

南渡江河口洪、枯季节水文泥沙变化特征及台风“海鸥”对入海水沙的影响*

陈斌^{1,2} 高飞^{1,2} 印萍^{1,2} 刘金庆^{2,3}

(1. 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室 青岛 266071; 2. 青岛海洋地质研究所 青岛 266071;
3. 中国海洋大学 青岛 266100)

摘要 基于 2014 年最新的洪、枯季节实测资料, 分析了南渡江河口海域水文泥沙的季节性变化特征, 借助台风“海鸥”过境期间的河道监测数据, 研究了台风天气造成的洪水事件对河流入海水沙通量的影响。研究结果表明: (1) 洪、枯季节河口海域的水体层化作用不强, 洪季的水温高于枯季, 但盐度低于枯季。水温呈现向海递减的趋势, 而盐度整体分布较为均匀; (2) 河口水体含沙量近岸大于远岸, 枯季河口三角洲泥沙向西输运。洪季含沙量明显高于枯季, 大量泥沙在台风季节被冲刷入海, 而后向海或向西输运扩散; (3) 河口海域为不规则全日潮, 呈现东西向往复流特征。温度、盐度和浊度均呈现较强的潮汐性变化特征; (4) 枯季河道内存在明显的盐水楔, 锋面处的垂向梯度很大, 在口门向陆大约 12—15 km 以远的河道水体不再受潮汐影响; (5) 台风“海鸥”影响下, 南渡江洪峰期间的径流量和含沙量均远远超过多年平均值, 反映了南渡江河口地区“台风季节”的特点。

关键词 南渡江; 季节性变化; 水文环境; 台风; 水沙

中图分类号 P714+.1 **doi:** 10.11693/hyhz20150100024

近几年来, LOICZ、MARGINS 等研究表明, 中小河流的入海物质在陆-海相互作用、世界边缘海沉积、全球海洋生物地球化学循环中扮演重要角色。一方面它的丰枯变化直接影响河口环境、流域经济的发展, 另一方面河流的入海物质是沿途风化产物和污染物质的重要载体, 直接影响近海生态环境(Hilton *et al.*, 2011)。尤其是在较强的季风、台风天气及大量降水等综合影响下, 中小河流的入海物质会在几天内快速入海(Kao *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2009), 河口地区接收的物质通量将瞬间增大。入海物质通量的快速变化对流域-河口的环境响应已经成为近几年国际地球科学界的研究热点(Milliman *et al.*, 2011)。目前来说, 我国对入海中小河流的基础研究还很弱; 与长江、黄河、珠江等大江大河相比, 对于中小河流入海物质的通量变化及其对流域-河口环境响应, 以及自然与人类活动双重因素驱动下陆源物质从流域到河口的源-

汇过程的研究不足。

南渡江发源于海南白沙县南峰山, 是海南第一大河, 斜贯海南岛中北部, 向北流经海口市汇入琼州海峡, 全长 334km, 流域面积 7033km²(海南省地方办公室, 2005)。据龙塘站水文资料(1957—1988 年; 2006—2008 年)统计, 年均径流量为 4.728×10⁸m³, 年均输沙量为 3.231×10⁴t。南渡江的水沙特征表现出季节性变化特征, 台风季节(7—10 月)的径流量占全年的 62.3%, 输沙量占全年输沙量的 74.4%(杨志宏等, 2013)。

南渡江河口海域属于热带季风气候, 盛行季风, 冬季多偏北风, 平均风速超过 3.5m/s, 夏季多偏南风, 平均风速在 3.0m/s 以下。每年的 7—10 月为台风频发季节。波浪以风浪为主, 5—8 月以偏南向浪为主, 9 月至翌年 4 月以东北向浪为主(柯佩辉, 1983)。该海域潮汐类型为日潮, 潮汐作用弱于风浪作用, 平均潮差

* 科技基础性工作专项项目, 2013FY112200 号; 国家自然科学基金重点项目, 41330964 号; 国家自然科学基金项目, 41406081 号。陈斌, 副研究员, E-mail: chenbin1007@hotmail.com

收稿日期: 2015-01-26, 收修改稿日期: 2015-04-05

1.0m左右,为弱潮河口。琼州海峡海域以往复流为主,有涨潮东流、西流和落潮东流、西流4种流动形式。南渡江口近岸海域以涨潮东流和落潮西流为主,转流一般发生在平均水位附近,平均水位以上以东流为主,平均水位以下以西流为主(龚文平等,2012)。

关于南渡江河口的研究多集中在盐水入侵(龚文平等,2012;赵军鹏等,2013)、三角洲及岸滩演变(王文介等,1986;龚文平等,1998;戴志军等,2000)、泥沙运移(李春初等,1997;陈沈良等,1998)等方面。近几年关于南渡江河口水文泥沙季节性变化的调查研究相对较少,尤其是在台风天气状况下对南渡江入海水沙通量的变化研究,由于观测极为困难所以几乎未见。本文通过2014年洪、枯季两个航次的调查数据,以及台风“海鸥”过境的监测资料,分析研究了南渡江河口近岸海域的水文泥沙洪、枯季时空变化特征,并探讨河口水文泥沙要素与动力因子之间的响应关系。根据台风过境的监测数据,揭示了南渡江入海物质通量瞬时变化趋势,为河口近岸海域环境及流域水资源的时空分布相关研究提供了依据。

1 资料与方法

2014年的枯季和洪季在南渡江河口海域及流域开展了两个航次的水文泥沙调查(图1)。南渡江河口潮汐为周日内一涨一落。4月1日(枯季),选取大潮时期的涨潮阶段,利用走航观测在河口海域完成了5条主要调查断面共计20个站位的观测,每个断面观测大约用时1.5h,观测的主要参数为温度、盐度、浊度等;在南渡江河道完成15站水文泥沙观测,其中干流12站,支流3站。根据龙塘水文站历史资料,此季节的径流量约为 $43.36\text{m}^3/\text{s}$ 。9月25日(洪季),选取大潮时期的落潮阶段,利用走航观测对海域5条调查断面和河道15站进行了重复观测,此季节的径流量约为 $446.62\text{m}^3/\text{s}$ 。9月15—23日,在南渡江中游潮流界以上河道(新大洲大桥附近)布设河床基监测站,全程监测了台风“海鸥”登陆期间的水沙通量。此外,两个航次完成了3个锚系站位连续25h海流、温度、盐度、浊度等参数的观测。

在两个海域调查航次期间,天气状况良好,无明显风浪。其中测站剖面的参数采集使用美国Seabird公司生产的SBE19 Plus多参数CTD;锚系站位的海流观测使用美国TRDI公司生产的ADCP(600 kHz)声学多普勒流速剖面仪;河道水文泥沙观测使用日本JFE公司生产的ASTD 152自容式CTD。

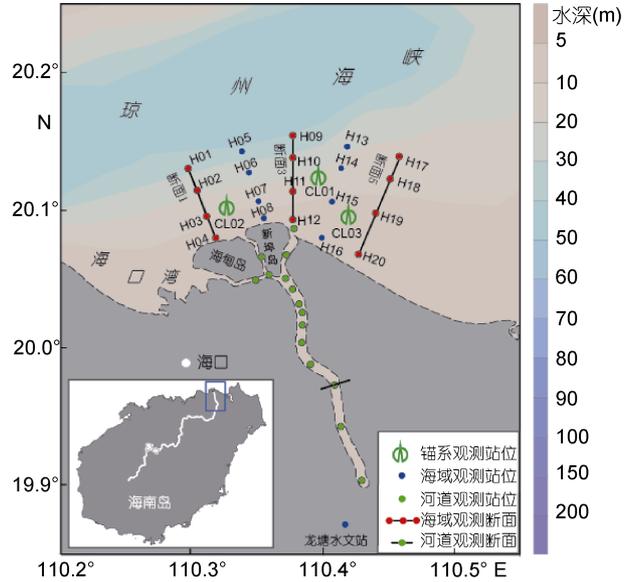


图1 南渡江调查站位

Fig.1 The investigation sites along the Nandu River

2 洪、枯季节温度、盐度、浊度的变化特征

2.1 洪、枯季节温度、盐度、浊度的平面分布特征

南渡江位于海南省最北部,属于亚热带地区,根据龙塘水文站历史资料,从图2可以看出南渡江的多年平均月入海径流量和输沙量均为典型的单峰型,径流量的峰值出现在10月份,占河流年径流量总量的34.1%;输沙量的峰值出现在9月份,占全年总量的25.5%。一般来说,1—4月为海南河流的枯水季节,7—10月为洪水季节(杨志宏等,2013)。

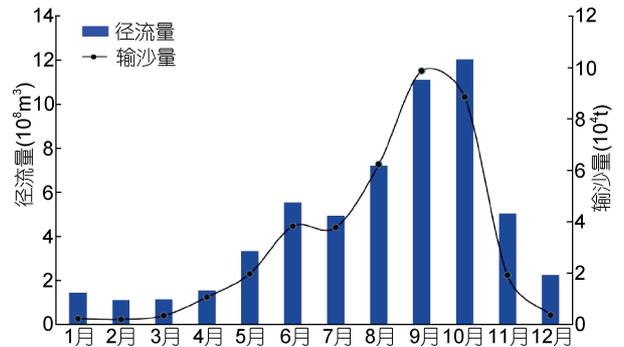


图2 南渡江龙塘站多年平均月径流量及输沙量分布

Fig.2 Average monthly runoff and sediment discharge of Nandu River

枯季,表、底层的水温均呈现向海递减的趋势,变化范围在 $20\text{—}25^\circ\text{C}$ 之间,表层温度略高于底层(图3a, b)。河口以东水体温度明显高于西部,站位资料均在涨潮期间获取,涨潮流以偏西向为主,推测南海温

度相对较高的水体在涨潮流的携带下向琼州海峡输运, 另外在 4 月份以偏东风为主, 表层水体基本上由东南往西北流动(柯佩辉, 1983), 与图 3 中表层温度的分布特征一致。根据资料显示 4 月份琼州海峡东部水体温度在 23—24.73°C 之间(杨士瑛等, 2006), 也与本文中河口以东水体温度值吻合。

洪季水温明显高于枯季, 河口附近海域水温略

高于离岸海域, 变化范围在 28—29.5°C 之间, 表、底层的温度差异更小(图 3c, d)。洪季观测数据是在台风“海鸥”登陆后第七天的落潮期间采集, 在这几天中大量的河流淡水入海, 又加之台风作用, 使得河口近海水体混合增强, 造成水温的空间分布特征较为一致。河口以西表层水体温度略高, 河口海域底层水温略高。

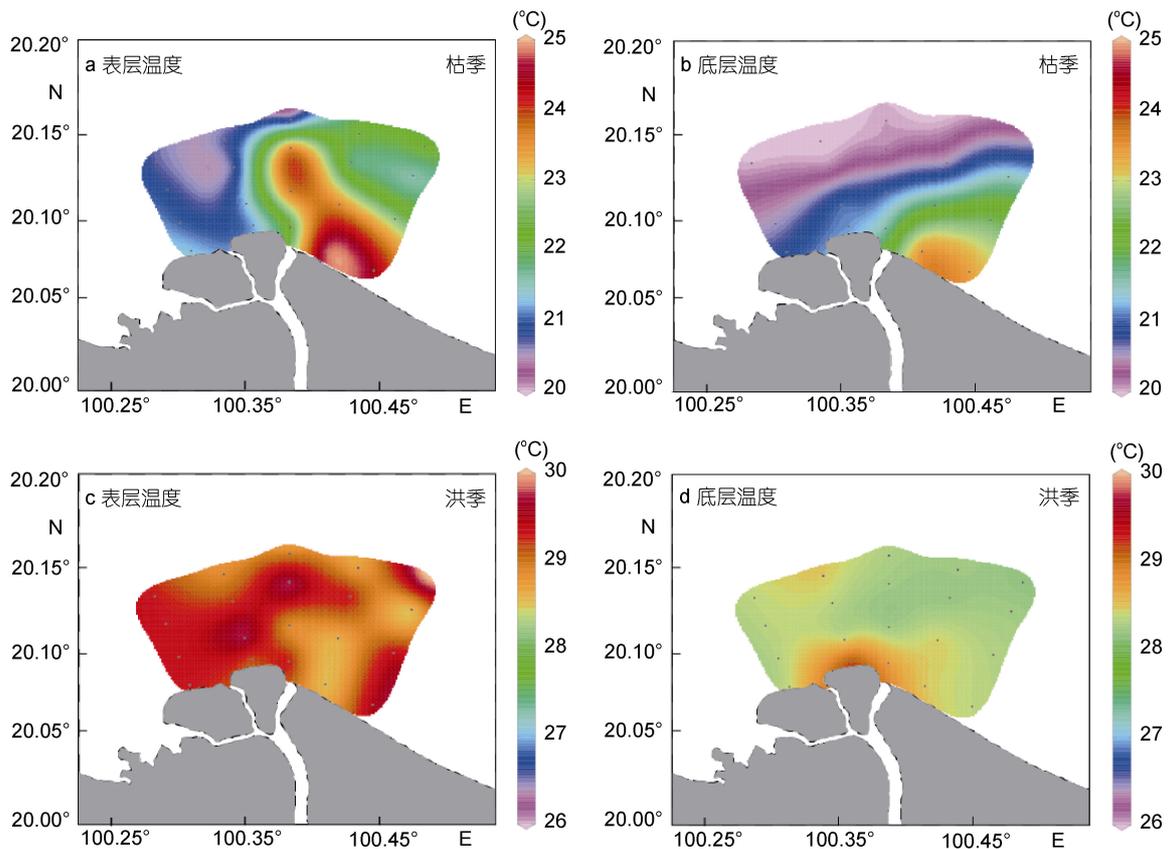


图 3 枯、洪季节温度的表、底层分布

Fig.3 Temperature at the surface and bottom layers in dry and flood seasons

枯季, 表、底层的盐度分布较为一致, 空间上差异不大(图 4a, b); 但在河口东侧入海岔道的外海域, 水深大约 15m 的表层水体, 出现一个低盐度的区域, 表现出异常低的盐度值(小于 16), 同时也出现在底层水体, 但其盐度值高于表层。除去该低盐区, 其它区域的盐度基本在 33 左右。

洪季, 研究海域的盐度明显低于枯季, 在台风作用下, 洪季的盐度分布也较为平均(图 4c, d)。洪水季节降雨较多, 本次观测又恰逢台风过后, 故整个河口海域表现出较低的盐度值, 在 28—30 之间; 但河口东侧的低盐区在表层水体依旧存在, 盐度值小于 21, 其位置与枯季数据一致。在后面章节对可能导致这种

现象的原因进行讨论。

浊度主要反映水体悬浮体的特征。南渡江河口的悬浮泥沙, 其空间分布, 近岸大于远岸、底层大于表层; 其时间分布, 洪季高于枯季(图 5)。枯季, 河口处浊度的垂向梯度较大, 表层的浊度高值区位于河口东岸(图 5a), 推测为南渡江三角洲东侧废弃岸段的再悬浮泥沙在潮流和东南季风的作用下向西输运; 前人计算该岸段的向西年输沙量约为 73.969m³(陈沈良等, 1998)。底层的高值区位于南渡江东岸和横沟河岔道入海口西侧, 浊度值为 20 ftu 左右(图 5b), 河口东岸的泥沙主要来自于东侧废弃岸段的再悬浮泥沙, 而横沟河岔道入海口西侧的泥沙则主要由在河口底

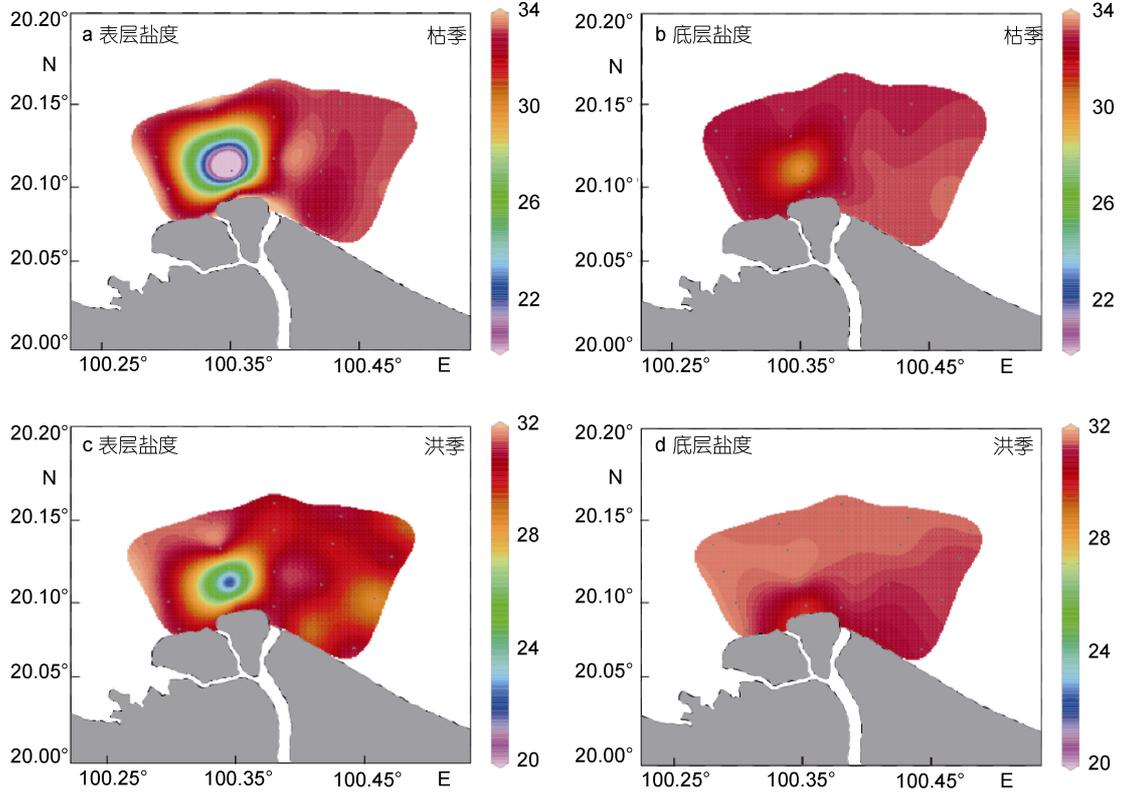


图 4 枯、洪季节盐度的表、底层分布

Fig.4 Salinity at the surface and bottom layers in dry and flood seasons

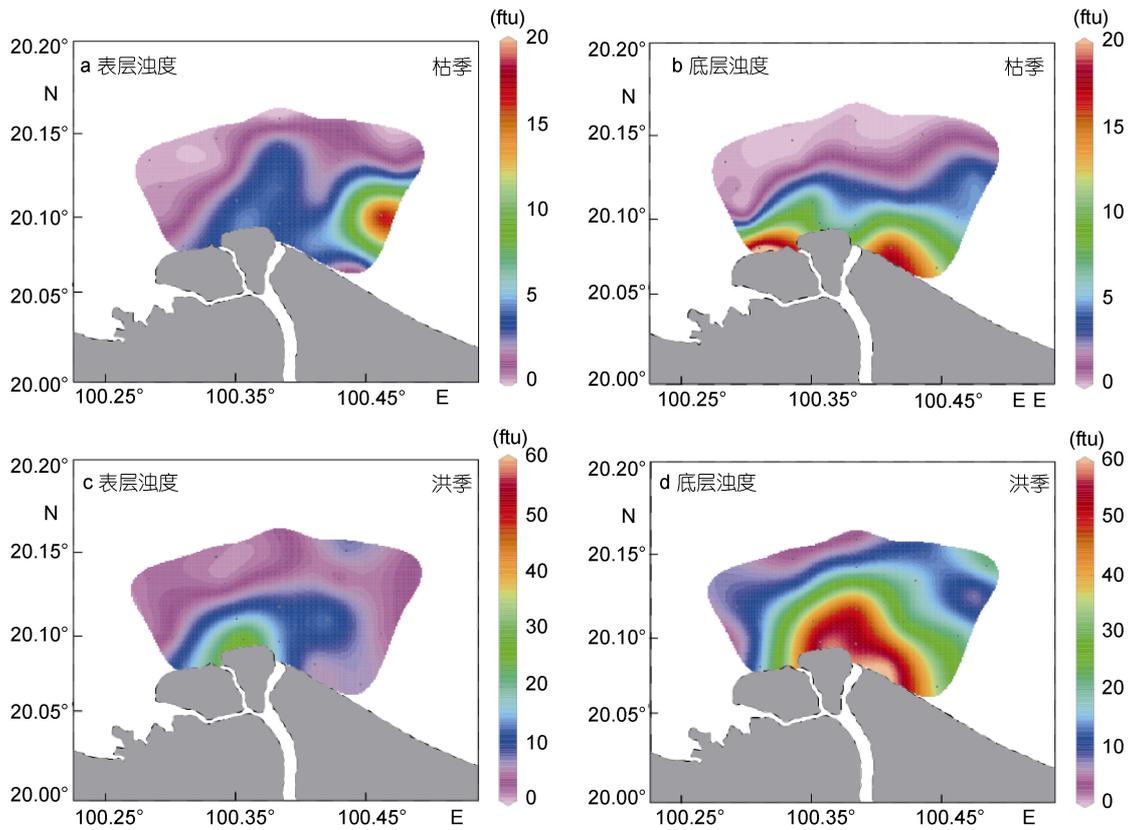


图 5 枯、洪季节的浊度表、底层分布

Fig.5 Turbidity at the surface and bottom layers in dry and flood seasons

床沉积的入海泥沙在动力作用下再悬浮进入水体而后再向西运输所致。总体来讲, 在枯季, 由南渡江直接入海的泥沙不多, 在干流入海口没有发现高浊度区域, 大多是底床的再悬浮泥沙沿岸运输, 大致保持沿岸向西运移的趋势, 而本研究涉及的两个岸段即南渡江干流入海口以东岸段、南渡江干流入海口以西至横沟河岔道入海口西侧分别为废弃侵蚀岸段和泥沙转运岸段(李春初等, 1997), 符合本文的泥沙运动趋势。

洪季的悬浮泥沙分布非常有特点, 以台风过后 7 天的观测结果为例, 水体的浊度值明显高于枯季, 大量的河口沉积物被径流携带入海, 泥沙入海后迅速沉积, 底层水体的浊度明显高于表层(图 5c, d), 最大值超过 60 ftu。入海口含沙量明显高于其它海域, 呈现出典型的河口输沙入海的特点。此外, 泥沙在洪季也表现为向西运输的特征。表层水体易于流动, 已经表现出向西运动的态势; 而底层水体的泥沙除了径流携带的泥沙入海, 还有部分在台风搅动下没有落淤的再悬浮泥沙, 由于底床水体相对稳定性较强、流速较小, 还有没有形成向西运动的趋势。

2.2 洪、枯季温度、盐度、浊度的断面分布特征

由于南渡江河口地理位置的原因, 温度、盐度、浊度不具备其它一般河流河口“夏储冬输”的季节性特征, 但具备低纬度、热带季风气候控制下的河流特征。为讨论温度、盐度、浊度在洪、枯季的变化特征, 选择由岸到海不同位置的断面: 断面 1(图 6)位于河口以西, 正对南渡江支流分叉入海口; 断面 3(图 7)正对南渡江入海口; 断面 5(图 8)位于河口以东。

断面 1 的枯季温度变化范围为 20—21°C, 洪季温度的变化范围为 28.3—30°C, 明显低于洪季; 但在两个季节温跃层均不明显, 表、底层的温度差异在 1—2°C, 洪季的温度分布更为平均。由于洪季降雨量较大, 故盐度(约为 31.5)低于枯季(约为 33); 盐度在垂向上差异不大, 说明该区域混合作用很强, 没有明显的水体层化现象。枯季, 断面 1 的水体较清, 虽然呈现由岸到海逐渐降低的趋势, 但总体上浊度值小于 5 ftu, 表明该岔道入海泥沙量不多; 洪季浊度值高于枯季, 近岸海域浊度值高于 20 ftu, 垂向梯度增大, 依然表现为向海递减之趋势。

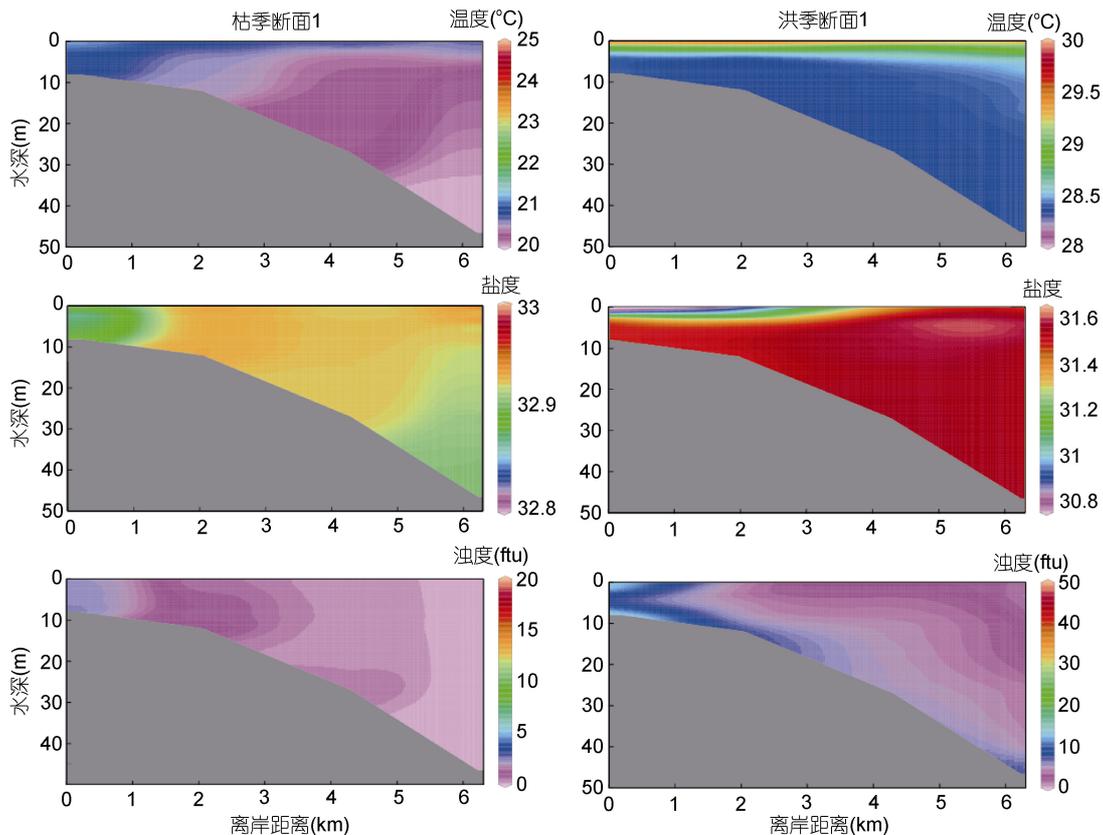


图 6 断面 1 温度、盐度、浊度枯、洪季分布

Fig.6 Temperature, salinity, and turbidity across Section 1 in dry and flood seasons

在潮流、径流的相互作用下,断面3的水体混合程度要高于河口西部(断面1),洪、枯季温度均高于西部。枯季,由岸向海温度呈现降低,而洪季由岸向海则呈现先降低再升高的特征,这是由于河口东部温度较高的水体随涨潮流到达此处。枯季的盐度(约33)高于洪季(约31—31.5),两个季节断面中出现的低盐区可能是淡水排放或羽状流携带淡水所致。断面3的浊度最高,尤其在洪季河口区超过50 ftu。从断面

分布特征来看,枯季入海泥沙较少,口门底床堆积的泥沙也较少,且颗粒较细的底床泥沙在动力作用下再悬浮进入水体,易于在季风的作用下向海扩散;而在洪季大量的径流携沙入海,大部分细颗粒的泥沙入海后已经向琼州海峡或沿岸输运,颗粒较粗的泥沙沉降在口门底床上,大部分泥沙在动力作用下进入水体后,在底层水体中沿下层水体向外输运,细颗粒的泥沙则进入上层水体向外扩散。

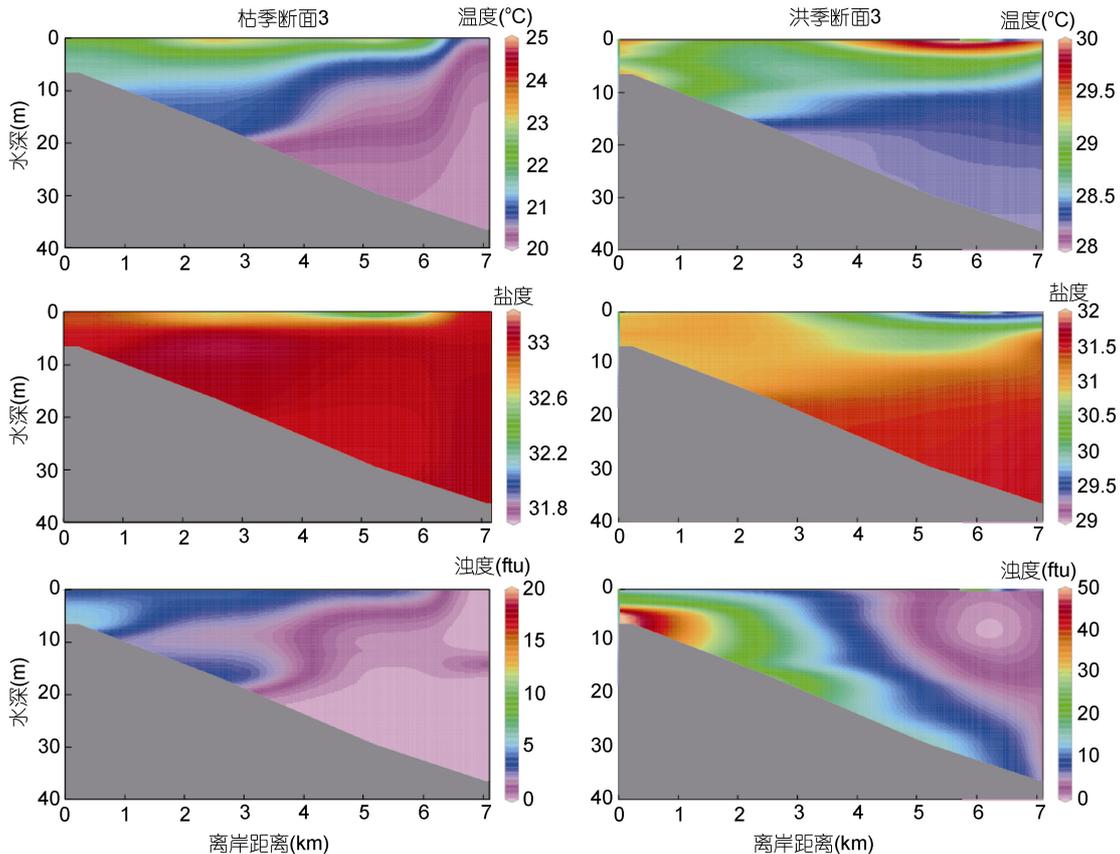


图7 断面3温度、盐度、浊度枯、洪季分布

Fig.7 Temperature, salinity, and turbidity across Section 3 in dry and flood seasons

与其它断面相比,断面5的枯季温度在近岸最高,向海逐渐降低,且混合较强,垂向梯度较小;洪季在表层有一层较薄的高温水,为潮流携来的河口东部高温水。枯季的盐度分布非常均匀,由于断面5所处海域没有正对河流入海口,故盐度高于正对入海口的断面3和正对分叉支流入海口的断面1;而在洪季此断面盐度却为最低,目前尚无理想的解释。断面5正处于河口东部的侵蚀岸段,故在枯季表现出相对高的浊度向海扩散,且输运范围较大,而洪季更显示出明显的底床泥沙再悬浮,垂向梯度较大,表层水体浊度近于0,而底层水体的浊度可达20 ftu,表现出一

定的侵蚀特性。

3 河口海域水文泥沙与潮流动力的响应

3.1 潮流

根据所观测的3个锚系站位连续25h的实测流速资料,通过引入差比关系,对垂向平均流速进行潮流的准调和和分析(方国洪等,1986;吴德安等,2008),获取3站位的 O_1 , K_1 , M_2 , S_2 这4个主要分潮潮流调和常数(表1)。获得的潮流调和常数列于表1中。南渡江河口海域全日潮流振幅的东、北分量的均大于半日潮流的东、北分量,体现出该海域全日潮流占主要地位,

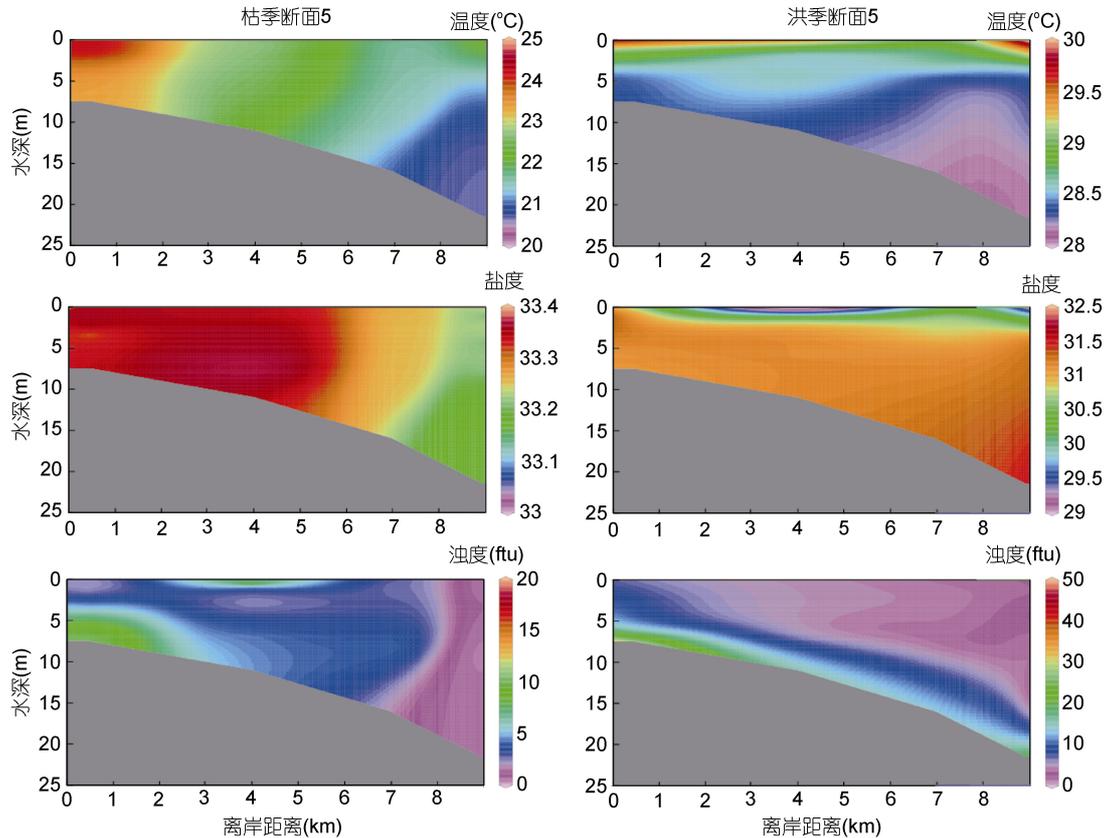


图 8 断面 5 温度、盐度、浊度枯季和洪季的分布

Fig.8 Temperature, salinity, and turbidity across Section 5 in dry and flood seasons

表 1 CL01、CL02、CL03 三站潮流调和常数

Tab.1 Tidal harmonic constants at Stations CL01, CL02, and CL03

站位	分量	振幅(cm/s)				迟角(°)			
		O ₁	K ₁	M ₂	S ₂	O ₁	K ₁	M ₂	S ₂
CL01	东	103.2	121.8	39.8	15.5	93	142	196	236
	北	2.4	2.7	2.0	1.1	177	226	47	87
CL02	东	43.6	51.4	33.2	12.9	73	122	199	239
	北	15.7	18.6	13.3	5.2	256	305	15	55
CL03	东	56.7	66.9	34.7	13.5	76	125	193	233
	北	13.6	16.1	7.8	3.0	76	125	216	256

呈现全日潮流的性质。对于 O₁, K₁, M₂, S₂ 这 4 个主要分潮流, 东分量明显大于北分量, 表现出潮流的主流向为东西向。

为进一步分析潮流特征, 分别计算 4 个主要分潮的潮流椭圆要素, 列于表 2 中。下面对计算所得各站的潮流椭圆要素结果进行进一步比较和分析。根据各分潮潮流振幅(W_{K_1} 、 W_{O_1} 、 W_{M_2}), 计算 3 测站的潮流性质 $F=(W_{K_1}+W_{O_1})W_{M_2}$ 可得到: CL01、CL02 和 CL03 站分别为 5.6、2.8 和 3.6, 均大于 2, 因此该海域属于不正规全日潮流区, 3 测站均以全日分潮 K₁ 潮流占

优。计算所得三站的 M₂ 潮流椭圆率基本为 0, 说明南渡江河口区潮流为东西向的往复流。

3.2 水文泥沙要素与潮流动力的响应关系

本文以 CL01 和 CL02 站来阐明南渡江口海域水文环境要素在潮周期内的变化特征及其对潮流动力的响应(图 9)。

CL01 站位于白沙浅滩以东, 水深大约 18m, 于枯季进行观测。从温度的变化过程来看, 温度较高的水体沿表层随着西向的涨潮流经过 CL01 站, 使得该站在整个涨潮过程中表层水体温度较高, 而后在较

表 2 CL01、CL02、CL03 三站潮流椭圆要素
Tab.2 Ellipse elements of tidal current at Stations CL01, CL02, and CL03

站位	分潮	最大潮流(cm/s)	最大潮流方向(°)	椭圆率	<i>F</i>
CL01	O ₁	14.7	90	0	5.6
	K ₁	17.4	90	0	
	M ₂	8.5	273	0	
	S ₂	9.9	273	0	
CL02	O ₁	13.2	110	0	2.8
	K ₁	16.1	110	0	
	M ₂	8.6	292	0	
	S ₂	9.9	292	-0.6	
CL03	O ₁	13.4	77	0	3.6
	K ₁	16.3	77	0	
	M ₂	8.5	258	0.1	
	S ₂	9.8	258	0.1	

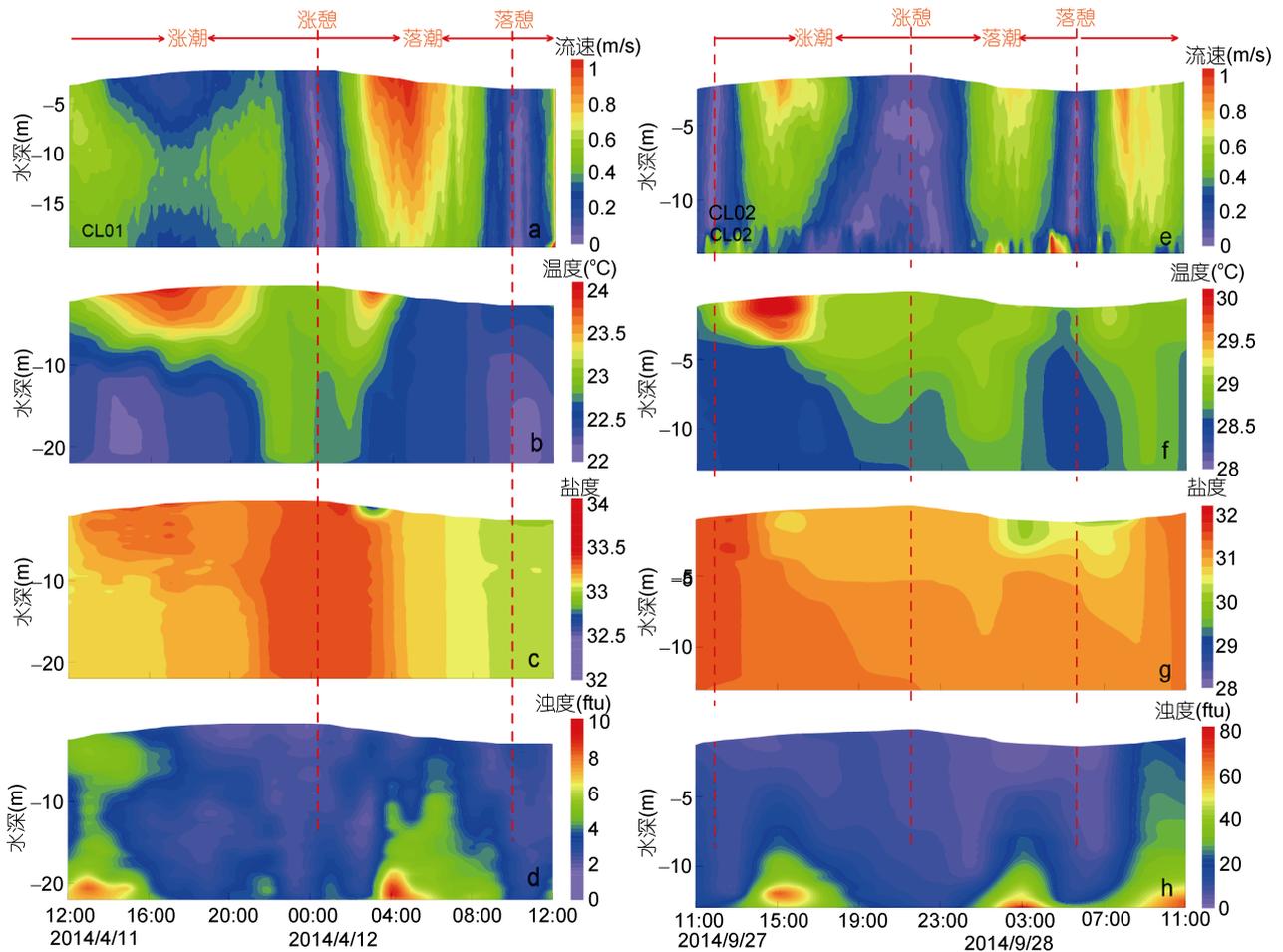


图 9 CL01 和 CL02 站潮流与温度、盐度、浊度之间的响应关系

Fig.9 The corresponding relationship between tidal current and temperature, salinity, turbidity at CL01 and L02 stations

大的东向落潮流的驱动下，高温水迅速东流，因此在落急时刻后温度较低。4 月份琼州海峡的东部水体温度要高于西部，相对高温的东部水体随着涨潮被携

带至此，而又随着落潮流流向东部，这也与前面所述的河口海域温度东高西低的分布特征相吻合。从盐度的变化过程来看，东部高盐水在涨潮时入侵，且垂向

混合较好, 最大盐度出现于涨憩时, 而最小盐度出现在落憩时。浊度反映了水体中悬浮物的含量, 从浊度变化过程来看, 浊度与流速变化密切相关。流速超过一定程度时, 可使部分底床泥沙悬浮, 增加水体的含沙量; 距离底床越近, 悬浮作用对含沙量的影响越明显, 表现为涨急和落急时含沙量明显增大, 而涨憩和落憩时含沙量迅速降低, 表明一方面再悬浮过程占主导, 另一方面泥沙的沉降速度较大, 在流速降低后迅速落淤。该海域在一个太阳日内发生一次涨落潮过程, 涨潮历时 14h, 落潮历时 10h, 经垂向平均的涨潮流速为 0.41m/s, 落潮平均流速为 0.52m/s, 显示出涨落潮的不对称性。从含沙量的垂向分布来看, 底层含沙量明显高于表层, 涨潮时水体含沙量的垂向梯度明显小于落潮时。涨落潮期间的含沙量总体相差不大, 运动形式以当地底床泥沙悬浮-沉降-再悬浮为主。

CL02 站位于横沟河入海口以东, 水深大约 12m, 于洪季进行观测。该站的涨潮流速大于落潮流速, 涨潮历时也大于落潮历时。由于该站距离河口较近, 受到入海淡水影响较大, 温度的变化规律不明显, 在整个涨落潮期间温度变化不大, 在涨潮流平流运输和入海径流混合作用下, 最大值出现在第一个涨潮期间, 最小值出现在落憩时。盐度变化具备河口特点, 在涨潮时盐度增大, 落潮时入海径流沿表层向外海运输, 并在落憩时达到最小值。含沙量的变化过程与 CL01 站类似, 但其垂向梯度要大于 CL01 站。在琼州海峡较强潮流的影响下, 南渡江河口的环境因子具有较强的潮汐性变化特点。

4 南渡江河道水文泥沙特征

4.1 枯季南渡江河道断面水文泥沙特征

利用枯季调查的河道垂向剖面资料绘制河道断面图(图 10)。海南地处亚热带地区, 即使在 4 月份, 陆源效应也非常明显, 受其影响, 河道水温呈现由中下游向入海口递减之趋势, 中游水温与入海口相差 4°C 之多, 由于观测在涨潮期间进行, 可以看到河口处低温水体已经向河道入侵。从盐度的断面图可以看到河道内出现了明显的盐水楔, 但是受到中上游径流的顶托作用, 盐水楔的前缘被强烈压缩, 锋面处的垂向梯度很大。在河道布设站位, 距离河口 15km 处的监测断面盐度值为 0, 而相距最近(3km)的下游站位的盐度值, 从表层到底层变化范围为 2—11, 由此推算南渡江的潮流界线在此两站之间, 也就是距入海口 12—15km 处, 此结果与之前的研究(赵军鹏等, 2013)

认为最大的潮流界为 13km 相吻合。从温度的剖面图也能看到海水对河流的影响区域也大体与盐度一致。浊度的剖面图展示了南渡江在枯季向海输沙的情况, 在涨潮期间仅有少量泥沙入海, 大量泥沙聚集在河流的中游地区: 一是由于中游河道较深, 上游的来沙需要在较强的携沙力的带动下才能向河流的下游输运, 而在枯季降雨量较小, 径流没有足够的流速来携带泥沙向海输运; 二是南渡江是海南省的第一大河, 上游建造了多项水坝、水库等设施, 也降低径流的流速; 再加上涨潮的消能和盐水入侵等因素, 大部分悬沙由于自重或絮凝作用落淤, 沉降在中游河段底床之上。对于落潮期间的泥沙入海情况还有待于后续航次的调查, 以期与现在的研究进行比对。

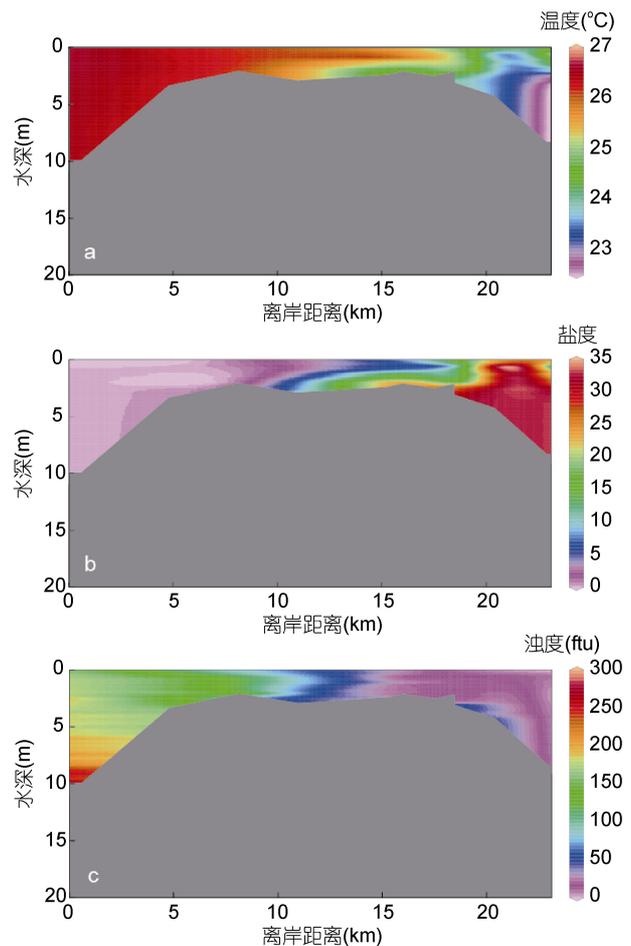


图 10 枯季温度、盐度、浊度河道断面分布图
Fig.10 Temperature, salinity, turbidity, in dry season

4.2 洪季南渡江河道平面水文泥沙特征

图 11 是根据台风登陆后第七天的落潮期间采集的数据绘制, 在台风作用下, 河道的表、底层水体进行了充分混合, 水体垂向差异不大, 故此处仅采用平

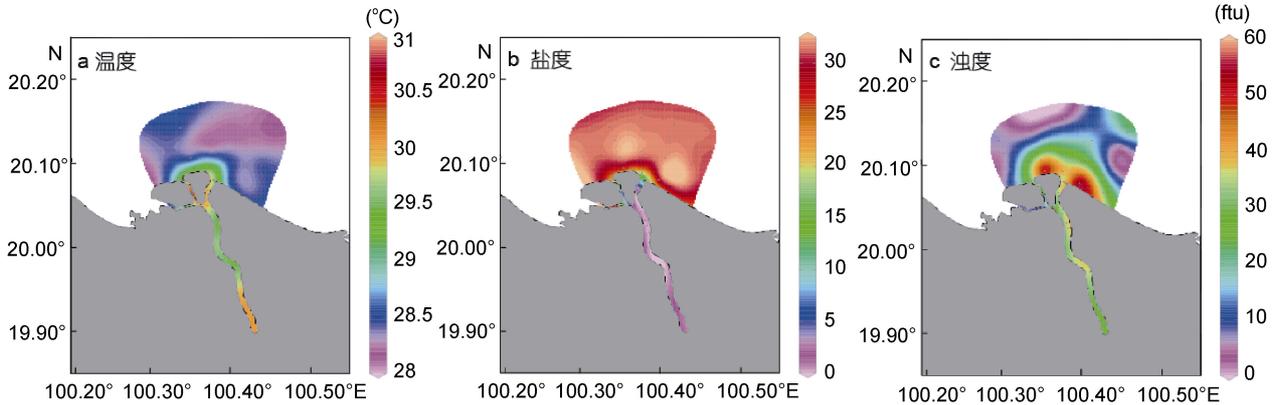


图 11 洪季温度、盐度、浊度河道及河口平面分布图

Fig.11 The temperature, salinity, turbidity in flood season

面图来阐述。此时仍然有明显的淡水入海，仍然受陆地热源效应影响。南渡江中下游温度较高的水入海后，与涨潮流在河口处混合，并在河口近岸海域形成温度较高的区域。对于盐度，受台风洪水的影响，降水迫使潮流界向河口前移，盐水入侵的强度减弱，上游河道盐度接近 0，在入海口门处，涨潮流携带盐水与淡水混合形成咸淡水锋面。与枯季相比，台风带来降雨引发的洪水期间，水体湍动强烈，径流较大，大部分的泥沙向口外冲泻，河道大部分的细颗粒物被冲刷入海，下游部分推移质也以滚动或跃移的形式被输运至口门。台风过后，由于大部分细颗粒的物质在短时间内被冲刷入海，河道内水体的含沙量不高，浊度在 20—40 ftu 之间，仍然在较大径流的携带下向海输运，并在入海口门处形成高值区。同时径流经过沿途的底部摩擦入海后流速锐减，泥沙颗粒出现明显的分选，其中颗粒较粗的物质堆积在口门附近，较细的泥沙则进入海域，或进入琼州海峡沿岸向西输运。可见表层水体的泥沙已经运移，而底床泥沙在动力作用下再悬浮进入底层水体，形成含沙浓度较高的水体。

5 讨论

5.1 河口海域低盐区形成的可能原因

前面章节已经论述过，在洪季和枯季河口东侧入海岔道的外海域水深大约 15m 的表层水体存在低盐区，表现出异常低的盐度值；同时底层水体也存在类似低盐区但其盐度值高于表层。在两个航次的调查中均出现这一现象，且位置一致，表明该现象不是观测误差所致。有两种可能性，一种可能是由于该区域附近存在淡水排放点或者深海海底排水管道，低盐

水体在海底排放后上升至表层，在潮流的作用下运移到该位置；亦有可能是河流淡水进入海域后，径流和海水之间的混合使水体在垂向上产生密度层化，从而扩展形成羽状流，将由河口向外流出的低盐水输运至此。经进一步查阅相关资料，发现海口污水处理厂深海排污口位于在横沟河以东海域，而低盐区中心站位的垂向流速为 0.55m/s，方向为 265°，说明在调查时刻潮流为西向，应该不是该排污口所致。为了进一步确认在低盐区周边是否存在排污口，对低盐区中心站位 H07 站周围 4 个站位的垂向剖面盐度值进行检查，距离 H07 站最近的距离为 1.4km，最远为 4.2km，发现除了最近岸的 H08 站表层盐度略低之外，其它站位的盐度无明显的低值。这个现象至少说明，如果是深海排水管道所致，那该排污口距离 H07 站的距离应该小于 4.2km，但目前尚未查明排污口的位置。另外 H08 站距离横沟河入海口大约 1.9km，且表层也出现一个次低值，说明也可能是横沟河径流入海后，在河口混合作用下形成羽状流将淡水输运至此所致，计算 H07 和 H08 站的 Richardson 数，虽不能直接证明羽状流输运影响，但可藉此来判定由潮流导致的混合程度，推断羽状流影响的可能性。通常以 Ri 值来衡量水体的稳定性； Ri 越小，说明湍流运动逐渐加强，层化减弱，混合程度加强。通过图 12 发现，这两站的 Ri 值都小于临界值 0.25，潮致混合都较充分，尤其是下层水体；由于距离河口更近，H08 站的混合程度高于 H07 站；H07 站的表层低盐水体恰巧也为 Ri 最大值区域，也证明了羽状流输运淡水的可行性。但低盐区成何目前仅停留在推测阶段，尚无直接证据，期望通过今后的补充航次找到解释。

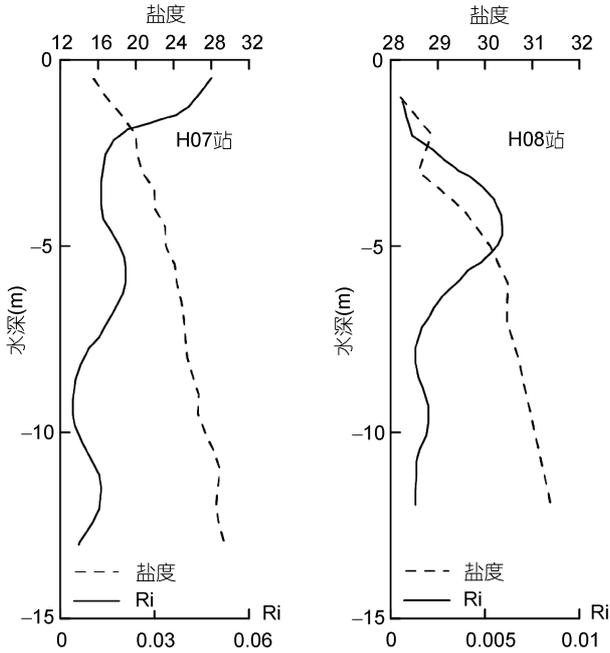


图 12 H07、H08 站盐度和 Richardson 数垂向剖面图
Fig.12 Profiles of salinity and the Richardson Number in H07 and H08

5.2 台风“海鸥”过境对南渡江水沙通量的影响

强台风“海鸥”9月16日9:40在海南省文昌市登陆(图 13), 中心附近最大风力有 13 级(40m/s), 当日 11:00 自海口市离开海南。期间大约在 10:20 台风中心横穿过监测断面, 台风期间降雨量达到 354mm。

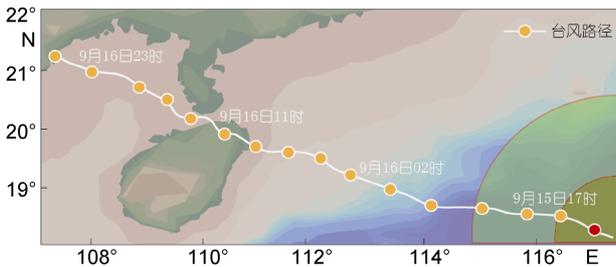


图 13 台风“海鸥”路径图
Fig.13 The trajectory of typhoon “Kalmaegi”

整个监测过程自 9 月 15 日 15:00 开始, 至 9 月 23 日 10:00 监测结束, 涵盖了台风登陆前到台风的影响消退整个时段, 共计约 8 天。从图 14 中可以看到, 在 9 月 16 日 9:40 台风登陆到当日 11:00 离开海南岛期间(图 14 红框), 水位开始上升, 径流量也开始增大, 但含沙量和输沙量上升缓慢, 显示出一定的滞后性; 直到 9 月 16 日 18:00, 输沙量开始急剧增大, 在 9 月 17 日 15:00 到达峰值, 此时中游河道水位上涨 3.3m, 含沙量约为 500mg/L, 径流量达到 8000m³/s 以上, 瞬

时输沙量为 3821kg/s; 此后水位缓慢下降, 大约 5 天后, 台风带来的洪水事件消退。

台风过境引发的洪峰过程从 9 月 16 日 18:00 到 18 日 10:00(图 14 黑框), 历时约 40h。根据监测断面获取的流速、浊度、含沙量及河道断面面积, 估算得出洪峰时段南渡江入海径流量、输沙量及含沙量, 并将其与龙塘水文站资料进行对比。多年平均的水沙资料显示, 年均径流量为 182m³/s, 年均输沙量为 3.2×10⁵t, 年均含沙量为 50mg/L; 而计算得到台风洪峰期间的径流量、输沙量及含沙量分别为 6830m³/s、2.3×10⁵t、362mg/L, 其中, 径流量和含沙量均远远超过多年平均数值, 而洪峰过程内的输沙量竟然达到了年均输沙量的 70%以上, 可见台风“海鸥”对南渡江入海水沙影响之大, 同时也说明南渡江河口地区具有“台风季节”特点。

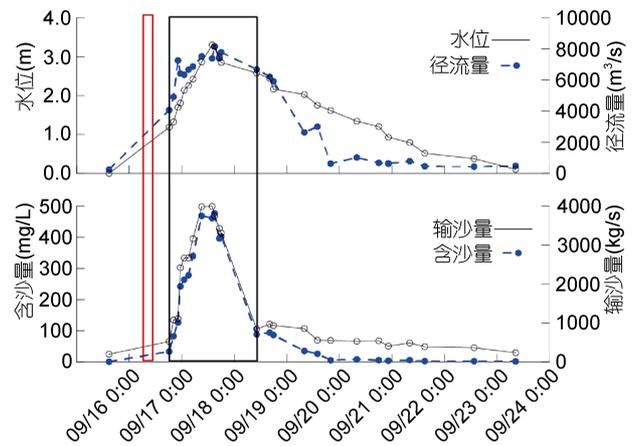


图 14 台风期间水位、径流量、含沙量及输沙量的变化过程线
Fig.14 Elevation, runoff, suspended sediment concentration and sediment discharge during typhoon “Kalmaegi”

此外, 河道的浊度与水流速度表现出正相关(图 15), 这里的浊度和流速为仪器直接观测的参数。根据中国气象科学数据共享网提供的台风前后的降雨量数据, 降雨量在台风过境前开始增加, 9 月 15 日 1:00 左右降雨量为 2.8mm/h, 此时南渡江河道径流量也开始增大, 河道内水量整体上涨, 故而在 9 月 16 日凌晨浊度下降。随着台风逼近海南, 降雨量急剧增大, 在 9 月 16 日 10:00—11:00 降雨量到达峰值, 此后水流速度增大, 携带上游泥沙的能力也增强, 从而使得水体浊度增大。另外在较大流速的条件下, 河道底床泥沙的再悬浮作用增强, 大量细颗粒物进入水体, 也导致水体浊度增大。9 月 16 日 11:00 台风过境后降

雨量迅速减少,而流速和浊度却表现出滞后性。9月17日0:00流速达到峰值,而浊度在9月17日10:00达到最大值。在流速到达峰值后,随着降雨量的减少或增大,流速出现减小—增大—再减小—再增大的过程,从9月18日开始流速总体上持续减小。而水体浊度自峰值后持续减小,至9月22日后水体浊度处于稳定状态,在大量的降雨冲淡作用及径流携带大部分底床的细颗粒泥沙入海的条件下,台风过后的河道水体浊度低于台风前。同时,洪水过程导致了水体温度急降,台风前约 31°C ,在洪水过程中降到了 26°C ,洪峰过后缓慢回升到 29°C 。这是由于在降雨过程中风力较大、气温较低、太阳辐射减少,同时大量雨水的注入致使温度急剧降低;洪峰过后,天气转晴、辐射增强、气温回升,河水温度缓慢回升。盐度自然也出现一个降低—再回升的过程,但该监测断面位于潮流界以上,基本不受潮汐影响,盐度基本为0,其变化可以忽略。

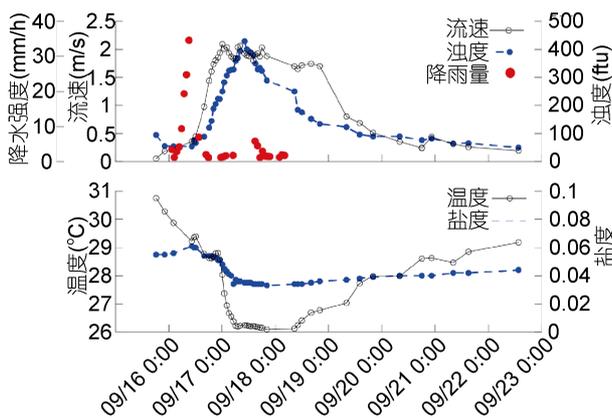


图 15 台风期间水流、浊度、温度及盐度的变化
Fig. 15 Current speed, turbidity, temperature, and salinity during typhoon "Kalmaegi"

6 结论

(1) 南渡江流域属于热带季风气候,具有独特的台风季节特征。洪、枯季节的水体层化作用不强,洪季的水温高于枯季,盐度低于枯季。由于亚热带地区的陆源效应,水温呈现向海递减的趋势,而盐度整体分布较为均匀。河口水体含沙量近岸大于离岸,底层大于表层。枯季的河口处浊度的垂向梯度较大,但输沙入海量不多。洪季含沙量明显高于枯季。

(2) 枯季河口三角洲东侧废弃侵蚀岸段的泥沙在涨潮流和东南季风的作用下向西输运,主要以底床再悬浮泥沙为主;洪季的河流泥沙入海量远大于

枯季,大量的泥沙入海后,粗颗粒的物质在口门沉积,细颗粒的泥沙依然沿岸向西输运或向琼州海峡输运,输运的物质通量也远大于枯季。因此,南渡江河口不具备“夏储冬输”的泥沙特征,而是明显的台风季节特征,尤其强台风带来的急剧降雨是南渡江河流在“源-汇机制”中的主要驱动力。

(3) 河口海域潮汐类型为不规则全日潮,潮流为东西向往复流特。河口温度、盐度和浊度均呈现较强的潮汐性特点,而浊度的峰值与流速的峰值与潮汐的相关性更加明显,本地含沙量主要来自于底床泥沙的再悬浮。

(4) 枯季河道内存在明显的盐水楔,受到中上游径流的顶托作用盐水楔的前缘被强烈压缩,锋面处的垂向梯度很大,在口门向陆大约 $12\text{--}15\text{km}$ 以上的河道水体不再受潮汐影响。河道水温由中下游向入海口递减,中游水温与入海口相差 4°C 。涨潮期间仅有少量泥沙入海,大量的泥沙聚集在河流的中游地区。

(5) 台风期间的监测数据显示入海通量的峰值具有一定的延时性和瞬时性,一般在台风过境大量降水后,入海通量的峰值才会出现,内径流量、输沙量及含沙量分别为 $6830\text{m}^3/\text{s}$ 、 $2.3\times 10^5\text{t}$ 、 $362\text{mg}/\text{L}$,其中径流量和含沙量均远远超过多年平均数值,可见台风对该地区的超强驱动力,充分证实了“台风季节”的特点。此外台风天气也使得水温随洪峰急剧降低,洪峰后缓慢回升。

参 考 文 献

- 王文介, 欧兴进, 1986. 南渡江河口的动力特征与地形发育. 热带海洋, 5(4): 80—88
- 方国洪, 郑文振, 陈宗镛等, 1986. 潮汐和潮流的分析和预报. 北京: 海洋出版社, 58—75
- 李春初, 田 明, 罗宪林等, 1997. 海南岛南渡江三角洲北部沿岸的泥沙转运和岸滩运动. 热带海洋, 16(4): 26—33
- 杨士瑛, 陈 波, 李培良, 2006. 用温盐资料研究夏季南海水通过琼州海峡进入北部湾的特征. 海洋湖沼通报, (1): 1—7
- 杨志宏, 贾建军, 王欣凯等, 2013. 近 50 年海南三大河入海水沙通量特征及变化. 海洋通报, 32(1): 92—99
- 吴德安, 崔俊松, 张忍顺等, 2008. 江苏辐射沙洲水道潮流调和分析. 海洋与湖沼, 39(2): 105—111
- 陈沈良, 龚文平, 王宝灿, 1998. 南渡江三角洲海岸泥沙纵向运移与岸滩演变的响应. 海洋湖沼通报, (1): 23—32
- 赵军鹏, 龚文平, 王道儒, 2013. 海南岛南渡江河口的盐水入侵. 海洋学报, 35(5): 14—28
- 柯佩辉, 1983. 琼州海峡的海流和水交换的初步分析. 热带海

- 洋, 2(1): 42—46
- 海南省地方办公室, 2005. 海南省志: 水利志. 海口: 南海出版社, 27—46
- 龚文平, 王宝灿, 1998. 南渡江三角洲北岸的海岸演变及其机制分析. 海洋学报, 20(3): 140—148
- 龚文平, 王道儒, 赵军鹏等, 2012. 海南岛南渡江河口枯季大小潮的盐度变化特征. 海洋通报, 31(6): 621—629
- 戴志军, 陈子燊, 欧素英, 2000. 海南岛南渡江三角洲海岸演变的波浪作用分析. 台湾海峡, 19(4): 413—418
- Hilton R G, Galy A, Hovius N *et al*, 2011. Efficient transport of fossil organic carbon to the ocean by steep mountain rivers: An orogenic carbon sequestration mechanism. *Geology* 39(1): 71—74
- Kao S J, Milliman J D, 2008. Water and sediment discharge from small mountainous rivers, Taiwan: the roles of lithology, episodic events, and human activities. *The Journal of Geology*, 116(5): 431—448
- Liu J T, Huh C A, You C F, 2009. Fate of terrestrial substances in the Gaoping (Kaoping) shelf/slope and in the Gaoping submarine canyon off SW Taiwan. *Journal of Marine Systems*, 76(4): 367—368
- Milliman J D, Farnsworth K L, 2011. River discharge to the coastal ocean: a global synthesis. Cambridge, New York: Cambridge University Press

VARIATIONS IN HYDRODYNAMICS AND SEDIMENTATION IN FLOOD AND DRY SEASONS AND IMPACT OF TYPHOON KALMAEGI ON RUNOFF AND SEDIMENT DISCHARGE IN NANDU RIVER ESTUARY

CHEN Bin^{1,2}, GAO Fei^{1,2}, YIN Ping^{1,2}, LIU Jin-Qing^{2,3}

(1. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, China; 2. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China; 3. Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract We studied the seasonal variations in hydrodynamics and sedimentology in Nandu River estuary based on observation data collected in 2014 in flood and dry seasons. We find that water column was less stratified and saltier, but warmer in the flood season than in the dry season. The temperature decreased from shallow to deep water, and the salinity was relatively stable. The spatial patterns of suspended sediment concentration in bottom layer decreased significantly seaward. In the dry season, under flood tidal current and southeast wind, the suspended sediment originated from the abandon shore to the east of the delta was transported westward along coast. Suspended sediment concentration was greater in flood season than in dry season, as a large amount of sediment was taken into the sea, and diffused seaward or westward. The flow pattern in the estuary was characteristic of irregular diurnal tide and east-west reciprocating flow. Temperature, salinity, and turbidity varied clearly and periodically with tidal changes. In the dry season, a clear salt wedge appeared in the middle and lower reaches, resulting in a greater vertical gradient in salinity. Under the influence of typhoon “Kalmaegi”, runoff and sediment concentration were much boosted above the normal average, recording the imprints of “the typhoon season” in the Nandu River estuary.

Key words Nandu River; seasonal variation; hydrology; sedimentation; typhoon; runoff and sediment discharge