

• 课程论文 •

夏季长江口-东海陆架-舟山海域的水文与物理海洋特征

王胤杰^{1*}

¹同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092, 中国

摘要: 本研究针对长江口及邻近海域的代表性断面开展了详细的水文观测, 以解析不同海域的水动力环境特征。主要的观测断面包括: 位于长江口南支的 YE 断面, 作为典型的河口与近海交汇区域; 以及东海北部的 YEC-EH 断面, 反映开阔海条件下的水文分布规律。研究手段以船载观测为主, 运用 ADCP、CTD 等仪器获得高精度的流场、温盐态等数据。同时配备多参数水质探测器, 全面监测各断面水体变化特征。YE 断面观测结果显示, 表层水体受到长江低盐冲淡水的影响较大, 而底层存在高盐外海水团, 二者交汇形成明显的盐跃层, 并对应温度、浊度的环流分层分布, 河口双层流特征显著。ADCP 数据反映该断面潮流运动占主导, 存在对称的涨落潮流, 流向与经典理论一致。HZW 断面作为典型的河口盐楔区, 温盐垂向梯度大, 并随潮汐周期性变化, 由冲淡水和外海水交替控制, 强潮汐混合作用下呈现复杂多变的流场。YEC-EH 断面代表东海较为稳定的开阔海条件, 表层受台湾暖流影响, 下层出现东海底层冷水团, 垂向温跃明显。开阔海区浊度全断面较低。研究表明, 从河口到开阔海, 水文特征发生显著转变, 多个断面的结果明确反映了江海交汇带的水动力环境复杂性。本研究为解析长江口三维环流过程和水团形成机制奠定了观测基础。

关键词: 长江口; 洋流; 舟山群岛; 盐跃层; 物理海洋

目录

1	引言	-1
1.1	科考航次与课程概况	-1
1.2	物理海洋学研究方向概况	-2
1.3	长江口-东海陆架物理海洋概况	-2
2	观测仪器与数据	-4
2.1	声学多普勒流速剖面仪 (ADCP)	-4
2.2	温盐深仪 (CTD)	-5
2.3	悬沙浓度测试及标定	-9
3	结果	-9
3.1	YE16 连续站	-9
3.1.1	流速时间剖面特征	-10
3.1.2	温度、盐度剖面特征	-10
3.1.3	悬沙浓度剖面特征	-11
3.2	YE 断面	-12
3.2.1	平面分布特征	-12
3.2.2	断面分布特征	-14
3.2.3	悬沙浓度剖面特征	-14
3.3	YEC-EH 断面	-14
3.3.1	平面分布特征	-15
3.3.2	断面分布特征	-16
3.3.3	悬沙浓度剖面特征	-16

1 引言

1.1 科考航次与课程概况

本次科考航次全名为: 2023 年夏季海洋地质国重室 KPP-YEC 科考航次 (Key Processes-to-Products in the

Yangtze River-Estuary-East China Sea Continuum)(长江河流-河口-东海连续体关键过程与产物关系综合研究科考航次), 由浙江省舟山博海海洋科技有限责任公司“博海科”号科考船参与了实施本次调查任务。本次科考航次位于长江口和东海陆架, 共计 22 个站位²观测, 着眼于长江口-东海陆架的关键物理过程、生物和生态环境等, 掌握海洋综合调查的技术和方法。

本次实习共有 24 名本科生大二学生参与, 他们被分为两批四个小组进行科学研究。教学团队包括 6 名指导教师和 5 名博士后/研究生。与此同时, 还开展了以增强学生责任感、工匠精神、海洋强国理念为主题的思政学习活动。

对于本科生的实习计划分为备航学习、海上实习、室内实验分析和报告撰写与答辩四个阶段。

- 备航学习 (7 月 2 日、7 月 3 日)

涵盖了实习动员、专业知识讲解和仪器操作培训。

- 海上实习阶段 (8 月 16 日至 8 月 22 日)

为期 7 天, 在预设的 22 个站位²开展物理、化学、生物、地质和地球物理 5 个学科方向的观测与采样。

- 室内实验分析阶段 (8 月 24 日至 8 月 25 日)

主要在临港实验分析或本部数据处理, 对本航次样品与数据分别进行分析测试与数据处理。

- 报告撰写与答辩 (8 月 25 日至 9 月 8 日)

用 7 天左右的时间整理数据、查阅文献, 完成实习报告并进行答辩。

本实习课程隶属于同济大学海洋与地球科学学院的海

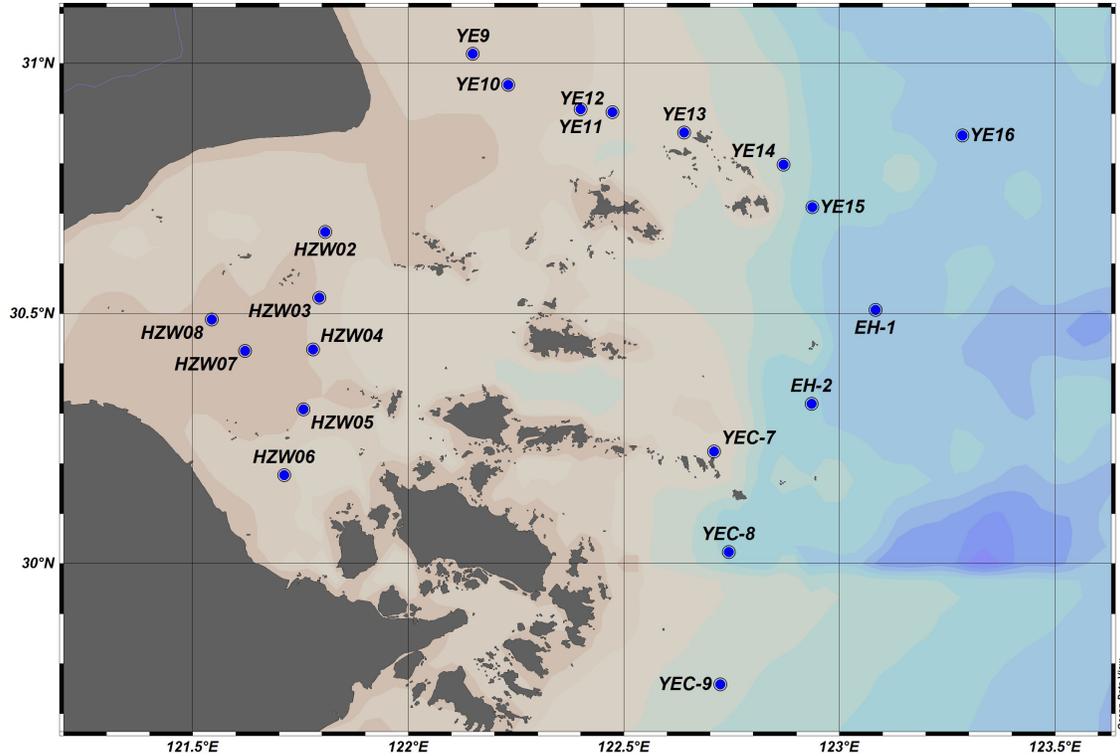


图1 本次观测站点与名称分布图

洋综合实习课程,是海洋科学专业必修的实践教学环节。该课程的设置目的是让学生初步掌握海洋综合调查的规范、技术和方法,为后续课程打下基础。通过近海实际调查与分析练习,学生可以掌握使用声学多普勒流速剖面仪、温盐深仪等专业仪器的方法,了解海水环境参数的测定,学习水文、生物、化学、地质和地球物理样品的采集与处理方法,熟悉数据分析工具的使用并编写调查报告。

本次海洋综合实习选择长江口和东海陆架作为调查区域,科学价值具有以下三点:

- 该海域受强烈人类活动影响,可以研究海陆交互作用对环境的影响
- 可以观测海洋多尺度动力过程与沉积物运移
- 可研究海洋上层与深部的生物地球化学耦合关系

因此对于提高本科生对于海洋科学的认识有重要的意义。由于本人在本次实习中选择的是物理海洋方向,所以本报告内容主要为物理海洋方向。

1.2 物理海洋学研究方向概况

本次物理海洋方向的实习主要在长江口南支和杭州湾两个区域开展了野外观测,以研究这两个典型河口海域的物理过程。

首先,在长江口南支沿一条跨越河口的观测断面展开了船载仪器观测,采集了水体温度、盐度、浊度等参数的数据。这些数据反映了长江淡水与海水相互作用所形成

的盐度锋面、浊度最大区等典型特征。通过绘制平面图和剖面图,可以直观地研究长江冲淡水的扩散过程以及与海水的混合机制。

其次,在杭州湾的一个定点开展了长时间系列观测,使用声学多普勒流速剖面仪和温盐深剖面仪,观测了一个完整潮汐周期内的流速、温度和盐度的时空变化。这些数据展现了潮汐涨落对河口海域水体交换的影响。通过时序剖面图的分析,可以定量地研究潮汐混合的过程。

在数据处理方面,物理海洋方向主要利用 Matlab 和 Ocean Data View 等软件进行数据分析和绘图。这大大提高了日后科学研究过程中非常重要的独立处理观测数据的能力。

与此同时,本次物理海洋方向实习也综合训练了海洋水文学、物理海洋学的野外观测、数据处理和分析的能力,使我们对典型河口海域的物理过程有了更直观和深入的了解,为后续开展河口与近海过程方面的研究奠定了基础。

1.3 长江口—东海陆架物理海洋概况

长江口-东海陆架是中国沿海重要的边缘海区域,水文动力环境复杂多变。本区域位于副热带季风气候区,深受季风气候特征影响。长江口西侧有长江大量淡水输入,东侧连接广阔的东海陆架海域。北侧的黄海沿岸流和苏北沿岸流,南侧的台湾暖流和黑潮,以及受潮流和地形影响的各种沿岸流环流,在东海陆架上交汇涌合,形成复杂

表 1 本次观测站位信息

站位名称	到站时间	离站时间	实际站位经纬度	水深 (m、测深仪)
8 月 17 日				
YEC-10	13:35	14:26	122°35 11.8106 E 29°37 5.3480 N	34
YEC-9	15:39	16:32	122°43 25.0552 E 29°45 31.6238 N	42
YEC-8	18:18	18:30	122°44 35.872 E 30°01 23.3487 N	37.5
8 月 18 日				
YEC-7	05:00		122°42 34.3784 E 30°13 28.2784 N	27.8
EH-1	12:07	12:34	123°05 01.82 E 30°30 26.848 N	57.83
EH-2	13:55	16:38	122°56 08.8753 E 30°19 11.1077 N	49.46
YE16	19:57		123°17 06.4516 E 30°51 21.8359 N	59.41
8 月 19 日				
YE16		10:09	123°14 46.3929 E 30°39 31.31 N	58.80
YE15	11:43	12:05	122°56 14.0734 E 30°42 46.5382 N	43.97
YE14	12:45	13:18	122°52 12.4233 E 30°47 53.9436 N	27.00
YE13	14:27	14:44	122°38 21.6125 E 30°51 42.6935 N	26.10
YE12	15:39		122°28 23.8281 E 30°54 00.1069 N	13.72
8 月 20 日				
YE12			122°28 14.3895 E 30°53 58.2565 N	13.74
8 月 21 日				
YE12	08:00		122°28 20.0600 E 30°54 00.8360 N	12.94
YE11	09:00		122°24 01.2633 E 30°54 30.5880 N	11.15
YE10	10:04	10:22	122°13 54.2941 E 30°57 26.2128 N	8.20
YE9	10:47	10:55	122°08 57.9205 E 31°01 08.1838 N	7.07
HZW02	15:17	15:36	121°48 25.5355 E 30°39 46.1351 N	11.75
HZW03	16:26	16:40	121°47 37.9945 E 30°31 53.2375 N	9.84
HZW04	17:15	17:38	121°46 46.4440 E 30°25 40.6562 N	11.91
HZW05	18:19	18:33	121°45 20.0149 E 30°18 31.6843 N	10.55
HZW06	19:17	19:33	121°42 47.0560 E 30°10 37.0653 N	6.23
8 月 22 日				
HZW08	14:19	14:30	121°32 38.5748 E 30°29 18.1459 N	9.87
HZW07	15:08	15:21	121°37 18.0660 E 30°25 32.0412 N	已关闭

的环流系统。

季风气候变化显著影响长江口及邻近海域的风场和波浪条件。冬季偏北风盛行,夏季偏南风占优势。该海域波浪以风浪为主,并与涌浪叠加形成混合波浪,其方向随季风方向变化。长江径流的季节变化也十分显著,导致长江口及邻近海域水文条件季节性差异大。

长江口外潮汐以规则半日潮为主,而口内受深水效应影响较显著,表现为不规则半日浅海潮。外海平均潮差约 2.5 米,向西逐渐增大,口内最大可达 5 米以上。涨落潮流方向近似顺应主潮流椭圆方向。口外为旋转潮,口内为往复潮。

东海环流体系可划分为外海流系和沿岸流两大类。主要受季风、河川淡水、暖流侵入等因素影响。西部主要

为台湾海峡暖流等南北向流体系;东部主要为黑潮、对马暖流等影响。东海暖流体系较稳定为南北流向,而沿岸流随季风季节变化方向显著。

长江冲淡水沿岸向东扩散,或南输送形成浙闽沿岸流。夏季可向东北扩散至 128°E 附近,冬季仅限长江口及以南近岸。因冲淡水密度轻,可在表层形成低盐舌状结构,与下层海水形成明显的盐度跃层。

本海域水团分布显著受长江径流影响,季节变化特征明显。还受外海水团如黄海冷水团、黑潮次表层水等影响,水团分布复杂多变。

2 观测仪器与数据

本次科学考察的观测站位主要包括定点连续观测站位和大面采样站位两类。

定点连续观测站位位于航线关键区域, 船舶会在该点泊位一个或两个完整潮汐周期。我们每隔 1 小时从表层、中间层和底层三个水深进行水样采集和温盐深仪参数检测, 以连续监测不同潮汐时段水体各层位的变化情况。同时, 我们还在站位的海底架设三脚架, 安装声学多普勒流速剖面仪, 对不同时段的水平流场进行动态监测。这些高时间分辨率的数据, 可以帮助我们量化研究不同潮汐时段对水体变化的影响规律。

大面采样站位主要布设在航线间的代表性区域, 船舶经过时进行快速采样, 包括表层海水采集和温盐深仪剖面检测, 目的是扩大观测范围, 了解研究区域水体基本状况的空间分布格局。

两类站位的观测数据将综合分析, 使我们能从时间和空间尺度上全面把握研究海域的水文动力特征。

2.1 声学多普勒流速剖面仪 (ADCP)

声学多普勒流速剖面仪 (ADCP) 利用多普勒效应, 通过发射一系列稳定而快速的脉冲“声音”来工作, 这些脉冲会反射回仪器, 其声音会从移动的水中悬浮的粒子上弹回。向仪器移动的粒子会返回更高频率 (音调更高) 的波, 而远离仪器移动的粒子会返回更低频率的波。由于粒子以与携带它们的水相同的速度移动, 可以通过计算仪器发出和接收的声波之间的频率差来计算粒子及其周围水的移动速度。该系统跟踪每个声音脉冲何时返回; 由于传播距离更远 (更深) 的脉冲会更晚返回, 这可转换为不同水深的流速数据。

ADCP 使用一系列声传感器发射和接收不同方向的声音脉冲。仪器可以直接安装在固定对象如系泊浮标或海床上。它们也可以安装在移动载具上, 如船舶或无人潜水器和水面载具。在大型研究船上, ADCP 通常永久安装在船体外壳底部。

与其他声纳一样, ADCP 有不同的工作频率。例如, 更高的 300 千赫兹 (kHz) 频率可提供高分辨率的近海面数据, 测量深度范围约为 70 米。更低频率的 ADCP, 如 38 kHz, 将提供分辨率较低的数据, 测量深度达约 1300 米, 具体取决于周围海洋的噪声水平。



图 2 Flowquest 600kHz ADCP

本次使用的声学多普勒流速剖面仪为 Flowquest 600kHz ADCP, Flowquest 系列是 Linkquest 公司研发的高性能声学多普勒流速剖面仪。这一系列流速剖面仪广泛应用于海洋、港口、湖泊及河流的流速流向测量, 也可用于近海浪测量。

本航次第一批次主要利用 ADCP 对于 YE16 连续站进行观测, 用于绘制该连续站一个潮汐周期内的水流数据, 之后主要通过 MATLAB 程序针对 YE16 号站位的 ADCP 多层流速资料进行了处理和分析, 程序首先读取并合并了两个 Excel 表格的 ADCP 原始数据, 其包含时间、位置、流速等信息。然后对数据进行预处理, 包括生成时间序列、提取有效水深、初始化速度矩阵等。主要通过循环取出各层的速度分量, 并进行单位转换、质控、去除异常值等操作。

由于 YE16 站位缺少连续的水深数据, 本次工作首先尝试了通过对于观测记录本所记录的每小时整点的水深数据 (单波束测深仪所获得) 插值的方式补充了 YE16 站位连续 13 个小时的水深数据。由于单波束测深仪容易收到船体摇晃等影响, 以一小时步长插值的结果相较于 YE12 的连续观测数据严重不平滑, 偏离了潮位曲线的正弦特征。

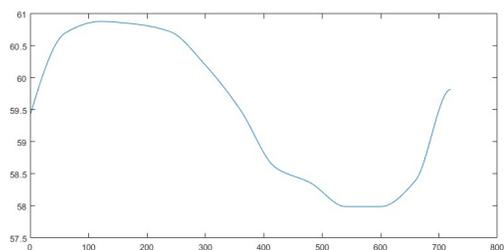


图 3 单波束测深插值结果

后改用 CTD304 与 TJCTD 的每小时整点由压力换算得出的深度数据, 并改进使用其具体时间进行插值其结果效果更为不佳。

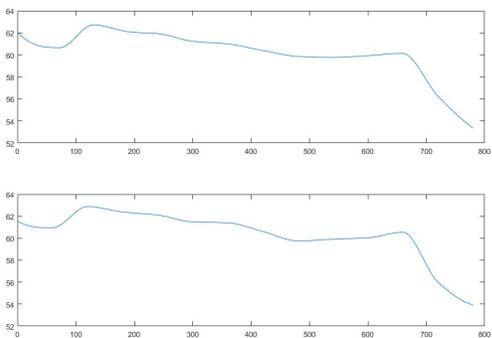


图 4 CTD304 与 TJCTD 测深插值结果

遂还是使用单波束测深数据利用 cftool 插件中的一阶傅里叶级数进行拟合得出一条光滑的 YE16 在该时段的潮位水深数据，作为潮位水深数据进行使用。

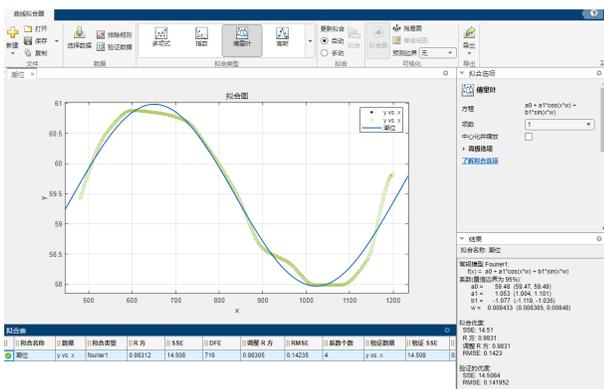


图 5 cftool 拟合

表 2 拟合结果

模型	Fourier1
表达式	$f(x) = a_0 + a_1 \cos(xw) + b_1 \sin(xw)$
系数 (95a ₀)	59.48(59.47, 59.49)
a ₁	1.053(1.004, 1.101)
b ₁	-1.077(-1.119, -1.035)
w	0.008433(0.008385, 0.00848)
拟合优度	
SSE	14.51
R ²	0.9831
调整 R ²	0.9831
RMSE	0.1423
验证优度	
SSE	14.5084
RMSE	0.141952

在移除可能受底层影响的异常数据之后，得到了质量

较好的多层流速数据集。

2.2 温盐深仪 (CTD)

CTD 代表导电率 (conductivity)、温度 (temperature) 和深度 (depth), 中文名可称为“温盐深仪”; 该命名指的是一个测量这些特性的电子仪器组合。通常,CTD 连接在一个大得多的金属框架上, 称为转盘, 转盘上可以挂载用于在不同深度收集水样的水样瓶, 以及可测量额外物理或化学特性的其他传感器。

海洋科学研究中经常使用 CTD 测量来检测海水化学和物理特性变化的证据。一般使用过程中通常在船只缓慢穿过被调查区域时, 提升和下落 CTD 直到贴近海床, 以检测该站不同深度的各类海水特性。

本次使用的温盐深仪有三个型号, 分别为“博海科”科考船自带的 SBE 19plusV2 与同济大学海洋学院所带的 OCEAN SEVEN 304Plus CTD、OTS200 V2.8.0 CTD。



图 6 SBE 19plusV2

其中, SBE 19plusV2, 它是一款性能可靠、使用简单的温盐深剖面仪, 采样频率为 4Hz, 广泛应用于海洋调查、监测以及工程应用等领域。

SBE19plusV2 能够有效减小船只起伏造成的盐度误差, 同时在低速下投过程中保持快速响应, 从而提高了动态测量精度, 能够捕捉到水体中的小尺度结构。

采集的数据可存储在内置存储卡上, 也可选择以工程单位或原始 HEX 格式实时输出。内置 9 节碱性电池可支持长达 60 个小时的连续剖面观测。在本次观测中对于每个站的水深 (Depth [salt water, m])、温度 (Temperature [ITS-90, deg C]) 与盐度 (Salinity, Practical [PSU]) 进行了测量。



图 7 304Plus CTD

304Plus CTD 温盐深仪由 Idronaut 公司推出, 该仪器采用小型设计, 集成了高精度的导电率、温度、压力传感器, 能够实现高精度的环境参数测量。相较于 SBE 19plusV2, 具有独特的无泵设计, 可以有效降低仪器的功耗。与市面上大多数 CTD 使用细小管道不同, 304Plus CTD 使用大直径短管设, 可有效防止生物附着。

本次观测中对于每个站位的水压力 (Pressure [salt water, m])、温度 (Temperature [ITS-90, deg C])、盐度 (Salinity, Practical [PSU])、电导率 (Conductivity[mS/cm]) 和声速 (SoundV [m/s]) 进行了测量。

另外, 本航次也配备了一款型号为 OTS200 V2.8.0 的国产 CTD, 在本次观测中对于每个站位的水压力 (Pressure [salt water, m])、温度 (Temperature [ITS-90, deg C])、盐度 (Salinity, Practical [PSU])、电导率 (Conductivity[mS/cm])、低量程浊度 (TuridityL[FTU]) 和高量程浊度 (TuridityH[FTU]) 进行了测量。

表 3 数据集信息

数据集名称	CTD304	TJ_CTD	ctdOTS
仪器型号	304Plus CTD	SBE19plusV2	OTS200 V2.8.0
水深	有	有	有
温度	有	有	有
盐度	有	有	有
电导率	有	无	有
低量程浊度	无	无	有
高量程浊度	无	无	有
声速	有	无	无

本航次第一批次主要利用 CTD 对于 YE 断面与 EH 断面进行了水文信息观测, 通过定时定点投放 CTD 仪器进行, 经过对于三款 CTD 的数据对比, 我们可以看到船载 CTD 数据-TJ_CTD (SBE19plusV2) 数据集的数据质量最差, 发生较多的数据错误与偏离现象。因此, 我们在除了在其两个 CTD 在该站位数据缺失的情况下, 一般不使用 TJ_CTD 数据集来进行数据分析与绘图。

表 4 仪器站位数据存在与否

站位	CTD304	TJ_CTD	ctdOTS
YE09	无	有	有
YE10	无	有	无
YE11	无	有	有
YE12	有	有	有
YE13	无	有	无
YE14	有	有	有
YE15	有	有	无
YE16	有	有	有
EH1	有	有	有
EH2	有	有	有
YEC07	有	有	有
YEC08	有	有	有
YEC09	有	有	有
YEC10	有	有	有

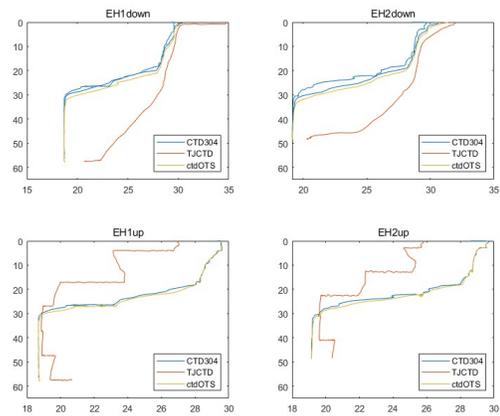


图 8 EH 断面 CTD 仪器温度数据对比

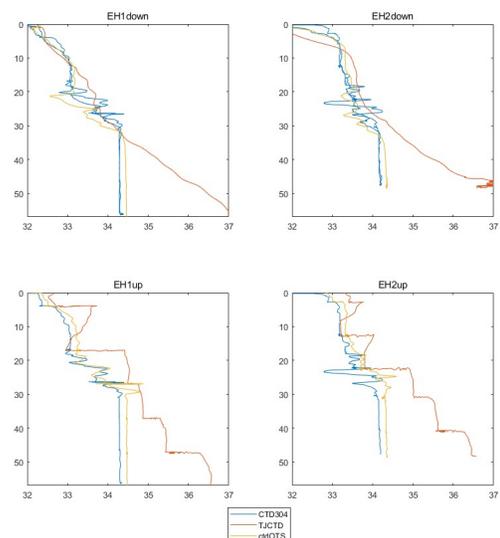


图 9 EH 断面 CTD 仪器盐度数据对比

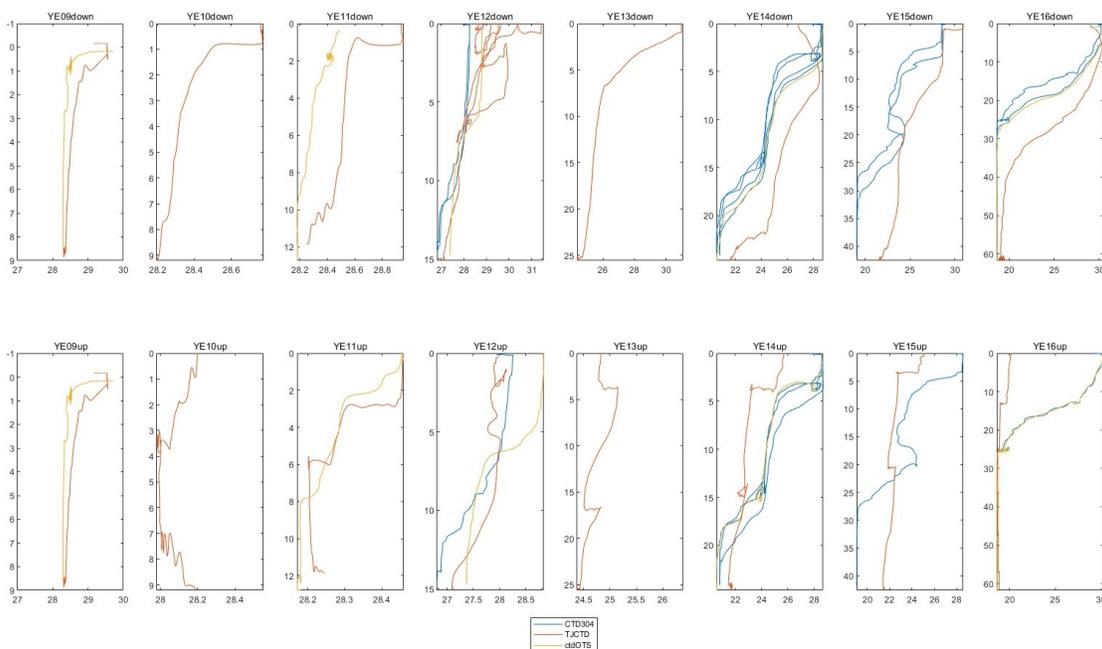


图 10 YE 断面 CTD 仪器温度数据对比

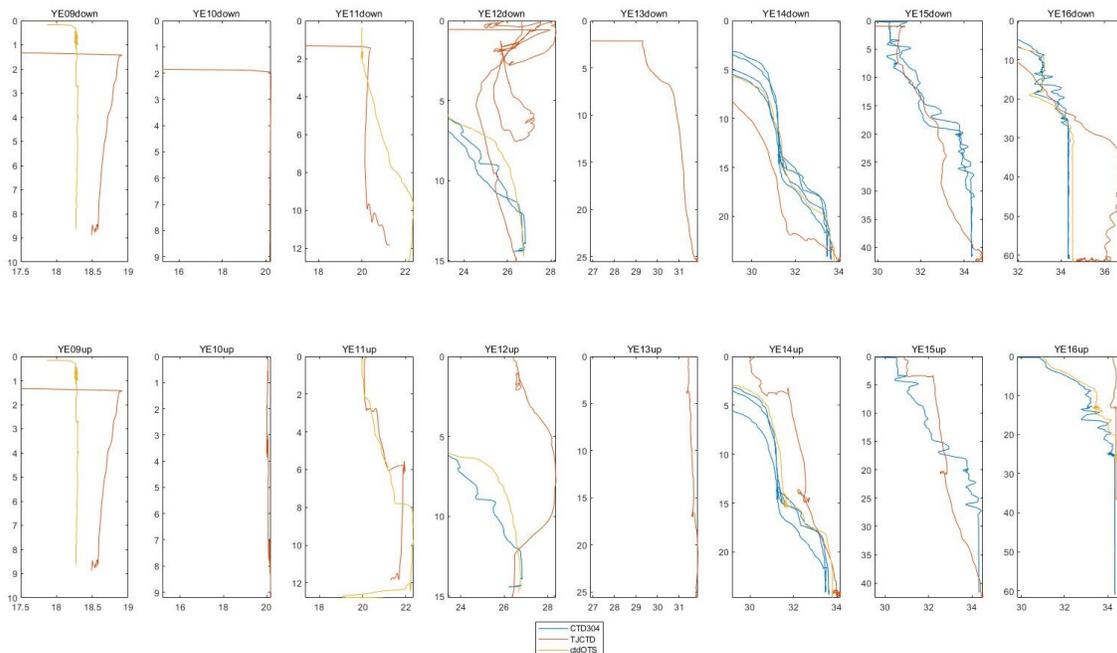


图 11 YE 断面 CTD 仪器盐度数据对比

因此，本研究使用了 MATLAB 对多个 CTD 仪器数据进行预处理，以提高后续分析的可靠性。首先据站点建立矩阵变量，提取了所有的 ctdOTS、CTD304 仪器数据，并根据站点信息将温度、盐度、深度等数据存储到对应矩阵中。其中 YE10 与 YE13 并无 ctdOTS、CTD304 仪器数据，因此使用 TJ_CTD 数据进行补充。在这之

后对数据按照深度排序，并删除了表层 0.3m 以内由于空气与刚开机等原因出现较大异常值的数据。

在数据整理后，出现了较多的抖动与碎波，为了使得 CTD 各项数据曲线更为平滑，更为接近真实数据，最大限度去除仪器系统误差的影响。因此我选择了几种滤波算法对数据进行测试，经过测试，各种滤波算法在本数

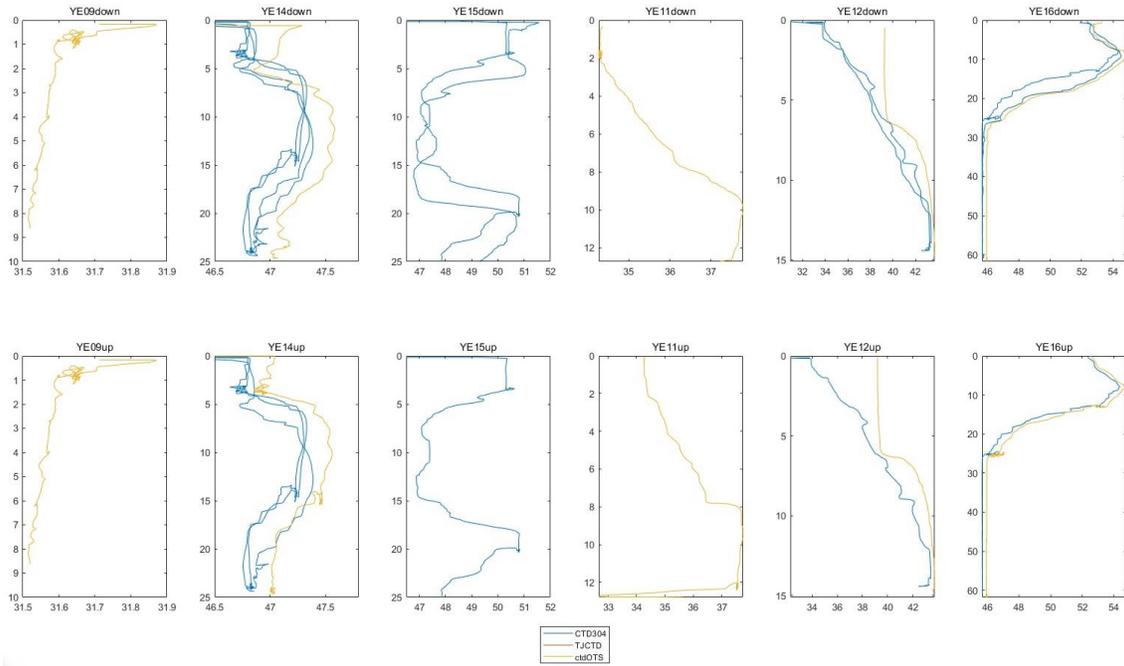


图 12 YE 断面 CTD 仪器电导数据对比

据集中需要达到 60 阶及以上才能得到较为平滑的结果。具体效果如13，之后本人选择了移动平均滤波（最小二乘滤波法）对各站位数据进行了平滑处理。

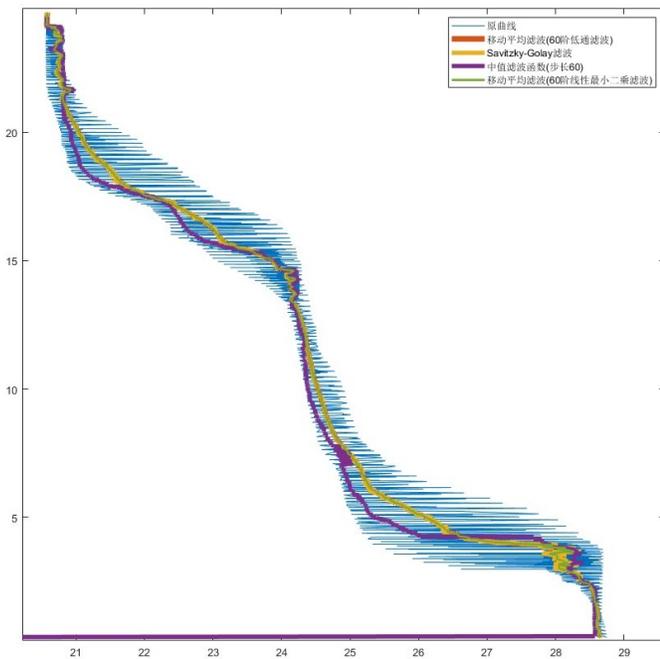


图 13 不同滤波算法的结果比较 (YE14 站位温度数据)

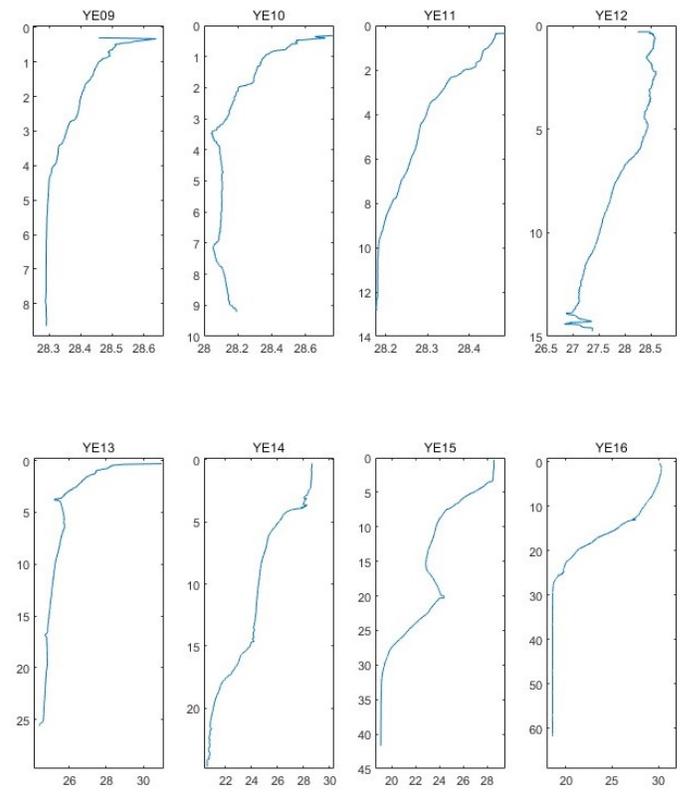


图 14 YE 各站位温度数据

以 YE 断面温度数据为例，各站位滤波结果如14所示，由于不同站位到达时间不同，海水断面物理性质分布略有差异。

2.3 悬沙浓度测试及标定

本航次中对于水样中的悬沙浓度进行了测定，利用津腾无油隔膜真空泵 GM-1.0A 采用过滤法得到。使用了高分子微孔滤膜（直径 47mm，孔径 0.45 μm）。以下 1、2 与 3 部分由韩香举博士进行全程处理，本人参与处理了 2、3 与 4 部分。

1. 首先在航次开始前已经给滤膜编号，45°C 恒温下烘烤 48 小时，然后放入平衡箱静置 24 小时。平衡后用分析天平测量并记录各滤膜质量。

2. 对悬沙浓度较低的水样，在航次的湿实验室中即进行过滤，高浓度水样带回实验室静置 1 周，沉降悬沙。取出静置水样，用软管先吸出上层清液，过滤。然后缓慢过滤剩余高浓度悬沙液。

3. 完全过滤后，用蒸馏水反复冲洗滤膜、过滤筒、软管，去除盐分和附着悬沙。

4. 将滤膜 45°C 烘烤 48 小时，称重计算各水样悬沙浓度。

5. 求出水样悬沙浓度 (g/L) 与对应 OBS 传感器 FTU 值的函数关系。用于将 OBS 读数转换为悬沙浓度。

在 MATLAB 中本人根据 obsCTD 中的 TurbidityL 数据与各层位悬沙浓度进行对应，将站位信息以点的形式呈现，并利用 cftool 拟合出了一阶与二阶仪器浊度与悬沙浓度的对应关系。作图如图 15 16，相较于指导书所展示的 (Tu et al., 2019) 的反演结果，本次结果由于 CTD 误差等各种系统误差，拟合函数残差较大。

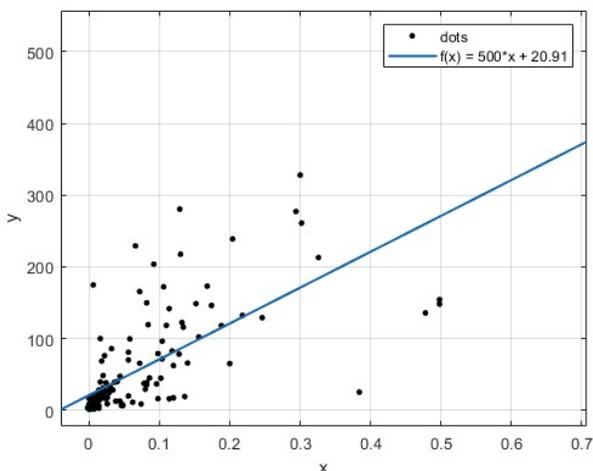


图 15 悬沙浓度与浊度关系一阶拟合

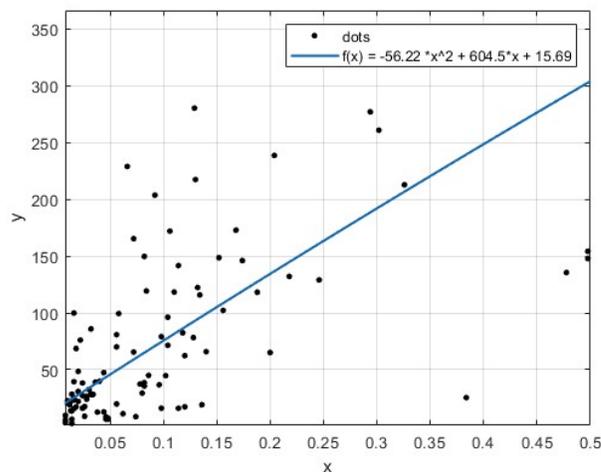


图 16 悬沙浓度与浊度关系二阶拟合

3 结果

本报告选取长江口南支 YE16 连续站位、YE 断面以及杭州湾 EH 断面作为观测对象。

在 YE16 连续站位，利用声学多普勒流速剖面仪 (ADCP) 开展了为期 48 小时的海流过程观测，获得了不同水深层流速和流向随时间变化的连续记录。在 YE 断面与 EH 断面上，使用传导-温度-深度剖面仪 (CTD) 进行了多站位观测，获得了断面上温度、盐度、浊度等参数的剖面分布数据。同时，利用水中光学仪器测量了水体光学性质参数。

观测数据的处理将使用 Matlab 等软件进行质控、绘制、订正、插值，并利用 MATLAB 和 Ocean Data View (ODV) 绘制观测断面上的温度、盐度等参数的分布图。

与此同时对 ADCP 和光学参数数据同样进行序列化处理，以绘制不同水深层参数随时间变化的时间序列图像。综合各类观测结果，分析长江冲淡水的时空分布规律及其对环流的影响，解析长江口及邻近海域水团结构，为认识长江口海域的水文动力环境提供依据。

3.1 YE16 连续站

YE16 站位经纬度数据为：123°17'06.4516 E 30°51'21.8359 N，该海域处于副热带季风气候区，受季风驱动，该海域表层海流呈季节性变化，夏季沿岸流向为自西南向东北，冬季则自北向南。该海域邻近长江口，会受到大量长江冲淡水的影响。长江冲淡水主要以低温低盐的表层舌状水团形式出现，通过对流、混合逐渐与周边海水交汇。YE16 站位所处位置，应已脱离长江冲淡水的直接影响，但仍可能受到长江冲淡水舌东扩过程中的间接影响。

从水文条件来看，YE12 站位所处海域表层水温约 28-30°C，底层较低；盐度约 31-34psu，表层较低而底层较高。

该海域不再像近岸区域那样受河水影响显著, 水文条件较为稳定。

3.1.1 流速时间剖面特征

本研究利用处理后的 ADCP 流速观测数据, 绘制了研究区域的流场平面分布图, 表示东西向和南北向流速的时空分布变化。18同时, 计算出了流速绝对值和流向, 绘制不同层次的流速剖面图和流向剖面图。这些可视化结果清晰展示了调查海域内部水体的流场特征和结构。

观测流场显示出明显的潮汐运动特征, 涨落潮过程对称性较好。根据水位变化计算, 高潮位水深约为 60.88 米, 低潮位水深约为 57.99 米。最大涨潮流速达到 1.06 米/秒, 涨潮流方向大致为正南; 最大落潮流速为 0.96 米/秒, 落潮流方向为正北。这与该海域 M2 主要分潮的经典潮流椭圆理论特征一致 (Rong and Li, 2012)。从垂直流速分布看, 中层流速最大, 表层次之, 底层最小, 符合传统潮流边界层分析。南北向流速结构显示, 底层流向先于表层发生变化, 表明涨潮期间密度较大的海水先从底部流入, 这与经典的河口环流理论一致。31

3.1.2 温度、盐度剖面特征

本人根据 CTD 间隔一小时在 YE16 站位投放得到的测量数据绘制了: 温度时间序列剖面、盐度时间序列剖面与电导率时间序列剖面。

由于该点位的 otsCTD 数据集与 CTD304 数据集均有完整数据, 所以根据指导教师意见本人对于各时间段的两组 CTD 观测数据各自分为 upcast 和 downcast 子数据集, 并分别绘制温度、盐度、电导率随时间变化的剖面图。

对于温度时间序列剖面, 表层温度较为稳定保持在 31°C 左右, 我们可以发现在离海底约 40m 与 50m 存在着明显的温跃层。其中在离海底约 55m 还存在一条暂时性的温跃层, 仅在 3 点至 7 点较为明显。与此同时, 在相同时间段, 40m 的温跃层位置也发生轻微上移。

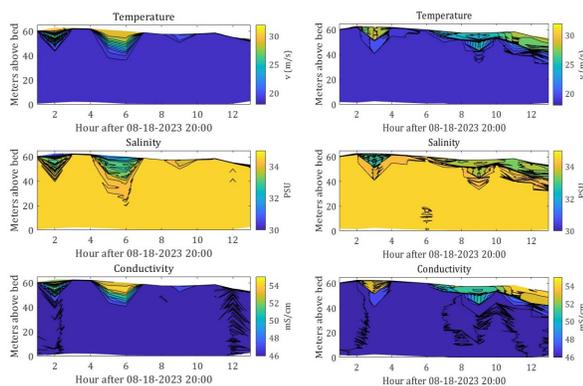


图 19 YE16 连续观测站位温度、盐度、电导率剖面总体特征 (ctdOTS 数据)

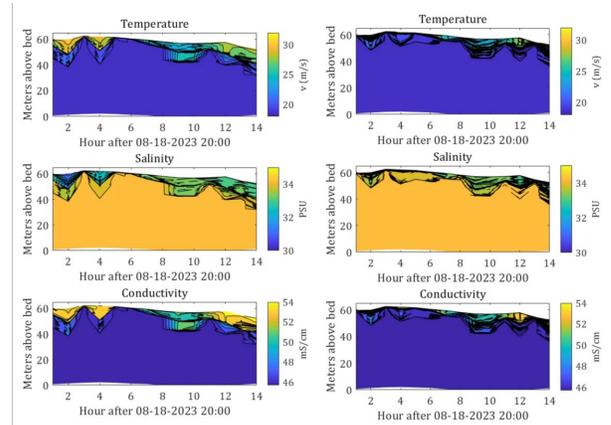


图 20 YE16 连续观测站位温度、盐度、电导率剖面总体特征 (CTD304 数据)

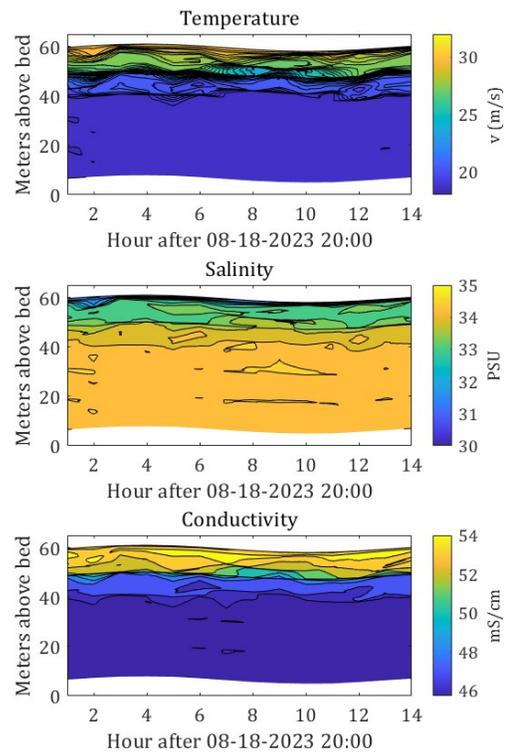


图 21 YE16 连续观测站位温度、盐度、电导率剖面总体特征

而对于盐度时间剖面, 可以发现在垂向上存在着明显的盐度分层。表层盐度总体保持在 31PSU 左右, 随时间变化较小。总体来说水体在距离海底 55 处与 40m 处存在两条盐跃层。

YE 站位温盐的垂向结构表明: 涨潮时外海低温高盐的海水从正北方向流入, 落潮时高温低盐的冲淡水从正南方向流出。站位 YE16 位于近海长江口区域, 根据观测资料分析, 其表层水体温度较高而盐度较低, 代表着源

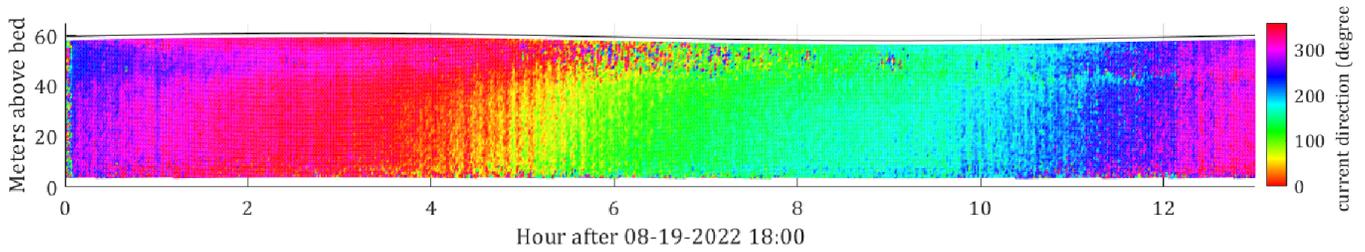


图 17 海水流动方向剖面图

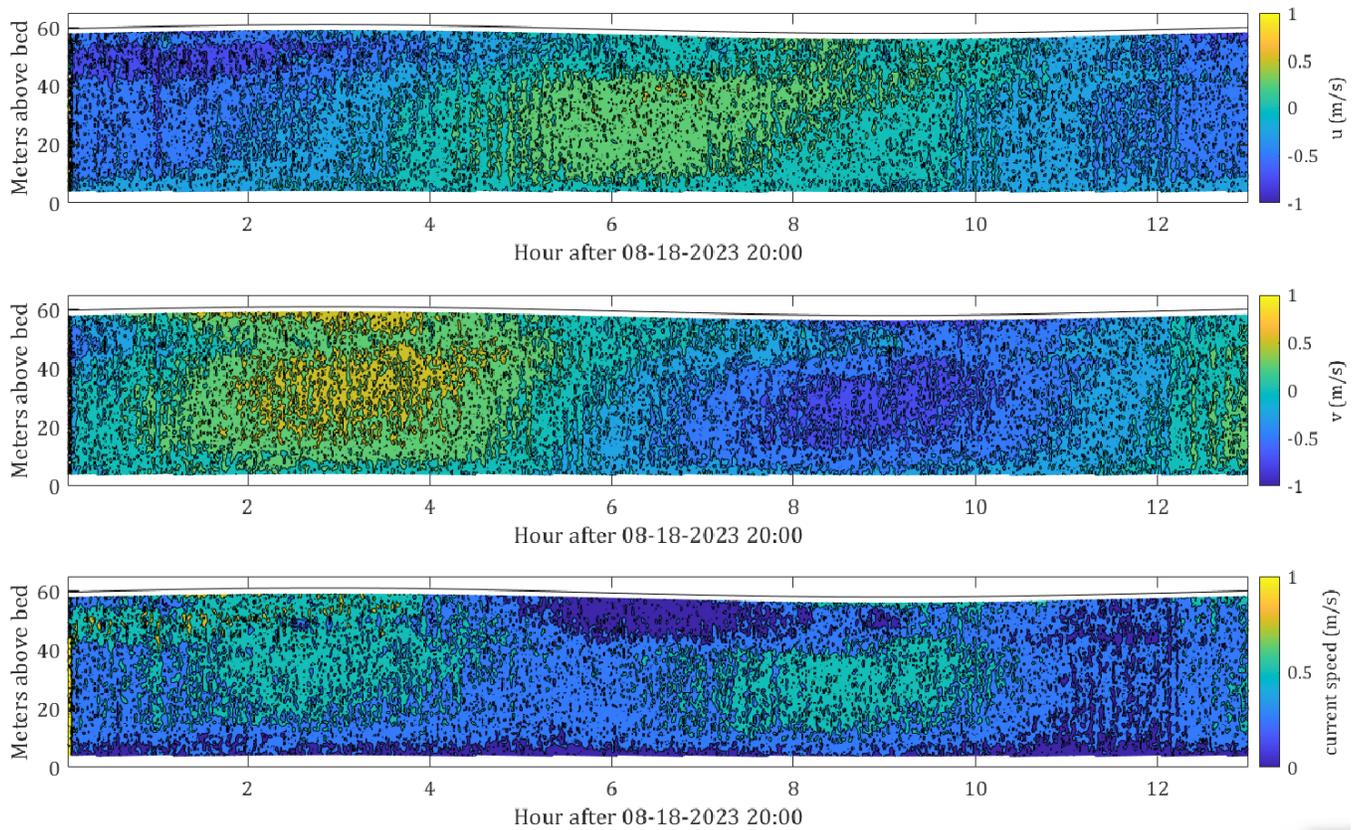


图 18 海水东西向和北南向流速的时空分布与流速绝对值剖面图

自近岸的近岸水团。这部分近岸水团受太阳辐射加热形成高温低盐的特征，主要来源可能包括长江口输入的淡水、降水补给、以及沿岸流动的近岸水团等。

相对而言，YE16 站位底层水体温度较低而盐度较高，代表着源自外海的外海水团。这部分外海水团形成低温高盐的特点，主要是受到了强烈的蒸发作用增加盐度，而远离热源导致温度相对较低。可能的水团来源包括北太平洋中层水团等通过垂向混合进入研究区域。

离海底 40-50 米处的明显温跃层应为近岸水体和外海水团的交界面，是两种不同水团性质的过渡区。表层近岸水体与底层外海水团在这里发生垂向混合，形成稳定的温盐跃层。

离海底 55 米处的暂时性温跃层，很可能是受内浪或潮汐振荡的影响，中间层水体与底层外海水团过境振荡而产生的短暂温跃层。其仅在夜间 3-7 点明显，也说明可

能与日夜热传导有关。

与此同时站位接近近岸区域，受潮汐和近岸水动力作用影响大，水团交汇复杂，因而出现多个不稳定跃层。

因此，通过分析 YE16 站位不同深度水体的温盐特征，可以辨识出表层为近岸水团而底层为外海水团的垂直结构，这反映了不同来源水团的存在与相互作用的过程。但需更多研究以确定水团的具体来源并建立定量模型。

3.1.3 悬沙浓度剖面特征

YE16 连续观测站通过过滤法检测不同层位悬沙浓度结果显示，表层 2 米悬沙浓度维持在 0-0.003g/L 的较低水平，这可能因为表层受波浪混合的影响，悬沙容易扩散稀释。中间层 26 米和底层 56 米的悬沙浓度略高于表层，均出现过 0.001-0.008g/L 的悬沙峰值，说明中间层和底

层是悬沙的积累区,但整体悬沙含量仍较低。站位悬沙总体维持在 0.001-0.008g/L 的低水平浓度,显示出弱悬输砂特征,这可能与观测期处于平水期,没有强烈的泥沙输运过程有关。不同层位悬沙浓度有所差异但变化范围不大,确实随时间略有波动,但总体处于低浓度状态。表层悬沙受流动影响变化较明显,而中间层和底层作为悬沙沉积区,悬沙含量相对稳定。该低浓度悬沙分布总体反映出平水期弱输砂的海洋动力条件。

3.2 YE 断面

YE 断面经度范围约在 122.15°E - 123.25°E, 纬度范围约在 30.66°N - 30.96°N。由于船务与航道繁忙等原因,本次航次任务站位规划相较于往届在 YE 断面选择点位较少且偏向于长江口东南外海。

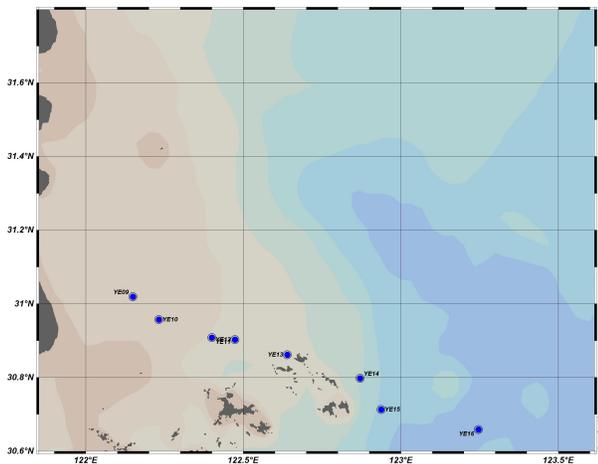


图 22 YE 断面站位与名称分布图

YE 断面从长江口内延伸至中国东海陆架,可以反映长江淡水与海水相互作用的典型特征。断面西端靠近长江口,受长江冲淡水影响较大,表层水体盐度较低;向东盐度逐渐升高,出现明显的盐度锋面,锋面以西为低盐长江冲淡水占据表层,以东则为较咸的东海表层水占据;底层水体受外海水团影响较大,盐度较高。

温度也呈现淡水与海水的交互作用特征,表层水温由西向东递减;而底层水温在陆架边缘出现较低值,为外海水团影响的标志。受泥沙含量的影响,表层水体浊度较高,并随着距河口的增加呈递减趋势;而底层含沙量较高则显示了泥沙的再悬浮现象。断面上的水文要素呈现出淡水与海水相互作用的复杂特征,反映出长江径流注入对邻近海域物理性质的重要影响。

由于该剖面的 otsCTD 数据集与 CTD304 数据集残缺,甚至部分站位需要 TJ_cTD

3.2.1 平面分布特征

本次观测获得的 YE 断面表层水温结果显示,断面最外侧的 YE16 站位出现了一个显著的高温异常,峰值达

到 30.5°C 左右,明显高于断面其他站位的温度。此外,两个 CTD 设备的观测数据一致反映了该温度异常特征,说明测量结果是可靠的。26 将该异常温度与 YE16 站历年同期的背景值进行对比,可以发现本次出现了较为明显的正温度异常。考虑到观测时段与往年存在一定时间差异,站位水团情况可能略有不同,因此产生了温度反常。具体原因还需进一步探究,初步猜测可能与以下因素相关:

1. 外海暖流入侵的异常加强,如台湾暖流或黑潮影响增强;
2. 长江径流量异常,淡水输入对海温的调节影响;
3. 气候变迁导致的区域性海温异常;
4. 其他可能的环流及水团变化原因。

但上述猜测还需获取更多证据进行验证,如环流和水文观测资料、气候资料等。本人曾尝试获取 Argo 浮标和 NOAA 卫星 SST 数据集,但空间分辨率较低,无法确定该细小尺度异常的成因。总体而言, YE16 站温度异常的成因尚不明确,需要开展进一步的检验研究与机制分析,以确定其中的原因及影响。

海底水温平面分布图显示,靠近陆地的近岸站位海底水温较高,而离岸较远的站位海底水温较低。这种分布规律与区域海底地形特征相关。浅水站位受太阳辐射热量的影响更多,底部水温相对较高。随着离岸距离的增加,水深也快速加深至 70 米左右。较深海域的海底水温更多受到深层水团性质的控制,深层水团的低温特征使得这些较远离岸站位的海底水温也更低。

观测获得的表层水体盐度分布范围约 18-32 PSU,明显受到长江低盐冲淡水的影响。在长江口内部,表层水体盐度梯度较小;而在 122.4-122.8°E 之间出现最大盐度梯度带,对应明显的盐度锋面,外侧咸淡水迅速混合,盐度快速升高。底层水体盐度普遍高于表层,123°E 附近可达 35 PSU,反映了高盐外海水团的底层入侵过程。

观测获得的表层水体盐度分布范围约 18-32 PSU,明显受到长江低盐冲淡水的影响。在长江口内部,表层水体盐度梯度较小;而在 122.4-122.8°E 之间出现最大盐度梯度带,对应明显的盐度锋面,外侧咸淡水迅速混合,盐度快速升高。底层水体盐度普遍高于表层,123°E 附近可达 35 PSU,反映了高盐外海水团的底层入侵过程。

浊度分布方面,近岸站位表层浊度整体较高,这主要是由于靠近淤泥来源,受到长江口输沙的影响更为显著。而表层浊度整体低于底层近一个数量级。

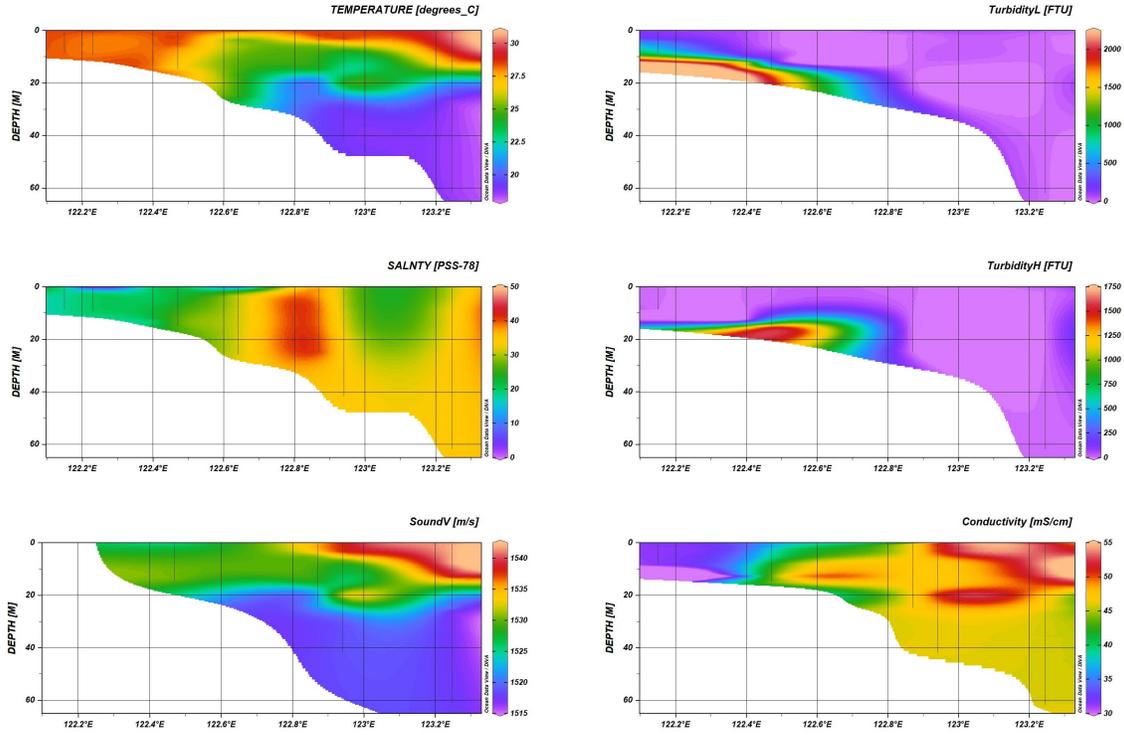


图 23 YE 断面各参数断面图

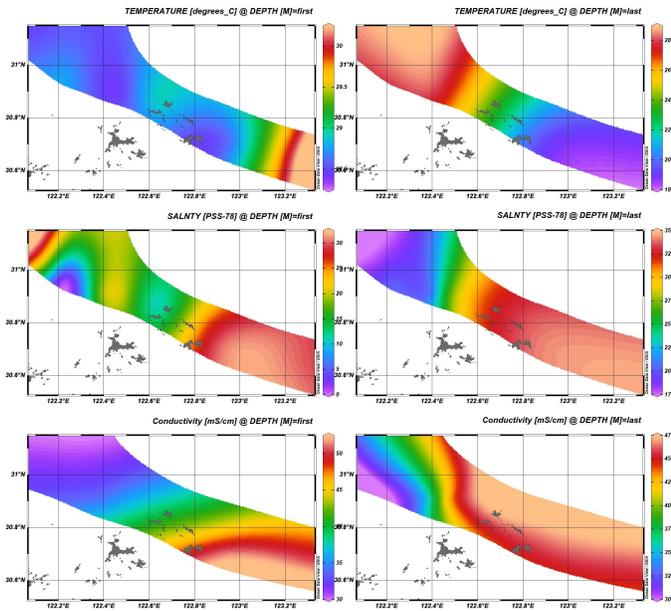


图 24 YE 断面各参数平面图 1

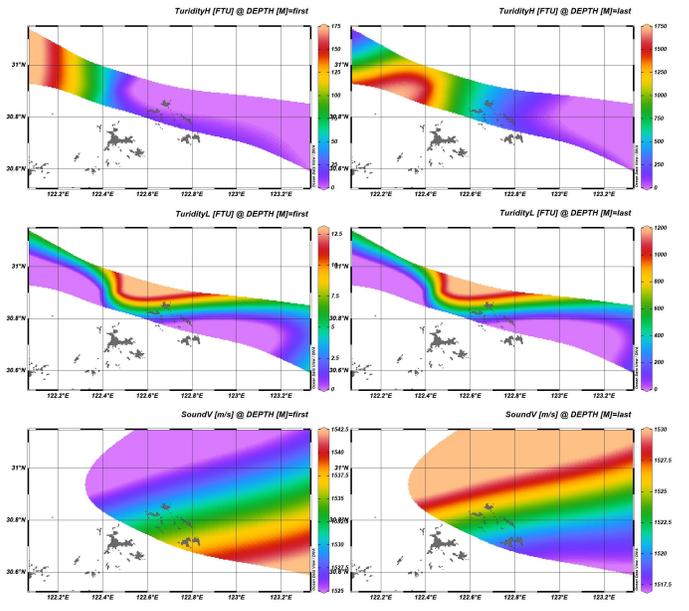


图 25 YE 断面各参数平面图 2

3.2.2 断面分布特征

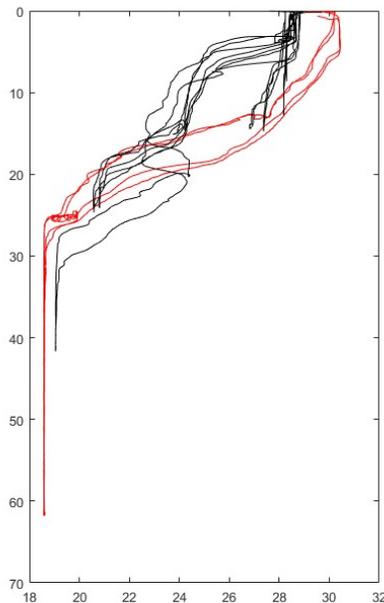


图 26 YE16(红色) 温度表层相较于其他站位示意图

本研究的 YE 断面沿向由河口向外海延伸, 水深逐渐增加。由于站位均选择靠近外海区域, 未出现前期观测中 125km 附近明显完整的盐度锋面结构, 仅 122.6°E 以西近岸区域可见表层明显的盐度锋面残余。剖面图显示显著的垂向盐度梯度, 外侧水体平面盐度梯度也更大, 这反映了不同水团之间的相互作用影响, 特别是长江淡水输入与海水交汇的影响。

温度分布与盐度类似, 随离岸距离增加, 水体呈现更多垂向结构特征。30 米以下区域温度较为均一, 平均约 18°C。浊度数据垂向变化更为显著, 剖面图显示 122.2°E-122.7°E 之间存在一个浊度高值区, 最大可达 2300FTU 左右, 此为最大浑浊带, 垂向梯度最大, 从底层向表层快速减小。这表明存在泥沙沉降再悬浮循环过程。

3.2.3 悬沙浓度剖面特征

本研究通过 Ocean Data View 软件对实验室测定不同层位悬沙浓度数据进行插值, 与前文浊度剖面分布图进行对比分析。尽管靠近西部站位仅获得了中层表水体悬沙数据, 但依然显示出与浊度分布较好的一致性。

122.2°E-122.7°E 之间均出现一个浊度和悬沙浓度的高值区, 越接近长江口内部, 浊度和悬沙含量越高。这可能是由以下因素导致的:

1. 长江口及邻近海域受到大量长江泥沙输入的影响, 河口溢淡及泥沙输输出区浊度和悬沙量本处于高水平。

2. 河口双层流体系中的下层经堤外沙洲输送大量泥沙; 堤外沙洲也可导致再悬浮泥沙堆积, 增大浊度。

3. 潮流搅拌作用下, 底层泥沙易再悬浮到上层, 导致浊度升高。

4. 河口盐跃层附近容易聚集和捕获悬浮泥沙。

5. 站位处河口外缘, 受江水动力弱, 容易形成汇聚或积累效应。

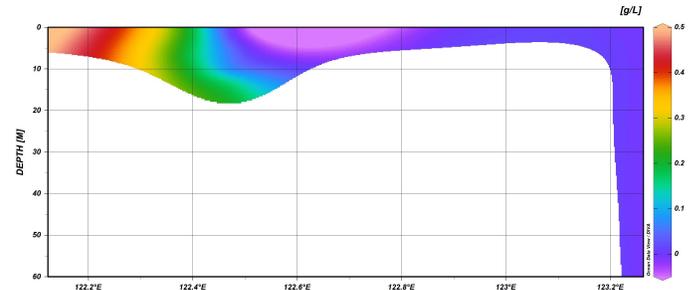


图 27 YE 断面悬沙浓度作图结果

3.3 YEC-EH 断面

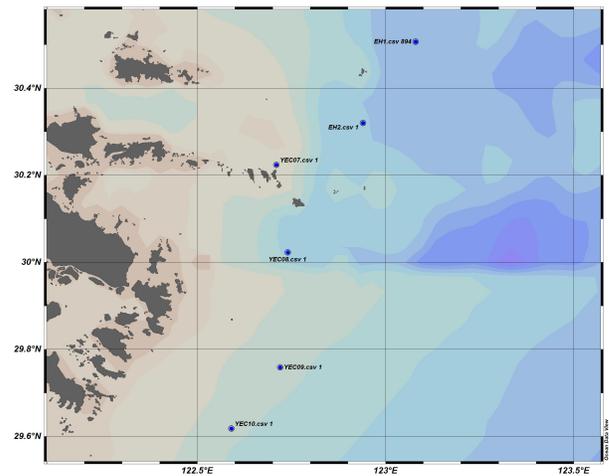


图 28 YEC-EH 断面站位与名称分布图

本研究的 YEC-EH 断面位于东经 122.58°-123.08°, 北纬 29.62°-30.51° 的长江口以南、东海北部大陆架区域。根据前文分析, 该海域处于典型的副热带季风气候区, 深受东亚季风的影响。区域内的风场和水文条件存在显著的季节变化特征。夏季受西南风盛行影响, 冬季北风占优势, 北风和南风交替频繁。

断面位于东海陆架长江口, 易受到长江大量淡水注入的影响。长江淡水可通过沿岸运输以及东北扩散, 形成低盐特征的表层冲淡水团, 与相对高盐的外海水团形成稳定的盐跃层。夏季冲淡水影响范围最大, 可延伸至研究区域。冬季冲淡水主要沿岸南传, 对研究区域的影响较弱。

断面所在大陆架浅水区域,受强烈的潮汐混合作用影响,表现为规律的半日潮特征。该海域的表层流场主要为季风驱动的浙闽沿岸流。根据季风特征,夏季沿岸流主要为西南风驱动的东北向,冬季则多为北风驱动的南向流动。

综上所述,YEC-EH 断面所处海域为东海北部大陆架区域,是长江淡水输入与季风强烈作用的边缘海代表区域,水文动力环境复杂变化,季节性特征明显。由于该剖面的 otsCTD 数据集与 CTD304 数据集残缺,甚至部分站位需要 TJ_CTD 数据进行补充,所以为了绘制完整的温度、盐度、电导率随时间变化的剖面图,决定采用经过各站位数据综合滤波平滑得到的温度、盐度、深度数据。

3.3.1 平面分布特征

YEC-EH 断面始于位于舟山群岛以东区域,呈现西南-东北走向。观测区域表层水体盐度范围由西至东在 29PSU 到 33PSU 之间,表层水体受到杭州湾、钱塘江的淡水水团影响。

YEC-EH 断面区域表层水温分布范围约为 26-30°C,靠近舟山群岛和杭州湾的 YEC07 站点出现明显的表层水温降低,该站点附近形成最大水平温度梯度区。观测到的温度梯度带与钱塘江的入海方向近似垂直分布。

表层水盐度的水平分布特征与温度分布高度一致,在 YEC07 站点也出现盐度的显著降低和强梯度,与温度变化趋势相似。温度和盐度的变化趋势一致是因为,YEC07 站附近水体受到杭州湾和钱塘江较低温度和盐度的淡水输入影响较大,导致表层水温盐明显降低和强梯度出现。淡水输入导致的温盐同步降低和强梯度是该站点的标志性特征。

在淡水输入影响下,YEC07 站点表层水电导率也发生明显降低,与温盐变化一致。电导率受盐度控制,淡水输入降低盐度的同时也导致电导率下降。

而底层水温盐分布则与表层相反,YEC07 站点底层温盐较高。这是因为靠近群岛处水深较浅,而温度低、盐度高的外海水团主要分布在较深水域,所以深层水温盐较高。底层水电导率较为均一,平均约 47 mS/cm。

表层和底层浊度在 YEC07 站均有升高,但底层浊度高于表层几个数量级。这主要是受淡水输入泥沙的影响。表层泥沙可远距离传输,而底层易聚集形成高浊度。此处浊度升高可能为舟山群岛陆源物质运输与钱塘江、长江等河流的影响。

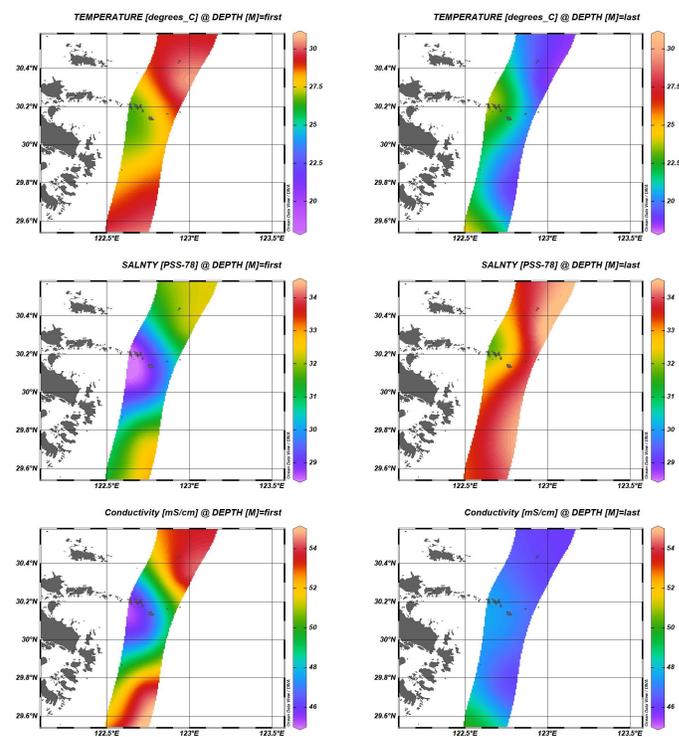


图 29 YEC-EH 断面各参数平面图 1

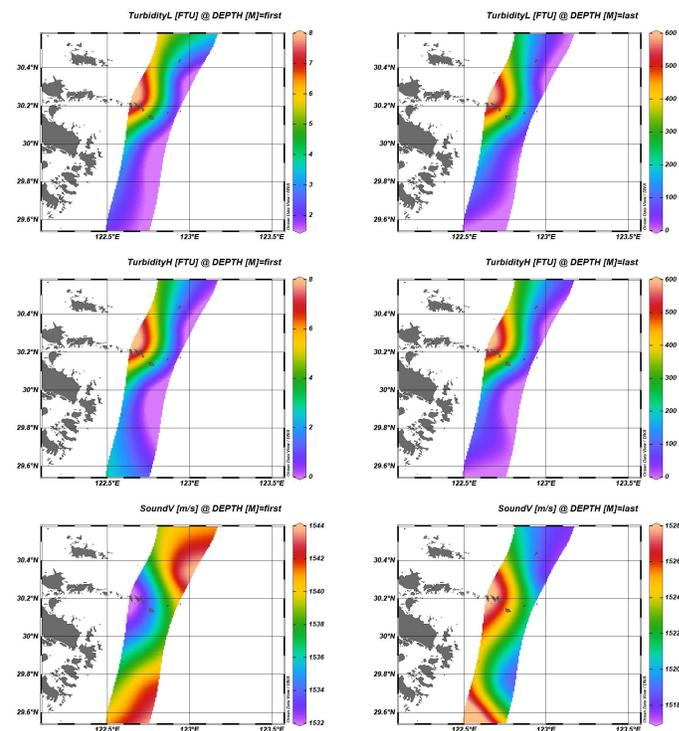


图 30 YEC-EH 断面各参数平面图 2

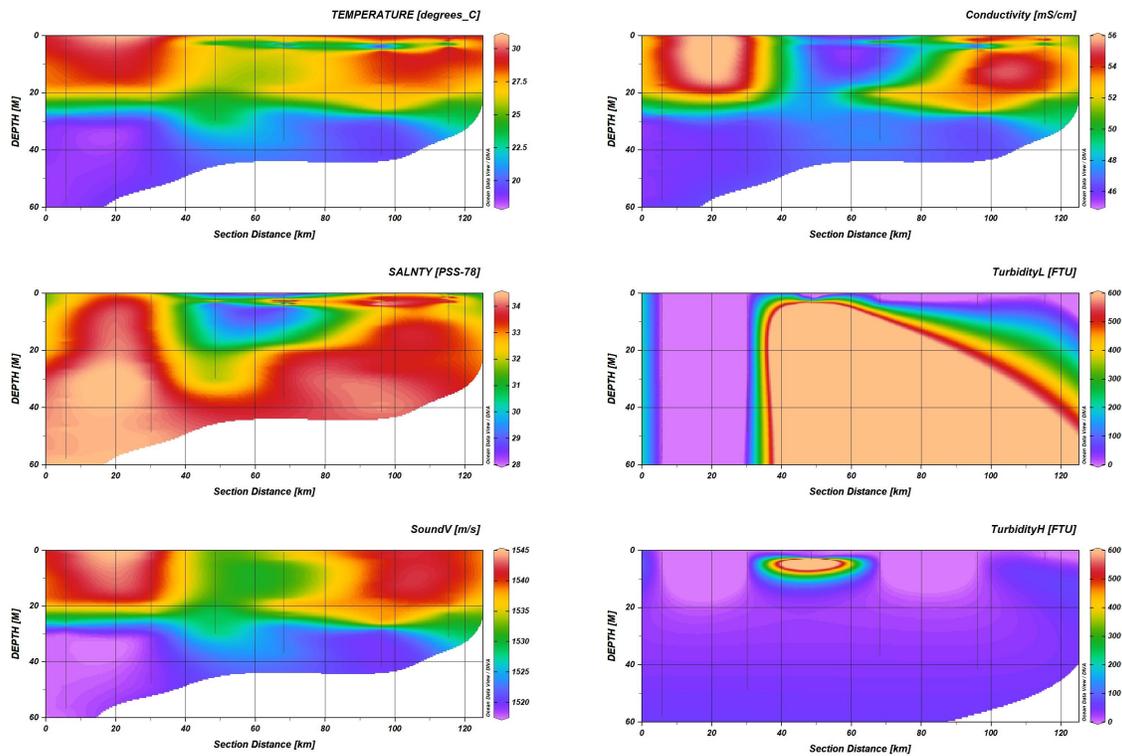


图 31 YEC-EH 断面各参数断面图

3.3.2 断面分布特征

YEC-EH 断面位于东海西部开阔海域, 水深逐渐加深, 相对其他断面受陆源泥沙影响较小。断面远离近岸淤积区, 也已脱离长江近源强输沙区域, 不再受显著冲淡水影响。断面水深在 30-60 米, 不属于浅滩区, 不易发生海床扰动和泥沙再悬浮。

从温度剖面分布可以看出, 断面存在两个主要的温跃层。约 25 米深处存在一个贯穿各站位的温跃层, 底层温度较高而顶层温度较低。另外在顶层 20 米范围内, YEC 各站出现一个温度更低的薄层, 特别是在 YEC09 站温度降至 21°C 左右。与此同步, 该薄层在盐度剖面上也出现较高盐度。

该高盐低温薄层可能是黄海冷水团所致。黄海冷水团是一种盐度较高而温度较低的水团, 主要分布在该海域的 30-50 米深度范围。断面所处位置正好在黄海冷水团的典型出现区, 其中的低温高盐薄层特征与黄海冷水团水文特征一致。黄海冷水团的入侵导致了断面顶层出现此类异常水文结构。

浊度剖面分布与前文类似, YEC07 站表层浊度略有增加, 底层更高。这可能与站点邻近小岛屿, 接受了局部陆源泥沙输入有关。

3.3.3 悬沙浓度剖面特征

与上一章节中浊度的分布类似, YEC-EH 断面区悬沙浓度的分布状况可以明确判定为维持在一个极低的基础

水平。除 YEC07 站表层外, 各站位不同层位的悬沙浓度值均接近零。这与同一断面的浊度分布情况相符合。由于浊度是反映悬沙含量的直接指标, 两者之间存在正相关关系是合理的。

断面区的这种持续低悬沙状态主要源自该海域的地理位置因素。其位于东海开阔水域, 远离陆源淤泥的直接影响。水体较为稳定, 不利于局部悬沙聚集。水动力条件良好, 有利于悬沙向更远区域的传播和稀释。

因此, YEC-EH 断面上悬沙浓度的分布规律直接反映了该开阔海域泥沙迁移过程的一般特征, 而与浊度分布情况一致则是这一自然规律的直接体现。

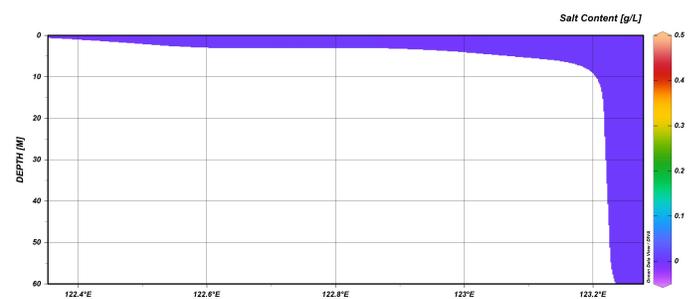


图 32 YEC-EH 断面悬沙浓度作图结果

本工作获得了同济大学海洋与地球科学学院的资助。

- 1 乔方利. (2012). 中国区域海洋学-物理海洋学. 北京: 海洋出版社.
- 2 王寇, 李博, 李爱国, 王鹏皓, 裴生鑫.(2021) 夏季长江口及其邻近海域湍流特征分析 [J]. 海洋学报, 第 43 卷 (11): 22-31
- 3 唐明, 程和琴, 陈钢, 李九发. 基于 ADCP 的长江口感潮河段床面稳定性分析 [J]. 泥沙研究,2020, 第 45 卷 (1): 37-44
- 4 李立, 许金电. 盛夏南海的水文与环流特征:2000 年 8 月航次再探 [J]. 海洋学报,2021, 第 43 卷 (6): 1-12