70

5 表层沉积物输移特性	71
5.1 表层沉积物特征.....	71
5.2 表层沉积物水力特性.....	72
5.3 表层沉积物运移趋势.....	85
5.4 表层沉积物输运通量.....	87
5.5 小结.....	88
参考文献	89
6 海床冲淤变化及理论判别	90
6.1 洋山港工程概况.....	90
6.2 洋山港海域历史演变情况.....	92
6.3 近期洋山港海域通道内地形冲淤变化.....	92
6.4 海床冲淤变化原因分析.....	98
6.5 海床冲淤变化的理论判别	102
6.6 小结	107
参考文献.....	107
7 岛群对水沙过程及地形分布的影响	108
7.1 对水动力的影响	108
7.2 对悬沙输移的影响	110
7.3 对地形的影响	111
7.4 小结	111
参考文献.....	112

1 绪 论

1.1 研究背景及意义

河口海岸地区是陆海相互作用的集中地带,各种过程耦合多变,演变机制复杂。在这些相互作用过程中,泥沙运动通常起到纽带的作用,这使得河口海岸地区泥沙运动规律的研究成为相关学科共同关心的问题之一(胡日军,2009)。随着人类活动对河口海岸地区的高强度开发,加上全球气候变化问题,如海平面上升引起的海岸侵蚀,导致了严重的环境恶化、资源破坏和灾害频发,对人类生存环境安全和生存质量构成严峻的挑战。因此,河口海岸研究已成为当前世界沿海国家和科学家十分关注的热点问题(陈吉余、陈沈良,2002)。

泥沙是河口海岸环境中重要的物质载体,对河口海岸海域生态环境和人类活动有着重要的影响,一方面它是河口营养盐和有机物的载体(Webster 和 Lemckert,2002),对污染物的迁移和循环起着重要作用(Walling 等,1985);另一方面泥沙的运动(起悬、沉降和输移)也影响着海床的冲淤变化,影响着潮滩地貌环境的变化;同时人类活动的开发,也使得河口海岸地区的泥沙再分配,泥沙运动、海床冲淤以及机制也发生了相应的改变。因此充分了解河口海岸海域泥沙输移、海床冲淤变化及动力机制,对于河口海岸资源利用和环境保护等具有重要的实际意义,也对探讨河口海岸泥沙现代沉积过程具有一定理论意义。

长江口、杭州湾海域是我国河口海岸泥沙研究热点区域,在长江口、杭州湾口外分布着诸如崎岖列岛、舟山群岛等岛群,这些海域是上海、浙江港口工业发展的重要区域。这些岛群海域环境相对比较复杂:岛屿多,岛屿之间相互关联影响(岛屿效应);岛屿之间的潮汐汊道流速大,最大流速高达 3m/s 左右;水道内水深大;水体含沙量高;同时这些海域又是长江水体南下的必经之路,是杭州湾水体与东海水体交换的主要通道,受东海流系(黑潮、台湾暖流、对马暖流、黄海暖流、黄海沿岸流以及东海沿岸流等)影响。因此,这些岛群海域的泥沙输移、海床冲淤变化及动力机制,与一般海域存在一定的特殊性。

基于此,本项目拟以杭州湾口外崎岖列岛海域为例,以多年实测资料为基

础,采用多种分析方法相结合,全面分析崎岖列岛洋山港海域水动力特征、泥沙输移特征。通过对本书的研究,实现对典型复杂海域环境下泥沙输移研究,可以更清晰地认识复杂海域环境下泥沙运动规律,拓展泥沙运动理论研究,而且可以为当地岛群岸线深水资源的开发利用和港口工程建设等提供必要和更加准确地科学依据。

1.2 国内外研究现状

由于河口海岸地区的自然条件复杂,泥沙运动受到波浪、潮流等水动力的影响,涉及物理、化学、生物过程与悬浮泥沙和沉积物的相互作用,河口海岸泥沙运动机理复杂,主要采用野外观测和室内实验研究、数学模型和物理模型以及理论研究等方法,或这几种方法相互结合,以求更加近似或真实地认识和掌握泥沙运动机理,推动对河口海岸地区泥沙的深入研究,并指导工程实践。

1.2.1 野外观测和室内实验

近岸海域水流、泥沙运动状态不同于河道内单向水流,海域内水流、泥沙运动受到风浪潮流的影响,比较复杂,底质组成也比较复杂。20 世纪 90 年代以前,在现场水文测验中大多数都是采用传统的水文测验方法,需要大量船只,组织大量人力、物力,在正常天气情况下进行观测。随着科学技术的发展和新技术的引进,从 90 年代后期开始,逐步采用新型声学 and 光学仪器(ADCP、OBS、ADV 等)测量方法,在水文泥沙(水流、含沙量)观测、近底边界层观测、浮泥及适航水深研究等方面取得了一定成果。

自 20 世纪 80 年代以来,ADCP(声学多普勒流速剖面仪)已成为物理海洋学研究的常规仪器。ADCP 发射固定频率的声波,接收水中散射体的后散射信号,根据多普勒效应,计算水体的流速,也在研究中得到广泛应用;在用声波的多普勒效应测流速、流向的同时,能输出水声后散射强度信号,这使其测量悬沙浓度(含沙量)成为可能,也使许多学者开始探讨和应用(田淳等,2003;汪亚平等,1999,程鹏等,2001)。ADCP 测量悬沙浓度时,有一个前提条件就是粒径大小没有变化,为排除粒径变化对声学测量误差的影响,对粒径变化不大的时段进行了分析。研究表明在观测期间悬沙粒径变化较小的条件下,后散射强度与水样悬沙浓度之间具有较好的相关性。如果观测期内粒径变化范围较大,应该对粒径进行修正。

光学仪器已广泛应用于悬沙浓度的观测研究中,它通过应用光的后散射及

光波衰减原理进行测量,通过接收红外辐射的散射量监测悬浮物质,然后通过相关分析,建立水体浊度与泥沙浓度的相关关系,进行浊度与泥沙浓度的转化,得到悬沙浓度。目前研究悬沙浓度的浊度计(或浊度仪)很多,如意大利的 HI93703、LPZ000 系列、上海的 WGZ 系列、苏州的 QZ201 系列、美国金泉仪器公司生产的 YSI 和美国 D&A 公司生产的 OBS 系列等,其中应用较为广泛的是 OBS 系列浊度仪(薛元忠,等 2001 年、2004 年)。应用光学仪器(如 OBS-3A)进行悬沙浓度观测时,对仪器的标定十分关键,对不同地区使用同一仪器要进行标定,即使是同一地区不同的观测仪器,也要分别进行标定,野外与室内标定会有较大的不同。另外,光学仪器观测的是点或线,限制了观测悬沙的时空分辨率。光学仪器是接触式的,对观测点的水流环境可能会有一定的干扰。

由于传统水文观测方法的局限性,我国在近底边界层观测上一直处于滞后状态,近十年来,人们对底部边界层的研究由浅入深,研究方法和手段也多种多样,特别是近年来现代化观测仪器的出现,如声学流速和悬浮泥沙浓度测量仪、光学悬浮泥沙测量仪、电子设备和存储设备的更新等,都提高了人们对底部边界层的探索能力,使得研究者能够获得原来不能获得的一些现场近底部观测资料。国内的相关研究主要集中在几个大河口,如长江口、黄河口、椒江河口等,研究内容集中于悬沙输移特征、浑浊带泥沙过程、悬沙垂向分布、浮泥形成机理及变化过程等。例如,沈焕庭等(1992 年)、时伟荣(1993 年)、贺松林、孙介民(1996 年)、Li 和 Zhang(1998 年)、时钟、陈伟民(2000 年)对长江口水动力、细颗粒泥沙过程进行了研究。Shi 等(1996—1999 年)利用声学方法对长江口北槽底部边界层细颗粒泥沙过程进行了研究,揭示了高度层化的悬浮液、黏性淤泥底床的再悬浮、近底高含沙层的再搬运以及近底高含沙层内的高、低频率再悬浮过程。Wright 等 1990 年利用声学等方法研究了黄河口的近底高浓度泥沙异重流的结构和动力机制,发现了大尺度内波。Li 等(1993 年)、Dong 等(1997 年)利用光学测沙系统研究了浙江椒江口细颗粒泥沙输移过程,结果表明大潮时,潮流不对称性产生了最大浑浊带;憩流时形成的过渡泥沙层在临界流速为 $0.3 \sim 0.4 \text{ m/s}$ 时被冲蚀。谢钦春、董礼先(1998 年)对椒江口的近底部研究也获得了丰富的成果。

国外海洋学家对河口近底层泥沙运动做了大量现场实验研究,内容包括近底高含沙层的动力特征、近底流速和水质观测对泥沙输移的研究以及底部边界层垂向结构的研究和动力特征的研究等(Wolanski et al., 1988 年;Wright et al., 1997 年;Adolf et al., 1998 年;Kushnir, 1999 年;Williams et al., 1999 年;Sternberg et al., 2001 年)。

美国 Washington 大学海洋学院 Sternberg 等,在 1988 年用一改装的 GEO-

PROBE 三角架研究 San Francisco 湾河口底部边界层的悬沙输移,泥沙浓度采用光学后散射法(OBS)观测。美国 William 和 Mary 学院 Virginia 海洋研究所 Maa 等于 1993 年在 Chesapeake Bay 利用一个环形水槽,现场观测了泥沙悬扬的临界剪切应力,这为河口底部泥沙运动研究提供了新途径。

1.2.2 泥沙运动数学模型研究

随着泥沙理论、数值计算技术和计算机的发展,数学模型得到了很快的发展,已经成为一种研究泥沙运动的重要手段。从不同角度出發,数学模型可以分为不同类型,例如从考虑的因素出发,有潮流作用下的泥沙运动数学模型、波浪共同作用下的泥沙运动数学模型;从泥沙运动特点考虑,有悬沙运动数学模型、推移质运动数学模型和全沙数学模型;从考虑问题的侧重点不同,又可以分为一维、二维、三维和复合模型等,不过在实际应用中往往这些方面都是综合考虑的,例如平面二维波浪共同作用下的悬沙运动数学模型就是经常运用的一种。目前二维模型广泛应用于悬沙及底沙输移和海床冲淤演变研究中,本节内容主要从目前在国内外应用比较成熟的二维数学模型出发,分析其应用状况。

1.2.2.1 确定源函数的方法

泥沙数学模型的研究主要集中在如何反映河口径流、潮流、波浪对泥沙的作用上,泥沙底边界层上的冲刷和淤积过程具体反映在平面二维泥沙数学模型中泥沙源汇项(冲淤函数) F_s 的处理上,一般有三种方法:挟沙能力法、底部切应力法和通量法;垂向二维泥沙模型底部边界条件的给定,主要有应力法和通量法。

(1) 挟沙能力法

水体挟沙能力是指在一定的水流泥沙及边界条件下,单位水体所能够挟带和输送泥沙的数量。如果悬沙浓度 C 大于水体的挟沙能力 C_* ,则泥沙沉降;反之,则底部冲刷;相等时处于平衡状态。泥沙源函数一般可表示为:

$$F_s = a\omega(C_* - C)$$

式中: a 为沉降几率。

水体挟沙能力的研究始于 Gilbert (1914 年)的水槽输沙实验,其后国内外众多学者对河道水流挟沙能力展开了广泛的研究,其代表有 Einstein (1950 年)、张瑞瑾 (1959 年)、Bagnold (1966 年) 和 杨志达 (1973 年、1992 年) 等工作。近些年来,有关潮流和波浪作用下水流挟沙能力的研究也取得了一定的成果,曹文洪和舒安平 (1999 年) 进行了系统的总结和分类,分析了各家优缺点。国内在河口海岸区域应用较广的主要有“窦国仁公式”和“曹祖德公式”,如下:

窦国仁等 (1995 年) 根据实测资料统计出了潮流和波浪共同作用下的水流

挟沙能力公式,称为“宾国仁公式”,表示为:

$$C_* = \alpha_0 \frac{\gamma\gamma_s}{\gamma_s - \gamma} \cdot \left[\frac{(u^2 + v^2)^{3/2}}{C'^2 H \omega_s} + \beta_0 \frac{H_w^2}{H T_w \omega_s} \right]$$

式中: γ 和 γ_s ——水和泥沙的重度;

u, v ——深度平均流速分量;

ω_s ——泥沙沉降速;

H_w 和 T_w ——波浪的平均波高和周期;

α_0 和 β_0 ——一组系数;

C' ——谢才系数;

H ——总水深。

曹祖德等(2001)根据理论和实测资料统计出了波浪、潮流共同作用下的水流挟沙能力(称为“曹祖德公式”),如下式:

$$C_* = \alpha \frac{\gamma_s \gamma}{\gamma_s - \gamma} \cdot \frac{(u_c + \beta u_w)^3}{gh \omega_s}$$

式中: γ_s ——沙重度;

γ ——水重度;

ω_s ——泥沙沉降速度;

u_c ——潮流流速;

u_w ——波浪底部水质速度, $\frac{\pi H}{T \sinh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)}$;

H ——波高;

T ——波周期;

h ——水深;

L ——波长,无浪时, $u_w = 0.0$;

h ——水深。

(2) 通量法

对于运动的泥沙,从水深方向来看,至少应分为两层,对于沙质海滩,则有悬移运动层——悬移质,推移运动层——推移质;对于淤泥质海滩,悬移运动层——悬移质,流移运动层——浮泥层;它们的分界高度称之为床面层厚度。通量法,就是将在床面上活动的泥沙分为两部分,沉积量和冲刷量(起悬量),那么其泥沙源汇项(或冲淤函数) F_s 可表示为:

$$F_s = P - D$$

式中: D ——潮流波浪及重力作用下泥沙在床面上的沉降总量;

P ——潮流波浪及重力作用下泥沙在床面上的起悬总量;

“ $P-D$ ”——泥沙在床面上的交换情况。当 $P > D$ 时,床面发生冲刷,水流中泥沙含量将逐渐增大;当 $P < D$ 时,床面发生淤积,水流中泥沙含量将逐渐减小;当 $P = D$ 时,海床不冲刷不淤积,水流中泥沙含量处于相对平衡状态。

白玉川等(2000)对沉积量 D 和冲刷量(起悬量) P 做了相关研究,所得结果如下:
泥沙在床面上起悬总量:

$$P = \alpha_p C_{bi} \cdot 0.83\beta(Z^+) U_{T*} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-0.5\alpha_1^2) - \alpha_1 \cdot [1 - \phi'(\alpha_1)] \right\}$$

式中: C_{bi} ——床面底部第 i 组粒径泥沙可活动的体积含沙量;

ϕ' ——误差函数, $\alpha_1 = \omega/\sigma_r$;

σ_r ——沙粒在床面层附近脉动速度的均方根值,它与底部摩阻流速 U_{T*} 呈如下函数关系。

$$\begin{aligned} \sigma_r &= 0.83 U_{*T} \beta(Z^+) \\ \beta(Z^+) &= \begin{cases} 1 - (Z^+ - 50)^2/2500, & Z^+ < 50 \\ 1, & Z^+ \geq 50 \end{cases} \\ Z^+ &= U_* \delta / \gamma \end{aligned}$$

式中: δ ——床面层高度;

U_* ——潮流摩阻流速;

U_{*T} ——潮流与波浪合成摩阻流速;

α_p ——比例系数,参照量纲分析, α_p 应为 R_p 的函数: $\alpha_p = 0.00135 R_p^{0.53}$,

$$R_p = \sqrt{g D_s} \cdot D_s / \gamma;$$

D_s ——泥沙粒径;

γ ——浑水黏滞系数。

泥沙在床面上沉积总量:

$$D = \phi_B \cdot \omega \cdot S$$

式中: ϕ_B ——修正系数,可根据泥沙沿水深的垂向分布情况确定;

ω ——沉积速率;

S ——水体含沙量。

(3) 底部切应力法

底部切应力法物理意义在于:当底部的剪切应力大于近底的临界起动应力时,泥沙颗粒起动,底部冲刷;当剪切应力小于临界不淤应力时,泥沙沉降,底部

淤积;介于两者之间时,则不冲不淤。泥沙源函数一般可表示为:

$$F_s = \begin{cases} -\alpha\omega_s C(1 - \frac{\tau_b}{\tau_d}), & \text{当 } \tau_b < \tau_d \\ 0 & \text{当 } \tau_d \leq \tau_b \leq \tau_c \\ M(\frac{\tau_b}{\tau_c} - 1), & \text{当 } \tau_b > \tau_c \end{cases}$$

式中: τ_b ——底部剪切应力;

τ_c ——临界起动应力;

τ_d ——临界淤积应力,它们所对应的三个速度分别为底部剪切速度 u_b , 临界起动流速 u_c 以及临界淤积流速 u_d ;

M ——泥沙起动系数;

α ——泥沙沉降概率。

上式中,起动过程(沙的冲刷率)采用 Partheniades(1965 年)的经典方法;沉积过程(泥沙的淤积率)则是采用 Krone(1962 年)提出的方法。

用底部剪切应力计算泥沙源函数的关键在于:两个临界应力(或流速)的合理选取。对于临界起动应力(或起动流速),众多学者进行了广泛的研究。基于大量的水槽实验数据以及部分现场观测资料,得到了许多起动流速公式。国际上比较著名的是经典的 Shield 曲线(1936 年),以及 Meyer-Peter(1948 年), Gessler(1971 年)等起动切应力公式。国内在河口海岸地区应用较为广泛的为 窠国仁(1960 年,1999 年)。

(4)平衡参考浓度法

在近底参考高度 a_{ref} 上对应有一个泥沙平衡参考浓度 C_{ae} ,悬沙在参考高度上的浓度 C_a 大于平衡浓度时泥沙淤积;比之小,则底部冲刷;与之相等,则不冲不淤。泥沙源函数可表示为(1986 年):

$$F_s = \omega_s (C_{ae} - C_a)$$

式中: ω_s ——悬沙沉降速度。

Van Rijn(1984 年)通过水槽试验和现场数据研究了控制泥沙输运的一组参数,然后利用这些参数来预测推移质和悬移质输运,其平衡参考浓度的表达式为:

$$C_{ae} = 0.015 \frac{D_{50} T^{1.5}}{a_{ref} D_*^{0.3}}$$

式中: D_{50} ——底沙中值粒径;

T ——输运状态参数;

D_* ——无量纲粒径参数。