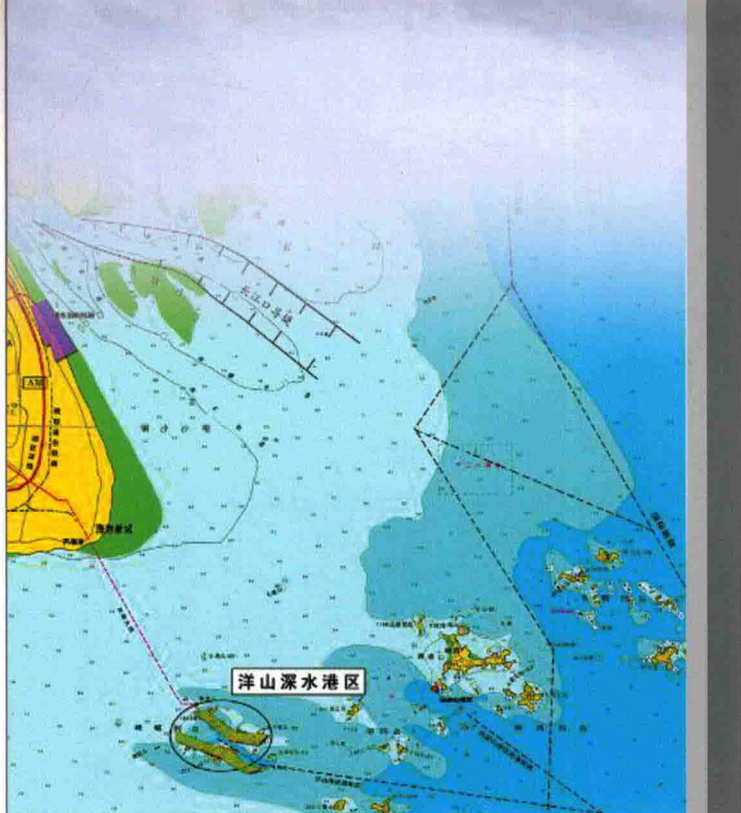




上海国际航运中心洋山深水港 工程动力地貌响应

Shanghai Guoji Hangyun Zhongxin
Yangshan Shenshuigang

Gongcheng Dongli Dimao Xiangying

虞志英 李身铎 张志林 等著



科学出版社

上海国际航运中心洋山深水港 工程动力地貌响应

虞志英 李身铎 张志林 等著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

上海国际航运中心洋山深水港建于长江口和杭州湾口外的崎岖列岛海域,地形和水文泥沙条件甚为复杂,给港口工程建设带来了困难。本书通过历年来对该工程区海域进行多次潮汐潮流、波浪、泥沙、沉积、地形调查,对调查资料进行系统整理分析,总结其演变规律,为不同时期的港口工程设计提供科学依据,同时对崎岖列岛海区复杂的动力地貌演变规律进行理论总结。

本书可供从事海洋工程、港口航道工程和水利工程的有关技术人员,高等院校海洋、港口、水利、环境工程有关专业师生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

上海国际航运中心洋山深水港工程动力地貌响应/
虞志英等著. —北京: 科学出版社, 2013. 9
ISBN 978-7-03-038619-9

I. ①上… II. ①虞… III. ①深水港—港口工程—海岸地貌—研究—上海市 IV. ①U658

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 217391 号

责任编辑: 许 健 / 封面设计: 殷 靓
责任印制: 刘 学

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

南京展望文化发展有限公司排版

上海锦佳印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 9 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2013 年 9 月第一次印刷 印张: 10 3/4

字数: 162 000

定价: 150.00 元

《上海国际航运中心洋山深水港 工程动力地貌响应》作者名单

虞志英 李身铎 张志林

徐海根 朱巧云 庄 骅

前言

位于长江口和杭州湾外三十余千米的崎岖列岛是上海国际航运中心洋山深水港所在,列岛由南、北两列岛链组成,北部为小洋山岛链,由 26 个大小岛屿组成,以小洋山岛最大;南部为大洋山岛链,由 34 个岛屿组成,大洋山岛为最大岛屿。两列岛链由西向东呈漏斗状排列,西口门宽 7.7 km,东口仅宽 1 km,东西长约 11 km,岛链内水域面积约 4.5 km²,水深 15 m 以上的深水岸线在 15 km 以上。洋山深水港区建设主要位于小洋山一侧岛链,至今已形成一、二、三期码头区,拥有深水泊位 16 个,2011 年吞吐能力已达 1 300 万 TEU 以上,已经确立了国际集装箱枢纽港竞争中的优势地位。

笔者长期从事与河口海岸及近海海洋工程有关的动力沉积地貌学科的研究工作,积累了较为丰富的实践经验和理论基础。受洋山同盛港口建设有限公司的委托,对港址所在的崎岖列岛海域水文、泥沙运动和沉积地貌演变进行系统分析研究。对建港工程中不同阶段堵汉工程前后港区内水沙运动和冲淤规律进行机理分析。提出港区海域因工程引起的地形改变,在潮动力场中存在着非线性运动特征;阐明了泥沙运动时空走势;指出一、二、三期的堵汉工程导致港区海域的冲淤变化与堵汉前后进出主通道海域的潮量、沙量密切相关。同时提出保存颗珠山汉道是保证西港区建后水深及已建一、二、三期港区减淤的根本措施等主要论点。先后完成了四项研究报告,即上海国际航运中心洋山港区水沙运动冲淤特征和堵汉工程影响分析(2006 年 12 月)、上海国际航运中心洋山深水港区地形冲淤分析研究报告(2008 年 1 月)、上海国际航运中心洋山深水港西港区海床冲淤趋势和加深研究(2009 年 3 月)和洋山港海域水沙运动和海床冲淤机理分析(2011 年 5 月)。这些研究成果经主管部门组织,由院士、著名教授参加评审后,分别在工程建设实践中得到了应用,达到了

满意的效果。本书是在上述研究实践的基础之上,进行理论上概括与加工提高。本书主要内容分为四个部分:一是崎岖列岛海域自然环境特征;二是洋山港区海域工程前水、沙运动和海床冲淤;三是洋山港区海域工程后水、沙运动和海床冲淤;四是洋山深水港工程海域水沙运动和地貌过程的综合研究。力求使海岸动力沉积地貌学科在为工程服务的理论和实践应用上有所创新。

本书在编写过程中,始终得到同盛集团洋山港建设指挥部领导归墨、王宣、戚秀莲和顾问总工程师邵荣顺等的关心支持,中交第三航务工程勘察设计院有限公司副总工程师徐伯勤、黄明毅和高级工程师孙士勇、张银苗的大力支持,提供所在地区的地形、水文泥沙和沉积物基础资料;编写单位领导华东师范大学河口海岸学国家重点实验室、河口海岸科学研究院领导陈吉余院士、丁平兴院长、周云轩主任、王平书记、何青副主任,以及长江口水文水资源勘测局局长田淳,副局长周丰年、周才扬,以及高健总工程师等的关心和支持。长江口航道管理局教授级高级工程师金镠对全书进行了指导、本单位杨忠勇博士等参与了本书的计算编辑工作,本书出版得到华东师范大学河口海岸学国家重点实验室的资助,在此一并表示衷心的感谢。

由于水平有限,本书不足之处在所难免,望国内外同仁不吝指正!

虞志英(华东师范大学终身教授)

李身铎(华东师范大学教授)

张志林(长江水利委员会长江口水文水资源局教授级高级工程师)

2012年12月

目录

前 言

第 1 章 崎岖列岛海域自然环境特征	1
1.1 崎岖列岛及其海域的地形和地质条件	2
1.2 水动力基本特征	3
1.3 泥沙特征	11
1.4 海床沉积物分布	17
1.5 冲淤演变	20
第 2 章 洋山港区海域工程前水沙运动和冲淤概况	22
2.1 港区海域自然地理概况	22
2.2 港区海域潮动力特征	23
2.3 流况分析	27
2.4 主通道和各汊道潮量	32
2.5 工程前洋山海域悬浮泥沙运动	34
2.6 工程前洋山海域海床冲淤演变	39
第 3 章 洋山港区海域工程后水沙动力和海床冲淤变化	41
3.1 工程海域潮汐和潮位	41

3.2	工程海域潮流和潮量	47
3.3	工程后海域泥沙特征和运动	64
3.4	工程海域海床冲淤变化	91

第4章	洋山海域在建港过程中的动力地貌学研究	99
------------	---------------------------	-----------

4.1	潮动力过程	99
4.2	欧拉余流场	116
4.3	潮动力和泥沙运动与海床冲淤变化的相关性	118
4.4	洋山工程对港区海域海床冲淤的影响	130

附 录	156
------------	------------

一	洋山海域水文泥沙观测概况	156
二	洋山海域潮位观测	157
三	水文气象观测	159
四	工程施工进展概况	159

主要参考文献	164
---------------	------------

第 1 章

崎岖列岛海域自然环境特征

上海国际航运中心洋山港北港区,位于长江口和杭州湾口交汇带,离上海南汇嘴三十余公里的崎岖列岛中的小洋山岛链处。崎岖列岛主要由小洋山(主体)和自西北向东南排列的北岛链、大洋山(主体)和自西向东排列的南岛链组成,其东侧由一系列自北向南的嵊泗列岛、川湖列岛、大小衢山岛等群岛构成其屏障(图 1-1)。列岛及其周边海域水下地貌的主体处在长江三角洲前缘的斜坡上,地势基本西浅东深,并受地质边界和水动力条件的影响,形成众多的潮流冲刷槽。

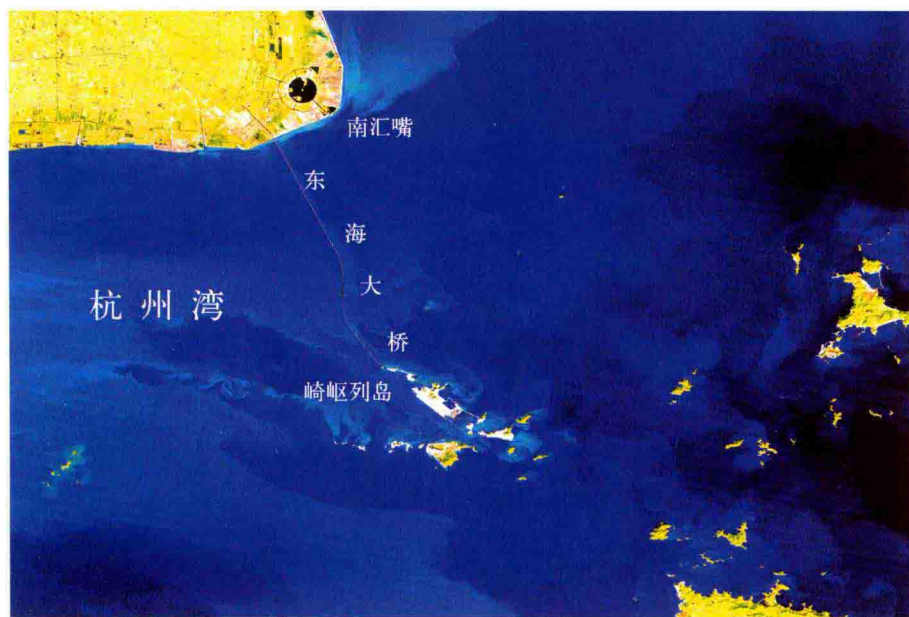


图 1-1 崎岖列岛遥感影像图(2004 年 2 月 26 日)

崎岖列岛海域位处强潮海湾杭州湾北口,潮动力主控着水流运动。源于西北太平洋的源潮波传向西南,经琉球群岛入中国东海后,其中半日分潮波在闽浙外海,除一小部分转向西南进入台湾海域外,大部分按前进波的形式向西北传播,在北上传播途中,部分转向西入杭州湾和长江口。杭州湾口外舟山群岛星罗棋布,迫使潮流分成数股,穿越岛间通道入湾,其中最北一股向西传播中,流经嵊泗列岛和大衢山之间海域后途经崎岖列岛,直冲南汇嘴,至嘴角前又分两路,分别进入杭州湾北部和长江口南槽。该股潮波主控着洋山海域水流运动。此外,潮波运动在苏北外海域形成了日分潮旋转潮波系统,在长江口和杭州湾北口海域呈现特有的旋转潮波运动。崎岖列岛海域同时北临长江口,是河流和海洋的过渡带,在海陆相互作用界面上受长江径流、潮汐潮流、风生流、近岸流系和底形等因素的作用,特别是在长江径流量丰沛季节,向口外东南方向的冲淡水会明显影响列岛海域。

1.1 崎岖列岛及其海域的地形和地质条件

1.1.1 地形特征

崎岖列岛分别由以大、小洋山为主体的南北二岛链组成,大小岛屿共有 69 个,总面积约 10.72 km^2 。北岛链自西北向东南有小乌龟、大乌龟、颍珠山、小洋山、镬盖塘、大岩礁、小岩礁、西门堂、中门堂、沈家湾、薄刀嘴、莠箕和虎啸蛇等岛屿;南岛链自西向东有唐脑山、立人山、双连山、蒲帽山、大小山塘、大小贴饼、大洋山、外后门和西马鞍等岛屿。两岛链间形成自西向东逐渐变窄的海域,平面形态呈大口向杭州湾敞开的侧漏喇叭形。东口小岩礁—大洋山—东北公山断面宽约 850 km ,西口小乌龟—唐脑山断面宽约 10 km 。列岛海域处在水深 $8\sim 9 \text{ m}$ 的杭州湾口北部外,为一广阔的 10 m 以深的水域,海域除西部局部区段外,大都约 14 m 以深。在南北岛链间的水深自西向东渐深,平均约由 10 m 增至 40 m ,至东口因过水断面急速缩窄,水流集能冲刷而形成深邃的峡道段,一般水深为 $30\sim 55 \text{ m}$,最深可达 87 m 。

众岛屿陆地地形起伏,高程一般为 $100\sim 200 \text{ m}$,大洋山的主峰海拔高度达到 204 m 。

1.1.2 地质条件

崎岖列岛的岛屿分布,主要受东西向和北西西向的构造层控制,在列岛地区未见较大岩脉和断裂构造。从岩性分析,小洋山岛链和大洋山西北部及其两侧小岛的岩性均由燕山晚期侵入的钾长花岗岩组成。而在大洋山东南部及其东侧诸小岛,基本上由上侏罗统茶湾组的流纹质凝灰岩组成。

根据大小洋山附近的沉积层钻孔,第四纪地层的最大厚度出现在大洋山岛的小梅村,厚度约 35 m,其他地区均不超过 25 m。沉积层的岩性属于上更新统,其下段的岩性为棕黄色含碎石的粉砂质黏土,局部有碎石富集成含黏土碎石层,厚度为 6~8 m;上段的岩性以棕黄色和灰黄色粉砂质黏土、粉砂夹含黏土碎石为主,厚度为 3~7 m。以岩性特性分析,可以认为该地层是洪积和坡洪积堆积层,反映了崎岖列岛海区在上更新世时期处于陆相的沉积环境。全新世海侵以来,在列岛海区沉积了以灰褐色粉砂质黏土为主的沉积物,厚度为 10~15 m。此后,经潮流冲刷和波浪掀动作用,一些细颗粒物质随潮流携带运移,沉积物呈现粗化现象,特别是在列岛东部海域,成为黏土质粉砂的主要分布区。

1.2 水动力基本特征

1.2.1 潮汐

1. 潮汐性质

根据崎岖列岛海域众多验潮站水位资料的调和分析结果,潮性判据 $(H_{K_1} + H_{O_1})/H_{M_2}$ 在 0.34~0.42,半日潮明显,但有日潮不等现象;判据 H_{M_4}/H_{M_2} 为 0.03~0.09,浅水分潮比较显著,落潮历时长于涨潮历时。按照海港水文泥沙调查规范约定,该海域属于非正规半日浅海潮类型。全海域西部比东部、北部比南部半日潮性质更强,越近海岸浅水分潮相对越大(表 1-1)。

表 1-1 崎岖列岛海域测站潮性判据

测 站	滩浒山	芦潮港	唐脑山	大戢山	大洋山	小衢山	马迹山	嵎 山
$(H_{K_1} + H_{O_1})/H_{M_2}$	0.37	0.34	0.42	0.35	0.35	0.41	0.39	0.38
H_{M_4}/H_{M_2}	0.09	0.08	0.05	0.04	0.07	0.04	0.04	0.03

2. 潮汐特征值

列岛海域平均潮差 2.5~3.5 m,最大潮差 5.0~6.0 m,潮差自东向西递增。按 1985 国家高程基准测得东部岛屿最高和最低潮位分别为 3.2 m 和 -2.5 m,西部芦潮港分别为 4.07 m 和 -2.86 m,海域自东向西最高潮位渐增,最低潮位渐减。平均落潮历时比涨潮历时长约 0.8~1.5 h。上述潮汐特征值均表明,本海域地形自东向西渐浅,潮波浅水变形特征相应渐增(表 1-2)。

表 1-2 崎岖列岛海域潮汐特征值

测 站	小洋山	大戢山	芦潮港
平均潮差	2.73 m	2.89 m	3.33 m
最大潮差	5.03 m	5.45 m	5.98 m
最高潮位	3.36 m	3.66 m	4.07 m
最低潮位	-2.59 m	-2.65 m	-2.86 m
平均涨潮历时	5:51	5:49	7:00
平均落潮历时	6:34	6:36	5:26
资料年限	1997~2004 年	1978~2002 年	1980~2002 年
高程基面	1985 国家高程基准		

1.2.2 潮流

1. 潮流性质与运动形式

根据该海域 20 余站潮流周日连续观测资料,经准调和分析可知,海域以半日分潮流 M_2 和 S_2 占绝对优势,其次为日潮波 K_1 和 O_1 ,浅水分潮波 M_4 和 MS_4 相对外海较强。判据 $F = (W_{K_1} + W_{O_1})/W_{M_2}$ 在 0.12~0.37, $G = (W_{M_4} + W_{MS_4})/W_{M_2}$ 为 0.10~0.26,在部分汉道中,浅水分潮流特强。根据海港水文调查规范约定,该海域潮流属于非正规半日浅海潮流类型(表 1-3)。

表 1-3 崎岖列岛海域潮流椭圆要素、潮性判据、余流

测站			B ₅	K ₁₈	B ₂	B ₁	N ₁	P ₅	W ₂	SC ₁	P ₄	B ₃	B ₄	W *
潮流椭圆要素	M ₂	$\frac{w}{(m/s)}$	1.02	1.04	1.16	1.24	1.28	1.11	1.19	0.92	1.10	1.20	1.10	1.21
		$\theta/(^{\circ})$	104	100	112	105	106	102	108	133	107	104	103	119
		k	-0.17	-0.01	-0.10	-0.06	-0.05	-0.02	-0.15	-0.12	-0.04	-0.01	-0.02	-0.05

(续表)

测站			B ₅	K ₁₈	B ₂	B ₁	N ₁	P ₅	W ₂	SC ₁	P ₄	B ₃	B ₄	W *
潮流椭圆要素	K ₁ + O ₁	w/ (m/s)	0.22	0.29	0.14	0.27	0.32	0.25	0.08	0.04	0.21	0.35	0.12	0.28
		θ/(°)	106	292	284	290	271	229	260	295	276	275	247	276
		k	0.05	−0.02	−0.50	0.01	−0.21	0.21	0.43	−0.28	0.21	0.03	−0.31	−0.05
	M ₄	w/ (m/s)	0.07	0.12	0.09	0.09	0.06	0.14	0.03	0.03	0.05	0.09	0.10	0.09
		θ/(°)	280	325	279	27	173	200	156	199	301	292	291	301
		k	−0.35	−0.50	−0.70	0.57	−0.17	−0.07	0.20	0.38	0.25	−0.14	−0.19	−0.05
潮性判据	F	0.37	0.28	0.12	0.22	0.25	0.23	0.16	0.15	0.18	0.29	0.28	0.23	
	G	0.11	0.20	0.13	0.12	0.13	0.23	0.26	0.20	0.15	0.14	0.20	0.14	
余流	流速	v ₀ / (m/s)	0.09	0.13	0.12	0.10	0.16	0.12	0.42	0.18	0.17	0.18	0.16	0.15
	流向	θ ₀ /(°)	72	345	194	166	91	235	199	196	177	104	13	183
最大可能潮流	v _{max} / (m/s)	2.58	1.86	2.20	2.35	2.39	2.24	2.25	2.23	1.85	2.02	1.88	2.15	
	θ/(°)	106	91	112	101	105	100	117	129	111	108	101	118	

由表 1-3 可看出,海域主要半日和全日分潮流主轴方向为 $100^\circ \sim 130^\circ$ 或 $290^\circ \sim 310^\circ$,潮流主要流向为 WNW—ESE, M_2 椭圆长轴 $1.00 \sim 1.30$ m/s, 椭率较小,大部分为 $0.01 \sim 0.10$,潮流往复性较强,转流时间较短,椭率大部分时间为负值,表明海域流矢随时间按顺时针方向旋转。

2. 潮流运动

(1) 流动概况: 本海域以太阴半日潮波 M_2 占优,因而约在半周日的时段内,主要潮波运动的方向,呈现约 6 h 向西略偏北的涨潮流和约 6 h 向东略偏南的落潮流,根据实测资料绘成的同潮流矢图(图 1-2 至图 1-7),图示本海域在每个半日潮周期中,按 1 h 时间间隔的逐时流况。

图 1-2 为小洋山潮位高平时 [$h = H_h + (0 \sim 1)$] 的流矢: 全水域处在涨潮流的后时段,潮流主流仍流向杭州湾,仅北部少量流向长江口南槽,同时流近南汇嘴处会分流,部分贴岸进入杭州湾,潮流强度相对

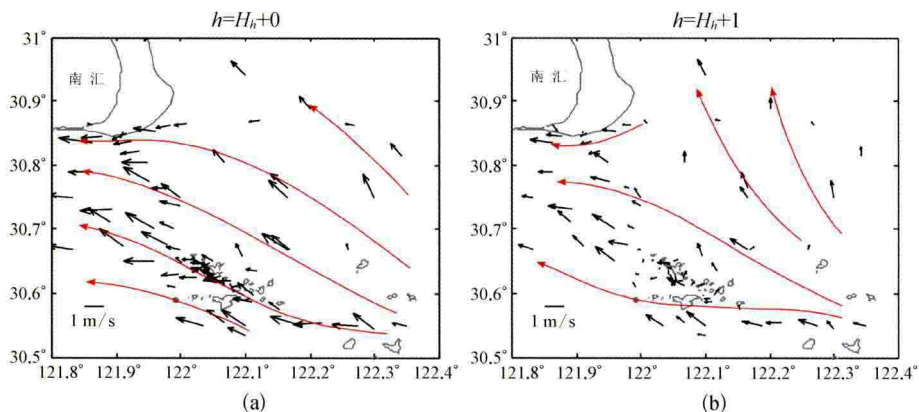


图 1-2 崎岖列岛附近海域逐时流矢图(大潮、表层)

较弱。

图 1-3 为小洋山潮位高平后 2~3 h [$h = H_h + (2 \sim 3)$] 的流矢: 潮流由涨转落的涨憩时段。全水域处在弱流状态, 流向极为分散, 口外潮流主要呈东北方向, 南汇嘴附近仍有由长江口贴岸流向杭州湾的弱流。

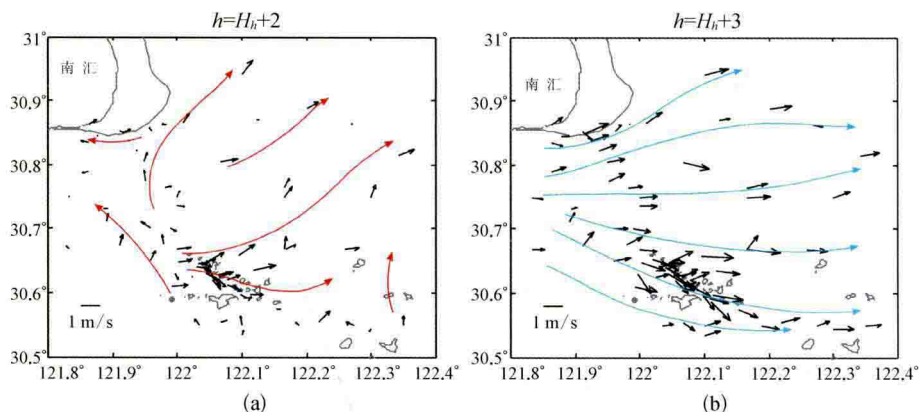


图 1-3 崎岖列岛附近海域逐时流矢图(大潮、表层)

图 1-4 为小洋山低平前约 1~2 h [$h = H_l - (1 \sim 2)$] 的流矢: 潮流落急时段, 由杭州湾向东流的强潮流主控本海域, 长江口南槽下泄的落潮流径直东流, 对本海域影响较小。

图 1-5 为小洋山潮位低平后 1 h [$h = H_l + (0 \sim 1)$] 流矢: 潮流处于落潮流阶段。

图 1-6 为小洋山潮位低平后 2~3 h [$h = H_l + (2 \sim 3)$] 的流矢: 潮流

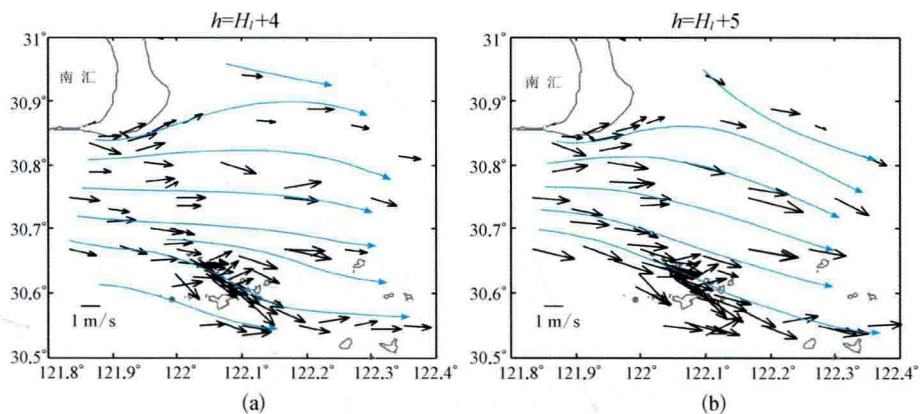


图 1-4 崎岖列岛附近海域逐时流矢图(大潮、表层)

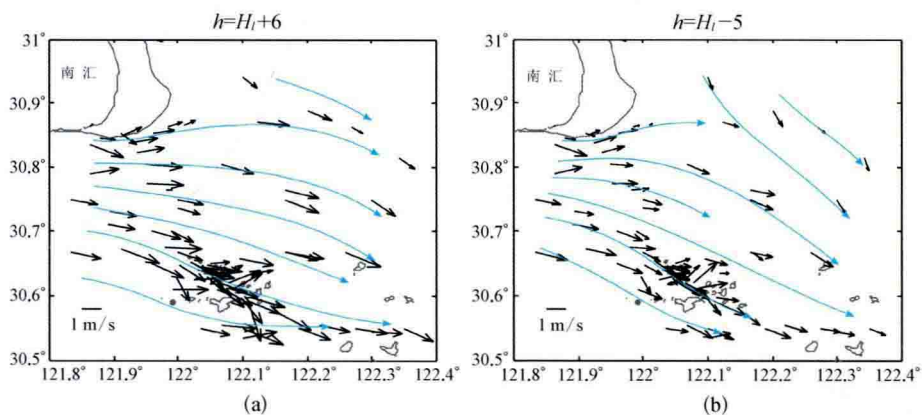


图 1-5 崎岖列岛附近海域逐时流矢图(大潮、表层)

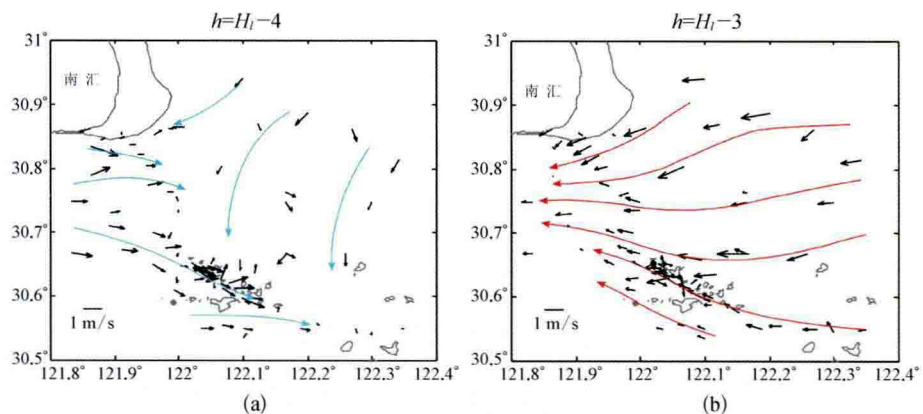


图 1-6 崎岖列岛附近海域逐时流矢图(大潮、表层)

由落转涨的落憩时段。全海域又处在弱流状态,南部仍有以杭州湾流经洋山港区的弱落潮流,北部则有长江水流入,而南汇嘴沿岸又开始出现从长江口流入杭州湾的水流。

图 1-7 为小洋山潮位高平前约 $1\sim 2\text{ h}$ [$h = H_h + (1\sim 2)$] 的流矢:潮流涨急时段,呈现潮流以西向急流汇入杭州湾,仅北侧有潮流进入南槽。

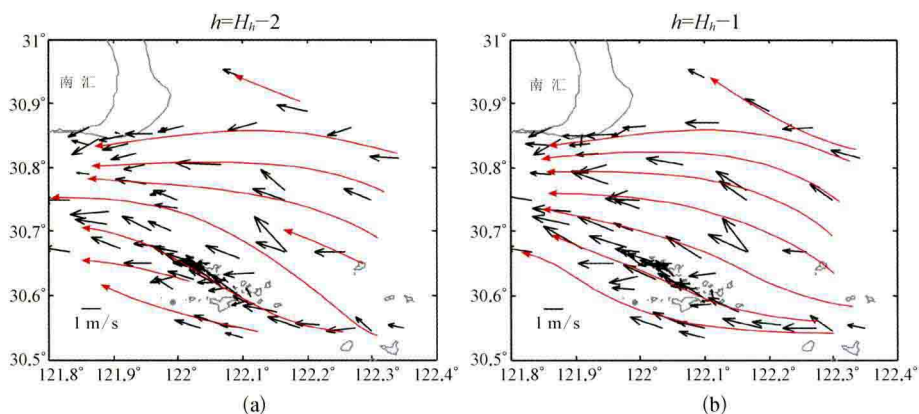


图 1-7 崎岖列岛附近海域逐时流矢图(大潮、表层)

(2) 潮流特征: 根据海域约 120 站次的潮流实测资料统计分析,全海域潮流的主要特征如下。

潮段平均流速: 落潮平均流速为 $0.90\sim 1.20\text{ m/s}$,最大落均速出现在洋山港区西口西侧,达 1.47 m/s ;涨潮平均流速为 $0.80\sim 1.20\text{ m/s}$;最大涨均速为 $1.48\sim 1.54\text{ m/s}$,出现在小洋山岛链东北侧。

潮段最大流速: 全海域实测最大涨急流速为 3.87 m/s ,在芦潮港南测得,小洋山东北侧水域,涨急流速可达 2.8 m/s ;全海域实测最大落急流速为 $3.02\sim 3.23\text{ m/s}$,均出现在小洋山东北侧水域。

落涨潮流速比: 绝大部分海域落潮流速大于涨潮流速,平均速比为 $1.10\sim 1.20$ 。速比最大达 $2.24\sim 2.52$,落潮流速远大于涨潮流速,出现在小洋山岛链间汉道中;也有局部地区涨潮流速大于落潮流速,最小速比值为 $0.65\sim 0.70$,出现在芦潮港南沿岸侧。

落涨潮流历时：大潮期间海域大部分落潮流历时长于涨潮流历时约 0.5~1.0 h, 历时比值约 1.10~1.20, 在洋山海域落潮流历时相对较长, 特别是在汉道中落潮流的右侧水域, 由于峡道效应, 落潮流历时长于涨潮流历时一倍多, 历时比值达 2.85。但在该海域东部邻近舟山群岛或水深较深处, 涨潮流历时长于落潮流历时约 0.5~1.0 h, 历时比值约 0.80~0.95。落涨潮流历时长短与潮汐有一定关系, 往往中潮期间涨潮流历时会增长。

(3) 流场分布特性：全海域表层平均流速为 1.20~1.50 m/s。由于崎岖列岛和嵎泗列岛间为潮波进入本海域的主通道, 因而在小洋山岛链东北侧呈现强流区, 最大表层平均流速在 1.50 m/s 以上, 以该海域为中心, 东向外海域深水和西北向南汇浅滩, 流速逐渐递减。崎岖列岛和岛群减阻了流速, 以其为中心形成弱流区, 并向四周流速逐渐增大。值得注意的是, 近年来由于南汇边滩不断向海围垦, 造成南汇南滩贴岸的高流速区, 进而形成从南汇至小洋山中间呈马鞍形的低流速段(图 1-8, 图 1-9)。

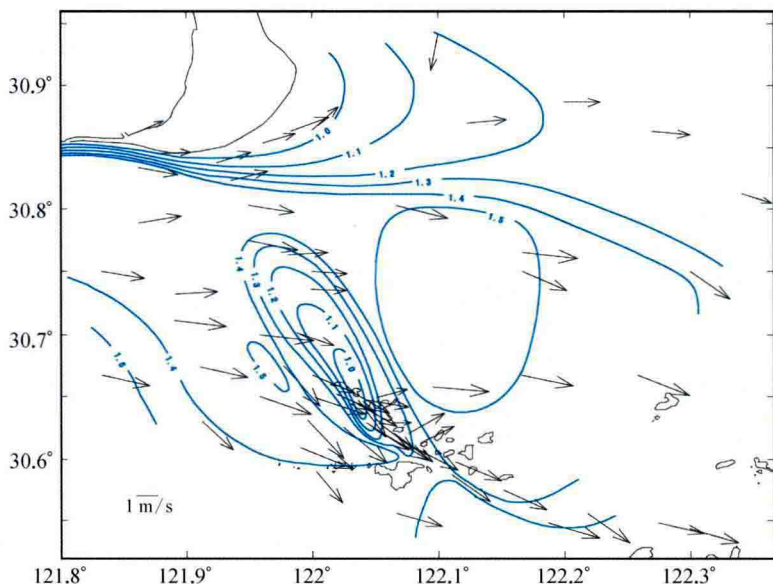


图 1-8 崎岖列岛海域落急流矢及落潮平均流速分布图(大潮、表层)