

王艳红 陈可锋 曾成杰 著

废黄河三角洲 海岸侵蚀过程与整体防护

FEI HUANGHE SANJIAOZHOU
HAIAN QINSHI GUOCHENG
YU ZHENGTI FANGHU



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

由南京水利科学研究院专著出版基金资助

废黄河三角洲 海岸侵蚀过程与整体防护

王艳红 陈可锋 曾成杰 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

由于历史时期黄河尾间变迁,苏北废黄河三角洲海岸的沧海桑田和桑田沧海变迁举世瞩目。因黄河北归引起的海岸侵蚀仍然在持续,废黄河三角洲海岸仍然是目前我国侵蚀最为严重的海岸之一。本书通过历史资料对比分析、应用遥感资料、实测水文泥沙资料分析、数学模型计算和物理模型试验等手段,研究了废黄河三角洲海岸的变异历史、侵蚀动态及整体防护对策,总结了海岸的演变规律和防护要求,以期废黄河三角洲海岸整体防护体系的构建提供科学依据。

本书可作为从事海洋科学、海岸工程和水利工程有关技术人员,高等院校海洋科学、海岸地貌、港口工程、水利工程等有关专业的师生参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

废黄河三角洲海岸侵蚀过程与整体防护 / 王艳红, 陈可锋, 曾成杰著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2014.9

ISBN 978-7-5170-2591-7

I. ①废… II. ①王… ②陈… ③曾… III. ①黄河—三角洲—侵蚀海岸—海岸防护 IV. ①TV882.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第229328号

书 名	废黄河三角洲海岸侵蚀过程与整体防护
作 者	王艳红 陈可锋 曾成杰 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京中献拓方科技发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 8.75印张 208千字
版 次	2014年9月第1版 2014年9月第1次印刷
定 价	30.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

天下莫柔弱于水，而攻坚强者莫之能胜。

——老子（公元前 6 世纪）

Under heaven nothing is more soft and yielding than water. Yet for attacking the solid and the strong, nothing is better, it has no equal.

——Lao Tsu (6th Century B. C.)

Nature has not only demonstrated how to erode but also how to protect. It may safely be said that there is no protection initiated by man which has not beforehand been invented by nature, and nature obtained all the good results as well as all the bad results before man did. Consequently we can learn from nature if we will only make the effort of opening our eyes and looking. It must be admitted that nature has had more imaginative and has had more success than man.

——Bruun (1962)

自然在演示侵蚀过程的同时也告诉人们如何去防护。事实上所有防护方式均为自然发明而非人类原创，而且自然在人类之前已经知道了防护效果的好坏。因此我们只要善于观察就可以从自然过程中学习。必须承认自然已比人类有更丰富的想象力和更多的成就。

——布容 (1962)

前 言

历史时期江苏北部海岸淤进蚀退趋势性过程的逆转一直是海岸动力地貌研究的热点,就长周期的区域性海岸演变而言,1855年以来废黄河三角洲海岸侵蚀进程中局部变异现象同样值得关注。现有防护工程虽基本控制了岸线蚀退,但堤外岸滩和水下岸坡的侵蚀仍在继续。在此过程中海岸组成物质粗化、岸滩坡度陡化等现象,反映了海岸性质存在由淤泥质海岸向砂质海岸变异的趋势。然而以往关于海岸侵蚀的研究中尚无针对海岸变异的专门探讨,成熟的海岸防护措施多针对砂质海岸。本书以海岸变异为主线编写,旨在探索淤泥质海岸侵蚀过程中局部岸滩地貌变异的机理,为更加有效的海岸防护提供基础依据。

从海岸演变历史的角度,本书提出废黄河三角洲海岸在黄河尾间变迁影响下淤蚀转变的同时,海岸性质也存在淤泥质海岸与砂质海岸之间的相互转换过程,说明砂质海岸与淤泥质海岸之间没有不可逾越的鸿沟。

本书提出海岸侵蚀过程中的变异并对变异特征及其进程进行了探讨,认为废黄河三角洲海岸目前的侵蚀变异属于黄河夺淮期间海岸淤长和由砂质海岸向淤泥质海岸演变的逆向调整过程;海岸的变异过程主要包括组成物质粗化、岸线和水下等深线趋直、海岸剖面变陡且形态上表现为由上凸变为下凹、动力环境要素主导地位易势等。考虑到海岸侵蚀过程中的变异特征,将通常针对砂质海岸的稳定岸弧概念引入到侵蚀变异中的淤泥质海岸,探讨了侵蚀变异中淤泥质海岸稳定岸弧的形成过程、岸弧形态及其与砂质海岸的差异,并积极探索通常应用于砂质海岸的岬角控制模式在侵蚀变异中淤泥质海岸整体防护中的应用。针对废黄河三角洲海岸的动力泥沙环境与侵蚀过程的特殊性,探讨了岬角控制在此类海岸应用中的特别要求。

本书在编写和前期相关研究过程中,得到了南京水利科学研究院喻国华教授、陆培东教授及南京师范大学王建教授的指导和帮助,在此表示衷心感谢。

由于海岸演变的复杂性和海岸防护工程的多样性,同时限于作者水平,本书错误和不足之处,敬请读者、同仁不吝赐教指正。

王艳红 陈可锋 曾成杰

2014年4月于南京

目 录

前言

摘要	1
第1章 海岸侵蚀与防护研究	2
1.1 海岸侵蚀	2
1.2 海岸防护	8
第2章 苏北废黄河三角洲海岸的历史演变和性质变异	20
2.1 黄河夺淮前稳定的砂质堡岛海岸	20
2.2 黄河夺淮期间快速淤长(由砂质海岸过渡为淤泥质海岸)	21
2.3 黄河北归后海岸的冲淤调整	23
2.4 小结	27
第3章 废黄河三角洲的海岸动力特征	29
3.1 旋转潮波影响下的潮汐特征与沿岸地貌格局	29
3.2 废黄河口附近海域潮汐与潮流特征	31
3.3 风、浪特征	37
第4章 废黄河三角洲海岸近期冲淤动态	44
4.1 灌河口以西(大板簰至灌河口)	44
4.2 灌河口至新淮河口	49
4.3 废黄河口拐角岸段(新淮河口至扁担港口)	53
4.4 射阳河口附近(扁担港口至斗龙港口)	63
4.5 泥沙运动趋势分析	70
4.6 海岸侵蚀原因与机制	74
第5章 海岸侵蚀过程中的岸滩变异特征	77
5.1 三角洲成长期间的海岸特征	77
5.2 黄河北归后的侵蚀与变异进程	77
5.3 小结	83
第6章 岸线变迁引起的海域潮汐流场的变异	84
6.1 黄河北归后几个关键时期的废黄河口地形的恢复	84
6.2 数学模型的建立与验证	87
6.3 岸线变迁和三角洲侵蚀对潮流运动的影响	93

第7章 已有海岸防护工程的防护效果	97
7.1 废黄河口附近的防护工程	97
7.2 小丁港附近岸段的防护	100
7.3 小结	101
第8章 岬角控制的海岸防护形式	103
8.1 物理模型设计	104
8.2 物理模型建立	108
8.3 模型验证	109
8.4 模型试验与结果分析	110
8.5 小结	115
第9章 废黄河三角洲海岸整体防护体系的构建	116
9.1 海岸整体防护体系的基本框架	116
9.2 节点控制防护体系	118
第10章 认识与展望	122
10.1 海岸侵蚀和防护研究	122
10.2 苏北废黄河三角洲海岸的变异过程	122
10.3 苏北废黄河三角洲海岸的侵蚀动态	122
10.4 海岸侵蚀动力机制	123
10.5 侵蚀泥沙的去向	124
10.6 海岸变异的特征与进程	124
10.7 废黄河三角洲海岸防护工程实践	124
10.8 变异中侵蚀性淤泥质海岸的稳定岸弧	125
10.9 节点控制为基本思路的海岸整体防护	125
10.10 人工岬角的应用	126
参考文献	127

摘 要

历史时期江苏北部海岸淤进蚀退趋势性过程的逆转一直是海岸动力地貌研究的热点,就长周期的区域性海岸演变而言,1855年以来废黄河三角洲海岸侵蚀进程中局部变异现象同样值得关注。近150年来,由于黄河北归后陆源泥沙断绝,废黄河三角洲海岸一直处于强侵蚀状态,现有防护工程虽基本控制了岸线蚀退,但堤外岸滩和水下岸坡的侵蚀仍在继续。在此过程中海岸组成物质粗化、岸滩坡度陡化等现象反映了海岸性质存在由淤泥质海岸向砂质海岸变异的趋势。然而以往关于海岸侵蚀的研究中尚无针对海岸变异的专门探讨,成熟的海岸防护措施多针对砂质海岸。本书以海岸变异为主线对废黄河三角洲海岸演变进行全面分析,旨在探索淤泥质海岸侵蚀进程中局部岸段发生变异的机理,为更加有效的海岸防护提供基础。具体开展了以下几方面的研究:

①就苏北海岸演变的历史资料和已有研究成果,论证了黄河尾间变迁影响下的海岸演变过程中所伴随的海岸性质变异,即砂质海岸和淤泥质海岸之间的相互转换过程;②通过综合地貌调查、沉积物采样与分析、海岸动力泥沙环境分析、不同时期水下地形和断面资料对比、多时相遥感影像的岸线对比分析和不同潮时悬沙含量遥感反演等手段,从海岸侵蚀动态、侵蚀时空差异及泥沙运移等方面揭示海岸侵蚀过程中存在的变异现象及其进程;③通过废黄河口凹入岸段波浪泥沙物理模型试验,研究海岸性质变异中稳定岬湾的形成、粗颗粒泥沙来源、岬湾岸线形态等特征;并对比分析了变异形成的砂质海岸岸弧形态与典型砂质海岸稳定岸弧形态的异同;同时通过不同波浪条件下稳定岸弧形成的系列试验,探讨了变异型砂质海岸岸弧形态对波浪动力的响应;④根据废黄河三角洲海岸侵蚀变异特征、物质组成和动力泥沙环境的特殊性以及稳定岸弧形成过程的研究结果,论证了岬角控制在废黄河三角洲海岸整体防护中的适用性及构建整体防护体系的途径。

研究认为:①目前废黄河三角洲淤泥质海岸侵蚀进程中存在向砂质海岸变异的现象,其过程属历史时期海岸淤进进程中性质变异的逆向调整;②侵蚀动力的时空差异及泥沙运移特征是废黄河三角洲海岸侵蚀现状存在差异的主要原因;随侵蚀过程中波浪优势的增强和粗化泥沙的富集,海岸侵蚀中的变异在地貌上表现为向波控砂质海岸特征发展;③废黄河三角洲海岸侵蚀过程中存在的变异特征,使得通过岬角控制也能形成稳定岸弧,为海岸整体防护体系的构建提供了新的途径。

第 1 章 海岸侵蚀与防护研究

1.1 海 岸 侵 蚀

随着全球海平面上升、人类对海岸带开发力度的加强和依赖程度的提高,海岸侵蚀和岸线后退逐渐成为威胁海岸带人类生存和生活环境的主要因素(Williams等,1990)。海岸侵蚀及防护日益受到海岸地貌研究者和工程师们的广泛关注,并逐渐积累了丰富的研究成果和实践经验。然而由于海岸侵蚀本身在时空尺度和区域特征等方面存在较大差异,而且属于多种学科共同关注的问题,调查研究的重点和方法等各有不同。

1.1.1 海岸侵蚀的认识

侵蚀和堆积是地貌过程的主旋律。在海岸带,侵蚀和堆积也是海岸演变的基础过程,并以岸线蚀退和淤进为主要表现形式。人类认识海岸演变开始于对海岸侵蚀的认识,因为海岸侵蚀是海岸变化的主要内容之一,且岸线的蚀退直接威胁人类的主要生存场所——陆地(Carter R. W. G. 和 Woodroffe C. D., 1997)。海岸侵蚀的认识长期以来被当作海岸演变研究的重要部分。在西方的文艺作品中海岸侵蚀多被描绘为海洋和陆地竞争中海洋优势的体现,在这种竞争中人类通常是站在陆地的一方,不过人类也经常有意无意地帮助大海(Mitchell, 1974)。同时由于海岸侵蚀涉及面广、时空尺度差异大以及区域性变化等特征,对海岸侵蚀也因不同的层面和尺度有着不同的理解,概括如下:

(1) 地质与地貌学角度。海岸侵蚀是海陆相互作用中海洋绝对优势的表现,是海洋动力对海岸地貌的塑造过程,人为因素只能延缓或加速其进程,并不能从根本上改变或逆转这一自然过程,认为海岸侵蚀似乎不可避免(Komar P. D., 1999)。

(2) 工程科学角度。海岸侵蚀是波浪和水流等动力作用下海岸泥沙运动的结果,只要人类对这一自然过程有充分的认识和理解,海岸侵蚀是可以预见和调控的,同时强调工程措施可以在很大程度上缓海岸侵蚀(不一定完全阻止)(Mitchell, 1974, Furuseth 等, 1984)。

(3) 生态学角度。海岸过程是海洋和陆地之间的势均力敌的战斗,难分胜负。海岸侵蚀既是原有生态系统的破坏也是新生态系统建立的过程,人类的干预只能使情况变得更糟(Mitchell, 1974; Morgan R. 等, 1993)。

无论从哪个角度,海岸侵蚀都是一个海陆相互作用的自然过程,但随着经济社会和科学技术的发展,人类已越来越多地参与到这一过程中来(DeVriend, 1991; Larsonand-Kraus, 1995; Rozyński F., 2005)。再加上海岸侵蚀的区域性差异和时空尺度的不同,使海岸侵蚀问题更加复杂。同时因为海岸侵蚀是一个动态变化的过程,一般认为长期处于强烈侵蚀的海岸,其短期和局部的淤蚀过程并非一成不变,甚至经常表现出截然相反的运动

态过程。不同时期、不同岸段或岸滩不同地貌部位的侵蚀过程和造成侵蚀主导因素更是千差万别。可以说海岸侵蚀是一个已经有人类广泛参与的自然过程，但在认识这一过程的同时需强调其区域性特征差异、时空尺度差异和动态变化特征等 (Komar P. D., 1999)。

1.1.2 海岸侵蚀的影响因素及其相互作用

海岸侵蚀的影响因素繁多，加之各因素之间的相互影响和作用，难以用简单的模式加以概括。根据不同的理解层面，海岸侵蚀的影响因素分为自然因素和人为因素 (Bruun, 1972, 引自 Silvester 和 Hus, 1997)、大尺度和小尺度因素 (包括时间和空间尺度) (Komar P. D., 1999)、主要因素和非主要因素 (Silvester D. 和 Hus J. R. C., 1997)、直接因素和间接因素等。

就自然因素而言，可以归纳为气候、沉积物收支、营力作用、相对海平面变化等。这几方面加上各种人为因素，共同控制着海岸的淤蚀动态。Wright 和 Thom (1977) 指出，由于控制海岸演变的因素繁多且存在相互作用，同时海岸演变对这些因素也有着一定的反作用，因此各因素以及海岸演变本身之间多存在“先有鸡还是先有蛋”的问题。对海岸侵蚀影响因素的认识有必要从各因素之间的相互作用出发，通过归类并强调主导因素，揭示各自在海岸侵蚀中的作用 (图 1.1)。

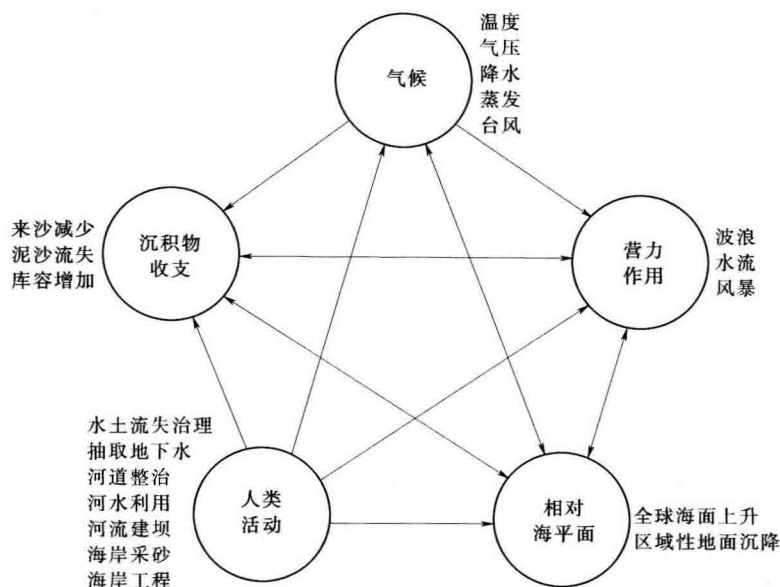


图 1.1 影响海岸侵蚀的主要因素及其相互作用

1.1.3 海岸侵蚀的时空尺度

地学研究领域中，因时间、空间尺度的差异，对各研究主题的焦点也有所不同。在过去数十年中，探讨营力过程的海岸动力地貌学，多将焦点放在“瞬时”和“事件”这种短时空尺度的探讨 (Cowell 和 Thom, 1994)。因为海岸地区不规则的突发性事件（如台风等）所产生的改变，对海岸地貌变化的影响程度往往比有规律的周期性变化更为剧烈，但

海岸地貌会在这种长周期变化中表现出具有某种可回复性的循环过程。

Komar P. D. (1999) 指出, 认识海岸侵蚀必须考虑不同的时空尺度, 因为海岸侵蚀研究不但包括了波浪和水流作用下泥沙运动的机理这种小尺度的内容, 同时也包括了构造运动和海面变化等大尺度过程 (图 1.2)。但人们一般多倾向于关注风暴等直接因素 (immediate causes) 造成的海岸侵蚀, 并采取修建海堤、防波堤和养滩等简单的解决方案, 而这些补救式措施 (band-aid fix) 往往很少考虑到影响海岸侵蚀的一些潜在的、大时空尺度因素。

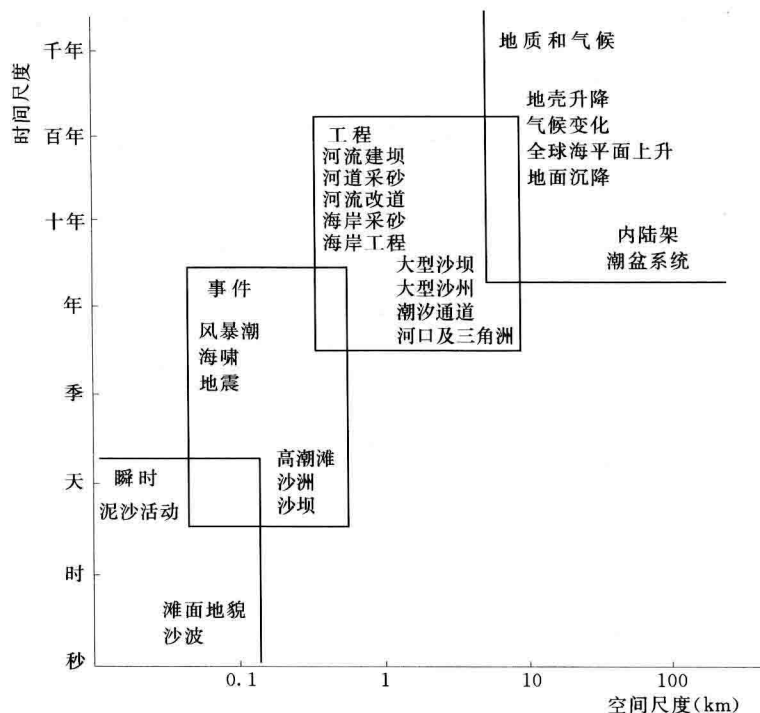


图 1.2 海岸侵蚀的时空尺度及其典型影响因素和范围

(据 Komar P. D., 1999 改绘)

沉积物在横剖面上的搬运以及通过数值模式模拟海滩剖面对海岸营力变化的反应等研究方面有了长足进步。但这都属于小到中尺度的研究范畴。近数十年来的大量研究多局限于这样的时空尺度, 直到最近才开始有部分针对大尺度因子的研究。

1.1.4 海平面上升的海岸形态响应

当人们意识到全球变暖导致海平面上升及其危害之后, 对海平面上升等大尺度因素造成的海岸侵蚀开始得到较多的关注 (施雅风, 范建华, 1990; Yang G. S., 1995; List J. H. 等, 1997), 研究对象主要集中在海平面上升与海岸形态响应等方面。应用历史记录方法估算海平面上升海岸形态响应的前提条件是: 海平面变化是海岸演变的主要因子, 其他相关环境因素在估算期内相对稳定。该方法尤其适合于研究相对均质的海岸, 其中最经

典的模式就是 Bruun 等 (1962) 通过大量实地调查和模拟研究得出了海平面上升与岸线蚀退范围之间的关系, 即 Bruun 定律。认为微小的海平面上升可以造成海岸大范围的蚀退, 并主张海滩平衡剖面。其内容主要有 3 点: ①海平面上升, 海滩上部受侵蚀; ②侵蚀下来的泥沙堆积于近滨 (Nearshore) 海底, 维持海滩平衡剖面; ③近滨海底因泥沙堆积加高的高度等于海平面上升量, 故近滨地带的水深不变。这一定律已被广泛采用, 其应用已由下凹剖面发展到有岸外水下沙坝及整个堡岛系统, 从二维剖面到三维剖面, 从理论模式到野外实地论证, 从砂质海岸向淤泥质海岸引申 (陈西庆等, 1998)。

1.1.5 人类活动与海岸侵蚀

几乎所有海岸侵蚀的研究都会考虑人类活动的影响, 因为海岸过程都越来越多地受到人为的控制和影响。造成海岸侵蚀的人为因素主要有两种类型: 一是对海岸资源的直接索取 (海岸资源的开采); 二是试图控制自然过程从而导致的海岸变化 (Carter 等, 1997)。人们可以有意无意地觉察到对海岸资源直接开采所造成的海岸侵蚀现象, 许多人为改变自然过程所产生的结果常常是难以预见的, 但随着时间的推移, 这种影响也会逐渐暴露出来。因为海岸演变的历史是和流域变化及其为海岸的供沙系统改变紧密联系的。Milliman 等 (1992) 的研究认为, 过去数百年间, 全球各流域对海岸的供沙系统发生了巨大的变化, 这与其间大规模的森林开采、荒地开发、流域治理等有着密切的关系, 这些流域的供沙正是许多河口和海岸免遭侵蚀的物质保障。20 世纪初以来, 流域治理越来越受到重视, 特别是水土保持力度的加大和大量水库的新建使土壤侵蚀和输送不再自由。

水库修建的目的一般是发电、灌溉和防洪等, 近数十年来其巨大的环境效益逐渐受到重视, 三角洲海岸因水库建设导致泥沙来源减少而侵蚀后退的现象并不少见。如尼日尔河曾以 1.24 亿 t/a 的输沙率向海岸供沙, 由于阿斯旺水坝 (Aswan High Dam) 的修建, 超过 10% 的泥沙被其拦截, 尼日尔三角洲开始侵蚀后退 (Stanley 和 Warne, 1998); 在西班牙, 由于 20 世纪 60 年代 Ribarroja-Mequinenza 水库组合的修建, 使埃布罗 (Ebro) 河大约 96% 的泥沙淤积在水库中, 导致三角洲淤进停止和附近海岸侵蚀后退 (Sanchez-Arcilla 等, 1998); 同样由于流域内的人为影响, 密西西比河的泥沙输送量在 1963—1989 年间下降了约 40%, 并被认为是导致密西西比三角洲海岸侵蚀的主要原因 (Coleman、Roberts 和 Stone, 1998); 我国北方的滦河 1979 年以来由于引滦工程的实施, 河流供沙减少 95%, 使三角洲以平均 6m/a 的速率后退, 在河口附近最大蚀退速率高达 300m/a (钱春林, 1994); 黄河曾是世界上三大供沙河流之一, 但近年来入海流量大大减少, 甚至经常断流, 如 1997 年共有 330d 无水入海, 下游断流河道最长可达 700km, 利津站 20 世纪 90 年代末的泥沙通量仅为 20 世纪 50 年代的约 1/60 (Chen J. Y. 和 Chen, S. L., 2002; 王颖等, 1998); 同样由于长江来沙减少, 长江水下三角洲的淤积速率由 1958—1978 年间的 0.38m/a 降低到 1978—1997 年间的 0.08m/a, 淤积速率减小要比泥沙来源减小快得多。三峡工程和南水北调工程的实施使长江供沙减小到约 1.6 亿 t/a, 远远低于维持长江水下三角洲不受侵蚀的 2.6 亿 t/a, 三角洲的侵蚀在所难免 (Yang S. L. 等, 2003)。

人工挖掘海岸泥沙是目前全世界非常普遍的现象, 由此所致海岸直接侵蚀的例子比比皆是。Msangi J. P. 等 (1988) 指出, 坦桑尼亚海岸为修筑海滨宾馆而大量开挖沿海泥

沙,立即导致海岸的迅速蚀退,其他原因引起的海岸侵蚀远没有如此直接和显著。Borges等(2002)对葡萄牙亚述尔群岛的 Santa Barbara 海滩的侵蚀研究认为,由于过度采砂,该海岸过去的地貌、泥沙和动力格局被打破,海岸由基本稳定转化为强烈侵蚀。张忍顺等(2002)也曾指出,人工采砂是江苏海洲湾砂质海岸侵蚀的主要原因。此外,辽宁旅顺柏岚子海岸的砂砾堤,山东黄县、福建东山湾和湄洲湾的沙滩,江苏绣针河口的老虎沙均因人工开采而造成强烈侵蚀(季子修,1996;蔡锋等,2005)。

另外,温室气体排放导致全球变暖和海面上升以及海岸带抽取地下水导致地面下沉(表现为相对海面上升)间接引起海岸侵蚀加剧也已成为公认的事实,并在海平面上升引起海岸侵蚀方面成为关注的焦点问题之一。不恰当的海岸工程设施也可以导致或诱发局部侵蚀现象。

1.1.6 泥沙运动与海岸侵蚀

海岸工程师多从波浪、水流作用下的泥沙运动特性方面认识和研究海岸侵蚀和岸滩演变。由于泥沙运动是海岸侵蚀过程的最后环节,从泥沙运动机理上认识和研究海岸侵蚀得出的结论和趋势预测似乎会更可能接近实际情况。不过由于测量资料和研究手段本身的局限性,类似的研究多用于海岸局部变化或解决一些实际的工程问题。其研究范畴主要包括两个方面,即泥沙运动和岸滩形变。

1.1.6.1 波、流作用下的泥沙运动规律

泥沙起动、搬运和沉降是海岸侵蚀和岸滩形态变化的主旋律,泥沙运动规律的研究也主要集中在这些方面。

1. 泥沙起动

泥沙起动是泥沙运动研究的基础课题,也是认识泥沙运动的关键所在。水流作用下的泥沙起动研究已有上百年的历史,试验研究和理论分析的成果和公式相对较多。根据研究的出发点和表达形式,起动流速公式主要可以归结为由流速(平均流速或底流速)、功率和底部剪切应力表示。如 Shields (1963) (引自 Buffington, 1999) 通过大量试验研究得出泥沙起动临界剪切应力公式,并根据公式绘制出著名的 Shields 曲线。该公式和曲线被后人广为应用并加以修正,而且被推广应用到波浪作用下的泥沙起动研究(Madsen 等, 1976)。

对于大多数的海岸侵蚀而言,波浪掀沙和潮流输沙一般被认为是泥沙运动的主要形式。与水流作用下泥沙运动研究相比,由于波浪传播过程中的水质点运动本身的复杂性,波浪作用下泥沙运动的研究起步要晚得多,而且很多都是以水流作用下泥沙运动研究为基础。例如,Madsen (1976) 总结前人的研究成果,将单向水流 Shields 泥沙起动标准曲线引入到波浪条件,将各振荡流作用下泥沙起动试验资料换算成 Shields 参数,认为单向水流条件下泥沙起动 Shields 曲线也适用于振荡流条件。迄今为止,波浪作用下泥沙起动公式有数十种,这些公式大多是通过水槽试验和理论推导得出的,各有适用条件和局限性,在实际应用中必须考虑研究对象的特性和公式的适用性。

波、流共同作用下的泥沙起动也是泥沙运动研究方面备受关注的根本问题。但由于波浪和水流共同作用时的流态异常复杂,无论从机理上还是应用上,离实用要求尚有相当大

的距离。不过近年来国内外不少学者对波浪共同作用下的泥沙运动进行了有益的探讨。一般的做法还是通过合成波浪和水流各自对海床的底部剪切应力进行计算,不过由于对波浪和水流叠加的机理和叠加后的流态变化认识有限,计算结果有待进一步验证。

2. 输沙率

输沙率的计算是判断海岸泥沙收支平衡与否的主要依据,也是判断海岸是否侵蚀和侵蚀强度的基础。输沙率计算一般包括“总输沙率(总量计算)”、“动力计算”和“逐时计算”3种主要途径。

总量计算一般用于估算总的净输沙量。计算中不区分推移质和悬移质,多用于沿岸输沙率的计算。目前海岸工程普遍采用的 CERC (美国海岸工程研究中心) 公式就是基于这种方法得出的经验公式。

动力计算方法是用海岸动力与输沙率之间的经验和半经验关系建立公式。海岸动力因素通过输沙率计算公式中与动力相关的参数加以考虑,此类输沙率计算公式是将推移质和悬移质分别考虑的。就推移质而言,水流作用下的推移质输沙率计算相对成熟并已得到广泛应用,波浪作用下推移质的输沙率研究相对滞后。对于悬移质而言,由于泥沙运动更为复杂,目前主要研究推移质泥沙运动的机理、含沙量垂线分布等方面,但缺乏足够的现场资料对比,很多情况下其计算精度难以保证。

逐时计算输沙率是随着计算机技术的广泛应用而发展起来的,这种方法主要用来计算悬移质输沙率,计算式的基本形式为

$$Q_{si} = \frac{1}{T} \int_{t=0}^T U_i(z, t) C(z, t) dz dt \quad (1.1)$$

式中 Q_{si} —— i 方向的输沙率;

$U_i(z, t)$ —— i 方向的流速;

$C(z, t)$ ——含沙量。

这种计算输沙率的方法是进行岸滩形变计算的理论基础之一。

1.1.6.2 侵蚀性海岸平衡剖面

由于人们观察到在水动力(波浪和潮流)和泥沙特征相似的情况下海滩剖面形态也具有一定的相似性,从而引出了海岸平衡剖面的概念。研究平衡剖面的关键问题在于:①平衡剖面存在的证据;②平衡剖面形态的计算;③达到平衡剖面所需的时间。从19世纪末期提出平衡剖面这一概念以来,许多学者针对上述问题提出一系列关于平衡剖面的解释,根据考虑的不同角度,这些解释可以分为以下几类:①中立点假设;②海岸等级理论;③海岸剖面平行进退;④沿剖面方向零输沙;⑤海岸剖面形态的幂次方程表达;⑥数学、物理模型模拟海岸演变(Gao S. 和 Michael C., 1998)。

对于最终的平衡剖面表达形式,一般认为是海岸零输沙(沿岸和沿剖面均无净输沙),即

$$q_x = q_y = 0$$

式中 q_x 、 q_y —— x 方向(如沿岸方向)和 y 方向(如垂直海岸方向)的输沙率。

如果以泥沙总量守恒为基础,瞬时床面变化可用输沙率梯度表示为

$$\frac{\delta h}{\delta t} + \frac{\delta q_x}{\delta x} + \frac{\delta q_y}{\delta y} = 0$$

其中的第一项 ($\delta h/\delta t$) 代表沉积或侵蚀率, 是床面变化的决定性因素, 当该项为零时, 海岸剖面达到平衡。这样的平衡剖面只有在达到最终阶段的侵蚀性海岸才有可能实现。在海岸侵蚀的初始阶段, 由于泥沙的流失, 滩面逐渐降低, 随着滩面的下蚀和水深加大, 波浪对海底的作用力逐渐减弱, 当剖面各点水深达到波浪不能起动泥沙时便达到了上述平衡剖面。

稳定的平衡剖面需要满足两个条件: ①海岸过程存在负反馈机制 (即当控制海岸剖面形态的一个动力因素因某种原因而加强时, 将会促使一系列的其他因素发生变化, 这些变化反过来可以抑制其进一步加强); ②这种反馈机制同样控制着海岸系统的其他过程 (Gao S. 和 Michael C., 1998)。对于以波浪作用为主的砂质海岸, 波浪作用加强会使剖面下蚀、水深加大, 从而显著减小波浪对海床的作用。但对于以潮流作用为主的淤泥质海岸 (特别时开敞型淤泥质海岸), 剖面下蚀和水深加大并不能明显减小潮流对海床的冲刷, 负反馈机制不甚显著, 因此海岸剖面难以达到平衡。不过平衡剖面的研究思路仍常常被用来预测海岸未来的发展趋势。

1.1.7 海岸侵蚀与岸滩变异

海岸的侵蚀本身就是海岸地貌、物质组成、动力格局甚至海岸性质的变化过程。一般对海岸侵蚀的研究多关注侵蚀过程中的地貌和动力格局等容易被觉察的变化过程, 但对于一些缓慢的变化, 如沉积物组成, 仅在一些研究和论著提到海岸侵蚀中沉积物粗化的现象 (Silvester R. 等, 1997; 王艳红等 2003)。

对于淤泥质海岸, 其形成过程是大量泥沙供给的结果, 海岸侵蚀是泥沙来源不足引起的泥沙流失。但由于在淤泥质海岸形成过程中大量泥沙的供给削弱了波浪对沉积物的分选, 使淤泥质海岸的组成物质变化幅度较大 (分选较差)。在侵蚀过程中, 波浪和潮流对沉积物进行侵蚀的同时也对其做进一步的分选, 泥沙起动后细颗粒部分被输送到其他区域的可能性更大, 而相对较粗颗粒的泥沙就地或在附近重新落淤, 从而导致侵蚀过程中沉积物的粗化。随着侵蚀过程的进行, 粗化现象进一步发展, 甚至可使海岸性质发生变化 (如由淤泥质海岸过渡到砂质海岸)。

泥沙在海岸动力地貌过程中起着重要作用, 海岸侵蚀和地貌变化甚至动力格局都会受到海岸组成物质的影响。在苏北废黄河三角洲海岸的侵蚀过程中, 海底普遍不连续分布有侵蚀残留粗化层, 这对抑制海岸进一步下蚀有着重要的作用 (虞志英等, 2002)。在废黄河三角洲侵蚀性海岸南侧 (射阳河口—斗龙港口) 以及吕四侵蚀性海岸南侧 (蒿枝港—塘芦港) 的淤蚀过渡段, 尽管海岸侵蚀只发生在低潮滩 (高潮滩淤长), 但侵蚀部位的泥沙粗化现象已经非常明显 (王艳红等, 2003)。

1.2 海 岸 防 护

海岸防护是为应对海岸侵蚀而采取的工程措施。由于海岸侵蚀这一自然过程的长期存在, 海岸防护也已经有了悠久的历史。不过大规模的海岸防护工程建设始于 19 世纪末期, 海岸防护的研究也随之逐渐发展 (Charlier R. H. 等, 2005)。近数十年来, 随着海岸

带经济的高速发展,以保护的海岸免受进一步的侵蚀或扩大陆地面积(围垦)为目的的海岸防护工程建设进一步加速,全球多数海岸(包括一些淤长型海岸)都建立了不同形式的防护设施。由于侵蚀特征和防护目的的不同,海岸防护形式多种多样,各自的功能、造价、寿命、维护费用、环境影响和潜在的经济价值等差异明显。这些对工程的决策和实施均起着决定性作用。现代海岸防护理念多强调维持海滩健康(hold a healthy beach),因此软性工程(soft engineering)一般被认为比传统的硬性工程(hard engineering)更环境友好(environmentally friendly)。但在人口密集的海岸,当人们的生命财产受到侵蚀威胁时,采用硬性防护措施或许在所难免(Bohemen H. D. V., 1996)。

关于海岸防护工程设计,长期以来的研究和实践积累了大量的经验,而且已有诸多颇具参考价值的文献和规范等参考资料,并随着技术手段的提高逐渐加以完善。而且,海岸防护的作用往往并不仅仅是直接阻止泥沙流失,而是对造成侵蚀各种因素进行合理的干预以达到防护目的。因此,为了选择合理的防护形式,深入了解待防护岸段的动力泥沙环境、海岸侵蚀机制和趋势非常必要。在此前提下,分析各种防护形式所起的作用、可能产生的影响及其适用性成为海岸防护设计和研究的重点。下文以目前广泛应用的一些海岸防护形式的研究成果和工程实例分析,评述这些手段在海岸防护中的作用和影响。

1.2.1 海堤

海堤(sea wall)是平行海岸布置、阻止岸线进一步后退以保护陆域免遭侵蚀的一种防护形式,是海岸防护体系中的最后一道防线。海堤的建设和研究已有悠久的历史,是应用最广的海岸防护形式。关于海堤的研究主要在其设计方面,如断面形式、波浪爬高计算、越浪量、设计标准和稳定性等。因此在海堤设计中除考虑满足一定高程和坚固程度之外还需兼顾一定的消浪功能,并将外侧堤面设计为斜坡、弧形、阶梯、加糙或透空等形式(Dominic Reeve 等, 2004)。但海堤对堤外海滩侵蚀的防护不会有任何有效作用(Tart and Griggs, 1990);相反,海堤(特别是直立或近直立堤)造成的波浪反射可促使堤前滩面侵蚀加剧,而且随堤前水深的增大这种效应会更加明显(姜梅 2000; Raudkivi 和 Dette, 2002; 童朝锋等, 2002),这样的例子在国内外非常普遍。例如,江苏废黄河三角洲海岸今年的达标海堤兴建尽管暂时阻止了岸线的进一步后退,但堤前滩面下蚀明显加剧(虞志英等, 1994; 张忍顺等, 2002)。从防护对象看来,与其说海堤是海岸防护设施,不如说是陆地防护设施。

海堤的积极和消极作用可归纳如下:①海堤可直接把陆地和海洋之间的动力作用隔开,使陆地免受波浪、风暴等的侵袭,千百年来在固定岸线、防潮防浪等方面发挥了重要作用;②经海堤反射的波浪对堤跟的掏刷和堤前滩面的冲刷强烈,极易造成护坡的塌陷和滩面的下蚀,从而增加常年维护和重建的庞大费用;③海堤的修筑切断了陆域泥沙来源(河口除外),打破了海岸原有的泥沙平衡,加剧了堤外的侵蚀作用;同时使海岸侵蚀失去陆域缓冲,造成潮滩剖面坡度变陡,甚至缺失高潮滩,原有潮滩生态系统必将遭到破坏。

1.2.2 丁坝

具有导流、护岸、促淤等作用的丁坝(groin)在河道整治和海岸防护中有着广泛的

应用。丁坝防冲促淤效果及其引起的局部冲刷已有了不少有价值的研究成果,不过由于丁坝在河道整治方面的应用比海岸防护更为广泛,大多数研究成果集中在河岸丁坝作用及机理方面(如万春艳等,2003;应强等,2004;窦希萍等,2005)。

然而对于海岸防护工程中丁坝而言,波浪、潮流等动力作用远比单向水流作用为主的河道复杂,丁坝防护方面的研究多为丁坝修筑后岸线和岸滩剖面形态变化以及丁坝(群)合理的布置形式等方面,而且多为对工程实例防护效果研究(陈来华等,2004)。通用的理论计算模式非常少。目前预测丁坝建设后地形演变的一维数学模型较多,如 GENESIS (美国陆军工程兵团,USACE)、LITPACK (丹麦水工试验所,DHI) 和 UNIBEST (荷兰代尔夫特水利研究所,WLDlft) 等,但由于这些模型通常仅考虑波浪入射方向、丁坝长度与位置等有限因素,预测结果也仅限于岸线形态变化,对水下地形变化的预测难以实现,适用范围和预测精度受到一定限制。最近,USACE 的 Hanson 和 Larson (2000) 开发的一套 N-line 模型排除了上述一维模型中沿岸韵律模式的继承性,还可得出不同水深和地貌部位的冲淤变化。在具体的工程设计中,通常需要根据当地实测动力泥沙特征进行数值模拟或物理模型试验提出或优化工程布置。

海岸丁坝的作用主要是阻止或减缓沿岸流及沿岸流引起的沿岸输沙,因此多用于沿岸输沙率较大的侵蚀性岸段。在无沿岸输沙或沿岸输沙率非常小的岸段,丁坝对岸滩防护几乎没有作用。即使在有沿岸输沙的海岸,由于动力格局和海岸物质组成的不同,丁坝防护后岸滩的淤蚀动态差异很大。如在淤泥质海岸建造丁坝建筑物,由于斜向入射波破碎后使丁坝的上游侧动力加强,冲刷细颗粒泥沙组成的海滩,而在下游侧波浪掩护区形成悬沙淤积;在砂质海岸,泥沙运动形式以推移为主,丁坝拦截沿岸输沙后在其上游侧形成淤积区,而下游侧则因泥沙来源减少而形成冲刷(刘家驹,2002)。

由于丁坝所能防护的岸线范围非常有限,在侵蚀防护中一般沿岸布置一系列的丁坝群以实现对海岸的整体防护。根据美国《海滨防护手册》中的推荐,丁坝间距一般为丁坝长度的 2~3 倍。在丁坝群的下游,由于沿岸流的输沙能力大于上游来沙量,岸滩常发生冲刷。另外,当丁坝在拦截沿岸输沙的同时常在其上游一侧形成向海方向的沿堤流,泥沙随沿堤流向海输运会导致海岸泥沙流失。为解决上述不利影响,丁坝常与离岸堤和人工补沙等措施并用,或将丁坝坝头筑为丁字形以防止沿堤流的形成和泥沙流失(Silvester 和 Hsu 1997)。

合理布置的丁坝(群)常有以下主要功能(Reeve 2004):①阻止或减少沿岸输沙,对稳定岸滩和岸线具有一定作用;②将强潮流“挑离”近岸;③减小人工补沙岸滩的泥沙流失;④控制海湾内泥沙的季节性输运;⑤减缓其他大型海岸工程建设引起的波浪冲刷;⑥加宽和改善休闲沙滩。同时,如果丁坝(群)工程布置和设计不够合理,可能引起以下不利结果:①在高沿岸输沙率海岸,如果丁坝设计中没有留出泥沙通道或进行人工补沙,丁坝下游的很大范围内将出现强烈的侵蚀;②丁坝下游的强烈侵蚀可能危及丁坝本身的安全;③如果出现异常风浪(与设计波浪方向有较大夹角)可能逆转丁坝上两侧的冲淤形势;④由于大风浪时泥沙可能随沿堤流向海流失,丁坝对海岸防护并无积极作用;⑤处于丁坝掩护区的高滩淤积的同时可能会使低滩发生侵蚀;⑥丁坝布置一般与波浪入射方向夹角很小,防浪和消浪作用不大。