

## 2018年澳门海域秋季水体温盐分布与层化特征

胡梦茜, 甘华阳

(广州海洋地质调查局, 广东 广州 510000)

**摘要:** 分析了2018年秋季澳门海域的温盐平面与垂向分布特征, 并利用线性优化法确定上混合层深度。结果表明: 澳门氹环岛近岸存在温度高于外海区域且梯度较大的暖水带, 主干道内海水混合强烈, 洪湾水道下泄径流量远大于上溯潮水, 盐度整体偏低。温盐具有 I—IV 4种典型的垂直分布类型: 其中 I 类具有明显的3层结构, 即上混合层、跃层与下混合层, 集中分布于紧邻开阔水域的东、南部海域; II类结构的跃层梯度较小, 无底部混合层, 潮致混合效应较 I 类强, 主要存在于澳门南部海域, 两者上混合层深度与水深比值约为 0.6; III类与 IV 类为强混合结构。澳门海域水体以混合作用为主, 垂向交换条件良好, 对海气热量与物质通量等的屏障作用微弱, 利于大气复氧与水体自净。

**关键词:** 澳门; 温盐特征; 层化混合; 线性优化法; 上混合层深度

**中图分类号:** P731.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2020)05-0052-07

### 1 引言

澳门面朝南海, 地处珠江口外缘西侧, 介于珠江河口湾与磨刀门河口间, 毗邻珠海。珠海-澳门附近水域是指珠海市横琴岛以东、澳门半岛以南、大九洲岛以西的水域。它是磨刀门河口区的组成部分, 是磨刀门水道的支汊-洪湾水道的排洪出口, 又是西江通往港澳地区航道的主要出口, 地理位置十分重要。该水域由3部分组成: 一是洪湾水道出口至澳门外港这段水道, 称为“主干道”; 二是位于珠海市大、小横琴岛及澳门氹仔岛、路环岛间的水域, 称为“十字门浅海区”; 三是位于珠海市湾仔与澳门之间的水域, 称为“湾仔浅海区”<sup>[1]</sup>。上述3个部分的水流在洪湾水道出口处交汇, 该区域称为“汇流区”。汇流区内水动力复杂、岸线不规则、水流紊乱且流速缓慢、泥沙集中落淤、发育拦门沙<sup>[2]</sup>。

澳门海域所处地理位置特殊, 受南海咸水和来自珠江口与磨刀门的径流共同作用, 水文条件复杂多变。在河口咸淡水混合区, 水体可出现盐度层化

现象。层化是河口的主要特征之一。河口层化与混合过程往往对河口中各种物质的通量交换起控制作用, 并对水体中营养物质、重金属与生物的分布等产生重要影响<sup>[3-5]</sup>。当层结稳定时, 海水混合会被限制在一定的区域, 海水中的氧气和营养盐得不到及时补充, 生物分泌的物质无法扩散与自净。因此研究澳门海域的水文特性与海水层化混合结构, 对了解该区域热量、动量、泥沙和营养物质等的输送条件具有重要意义。

受澳门特别行政区的地位影响, 其海域调查工作难以开展。目前已有的水文调查程度较低。俞慕耕等<sup>[6]</sup>曾在澳门回归初期进行了澳门岛海域的水文气象本底调查, 此后该区域的水文调查长期处于空白。澳门一直以来存在咸潮入侵、水质恶化、水资源短缺等诸多水环境问题<sup>[7-10]</sup>。近年来, 澳门兴起大量的填海造陆工程, 海岸线长度由1995年的43.17 km增长至2018年的76.08 km, 同时土地面积也成倍扩展, 势必对周围的水文特性造成影响。本文调查了澳门海域的海水温度、盐度的平面与垂向分布特

收稿日期: 2019-07-09; 修回日期: 2019-08-27。

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20160146, DD20190308, DD20190289)。

作者简介: 胡梦茜(1993-), 女, 硕士, 主要从事海岸带水文数值模拟研究。E-mail: carlyhu@163.com

点,分析其层化与混合特性,并采用线性优化法确定相应的上混合层深度。海水垂向结构与上混合层深度的确定可为进一步研究该区域的物质与热通量提供基础支持<sup>[11]</sup>。

## 2 资料与研究方法

### 2.1 数据来源

2018年10月29日—11月6日,广州海洋地质调查局采用加拿大RBR公司生产的浅水XR-420型温盐深仪(Conductivity Temperature Depth, CTD),在澳门海域内完成了29个站位的温、盐、深度剖面观测。采样时间间隔为0.2 s,仪器收放速度约为0.4 m/s。站点分布如图1所示,图中水深基准面为平均海平面,位于水位零点上1.8 m。澳门水域除了路环岛大担角附近海域与夹马口外,水深一般不超过6 m,绝大部分区域水深都在4 m以下。等深线呈南北走向分布,大致与澳门东岸平行,海域堆积作用旺盛、水浅滩多。此外,9月25—26日在D015与D140站位完成25 h潮流同步观测。

### 2.2 海水层化系数与上混合层深度

潮汐河口海岸的水体中,径流和海水之间的混

合将会使水体在垂向上产生密度层化;由于湍流扩散作用,水体常常发生垂向紊动混合。层化与混合是潮汐河口海岸水体中重要的水动力过程,不仅决定了河口海岸水体的交换,还会对泥沙搬运、污染物扩散及水生生物分布产生重要影响。层化系数可按照式(1)进行计算<sup>[12]</sup>:

$$N = \Delta S / S_0 \quad (1)$$

式中: $N$ 为盐度层化系数, $\Delta S$ 为表底层盐(温)度差, $S_0$ 为垂线平均盐(温)度。当 $N > 1.0$ 时河口为高度层化型, $0.1 < N < 1.0$ 时河口为缓混合型, $N < 0.1$ 时河口为强混合型。

海洋中的混合层是海洋的上界面,直接与大气相接。海洋与大气的能量、动量和物质的交换主要通过混合层进行,因此海洋混合层研究在海气相互作用中占重要地位。常用来确定对应的上混合层深度的方法包括差值法、梯度法和曲率法。前两种方法通过计算温度或盐度的差值与梯度,并与给定阈值进行比较来推算混合层深度,具有较大的人为误差;曲率法则通过求温度或盐度随深度的二阶偏导来判断上混合层深度,该方法较差值法与梯度法更为客观,但是对噪声敏感<sup>[13-15]</sup>。本文采用具有一定抗噪性能的线性优化法<sup>[15]</sup>来确定混合层深度。

假设盐度剖面可以用 $S_z$ 来表示离散数据,线性拟合第一个点 $z_1$ 到 $z_k$ 深度的盐度,实测数据与拟合值分别表示为 $(S_1, S_2, \dots, S_k)$ 和 $(\hat{S}_1, \hat{S}_2, \dots, \hat{S}_k)$ ,对应的均方根误差为:

$$E_1(k) = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (S_i - \hat{S}_i)^2} \quad (2)$$

下一步从 $z_k$ 深度往下选择 $n$ 个点,利用以上线性关系计算拟合偏差的绝对值:

$$E_2(k) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (S_{k+j} - \hat{S}_{k+j})^2} \quad (3)$$

如果 $z_k$ 恰好在混合层内,则线性拟合能够很好地贴合数据点 $z_1, z_2, \dots, z_{k+n}$ ;更深的 $n$ 个数据点拟合偏差绝对值 $E_2(k)$ 一般会比 $E_1(k)$ 小,因为各点观测数据和拟合数据间的差异可能相互抵消;若 $z_k$ 在混合层底部,则 $E_2(k)$ 较大, $E_1(k)$ 较小;如果 $z_k$ 在混合层底部之下, $E_2(k)$ 和 $E_1(k)$ 均较大。因此可以确定混合层深度的判定标准如下:

$$Q(k) = \frac{E_2(k)}{E_1(k)} \rightarrow \max, H_{\min} = -E_1(k) \quad (4)$$

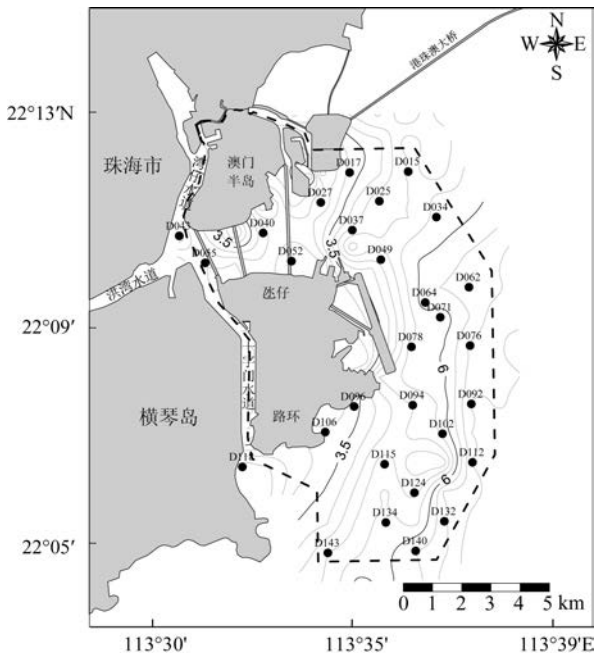


图1 2018年秋季澳门海域调查站位分布示意图

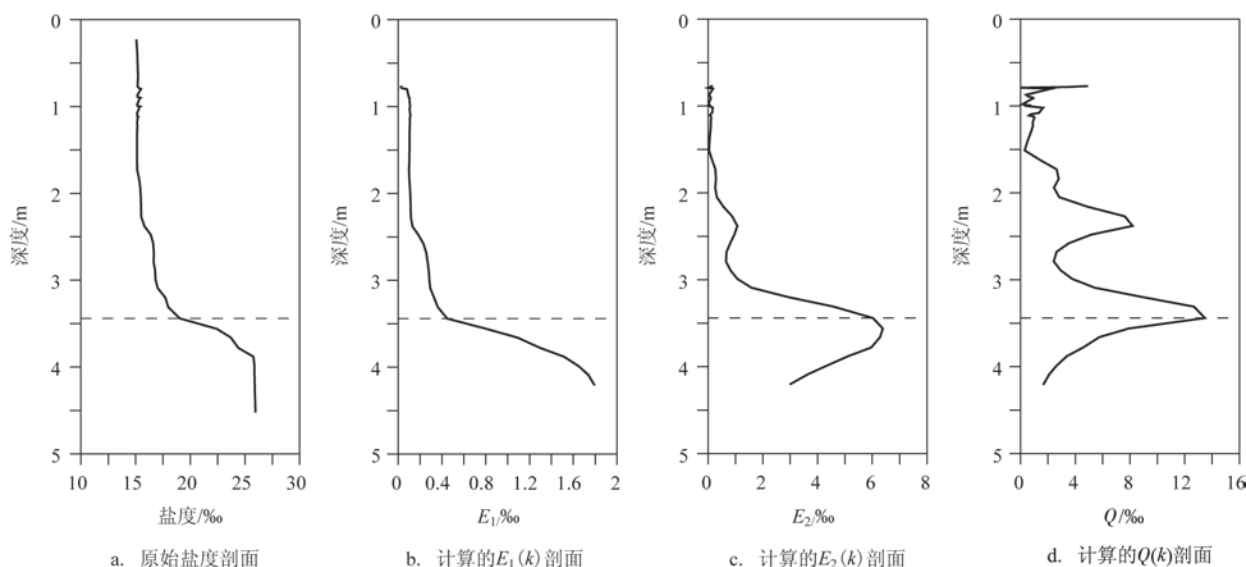


图2 线性优化法确定上混合层深度过程

以D015为例确定混合层深度,计算过程如图2所示。其中a为原始盐度剖面数据,b、c和d分别为计算的 $E_1(k)$ 、 $E_2(k)$ 和 $Q(k)$ 剖面, $n$ 取3,判定的混合层深度为3.44 m。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 海水温盐平面特征

根据经验定义表层水深小于0.5 m,底层对应最大水深 $H_{\max}$ ,中层水深为 $1/2 H_{\max}$ 。澳门氹环岛表层温度介于 $22.54\sim 25.58\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,各站平均温度为 $23.90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;中层温度介于 $22.67\sim 25.58\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,各站平均温度为 $23.97\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;底层温度介于 $23.03\sim 25.56\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,平均温度为 $24.27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。从表层至底层温度总体呈上升趋势,各层最高温度和最低温度的极差分别为 $3.04\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $2.91\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $2.53\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,有沿深变小的趋势。

调查区域位于珠江口西侧,其近岸海域的温度较高,尤其在澳门半岛东南与澳门离岛东侧海域有两条明显的热水舌向外海延伸。环岛存在温度高于外海区域的暖水带,该处等温线密集、温度梯度较大。这类海水性质差异较大的过渡带对河口区流场变化、物质迁移、沉积过程、离子的吸附和解吸过程等都有着重要影响。中层和表层温度平面分

布特征基本一致,其中澳门半岛东南侧的高温水舌明显减弱,到达水体底部时已经基本消失;而澳门离岛东侧的高温水舌则随水深增加继续向东延伸,受其东南侧底部冷水侵入作用,宽度逐渐束窄(见图3)。

海水表层盐度介于 $3.15\sim 20.53$ 之间,平均盐度为15.22;中层盐度介于 $2.19\sim 23.19$ 之间,平均盐度为16.04;底层盐度介于 $2.5\sim 30.08$ 之间,平均盐度为20.16。从表层至底层平均盐度值总体呈现上升趋势;表层、中层和底层盐度极差分别为17.38、21.00和27.58,随着深度的增加而增大。

调查区海水盐度的分布和变化主要受海流、径流以及沿岸冲淡水的影响。由图4可见,各层盐度的平面分布有差异但又有共通之处。整体来看,澳门海区与珠江口海区的盐度分布和变化密切相关。珠江口海区盐度分布为口门外盐度高,变化小;口门内盐度低,变化较大。类似地,调查区各层盐度的分布特点表现为北低南高,东高西低。垂向上底层盐度较表层盐度更高,但是在汇流区垂向盐度较低且分布均匀,均低于 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。主要原因是受到洪湾水道下泄径流作用,在观测期间涨潮流作用较弱。

#### 3.2 海水层化与混合特征

澳门海域水温垂向差异较小,因此本文主要考虑盐度层化,其对应的层化系数如图5a所示。由图



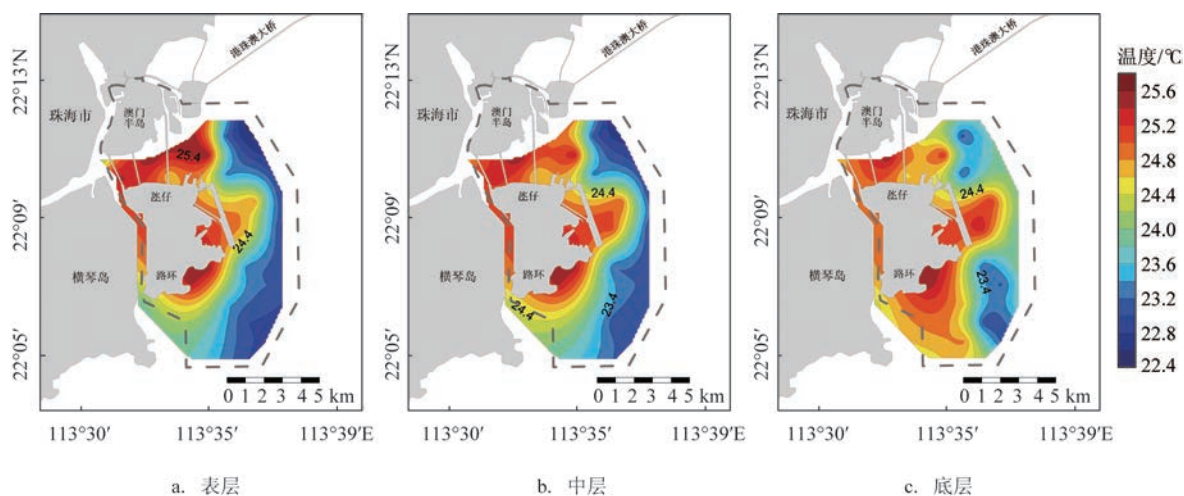


图3 研究区温度平面分布图

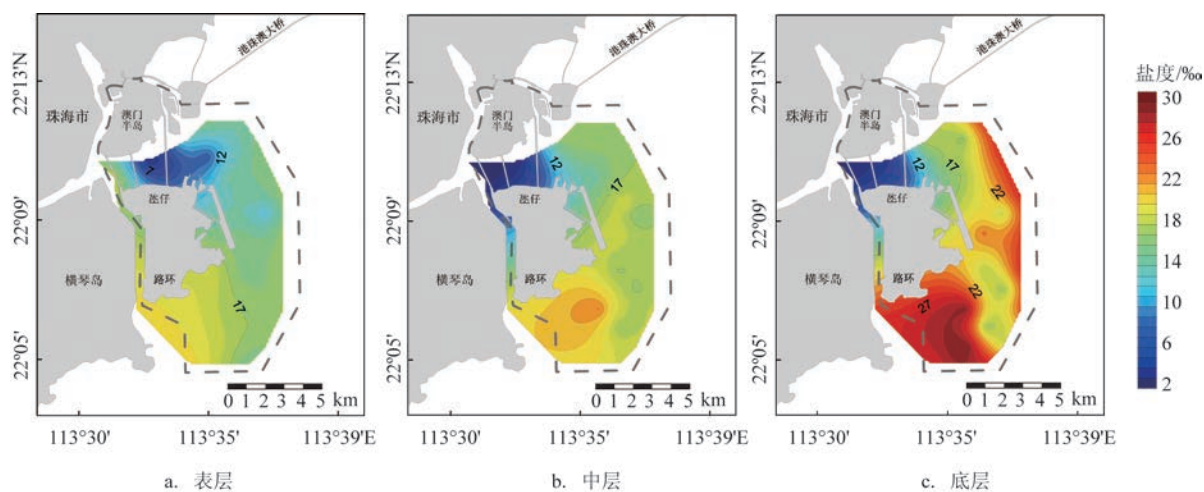


图4 研究区盐度平面分布图

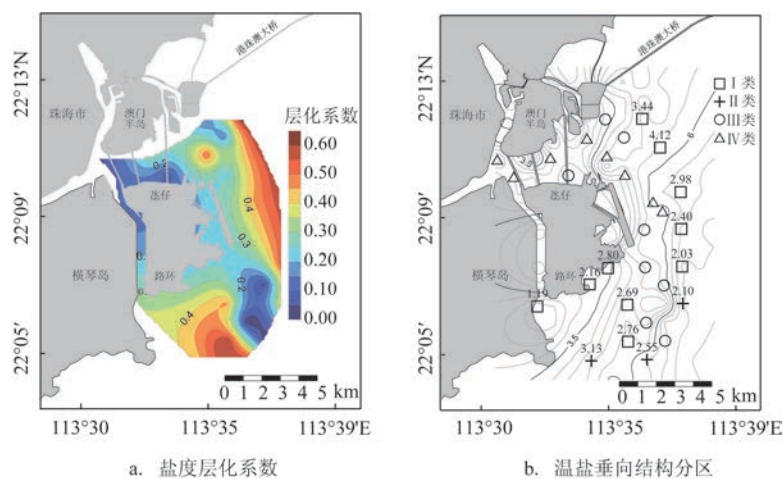


图5 研究区海水层化特征

可见澳门离岛海域的南部与东部盐度层化系数大于0.5,较其他区域更高。这是由于该区域紧邻开阔海域,潮汐畅通,受径流和潮汐共同作用分层较明显。但是两者的温盐垂向分布形式不完全相同,并且东南向由于局部凸起的水下地形导致水流能量耗散较快,出现局部强混合区域。

总的来说观测位点的温盐垂向分布可以分为 I—IV 4 种模式。以 D015、D140、D124 和 D017 为代表,各站的温盐垂向分布如图 6 所示。东侧 D015 站位的温度和盐度跃层梯度较大,具有明显的 3 层结构即上混合层、跃层与底部混合层,为 I 类 3 层结构;南侧 D140 站位具有相似的分层系数,但是其跃层梯度不明显,上混合层盐度均匀分布,拐点以下盐度随水深缓慢增大,为 II 类双层结构;澳门离岛东南向的 D124 站位虽然受到潮汐作用,但是湍流混合作用非常强,盐度随深度基本不变化,平均盐度为 17‰,平均温度为 23 °C,为 III 类强混合结构;澳门东岸 D017 站位的海水盐度随深度变化而增大,温度随深度减小,垂向无分层,为 IV 类线性结构。各站位垂向结构分类布局如图 5b 所示。

影响河口水体层化的 3 个主要动力过程包括底层潮汐混合、径流掺混及风扰动。底层潮汐混合引起潮汐能量的不断向上层传递,破坏水体的分层稳定性;而径流携带较轻的淡水浮于较重的盐水上面,使水体向稳定层化方向发展;风应力的主要作用为引起水面扰动,能量不断向下层水体传递,导致分层不稳定<sup>[4]</sup>。三者的相对强弱决定温盐的垂向结构。与 Qiu 等<sup>[16]</sup>的结果对比,本文 I 类 3 层垂向分

布对应其 B 型分布,在一年当中都可能存在。较厚的上混合层主要由海气界面浮力通量引起,同时该类温盐垂向结构的底层潮致混合效应一般,受底部摩擦作用具有一定厚度的下混合层,被限制在跃层之下。II 类双层结构则介于 A-β 型与 B 型分布之间,无明显的下混合层,潮汐作用较强,底部混合层与跃层趋于消失,在表层风作用下,发育一定厚度的上混合层。研究区缺乏实测风场与径流量数据,受资料限制。本文仅探讨两类温盐结构的潮致混合作用强弱及其对底层海水温盐的影响。底层潮汐混合对水体层化的贡献  $F_T$  计算式为<sup>[17]</sup>:

$$F_T = -\frac{\varepsilon k_b \rho_w |U_b|^3}{h} \quad (5)$$

式中: $h$ 为水深; $\varepsilon$ 为潮汐混合系数,取 0.003 8; $k_b$ 为底拖曳系数,取 0.002 5; $\rho_w$ 为底层水体密度,根据海水状态方程计算得到; $U_b$ 为底层主流向流速。D015 与 D140 站位分别对应 I 类与 II 类温盐结构,两者,对应的潮汐混合贡献时间序列如图 7 所示。结果表明,澳门氹环岛东北向 D015 站的潮汐混合作用整体小于东南侧 D140 站位,II 类双层结构对应的潮致混合效应更强,不利于海水分层,动量不断上传递,与前述推测吻合。

温盐垂向结构分布特征的统计结果见表 1。I、II 类温盐垂向类型为分层结构,主要分布于紧邻开阔水域的东、南海域。整个澳门海域以 I 类温盐结构为主;II 类数量仅为 3 个,占比为 10%,主要存在于澳门南部海域。由于面临南海,南海潮波可直接到达该区域,因此潮致混合效应较其他区域更

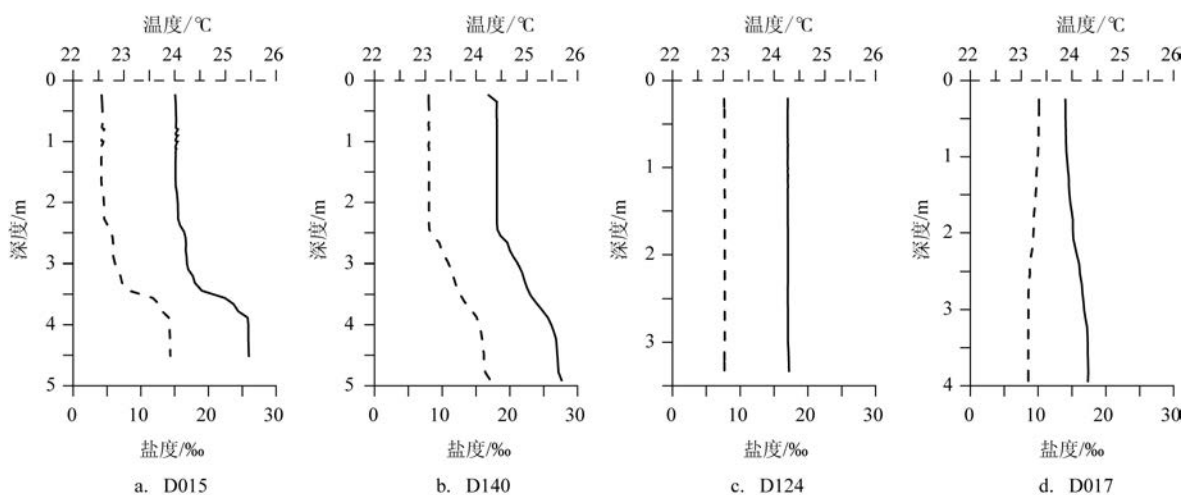


图6 温度与盐度垂向分布类型

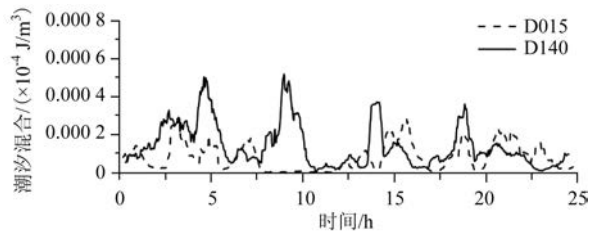


图7 潮汐混合作用

表1 温盐垂向结构类型统计参数

温盐垂向结构类型	I类	II类	III类	IV类
站位数量	10	3	8	8
平均上混合层深度 $\bar{H}_{mix}/m$	2.66	2.59	0	0
平均触底水深 $\bar{H}_{max}/m$	4.48	5.02	3.64	3.01

强。两种类型都有明显的上混合层,混合层深度比( $\bar{H}_{mix}/\bar{H}_{max}$ )约为0.6,风力较强,但作用深度有限。III、IV类为混合型结构,集中分布在主干道、澳门机场周边以及东南浅滩等近岸或水浅的区域。两处成因可能不同:主干道靠近上游,水体完全被径流控制;而东南浅滩由于地形抬高风力作用或可直接到达床底,强于径流的层化效应。总体而言,澳门海域水体垂向交换条件良好,温盐垂向结构以混合型居多。

范中亚等<sup>[18]</sup>计算发现除磨刀门外,珠江口各口门的大小潮混合差异均为较低水平,因此温盐垂向分布主要受潮汐涨落的变化,大小潮导致的差异较弱。而潮汐涨落对垂向分布的影响主要表现在潮汐剪切上,潮汐剪切对盐度层化影响较大。涨潮时水体混合良好,退潮时水体层化增强,潮汐应变将导致海水周期性层化<sup>[17]</sup>。潮汐应变只发生在底边界层<sup>[9]</sup>,因此I、II类温盐结构可随潮涨潮落相互转换,其上边界层厚度受潮汐影响相对较小。

## 4 结论

澳门氹环岛海区2018年温盐调查结果显示:近岸海域具有更高的温度,环岛存在温度高于外海区域的暖水带,温度梯度较大;澳门机场附近存在向外伸展的高温水舌;秋季澳门水道的海水混合强烈,主要受洪湾水道下泄径流作用,整体盐度较低。

温盐具有I—IV 4种典型的垂直结构类型。其

中I类具有明显的3层结构:上混合层、跃层与底部混合层,集中分布在紧邻开阔水域的东、南海域。II类为双层结构,跃层梯度小,无明显底部混合层,水体潮致混合效应大于I类,主要存在于澳门南部海域,毗邻南海。I、II类分层结构对应的上混合层深度比约为0.6,海气热量交换充分。III、IV类结构为混合型结构,集中分布在主干道、澳门机场周边及东南浅滩等近岸水浅的区域。

总体来说,澳门水体层化系数低,以强混合和缓混合为主。水体垂向交换条件良好,对海气热传导、泥沙与营养物质通量的屏障作用微弱,利于大气复氧与水体自净。海水平流输运条件对水环境的影响仍有待进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 黄希敏, 沈汉坤. 珠海-澳门附近水域十字门水道北口导导线平面布置的确定[J]. 水利规划, 1997(1): 53-56.
- [2] 张广燕. 澳门附近水域汇流区冲淤演变分析[J]. 人民珠江, 2006(3): 19-21.
- [3] 李开枝, 黄良民, 张建林, 等. 珠江河口咸潮期间浮游植物的群落特征[J]. 热带海洋学报, 2010, 29(1): 62-68.
- [4] 任杰, 刘宏坤, 贾良文, 等. 磨刀门水道盐度混合层化机制[J]. 水科学进展, 2012, 23(5): 715-720.
- [5] Laing G D, De Vos R, Vandecasteele B, et al. Effect of salinity on heavy metal mobility and availability in intertidal sediments of the Scheldt estuary[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2008, 77(4): 589-602.
- [6] 俞慕耕, 周雅静. 澳门及其临近海域水文气象特征[J]. 海洋预报, 1998, 15(1): 59-67.
- [7] 何伟添, 段舜山. 澳门咸潮产生的原因、危害及防治对策[J]. 生态科学, 2008, 27(2): 124-128.
- [8] 韩保新, 郭振仁, 李开苏, 等. 澳门周围水域水污染状况及水环境容量利用[J]. 海洋环境科学, 1993, 12(1): 35-41.
- [9] 何万谦, 黄金良. 澳门半岛近岸海域水质时空变异分析[J]. 环境科学, 2010, 31(3): 606-611.
- [10] 梁海含, 林小涛, 梁华, 等. 澳门路氹湿地的水质调查与评价[J]. 海洋科学, 2006, 30(3): 21-25.
- [11] Ren J, Wu J X. Sediment trapping by haloclines of a river plume in the Pearl River Estuary[J]. Continental Shelf Research, 2014, 32: 1-8.
- [12] Haralambidou K, Sylaios G, Tsihrantzis V A. Salt-wedge propagation in a Mediterranean micro-tidal river mouth[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2010, 90(4): 174-184.
- [13] Chu P C, Fan C W, Liu W T. Determination of vertical thermal structure from sea surface temperature[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2000, 17(7): 971-979.

- [14] Lorbacher K, Dommenges D, Niiler P P, et al. Ocean mixed layer depth: a subsurface proxy of ocean-atmosphere variability[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(C7): C07010.
- [15] Chu P C, Fan C W. Optimal linear fitting for objective determination of ocean mixed layer depth from glider profiles[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2010, 27(11): 1893-1898.
- [16] Qiu C H, Huo D, Liu C J, et al. Upper vertical structures and mixed layer depth in the shelf of the northern South China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2019, 174: 26-34.
- [17] Simpson J H, Brown J, Matthews J, et al. Tidal straining, density currents, and stirring in the control of estuarine stratification[J]. *Estuaries*, 1990, 13(2): 125-132.
- [18] 范中亚, 林澎, 曾凡棠, 等. 珠江口门枯季动力过程及盐度分布特征. *热带地理*, 2013, 33(4): 400-406.
- [19] Stacey M T, Ralston D K. The scaling and structure of the estuarine bottom boundary layer[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2005, 35(1): 55-71.

## Characteristics of temperature, salinity distribution and stratification near Macau in autumn of 2018

HU Meng-xi, GAN Hua-yang

(Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510000 China)

**Abstract:** This paper analyzes the characteristics of horizontal and vertical distribution of ocean temperature and salinity near Macau in autumn, and calculates the upper mixed layer depth using linear optimization method. It is found that there is a warm water belt near the coast with large temperature gradient, and the seawater in the main waterway is strongly mixed. The runoff of the Hongwan waterway is much larger than the upstream tide, and the salinity is generally low. The vertical distribution of temperature and salinity can be divided into four typical types. Type I shows significant three-layer structure in the eastern and southern areas adjacent to the open water, which are upper mixed layer, thermocline and the bottom mixed layer. The gradient of type II has a smaller thermocline and halocline gradient without bottom mixed layer, which mainly locates south off Macau with stronger tidal mixing compared to that of type I. The ratio of the mixed layer depth to the water depth of both type I and type II is about 0.6. The type III and IV are strongly mixed structures. The sea water near Macau is dominated by mixing, which favors the vertical exchange and reduces the barrier effects on sea-air heat and material flux. That helps the atmospheric reoxygenation and self-purification of the water.

**Key words:** Macau; temperature and salinity characteristics; stratification and mixing; linear optimization fitting; upper mixed layer depth