

中国环境资源与水利水电工程

王超 邵维文 主 编
金峰 槐文信



海洋出版社

中国环境资源与水利水电工程

Environment, resource and hydraulic
engineering in China

王 超 邵维文 主编
金 峰 槐文信

海洋出版社

2007 年 · 北京

图书在版编目(CIP)数据

中国环境资源与水利水电工程/王超等主编. —北京:
海洋出版社, 2007. 12

ISBN 978 - 7 - 5027 - 6954 - 3

I. 中… II. 王… III. ①环境工程 - 中国②水利工程 -
中国③水力发电工程 - 中国 IV. X5 TV - 12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 194005 号

责任编辑:方菁

责任印制:刘志恒

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

上海交大印务有限公司印刷 新华书店发行所经销

2007 年 12 月第 1 版 2007 年 12 月上海第 1 次印刷

开本: 787mm × 1092mm 1/16 印张: 57.5

字数: 1 500 千字 定价: 160.00 元

发行部:62147016 邮购部:68038093 总编室:62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

《中国环境资源与水利水电工程》

编审人员

顾问：	邱大洪	李桂芬	陈耀松	茆 智	赵文谦
	柴恭纯	张蔚榛	梁在潮	董曾南	谢鉴衡
主编：	王 超	邵维文	金 峰	槐文信	
编委：	王兆印	王沛芳	左其华	卢永金	宁廷俊
	孙西欢	孙奉仲	李兆敏	朱志夏	陈国谦
	陈美发	吴时强	范波芹	罗兴錡	周华君
	周潮洪	郑之初	张宁川	张立翔	张俊华
	唐巨山	宣伟丽	郭振仁	徐祖信	阎庆绂
	殷代印	崔 莉	曾卓雄	董国海	熊 明
	熊绍隆	潘森森			

（以上均以姓氏笔画为序）

前 言

我国的改革开放即将走过 30 年的光辉历程，在这求真务实、开拓奋进的 30 年里，我国的环境、资源和水利水电事业日臻成熟并取得了举世瞩目的发展成就，显示我国改革开放和中国特色社会主义现代化建设的进程波澜壮阔，走新型工业化道路，建设资源节约型、环境友好型社会取得了新胜利。为了回顾这段历史时期我国环境、资源和水利水电事业非同凡响的发展历程，更加深入了解我国环境、资源和水利水电事业的辉煌成就，进一步繁荣学术研究，推动科技创新，我们组织撰写了这部学术论文集——《中国环境资源与水利水电工程》。

本文集所选论文各具特色，总的来说内容系统、完整，理论阐述清楚，方法切实可用，既体现继往开来、与时俱进的精神，也反映了科学性、先进性和实用性的结合。可供具有大专以上文化水平的有关工程技术人员查阅使用，也可供理工院校的师生参考。

由于有关学科内容博大精深，技术发展日新月异，文集中难免有不足或纰漏之处，敬请各界同仁批评指正。

本文集在撰写和编审过程中得到邱大洪院士（大连理工大学）、谢鉴衡院士（武汉大学）、张蔚榛院士（武汉大学）、茆智院士（武汉大学）、何友声院士（上海交通大学）、钟万勰院士（大连理工大学）等知名专家、教授的热情指导、帮助和鼓励，在此谨表衷心感谢！

编者 2007 年 11 月

目次

环境工程

沿岸流作用下污染物运动的数值模拟.....	邱大洪 唐军 沈永明 (1)
基于河网多参数耦合水质模型的苏州河环境综合整治三期工程规划水质 目标可达性分析.....	卢士强 林卫青 徐祖信 (12)
长江口南港化学需氧量动力学模型的应用.....	严以新 张素香 李熙 (20)
Methods on Environmental Carrying Capacity Calculation for Total Pollutant Load Control in Estuaries and Bays.....	Guo Zhen-ren Peng Hai-jun (26)
河口、海岸带环境经济综合管理模型研究.....	姜国强 李开明 陶建华, 等 (32)
浅谈环境信息在永定新河一期治理工程中的实际应用.....	孙艳青 李万庆 (39)
太湖流域水生态系统保护与修复浅析.....	石亚东 陈方 甘升伟 (45)
生态水文模型在流域城市水环境管理中的应用与展望.....	刘静玲 王强 周英英 (49)
棉花滩水库建成后对下游河流生态系统影响分析.....	李杰友 果利娟 陈旺, 等 (55)
防止远洋有害水生物入侵及保持海河生态平衡.....	周跃华 李田田 陈淼 (60)
感潮河网水动力与水污染的数值模拟.....	陈虹 朱明栓 余金星 (65)
天然河流酸碱污染 pH 控制计算的原理和方法.....	张蕴华 (71)
宁波东钱湖污水处理厂尾水排放影响计算分析.....	朱军政 (77)
冲洪积扇地下水系统模型研究现况与展望.....	高佩玲 (82)
典型岩溶介质地下水污染输运特征.....	邓英尔 贾疏源 黄润秋, 等 (86)
模糊物元分析在水质综合评价中的应用.....	田景环 唱彤 (91)
改进的灰色关联分析在水质综合评价中的应用.....	田景环 马海峰 (97)
两种水质现状评价方法在青弋江芜湖市区段的应用比较.....	孙世群 李峻 (102)
累计流量法计算河道型水库水质的问题探讨——谢才—曼宁公式的适 用性研究.....	李龔 曾凡棠 (108)
水环境 DSS 系统中数据集市的开发.....	梁荃荃 廖振良 姚杰, 等 (114)
斜顶建筑物街道峡谷内污染物扩散分布的风洞实验研究.....	黄远东 李文孟 金铭霞, 等 (120)
长江外滩防护林群落对钉螺分布密度影响调查.....	王万贤 程炯 刘文瀚, 等 (126)

Level set 方法模拟与气泡和液滴行为相关的流动·····	李彦鹏 (131)
环保制冷剂缠绕毛细管内流动特性仿真研究·····	赵斌 陈元芝 王美霞 (140)
膜蒸馏和膜吸收技术及其在处理化工废水中的应用·····	
·····	李贝贝 张元秀 王树立 (145)
我国交通工程环境监理的组织模式简介·····	王相国 (151)
火电厂逆流式冷却塔噪声产生和传播的理论计算和数值模拟·····	
·····	杨祥良 张应彪 孙奉仲 (156)
某广场语音、数据传输系统·····	李晓蕾 厉善亨 (163)

资源开发

磨料射流理论与模拟研究进展·····	王明波 王瑞和 梁成亮 (170)
作业井井侵后井筒流动规律研究·····	李兆敏 杨建平 谢明英, 等 (176)
用于提高石油采收率的清洁生产技术及其环境影响分析·····	
·····	朱维耀 李绒 龙大锋, 等 (182)
利用累积产量进行产量递减分析及对比·····	张烈辉 袁迎中 (192)
非均质油藏稳定渗流的压力计算方法·····	尹洪军 贾俊飞 贾世华 (197)
聚合物溶液的渗流模型·····	张立娟 岳湘安 (203)
低渗透分形介质中幂律流体的垂直裂缝井不定常渗流分析·····	
·····	宋付权 李画眉 吴锋民 (209)
变形介质分形煤层气藏不稳定渗流问题·····	
·····	何应付 杨正明 张亚蒲, 等 (215)
大庆朝阳沟油田 119—52 井区蒸汽驱油数值模拟研究·····	
·····	殷代印 张湘娟 (221)
注蒸汽吞吐井油层套管应力的数值计算·····	余中红 王立洋 郑之初 (226)
液固旋流器除砂机理研究·····	郭军 张军 郑之初, 等 (233)
纳米聚硅室内实验评价·····	王克亮 杨丽英 杜姗 (240)
酸化用黏土稳定剂室内试验研究·····	曾晓慧 钟双飞 郭大立 (246)
海上风电利用现状及资源评估·····	邓院昌 余志 王铁强 (250)

水利水电工程

湍流的非高斯统计模型和自相似律·····	钱俭 (257)
流场中三个物体之间相互作用的研究·····	孙仁 (262)
空化相似参数研究·····	潘森森 (267)
含植物水流粗糙次层的自由剪切流假定·····	李艳红 (280)
复式断面明渠流中浮力射流特性数值分析·····	肖庆华 槐文信 曾玉红 (286)
三峡工程明渠截流模型试验与原型对比及分析·····	宁晶 杨伟 张津 (291)
ADV 流速测量及其精度控制·····	陈英姿 许光祥 (294)

青岛大沽河流域网坐标配准及 SWAT 的初步应用.....	郑毅 张彬 方红卫 (300)
基于 DEM 的大坝位置定位方法探讨.....	李翀 王昊 彭静 (306)
二维后向台阶流流动结构的实验研究.....	齐鄂荣 李炜 黄明海 (310)
博弈论在水利水电工程中的应用.....	张阳 吴文平 张静波 (319)
水面蒸发系数及其通用公式的研究.....	陈惠泉 毛世民 (324)
槛控水跃的水力特性.....	倪汉根 刘亚坤 (336)
电厂取排水问题研究进展.....	程友良 关膺 (347)
多沙河流急弯下口修建拦河闸取水发电枢纽水力学模型试验.....	杨伟 宁晶 周瑛 (356)
越南广宁电厂明渠取水工程泥沙试验研究.....	吴福生 童中山 吴修锋, 等 (361)
上海洋山深水港区泥沙起动、沉降及运移特征分析.....	吴明阳 杨华 冯玉林 (370)
平面二维水流泥沙数学模型有限元法.....	高桂景 王平义 (377)
钱塘江河口过江隧道河段最大冲刷深度研究.....	史英标 鲁海燕 杨元平, 等 (382)
悬移质泥沙运动引起的直立堤前海床局部冲刷的数值模拟.....	陈兵 (391)
波浪斜向入射对单宽直立堤作用的研究.....	徐绩青 杨成渝 许光祥, 等 (402)
挟沙水流的能量平衡方程.....	陈小秦 黄才安 (408)
黄河下游游荡性河道整治方案研究新进展.....	江恩惠 曹永涛 李军华, 等 (417)
悬液流变特性实验研究.....	李昆鹏 陈书奎 王岩 (424)
1964—1973 年三门峡水库潼关以下库区冲淤规律分析.....	李昆鹏 蒋思奇 李涛, 等 (428)
小浪底水库拦沙初期淤积特性分析.....	蒋思奇 李书霞 马怀宝, 等 (436)
黄河小浪底水库异重流研究与应用.....	张俊华 李书霞 陈书奎, 等 (441)
小浪底水库异重流排沙分析.....	马怀宝 张俊华 陈书奎, 等 (448)
粉煤灰和黄土浑液面变化的试验研究.....	李涛 张俊华 陈书奎, 等 (454)
引渤济锡海水输送工程.....	杨开林 王涛 郭永鑫, 等 (458)
黄河公伯峡水电站竖井水平旋流泄洪洞水力学与结构原型观测.....	刘继广 陈文学 谢小平, 等 (467)
黄河公伯峡水电站竖井水平旋流泄洪洞原模型水力学试验成果对比与分析.....	陈文学 刘继广 董兴林, 等 (473)

高坝洲水电站泄洪调度试验研究·····	韩继斌 渠立光 郭艳阳 (481)
泄洪雾化降雨的分布规律研究·····	孙双科 柳海涛 刘之平 (486)
大型泄洪洞侧墙掺气减蚀研究·····	刘超 杨永全 (491)
窄缝消能工在高坝溢流表孔上的应用研究·····	
·····	孙双科 耿运生 龙起煌, 等 (496)
抽水蓄能电站侧式进出水口三维数值模拟·····	沙海飞 吴时强 周辉 (503)
抽水蓄能电站过渡过程调节控制应用研究·····	王林锁 索丽生 (508)
溢洪道阶梯陡槽段泄流特性研究与计算探讨·····	
·····	黄智敏 朱红华 何小惠 (514)
混流式水轮机内部非定常压力脉动特性数值研究·····	
·····	王琪 郭鹏程 罗兴镒 (521)
模型混流式水轮机尾水管内速度分布研究·····	汪宝罗 屈波 郑源 (528)
望虞河河口泵站规模初步探讨·····	朱桂娥 盛根明 袁欣, 等 (534)
珠三角咸潮入侵变化趋势及其动力因素影响分析·····	戚志明 包芸 (539)
东江流域咸潮入侵规律的分析·····	詹杰民 吕满英 江涌 (547)
天津市水利工程沉降灾害研究·····	周潮洪 刘波 焦飞宇 (556)
流域现代防洪管理·····	陈旺 果利娟 张洋, 等 (566)
浙江省山洪灾害临界雨量研究初探·····	范波芹 黄仕勇 叶勇 (570)
淮河与洪泽湖分离防洪排涝效益分析·····	王学功 王久晟 张波 (574)
上海杨树浦发电厂煤码头、灰码头段防汛墙防渗处理·····	阮龙飞 (582)
水库汛期洪水分期条件下的土坝漫坝风险分析方法·····	莫崇勋 麻荣永 (588)
透水丁坝工程设计关键技术问题研究述评·····	宗全利 刘焕芳 (595)
钱塘江河口护塘丁坝研究进展·····	赵渭军 余祈文 林炳尧 (599)
天津港防波堤延伸工程试验研究·····	孙连成 赵洪波 赵会民, 等 (609)
波浪作用下可渗防波堤的堤心石模拟问题研究·····	王登婷 (616)
黏弹性土体非稳定渗流分析·····	徐晶 宋东辉 (623)
长江口青草沙水库与河势关联的若干工程问题的数学模型分析·····	
·····	刘新成 卢永金 杜小骏, 等 (630)
金山城市沙滩水库围堤工程设计与施工·····	阮龙飞 (641)
促淤工程实施效果的初步评价·····	张丽芬 (653)
分期导流过水围堰平面二维水流数值模拟·····	彭杨 陈伟锋 纪昌明 (661)
水工建筑物进水口漩涡影响因素和临界淹没水深研究·····	
·····	杜敏 叶飞 郑全乐, 等 (668)
岩堆的工程特性研究·····	范玮佳 赵明阶 付华 (674)
黄土高原的沟道坝系工程·····	朱明东 许翼 徐向舟, 等 (682)
不同径长比管道车能耗的试验研究·····	孙西欢 李永业 阎庆斌 (688)

张謇的治水思想与实践·····	陆近 陆洲 陆凌宏,等 (693)
张謇与中国农垦早期现代化·····	钱黎敏 成林华 袁丰,等 (699)

船舶通航与海洋

船模试验技术及其在工程中的应用·····	程子兵 韩继斌 严伟 (705)
排水型高速船兴波问题的数值计算·····	高高 (712)
带式浮桥水弹性固有频率的迭代算法·····	张军 缪国平 孙文俊 (721)
阶梯流作用下深海立管涡激振动响应的时域计算·····	
·····	黄智勇 崔维成 刘应中 (728)
上海交通大学海洋工程国家重点实验室动力定位系统研究进展·····	王磊 (739)
浮式工程装备水动力分析新策略——基于粘流的数值模拟·····	潘小强 (747)
低速进系数下全回转螺旋桨后呆木受力数值计算·····	
·····	吴琼 冯学梅 蔡荣泉 (755)
电力推进系统负荷的计算机仿真·····	袁娟英 厉善亨 (766)
船舶电力推进与永磁电机·····	沈雄 邓穗湘 (772)
近年来吊舱推进器技术的新进展·····	马骋 钱正芳 杜度,等 (778)
用 RANS 方法计算水翼空泡·····	叶金铭 熊鹰 (786)
再制造工程技术在海军装备保障中的应用·····	华小军 (794)
涌潮波研究方法综述·····	万德成 (797)
基于格子 Boltzmann 方法的圆柱绕流模拟·····	陈同庆 张庆河 程亮 (814)
浅水波的位移法求解·····	陈晓辉 沈永明 钟万颀 (821)
孤立波与矩形浮堤的相互作用·····	刘长根 陶建华 (829)
二维抛泥数学模型·····	朱志夏 (837)
长江上游航道标准船队自行上滩距离研究·····	杨胜发 胡江 王涛,等 (843)
澜沧江急流滩整治措施剖析·····	邓明文 许光祥 疏玉清 (848)
杭州湾大桥建桥影响研究·····	熊绍隆 曾剑 韩海骞,等 (854)
建桥对钱塘江涌潮景观影响的研究·····	卢祥兴 杨火其 曾剑 (860)
桥台最大清水冲刷计算公式的探讨·····	孙庆楠 齐梅兰 马先华 (866)
柔性消能防撞装置的技术特点·····	陈国虞 张澄 倪步友,等 (873)
海洋工程系泊系统研究发展综述·····	丁勇 王道能 秦亚军,等 (884)
The Study on the Effect of Wind Field to the Ocean Current of South China Sea·····	Huang Ke Fu Qiang Zhang Ming (891)
水温垂直结构一维遥感与数值预报模型·····	修树孟 申辉 逢爱梅 (897)
三维波浪场中畸形波数值模拟·····	
·····	刘晓霞 张宁川 裴玉国,等 (908)

沿岸流作用下污染物运动的数值模拟

邱大洪 唐军 沈永明

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘 要 基于椭圆形缓坡方程、近岸流方程及波流作用下污染物运动方程对近岸斜向入射波浪破碎生成的沿岸流及污染物在沿岸波流中的运动进行了数值模拟, 并对数值模拟结果进行了验证分析。数值模拟结果表明, 在相近工况参数下, 随着入射波高和岸坡坡度的增加, 波浪引起的平均水面变化和沿岸流流速均明显增大; 随着入射波浪周期的增大, 波浪引起的平均水面变化明显增大。在近岸区域, 斜向入射波浪破碎所产生的沿岸流对污染物的运动起着重要影响作用。

关键词 缓坡方程, 破碎波, 沿岸流, 污染物

1 引言

海岸带和近岸海域由于地形变化的复杂性, 是海洋各种水动力因素最为复杂的区域, 从外海传播过来的波浪受近岸地形和海岸线的共同影响作用, 波浪的反射、折射、绕射、汇聚等各种效应非常显著, 特别是平缓海岸, 波浪向近岸传播中受近岸水深的浅化效应影响会发生破碎现象。波浪破碎后通常会引起沿岸或离岸及向岸的水体运动, 这种流动被定义为沿岸流或裂流。波浪破碎产生的沿岸流或裂流等近岸流普遍存在于近岸海域。在该区域, 波浪、波浪引起的平均水位变化及沿岸流、裂流等水动力相互影响作用, 使得该区域的水动力因素较外海异常复杂, 污染物的运动和其所处的环境动力因素密切相关, 在近岸区域污染物在波浪、近岸流等作用下, 随着近岸水体和近海水体的交换被带入近海后逐渐扩散至外海, 因此近岸水体运动的复杂特性将直接影响到近岸各类污染物质的输移扩散运动。研究揭示近岸流及近岸污染物的运动规律对正确揭示近岸水动力机理, 分析评价近岸空间资源的开发利用及近岸活动等对近岸水环境的影响等有较强的理论研究和工程应用价值。

国内外研究学者在近岸波浪、近岸沿岸流、近岸污染物运动等方面都开展了大量的研究工作^[1-12], 并取得了大量研究成果。关于近岸流的研究大都以 Longuet-Higgins 提出的波浪辐射应力为基础, 考虑到近岸水深较浅, 水体沿垂向很快混合均匀的特征及数学模型的计算效率, 在近岸流数值模拟研究中所采用的近岸流数学模型大都基于沿水深积分的浅水方程而来。由于近岸水动力要素运动的复杂性, 其中许多的水动力运动机理仍有待于进一步揭示, 关于近岸流及近岸污染物运动的数学模型研究还需要进一步完善。

基于近岸波浪传播的椭圆形缓坡方程和近岸流数学模型对近岸波浪斜向入射破碎产生的沿岸波流场进行了数值模拟, 在此基础上对污染物在沿岸波流中的运动进行了数值模拟, 并对数值模拟结果进行了验证, 同时结合模拟结果对近岸斜向入射波浪破碎产生的沿岸流场及污染物在沿岸流场中的运动规律进行了分析。

作者简介: 邱大洪 (1930-), 男, 中国科学院院士, 从事海岸水力学研究。E-mail: qiudh@dlut.edu.cn

基金项目: “973” 国家重点基础研究发展计划资助项目 (2006CB403302), 海洋工程国家重点实验室研究基金。

2 数学模型

2.1 近岸波浪椭圆形缓坡方程

Berkhoff^[1]提出的椭圆形缓坡方程是描述波浪在近岸缓坡区域传播变形的一类有效数学模型,它综合考虑了波浪传播过程中的折射、绕射、反射等效应,如考虑波浪破碎的能量损失,可采用如下椭圆形缓坡方程来描述波浪在近岸缓坡区域的传播:

$$\nabla \cdot CC_g \nabla \phi + k^2 CC_g \phi + i\omega \frac{D_b}{E} = 0 \quad (1)$$

式中: $\phi = -ig\eta'/\omega$ 为波浪势函数, η' 为复波面升高; i 为虚数单位; k 为波数; ω 为波浪角频率; $C = \omega/k$, 为波浪相速度; $C_g = \partial\omega/\partial k$ 为波浪群速度; h 为静水深; $E = \rho g H^2/8$, 为波能量, H 为波高; D_b 为波浪破碎产生的能量损失,可由下式计算^[8]:

$$D_b = KC_g (E - E_s)/h$$

式中: $K \sim 0.15$, 为经验系数; E_s 为波浪稳定能量,可取水深 $0.4h$ 处以下的波浪能量。

一般认为当某点的波高大于该点的最大破碎波高(H_b)时,该点波浪会发生破碎。最大破碎波高通常可由下面的表达式确定:

$$H_b = \gamma h \quad (2)$$

式中: $\gamma \approx 0.4 \sim 0.8$, 为波浪破碎指标。

2.2 近岸流数学模型

研究表明,波浪辐射应力是近岸流的主要动力^[2-3],波浪引起的近岸流可采用如下深度平均的平面二维浅水方程作为控制方程^[4-6]

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (U(h+\eta)) + \frac{\partial}{\partial y} (V(h+\eta)) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho(h+\eta)} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) - \frac{1}{\rho(h+\eta)} (\tau_{rx} - \tau_{bx}) - A_{mx} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{\rho(h+\eta)} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) - \frac{1}{\rho(h+\eta)} (\tau_{ry} - \tau_{by}) - A_{my} = 0 \quad (5)$$

式中: U , V 分别为 x 和 y 方向的水平速度分量; η 为平均水面升高; S_{xx} , S_{xy} , S_{yx} 和 S_{yy} 分别为波浪引起的辐射应力分量; τ_{rx} , τ_{ry} 分别为 x 和 y 方向的表面切应力分量; τ_{bx} , τ_{by} 分别为 x 和 y 方向的底部切应力分量; A_{mx} , A_{my} 分别为 x 和 y 方向的侧向掺混应力分量。

对在有限水深中传播的微幅线性波,可从波浪辐射应力定义出发将波浪势函数和辐射应力直接联系起来给出辐射应力的表达式,这样可以避免对波向角的求解。郑永红^[7]等结合抛物形缓坡方程中的变量给出了如下波浪辐射应力的计算式

$$S_{xx} = \frac{\rho g}{4} \left\{ \left| \frac{\partial \eta'}{\partial x} \right|^2 \frac{1}{k^2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) + \left[|\eta'|^2 \frac{2kh}{\sinh 2kh} + \frac{2kh/\tanh 2kh - 1}{2k^2} \left(\left| \frac{\partial \eta'}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial \eta'}{\partial y} \right|^2 - k^2 |\eta'|^2 \right) \right] \right\} \quad (6)$$

$$S_{yy} = \frac{\rho g}{4} \left\{ \left| \frac{\partial \eta'}{\partial y} \right|^2 \frac{1}{k^2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) + \left[|\eta'|^2 \frac{2kh}{\sinh 2kh} + \frac{2kh/\tanh 2kh - 1}{2k^2} \left(\left| \frac{\partial \eta'}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial \eta'}{\partial y} \right|^2 - k^2 |\eta'|^2 \right) \right] \right\} \quad (7)$$

$$S_{xy} = S_{yx} = \frac{\rho g}{4} \left[\operatorname{Re} \left(\frac{\partial \eta'}{\partial x} \frac{\partial \eta'^*}{\partial y} \right) \frac{1}{k^2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \right] \quad (8)$$

式中: η'^* 为复波面升高 η' 的共轭复数; 其余各量的含义同上。

关于波流场中的底部切应力的计算公式较多, 但目前还没有相对统一的计算公式。当弱流或流速趋近垂直于波向时, 波流场中的底部切应力分量可采用如下公式计算^[2-3]:

$$\tau_{bx} = 4\rho c_f u_o U / \pi \quad (9)$$

$$\tau_{by} = 2\rho c_f u_o V / \pi \quad (10)$$

式中: u_o 为近底波浪最大轨迹速度, 可由线性波浪理论得出: $u_o = 2\pi a_o / T$, 其中, $a_o = H / (2 \sinh kh)$ 为由线性波浪理论给出的波浪质点近底水平轨迹振幅 c_f 为波流综合作用下的底摩擦系数。应用该公式的优越性在于其格式比较灵活。

侧向掺混应力定义为:

$$A_{mx} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial U}{\partial y} \right) \quad (11)$$

$$A_{my} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial V}{\partial y} \right) \quad (12)$$

式中: μ 为波流作用下的侧向掺混系数, 可采用如下 L-H 模型确定:

$$\mu = Nx_l \sqrt{gh} \quad (13)$$

式中: x_l 为波浪破碎点的岸边距; $N \approx 0 \sim 0.016$, 为无量纲量。在破碎带外侧向掺混系数可取为波浪破碎点处的值。

仅考虑波浪引起的近岸流动时, 对于离岸波浪入射处边界可近似采用下述边界条件:

$$\eta = 0 \quad (14)$$

$$U = 0 \quad (15)$$

$$V = 0 \quad (16)$$

在开敞侧边界, 当上下游边界处地形变化较平缓时可采用如下连续性边界条件:

$$\partial \eta / \partial \bar{n} = 0 \quad (17)$$

$$\partial U / \partial \bar{n} = 0 \quad (18)$$

$$\partial V / \partial \bar{n} = 0 \quad (19)$$

在以上边界条件中, $\bar{n}$ 为边界外法线方向。在岸边界, 由于岸边水深通常极浅, 也可采用上述式 (17)、式 (18) 和式 (19) 作为边界控制条件。

2.3 近岸波、流作用下污染物运动的数学模型

在近岸浅水区域, 波、流共同作用下污染物的运动由如下平面二维方程控制

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{\partial c}{\partial x} + V \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{1}{h + \eta} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left((h + \eta) D_{cwx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((h + \eta) D_{cwy} \frac{\partial c}{\partial y} \right) \right) + S_m \quad (20)$$

式中: c 为沿深度平均的污染物浓度; D_{cwx} , D_{cwy} 分别为波、流共同作用下污染物沿 x 和 y 方向的扩散系数; S_m 为污染物的源汇项。

采用如下公式^[8]计算波、流共同作用下污染物的扩散系数:

$$D_{cw} = D_c + D_w$$

其中, D_c 为流作用下污染物的扩散系数, 采用如下公式计算^[9]:

$$D_{cx} = \frac{(k_l U^2 + k_t V^2) h \sqrt{g}}{C \sqrt{U^2 + V^2}}$$

$$D_{cy} = \frac{(k_l V^2 + k_t U^2) h \sqrt{g}}{C \sqrt{U^2 + V^2}}$$

式中: C 为 Chezy 系数; k_l 和 k_t ^[9-10] 可分别取 5.93 和 0.15。波浪作用下污染物的扩散系数 D_w , 采用下式计算^[8, 11]

$$D_{wx} = D_{wy} = 0.035 \alpha h H / T$$

式中: T 为波浪周期; α 为经验系数, 考虑到波浪破碎作用的影响, 按下面的关系式确定:

$$\alpha = \begin{cases} 5.5H/h - 2.0 & \text{破碎区} \\ 1.0 & \text{非破碎区} \end{cases}$$

当已知边界处污染物的浓度时, 即可给定污染物输运方程的边界条件, 但由于测量困难, 第一类边界往往不易给定。从理论上讲, 应满足在无穷远处污染物浓度为 0 ($c_\infty=0$) 的条件, 但由于所关心的区域往往是有限的, 因此必须在计算边界处施加边界条件。假定边界处的污染物浓度值与污染团中心处的浓度值相比很小, 当流体流入计算区域时, 沿边

界的浓度可置为域外的值, 即 $c=0$; 当流体流出计算区域时, 考虑到在远离污染源的出流边界处污染物的浓度分布是平滑连续的, 可近似采用下述的连续边界条件:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \bar{\mathbf{V}} \cdot \bar{\mathbf{n}} \frac{\partial c}{\partial n} = 0$$

式中: $\bar{\mathbf{n}}$ 为边界外法线方向。采用有限差分格式对数学模型进行数值离散求解, 其中波流作用下近岸污染物运动模型和近岸流模型的求解过程相似, 具体求解过程可参考文献[5, 12]。

3 数学模型的验证

结合国家自然科学基金重点基金“近岸海域潮、波、波流共同作用下污染物迁移转化规律的研究”, 在海岸和近海工程国家重点实验室进行了 1:100 和 1:40 两种平直缓坡地形下由斜向入射波浪破碎形成的沿岸波流场及波流中污染物的运动等实验研究。实验地形布置如图 1 所示, 实验工况计算参数如表 1 所示, 表中所给入射波均为规则入射波, 其中 h_0 为波浪入射位置的静水深度; θ 为入射波浪与岸坡间的夹角; H_0 为入射波高; L 为污染物排放点岸边距, 对污染物采用连续点源的形式定点排放。考虑到缓坡方程数值模型的计算效率, 采用破碎区波高正比于当地水深的经验公式来调整计算破碎区的波高, 即设破碎区波高为 $H=\gamma h$ 。数值模拟中, 计算区域选取为和岸坡平行的区域(x 方向为离岸方向, y 方向为沿岸方向, 波浪入射边界处入射波浪为斜向波), 这样数值计算中侧边界处理相对简单, 波浪破碎区计算域也可以取得相对较大些。

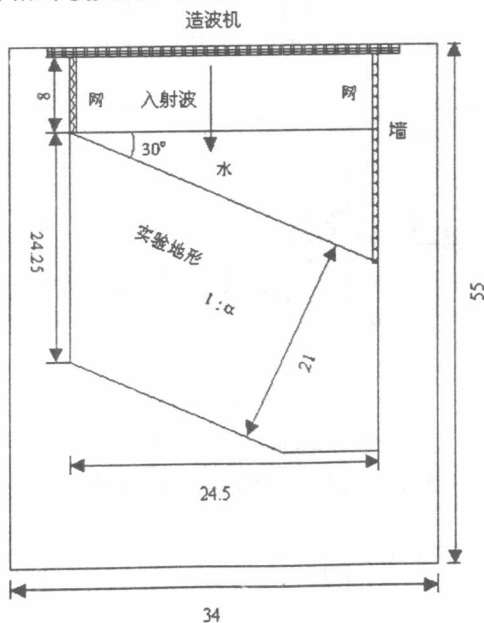
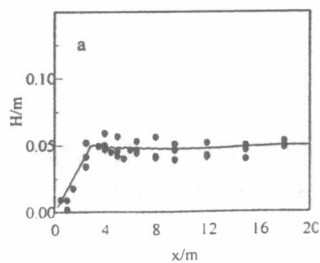
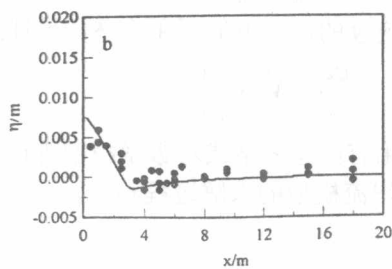


图 1 沿岸流实验地形布置图 (图中长度尺寸单位为: m)

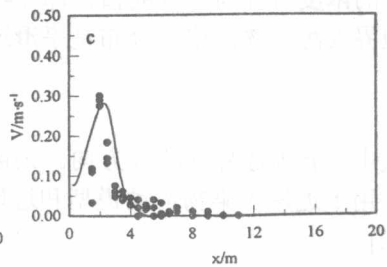
图 2 至图 5 给出了各工况下的波高、平均水面升高和沿岸流速的计算值和实验值^[13], 其中 x 方向为离岸方向 (由岸方向指向外海为正)。从图 2 至图 5 可看出, 各工况下模拟所得波高、平均水面升高、沿岸流速和实测值总体趋势均符合良好。比较工况 1 和工况 2 的数值模拟和实验结果可以看出, 在相近工况参数下, 随入射波高的增大, 沿岸流速明显加快, 平均水面升高值也随之增大; 对比工况 1 和工况 3 的数值模拟和实验结果可以看出, 在相近工况参数下, 随入射波浪周期的增大, 平均水面升高值也增大; 对比工况 3 和工况 4 的数值模拟和实验结果可以看出, 在相近工况参数下, 随着岸坡坡度的增加,



a. 波高实测值与数值解比较



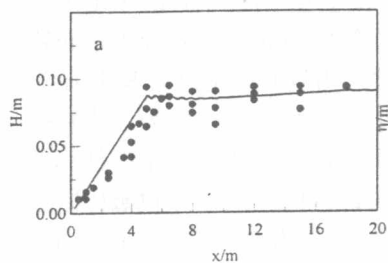
b. 水面升高实测值与数值解比较



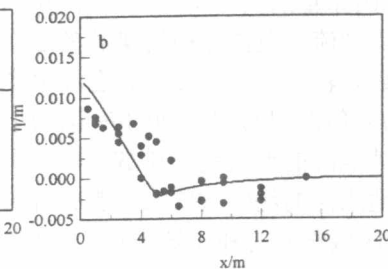
c. 沿岸流实测值与数值解比较

—— 数值解, ••• 实测值

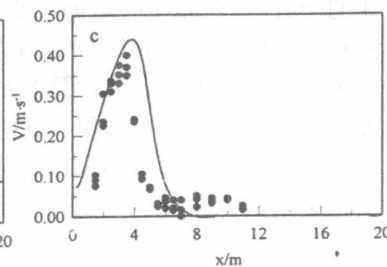
图2 工况1数值模拟值与实测值比较



a. 波高实测值与数值解比较



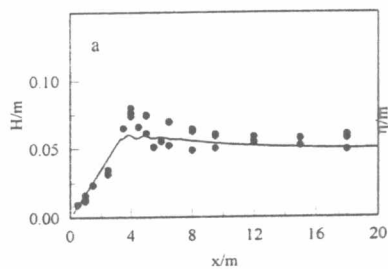
b. 水面升高实测值与数值解比较



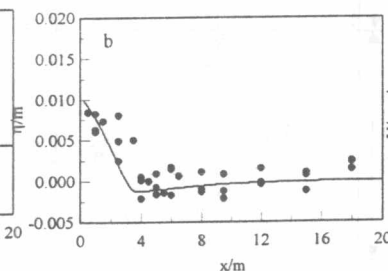
c. 沿岸流实测值与数值解比较

—— 数值解, ••• 实测值

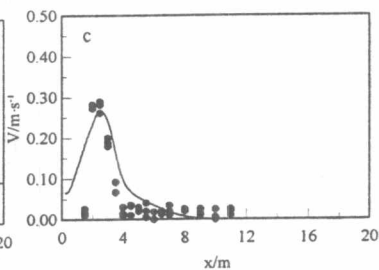
图3 工况2数值模拟值与实测值比较



a. 波高实测值与数值解比较



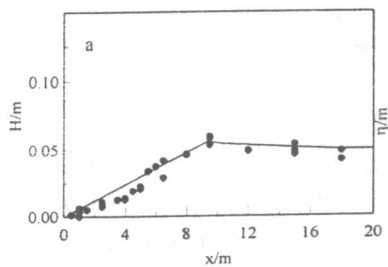
b. 水面升高实测值与数值解比较



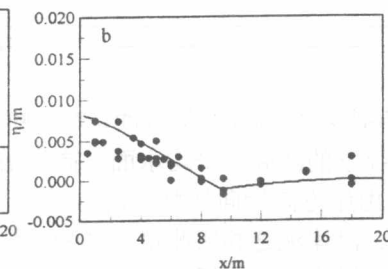
c. 沿岸流实测值与数值解比较

—— 数值解, ••• 实测值

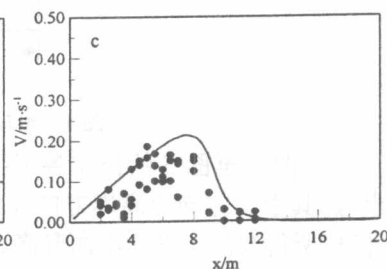
图4 工况3数值模拟值与实测值比较



a. 波高实测值与数值解比较



b. 水面升高实测值与数值解比较



c. 沿岸流实测值与数值解比较

—— 数值解, ••• 实测值

图5 工况4数值模拟值与实测值比较

沿岸流流速明显加快, 平均水面升高值也有所增大。

为便于与污染物运动的实验结果相比较, 污染物运动分布坐标的选取和波流场坐标选取有所不同(在污染物运动分布坐标中, 入射波浪为正向波), 图 6 为图 7 至图 10 中污染物运动分布实验和计算结果中所采用的相对参考坐标(实验中为便于图像采集, 不同实验工况中污染物运动的坐标略有变化, 因此本文计算结果和实验结果均采用相对参考坐标给出)。图 7 至图 10 为各工况下污染物在各时刻分布范围的实验值与数值模拟结果的比较, 图中所给曲线为污染团分布范围的等浓度线, 其中数值模拟所示结果中污染物最小相对浓度值为 10^{-3} (相对于排放点污染物初始浓度值)。从图 7 至图 10 的数值模拟结果可以看出, 当近岸波浪以一定角度斜向岸边传播时, 由于水深变浅波浪破碎会产生近岸流, 在波浪破碎区域污染物主要沿着沿岸方向运动, 表明其运动主要受沿岸流控制影响; 随着斜向入射波高和沿岸坡度的增加, 污染物运动的速度加快, 这与实验中获得污染物运动分布的趋势是一致的。但由于实验历程较长, 且实验环境背景变化较大, 给实验测量带来了一定困难, 也给污染物浓度场的定量分析增加了一定难度; 同时采用的近岸波流中污染物运动的数学模型为平面二维模型, 计算所得污染物浓度值为深度平均值, 而实验中获得污染物浓度值为沿水深的垂向叠加值(但由于水深较浅, 污染物沿水深混合充分, 其分布范围和沿水深深度平均的分布应趋于一致), 这些都使实测值和计算值有一定的差异性, 因此仅给出了污染物运动分布范围的数值模拟结果与实验结果的比较, 但从图中数值模拟结果与实验结果的比较可看出, 数值模拟结果与实验结果在总体趋势上符合良好, 通过上述数值计算结果也可看出, 在沿岸缓坡区域, 由波浪破碎作用产生的近岸波、流体系对沿岸污染物的输运有重要影响作用。

4 结论

近岸波浪斜向传向岸边时, 由于水深变浅波浪破碎而引起的近岸波、流体系是近岸重要的环境水动力因素, 它们对近岸污染物的运动起着重要影响作用。基于描述近岸缓坡区域波浪传播的椭圆形缓坡方程、近岸流数学模型和污染的物质在近岸波流中运动的数学模型对近岸斜向入射波浪破碎产生的沿岸波、流和污染物在波、流中的运动过程进行了数值模拟, 并对数值模拟结果进行了验证分析。数值模拟结果表明, 在近岸缓坡海域, 由斜向入射波浪破碎作用所形成的波流场中, 入射波高和地形坡度对沿岸流流速分布和波浪引起的平均水面升降有较明显影响作用, 随着入射波高和金岸地形坡度的增加, 近岸沿岸流流速和平均水面升降幅值明显加大; 随着入射波浪周期的加大, 平均水面升降值也明显增加; 在波浪破碎区污染物运动方向受入射波浪传播方向影响极小; 随着斜向入射波高和沿岸岸坡的增加, 污染物输运的速度明显加快。近岸缓坡区域斜向入射波浪破碎所产生的沿岸波流对近岸污染物的运动分布起着重要影响作用。