

# 基于地波雷达观测资料的烂沙洋海域表层海流特征研究

吉会峰, 李用留, 高清清, 朱建斌, 刘吉堂

(国家海洋局南通海洋环境监测中心站, 江苏 南通 226005)

**摘 要:** 利用江苏如东海域地波雷达获得的长期的海流观测资料对烂沙洋海域表层海流特征和余流特征进行了分析。资料分析结果表明:本海域表层海流总体上呈西北-东南向,海域潮流动力较为强劲,各月最大流速介于125~150 cm/s;各月涨潮平均流速介于39~63 cm/s,落潮平均流速介于37~64 cm/s;表层潮流为正规半日潮,M2分潮为最主要分潮,潮流为往复流;东西向潮流流速大于南北向,东西向潮流最大流速为114 cm/s左右,南北向潮流最大流速为62 cm/s左右;该海域余流基本上呈现西向-南向流动,逐时余流方向频率方向为S向或SSW向。

**关键词:** 海流;地波雷达;调和分析;余流

**中图分类号:** P731.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2017)05-0064-10

## 1 引言

南黄海辐射沙洲位于江苏海岸以东,自弼港向外呈辐射状分布,其面积宽广,南北长约200 km,东西宽约90 km。该海域处于东海前进潮波与黄海旋转潮波的辐合带,由于潮波辐聚,波能集中,使得该区潮差大、潮流强,属强潮区。辐射沙洲区域脊槽相间,地形复杂,是南黄海独特的地貌类型。

烂沙洋潮流通道位于辐射沙脊群南部西太阳沙和鱞鱼沙之间,是辐射沙洲沙基间的一个潮流深槽,被火星沙、大洪埂子、太阳沙分成南水道、中水道和北水道,烂沙洋槽宽水深,水道深槽离岸较近,是开发建设深水航道的理想地方<sup>[1]</sup>,烂沙洋北水道和南水道已成为江苏如东海域重要的航运通道。

海流是海洋动力研究中的重要参数,是形成和维持辐射沙脊群的主要动力,余流对长期物质的输移具有指示作用。对辐射沙洲海域潮流和余流特征的研究对了解辐射沙洲海域地形地貌形成与演变及物质的长期输运特征都具有十分重要的意义。不少学者对南黄海海域的水文动力状况作了大量工作,在以往的研究主要通过短期现场观测资

料和数值模拟来研究潮流对沙脊发育的动力作用、沿岸流特征及对物质输运的影响<sup>[2-6]</sup>。高频地波雷达(HF Surface Wave Radar)是当今国际上海洋观测的先进设备,利用海洋表面对高频电磁波的一阶散射和二阶散射机制<sup>[7-9]</sup>,可以从雷达回波中提取风场、浪场、流场等海况信息,实现对海洋环境大范围、高精度和全天候的实时监测,已成为重要的海洋观测手段<sup>[10-12]</sup>。

本文根据地波雷达在烂沙洋海域获取的长期海流观测资料,利用matlab软件编写程序进行分析,研究该海域潮流及长期余流分布特征及变化规律,为该海域深水航道的开发建设、地形演变研究及污染物质的漂移扩散研究等工作提供有益的参考。

## 2 雷达观测资料

OSMAR-S型系列便携式高频地波雷达是一种相干散射雷达,它利用高频电磁波随水面传播的特点,探测海洋表面流的反射回波信号,利用海洋波浪对高频电波的传输和衰减的特性,对雷达接收信

收稿日期: 2016-11-09; 修回日期: 2017-01-05。

基金项目: 国家海洋局东海分局青年科技基金(201624)。

作者简介: 吉会峰(1987-),男,工程师,硕士,主要从事物理海洋学、水文动力研究。E-mail: zqjhf@163.com

号进行预处理,再结合雷达分辨率计算对应回波处的海洋径向表面流速。通过间隔一定距离的双站雷达同时获得同一地点的不同方向的径向流,采用矢量合成的方法,获得该点的矢量流。与传统的仪器相比其具有探测范围广、分辨率高、全天候等诸多优势。

南通地波雷达站系统分为3个部分:洋口、吕四两个分站点,南通中心站一个数据处理集成中心。吕四大唐电厂地波雷达站和如东洋口港地波雷达站相距约58 km;地波雷达站的采样点(雷达元)以等间隔的距离(2.5 km)和角度(径向流 $3^{\circ}$ )分辨率在覆盖海域分布;雷达单站采样频率为每6 min一次,合成后的海流采样间隔为20 min。雷达建成运行后获得了大量该海域连续的表层海流观测资料。

便携式高频地波雷达的主要技术指标如表1所示。

表1 便携式高频地波雷达 OSMAR-S的主要技术指标

雷达型号	OSMAR-S100(J)	
工作频段/MHz	(13 $\pm$ 0.5)	
最大探测距离/km	100	与外部环境有关
方位角分辨率/ $^{\circ}$	3	
距离分辨率/km	1, 2.5	根据需要设定
测流精度/(cm/s)	5	
数据更新时间/min	6	

2012年,国家海洋局南通海洋环境监测中心站对地波雷达站进行测流比对。在地波雷达高精度探测区内,通过海上3个点的定点 ADCP 海流观测和一个点的漂流浮标观测与雷达反演的同步海流

资料进行比对分析,获取了该海域地波雷达测量表层海流的准确度信息。对比分析表明,地波雷达测流结果与 ADCP 及漂流浮标测流结果吻合较好,地波雷达测流与 ADCP 测流结果误差最小水深层次基本在0.5 m层。地波雷达与 ADCP 测量结果相比,流速平均误差为-7.58 cm/s,两者相关系数为0.70,流向平均误差为 $-2.53^{\circ}$ ,两者相关系数为0.91。OSMAR-S地波雷达苏北浅滩海域测量表层流是可行的,误差基本在可接受范围之内<sup>[13]</sup>。

本文结合烂沙洋海域地形和水动力条件,在地波雷达的有效探测范围内,取位于烂沙洋海域靠近雷达系统高精度探测区中心附近具有较大代表性的A点、B点和C点,对获取的海流资料进行分析。其中,A点位于烂沙洋中部区域,周围平均水深约15 m;B点位于烂沙洋北水道区域,其北侧为太阳沙,南侧为大洪埂子,周围平均水深约17 m;C点位于烂沙洋南水道小洪区域,其北部为火星沙,周围平均水深约13 m。本文选取2013年1月1日—2013年12月31日全年的表层海流观测资料进行分析。

### 3 潮流特征分析

#### 3.1 实测海流特征

对各月实测海流资料进行统计特征分析:由实测海流数据可以看出,本海域潮流基本为往复流,流向总体上呈西北-东南向,涨落潮流向比较集中,落潮流相基本集中在 $100^{\circ}\sim 130^{\circ}$ ,涨潮流向基本集中在 $270^{\circ}\sim 300^{\circ}$ ;海域潮流动力较为强劲,全年实测

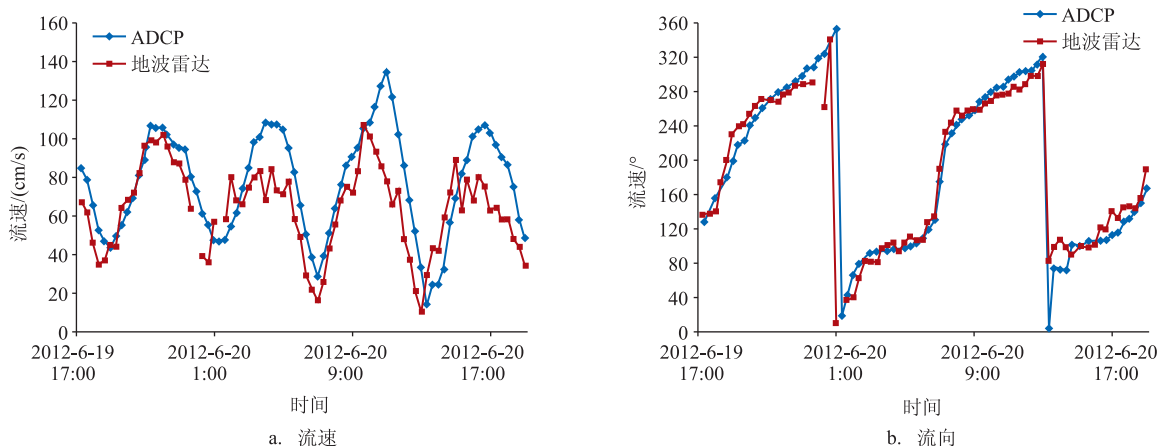


图1 0.5 m层 ADCP 与地波雷达流速、流向对比

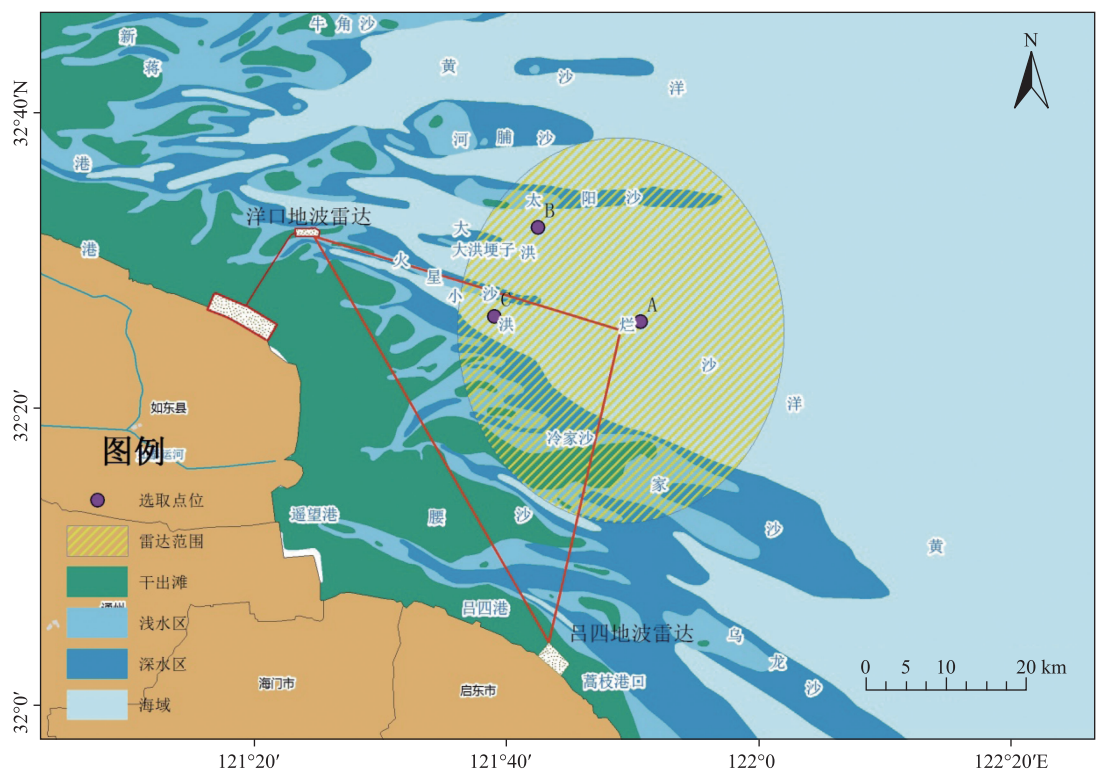


图2 海流探测范围示意图(黄色为高精度区)

表2 A点实测各月最大流速、涨落潮平均流速

月份		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	全年
实测最大	流速/(cm/s)	149	143	147	145	146	133	150	148	147	147	147	139	150
	流向/°	294	266	111	111	296	286	130	287	292	131	123	278	130
涨潮平均	流速/(cm/s)	44	51	57	52	54	55	53	58	61	57	53	51	54
	流向/°	275	273	277	283	291	282	296	292	284	280	281	274	283
落潮平均	流速/(cm/s)	43	48	54	53	50	53	54	56	57	62	53	49	53
	流向/°	123	118	119	122	122	118	121	125	126	128	123	122	122

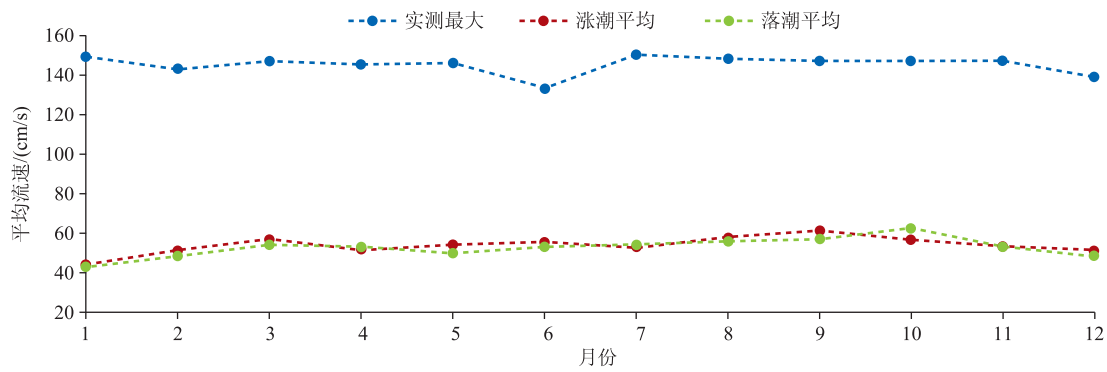


图3 A点实测各月最大流速、涨落潮平均流速变化曲线

最大流速 150 cm/s。

对各月实测海流数据进行矢量平均,可得平均涨落潮流速和流向:A点各月涨潮平均流速介于44~61 cm/s,全年涨潮平均流速54 cm/s;落潮平均流速介于43~62 cm/s,全年落潮平均流速53 cm/s。B点各月涨潮平均流速介于45~63 cm/s,全年涨潮平均流速55 cm/s;落潮平均流速介于45~64 cm/s,全年落潮平均流速56 cm/s。C点各月涨潮平均流速介于39~61 cm/s,全年涨潮平均流速50 cm/s;落潮平均流速介于37~58 cm/s,全年落潮平均流速48 cm/s。

由分析结果可以看出本海域表层海流平均涨落和潮流速之间相差不大,从全年平均来看,位于

烂沙洋北水道的B点平均涨、落潮流速最大,位于烂沙洋南水道的C点平均涨、落潮流速最小,这可能是由于B点所处位置位于东西向两沙之间,水道狭窄且水深较深,而C点所处位置受南北向沙脊的影响且水深较浅所致。

### 3.2 潮流调和分析

潮流调和分析将不同的天文潮的频率固定,将海水的流动分解成不同天文分潮作用引起的流动,只要足够长的时间序列,就能将频率相近的潮流完全进行分立,得到每个天文分潮的椭圆要素<sup>[14]</sup>。本文采用Pawlowicz等<sup>[15]</sup>提供的潮流调和分析程序包对实测海流数据进行调和分析。

表3 B点实测各月最大流速、涨落潮平均流速

月份		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	全年
实测最大	流速/(cm/s)	134	144	145	142	145	129	148	147	144	141	146	141	148
	流向/°	275	86	105	106	288	115	109	102	102	117	283	295	109
涨潮平均	流速/(cm/s)	45	52	57	54	56	58	55	58	63	58	54	56	55
	流向/°	275	271	274	278	280	283	291	292	286	279	281	276	281
落潮平均	流速/(cm/s)	45	51	56	56	53	59	57	60	60	64	57	54	56
	流向/°	123	117	117	117	112	121	119	120	128	127	123	125	121

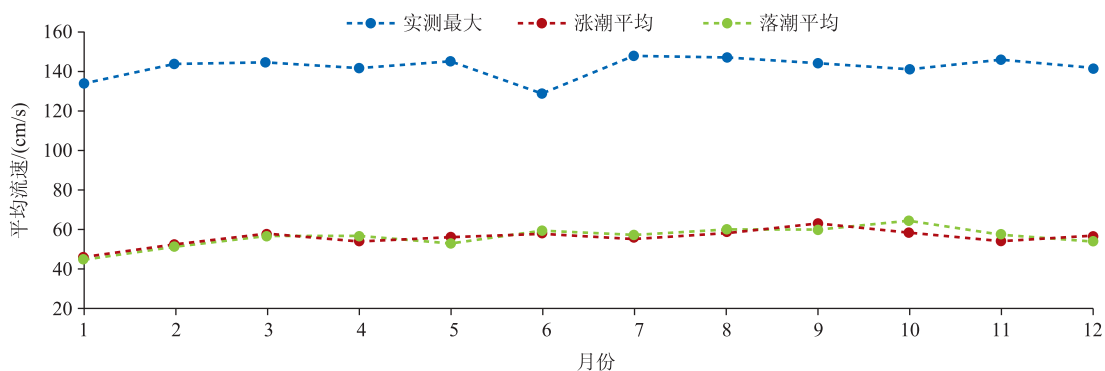


图4 B点实测各月最大流速、涨落潮平均流速变化曲线

表4 C点实测各月最大流速、涨落潮平均流速

月份		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	全年
实测最大	流速/(cm/s)	143	142	143	137	141	125	149	144	137	139	147	145	149
	流向/°	258	227	98	106	272	264	118	115	290	233	260	272	118
涨潮平均	流速/(cm/s)	39	48	53	48	51	51	46	56	61	56	51	50	50
	流向/°	269	263	266	268	271	274	282	283	274	269	274	274	272
落潮平均	流速/(cm/s)	37	44	48	48	44	50	47	54	51	58	50	48	48
	流向/°	131	122	121	119	112	128	122	122	132	128	124	126	124



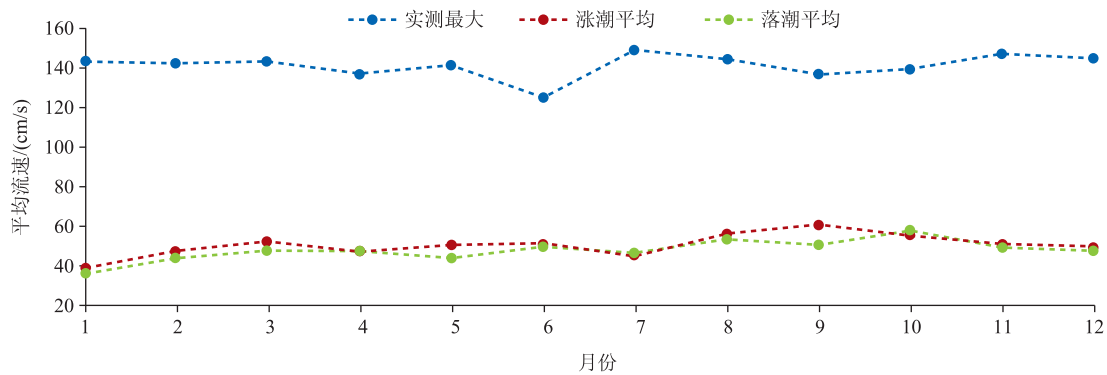


图5 C点实测各月最大流速、涨落潮平均流速变化曲线

表5 主要分潮椭圆要素

点位 分潮	A			B			C		
	长轴/(cm/s)	短轴/(cm/s)	倾角/°	长轴/(cm/s)	短轴/(cm/s)	倾角/°	长轴/(cm/s)	短轴/(cm/s)	倾角/°
*M2	71.6	-9.6	158	75.7	-8	160	64.4	0.1	162
*S2	32.9	-7.7	159	33.4	-6.3	161	29.6	-2.7	166
*N2	11.6	-1.6	162	12	-1.7	164	10.3	-0.2	164
*K2	9.9	-2.1	151	9.9	-0.8	159	8.7	0.5	168
*K1	6.5	-0.6	89	6.1	0.2	77	5.6	0.2	77
*M4	4.8	-0.3	80	3.8	1.4	76	4.1	-0.5	62
*O1	4.7	0.4	92	4.6	0.8	92	3.7	0.3	87
*MS4	4.6	-0.1	52	4.5	0.2	59	4.5	-0.4	39

由调和分析可得各分潮的长轴、短轴、偏角等椭圆要素,本文选取其中8个主要分潮,这8个主要分潮按长轴大小排列分别为:M2、S2、N2、K2、K1、M4、O1、MS4,其椭圆要素见表5。表中椭圆短轴正值表示潮流是逆时针旋转,椭圆短轴负值表明潮流椭圆顺时针旋转,倾角是椭圆长轴与正东方向逆时针所形成的夹角。

潮流性质:根据各椭圆要素得到主要全日分潮流与主要半日分潮流椭圆长轴的比值(HO1+HK1)/HM2均小于0.5,表明该海域的表层潮流为正规半日潮流,这也与以往的研究相一致。

由各分潮椭圆要素可知:该海域M2分潮为最主要分潮,其椭圆长轴远大于其他分潮,其次为S2分潮;其余6个分潮长轴较小,均在12 cm/s以下。因此,以M2分潮为主对3点进行比较:位于烂沙洋北水道的B点椭圆长轴最长,位于烂沙洋中部的A点次之,位于烂沙洋南水道的C点长轴最短。

从潮流运动形式看,本海域M2分潮椭圆率均小于0.15,表明潮流呈现较强的往复性,其中C点处

椭圆率最小,表明该处潮流往复性最强,其次为B点处,A点处最弱。

经调和分析后,可从实测海流中分离出纯潮流部分,其 $U$ (东方向)和 $V$ (北方向)分量随时间的变化如见图4—6,可以看出A、B两处 $U$ 、 $V$ 两个方向的潮流均具有明显的半月周期;C处 $U$ 方向潮流半月周期明显, $V$ 方向周期性较弱;3处 $U$ 方向流速幅度均大于 $V$ 方向。

A处潮流 $U$ 方向上的最大值(见图7),即东向潮流最大流速为112 cm/s左右;最小值,即西向潮流最大为114 cm/s左右。 $V$ 方向上潮流的最大值,即北向潮流最大流速为62 cm/s左右;最小值,即南向潮流最大为48 cm/s左右。

B处潮流 $U$ 方向上的最大值(见图8),即东向潮流最大流速为114 cm/s左右;最小值,即西向潮流最大为111 cm/s左右。 $V$ 方向上潮流的最大值,即北向潮流最大流速为60 cm/s左右;最小值,即南向潮流最大为44 cm/s左右。

C处潮流 $U$ 方向上的最大值(见图9),即东向潮流

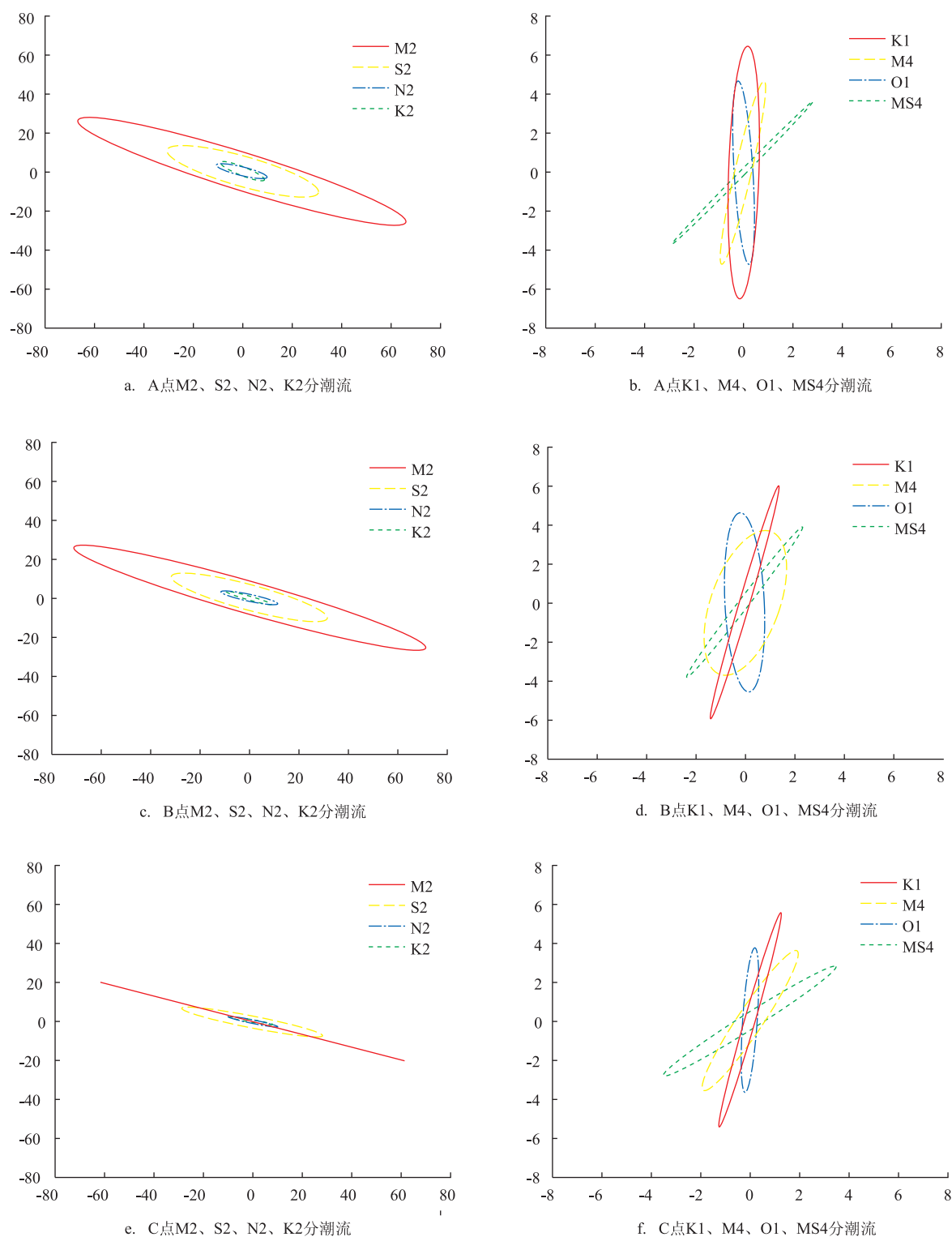


图6 3个地点分潮流特征

最大流速为107 cm/s左右;最小值,即西向潮流最大为107 cm/s左右。 $V$ 方向上潮流的最大值,即北向潮流

最大流速为42 cm/s左右;最小值,即南向潮流最大为36 cm/s左右;东西向流速幅度明显大于南北向。

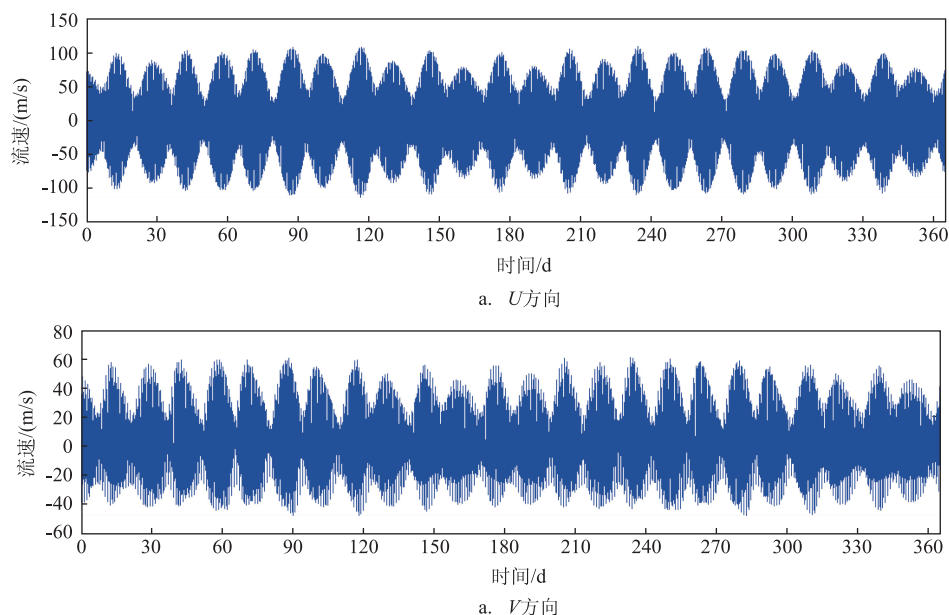


图7 A点 $U$ 、 $V$ 方向潮流曲线

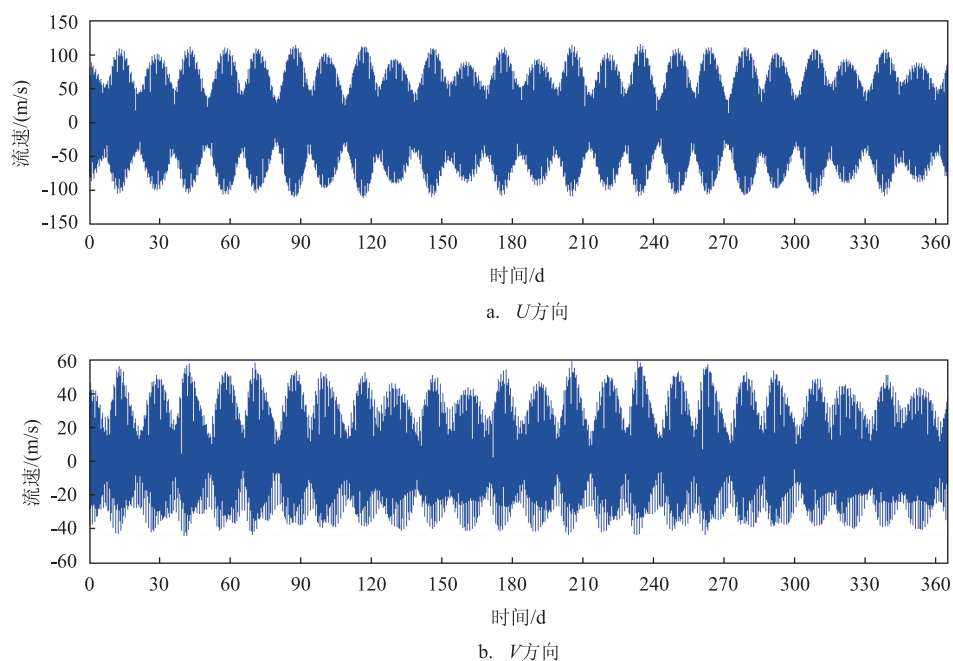


图8 B点 $U$ 、 $V$ 方向潮流曲线

### 3.3 余流特征分析

余流一般指实测海流扣除周期性潮流后的非周期性的流动,余流包括风海流、密度流、径流和潮汐余流,它主要受地形、气象、径流等因素的影响和

控制。由于余流是常向运动,它往往指示着水沙和污染物质运移的方向,余流分析是研究海岸带泥沙运动和污染物扩散的一种有效手段。

对各点 $U$ 、 $V$ 两个方向上余流分别作月平均处理,由表6可见在两个方向上余流基本都为负值,说

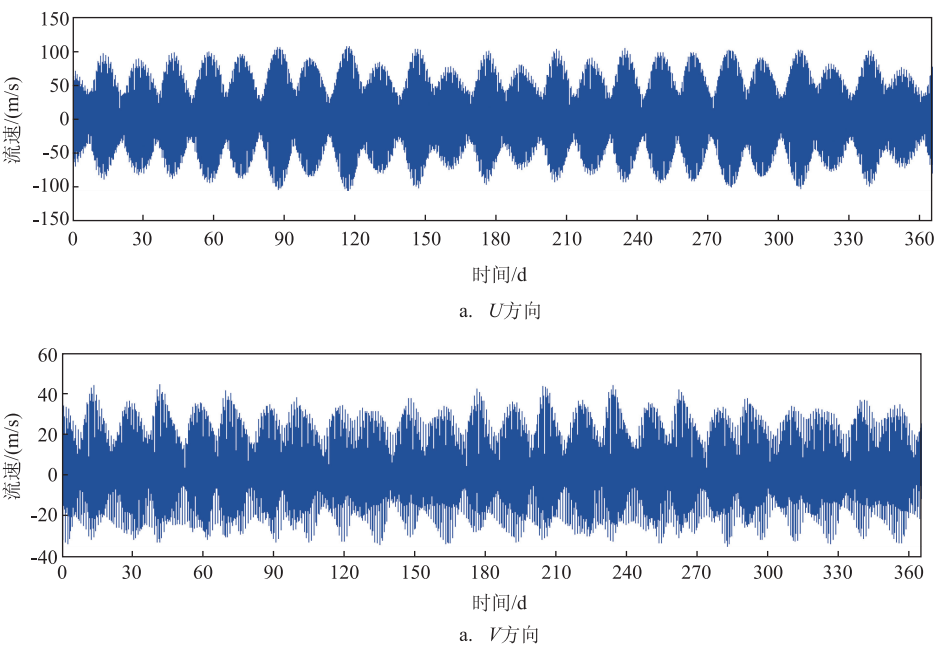


图9 C点U、V方向潮流曲线

表6 各点位U、V方向月平均余流(单位:m/s)

点位	方向	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
A	U	-5.1	-5.7	-7.6	-3.3	-6.8	-5.6	-2.5	-5.6	-7.4	-4.6	-1.9	1.3
	V	-9.2	-8.9	-8.9	-8.0	-1.9	-6.0	-1.7	-3.9	-8.9	-13.4	-10.1	-12.8
B	U	-4.0	-4.3	-5.9	-3.1	-5.7	-4.5	-2.7	-2.7	-8.6	-3.7	-2.7	-3.8
	V	-10.3	-10.2	-10.4	-8.7	-3.7	-8.5	-3.7	-2.9	-9.1	-14.4	-9.5	-12.8
C	U	-6.7	-7.3	-8.3	-4.3	-7.4	-7.4	-5.3	-6.2	-13.3	-6.9	-4.8	-4.3
	V	-12.4	-13.8	-13.2	-11.9	-7.6	-13.2	-6.6	-7.0	-13.8	-18.1	-12.1	-12.9

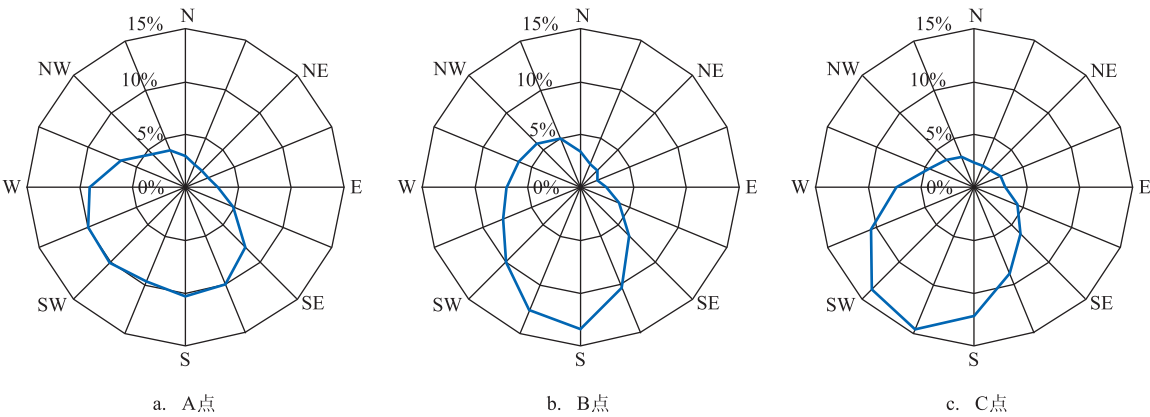


图10 各方向余流所占频率曲线

明月平均余流基本上呈西向和南向流动。对各点逐时的余流流向进行频率统计,各点频率曲线如图10所示,从图中可以看出,本海域余流最大频率方向为S向或SSW向,也就是以指向近岸为主,这与吴德安等<sup>[16]</sup>基于1998年10月实测数据分析的结果“烂沙洋近海段余流指向近岸”较为一致。



## 4 结论

通过对烂沙洋海域地波雷达表层海流观测数据的统计分析、潮流调和分析以及余流分析,初步可以得出以下结论:

(1)本海域表层海流总体上呈西北-东南向,落潮流相基本集中在 $100^{\circ}\sim 130^{\circ}$ ,涨潮流向基本集中在 $270^{\circ}\sim 300^{\circ}$ ;海域潮流动力较为强劲,全年实测最大流速 $150\text{ cm/s}$ ;各月涨潮平均流速介于 $39\sim 63\text{ cm/s}$ ,落潮平均流速介于 $37\sim 64\text{ cm/s}$ ;从全年平均来看,位于烂沙洋北水道的B点平均涨、落潮流速最大,位于烂沙洋南水道的C点平均涨、落潮流速最小,这可能是由于B、C点所处水道位置不同,受周围沙脊走向影响所致;

(2)该海域的表层潮流为正规半日潮,M2分潮为最主要分潮,其次为S2分潮。从潮流运动形式看,本海域潮流呈现较强的往复性,其中烂沙洋南水道潮流往复性最强,这可能与此处水道狭长有关,其次为烂沙洋北水道处;

(3)该海域 $U$ 、 $V$ 两个方向的潮流均具有明显的半月周期;东西向流速幅度明显大于南北向;

(4)该海域余流基本上呈西向-南向流动,从逐时余流统计特征来看,本海域余流最大频率方向为S向或SSW向。

### 参考文献:

- [1] 李孟国,杨树森. 西太阳沙和烂沙洋海域深水港开发涉海关键技术问题[J]. 中国港湾建设, 2011, (1): 1-4, 22.
- [2] 刘爱菊,修日晨,张自历,等. 江苏近海的激流[J]. 海洋学报, 2002, 24(6): 120-126.
- [3] 诸裕良,严以新,薛鸿超. 南黄海辐射沙洲形成发育水动力机制研究—I. 潮流运动平面特征[J]. 中国科学(D辑), 1998, 28(5): 403-410.
- [4] 吴德安,崔效松,张忍顺,等. 江苏辐射沙洲水道潮流调和分析[J]. 海洋与湖沼, 2008, 39(2): 105-111.
- [5] 张忍顺,王雪瑜. 江苏省淤泥质海岸潮沟系统[J]. 地理学报, 1991, 46(2): 195-206.
- [6] 秦毅. 江苏近海的环流动力研究进展[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(12): 3389-3394.
- [7] Crombie D D. Doppler spectrum of sea echo at  $13.56\text{ Mc/s}$ . [J]. Nature, 1955, 175(4459): 681-682.
- [8] Stewart R H, Joy J W. HF radio measurements of surface currents [J]. Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts, 1974, 21 (12): 1039-1049.
- [9] Barrick D E, Evans M W, Weber B L. Ocean surface currents mapped by radar[J]. Science, 1977, 198(4313): 138-144.
- [10] 朱大勇,邵浩,李炎,等. OSMAR高频地波雷达福建示范系统径向流数据质量分析[J]. 台湾海峡, 2007, 26(1): 7-16.
- [11] 龚子平,柯亨玉,吴雄斌,等. “龙王”台风期间高频地波雷达数据分析[J]. 地球物理学报, 2007, 50(6): 1695-1702.
- [12] 朱大勇,李炎,郭小钢,等. 高频地波雷达海流验证研究述评[J]. 热带海洋学报, 2013, 32(4): 1-7.
- [13] 吉会峰,张春琳,刘吉堂. 苏北海域高频地波雷达海流探测误差分析[C]//中国海洋学会2013年学术年会第14分会场海洋装备与海洋开发保障技术发展研讨会论文集. 上海:上海市海洋湖沼学会, 2013.
- [14] 侍茂宗. 物理海洋学[M]. 济南: 山东教育出版社, 2004: 60-120.
- [15] Pawlowicz R, Beardsley R, Lentz S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE[J]. Computers & Geosciences, 2002, 28(8): 929-937.
- [16] 吴德安,张忍顺,沈永明. 江苏辐射沙洲水道垂线平均余流的计算与分析[J]. 海洋与湖沼, 2007, 38(4): 289-295.

## Surface current characteristics analyzed by HF Surface Wave Radar data in Lanshayang sea area

Ji Hui-feng, Li Yong-liu, GAO Qing-qing, ZHU Jian-bin, LIU Ji-tang

(Nantong Marine Environmental Monitoring Center, State Oceanic Administration, Nantong 226005 China)

**Abstract:** This paper analyses the characteristics of sea surface currents and residual currents in coastal area of Rudong County, in Jiangsu Province, using long-term ocean observation data obtained by HF Surface Wave Radar. Results show that, the sea surface current direction is generally NW-SE. The maximum monthly flow is

between 125~150 cm/s so that tidal energy is strong here. The average flood current velocity is between 39~63 cm/s and the average ebb current velocity is between 37~64 cm/s. The surface tide is regular semidiurnal and M2 is the most important constituent. The tidal current velocity in east-west is 114cm/s, which exceeds the tidal current velocity value of 62cm/s in north-south. The direction of residual current is west-south, and the direction frequency distribution of hourly residual current shows that southward is the largest, followed by southwestward.

**Key words:** ocean current; HF Surface Wave Radar; tidal harmonic analysis; residual current