

沿岸流

Experimental and Numerical Study
on Longshore Current Instability

不稳定实验和数值研究

沈良朵 著



海洋出版社

沿岸流不稳定实验和数值研究

Experimental and Numerical Study on
Longshore Current Instability

沈良朵 著

海洋出版社

2019年·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

沿岸流不稳定实验和数值研究/沈良朵著. —北京: 海洋出版社, 2018. 8

ISBN 978-7-5210-0188-4

I. ①沿… II. ①沈… III. ①沿岸流-海洋动力学-研究 IV. ①P731.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 207304 号

责任编辑: 高朝君 薛菲菲

责任印制: 赵麟苏

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编: 100081

北京朝阳印刷厂有限责任公司印刷

2019 年 1 月第 1 版 2019 年 1 月北京第 1 次印刷

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 13.75

字数: 292 千字 定价: 68.00 元

发行部: 010-62132549 邮购部: 010-68038093

总编室: 010-62114335 编辑室: 010-62100038

海洋版图书印、装错误可随时退换

目 次

1 绪 论	(1)
1.1 研究背景和意义	(1)
1.2 沿岸流研究进展	(2)
2 平均沿岸流实验研究	(9)
2.1 实验布置和实验方法	(9)
2.2 平均沿岸流均匀性和重复性	(16)
2.3 平均沿岸流剖面特征	(23)
2.4 小结	(33)
3 缓坡海岸平均沿岸流速度剖面特征	(34)
3.1 时均沿岸流模型及其简化解析解	(34)
3.2 模型参数对平均沿岸流速度剖面影响	(41)
3.3 平均沿岸流实验数值模拟结果	(53)
3.4 小结	(66)
4 沿岸流不稳定实验研究	(68)
4.1 沿岸流不稳定实验方法	(68)
4.2 沿岸流不稳定谱特征	(73)
4.3 墨水运动反映的沿岸流不稳定特征	(84)
4.4 小结	(105)
5 沿岸流线性不稳定分析	(107)
5.1 缓坡海岸沿岸流线性不稳定性特征	(107)
5.2 实验沿岸流线性不稳定性分析	(114)
5.3 波动周期与实验测量结果的对比	(124)
5.4 沿岸流线性不稳定空间变化特征	(126)
5.5 小结	(130)
6 沿岸流非线性不稳定特征数值研究	(132)
6.1 沿岸流非线性不稳定及物质输移扩散的数学描述	(132)
6.2 不规则波辐射应力的数学描述	(144)
6.3 模型参数对沿岸流不稳定的影响	(149)
6.4 实验中沿岸流非线性不稳定特征数值模拟	(154)

6.5 小结	(189)
7 结论与展望	(191)
7.1 结论	(191)
7.2 创新点	(192)
7.3 局限与展望	(193)
参考文献	(194)
附录 A 波浪和水流共同作用下的底摩擦力	(201)
附录 B 墨水图像处理方法	(203)
附录 C 平均沿岸流速度剖面及其对应的不稳定增长模式	(210)

1 绪 论

1.1 研究背景和意义

陆地和海洋交界的海岸带和近岸海域是各种动力因素最复杂的地区,波浪在岸滩上演化、破碎,这就使得泥沙和各种污染物的输移规律变得十分复杂,与单纯潮流作用下的运动规律有着较大的差别。海岸带是经济活动较为发达的地区,海岸带的开发、利用和保护直接影响沿海地区的经济开发与建设。我国拥有总长度约 18 000 km 的大陆海岸线,有非常辽阔的海域,21 世纪我国在海岸带的开发利用方面前景广阔^[1]。近岸海域的水动力学研究是解决海岸演变、防护及开发利用的一个重要的理论基础。因此,对近岸海域水动力问题的研究具有重要的现实意义。

近岸海域水动力(包括沿岸流、裂流、海底回流和近岸环流等)是近岸污染物运动、泥沙输移以及海岸变形的主要动力因素^[2-4]。它涉及波浪破碎、波浪边界层以及湍流等强非线性和黏性流体运动等这些现有研究尚未解决的力学问题,运动规律比较复杂。近岸海域水动力研究中最突出的是沿岸流的问题,沿岸流对于沿岸泥沙运动等有很重要的作用。Fleming 等^[5]研究指出,10%的沿岸流预报误差可能导致 70%的沿岸输沙误差。

对于沿岸流的研究,Longuet-Higgins 等^[6]提出了波浪中辐射应力的概念,为近岸流系的理论研究打下了基础,其研究表明,沿岸流主要是由辐射应力作用和沿岸方向波高分布不均匀而导致波浪增水不均匀引起的(Longuet-Higgins 等^[6,7])。随着对沿岸流认识的逐渐深入,Oltman-Shay 等^[8]首先在现场沿岸流实验中发现沿岸流存在动态特性,即速度矢量存在左右摆动,他们通过数据分析证实在实验中产生的波长为 100 m、波动频率在 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ Hz 波生沿岸流范围内的波动为沿岸流自身的一种不稳定运动。所以沿岸流的研究要涉及沿岸流不稳定运动问题,它对研究近岸海域内的污染物和沉积物输运等都有很重要的意义。Miles 等^[9]通过研究指出,沿岸流不稳定运动对于沉积物输运有很大影响,沉积物在垂直岸方向输运 16%和沿岸方向输运 12%都是由沿岸流不稳定运动引起的。Russell^[10]指出,海岸侵蚀与沿岸流不稳定运动有很大关系。Aagaard 等^[11]和 Smith 等^[12]也指出,近岸泥沙运动会受到一定程度的沿岸流不稳定运动的影响。Coco 等^[13]和 Sanchez 等^[14]的研究表明,沿岸流不稳定对海岸韵律地形的形成起主要作用。有关研究也表明,沿岸流不稳定运动还与裂流^[15,16]、波浪爬高^[17,18]等的变化有比较密切的关系。

目前对沿岸流的实验研究主要针对现场实验和较陡坡实验情况,为了更深入地了解缓

坡情况下的沿岸流特征,有必要进行缓坡情况下的沿岸流实验。基于此,本书通过缓坡沿岸流实验来研究缓坡情况下的沿岸流特征,以便为今后研究海岸变形、污染物和泥沙等各种复杂动力环境下的运动规律奠定水动力学理论基础。这对于指导海洋沿岸环境保护、海域环境评价、水质规划、污染物控制及海洋排污工程的设计等都具有重要的现实意义。

1.2 沿岸流研究进展

1.2.1 平均沿岸流研究

人们很早就已经认识到了沿岸流现象^[6-8,19,20],现有的对平均沿岸流的研究,按其理论出发点的不同,可以大致归纳为以下三类:(a)将水体质量的连续性作为切入点,如 Inman 等^[21]、Brebner 等^[22]和 Galvin^[23]的研究中采用的方法。(b)用能流或动量流来推导公式,如 Putnam 等^[24]所提出的研究方法。(c)用波浪辐射应力来推导公式,如 Longuet-Higgins^[7]、Bowen^[25]和 Thornton^[26]的研究中采用的方法。前两类方法虽在有些研究中经过部分的实验检验,但是因为受当时实验条件的限制,目前还不能证明其所做的论证是充分的。从波浪辐射应力的概念出发分析沿岸流,是对沿岸流研究的重要发展。该方法认为,波浪斜向入射,从深水区传到浅水区,因水深减小引起浅水变形,使得波高增大,最终发生破碎,而波浪破碎后通过破波带时,其动量流(辐射应力)沿岸方向的分量变化并不能完全由平均水面坡降力来平衡,还需要由底部剪切应力(底摩擦力)来平衡辐射应力梯度。因为时均剪切应力只有在发生时均流动时才存在,这使得处于衰减中的自由表面波浪将沿岸波动动量转化为时均沿岸流动,从而产生了波生沿岸流。

当然,这些理论的可靠性和应用范围还需要进一步与准确的实验结果进行比较。实验一方面可以用来检验这些理论结果的正确性;另一方面也可以用于指导和改进这些理论。而且在这些理论的沿岸流模型中,有些参数是需要通过实验结果来标定的。

现有的沿岸流实验包括现场沿岸流实验和沿岸流模型实验。Galvin 等^[27]、Komar^[28]和 Basco^[29]对沿岸流做了现场观测, Birkemeier 等^[30]对沿岸流现场实验 DELILAH、DUCK94 和 SANDYDUCK 做了总结。进行全面的现场观测所需的费用很高,而且现场实验受观测时环境的不可控制性以及观测因时、因地的变化性的影响较大。Visser^[20]、Putnam 等^[24]、Galvin 等^[27]、Brebner 等^[31]、Mizuguchi 等^[32]、Kim 等^[33]、Reniers 等^[34]、Hamilton 等^[35]以及 Zou 等^[36,37]均对沿岸流进行了实验研究。Galvin 等^[27]测量了水深平均沿岸流沿垂直海岸方向的分布,指出因实验水池的长度有限而使得沿岸流不能达到均衡状态。Visser^[20]在代尔夫特理工大学的港池内将水泵维持的水流循环系统应用到沿岸流的测量中,进行了坡度为 1:10 和 1:20 的平坡沿岸流实验。Hamilton 等^[35]在美国陆军工程师研究和发展中心的海岸和水力学实验室进行了坡度为 1:30 的平坡沿岸流实验,研究表明,采用水泵维

持水流循环, 流量在一定范围内变化时, 不会显著地影响到沿岸流的沿岸均匀性。

关于沿岸流模型实验所采用的水流循环模型, 目前研究采用的主要有 5 种类型 (图 1.1): 类型 1 水流循环 (Putnam 等^[24]) 是在水池的离岸区域进行的; 类型 2 水流循环是在波导墙的下游留有一开口, 并在造波板的下面留有一间隙让水流进行循环 (Galvin 等^[27]; Mizuguchi 等^[32]); 类型 3 水流循环在两边的波导墙破波带处有开口, 在造波机后面或者岸滩下面通水管, 这样就能使水体在水池岸滩的末端和下游之间水位差的驱动下循环; 类型 4 水流循环和类型 3 相似, 只是水流循环是在造波板的后面和下面进行, 在波导墙上端用一小流量水泵来加强循环 (Kamphuis^[38]); 类型 5 水流循环采用的是一种圆形水池, 有圆周形岸滩, 水池中央处设有螺旋形造波机 (Dalrymple 等^[39])。

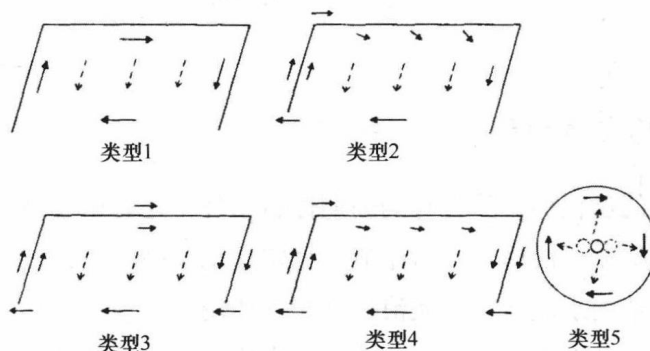


图 1.1 5 种实验水池循环模型 (箭头表示水流方向)

Visser^[20] 为了在实验水池内得到均匀的沿岸流, 采用了与上述不同的一种新的实验方法和水池设置, 就是将水泵维持的水流循环系统应用到沿岸流的测量中, 该实验是在改进类型 3 的实验水池中进行的, 水池长 34.0 m、宽 16.6 m、深 0.68 m, 采用由 0.4 m 宽的橡胶面板构成的蛇形造波机造波。实验是在 1:10 和 1:20 两种不同坡度水泥地形上进行的。地形置于造波机对面并且与造波机平行。实验采用了波导墙, 波导墙与造波机呈一定夹角放置。Visser 的实验水池对类型 3 水池做了以下改进: (a) 由造波机、波导墙以及地形所组成的区域以外的水流循环完全可由水泵来控制; (b) 波导墙下游开口的宽度没有必要等于破波带的宽度; (c) 改善波导墙上端到岸线之间流入水流的分布 (可以增加此间均匀沿岸流的长度)。但是采用这种方法进行实验的一个缺点是必须在实际的测量开始之前确定以下几个量值: 泵的循环流量 Q 和波导墙下游开口的宽度 W_d (如图 1.2 所示)。而实际实验中很难控制这两个参数, 这就会影响到沿岸流的均匀性, 而且也增大了实验中的计算量和人力、物力, 增加了实验经费。本书实验应用被动的循环系统以探讨不用水泵来维持水流循环的新途径, 关于被动循环系统产生的沿岸流的沿岸均匀性将在第 2.2.1 节中讨论。

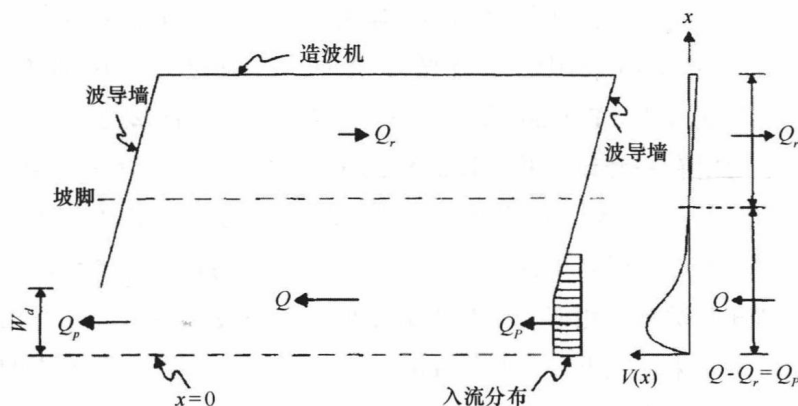


图 1.2 水流循环系统

1.2.2 沿岸流不稳定运动研究

在波浪传向海岸的过程中,除自身的周期性运动外,还有由于波浪非线性和波浪破碎而产生的包括质量输移流、沿岸流、沿岸流不稳定运动及破波带内的旋涡运动等多种形式的水流运动。这些复杂的水流运动和波浪运动相互作用,会使海岸区域的物质输移扩散及泥沙运动出现复杂的运动形态。波浪的非线性使水质点的运动轨迹不封闭从而产生了质量输移流^[40,41];波浪斜向入射传至海岸时,为平衡辐射应力梯度,将沿岸波动动量转化为时均沿岸流动从而产生了波生沿岸流。随着对沿岸流认识的深入,近些年人们还发现沿岸流存在不稳定现象^[8,42-45],即沿岸流在沿岸流动的同时,速度矢量还存在长周期左右摆动。该沿岸流不稳定现象也被称为剪切波。Oltman-Shay 等^[8]通过观察发现了近岸破碎区周期 1 000 s、波长 100 m 沿岸传播波动的存在。这些波动比观察到的对应频率的重力波波长要小得多。这些像波浪运动一样沿岸传播波动的存在及其属性与破波区沿岸流的存在、强度和方向有关。自 Oltman-Shay 等^[8]在现场观测到沿岸流不稳定运动以来,人们就对其特性进行了很多研究。Bowen 等^[42]利用他们建立的剪切不稳定模型对该现象作了解析分析,指出沿岸流产生不稳定运动的动力是沿岸流在垂直岸方向产生的剪切 V_x ,相当于引起潮流的“科氏力”,并且他们分析得到的频率波数结果与 Oltman-Shay 等的实验结果相符合,所以他们也将观测到的这种现象称为剪切波。

Dodd 等^[44]基于最不稳定线性模式研究发现理论预测和实验观察到的波长和波浪周期吻合良好。Allen 等^[46]通过有限差分数值求解浅水方程研究了破波区沿岸流有限幅值剪切不稳定的非线性动力特性。Özkan-Haller 等^[47]通过辐射应力梯度项和波流相互作用项耦合研究了破波区沿岸流波流相互作用的剪切不稳定效应。Newberger 等^[48]通过使用折射波浪模型和带有水深平均相速度平均自由表面重力波效应项的三维原始流模型扩展了 Özkan-Haller 等^[47]的模型,结果表明,在底摩擦相对较大的区域,流对波的效应倾向于阻止不稳

定的发展。Kennedy 等^[49]进行了包含辐射应力和多普勒转换的线性稳定分析。Bühler 等^[50]、Chen 等^[51]和 Terrile 等^[52]利用相位重解模型（没有考虑波流之间的区别）求解了流场，研究了近岸环流中的涡旋输移运动。

到目前为止，对沿岸流不稳定运动的研究中数值计算方面的较多，而实验方面的较少。现场实验有 Duck, North Carolina^[53]所做的两次沿岸流实验，并在实验中观测到沿岸流不稳定运动。Reniers 等^[34,54]利用水泵水循环模型在实验室内测量了沙坝和平坡地形条件下的沿岸流不稳定运动。邹志利等^[55]，金红等^[56]在大连理工大学港口、海岸与近海工程国家重点实验室通过实验观测到沿岸流不稳定运动，给出了在平面斜坡地形条件下沿岸流随时间周期性变化的特征，同时给出了沿岸流不稳定运动导致的相应的墨水运动特征。任春平^[57]和 Ren 等^[58]利用最大熵谱估计分析了邹志利等^[55]在大连理工大学实验室进行的沿岸流不稳定运动实验，指出 1 : 100 坡度和 1 : 40 坡度地形条件下规则波和不规则波的波动周期分别约为 50 s 和 100 s；同时其利用实验测量得到的墨水运动轨迹分析了不稳定运动的传播速度；利用三角函数回归法分析了不稳定运动的波动幅值；利用线性不稳定模型数值求解了实验中沿岸流不稳定运动的增长模式，结果与实验结果吻合良好。李亮^[59]基于二维近岸环流方程，采用三阶预报、四阶校正时间步进的 Adams-Bashforth-Moulton 方法数值模拟了平面斜坡海底地形上沿岸流的不稳定运动，分析了底摩擦系数、沿岸方向计算长度对沿岸流不稳定运动的影响。

国外学者对沿岸流不稳定运动数值方面的研究主要集中在沿岸流线性不稳定数值模型^[43-45,60-62]和沿岸流不稳定运动的非线性研究^[46,63-65]，即这些不稳定随时间将发生怎样的变化。除了这些研究外，其他一些学者在沿岸流不稳定运动产生的机理方面也做了研究^[66,67]。下面将详细介绍这些方面的研究进展。

(1) 沿岸流线性不稳定

Bowen 等^[42]用线性不稳定理论解释了 Oltman-Shay 等^[8]现场观测到的沿岸流不稳定现象，并将这种周期性低频振荡称为剪切波或者沿岸流不稳定运动。他们通过一个简单的流速剖面（其沿岸流离岸一侧的背景旋只有一个极值）阐述了剪切不稳定机理。这种情况下，不稳定与后剪切极值密切相关，他们的模型与 Oltman-Shay 等^[8]所观测到的结果吻合良好。Putrevu 等^[43]、Dodd 等^[60]和 Falqués 等^[68]的研究基于线性剪切波的理论分析，考虑的沿岸流只有一个后剪切极值，因此称为后剪切。Reniers 等^[54]通过实验表明，基于后剪切不稳定所预测的频率和波数与所测量的值吻合良好。

Dodd 等^[44]比较了平底和沙坝剖面的稳定属性，发现后者由不止一个不稳定模式增长起来。因为这种情况的背景旋存在两个极值，一个与后剪切（BS）相关，另一个与前剪切（FS）相关。其中，沙坝上最快的增长模式为与前剪切有关的模式，第二快的为与后剪切有关的模式。因此他们得出结论，对于沙坝剖面，后剪切可能不太重要。此外，一些基于非线性剪切波（如 Allen 等^[46]，Özkan-Haller 等^[65]）的理论考虑了拥有两个拐点的

基本稳定的沿岸流剖面，但是他们的非线性分析仍然建立在线性分析所得到的不稳定波长计算结果的基础上。这些研究都表明，在某些情况下，剪切波的低频调节可能是由前剪切和后剪切的相互干扰所引起的。

Baquerizo 等^[69]通过考虑基于 Bowen 和 Holman 的扩展模型，将垂直岸线方向的速度分为四个区域，分别得出相应的线性不稳定特性的解析解。他们详细研究了两种不稳定模式的存在和特性，一个与沿岸流峰值离岸一侧背景旋极值（后剪切模式）有关，另一个与沿岸流峰值向岸一侧背景旋极值（前剪切模式）有关。最后，分析了拥有一个最大值并且在它两侧各有一个拐点的沿岸流速度剖面，给出了它的特征波长、频率、流场以及前剪切和后剪切模式占优的条件，并证明了由于在沿岸流向岸一侧背景旋存在第二极值，也会引起沿岸流不稳定。前剪切波引起的增长率主要取决于前剪切，但也依赖于沿岸流的最大值和宽度。前剪切占优还是后剪切占优，主要决定于这些参数值的大小。在某种条件下，两种不稳定波浪在相近的波数和角频率下拥有类似的增长率，这使得在沿岸方向可能会形成剪切波。基于真实沿岸流剖面（由 1980 年利德贝特海滩近岸泥沙研究实验数据拟合得到的平均沿岸流剖面）的数值分析证明了该解析模型的正确性，该平均沿岸流剖面在沿岸流最大值向岸一侧存在一个背景旋极值，同时考虑前剪切和后剪切，结果与实验结果吻合良好，而仅考虑后剪切，结果则与实验结果差别较大。

（2）沿岸流非线性不稳定

线性不稳定理论只适用于小波幅的剪切波： a/L 远远小于 1， a 和 L 分别为剪切波的波幅和波长。当不稳定剪切波的波幅达到有限幅值之后，需要用非线性不稳定模型来分析，因为随着沿岸流不稳定运动的进一步发展，由不稳定引起的扰动速度场、波面变化等使得原来线性不稳定模型中的一些假定不再成立，包括较小的扰动项和忽略掉的非线性项（非线性作用较强时，不能忽略）。

研究非线性波浪的一个有效方法是使用通过多尺度渐近展开得到的简单数学模型。同原始的浅水方程相比，这些模型一般应用范围有限，但只要潜在的假定是有效的，它们就能有效地描述非线性剪切波必要的动力特性。Dodd 等^[45]利用弱非线性理论对海滩上的沿岸流不稳定进行了解析研究，结果表明，当沿岸流不稳定达到有限幅值后，就会改变平均沿岸流的分布。虽然弱非线性理论在超出线性区域的范围时对于理解不稳定运动的发展是有用的，但它仍局限于小波幅波浪的情况。对于浅水中所观察到的强非线性剪切波不再有效。

Allen 等^[46]用数值模拟详细分析了平面斜坡地形下沿岸流不稳定运动受底摩擦系数和计算域在沿岸方向长度的影响。他们采用“刚盖”假定，同时忽略了侧混的影响，在给定初始时刻沿岸流流速分布的基础上，研究了在不同的底摩擦系数和不同的沿岸方向计算域长度的条件下，沿岸流不稳定运动随时间变化的特征。数值结果表明，随着底摩擦系数的逐渐减小，速度波动幅值会逐渐增大，不稳定运动会变得更为活跃，由最初明显的周期性

波动逐渐发展为出现群的特征,进而产生倍周期分岔并最终达到混沌状态。在较小的底摩擦系数的情况下,沿岸方向计算域取多倍不稳定波长与取 1 倍不稳定波长相比,其速度时间历程上会出现很小幅值的波动,并易出现阶段性的平台期;对于较大的底摩擦系数,计算域沿岸方向的长度对不稳定运动的影响不大。

Özkan-Haller 等^[70]用考虑底摩擦和侧混影响的非线性浅水方程对 SUPERDUCK 实验中的沿岸流不稳定运动进行了数值研究。他们讨论了底摩擦与侧混效应对不稳定运动结果的影响,结果表明:底摩擦系数越小,则平均沿岸流越大,相应的速度波动幅值也越大,产生的涡旋运动也更剧烈;侧混系数越小,则速度时间历程波动幅值越大,不稳定运动波长越小,相应的涡旋运动也更剧烈。此外,他们进一步将数值计算结果中速度时间历程、波动传播速度和最后的平均沿岸流与实验结果进行了一一比较,结果表明,数值模拟结果与实验结果吻合较好。

Slinn 等^[63]用考虑底摩擦而没有考虑侧混的非线性浅水方程研究了两个沙坝地形上的剪切不稳定。他们发现底摩擦系数对不稳定运动波动幅值有较大影响:当底摩擦系数较大时,剪切波呈现等幅波动,与线性不稳定结果类似;当摩擦系数较小时,不稳定运动波动幅值逐渐变得不规则。此外,他们还指出,不稳定运动会在破波带内引起动量掺混,使得发生不稳定运动之前的速度剖面重新分布。

综上所述,上面提到的对沿岸流不稳定的研究中,当初始的平均沿岸流逐渐发展成有限幅值波动的沿岸流不稳定运动之后,所有研究者的思想都是基于 Bowen 等^[42]所用的线性不稳定理论。

(3) 沿岸流不稳定运动产生的其他理论机理

对于 Oltman-Shay 等^[8]观测到的沿岸方向的长周期波动现象,除了沿岸流线性不稳定和非线性不稳定理论的解释之外,还有一些学者认为,这些振荡是一个受外力作用的现象。Shemer 等^[67]认为,沿岸流和辐射应力的振荡可能是由于由一个载波(主频波)和两个最不稳定 Benjamin-Feir 副频波组成的三波系统长时间演化引起的。Haller 等^[66]提出离岸波群可以直接引起低频的波浪运动。Dodd 等^[62]和 Shrira 等^[71]研究表明,通过三波相互作用可以导致爆发式不稳定产生。尽管这些理论能从一定程度上解释 Oltman-Shay 等^[8]观测到的现象,但是到目前为止,研究最多、应用最广并且较成熟的仍然是线性不稳定理论。

1.2.3 沿岸流作用下物质输移扩散研究

波浪破碎会导致流体产生旋涡运动^[46,70],沿岸流不稳定运动同样也伴随很强的旋涡运动。这些复杂的旋涡运动必然会对海岸泥沙运动和污染物输移扩散产生较大影响。因此,研究由波浪斜向入射发生破碎而形成的波生沿岸流(可能进一步发展成沿岸流不稳定运动)作用下的物质输移扩散具有重要意义。

Feddersen 等^[72]通过高阶 Boussinesq 模型数值模拟了加利福尼亚亨廷顿海滩附近波浪和沿岸流共同作用下 HB06 染料的扩散实验,模拟结果与破波区染料输移扩散现场实验观测到的低频涡旋和平均沿岸流吻合良好。Clark 等^[73]通过对流扩散模型与 Boussinesq 模型耦合,数值模拟了破波带内染料示踪的实验结果,结果表明,与实验观测值相似,模拟得到的总的垂直岸线方向的扩散率与以低频涡旋 ($0.001 \sim 0.03 \text{ Hz}$) 为主导的混合长度参数成正比。Winckler 等^[74]推导了破波区溶质输移传播和对流扩散方程,对平面海滩沿岸流作用下的瞬时源和连续源运动进行了数值模拟,结果发现,总的对流速度等于由辐射应力引起的稳定流与来自波动的速度和浓度的协方差的贡献相加,溶质除了沿岸方向的输移外,还向岸漂移。孙涛等^[75,76]用数值模拟研究了波浪、潮流作用下渤海湾近岸海域污染物的输移扩散规律,并指出,在波浪破碎区内潮流对污染物输移扩散的影响明显小于波浪变形、破碎形成的近岸流对污染物输移扩散的影响。唐军等^[77-80]通过实验模拟研究了缓坡海岸带(坡度为 $1:100$ 和 $1:40$)波浪场中污染物的运动,给出了污染物在波浪破碎区和非破碎区运动范围的变化,讨论了在规则波和不规则波作用下,波浪破碎区和非破碎区污染物运动的宏观变化趋势。张庆杰^[81]通过将近岸环流方程与物质输移扩散方程耦合,计算了沿岸流不稳定情况下的墨水扩散,并分析了实验中观察到的墨水摆动现象。

物质输移扩散的研究中最为关键的是扩散系数的研究。邹志利等^[82]通过在沿岸流流场中投放墨水点源并采用 CCD 摄像机摄像,测量了点源扩散过程,进行了沿岸流中混合系数的实验研究。Clark 等^[83]通过沿岸流作用下破波区染料扩散实验,得到垂直岸方向的扩散系数,它与由破波区宽度尺度和由破波区涡旋所引起的低频水平旋转速度尺度参数化的混合长度参数一致。Pearson 等^[84]基于波浪和沿岸流共同作用下的扩散实验,表明混合强度随波高平方的增加而增加,但这种变化综合了多种混合机制的影响。

2 平均沿岸流实验研究

波浪在近岸处的破碎将产生沿岸流。人们对沿岸流的理论研究已有很长的历史,但对沿岸流的实验研究,尤其是对平面缓坡地形条件下沿岸流准确分布研究的结果并不多。Visser^[20]在代尔夫特理工大学的港池内进行了坡度为 1:10 和 1:20 的沿岸流实验。Hamilton 等^[35]在美国陆军工程师研究和发展中心的海岸和水力学实验室应用声学多普勒流速仪 (ADV) 测量了坡度为 1:30 的沿岸流。他们都是在相对较陡的坡度上进行的沿岸流实验。邹志利等^[36]在大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室进行了 1:100 和 1:40 缓坡沿岸流实验,但他们采用的是电阻式流速仪,且布置在离岸线较远处,使得沿岸流最大值近岸一侧流速仪较少,很难得到准确的平均沿岸流速度剖面,尤其是近岸一侧的速度分布。而沿岸流近岸一侧的形状对沿岸流不稳定有重要影响^[69],针对这一情况,为了解决缓坡沿岸流的分布问题,观察其分布的具体形状及其对沿岸流不稳定的影响,本书通过在近岸一侧布置较多高精度的 ADV 流速仪,重新进行了 1:100 和 1:40 两种坡度条件下的沿岸流实验,并获得了缓坡地形条件下不同于沿岸流解析解形式的平均沿岸流速度分布。

本章首先介绍实验布置、实验方法和波况,然后分析平均沿岸流测量结果的重复性和平均沿岸流沿岸的均匀性,在此基础上分析了 1:100 坡度和 1:40 坡度情况下波高、波浪增减水以及平均沿岸流速度剖面的基本特征,并用 Allen 形式^[46]的沿岸流剖面拟合了各组不同波况下的沿岸流剖面。

2.1 实验布置和实验方法

2.1.1 实验布置及地形

实验在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室多功能综合水池内进行,该水池长 55.0 m、宽 34.0 m、深 1.0 m。为了研究缓坡沿岸流的分布特征,实验选取了 1:100 和 1:40 两种坡度,这对应于缓坡情况,而以前研究的均为较陡坡情况。实验在这两种坡度平直海岸模型上测量了沿岸流的流速分布,同时也测量了波面升高在垂直岸线方向的分布。为了更清晰地观察沿岸流的流动情况,实验所用地形采用白色水泥制作,形成白色背景,并在地形上绘制了 1 m×1 m 的黑色网格,以形成较强的对比效果,同时,此平面斜坡地形由于底摩擦引起的耗散相对较小,更有利于沿岸流不稳定的发展,为进一步研究沿岸

流不稳定做准备。海岸模型与造波机呈 30° 放置，以增加海岸线的长度，这也让沿岸流不稳定有更多的发展空间。为了使 $1:100$ 坡度和 $1:40$ 坡度情况下斜坡段长度均为 18.0 m ，实验对 $1:100$ 和 $1:40$ 地形坡前静水水深分别取 0.18 m 和 0.45 m ，坡脚距造波板最短距离为 8.0 m ，最长距离为 22.5 m 。为了使实验区域内不受外面水流影响，防止水流进入，实验在造波机处到模型的坡脚处之间布置了波导墙，并且在波导墙内侧放置了消浪网以防止波浪的反射。静水线以上斜坡段仍留有 3 m 多的宽度，以给定足够多的波浪爬坡长度。以 $1:100$ 坡度为例（ $1:40$ 坡度仅是相应的坡度和水深不同），如图 2.1 所示，坐标系 (x, y) 的原点在静水线的上游端， x 轴正方向指向离岸方向， y 轴正方向指向下游方向。模型与周围三面水池壁都留有 4 m 多宽的间隔，其水深与造波板前平底处水深一致，实验中会形成沿岸方向的平均水位差，产生由沿岸流带动的水池内水体的循环。图 2.1 的下图为垂直岸方向的实验地形，图 2.2 为前后两个视角下的实验总体布置。

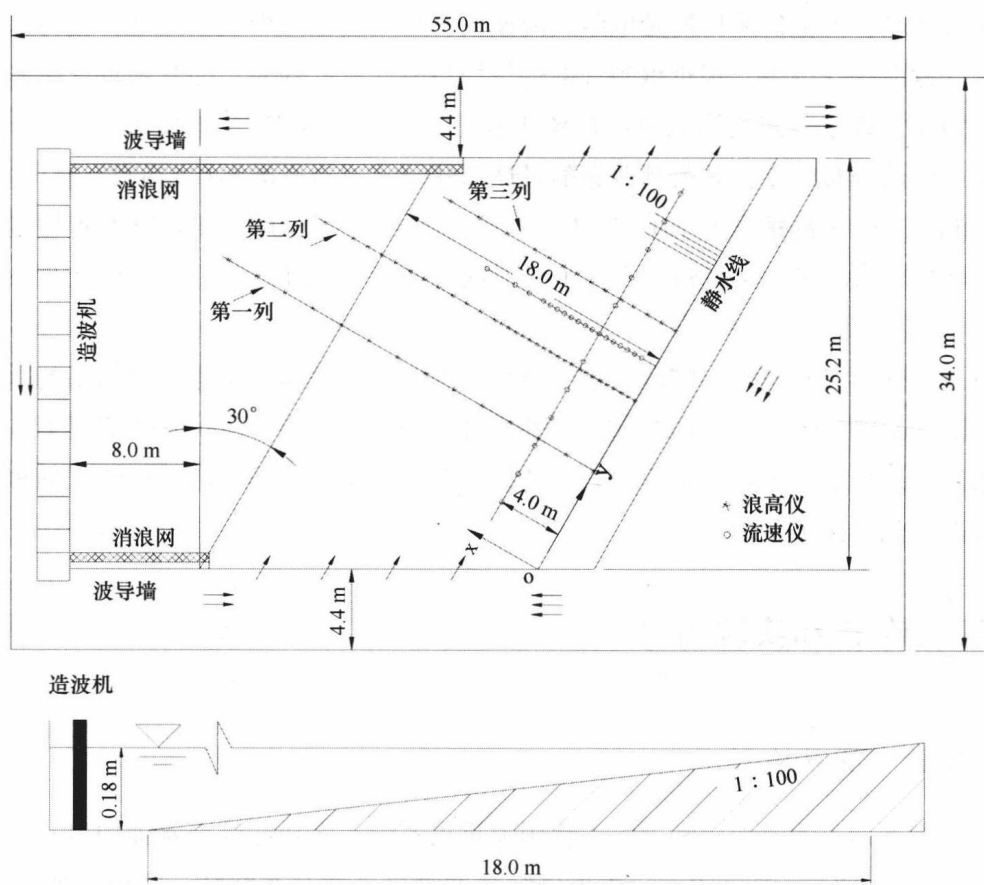


图 2.1 实验布置及地形

实验中沿岸流流速由 Nortek 生产的 ADV 流速仪测量得到，这种流速仪的测量精度为 $0.5\% \times \text{测量范围} \pm 1\text{ mm/s}$ 。本实验采用 29 个 ADV 流速仪，因数量较多、测量范围较广、距离较远，故 ADV 采用无线方式进行通信，如图 2.3 所示（通过电脑主机上的无线接收

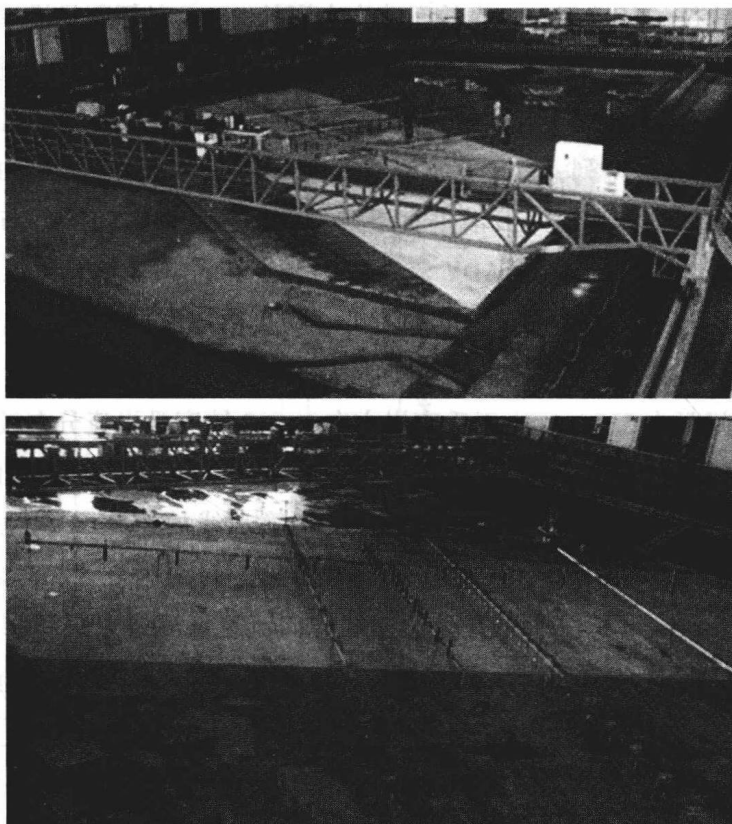


图 2.2 实验布置 (上图) 和测量仪器布置 (下图)

上图：海岸模型位于水池中央，其两侧和后侧与池壁有 4~8 m 的间隔，可形成维持沿岸流的循环通道。下图：两列 ADV 分别平行和垂直于海岸布置，分别用来测量沿岸均匀性和垂直岸方向的速度分布；三列浪高仪垂直于海岸布置，用来记录波浪条件



图 2.3 ADV 通过无线方式进行通信

器实时接收流速数据)，这样可以减少数据线的连接，使整个实验场地布置更加整洁，也使得采集后的多条数据同时记录在一个文件中，从而使以后的数据处理和应用更加方便。

实验中的 ADV 流速仪, 其端部与水底的间隙为水深的 $1/3$, 以便测量沿岸流沿水深的平均值 (对于对数分布的流速分布来讲, $1/3$ 处代表整个流速分布的平均值, 张振伟^[85] 的波生流垂向分布规律和模拟表明该实验所测的沿岸流沿水深呈对数分布), 流速仪分别沿垂直岸线和平行岸线方向排成两列, 其中垂直岸线方向 18 个, 平行岸线方向 12 个 (共用一个交叉流速仪), 分别用来测量沿岸流沿垂直岸线方向和沿沿岸方向的分布。图 2.4 给出了 $1:100$ 坡度和 $1:40$ 坡度整个区域 ADV 流速仪的详细布置: 沿岸方向距岸线位置选择在沿岸流最大位置附近。 $1:100$ 坡度和 $1:40$ 坡度沿岸方向布置的流速仪分别距岸线 4.0 m 和 2.5 m ; 两种坡度下流速仪沿岸方向的沿岸位置一致, 从第一个 $y=2.5\text{ m}$ 到第十二个 $y=24.5\text{ m}$, 间距为 2.0 m 。由于垂直岸方向 $1:40$ 坡度沿岸流分布较窄且靠近近岸一侧, 为了更好地得到 $1:40$ 坡度沿岸流剖面分布特征, 在近岸一侧布置了比 $1:100$ 坡度更密的流速仪, 其垂直岸线方向流速仪测量点距静水线的距离分别为 0.2 m 、 0.6 m 、 1.0 m 、 1.3 m 、 1.6 m 和 2.0 m , 从 2.0 m 至 7.0 m , 间距为 0.5 m , 之后从 7.0 m 至 9.0 m , 间距为 1.0 m ; 而 $1:100$ 坡度垂直岸线方向流速仪测量点距静水线的距离分别为从 1.0 m 至 8.0 m , 间距为 0.5 m , 之后依次为 9.0 m 、 10.0 m 和 12.0 m ; 垂直岸方向的沿岸位置一致, 均位于 $y=14.5\text{ m}$ 处。图 2.5 为 ADV 流速仪布置现场图。

波面升高由垂直于岸线方向排列的三列共 60 个电容式浪高仪测量, 列与列的间距为 5.0 m , 详细布置见图 2.6: 第一列位于 $y=7.0\text{ m}$ 处, 各测量点距静水线的距离从静水线开始至 26.0 m 处, 间距为 2.0 m ; 第二列各测量点距静水线的距离从静水线开始至 10.0 m 处, 间距为 0.5 m , 之后从 11.0 m 至 20.0 m , 间距为 1.0 m , 最后一个位于 22.0 m 处; 第三列各测量点距静水线的距离从静水线开始至 10.0 m 处, 间距为 1.0 m , 之后从 12.0 m 至 16.0 m , 间距为 2.0 m 。离造波板最近的浪高仪为第一列距离静水线 26 m 处的浪高仪, 距造波板 9.8 m , 用来记录入射波高。第二列位于港池中间段, 由后面的实验结果可知, 这部分生成的沿岸流较均匀, 是实验重点关注的区域, 故近岸一侧布置较密, 用来更细致地测量垂直岸方向波高的变化。第一列和第三列主要用作参考, 同时也可通过三列比较来说明波高、增减水的沿岸均匀性。

2.1.2 实验方法及波况

为了促使沿岸流引起的水体循环的形成, 本书沿岸流的物理模型实验应用了被动的循环系统, 以探讨不用水泵来维持水流循环的新途径, 即水循环由岸滩模型的两端及其后侧的水渠形成, 在模型和水池之间留有 4.4 m 宽的间隙 (如图 2.1 所示), 岸滩模型后侧的水渠宽为 $4.0\sim 8.0\text{ m}$ (如图 2.2 所示)。间隔的深度与水池中平底部分一致, $1:100$ 坡度和 $1:40$ 坡度分别为 0.18 m 和 0.45 m , 这样更有利于改善由于沿岸流的产生所引起的水体循环, 以保持沿岸流沿岸线方向的均匀性。在岸滩模型上形成的沿岸流会流向岸滩下游的水渠并且经过岸滩模型后侧的水渠流向岸滩模型的上游, 这样形成了一个完整的循环系