

# 江苏辐射沙洲水道垂线平均余流的 计算与分析\*

吴德安<sup>1,2</sup> 张忍顺<sup>3</sup> 沈永明<sup>3</sup>

(1.河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室 南京 210098; 2. 河海大学交通、海洋学院 南京 210098;  
3. 南京师范大学海洋及滩涂研究所 南京 210097)

**提要** 根据辐射沙洲邻近主水道和中心沙洲滩面水道 33 个站次的准同步实测潮流资料, 计算了各站位垂线平均欧拉余流、斯托克斯余流、拉格朗日余流, 并分别进行了逐站位的分析和比较。各站位斯托克斯余流相对较小, 在水道口门处斯托克斯余流较大, 余流流向大都沿涨潮流向, 豆腐渣腰门水道及其以东站位的斯托克斯余流则大致沿落潮流向。欧拉余流和拉格朗日余流大小和流向基本一致。研究海域存在着半封闭的顺时针方向的海水净输移。西洋水道和条鱼港水道是辐射沙洲中心腹地的净进水通道, 而豆腐渣腰门水道、陈家坞槽水道、外王家槽水道、苦水洋海域水道则是净出水通道。

**关键词** 辐射沙洲, 潮流水道, 欧拉余流, 斯托克斯余流, 拉格朗日余流

**中图分类号** P731.23

在近岸和河口区域, 水质点经过一个潮汐周期之后, 并不回到原先的起始位置上, 这是由于常流和湍流以及潮汐本身的非线性现象所引起的。常流是指进行潮流调和分析时的余流部分, 它是由于风、大气压力梯度、河流流入等原因产生的(陈宗镛, 1980)。Tee(1976)指出, 潮汐余流是由于非线性底摩擦效应、底形、边界形状、连续方程中的非线性项、动量方程中的平流项种种原因使得潮流出现非线性效应引起的。潮汐余流可用拉格朗日方法和欧拉方法进行的研究, 欧拉余流是指对空间固定地点来说的, 而拉格朗日余流等于欧拉余流加上斯托克斯漂流, 它能给出一个流体元的余流。Bowden(1963)最早将余流分解为欧拉余流和 Stokes 余流, 二者合成得到 Lagrange 平均输移。在潮汐河口或海岸水域、对定点潮流记录滤波或流的时间序列作潮周期平均, 求得的余流为欧拉余流。Stokes 余流体现的是潮流变化项与水深变化项的潮周期相关大小。在浅水海洋学中, 拉

格朗日余流来源于有限振幅波的研究。Longuet-Higgins(1969)在大尺度环流研究中首次使用“拉格朗日”概念, 认为质量输移速度等于欧拉余流与 Stokes 漂流之矢量和。Zimmerman(1979)和 Cheng 等(1982)指出质量输移的 Stokes 公式不足以解释余流的拉格朗日性质, 他们定义拉格朗日余流是标识水质点净位移除以相应时间, 潮汐长期质量输运过程不是由欧拉余流而是由拉格朗日平均速度决定(Feng *et al.*, 1986)。

## 1 研究背景

南黄海辐射沙洲海域有关研究始于 20 世纪 50 年代, 1958 年江苏省水产厅采用实测与渔民访问相结合的方式, 第一次绘出了苏北近岸水下沙脊的辐射状分布形式。60 年代初, 中国科学院海洋研究所对 港海域辐射沙洲的形成背景、条件及成因等方面进行了调查研究。1979 年, 航海保证部在此进行了航海水道测量, 首次以实测资料为基础绘出了 港辐射沙洲地形地貌分布图。

\* 国家自然科学基金重点项目, 50339010 号及国家自然科学基金项目, 40476039 号。吴德安, 博士, 副研究员, E-mail: wudeian@163.com。

收稿日期: 2006-02-08, 收修改稿日期: 2007-04-06

1980—1984年期间,开展了迄今规模最大的一次对江苏省海岸带与海涂资源综合调查、对辐射沙洲进行了多学科、系统全面的综合调查研究,取得了丰富的资料,并编有图集和报告(任美镔等,1986)。

80年代末至90年代初,国内一些研究单位对辐射沙洲海域又进行了较为细致全面地联合调查和深入细致的研究。由南京大学主持、河海大学和中国科学院海洋研究所参加的国家自然科学基金重点课题《南黄海海底辐射沙洲形成演变研究》对辐射沙洲海域动力、地貌特征及其相互作用机理进行了沉积物、地震剖面调查、波浪、潮流水文数值模拟等方面的综合研究(王颖等,1998;宋志尧等,1998;诸裕良等,1998;张东生等,1998)。

南黄海辐射沙洲海域,水文条件复杂,潮沟汊道众多,沙洲分布其中,近岸水域的水流状况除受制于外海的潮波系统和海流系统的影响外,亦受制于海岸轮廓的影响。岸外辐射状潮流脊的存在明显地影响近带潮流状况。这需要设置更多的站位进行针对性测量和研究。江苏省重点课题《条子泥促淤并陆工程实验研究》对辐射沙洲腹地邻近水道和横穿条子泥、小条子泥滩面的串水水道的潮流、泥沙进行了多站位准同步测量,以期对该海域的水、沙输移状况、辐射沙洲的演变趋势和条子泥并陆前景进行科学分析和预测。辐射沙洲海域沙洲形态和测量站位见图1所示。现场调查是在中潮期间进行的,分别进行25h的流速、水深、风速、含沙量的准同步测量。由于辐射沙洲海域幅员辽阔,进行大面积的同步测量存在着客观上的困难,本课题调查分两次进行:其中位于主泓潮流水道中的4#—24#站位的测量是在1998年9—10月中潮期间同步完成的,测量海域平均船高风速为:3.0m/s,平均风向为115°。而中心沙滩串水水道中的A1—C3站位的测量是2000年5月份在中潮期间同步完成的,测量站点平均船高风速为3.7m/s,平均风向为130°。虽然这两次较大规模的测量时间间隔近2年,又存在着季节性的差异,但测量时间的选择都是在中潮期间进行的,近似于准同步测量。两次测量的平均风速虽然有些差异,但考虑到所在水域的开阔度、深浅度以及沙脊地貌因素,两次测量的海况还是可比较的。当然在辐射沙洲这样的海岸带海域,风速风向在时间上、空间上都是变化的,而风速的大小与变化对潮流

运动存在着或多或少的影 响,这些影响正如数据误差那样是不能消除的。

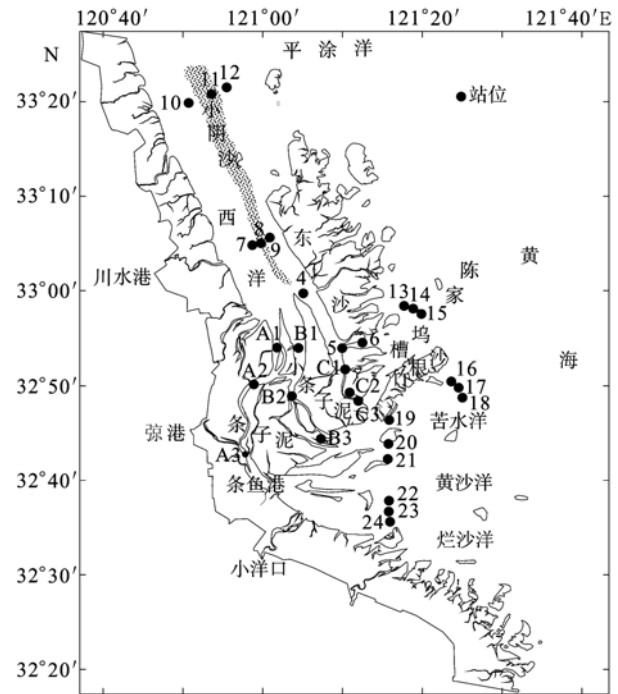


图1 沙洲形态与站位图

Fig.1 The site map of the survey stations

## 2 潮流测量具体方法

潮流测量具体方法是:测量每隔1h进行一次,其中流速、含沙量的测量按相对水深分层进行。采用重庆水文仪器厂生产的ZSX-3型直读流速流向仪对潮流流速、流向进行连续两个潮周期(约25h)的分层时序测量。测量层次为:水深小于1.5m的测一层(在0.6h处,h为实际水深);水深在1.5m及2m之间时测两层(水表面以下0.5m处,底床上0.5m处);水深h介于2—4m时测三层(水面以下0.5m,0.6h,底床上0.5m);水深大于4m时测量6层(水面下0.5m处,0.2h,0.4h,0.6h,0.8h,底床上0.5m处)。仪器流向测量精度为 $\pm 5^\circ$ ,仪器流速测量精度为 $< 2\% + 0.005\text{m/s}$ 。

B1、B2、B3 站位在中潮期间测量两个潮周期,另外在小潮期间也测量两个潮周期,以期比较不同潮况时的余流变化特征。作者将利用上述测量资料进行垂线平均余流的计算与分析。

## 3 垂线平均余流的计算和分析

### 3.1 垂线平均余流的计算

垂线平均余流的计算方法是,取该站位潮流平均涨潮流向为x轴正向,构造xoy右手直角坐标系,对各层流速沿x轴和y轴进行分解,设t为时间,z为相对水深(0 $\leq$ z $\leq$ 1)得到 $u(z,t),v(z,t)$ 。

不计流速脉动项, 则瞬时流速分量  $u(z, t)$  可以分解成垂线平均量项及其偏差项之和:  $u(z, t) = \bar{u} + u'$ ,  $\bar{u}$  和  $u'$  又可分解成潮平均量和潮变化项之和(沈焕庭等, 2001):

$$\begin{aligned}\bar{u} &= \bar{u}_0 + \bar{u}_t \\ u' &= u'_0 + u'_t\end{aligned}$$

瞬时流速可以分解为:  $u(z, t) = \bar{u}_0 + \bar{u}_t + u'_0 + u'_t$ ; 水深可表示为:  $h(t) = h_0 + h_t$

沿着  $x$  轴正向的单宽潮周期平均输水量为:

$$\langle Q \rangle = 1/T \int_0^T \int_0^1 u h dz dt = \bar{u}_0 h_0 + \langle \bar{u}_t h_t \rangle$$

其中  $\langle \rangle$  表示潮周期平均。  $\bar{u}_0 h_0$  为平均流项,  $\langle \bar{u}_t h_t \rangle$  为潮汐与潮流相关项, 称为斯托克斯漂移效应,  $T$  为潮周期。上式可表示为:  $\langle Q \rangle = h_0 \langle \bar{u}_E + \bar{u}_S \rangle = h_0 \bar{u}_L$ , 其中

$$\begin{aligned}\bar{u}_E &= \bar{u}_0; \\ \bar{u}_S &= \langle \bar{u}_t h_t \rangle / h_0; \\ \bar{u}_L &= \langle Q \rangle / h_0 = \bar{u}_E + \bar{u}_S\end{aligned}$$

上式中  $\bar{u}_E$ 、 $\bar{u}_S$ 、 $\bar{u}_L$  分别为  $x$  轴流向垂线平均欧拉、斯托克斯和拉格朗日余流分量。对  $y$  轴分量  $v(z, t)$  同样进行上述计算过程, 得到  $y$  轴流向的垂线平均欧拉、斯托克斯和拉格朗日余流分量  $\bar{v}_E$ 、 $\bar{v}_S$ 、 $\bar{v}_L$ 。对  $x$  轴流向和  $y$  轴流向垂线平均欧拉、斯托克斯和拉格朗日余流分量分别进行矢量合成得到垂线平均欧拉、斯托克斯和拉格朗日余

流矢量, 为讨论方便, 不妨分别记作  $U_E$ 、 $U_S$ 、 $U_L$ 。中潮期间余流测量计算结果如表 1 所示。各测站的垂线平均欧拉、斯托克斯和拉格朗日余流结果分别绘于图 2、图 3、图 4。

### 3.2 欧拉余流特征及分布

如图 2 所示, 设立在沙洲邻近主水道里的测站欧拉余流值普遍较大, 在西洋东槽水道中部的 9# 站位, 邻近黄沙洋八仙角的 22# 站位的欧拉余流较大, 分别为 0.65 m/s、0.49 m/s。其余各站位的欧拉余流值在 0.08—0.33 m/s 之间。

在亮月沙以西的西洋水道北端设置的 10#、12# 站位欧拉余流流向大致顺落潮流向。在西洋水道中部设置的 7#、8#、9# 测量站位的欧拉余流的大小和流向都相差较大。其中, 位于西槽的 7# 站位欧拉余流流向为东南向, 大致顺涨潮流向, 而位于小阴沙沙脊上的 8# 站位欧拉余流流向为北偏东向, 上述二站的欧拉余流都有指向东沙的分量。东槽的 9# 站位的欧拉余流值较大, 其流向为西偏南向, 9# 站位欧拉余流的上述特点是由于漫过东沙的涨、落潮水引起的, 在对测量资料的分析发现, 9# 站位所在位置在中高潮时, 沿东槽走向的涨潮水和漫过东沙沙脊的来自东部平涂洋涨潮水在此交汇, 在落潮期间, 东沙沙脊上的海水在一定的时间内也是近西向落潮的。由此可见, 该处海水运动较为特殊。

表 1 欧拉余流、斯托克斯余流、拉格朗日余流统计 (大小: m/s; 流向: °)

Tab.1 Statistics of Euler, Stokes and Lagrangian residual currents at survey stations in the tidal channels (current: m/s; current direction: °)

站号		4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	11# <sup>1)</sup>	12#	13#	14#	15#	16#	17#	18#
$U_E$	大小	0.22	0.1	0.31	0.32	0.17	0.65	0.16	0.125	0.09	0.25	0.14	0.18	0.29	0.18	0.24
	流向	110	194	30	110	28	241	48	29	10	184	83	348	334	49	47
$U_S$	大小	0.07	0.18	0.05	0.05	0.1	0.02	0.02	0.035	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01	0	0.01
	流向	145	72	82	141	152	333	171	176	181	37	186	35	7	218	302
$U_L$	大小	0.28	0.15	0.35	0.37	0.14	0.65	0.15	0.1	0.05	0.23	0.13	0.19	0.3	0.17	0.24
	流向	118	104	37	114	62	243	56	37.5	19	181	87	351	334	50	45
站号		19#	20#	21#	22#	23#	24#	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
$U_E$	大小	0.21	0.33	0.08	0.49	0.15	0.21	0.13	0.31	0.01	0.34	0.51	0.06	0.26	0.3	0.14
	流向	146	54	44	269	56	288	114	49	180	26	9	251	39	200	51
$U_S$	大小	0.02	0.09	0.03	0.06	0.06	0.08	0.05	0.09	0.07	0.1	0.04	0.05	0.1	0.02	0.02
	流向	286	313	334	291	256	250	213	246	352	174	216	101	206	7	42
$U_L$	大小	0.2	0.33	0.09	0.55	0.1	0.28	0.14	0.23	0.06	0.26	0.48	0.03	0.17	0.28	0.16
	流向	149	38	25	271	45	277	134	43	350	37	6	194	47	201	50

1) 表 1 中 11# 站位流速测量资料不够完整, 而 11# 站位位于 10# 与 12# 站位中间, 11# 站位可利用二者计算结果插值得, 所得结果可供参考。

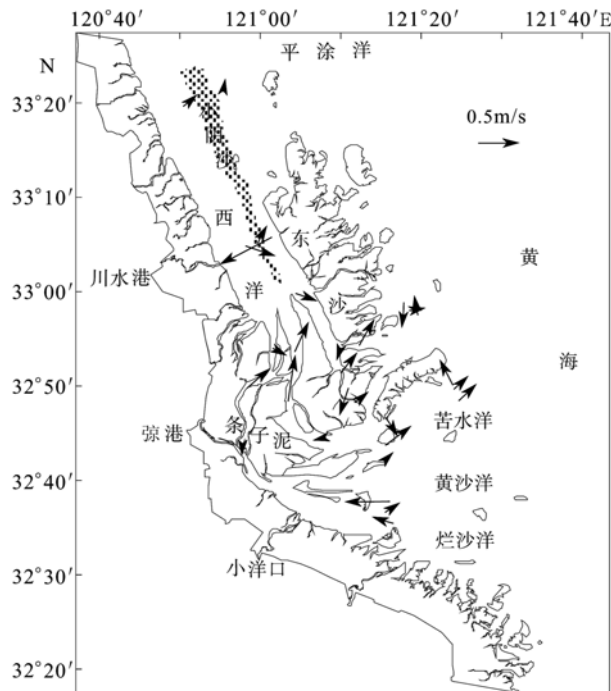


图 2 欧拉余流分布

Fig.2 The distributions of Euler residual currents in the tidal channels

东大港水道的 4# 站位对应欧拉余流大致顺其涨潮流向。5# 站位的欧拉余流较小为 0.1 m/s, 欧拉余流流向为南偏西的涨潮流向, 这是该站位位于两股潮流的交汇处导致的。设置在豆腐渣腰门水道的 6# 站位对应的欧拉余流流向为 30° 的流向, 大致为东北偏北的落潮流向。可见, 东大港水道是涨潮流占优, 而 6# 站位所在的豆腐渣腰门水道则是落潮流占优。5# 站位的潮流运动可以反映上述特征。

设置在东沙东南陈家坞槽断面上的 13#—15# 站位欧拉余流流向较为复杂, 三个站位的余流流向相差甚大, 但总体上是以顺涨潮流向的, 尤以 13# 站位欧拉余流较强。

在竹根沙东部以南, 设置在苦水洋断面上的 16#、17#、18# 站位对应欧拉余流较大, 其中 16# 站位的欧拉余流达到 0.29 m/s, 其流向指向竹根沙; 17#、18# 站位的欧拉余流大小和流向都较为一致, 流向为落潮流向, 可见这里是辐射沙洲海域的净出水通道。

竹根沙与馒头泥之间的 19# 站位、馒头泥以南的 20#、21# 站位, 其欧拉余流值以 20# 站位为最大, 19# 站位欧拉余流次之, 三站位欧拉余流流向也大致指向其平均落潮流向。

在烂沙洋八仙角沙洲附近测量端面上设立的 22#、23#、24# 站位, 其欧拉余流特征是, 22#、

24# 站位对应的欧拉余流较大, 分别为 0.49 m/s 和 0.21 m/s, 余流流向大致沿其涨潮流向。而 23# 站位的欧拉余流大小为 0.15 m/s, 流向却大致顺落潮流向。总的来讲, 该断面也是净进水断面。

横穿条子泥、小条子泥等沙洲的 3 条串水道上的站位对应的欧拉余流基本上是沿其落潮流向的, 但 B3 站位的欧拉余流流向顺其涨潮流向, 其值较小, 仅为 0.06 m/s。欧拉余流之所以沿落潮流向, 是因为沙洲上的水道是沙洲滩面水下泄归槽的主要通道, 其落潮强度和落潮历时比涨潮相应要大。在各个向中心沙洲汇聚的主槽水道末端的欧拉余流大都显示该特征。

### 3.3 斯托克斯余流特征及分布

斯托克斯余流表征的是水流的漂移量。斯托克斯余流是潮流变化量  $\bar{u}_i$  与潮汐变化量  $h_i$  乘积的潮周期平均。它体现了在潮周期里二者的相关程度, 显然二者相关性越好, 对应斯托克斯余流越大。

各测站的斯托克斯余流大小和流向分布如图 3 所示。在中心沙洲邻近主要水道中的各站位的斯托克斯余流值都相对较小, 其中 5#、8#、20#、24# 站位的斯托克斯余流值稍大些, 分别为 0.18 m/s, 0.1 m/s, 0.09 m/s, 0.08 m/s, 其余各站的斯托克斯余流都不超过 0.06 m/s。在中心沙洲上的串水道中的测站以 A2、B1、C1 的斯托克斯余流较大, 分别为 0.09 m/s, 0.1 m/s, 0.1 m/s。

在西洋水道, 斯托克斯余流基本上是与涨潮流流向相一致, 如 4#、7#、8#、10#、12# 站位, 9# 站位的斯托克斯余流与西洋水道涨潮流向逆向, 这主要是受到来自东面漫过东沙沙滩的涨、落潮水影响所致。豆腐渣腰门水道的西口门处的 5# 站位以及该水道中部的 6# 测站的斯托克斯余流基本指向该水道落潮流向, 且斯托克斯余流值较大。在陈家坞槽断面设立的 13#、14#、15# 站位的斯托克斯余流值较小, 13#、15# 测站的斯托克斯余流流向大致顺其落潮流向, 14# 测站的斯托克斯余流流向与涨潮流向较为一致。

16#—19# 站位的斯托克斯余流值较小, 流向大都与涨潮流向较为一致。20#—24# 站位的斯托克斯余流值较大, 流向指向辐射沙洲中心沙洲, 即大致顺其涨潮流向。

总之, 中心沙洲外围水道的斯托克斯余流是

水道地形逐渐变化抬升, 导致涨潮潮流变化量  $\bar{u}_t$  与潮汐变化量  $h_t$  正相关更强, 这样涨潮阶段的二者的乘积更大些, 这就是大多数站位对应斯托克斯余流大致沿其涨潮流向的主要原因。

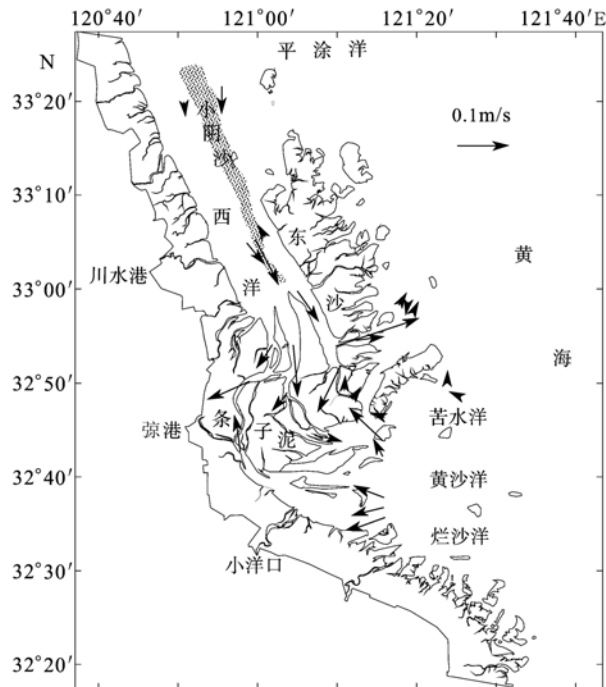


图 3 斯托克斯余流分布

Fig.3 The distributions of Stokes residual currents in the tidal channels

三条串水水道上设立的 A1—C3 的 9 个测量站位对应的斯托克斯余流特点是: 除了 C3 站位外, 其余各站斯托克斯余流流向与其涨潮流向基本一致。沙洲各水道的口门处是邻近主水道和沙洲串水水道的结合部, 流速变化和水位的变化相关性更强, 从而在该处的斯托克斯余流较大, 且大致顺其涨潮流向。由此可见, 辐射沙洲海域底床地形的变化是造成水流飘移的基本原因。

### 3.4 拉格朗日余流特征及水循环

水量输移是由非潮汐运动的平均流和斯托克斯漂移效应共同作用的结果, 拉格朗日余流可反映水量净输移的大小和流向。

所有测站中, 5#、8#、A1、A3 站位对应的斯托克斯余流和欧拉余流大小相当, 但流向差别较大, 矢量合成所得拉格朗日余流流向相较欧拉余流的流向改变较大, 其余站位的欧拉余流差不多是对应斯托克斯余流的 5—30 倍, 所以拉格朗日余流的大小、流向和欧拉余流的大小、流向相近。各站位拉格朗日余流的具体大小和流向见表 1 和图 4 所示。

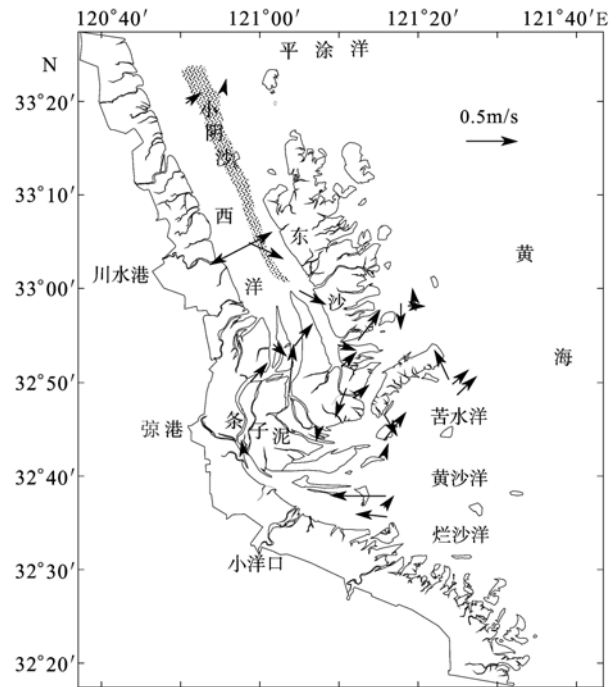


图 4 拉格朗日余流分布

Fig.4 The distributions of Lagrangian residual currents in the tidal channels

图 4 表明, 在沙洲腹地及邻近水道中的水流净输移流向总体是以顺时针方向进行的。从烂沙洋、黄沙洋沿其涨潮流向经条鱼港水道, 漫过条子泥沙滩及滩上水道向条子泥北部水域流去, 与西洋水道南向净输移潮水会聚于西洋南端各支水域。在西大港西支北口门处, 潮水漫过西北尖子沙脊向其东的西大港水道输移, 然后从西大港水道通过北尖子沙脊流向东大港水道, 与北来的西洋净输移潮水相汇, 然后漫过东沙南端、江家坞沙滩、通过豆腐渣腰门等水道向陈家坞槽海域方向净输移。由于贯穿条子泥中部有东西向的二分水滩脊的存在, 小条子泥中南部、高泥沙滩水道的潮水净输移则是向南或东南流向汇入外王家槽、陈家坞槽等水道, 然后向苦水洋海域近东向净输移。

表 2 为小潮期间 B1、B2、B3 站位对应的 2 个潮周期平均垂线平均欧拉余流、斯托克斯计算余流结果, 与表 1 中的对应结果比较发现, 各站位对应余流大小及流向都发生了或大或小的变化。总的来讲, 中潮各余流值大于相应小潮余流值, 但 B3 站位的小潮拉格朗日余流值大于其中潮相应结果。各对应余流流向都发生了变化, 中潮与小潮对应余流流向有的甚至相反, 如 B2 站位的欧拉余流流向、拉格朗日余流流向所示变化。由于 B2 测站位于西大港串水水道中部, 临近中央沙脊, 其余流受潮位和归槽水的影响较大, 而两端口门处的 B1、B3 站位对应余流流向

表2 小潮期间 B1、B2、B3 站位欧拉余流、斯托克斯余流、拉格朗日余流统计

Tab.2 Statistics residual currents during neap at Stations B1,B2 and B3

站号	欧拉余流		斯托克斯余流		拉格朗日余流	
	大小(m/s)	流向(°)	大小(m/s)	流向(°)	大小(m/s)	流向(°)
B1	0.12	32	0.06	161	0.09	60
B2	0.05	195	0.05	188	0.1	191
B3	0.11	144	0.01	82	0.12	138

改变相对较小。由此可推断,大、中、小潮期间计算所得各平均余流值对应大小和流向都会有所差异的,在沙滩水道余流的大小和流向改变可能要大些。因此要更细致地弄清辐射沙洲水道水流净输移问题需要较长时间的测量序列,至少需要大潮—中潮—小潮—大潮的一个完整潮流测量序列。辐射沙洲海域水流净输移同样受到风场的影响,本文中作者所分析的余流不只是潮余流,同时包含了风海流的影响。由于沙脊地形的屏蔽作用,所分析的站位又处于潮流水道中,潮余流成分应是主要的。辐射沙洲中心浅滩水道由于受地形影响,余流大小和方向随潮况不同而发生一定的变化,中心沙洲外围深水水道(1998年测站所在水道)处余流受地形变化的影响可能要小些。这样在深水潮流水道水量的净输移大小发生一定的变化,但其基本输移方向应是变化不大的。因此本研究中作者在一定程度上发现、揭示辐射沙洲腹地海域潮流水道水量净循环输移的基本路径与方向。

#### 4 小结

本文中作者对辐射沙洲余流分布状况的分析是根据各测站中潮阶段两个潮周期准同步流速测量资料计算结果进行的。各站位斯托克斯余流相对较小,但分布较有规律,在水道口门处斯托克斯余流较大,余流流向大都沿涨潮流向,豆腐渣腰门水道及其以东站位的斯托克斯余流则大致沿落潮流向。

欧拉余流和拉格朗日余流除个别站位外,大小和流向基本一致。拉格朗日余流分布表明,所述水域存在着半封闭的顺时针方向的海水净输移。西洋水道和条鱼港水道是辐射沙洲中心腹地的净进水通道。而豆腐渣腰门水道、陈家坞槽水道、外王家槽水道、苦水洋海域水道则是净出水通道。

欧拉余流、斯托克斯余流、拉格朗日余流在不同潮况的潮周期平均大小和流向是有所差异的,在不同的水道和水道的不同位置,这些差异的程

度是不同的。对该海域水循环状况的更精确了解还需要在各水道设置更密集、合理的测站,测量时间足够长且要尽可能的同步。数值模拟对此问题的解决可能是一个有效手段。

#### 参 考 文 献

- 陈宗镛编著,1980. 潮汐学. 北京: 科学出版社, 250—251
- 沈焕庭, 吴加学, 刘新成等, 2001. 长江河口物质通量. 北京: 海洋出版社, 11—153
- 沈焕庭, 潘安定著, 2001. 长江河口最大浑浊带. 北京: 海洋出版社, 100—107
- 任美镔主编, 1986. 江苏海岸带和海涂资源综合调查. 北京: 海洋出版社, 1—146
- 王 颖, 朱大奎, 周旅复等, 1998. 南黄海辐射沙脊群沉积特点及其演变. 中国科学(D辑), 28(5):385—393
- 宋志尧, 严以新, 薛鸿超等, 1998. 南黄海辐射沙洲形成发育水动力机制研究——潮流运动立面特征. 中国科学(D辑), 28(5): 411—417
- 诸裕良, 严以新, 薛鸿超, 1998. 南黄海辐射沙洲形成发育水动力机制研究——潮流运动平面特征. 中国科学(D辑), 28(5): 403—410
- 张东生, 张君伦, 张长宽等, 1998. 潮流塑造——风暴破坏——潮流恢复(试释黄海海底辐射沙脊群形成演变的动力机制). 中国科学(D辑), 28(5): 394—402
- Bowden K F, 1963. The mixing processes in tidal estuary. *International Journal of Air and Water Pollution*, 7: 343—356
- Cheng R T, Casulli V, 1982. On Lagrangian residual currents with applications in South San Francisco Bay, California. *Water Resources Research*, 18: 1652—1662
- Feng S, Cheng R T, Xi P, 1986. On tide-induced Lagrangian residual current and residual transport——Part I, Lagrangian residual current. *Water Resources Research*, 22(12): 1623—1634
- Longuet-Higgins M S, 1969. On the transport of mass by time-varying ocean currents. *Deep Sea Research*, 16: 431—447
- Tee K T, 1976. Tide-induced residual current, a 2-D nonlinear numerical tidal model. *J Mar Res*, 34(4): 603—628
- Zimmerman J T F, 1979. On the Euler-Lagrangian transformation and the Stokes drift in the presence of oscillatory and residual currents. *Deep Sea Research*, 26A: 505—520

## TIDAL RESIDUAL CURRENT ANALYSIS IN THE TIDAL CHANNELS OF THE RADIAL SAND RIDGE OFF JIANGSU COAST, CHINA SEA AREA

WU De-An<sup>1,2</sup>, ZHANG Ren-Shun<sup>3</sup>, SHEN Yong-Ming<sup>3</sup>

(1. *The State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing, 210098*; 2. *College of Traffic, College of Ocean, Hohai University, Nanjing, 210098*; 3. *The Ocean and Mudflat Institute of Nanjing Normal University, Nanjing, 210097*)

**Abstract** Using water current data from 30 tidal current survey sites in radial sand ridges off Jiangsu coast, East China, local Euler, Lagrangian and Stokes residual currents are calculated. Channels of net-water fluxes in mid tide period were determined. The Stokes residual current at each site was weaker than those of Euler and Lagrangian ones. In the mouth of tidal lodes, the Stokes residual current was slightly stronger than those of other's and tended to the direction of local flood current, while in a tidal channel at Doufuzha and beyond, it followed local ebb current. The Euler and Lagrangian residual currents were similar in intensity and direction. In the study area, a clockwise semi-close circulation of net-water flux has been revealed. The tidal channels at Xiyang and Tiaoyugang are the inflow channels of net-water fluxes. However, those at Doufuzha, Chenjiawu and Waiwangjiacao, and marine area of Kushuiyang were the outflow channels of net-water fluxes.

**Key words** Radial sand ridge, Tidal channels, Euler residual current, Stokes residual current, Lagrangian residual current