

潮汐河口环流、湍流、混合与层化的物理学

时 钟^{1,2,3}, 熊龙兵¹, 倪智慧¹, 李 霞¹

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200030; 2. 海洋工程国家重点实验室, 上海 200030;
3. 高新船舶与深海开发技术中心, 上海 200030)

摘 要: 简要回顾了潮汐河口环流、湍流、混合与层化的基本物理概念、内涵、研究方法、研究成果, 指出了主要的研究进展, 最后, 展望了今后的研究方向。本文不考虑悬沙和风浪的影响。经典的河口环流也因潮汐应变的出现而受到挑战, 河口环流由重力环流和潮汐应变环流构成。“涡黏度-剪切协方差(ESCO)”概念的提出, 又区分出重力 ESCO 环流与潮汐 ESCO 环流。横向环流, 尤其具有曲率的弯道中的横向环流, 也得到进一步的理解。涡度方法的应用, 揭示横向环流不仅由各种不同物理机制造成, 而且对纵向河口重力环流有重要的影响。分层流中剪切湍流的理论加深了人们对潮汐河口湍流、混合的物理学的认识, 势能差异方程更是使得定量理解潮汐河口混合与层化的三维时间、空间变化成为可能。

关键词: 河口; 环流; 湍流; 混合; 层化

中图分类号: P731.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-3682(2019)01-0001-31

doi: 10.3969/j.issn.1002-3682.2019.01.001

引用格式: SHI Z, XIONG L B, NI Z H, et al. The physics of circulation, turbulence, mixing and stratification in tidal estuaries[J]. Coastal Engineering, 2019, 38(1): 1-31. 时钟, 熊龙兵, 倪智慧, 等. 潮汐河口环流、湍流、混合与层化的物理学[J]. 海岸工程, 2019, 38(1): 1-31.

“河口是一个与开敞海自由连接、含可测得量的海盐、半封闭的海岸水体(An estuary is a semi-enclosed coastal body of water having a free connection with the open sea and containing a measurable quantity of sea salt)”^[1], 这一定义似乎特别适合“河口环流(estuarine circulation)”的研究^[2]。美国 Pritchard^[3]将其原定义稍做修改为“河口是一个与开敞海自由连接、其中海水可测得与来自陆地流域的淡水稀释的半封闭的海岸水体(An estuary is a semi-enclosed coastal body of water which has a free connection with the open sea and within which sea water is measurably diluted with fresh water derived from land drainage)。”

由于河流与海水密度的差异, 导致在河口水平(纵向、横向)及垂直方向上形成密度梯度。其中, 水平(纵向)密度梯度受重力作用往往导致河口水体产生表层净向海、底层净向陆的“河口环流”, 从而影响悬沙、营养盐等物质的纵向输移; 垂向密度梯度的变化会使河口水体呈现为“混合(mixing)”或“层化(stratification)”的状态并影响物质的垂向输移与能量(势能、湍流动能等)的垂向转换。

国外学者在潮汐河口环流、湍流、混合与层化方面做了大量研究, Bowden^[4]; Beardsley 和 Boicourt^[5], Bowden^[6], Dyer^[7], Geyer 和 MacCready^[8], MacCready 和 Geyer^[9]综述了潮汐河口环流与混合的研究概况。

本文简要回顾了国外潮汐河口环流、湍流、混合与层化的基本物理概念、内涵、研究方法、研究成果, 依据笔者的兴趣, 指出主要研究进展, 展望今后研究方向。鉴于保持相关内容的完整性等考虑, 本文亦包含了中国台湾的淡水河口、大陆的黄河口、瓯江口。文中对不同小节中的主要进展, 以罗马数字 I, II, III, ..., X 作了统一顺序编排。又鉴于潮汐河口是海岸的一部分, 基于各节的具体内容叙述, “河口”和“河口海岸”两种文

收稿日期: 2016-12-27

资助项目: 海洋工程国家重点实验室自主研究课题——小尺度海洋湍流(GKZD010071/021)

作者简介: 时钟(1965-), 男, 教授, 英国威尔士大学哲学博士, 主要从事环境流体力学包括河口物理学方面学习、教学、研究。

E-mail: zshi@sjtu.edu.cn

(王 燕 编辑)

字表述均采用;另外,“潮汐河口”或简称“河口”两种文字表述亦均采用。

1 简 史

自英国 Fleming^[10]在苏格兰 Tay estuary 观测发现“河口盐度层化(estuarine salinity stratification)”现象后,至今,已有大量相关研究在世界其他潮汐河口陆续展开,由此逐步建立了潮汐河口环流、湍流、混合与层化的物理学的理论体系。国外潮汐河口环流、湍流、混合与层化的研究大致分为 8 个阶段(以时间倒序),如表 1 所示。

表 1 潮汐河口环流、湍流、混合与层化的研究主要历史阶段

Table 1 Major historical periods in the studies of circulation, turbulence, mixing and stratification in tidal estuaries

阶段(时间倒序)	潮汐河口环流、湍流、混合与层化的研究
2017 年至今	重力 ESCO 环流、潮汐 ESCO 环流(Gravitational ESCO Circulation and Tidal ESCO Circulation)
21 世纪 10 年代	潮汐应变环流(Tidal Straining Circulation)
20 世纪 90 年代	潮汐作用对层化与余环流的影响(Tidal Effects on Stratification and Residual Circulation)
20 世纪 70 年代	河口环流的空间结构(Spatial Structures of the Estuarine Circulation)
20 世纪 60 年代	混合参数化与标度关系(Mixing Parameterizations and Scaling Relations)
20 世纪 50 年代	经典的潮汐平均平衡(Classical Tidally-averaged Balances)与河口环流(Estuarine Circulation)
20 世纪 20 年代	河口海岸潮汐动力学(Estuarine and Coastal Tidal Dynamics)
19 世纪 10 年代	河口盐度层化(Estuarine Salinity Stratification)

简单地讲,Pritchard^[1,11-13], Rochford^[14], Bowden^[15-16]和 Abood^[17]较早采用现场观测研究潮汐河口的环流与混合。Keulegan^[18]较早采用室内实验研究潮汐河口盐、淡水界面混合。Stommel 和 Farmer^[19], Ketchum^[2,20]较早采用理论方法研究了潮汐河口的环流与混合。

2 (纵向)河口环流

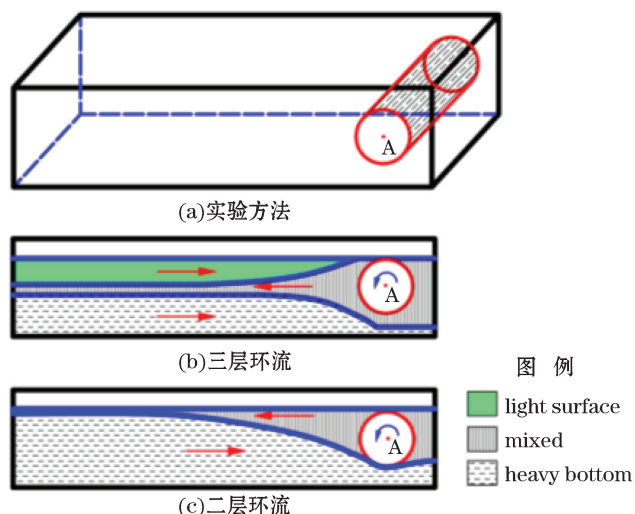
2.1 概念性模式

2.1.1 加拿大 Hachey^[21]的概念性模式

20 世纪初期,海洋学家通过现场观测已经注意到,河口水域存在表层密度较小的淡水向海运动、底层密度较大的海水向陆运动的现象。通过水槽实验,加拿大 Hachey^[21]成功反演了这种特殊的环流形式(图 1),混合作用由转子 A 驱动。但是,对河口环流基本的物理机制仍然知之甚少。

2.1.2 美国 Pritchard^[1,11]的概念性模式

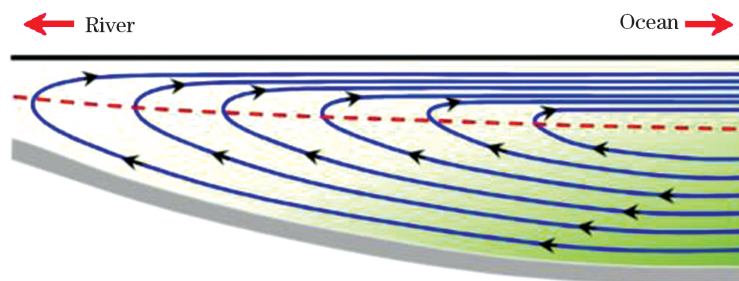
结合观测资料与理论分析,美国 Tully^[22]和 Cameron^[23]研究了河口盐、淡水混合导致的水流运动特征。Stommel^[24]和 Cameron^[23]最早从流体力学角度研究了潮汐河口环流的动力学。笔者认为,基于这些研究成果,Pritchard^[1,11-13,25-29]对潮汐河口动力学、环流的动力学的理解进行了全面、深入的研究。根据 James River estuary 的观测资料,美国 Pritchard^[1, 11]发现该河口也存在较为明显的二层流结构,并将其与水平密度梯度建立联系,进而从动力机制的角度提出了“河口环流”的概念性模式(图 2)。Beardsley 和 Boicourt^[5]详细综述了“河口环流概念的发展(The Development of Estuarine-Circulation Concepts)”。



注: light surface 为轻表层; mixed 为混合层; heavy bottom 为重底层

图 1 Hachey^[21] 的实验方法及实验得到的三层环流和二层环流形式

Fig.1 Diagram of Hachey's^[21] experimental approach, resultant three-layer and two-layer circulation patterns



注: River 为河流, Ocean 为海洋; $\rightarrow$ 表示环流, - - - 将水体分上、下二层

图 2 河口环流概念性模式^[1,11]

Fig.2 Conceptual model of estuarine circulation^[1,11]

值得一提的是“estuarine circulation”,即“河口重力环流(estuarine gravitational circulation)”,又被称为“交换流(exchange flow)”^[30]。

2.2 基于物理学的数学模型(physics-based mathematical model)

2.2.1 美国 Pritchard^[1, 12-13, 25, 27] 的二维“河口环流”的数学模型

“河口环流”作为潮平均的净水流,仍然属于余流的范畴,其强度一般远小于潮流。美国 Pritchard^[1,12-13,25,27] 采用潮流作用下的动量、盐度平衡方程建立了一个二维“河口环流”的数学模型;基于该河口的现场观测资料,即温度、盐度及流速资料,计算纵向及横向压力场随水深的变化情况,评估了运动控制方程中各项所对应的物理过程。结果表明:纵向上的对流与垂向上的湍流混合是控制盐输运的主要物理机制。Pritchard^[27] 认为,“河口环流”的形成本质上体现的是由水面纵向比降引起的正压效应(向海)、由盐水入侵引起的斜压效应(向陆)与底摩擦引起的湍流混合效应之间的平衡关系,水平盐度梯度($\partial S/\partial x$)导致水体垂向上的压力梯度发生变化,是“河口环流”形成的主要驱动力。Pritchard^[1,11-13,25-29] 关于“河口环流”的动力学研究,为之后世界范围内的河口物理学相关研究奠定了基础,也一直是启发的源头。

2.2.2 美国 Hansen 和 Rattray^[31-32]的“河口环流”的数学模型

基于 Pritchard^[13, 25, 27]提出的二维“河口环流”的数学模型,通过将原始偏微分控制方程简化为常微分方程,美国 Rattray 和 Hansen^[33]得到了一个理想河口的定常环流的数学模型,并将计算结果与 James River estuary 的观测资料进行了对比。此后,Hansen 和 Rattray^[31-32]放宽了原模型的限制条件并建立了纵向压力梯度与垂向湍流混合的水流、盐度平衡方程^[31](为了叙述一致性, K 和 A 二组参量符号已作调整):

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) = 0, \quad (1)$$

$$B \left(u \frac{\partial S}{\partial x} + w \frac{\partial S}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(B A_h \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(B A_v \frac{\partial S}{\partial z} \right), \quad (2)$$

式中, ρ 为密度, p 为压力, K_v 为垂向涡黏度, u 为纵向流速, B 为河口宽度, S 为盐度, w 为垂向流速, A_h 和 A_v 分别为水平及垂向涡扩散率。他们通过“相似变换(similarity transformation)”的方法得到了解析解,同时还考虑了不同水域及动力条件的影响。

英国 Chatwin^[34]采用与美国 Hansen 和 Rattray^[31]相似的控制方程并通过给定的基本动力边界条件,获得了“河口环流”的解析解,但是,忽略了盐度的水平扩散作用。

2.2.3 美国 Jay 和 Smith^[35-36]的“河口环流”的数学模型

根据 Columbia River estuary 的现场观测资料,美国 Jay 和 Smith^[35-36]分别建立了针对 3 种类型河口即强层化型、部分混合型与弱层化型理想河口的环流的数学模型,同时将水流运动机制分为潮流的正压作用与水平密度梯度的斜压作用两个部分,然后,通过相似变换得到模型的解析解,从而反映了 3 种类型“河口环流”的基本特征。此外,在密度场和径流的基础上进一步考虑了潮汐的影响,美国 McCarthy^[37]建立了充分混合型河口垂向二维“河口环流”解析模型。美国 MacCready^[38]利用一个简单理想河口的水流、盐度二维解析模型研究了径流和潮汐对“河口环流”以及密度层化的影响,即:河口调整;结果发现:强层化型与强混合型河口对二者的响应迅速,而“适度层化(intermediate stratification)”型河口的“河口环流”对径流和潮汐的变化并不敏感。

2.2.3.1 主要进展 I: 潮汐应变环流(tidal straining circulation)

早期关于“河口环流”的研究中,假设垂向上的混合强度恒定,即并没有考虑“混合潮周期不对称性(tidal asymmetry of mixing)”,由此认为“重力环流(gravitational circulation)”在“河口环流”中占据主导地位,故“河口环流”早期也被简单地认为等同于“重力环流”^[1, 33]或“重力对流(gravitational convection)”^[32, 39]。然而,自 20 世纪 90 年代以来,有关河口混合过程的大量研究对这一观点提出了挑战。最具代表性的研究是英国 Simpson 等^[40]提出了纵向一维“潮汐应变(tidal straining)”的概念,即指水平潮流的垂向剪切与水平密度梯度相互作用这一物理机制,它倾向于使河口水体在一个潮周期内呈现混合与层化的交替变化。而且,Simpson 等^[40]进一步描述了部分河口中所存在的“应变致周期性层化(strain-induced periodic stratification, SIPS)”现象,即涨潮时混合增强而落潮时混合减弱。美国 Jay 和 Musiak^[41]的研究显示,这种由“潮汐应变(tidal straining)”导致的混合强度的涨、落潮不对称分布会影响相应的动量输移过程,进而形成与“重力环流”形式类似的余环流,也即“潮汐应变环流”,并增强“河口环流”。

通过一个理想的周期性层化河口垂向二维数学模型,德国 Burchard 和 Baumert^[42]研究河口“最大浑浊带”时,发现潮汐应变环流对“河口环流”的贡献甚至超过了“重力环流”。基于该周期性层化河口垂向二维数学模型,Burchard 和 Hetland^[43]研究了“潮汐应变”和“重力环流”对“河口环流”的贡献,结果显示:在不考虑径流等因素的影响下,“潮汐应变环流”的强度约为“重力环流”的 2 倍,“潮汐应变”是“河口环流”形成的主要因素。美国 Cheng 等^[44]利用三维数学模型 ROMS 研究了 3 类河口(弱层化型、部分混合型、强层化型)中由混合不对称性所导致的环流特征,结果显示:对于弱层化型和部分混合型河口而言,这种由混合不对称性所导致的“潮汐应变环流”影响更为明显。

2.2.3.2 主要进展 II: 区分、统一“重力环流”与“潮汐应变环流”的混合参数

美国 Geyer 和 MacCready^[8]对“河口环流”理论的发展做了回顾,并重点总结了潮汐应变环流的相关研究成果。针对“潮汐应变环流”与传统的重力驱动“河口环流”这 2 种概念模式之间存在的矛盾,Geyer 和 MacCready 认为可以通过引入一个混合参数 M 对其加以区分、统一^[8]:

$$M^2 = \frac{C_D U_T^2}{\omega N_0 H^2}, \quad (3)$$

$$N_0 = (\beta g s_{\text{ocean}} / H)^{1/2}, \quad (4)$$

式中, C_D 为底部拖曳系数, U_T 为水深平均的潮流幅值, ω 为相应的潮流圆频率, N_0 为河口最大盐度层化所对应的浮力频率, H 则为总水深, $\beta \approx 7.7 \times 10^{-4}$ 为盐度膨胀系数, g 为重力加速度, s_{ocean} 为河口可能出现的表、底层最大盐度差。

混合参数 M 代表了潮汐时间尺度与混合时间尺度之比,Geyer 和 MacCready^[8]通过引入混合边界层理论^[45]对该参数的临界值进行了粗略的推导,并认为:

1) 当 $M > 1$ 时,混合时间尺度小于潮汐时间尺度,潮周期内会出现混合与层化的交替变化,“潮周期混合不对称性”会导致“潮汐应变环流”的形成并对“河口环流”产生重要影响;

2) 当 $M < 1$ 时,混合时间尺度大于潮汐时间尺度,河口呈现部分混合或强层化特征,此时,由斜压梯度导致的“重力环流”明显增大并占据主导地位,所以,“重力环流”是“河口环流”形成的主要因素。

是否存在 $M=1$ 的情形呢? 笔者认为有可能,即:“重力环流”、“潮汐应变环流”是均等的。

2.2.3.3 主要进展 III: “涡黏度-剪切协方差(eddy viscosity-shear covariance,ESCO)”与环流

采用垂向一维和水深平均二维数学模型,Dijkstra 等^[46]系统分析了部分层化河口交换流的生成机制。鉴于潮汐河口交换流/环流生成机制的复杂性,Dijkstra 等^[46]提出了“涡黏度-剪切协方差(eddy viscosity-shear covariance,ESCO)”概念,并进一步提出了 2 种明显不同的物理机制:潮汐 ESCO 环流,是正压潮汐与涡黏度在主潮频率上的直接相互作用结果;重力 ESCO 环流,是通过在任意时间尺度上重力环流与涡黏度时间变化的非直接相互作用的放大结果。这 2 种机制在理想宽度平均模式的 Scheldt River estuary 得以初步验证。

似乎“潮汐应变环流”是一个不能够完整体现物理机制的术语。笔者认为:虽然“涡黏度-剪切协方(ESCO)”是比较清晰的、准确的数学表述,但是,并不是清晰的、准确的物理学表述,英文缩写中没有体现“涡黏度(viscosity)”的字母。当然,鉴于潮汐河口环流物理学的复杂性,“ESCO”相应的物理学表述非常困难,今后,结合这方面国际上相关研究的进展或争议,可以选择中国河口,例如长江口,进一步开展这方面的研究。

3 平面环流

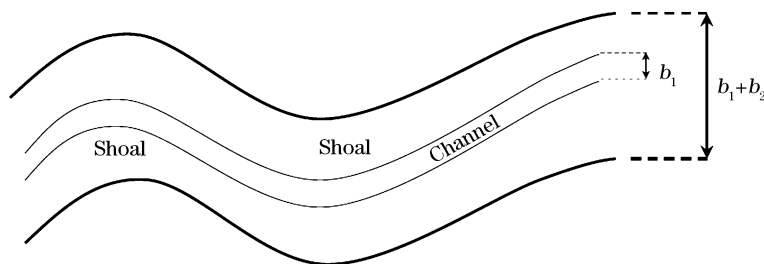
潮汐河口,水体在引潮力的作用下呈周期性的涨、落潮流运动。由于受科氏力、河口平面形态、水下地形等影响,水流可能在平面上形成环流。在多汊道及滩槽相间的河口,由于汊道、滩槽之间底部糙率的差异,在转流前后,常常出现主槽为落潮流而浅滩及支汊仍为涨潮流的现象。

3.1 潮汐捕集

在研究一个概化的河口盐、淡水的扩散时,荷兰 Schijf 和 Schönfeld^[47]提出了“储存池机制(storing-basin mechanism)”,认为:不规则的河口岸线类似于一个储存池,涨潮时,高盐水体将被聚集到池子里;落潮时,储存的水体被释放出去,与主槽中的低盐水体进行混合。河口的浅滩与这种储存池有着类似的作用,主槽进行水流的输送,而浅滩则储存水体。假设河口的主槽宽度为 b_1 ,浅滩的平均宽度为 b_2 ,水深为 a (图 3),此时浅滩造成纵向扩散作用,其扩散系数 D 可以用式(5)表示:

$$D = \frac{\pi}{4} \frac{b_2 \hat{h}}{b_1 a} \hat{v} \hat{x} \cos^2 \varphi, \quad (5)$$

式中, $\hat{h}$ 为潮差, $\hat{v}$ 为潮流流速振幅, $\hat{x}$ 为潮程, φ 为盐、淡水交换流量。



注: Shoal 为浅滩; Channel 为河槽; b_1 和 b_2 为河槽宽

图 3 浅滩对潮汐捕集的影响^[47]

Fig.3 Effect of shoals on tidal trapping^[47]

美国 Okubo^[48]对潮汐扩散机制做了更为详细的描述,把这种由于不规则河口岸线造成的纵向扩散归结为“捕集现象(entrapment phenomenon)”,并且建立了数学模型来解释这种主水体与截留水体之间的交换过程。美国 Fischer^[49]总结并评价了前人的研究成果,正式提出了“潮汐捕集(tidal trapping)”的概念。之后,美国 MacVean 和 Stacey^[50]对“潮汐捕集”的机制进行了更为深入的阐释:通常流速相位的变化与摩擦力有关。在浅滩,有植被覆盖或者粗糙的底床,摩擦力较大,水流会损失相当一部分动量,潮流对正压压力梯度的反应十分迅速;而在深槽处,水流受到的摩擦力较小,在转流之前,引潮力压力梯度必须立即增加以克服水流的惯性力。这种机制可以用沿着河槽的动量平衡方程进行进一步解释,该动量平衡方程为

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right), \quad (6)$$

式中, u 为水平方向速度, t 为时间, η 为水位, v_t 为湍流涡黏度; 左边为非定常项, 右边两项分别为正压压力梯度项和雷诺应力垂向扩散项。

在浅滩处, 非定常项较小, 沿着河槽的流速与压力梯度存在 90° 的相位差; 在深槽处, 非定常项较大, 压力梯度与流速不再是 90° 的相位差, 流速滞后于引潮力, 因此, 压力梯度滞后流速的相位小于 90° 。由于深槽对潮汐压力梯度的反应滞后于浅滩, 在涨潮转为落潮时, 深槽水流还是高盐的涨潮流时, 浅滩处的水流已经转为落潮流, 于是形成了横向的盐度梯度。当深槽水流开始转为落潮流时, 盐度已经过了峰值, 流速滞后盐度的相位小于 90° ^[50]。

3.2 潮汐捕集与平面环流

“潮汐捕集”机制能够很好地解释河口地区水位、流速和盐度之间的相位关系。MacVean 和 Stacey^[50]利用 San Francisco Bay 水位、流速和盐度的实测资料充分印证了他们的这一理论。由此, 他们将“潮汐捕集”机制从前人的纵向扩散作用扩展到潮流平流作用, 并且建立了这种新的理论框架体系, 非常适用于具有潮汐汊道及裂口盐池(breached salt ponds)的 San Francisco Bay。很显然, 潮汐河口由于“潮汐捕集”造成水位、流速和盐度之间相位的差异, 会形成平面环流。

4 次级或横向环流(secondary/transverse circulation)

潮汐河口不仅存在较为特殊的“河口环流”形式, 还包括了常规的横向环流和平面环流, 这 2 种环流形式并不属于余流范畴, 与“河口环流”存在本质区别。“横向环流”是跨航道方向上的环流, 与沿航道方向上的纵

向环流相对应且强度明显较小,也被称作“次级环流”,它对于横向上的混合过程以及地形冲淤变化有重要影响^[51]。

横向环流通常是由科氏力、离心力以及横向上盐、淡水混合形成的密度梯度所造成的,以不规则岸线与复杂水下地形控制为主,层化为辅。其中,不规则岸线主要表现为弯道处离心力的作用。前苏联 Rozovskii^[52]在对弯道水流特性研究后提出:垂向剪切的水流在弯道处会产生表层流向凹岸,底层流向凸岸的横向环流(图 4)。水流流经弯道做曲线运动,形成弯道特有的水流运动规律。曲线运动的弯道水流,是一种复杂的三维螺旋湍流,在重力与离心力作用下,主要表现为水面纵横比降、横向环流、纵向垂线平均流速重新分布等。

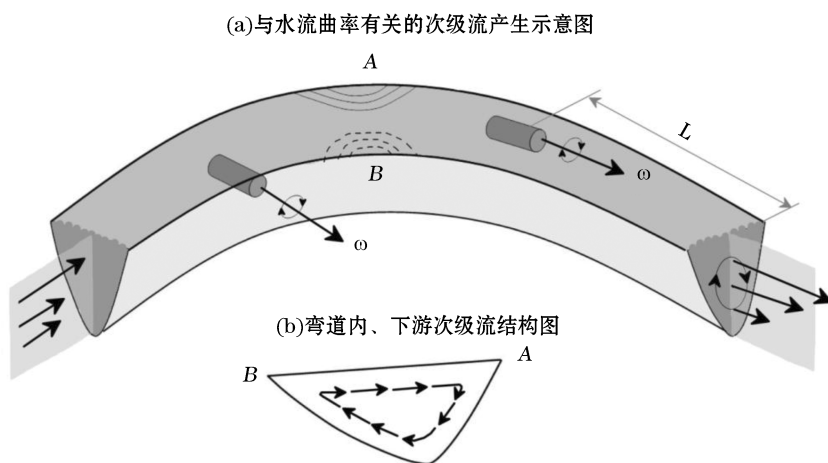


图 4 与水流曲率有关的次级流产生示意图和弯道内、下游次级流结构图(改自 Chant^[51])
Fig.4 Schematic showing the set-up of secondary flows associated with flow curvature and structure of secondary flows in and downstream of channel bend (adapted from Chant^[51])

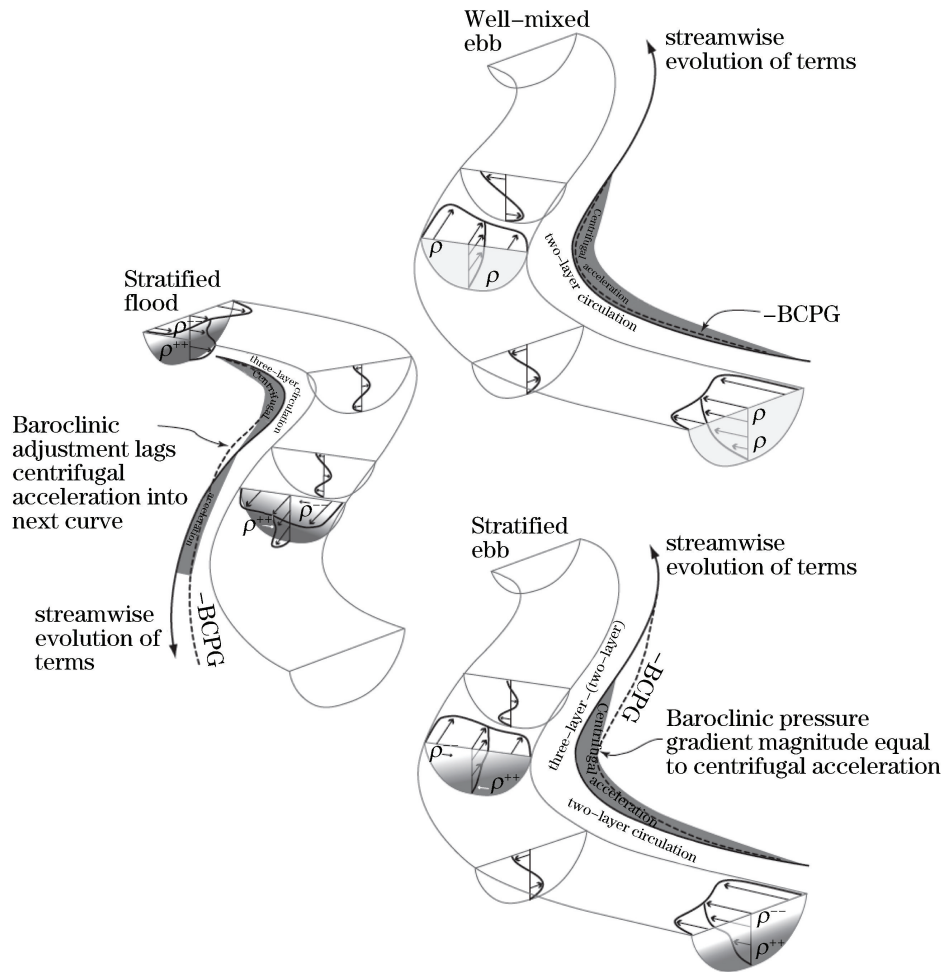
美国 Chant^[51]从理论上分析了形成“次级环流”的机制,包括 Ekman 驱动力——摩擦力与科氏加速度的动态平衡,以及河道曲率等。他在解释弯曲河流次级环流时,引入了“涡度(ω)”的概念。他认为:水流在经过弯道之前,由于垂向的剪切水流,形成顺时针的“涡度(ω)”。表层水流流速大,动量也大,在惯性作用下表层水流流向凹岸,并在凹岸下切;底层水流流速小,动量也小,主要受到倾向于凸岸的压力梯度影响,水流流向凸岸。因此,在横断面上形成表层向凹岸、底层向凸岸的环流,与河道主流相叠加,就形成螺旋形水流。在经过弯道之后,横向环流由于底部摩擦逐渐消失,亦即存在一个相反方向的“涡度(ω)”,抵消了之前的“涡度(ω)”(图 4)。

许多河口物理学家研究河口横向次级流^[49,51,53-65]。美国 Fischer^[49,53]较早理论研究河口横向重力环流。英国 Smith^[54]理论研究了河口次级流。英国 Smith^[54-55]研究了河口次级流及其对纵向上分散的影响。基于观测和数学模型,英国 Nunes 和 Simpson^[58]研究了充分混合的河口中的轴线辐聚问题,发现:主槽横向上深度的变化会通过差异平流驱动横向次级环流,次级环流和主槽形态之间存在一个积极的反馈。

基于在美国加州 Elkhorn Sough 的主槽中观测的资料,Nidzieko 等^[66]定量分析了具有曲率的、充分混合、层化的河口水流的横向环流,得出了一个概念性模式(图 5)。

对于河口“次级环流”与水体的混合和层化之间的关系,美国 Geyer^[59]认为层化会加强河口“次级环流”,而其他的一些学者如 Chant 和 Wilson^[61],Seim 和 Gregg^[67],Chant^[60]以及 Lerczak 和 Geyer^[62]却一致认为,由垂向密度层化引起的浮力作用将会大大减弱“次级环流”。美国 Chant^[51]总结了横向环流形成的物理机制,包括了科氏力作用^[68]、河道曲率^[52,61,69]、差异对流引起的横向斜压梯度^[58]与坡面边界层混合作用^[70],其中,前两者不受密度影响,而后两者却与密度引起的斜压效应有关。一般而言,这几种机制并不孤立存在,往

往还会相互影响,并且在特定情形下都有其相应的主导机制,例如,弯道附近出现的横向环流可能主要受河道曲率的控制。“层化”引起的斜压效应对横向环流的影响较为复杂,Geyer^[59]认为层化会增强横向环流,而 Chant^[60]却得出了完全相反的结论,这主要是与层化的强度有关,即 Geyer^[59]的结论仅适用于弱层化的情形,而在强层化的情况下,斜压梯度会减小水流剪切,进而抑制横向环流。



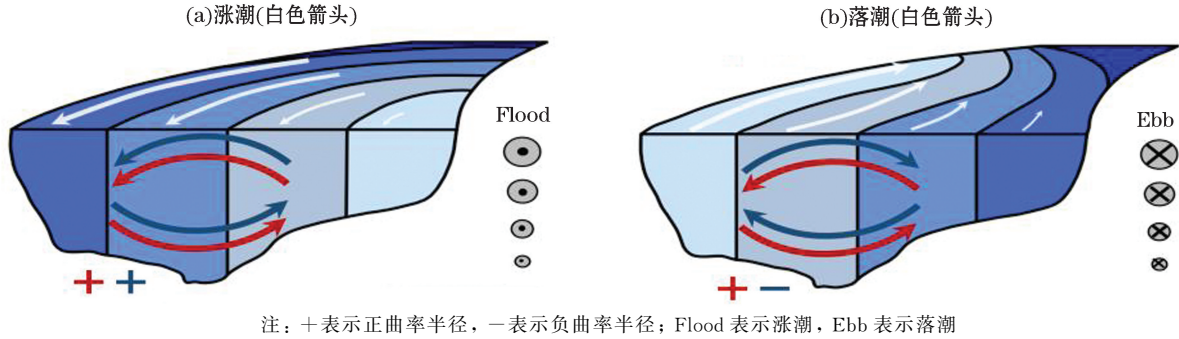
注: well-mixed ebb 表示充分混合落潮; stratified flood 表示分层涨潮; stratified ebb 表示分层落潮

图 5 层化、离心加速度、斜压梯度的相互作用的概念性图^[66]

Fig.5 Conceptual model for interaction between stratification, centrifugal acceleration, and baroclinic pressure gradient^[66]

4.1 主要进展 IV: 涡度方法

基于德国 Wadden Sea 的充分混合、弯曲的潮汐汉道的现场观测,采用涡度方法,Becherer^[71]定量分析了横向环流的机制,得出了一个概念性模式(图 6)。Becherer 等^[66]进一步发现:德国 Wadden Sea 的弯曲潮汐汉道的横向环流是生成“河口环流”的主导项,将横向环流对“河口环流”的影响定义为“纵向动量的横向重新分布(the lateral redistribution of along-channel momentum)”。纵向流速有横向剪切时,横向环流会增大或减小纵向流速的垂向梯度,从而增强或减弱纵向环流。通过横向环流,将纵向动量的横向梯度转化为纵向环流。



注: +表示正曲率半径, -表示负曲率半径; Flood表示涨潮, Ebb表示落潮

图6 在弯曲槽中仅由斜压梯度(—→)和曲率(—→)造成的横向环流的示意图^[71]

Fig.6 Sketch of the lateral circulation in a curved channel induced by the baroclinic pressure gradient (—→) and curvature alone (—→)^[71]

5 湍流、混合与层化

5.1 湍流

“湍流”一直是流体力学家^[72-78]感兴趣的研究科学难题,也是海洋学家^[79-82]感兴趣的研究科学难题。英国 Taylor^[72]应用统计学开拓了湍流扩散的起源或成因物理学研究。

5.1.1 湍流动能耗散率 ϵ

显著的湍流运动是海岸潮汐河口基本的水动力特征之一^[83]。基于 Mersey estuary 的现场观测,英国 Bowden 和 Proudman^[84], Bowden 和 Fairbairn^[85], Bowden^[15], Bowden 和 Howe^[86]开拓了潮汐河口湍流的非直接观测研究。

鉴于直接观测湍流的实际困难,一些学者也从微观的角度通过水体湍流动能耗散率 ϵ 来研究河口混合与层化对湍流的影响。英国 Rippeth 等^[87]利用“FLY(fast light yoyo)”观测了 Liverpool Bay“受淡水影响区(region of freshwater influence, ROFI)”水体垂向上 25 h 时间序列的水流、温度、盐度以及湍流动能耗散率 ϵ , 结果显示:“潮汐应变”所导致的水体周期性层化与湍流动能耗散率的周期性特征存在明显联系,即:落潮时,“潮汐应变”使得水体的层化增强,强湍流耗散被限制在近底层水体而难以向上层扩散;涨潮时,“潮汐应变”使得水体层化减弱甚至发生完全混合,强湍流耗散几乎充斥着整个垂向水体。此外,观测的湍流动能耗散率存在明显的周期性特征,其中上层水体呈 M_2 周期变化,下层水体则呈 M_4 周期变化。

通过对 Rhine ROFI 的湍流动能耗散率、水体密度以及水流等观测资料的分析,英国 Fisher 等^[88]发现,近底层有着较大的湍流动能耗散率并且呈 M_4 周期性变化,他们认为这与底部较强的剪切效应以及潮流的不对称性有关;底层以上的湍流动能耗散率一般较小,但在特定时段,强湍流耗散可扩散至整个水体;他们从能量的角度考虑,认为这是由于该时段出现了“过度应变(over-straining)”,水体释放额外的势能从而促进了湍流混合。此外, Fisher 等^[88]还比较了英国 Rippeth 等^[87]实测湍流动能耗散率的周期性特征,结果发现:二者存在明显差别,即:Rhine ROFI 中的强层化出现在高潮位、弱层化出现在低潮位,而 Liverpool Bay 与此刚好相反,并将主要原因归结为这 2 个河口潮波形态的差异,其中 Rhine 的潮波以行波为主,而 Liverpool Bay 的潮波以驻波为主。

通过现场观测,英国 Simpson 等^[89]分析了部分混合型的 York River estuary 中潮周期变化的湍流特征参数(雷诺应力)。美国 Geyer 等^[64]则对高度层化型的 Merrimack estuary 落潮期间的湍流动能耗散率、浮力通量等进行了观测,并总结了湖泊、河口、大洋等自然水域中湍流动能耗散率的量级分布,其中,河口水域的湍流动能耗散率量级范围大约为 $10^{-6} \sim 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ 。

5.1.2 Kolmogorov-5/3 湍流能量谱

自 Kolmogorov^[75] 中隐含的一维 Kolmogorov-5/3 湍流能量谱得到理论研究、室内实验观测的证实起,流体流体力学家也同时开始思考:河口(海岸)水体中湍流究竟是否存在惯性子区一维 Kolmogorov-5/3 湍流能量谱? 国际流体力学界一致认为 Grant 等^[90] 以及 Grant 和 Moilliet^[91] 在加拿大的 Discovery Passage(一个潮汐通道)的南端成功观测到一维湍流能量谱(图 7)。

图 7 中一维湍流能量谱 $\varphi(k)$ 可以表示为^[90]

$$\varphi(k) = k \rho^{1/3} \epsilon^{2/3} k^{-5/3}, \quad (7)$$

式中, k 是波数, ϵ 是湍流动能耗散率。

对这一重要成果, Stewart 和 Grant^[92] 又做了总结。然而,基于理论研究,美国 Long^[93] 认真地挑战了 Grant 等^[90] 以及 Grant 和 Moilliet^[91] 的这一发现。河口(海岸)水体中湍流究竟是否存在惯性子区 Kolmogorov-5/3 湍流能量谱仍是今后具有挑战性的河口(海岸)水体物理学的科学难题。

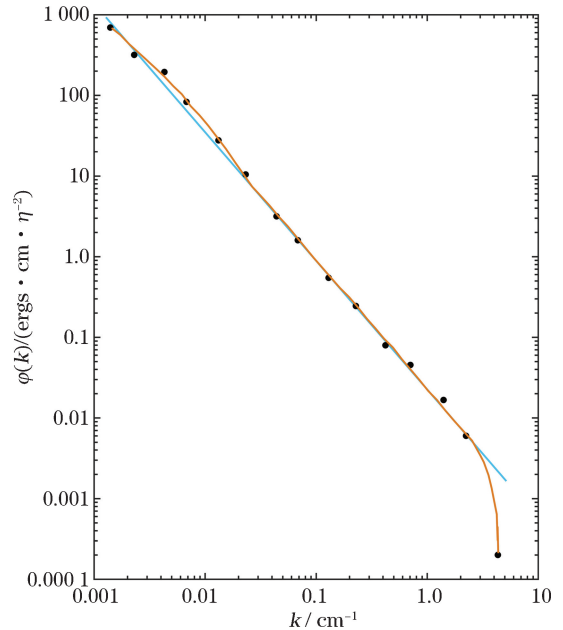
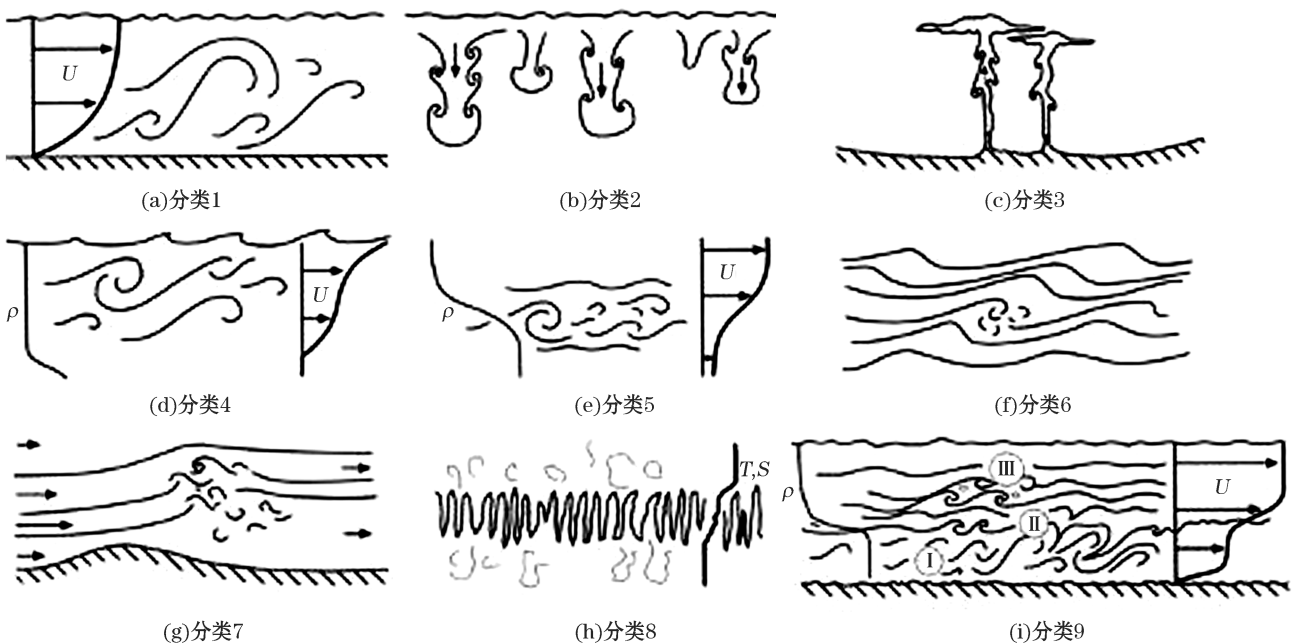


图 7 一维湍流能量谱^[90]

Fig.7 One-dimensional turbulence energy spectrum^[90]

5.2 混合与层化

按照美国 Eckart^[94] 的理解、定义,“混合(mixing)”由“搅动(stirring)”与“扩散(diffusion)”构成:搅动(stirring) + 扩散(diffusion) = 混合(mixing)。海洋分层密度界面湍流混合的研究,一直是环境流体力学家、物理海洋学家感兴趣的课题^[80, 82]。各种不同类型的海洋混合过程如图 8 所示。笔者认为这些混合过程亦是存在于河口水体中的。



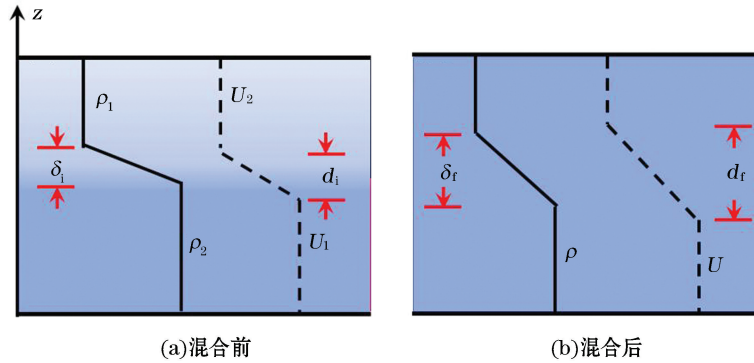
注: ρ 是密度; U 是速度; T 是温度; S 是盐度; I 是由外部剪切应力所致的混合,

II 是剪切和湍流涡所致的内混合, III 是破碎内波所致内混合

图 8 海洋 9 种湍流混合过程的分类^[81]

Fig.8 Classification of 9 turbulent mixing processes in the ocean^[81]

所谓“层化”指的是水体密度沿垂向存在差异,当底层水体密度大于表层时称为稳定层化(图 9)。混合与层化作为河口海岸水体的基本特征,与水体的诸多物理、化学过程存在密切联系,故受到了海洋学家的广泛关注,并开展了大量相关研究。一般地说,河口海岸水体呈现稳定层化。河口海岸水体处在混合状态下时,其密度在垂向上几乎为均一分布,与混合相对应的是层化状态。在受淡水影响的河口海岸水域,受到各种不同类型物理过程的影响,混合与层化之间相互转换。若将水体混合,动能必须转化为势能,混合恰能增强水体的势能。基于德国 Prandtl^[74] 的“混合长度理论(the mixing length theory)”,美国 Kent 和 Pritchard^[96] 较早将其应用于 James River estuary 垂向盐度扩散的研究。



注: ρ 是密度; U 是速度; d 是速度界面的厚度; δ 是密度界面的厚度; d 和 δ 的下标 i 和 f 分别表示初始和最后状态

图 9 混合前和混合后的密度垂向剖面(实线)和流速垂向剖面(虚线)^[95]

Fig.9 Schematic of the vertical profiles of density (solid line) and velocity (dashed line) before and after mixing^[95]

5.2.1 梯度/局部 Richardson 数与河口垂向混合(层化)

英文文献中,有“梯度(gradient)”Richardson 数和“局部(local)”Richardson 数的表述,物理意义是相同的。Richardson 数(Ri)的基本想法是英国 Richardson^[97] 研究大气涡能量输出供给的意外副产品,表示大气中势能与动能的平衡关系。根据 Richardson^[97] 的基本想法,德国 Schlichting^[98] 将其转化为具体的数学公式,并以 Richardson 命名,即为梯度 Richardson 数。英文文献中,由 Holzman^[99] 最早给出在大气研究中的 Richardson 数的形式。 Ri 被广泛应用于大气与海洋的湍流混合与稳定性研究中,应用于海洋中时原始公式中的温度被替换为水体密度。

英国 Bowden^[100] 率先将局部 Richardson 数用于研究 Mersey estuary 的垂向混合。局部 Ri 数是定量研究水体湍流混合的一个重要参数,它从能量的角度表征了水体的势能与动能之间的平衡关系,其基本形式^[100]:

$$Ri = -\frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^{-2}. \quad (8)$$

另外,梯度 Ri 数也可表述为 $Ri = N^2/S^2$ 且 $N^2 = -g\rho^{-1}\partial\rho/\partial z$, $S^2 = (\partial u/\partial z)^2$, 其中, N 为“浮力频率(buoyancy frequency)”或“Brunt-Väisälä 频率”^[101], 它代表的是水质点在层化水体中相对于平衡位置振荡的频率,而负号则是为了确保稳定层化时的浮力频率为正值, S 为垂向流速剪切。“浮力频率”倾向于抑制湍流混合并将湍流动能转化为势能,从而增强层化,垂向流速剪切则起着完全相反的作用。梯度 Ri 数综合考虑了这 2 个物理过程的影响,能够较为全面地反映混合与层化水体的稳定性。

一般而言,较大的梯度 Ri 数意味着水体具有较强的层化和较好的稳定性,而较小的梯度 Ri 数,意味着水体具有较强的混合和较弱的稳定性。为了判断水体混合与层化的稳定性状态,需要引入一个梯度 Ri 数的临界值。对此,许多学者从理论与实验的角度开展了研究^[89, 102-103], 发现 0.25 是比较合适的梯度 Ri 数的临界值。

更进一步地,基于美国 Munk 和 Anderson^[104] 的温跃层理论公式, Bowden^[100] 计算出了 Mersey estuary

的垂向“涡黏度(eddy viscosity)”、“涡扩散率(eddy diffusivity)”,结果发现:一方面,层化稳定效应降低了“垂向涡黏度(vertical eddy viscosity)”、增加了密度流的速度;另一方面,层化稳定效应降低了“垂向涡扩散率(vertical eddy diffusivity)”、增加了盐度梯度。

在潮汐河口纵向分散的理论研究中,英国 Smith^[105]推导出 Ri 数:

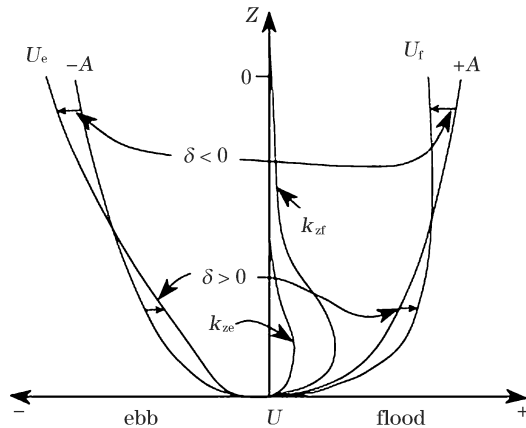
$$Ri_1 = -\frac{\beta g \partial_z \bar{s}^2}{U_0 \langle |U_0| \rangle} \Gamma^2 \frac{\bar{v}_{13}}{\bar{\kappa}_3} (h/\bar{h}) \frac{\eta^2 \ln \eta}{1-\eta} + \left(\frac{\beta g \partial_z s_0 \bar{h}^2}{U_0 \langle |U_0| \rangle} \right)^2 \frac{\Gamma^4 \bar{v}_{13}^2}{\bar{\kappa}_3 \bar{v}_{23}} (h/\bar{h})^2 \left\{ \eta^2 - \frac{\eta^2 \ln \eta}{1-\eta} \frac{1}{[\ln(1/\eta_*) - 1]} \right\}, \quad (9)$$

式中, βg 是盐的减重力(reduced gravity); U_0 是初始速度; $\bar{s}$ 是平均盐度; s_0 是初始盐度; $\bar{\kappa}$ 是垂向涡扩散率的平均值; η 是表面位置; η_* 是底部位置; Γ 是谢才系数; $\bar{v}_{13}$ 和 $\bar{v}_{23}$ 是动量的涡扩散率平均值的 2 个分量, 下标 1, 2 和 3 表示坐标系方向。

梯度 Ri 仍然被用于半定量地理解潮汐河口的混合与层化, 例如: 英国 Mersey estuary^[106]; 台湾 Dyan-shuei River estuary^[107]。笔者认为, Smith^[105]的 Ri 数亦非常值得在潮汐河口测试, 一方面, 证实其正确性; 另一方面, 若正确, 可以有助于理解真实潮汐河口中的纵向分散的物理学。

5.2.2 主要进展 V: 内部潮流不对称性(internal tidal asymmetry)

河口地区受复杂地形、岸线的影响产生潮流不对称性, 已经为海洋学家所理解。但是, 对其动力学、物理学仍需进一步的理解。例如, 美国 Colombia River estuary 内潮流速度和涡混合系数的垂向分布显示“内部潮流不对称性”^[41, 108-110], 如图 10 所示。事实上, 河口“内部潮流不对称性”是由潮流剪切与潮流垂向混合之间的相关联驱使造成的。英文文献中“内部潮流不对称性”与“混合潮流不对称性”的物理概念是相同的。



注: ebb 为落潮, flood 为涨潮; U_e 为落潮流速, $-A$ 为落潮潮频率主调和, δ 为内部潮流不对称性, k_{zc} 为落潮涡扩散系数; U_f 为涨潮流速, $+A$ 为涨潮潮频率主调和, k_{zf} 为涨潮涡扩散系数

图 10 “内部潮流不对称性”的定义^[41, 110]

Fig.10 Definition of internal tidal asymmetry^[41, 110]

5.2.3 主要进展 VI: “势能差异”理论与“潮汐应变”

美国 Fischer^[49]对河口水体混合与扩散的相关研究进行了总结, 并探讨了河口环流、潮汐、风应力的影响。基于 James, York 和 Rappanhanock 河口的现场观测资料, 美国 Haas^[111]首次揭示了在潮流混合作用下水体的层化存在大、小潮周期的变化。

值得一提的是, 在研究 Irish Sea 近岸水域中由温度变化造成的羽状锋问题时, 从势能的角度, 英国 Simpson 和 Hunter^[112]分析了水体混合与层化对羽状锋形成的影响, 并提出了一个判断潮流混合强度的参数 (h/u^3) (即 Simpson-Hunter 数), 其中, h 为水深, u 为潮流流速。当水深越小、潮流越强时, Simpson-

Hunter 数越小,水体相应的混合程度也越高,因此该参数可用于对不受径流影响的陆架海域混合与层化强度进行判断。Simpson 等^[113]进一步发展了这种势能的研究方法,从而提出了一个定量判断水体层化强度的相对势能 V 公式^[113]:

$$V = \int_{-h}^0 (\rho - \bar{\rho}) g z dz, \quad (10)$$

式中, ρ 为水体密度; $\bar{\rho}$ 为垂向平均的水体密度,且 $\bar{\rho} = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 \rho dz$; g 为重力加速度; z 为高程。当 $V=0 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,水体为完全混合状态;当 $V < 0 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,水体为稳定层化状态。根据该定义, Simpson 等^[113]导出了相对势能的变化率公式,并按照混合与层化的相关物理机制将其分为“表面受热(surface heating)”、“潮汐搅动(tidal stirring)”和“风搅动(wind stirring)”三个部分。Simpson 等^[113]据此研究了英国周边陆架海羽状锋的分布机制,结果表明:“潮汐搅动”是影响陆架海羽状锋分布的主要因素。

基于 Simpson 等^[113], Simpson^[114]提出了“势能差异(potential energy anomaly)”的计算公式^[114]:

$$\phi = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 (\bar{\rho} - \rho) g z dz, \quad (11)$$

式中, ϕ 为势能差异,表示单位体积的水体由层化状态变为完全混合状态所需的能量(单位为 $\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$) (图 11),相较于之前相对势能的定义(式(10)),“势能差异”的物理意义更加明确,其成为判断水体混合与层化强弱的有效物理量。由“表面受热”、“潮汐搅动”和“风搅动”等相关物理机制共同引起的“势能差异变化率”即得到相应的“势能差异方程(potential energy anomaly equation)”。

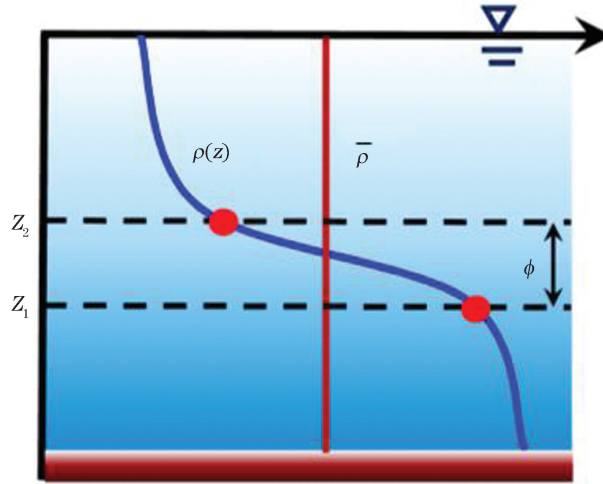
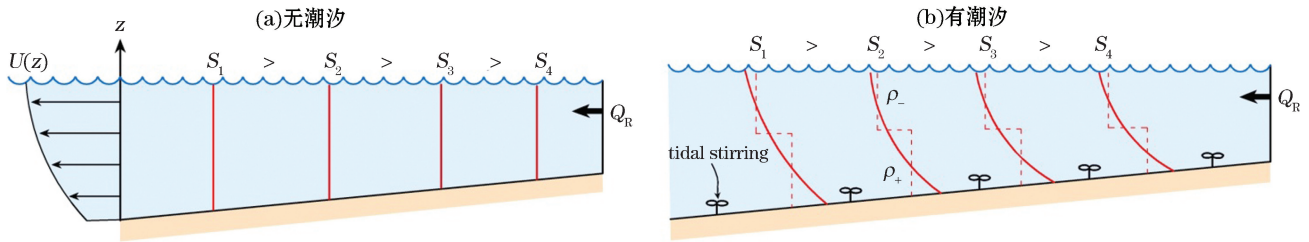


图 11 水体垂向上从位置 Z_1 到位置 Z_2 由层化变为混合所需的势能简图

Fig.11 The potential energy required for the change from stratification to mixing from Z_1 to Z_2 within the water column

5.2.4 “潮汐应变”概念性模式

然而,上述有关混合与层化的势能理论研究针对的仍然是陆架海域,其所考虑的“表面受热”、“潮汐搅动”和“风搅动”三者均为垂向上的物理过程,并未考虑河口海岸水域径流淡水注入的影响,因此存在明显的局限性。基于“势能差异”公式,英国 Simpson 等^[40]对其做了进一步完善并考虑了河口水域的密度水平对流作用,从而导出了纯潮流及“河口环流”所致的“势能差异变化率”公式,并提出“潮汐应变”的概念(图 12)。

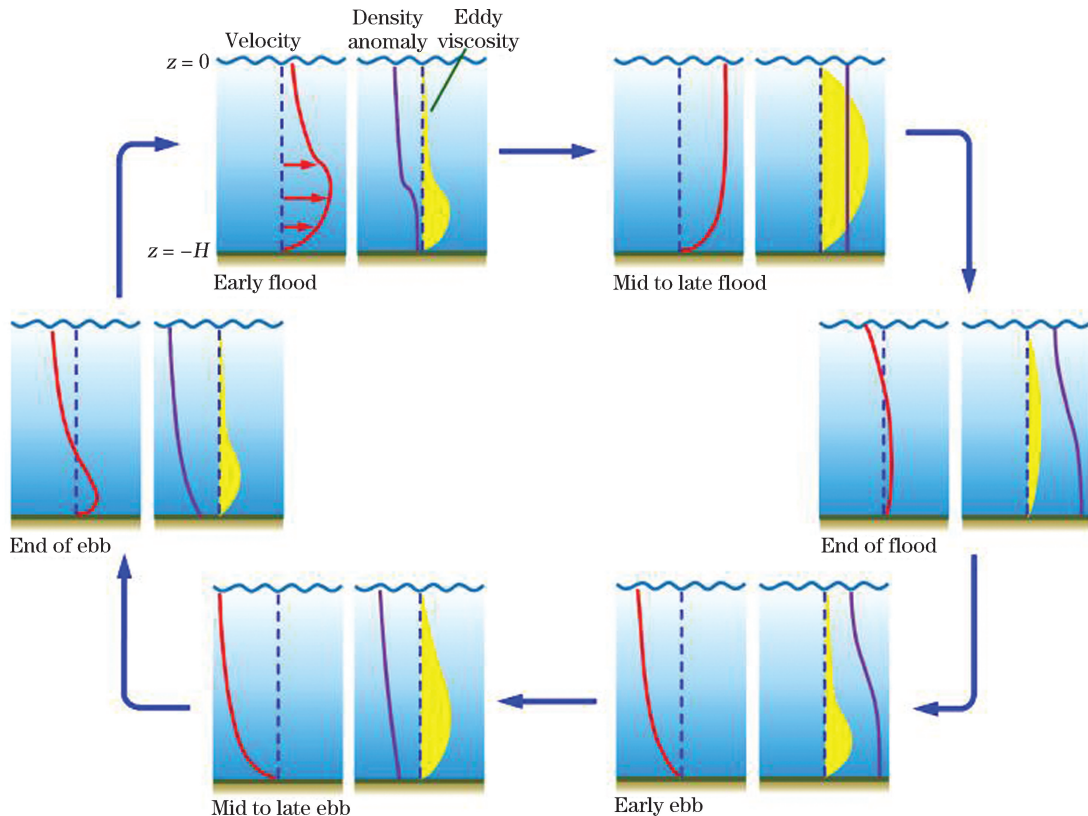


注：图 a 和图 b 左端均为海，右端均为径流； $U(z)$ 为流速， S 为盐度， Q_R 为河流流量， ρ 为密度，tidal stirring 为潮汐搅动

图 12 潮汐应变概念机制图^[9,40]

Fig.12 Schematic of the tidal straining mechanism^[9,40]

“潮汐应变”指的是水平潮流的垂向剪切与水平密度梯度相互作用这一物理机制，它倾向于使河口水体在一个潮周期内呈现混合与层化的交替变化，即“混合与层化涨、落潮不对称性(flood and ebb tidal asymmetry of mixing and stratification)”：落潮时，水流向海，底摩擦效应导致垂向上形成明显的流速剪切并使得密度等值线发生倾斜而产生层化(图 13)；涨潮的过程与之相反，向陆水流在垂向上的反向流速剪切使得水体又趋于混合(图 13)。在“潮汐应变”的作用下，层化与湍流强度随潮周期的变化如图 13 所示。落、潮期间，若“潮汐应变”所致的势能变化大于“潮汐搅动”，水体将呈现为混合与层化的交替变化，即为“应变致周期性层化”状态。



注：velocity 为速度；early flood 为初涨；density anomaly 为密度差异；eddy viscosity 为涡黏度；mid to late flood 为涨潮末；end of ebb 为落潮末；mid to late ebb 为落潮末；early ebb 为初涨；end of flood 为涨末

图 13 “应变致周期性层化”情形下流速、密度差异、涡黏度剖面在一个潮周期内的变化^[8]

Fig.13 Variability of vertical profiles of velocity, density anomaly, and eddy viscosity over a tidal period for the strain-induced periodic stratification regime^[8]

5.2.5 基于物理学的数学模式(physics-based mathematical model)

英国 Simpson 等^[40]利用英国 Bowden 和 Fairbairn^[115]及美国 Officer^[116]给出的近似流速分布得到了“潮汐应变”和“河口环流”所致的“势能差异变化率”的计算公式。

“潮汐应变”所致的“势能差异变化率”计算公式:

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial t}\right)_{\text{st}} = 0.031gh\hat{u} \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (12)$$

“河口环流”所致的“势能差异变化率”计算公式:

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial t}\right)_{\text{E}} = \frac{1}{320} \frac{g^2 h^4}{N_z \rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial x}\right)^2 \quad (13)$$

式(12)和式(13)中,下标 st 表示“潮汐应变”,下标 E 表示“河口环流”, $\hat{u}$ 为垂向平均的潮流流速, $\partial \rho / \partial x$ 为水平密度梯度, N_z 为垂向“涡黏度”。从这 2 种物理机制的“势能差异变化率”公式可以看出,“河口环流”起着持续增强层化的作用,而“潮汐应变”由于流速 $\hat{u}$ 涨、落潮方向的差异,其对层化的影响具有两面性,即:既有增强的作用,也有减弱的作用。利用“潮汐应变”的概念,Simpson 等^[40]较好地解释了 Liverpool Bay 混合与层化的潮周期变化规律。此后,“潮汐应变”已经被应用于许多河口的研究,如:德国 Rhine ROFI^[88,117],美国 York River estuary^[118],美国 Hudson River estuary^[119]和中国黄河口^[120]。

需要说明的是,英国 Simpson 等^[40]所提出的“潮汐应变”概念是纵向一维的,适用于纵向密度梯度显著、对流过程一维特征突出的河口,例如: Liverpool Bay。根据 Arhus Bay 的一年水文观测资料,丹麦 Lund-Hansen 等^[121]采用 Simpson 等^[40]的“势能差异”理论并考虑风、热辐射、“河口环流”和潮流作用,进而探讨了该水域混合与层化的特征和机制。英国 Simpson 等^[89]利用“潮汐应变”的概念分析了 York River estuary 的湍流观测资料,发现“潮汐应变”通过控制层化强度在潮内的变化使得湍流强度出现了涨、落潮不对称分布。此后,一些学者基于观测资料^[122-123]或模型研究^[124]发现,河口横向上的密度梯度与流速剪切相互作用也会形成横向“潮汐应变”,并对水体的混合与层化产生影响。

5.2.6 主要进展 VII: 水平 Richardson 数或 Simpson 数与(纵向)层化类型

根据 Simpson 等^[40]、Simpson 和 Sharples^[125],部分混合型河口水体受径流和潮汐的共同作用往往存在“应变致周期性层化(strain-induced periodic stratification)”与“持久性层化(persistent stratification)”二种类型,而 Simpson 数(Si 数)则是区分这二种层化状态的一个重要参数^[126-127]。 Si 数并不是由 John H. Simpson 本人提出的,而是美国的 Stacey^[126]和 Monismith 等^[127]基于 John H. Simpson 的“势能差异”理论并做进一步推导得到的,最初也被称为“水平 Richardson 数”^[128],而根据 Simpson 等^[40]对河口混合与层化机理的探讨,该参数本质上体现的是“潮汐应变”与“搅动”之间的平衡关系,因此后来的学者将其命名为 Simpson 数。

基于英国 Simpson 等^[40],通过量纲分析,美国 Stacey^[126]简化处理了水体混合与层化的“势能差异”公式,提出了一个描述二种层化状态之间相互转化的参数,并被命名为“水平 Richardson 数”,也即 Si 数(说明:原文中用的是 Ri_x ,为了叙述的一致性,下文将以 Si 代替之):

$$Si = g\beta \frac{dS}{dx} \frac{h^2}{u_*^2} \quad (14)$$

式中, dS/dx 为水深平均的纵向盐度梯度, u_* 为摩阻流速。给定某个临界 Si_0 ,当 $Si > Si_0$ 时,潮流引起的湍流混合作用不足以克服斜压梯度,水体在整个潮周期内都呈现为明显的层化状态;当 $Si < Si_0$ 时,潮流引起的湍流混合作用增强并抑制层化,水体以“应变致周期性层化”状态为主。

美国 Monismith 等^[127]采用类似的方法也导出了 Si 数的计算式,并按照摩擦定律将 Stacey^[126]原始公式中难以直接观测的摩阻流速 u_* 替换为 $C_D^{1/2} U_{\max}$,其中 C_D 是底部拖曳系数, $U_{\max}$ 为潮流流速幅值,由此得到新的 Si 数计算公式^[127]。相较原始公式而言,新的 Si 数计算公式更加便于实际应用。此后,该参数已在理想及实际河口混合与层化的相关研究中得到成功应用^[129-131]。

基于英国 Simpson 等^[40]和 Stacey^[126],德国 Becherer 等^[132]做了进一步定量分析,得到了 Si 数的 2 个临界值,即除了“应变致周期性层化”状态与“持续性层化”状态之间的临界值之外,还存在一个完全混合状态与“应变致周期性层化”状态之间的临界值,二者分别为 0.088 和 0.84,即分别约为 0.1 和 1.0 量级。具体地讲,当 Si 数低于下临界值(0.1)时,水体在整个潮周期内都处于较好的混合状态;当 Si 数高于上临界值(1.0)时,水体在整个潮周期内都处于层化状态,即持续性层化;当 Si 数介于上、下临界值之间时,水体在整个潮周期内呈现为“应变致周期性层化”。

5.2.7 主要研究进展 VIII: 高 Reynolds 数“剪切失稳(shear instability)”造成潮汐河口的混合

“剪切效应(shear effect)”造成的水平混合普遍存在于潮汐河口里^[133]。“剪切失稳(shear instability)”是层化的海洋水体中将流体运动转化为混合的主要机制。基于 Connecticut River estuary 的现场观测资料,美国 Geyer 等^[134]分析了高 Reynolds 数剪切失稳导致的混合(图 14 和图 15)。

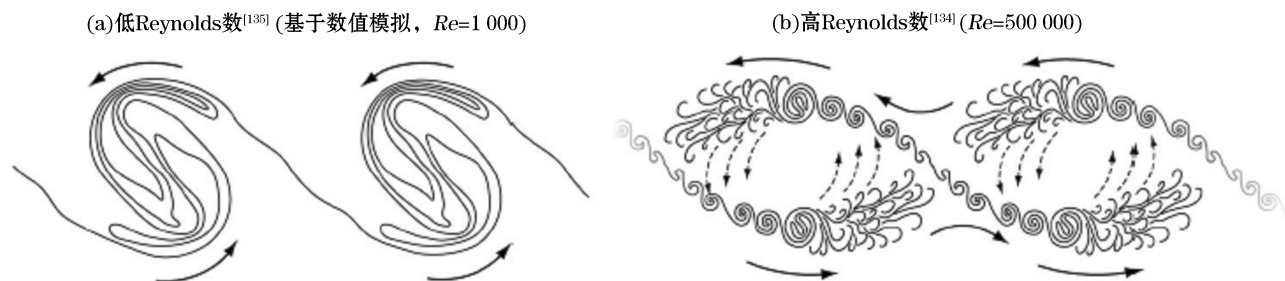
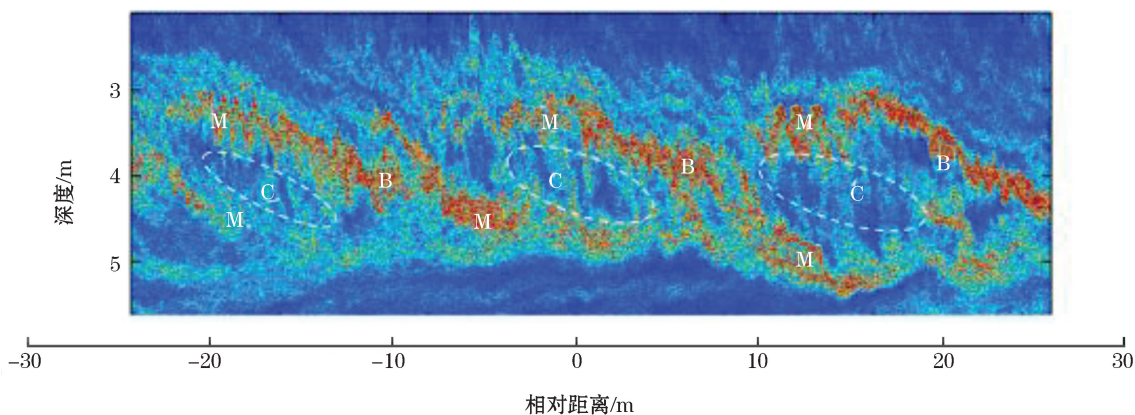


图 14 Kelvin-Helmholtz 失稳造成的混合示意图^[134-135]

Fig.14 Sketch of mixing by Kelvin-Helmholtz instability^[134-135]



注: M 表示混合区; C 表示中心; B 表示瓣子中心

图 15 美国 Connecticut River estuary 失稳的盐度结构声学图像^[134]

Fig.15 Acoustic imagery of the salinity structure within instabilities in the Connecticut River estuary, USA^[134]

6 数学模拟

潮汐数学模拟是在给定初始条件和边界条件的前提下,采用数值离散的方法(包括有限差分、有限元和有限体积等方法)对河口海岸基本水动力控制方程进行近似求解,从而获得相关物理量时空分布特征的一种研究方法。

6.1 数学模型简介

河口海岸潮汐数学模型研究最早可以追溯到 20 世纪初期,德国 Defant^[136]给出了一维潮波运动方程的数值解法并应用于狭长海域的潮汐求解,得到了良好的结果。20 世纪 50 年代以后,随着计算机硬件的飞速发展,河口海岸数学模拟技术得到了越来越广泛的应用并已成为河口研究的一个重要手段。德国 Hansen^[137]采用二维潮流数学模拟技术模拟了 Ems 河口的潮波并得到了相当精确的结果。美国 Reid 和 Bodine^[138]针对河口海岸水域的潮间带问题,为潮流数学模型设计了一个简单的动边界处理方法。

美国 Leendertse 等^[139]较早提出了适用于河口海岸分层水体的准三维数学模型,它将水体沿深度方向划分为若干层后,在各层内使用分层积分的二维控制方程进行计算,因此也称“分层二维模型”。美国 Blumberg 和 Mellor^[140]开发了一套全三维河口海洋数学模型(即后来的 POM 模型),该模型在垂向上引入了 σ 坐标变换^[141],并且采用了“模式分裂法”^[142]将三维自由表面的波动问题分解为快速表面重力波(外模式)和慢速内波(内模式)问题。美国 Lynch 和 Gray^[143]针对有限元方法求解水动力方程存在的数值震荡问题而提出了“一般波动连续方程(general wave continuity equation, GWCE)”,并被广泛应用于河口海岸数学模型。意大利 Casulli 和 Cheng^[144]为了克服“模式分裂法”的不足,发展一种新的半隐半显式差分格式(即 θ 法)。

按照基本控制方程的形式,河口海岸潮汐数学模型主要分为 4 种:(i)一维模型;(ii)平面二维模型;(iii)垂向二维模型;(iv)三维模型。一维模型是应用最早,也是最简单的一类,但由于网格形式过于简单,需对模型计算区域做大量的参数化,适用于有大量细长支流的河口。平面二维模型是目前河口研究中应用最为广泛的一类模型,一方面,由于河口多属宽浅水域,二维特征明显;另一方面,平面二维模型所需的计算量相对较小,其结果也能满足工程需要。垂向二维模型是将三维控制方程沿横向积分得到的,它忽略了地形、水流的横向变化,因此较适用于窄而深的河口。三维模型的起步较晚但发展迅速,由于实际水流运动都具有三维特征,为了更好地研究河口水体的混合与层化、泥沙运动、污染物扩散等问题,采用三维模型显得尤为必要。

较早的三维模型采用垂向分层的二维模式^[139],实际上是一种准三维模型。20 世纪 80 年代以来,随着计算机技术的飞速发展,全三维模型开始陆续出现并得到了越来越广泛的应用,按照所采用的数值方法大致可以分为三类:有限差分模型、有限元模型、有限体积模型。

1)有限差分模型

较为成熟的有限差分模型包括:COHERENS^[145], ECOM^[140], POM^[146], Delft-3D^[147]等。这类模型所采用的有限差分法多基于 Taylor 展开,采用局部差商来近似代替微商,从而获得偏微分方程的近似解。因为概念简单、易于编程等原因,有限差分法最早实现计算机程序化并被广泛用于大洋及河口海岸地区,但是,有限差分模型空间上所采用的结构化网格难以适应河口海岸复杂的地形岸线,因此存在一定局限性。

2)有限元模型

较为成熟的有限元模型包括:TELEMAC^[148], ADCIRC^[149]等。这类模型所采用的有限元方法起源于结构力学,它基于方程余量与权函数正交化的原理,通过将区域离散为互不重叠的有限个单元,在各单元内选择若干点作为插值节点,并为各节点假定一种规范化的形函数,而最后的解将由这些形函数的线性组合来得到。

有限元方法的计算思想由美国 Courant^[150]提出。美国 Turner 等^[151]发表了关于有限元方法的第一篇论文,但当时并未使用“有限元方法”这一名称,直到 1960 年,“有限元方法(finite element method)”的名称才由 Clough^[152]正式提出。英国 Zienkiewicz 和 Cheung^[153]利用有限元方法求解势流问题被认为是有限元方法在流体力学领域应用的开端。德国 Grotkop^[154]采用 Galerkin 有限元方法求解河口水域二维浅水方程是首次将有限元方法应用在河口海岸潮流数学模拟的。有限元模型可采用无结构网格进行空间离散,节点之间由形函数拟合,故能够很好地适应近岸水域复杂的地形与岸线,较有限差分模型有明显进步。

3)有限体积模型

较为成熟的有限体积模型包括:FVCOM^[155],SUNTANS^[156]。有限体积模型发展较晚,它采用有限体积法,该方法的基本原理是将计算区域离散为有限个控制体积,并将偏微分方程在每一个控制体积内积分,从而对积分方程进行离散求解。有限体积法同时具备了有限差分法与有限元法的某些特点,加之它采用积分形式的控制方程,从而保证了质量守恒。但是,由于有限体积模型对控制体积分的特点,其控制体积仅相当于有限元模型的单个节点,故对防波堤等人工结构物进行地形贴合的效果可能不如有限元模型。

6.2 河口环流的数学模拟

美国 Blumberg^[157]建立了部分混合型河口垂向二维数学模型并采用简单的混合长度湍流模型,利用 Potomac River estuary 的水流、盐度实测资料研究了该河口的盐度平衡关系及相应的“河口环流”特征。此后,利用该垂向二维数学模型,美国 Blumberg^[158]对 Potomac River estuary 进行了数值实验研究,以对比正压和斜压效应对潮汐与“河口环流”特征的作用。结果表明:斜压效应对宏观的潮汐特征并无明显影响,但对水体垂向上的水流结构影响显著,因此,斜压效应是研究“河口环流”问题时必须考虑的核心因素。美国 Blumberg 和 Oey^[159]回顾了河口海岸水域环流与混合数学模拟研究的进展及其存在的问题。平面二维模型、垂向二维模型及三维模型均得到了一定程度的应用,但是仍然存在一些制约因素,包括模型在河口近岸水域网格分辨率的问题、垂向上小尺度湍流参数化的问题等。

利用一个三维数学模型,结合 St. Lawrence estuary 夏季的水文实测资料,加拿大 Bourgault^[160]模拟了该河口航道内“河口环流”并分析了水体的剪切不稳定性。此外,作者还建立了一个垂向二维数学模型,据此研究了该河口的“河口环流”与湍流混合特征随河流径流量的变化情况。利用三维数学模型 POM,通过 4 组数值试验,Guo 和 Valle-Levinson^[161]研究了 Chesapeake Bay 中潮汐对“河口环流”和口外羽状流的影响,结果显示:考虑潮汐作用和不考虑潮汐作用下的“河口环流”有明显差异,这是由于潮流能增强混合作用,从而影响了水体的总体层化特征。

美国 Scully 等^[124]采用三维数学模型 ROMS 研究了 Hudson River estuary 中驱动“河口环流”的相关物理机制,结果表明:随潮周期变化的非线性横向环流对“河口环流”有重要影响,并且一般情况下都是增强环流。美国 Li 和 Zhong^[162]采用三维数学模型 ROMS 分析了 Chesapeake Bay 中“河口环流”的涨、落潮与大、小潮变化情况,结果显示:“河口环流”在大、小潮周期内有明显变化,且小潮的“河口环流”较大潮增大约 50%。此外,关于驱动“河口环流”的主要物理机制是斜压梯度^[27]或混合的“潮内不对称性(internal tidal asymmetry)”^[35]仍存有争议,但就部分混合型的 Chesapeake Bay 而言,斜压梯度是驱动“河口环流”的主要机制。美国 Gross 等^[163]利用三维数学模型 TRIM-3D 研究了 San Francisco estuary 的“河口环流”及输移过程,并通过与观测的水流、盐度资料进行对比,获得了良好的精度,且在此基础上展开的输移过程分析表明,在该河口的向海端,“河口环流”是输移的主要驱动力。

美国 Valle-Levinson 等^[164]建立了沿河口横向和纵向的垂向二维数学模型并考虑压力梯度、摩擦力和地转效应的影响,据此研究了“河口环流”在横断面上的分布以及任意地形下的横向环流结构并与 James River estuary 的观测资料进行了对比,结果显示:由于受到科氏力的影响,“河口环流”在横断面上的分布往往会存在不对称现象,而当摩擦力较为明显时,也会在河道两侧出现横向环流。

美国 Lerczak 和 Geyer^[62]利用数学模型 ROMS 建立了理想河口的三维斜压模型且河口横断面均为抛物线型,并考虑了从大潮至小潮的层化强度变化,结果发现:由差异对流引起的横向密度梯度以及地转效应是控制横向环流的主导因素,其影响在适度层化的情形下尤其明显;横向环流的强度存在显著的涨、落潮不对称,即涨潮的横向环流强度明显更高。此外,Lerczak 和 Geyer^[62]结果也显示,由大潮至小潮随着层化的增强,横向环流会有明显减弱,这与 Hudson River estuary 的观测结果刚好相反,其主要原因是该数学模型在垂向上采用了过于简单的湍流零方程,而采用 $k-\omega$ 方程则得到了较为理想的结果。

美国 Cheng 等^[165]采用 ROMS 数学模型并结合 Passaic River estuary 水流、盐度观测资料研究了该河口横向环流的动力特性,认为由“潮汐应变”引起的层化强度的变化是导致横向环流的形态在潮周期内发生变化的重要因素,在高度层化的落潮期间,斜压效应以及混合的不对称性使得横向环流出现了“二元结构”,其中,在上层水体,横向环流表层指向浅滩而底层指向深泓线,而下层水体的横向环流与此方向相反。

美国 Yang 和 Khangaonkar^[166]利用三维数学模型 FVCOM 模拟了 Skagit River estuary 口门附近不同径流、风应力下的平面潮汐环流形态以及盐度层化的情况,该数学模型的动边界格式能够反映口内潮间带的影响,结果显示:该河口的平面环流主要受潮汐、径流控制,潮滩等浅水区的环流显著受到风应力的影响。

6.3 湍流、混合与层化的数学模拟

基于垂向一维河口数学模型,采用 7 种不同的垂向质量、动量混合系数,Nunes Vaz 和 Simpson^[167]预测了河口中层化的时间依赖信号的特性(the time-dependent signal),结果显示:高频率时(涨潮、落潮),层化主要是由“应变(straining)”所致;低频率时(大、小潮),主导层化的是“河口重力环流(estuarine gravitational circulation)”。

美国 Li 等^[168]利用三维数学模型 ROMS 研究了 Chesapeake Bay 径流量差异明显的 2 个年份中该河口的盐度层化情况,并比较了 4 种湍流模型(Mellor-Yamada/ $k-kl$, $k-\epsilon$, $k-\omega$, KPP)的模拟结果,发现水体垂向上的层化程度与湍流模型的类型并无明显联系,但是其对“背景扩散系数”却非常敏感。美国 Warner 等^[169]利用 ROMS 三维数学模型并根据 Hudson River estuary 不同潮汐、径流条件的观测资料研究了该河口的水动力特征与混合过程,结果显示:该模型较好地反映了层化的大、小潮变化以及垂向上的盐度分布,但对底部粗糙度与垂向稳定函数十分敏感。荷兰 De Boer 等^[147]利用数学模型 Delft-3D 的三维水动力模块建立了一个理想化模型,在此基础上研究了 Rhine ROFI 大、小潮的层化对垂向水流结构的影响,结果发现:在层化较为明显的小潮期间,向陆水流及“潮汐应变”明显增强,相应的表、底层潮流椭圆转向相反,垂向上的椭圆率的变化也与涡黏性系数存在一定联系。美国 Stacey 等^[170]建立了包含二阶湍流模型的一维河口数学模型,并利用该模型研究了潮内的周期性层化对“河口环流”形成的影响,结果显示:潮内层化的涨、落潮不对称性将导致湍流混合出现不对称分布,由此导致的余环流与“河口环流”的形式相同且量级接近,但受层化潮相变化的影响较为明显。美国 MacCready 等^[171]利用三维数学模型 ROMS 研究了 Columbia River estuary 及其羽状流区域的混合特征,该模型综合考虑了径流、潮汐、风应力等因素,而模拟的水流、温度、盐度等也与观测资料符合良好,在此基础上,他们通过一个潮平均的单位体积能量平衡方程研究了该水域的动力机制。

6.3.1 主要进展 IX: 三维势能差异方程

在研究河口混合与层化的“势能差异方程”方面,由英国 Simpson^[114]到 Simpson 等^[40],从仅仅考虑垂向过程逐渐发展到包括垂向和水平过程共同作用,即纵向一维。该理论体系已逐渐得到完善,但仍存在局限性。德国 Burchard 和 Hofmeister^[172]和荷兰 de Boer 等^[173]采用海水密度的对流扩散方程导出了“三维势能差异方程”,从而进一步发展了混合与层化的“势能差异”理论。

将 Burchard 和 Hofmeister^[172]中的三维势能差异方程展开,得到:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \varphi}{\partial t} = & \underbrace{-\frac{\partial(\bar{u}\varphi)}{\partial x}}_{A_U} - \underbrace{\frac{\partial(\bar{v}\varphi)}{\partial y}}_{A_V} + \underbrace{\frac{g}{D} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x} \cdot \int_{-h}^{\eta} z \bar{u} dz}_{B_U} + \underbrace{\frac{g}{D} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial y} \cdot \int_{-h}^{\eta} z \bar{v} dz}_{B_V} - \underbrace{\frac{g}{D} \int_{-h}^{\eta} \left(\eta - \frac{D}{2} - z \right) \bar{u} \cdot \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x} dz}_{C_U} - \\
 & \underbrace{\frac{g}{D} \int_{-h}^{\eta} \left(\eta - \frac{D}{2} - z \right) \bar{v} \cdot \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial y} dz}_{C_V} - \underbrace{\frac{g}{D} \int_{-h}^{\eta} \left(\eta - \frac{D}{2} - z \right) \bar{w} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial z} dz}_{D} + \underbrace{\frac{\rho_0}{D} \int_{-h}^{\eta} P_b dz}_{E} - \underbrace{\frac{\rho_0}{2} (P_b^s + P_b^b)}_F + \\
 & \underbrace{\frac{g}{D} \int_{-h}^{\eta} \left(\eta - \frac{D}{2} - z \right) Q dz}_{G} + \underbrace{\frac{g}{D} \int_{-h}^{\eta} \left(\eta - \frac{D}{2} - z \right) \nabla_h (K_h \nabla_h \rho) dz}_{H}, \quad (15)
 \end{aligned}$$

式中, A_U 是 u 方向平流项; A_V 是 v 方向平流项; B_U 是 u 方向水深平均应力; B_V 是 v 方向水深平均应力; C_U 是非平均应力; C_V 是非平均应力; D 是垂直平流项; E 是垂直混合项; F 是表层、底层浮力通量; G 是内源项; H 是水平湍流输移散度; K_h 是水平涡扩散率; ∇_h 水平梯度算子。鉴于该方程不仅包括了垂向搅动、纵向“潮汐应变”, 还考虑横向“潮汐应变”、水平对流和扩散等多种因素的影响, 成为数学模型研究河口混合与层化机制的有效工具。此后, “三维势能差异方程”已在多个河口、潟湖得到应用^[174-177]。

Chant 和 Wilson^[61] 的次生流理论和 Simpson^[114], Burchard 和 Hofmeister^[172] 的势能差异理论已经被应用在理想、真实的河口^[65-66, 165, 178]。通过观测和分析, Nidzieko 等^[65] 提出了 3 种横向环流模式: 1) 充分混合情况下曲率产生的二层螺旋流; 2) 层化强情况下密度驱动的二层环流以及介于两者之间的环流; 3) 三层环流。Becherer 等^[66] 研究表明德国 Wadden Sea 属于充分混合情况下曲率产生的二层螺旋流。

6.3.2 主要进展 X: 湍流能耗散率 ϵ 与数学模拟

英国 Simpson 等^[179] 根据 Irish Sea 分别处于混合与层化状态下的观测站一个潮周期的湍流能耗散率观测资料, 利用 Mellor-Yamada 2.0^[180] 及 Mellor-Yamada 2.2^[181] 湍流模型建立垂向一维数学模型对水体湍流能耗散率的潮周期分布进行了模拟, 结果基本反映了湍流能耗散率的量级、 M_4 周期性特征与垂向上的相位滞后现象, 且发现在中间水层可能存在一个局部的湍流动能来源。

英国 Simpson 等^[182] 利用 Rippeth 等^[87] 的实测资料建立了垂向一维数学模型, 并采用 $k-\epsilon$ 湍流模型模拟了湍流能耗散率 ϵ 的时空特征, 模拟结果较好地反映了湍流能耗散率在涨、落潮周期内的不对称分布特点; 此外, 模型通过分析剪切生成率、浮力生成率与湍流能耗散率之比随潮周期的变化情况, 发现涨潮结束时刻的 B/ϵ 出现了负值, 表明该时刻出现了“过度应变”并增强了垂向上的混合。根据 Rhine ROFI 实测的湍流能耗散率^[88], 基于 Mellor-Yamada 2.0^[180] 及 Mellor-Yamada 2.2^[181] 湍流模型的垂向一维数学模型, 英国 Souza 等^[183] 模拟了湍流能耗散率分布, 模拟结果也较好地反映了湍流能耗散率的 M_4 周期分布、涨落潮不对称等基本规律。通过一个理想河口的垂向二维数学模型, 美国 Li 等^[184] 采用“大涡模拟 (large eddy simulation, LES)”的方法, 研究了层化状态下的水平密度梯度对湍流的影响, 结果发现: 湍流强度主要受剪切作用的控制, 而“潮汐应变”却是导致湍流混合在涨、落潮期间不对称分布的主要因素。基于 Rhine ROFI 河口在 1999 年的实测湍流资料, 德国 Fischer 等^[185] 利用 GETM 数学模型、 $k-\epsilon$ 湍流模型与二阶代数模型^[186] 研究了径流、潮汐、风作用下 Rhine 河口湍流能耗散率及相关物理量的变化特征, 模拟结果较好地反映了湍流能耗散率的时空分布特点, 如时间上明显的周期性、空间上明显的表、底层差异等; 此外, 模拟结果还显示, Rhine 河口湍流能耗散率的分布主要受水流剪切的控制, 其空间分布与梯度 Ri 数存在明显的对应关系。最后, 值得一提的是, “大涡模拟”也被用于潮汐河口不对称性潮汐混合与层化的研究^[184, 187], 这也是近年来的主要进展之一。

7 潮汐河口的分类

为了研究潮汐河口的层化和重力环流, 许多学者提出了各种不同类型数学公式, 主要基于具有物理重要性的参数: 由河流推导出的“每个单位宽度浮力通量 (the buoyancy flux per unit width) $(\Delta\rho/\rho)gQ_f/b$ ”和“潮流速度平方根 (the rms tidal velocity U)”。基于笔者的兴趣, 以下简单介绍。

7.1 河口数 (estuary number)/the Canter-Cremers number

根据 Fischer^[53], Bowman 和 Esalias^[188], Harleman 和 Abraham^[189], Harleman 和 Ippen^[190] 定义了河口数:

$$E = \frac{P_t U_0^2}{gdQ_f T_t}, \quad (16)$$

式中, Q_f 为淡水流量。

根据 Savenije^[191], 河口数(estuary number)称为 the Canter-Cremers number:

$$N = \frac{Q_f T}{P_t}. \quad (17)$$

7.2 河口 Ri_E 数(estuarine Richardson number)

受 Ellison 和 Turner^[192]的“圆管理查森数(the pipe Richardson number)”的启发, Fischer^[53]提出了河口 Ri 数(estuarine Richardson number):

$$Ri_E = g \Delta \rho Q_f / \rho b U^3. \quad (18)$$

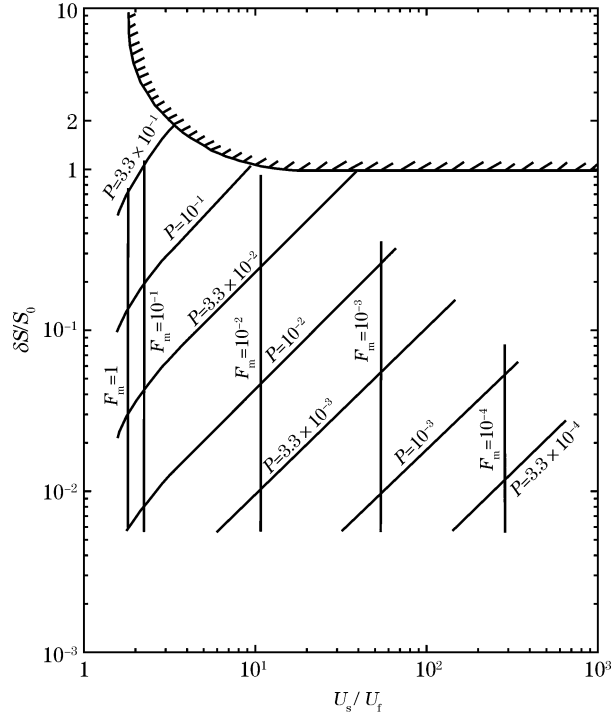
Fischer 等^[193]将其稍改为

$$R = (\Delta \rho / \rho) g Q_f / W U_t^3. \quad (19)$$

Lin 等^[194]应用河口 Ri 数(式(18))半定量地研究瓯江河口的层化。

7.3 Hansen 和 Rattray^[32]层化-环流图

为了理解世界河口物理学及其普适性,可以采用无量纲数对河口进行分类。潮汐河口物理学英文文献中,最为经典是 Hansen 和 Rattray^[32]层化-环流图(图 16)。



注: U_s 是表层纵向时间平均速度, U_t 是河口的横截面单位面积的河流流量; S 是盐度;
 S_0 是初始盐度; P 是表示环流与盐度分布耦合的参数; F_m 是密度弗洛德数

图 16 Hansen 和 Rattray^[32]层化-环流图选例

Fig.16 An example of Hansen-Rattray^[32] stratification-circulation diagram

此外,在 Hansen 和 Rattray^[32]的河口分类中,还考虑了其他参数,即: $\Delta \rho$ (河流水与海水的密度之差), U_t (潮流速度平方根) 和 U_d (密度速度)。密度速度 U_d :

$$U_d = \sqrt{g D \Delta \rho / \rho}, \quad (20)$$

式中, D 为河口深度。

7.4 Geyer 和 MacCready^[8] 河口分类图

2016 年, 恰逢“Hansen 和 Rattray^[32] 层化-环流图 (Stratification-Circulation Diagram)”50 周年, 是否应该对这一分类方法梳理、修改? 这也引起河口物理海洋学家的思考。例如, 美国 Geyer 和 MacCready^[8] 采用与 Hansen 和 Rattray^[32] 不同的 2 个参数, 即: 弗洛德数 (Fr) 和混合参数 (M), 对世界主要潮汐河口进行了分类 (图 17)。 M 的定义, 见式 (3)。

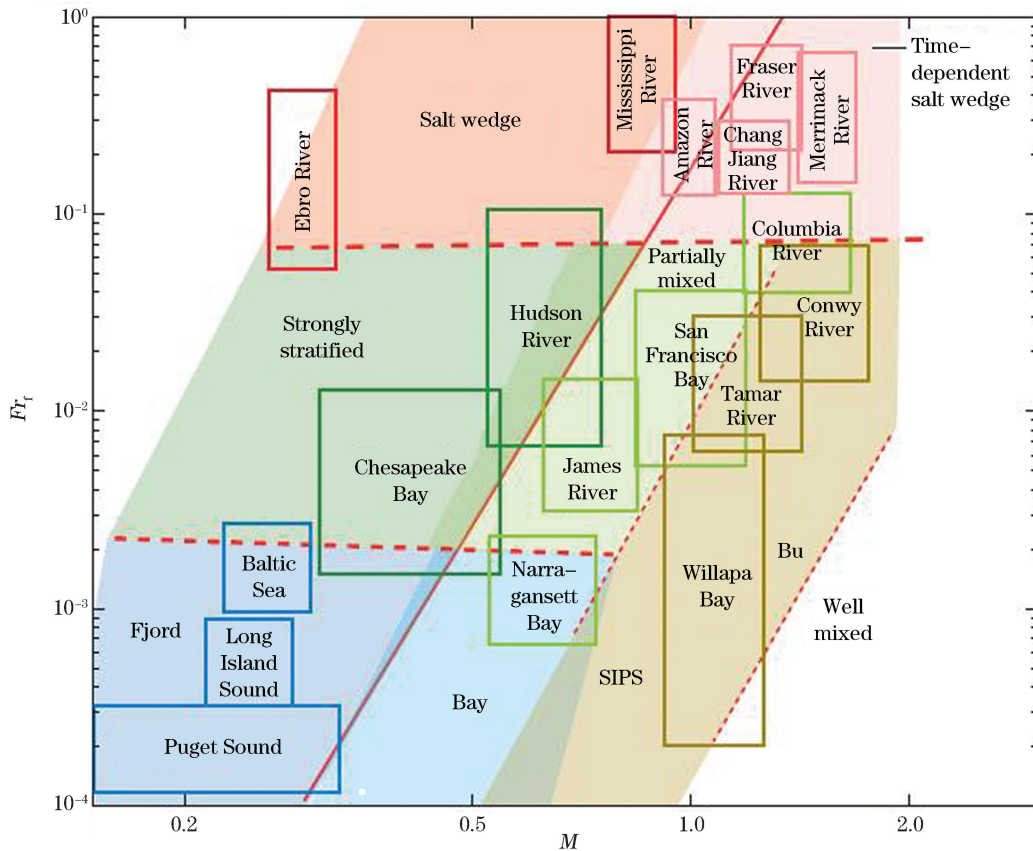


图 17 河口分类的新图^[8]

Fig.17 New diagram of estuarine classification^[8]

潮汐河口究竟如何分类? 笔者认为, 此仍是潮汐河口物理学挑战性的科学难题。

8 结 语

本文简要回顾了国外潮汐河口环流、湍流、混合与层化的物理学, 指出了主要的研究进展:

- 1) 经典的河口环流由重力环流和潮汐应变环流或重力 ESCO 环流和潮汐 ESCO 环流构成。
- 2) 具有曲率的弯道中的横向环流, 由各种不同物理机制所致, 对纵向河口环流有重要的影响。
- 3) 流体力学分层流中剪切湍流的理论加深了人们对潮汐河口湍流、混合的物理学的认识。
- 4) 势能差异方程可以帮助理解潮汐河口混合与层化的三维变化。
- 5) 湍流的现场观测取得了一定成果, 仍是十分困难、重要的。
- 6) 各种数学模型有助于理解潮汐河口的环流、湍流、混合与层化的物理学。

河口混合效率也是本文的相关内容, 限于篇幅, 暂略去。

9 展 望

最后,结合笔者学习欧美文献的粗浅体会、兴趣,提出以下今后研究内容:

- 1) 潮汐应变环流是否普遍存在潮汐河口? 若存在,其量级有多大?
- 2) 重力 ESCO 环流与潮汐 ESCO 环流是否普遍存在潮汐河口? 若存在,其量级有多大?
- 3) 区分、统一“重力环流”与“潮汐应变环流”的混合参数的应用以及进一步探讨。
- 4) 潮汐捕集与平面环流的相互关系究竟如何?
- 5) 横向环流形成的物理机制进一步探讨。
- 6) 具有曲率的弯道横向环流涡度方法的研究。
- 7) 潮汐河口的纵向环流与横向环流的相互关系究竟如何? 横向环流究竟如何影响纵向环流?
- 8) 河口水体中湍流究竟是否存在惯性子区 Kolmogorov-5/3 湍流能量谱?
- 9) Smith^[105] 的 Ri 数在潮汐河口纵向分散中的应用。
- 10) 内部潮流不对称性在潮汐河口环流与混合中的作用究竟如何? 如何定量分析?
- 11) “势能差异”理论与“潮汐应变”在潮汐河口环流与混合中的作用究竟如何? 如何定量分析?
- 12) 水平 Richardson 数/Simpson 数与(纵向)层化类型的关系如何?
- 13) 稳定剪切分层流密度界面处的湍流混合物理机制究竟如何?
- 14) 河口环流的数学模拟的进一步探讨。
- 15) 横向环流的数学模拟的进一步探讨。
- 16) 潮汐河口混合的数学模拟仍需进一步探讨。
- 17) “三维势能差异方程”是否能在潮汐河口混合与层化研究中得以应用?
- 18) 湍动能耗散率 ϵ 与数学模拟的进一步研究。
- 19) 潮汐河口究竟如何分类? 现有的分类方法哪种更好?

致谢:上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院的邵聪颖、李为和李兆辉帮助重新绘制本文中的图。本文部分内容取自上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院的邵聪颖和李为硕士学位论文的文献综述。

参考文献 (References):

- [1] PRITCHARD D W. Estuarine hydrography[M]//LANDSBERG H E. Advances in Geophysics. New York: Academic Press, 1952a, 1: 243-280.
- [2] KETCHUM B H. Circulation in estuaries[C]//Proceedings of the Third International Conference on Coastal Engineering, Cambridge, Massachusetts, USA. 1952: 65-76.
- [3] PRITCHARD D W. What is an estuary: physical view point[M]//LAUFF G H. Estuaries. Washington D C: American Association for Advancement of Science, Publication No. 83, 1967a: 3-5.
- [4] BOWDEN K F. Circulation and diffusion[M]//LAUFF G H. Estuaries. Washington D C: American Association for the Advancement of Science, Publication No. 83, 1967b:15-36.
- [5] BEARDSLEY R C, BOICOURT W C. On estuarine and continental shelf circulation in the middle Atlantic Bight[M]//WARREN B A, WUNSCH C. Evolution of physical oceanography. Cambridge, Massachusetts, USA: The MIT Press, 1981: 198-233.
- [6] BOWDEN K F. Turbulent mixing in estuaries[J]. Ocean Management, 1981, 6: 117-135.
- [7] DYER K R. Circulation and mixing in stratified estuaries[J]. Marine Chemistry, 1991, 32: 111-120.
- [8] GEYER W R, MACCREADY P. The estuarine circulation[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2014, 46: 175-197.
- [9] MACCREADY P, GEYER W R. Advances in estuarine physics[J]. Annual Review of Marine Science, 2010, 2: 35-58.
- [10] FLEMING J. Observations on the junction of the fresh water of rivers with the salt water of the sea[J]. Transactions of the Royal Socie-

ty of Edinburgh, 1818, VIII(II): 507-513.

- [11] PRITCHARD D W. The physical hydrography of estuaries and some applications to biological problems[C]//Transactions of the 16th Northern American Wildlife Conference, Wildlife Management Institution, Washington D C, USA, 1951: 368-376.
- [12] PRITCHARD D W. Salinity distribution and circulation in the Chesapeake Bay estuarine system[J]. Journal of Marine Research, 1952b, XI(1): 106-123.
- [13] PRITCHARD D W. The physical structure, circulation, and mixing in a coastal plain estuary[R]. Technical Report of the Chesapeake Bay Institute 3 Reference 52-2, the Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland, USA, 1952c: 55.
- [14] ROCHFORD D J. Studies in Australian estuarine hydrology. I: Introductory and comparative features[J]. Australian Journal of Marine and Freshwater Research, 1951, 2(1): 1-117.
- [15] BOWDEN K F. Circulation and mixing in the Mersey estuary[J]. Proceedings of the International Association of Scientific Hydrology Publication No. 51, Helsinki, Finland, 1960: 352-360.
- [16] BOWDEN K F. Estuaries and coastal waters[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1962, A265(1322): 320-325.
- [17] ABOOD K A. Circulation in the Hudson estuary[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 1974, 250: 39-111.
- [18] KEULEGAN G H. Interfacial instability and mixing in stratified flows[J]. Journal of Research of the National Bureau of Standards, 1949, 43: 487-500.
- [19] STOMMEL H, FARMER H G. On the nature of estuarine circulation[R]. Part I (Chapter 3 and 4). Massachusetts, USA, Woods Hole Oceanographic Institution Technical Report Reference No. 52-88, 1952: 88.
- [20] KETCHUM B H. The exchange of fresh and salt waters in tidal estuaries[J]. Journal of Marine Research, 1951, 10(1): 18-38.
- [21] HACHEY H B. Movements resulting from mixing of stratified waters[J]. Journal of the Biological Board of Canada, 1934, 1(2): 133-143.
- [22] TULLY J. Oceanography and prediction of pulp mill pollution in Alberni inlet[J]. Bulletin of Fisheries Research Board of Canada, 1949, 83: 1-169.
- [23] CAMERON W M. On the Dynamics of Inlet Circulations[D]. San Diego, California, USA: Scripps Institution of Oceanography, University of California, 1951.
- [24] STOMMEL H. Recent developments in the study of tidal estuaries[R]. Massachusetts, USA, Woods Hole Oceanographic Institution Technical Report Reference No. 51-33, 1951.
- [25] PRITCHARD D W. A study of the salt balance in a coastal plain estuary[J]. Journal of Marine Research, 1954, 13: 133-144.
- [26] PRITCHARD D W. Estuarine circulation patterns[J]. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1955, 81: 717-727.
- [27] PRITCHARD D W. The dynamic structure of a coastal plain estuary[J]. Journal of Marine Research, 1956, 15: 33-42.
- [28] PRITCHARD D W. The equations of mass continuity and salt continuity in estuaries[J]. Journal of Marine Research, 1958, 17: 412-423.
- [29] PRITCHARD D W. Observations of circulation in coastal plain estuaries[M]//LAUFF G H. Estuaries. Washington D C: American Association for Advancement of Science, Publication No. 83, 1967b: 37-44.
- [30] MACCREADY P. Calculating estuarine exchange flow using isohaline coordinates[J]. Journal of Physical Oceanography, 2011, 41, 1116-1124.
- [31] HANSEN D V, RATTRAY M Jr. Gravitational circulations in straits and estuaries[J]. Journal of Marine Research, 1965, 23(2): 104-122.
- [32] HANSEN D V, RATTRAY M Jr. New dimensions in estuary classification[J]. Limnology and Oceanography, 1966, 11(3): 319-326.
- [33] RATTRAY M Jr, HANSEN D V. A similarity solution for circulation in an estuary[J]. Journal of Marine Research, 1962, 20: 121-133.
- [34] CHATWIN P C. Some remarks on the maintenance of the salinity distribution in estuaries[J]. Estuarine and Coastal Marine Science, 1976, 4: 555-566.
- [35] JAY D A, SMITH J D. Residual circulation in shallow estuaries: 1. highly stratified, narrow estuaries[J]. Journal of Geophysical Research, 1990a, 95(C1): 711-731.
- [36] JAY D A, SMITH J D. Residual circulation in shallow estuaries: 2. weakly stratified and partially mixed, narrow estuaries[J]. Journal of Geophysical Research, 1990b, 95(C1): 733-748.
- [37] MCCARTHY R K. Residual currents in tidally dominated, well-mixed estuaries[J]. Tellus, 1993, 45A(4): 325-340.
- [38] MACCREADY P. Estuarine adjustment to changes in river flow and tidal mixing[J]. Journal of Physical Oceanography, 1999, 29(4): 708-726.
- [39] HANSEN D V. Salt balance and circulation in partially mixed estuaries[M]//LAUFF G H. Estuaries. Washington D C: American Asso-

- ciation for Advancement of Science, Publication No. 83, 1967: 45-51.
- [40] 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.
- [41] JAY D A, MUSIAK J D. Particle trapping in estuarine tidal flows[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(C10): 20445-20461.
- [42] BURCHARD H, BAUMERT H. The formation of estuarine turbidity maxima due to density effects in the salt wedge. a hydrodynamic process study[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1998, 28(2): 309-321.
- [43] BURCHARD H, HETLAND R D. Quantifying the contributions of tidal straining and gravitational circulation to residual circulation in periodically stratified tidal estuaries[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2010, 40(6): 1243-1262.
- [44] CHENG P, VALLE-LEVINSON A, DE SWART H E. A numerical study of residual circulation induced by asymmetric tidal mixing in tidally dominated estuaries[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(C01017): 1-13. DOI: 10.1029/2010JC006137.
- [45] TROWBRIDGE J H. A simple description of the deepening and structure of a stably stratified flow driven by a surface stress[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(C10): 15529-15543.
- [46] DIJKSTRA Y M, SCHUTTELAARS H M, BURCHARD H. Generation of exchange flows in estuaries by tidal and gravitational eddy viscosity-shear covariance (ESCO)[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2017, 122: 4217-4237.
- [47] SCHIJF J B, SCHONFELD J C. Theoretical considerations on the motion of salt and fresh water[C]//Proceedings of the Minnesota International Hydraulics Convention, 5th Congress I.A.H.R.: a Joint Meeting of International Association for Hydraulic Research and Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers, University of Minnesota-Minneapolis, Minnesota, USA, September 1-4, 1953: 321-333.
- [48] OKUBO A. Effect of shoreline irregularities on streamwise dispersion in estuaries and other embayments[J]. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1973, 6: 213-224.
- [49] FISCHER H B. Mixing and dispersion in estuaries[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1976, 8(1): 107-133.
- [50] MACVEAN L, STACEY M. Estuarine dispersion from tidal trapping: a new analytical framework[J]. *Estuaries and Coasts*, 2011, 34: 45-59.
- [51] CHANT R J. Estuarine secondary circulation[M]//VALLE-LEVINSON A. Contemporary issues in estuarine physics. New York: Cambridge University Press, 2010:100-124.
- [52] ROZOVSKI I L. Flow of water in bends of open channels[M]. Academy of Science of the Ukrainian SSR. Israel Program for Scientific Translation, Jerusalem, 1961: 1-233.
- [53] FISCHER H B. Mass transport mechanisms in partially stratified estuaries[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1972, 53: 671-687.
- [54] SMITH R. Longitudinal dispersion of a buoyant contaminant in a shallow channel[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1976, 78: 677-688.
- [55] SMITH R. Long term dispersion of contaminants in small estuaries[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1977, 82: 129-146.
- [56] DYER K R. Lateral circulation effects in estuaries[M]//OFFICER C B. Estuaries, Geophysics and the Environment. Washington D C: National Academy of Sciences, 1977: 22-29.
- [57] KJERFVE B, PROEHL J A. Velocity variability in a cross-section of a well-mixed estuary[J]. *Journal of Marine Research*, 1979, 37(3): 409-418.
- [58] NUNES VAZ R A, SIMPSON J H. Axial convergence in a well-mixed estuary[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1985, 20(5): 637-649.
- [59] GEYER W R. Three dimensional tidal flow around headlands[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98: 955-966.
- [60] CHANT R J. Secondary circulation in a region of flow curvature: relationship with tidal forcing and river discharge[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(C9): 14-1-14-11. DOI: 10.1029/2001JC001082.
- [61] CHANT R J, WILSON R E. Secondary circulation in a highly stratified channel[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(23): 207-215.
- [62] LERCZAK J A, GEYER W R. Modeling the lateral circulation in straight, stratified estuaries[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2004, 34(6): 1410-1428.
- [63] WINTERWERP J C, WANG Z B, VAN DER KAAIJ T, et al. Flow velocity profiles in the Lower Scheldt estuary[J]. *Ocean Dynamics*, 2006, 56: 284-294.
- [64] GEYER W R, SCULLY M E, RALSTON D K. Quantifying vertical mixing in estuaries[J]. *Environment Fluid Mechanics*, 2008, 8: 495-509.
- [65] BECHERER J, STACEY M, UMLAUF L, et al. Lateral circulation generates flood tide stratification and estuarine exchange flow in a curved tidal inlet[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2015, 45: 638-656.
- [66] NIDZIEKO N, HENCH J, MONISMITH S. Lateral circulation in well-mixed and stratified estuarine flows with curvature[J]. *Journal*

of Physical Oceanography, 2009, 39: 831-851.

- [67] SEIM H E, GREGG M C. The importance of aspiration and channel curvature in producing strong vertical mixing at a sill[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102: 3451-3472.
- [68] OTT M W, GARRETT C. Frictional estuarine flow in Juan de Fuca Strait, with implications for secondary circulation[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(C8): 15657-15666.
- [69] LACY J R, MONISMITH S G. Secondary currents in a curved, stratified, estuarine channel[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(C12): 31283-31302.
- [70] PHILLIPS O M, SHYU J H, SALMUN H. An experiment on boundary mixing- mean circulation and transport rates[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1986, 173: 473-499.
- [71] BECHERER J. Estuarine circulation in well-mixed tidal inlets[D]. Rostock, Germany: Universität Rostock, 2014.
- [72] TAYLOR G I. Diffusion by continuous movements[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1921, A20: 196-212.
- [73] TAYLOR G I. Statistical theory of turbulence. Parts I-IV[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 1935, A151: 421-478.
- [74] PRANDTL L. Bericht über untersuchungen zur ausgebildeten turbulenz[J]. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, 1925, 5: 714-718.
- [75] KOLMOGOROV A N. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers[J]. Doklady Akademii Nauk Sssr, 1941a, 30: 9-13 (reprinted in Proceedings of the Royal Society of London, 1991, A434(1890): 9-13).
- [76] KOLMOGOROV A N. Dissipation of energy in locally isotropic turbulence[J]. Doklady Akademii Nauk Sssr, 1941c, 32: 16-18 (reprinted in Proceedings of the Royal Society of London, 1991, A434(1890): 15-17).
- [77] BATCHELOR G K. The theory of homogeneous turbulence[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1953.
- [78] TURNER J S. Buoyancy effect in fluids[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1979.
- [79] TURNER J S. Small-scale mixing processes[M]//WARREN B A, WUNSCH C. Evolution of physical oceanography. Cambridge, MA, USA: The MIT Press, 1981: 236-263.
- [80] MOUM J N, SMYTH W D. Upper ocean mixing processes[M]//STEELE J H, TUREKIAN K K. Encyclopedia of ocean sciences, Salt Lake City, USA: Academic Press, 2001: 3093-3100. DOI: 10.1006/rwos.2001.0156.
- [81] THORPE S A. An introduction to ocean turbulence[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [82] WATSON A J, LEDWELL J R, MESSIAS M-J, et al. Rapid cross-density ocean mixing at mid-depths in the Drake Passage measured by tracer release[J]. Nature, 2013, 501: 408-413.
- [83] PROUDMAN J. On the turbulence of a tidal current[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 1940, 176(967): 449-468.
- [84] BOWDEN K F, PROUDMAN J. Observations on the turbulent fluctuations of a tidal current[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 1949, 199(1058): 311-327.
- [85] BOWDEN K F, FAIRBAIRN L A. Further observations of the turbulent fluctuations in a tidal current[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 1952, 244(883): 335-356.
- [86] BOWDEN K F, HOWE M R. Observations of turbulence in a tidal current[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1963, 17: 271-284.
- [87] RIPPETH T P, FISHER N R, SIMPSON J H. The cycle of turbulent dissipation in the presence of tidal straining[J]. Journal of Physical Oceanography, 2001, 31(8): 2458-2471.
- [88] FISHER N R, SIMPSON J H, HOWARTH M J. Turbulent dissipation in the Rhine ROFI forced by tidal flow and wind stress[J]. Journal of Sea Research, 2002, 48(4): 249-258.
- [89] SIMPSON J H, WILLIAMS E, BRASSEUR L H, et al. The impact of tidal straining on the cycle of turbulence in a partially stratified estuary[J]. Continental Shelf Research, 2005, 25(1): 51-64.
- [90] GRANT H L, MOILLIET A, STEWART R W. A spectrum of turbulence at very high Reynolds number[J]. Nature, 1959, 184: 808-810.
- [91] GRANT H L, MOILLIET A. The spectrum of a cross-stream component of turbulence in a tidal stream[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1962, 12: 237-240.
- [92] STEWART R W, GRANT H L. Early measurements of turbulence in the ocean: motives and techniques[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1999, 16: 1467-1473.
- [93] LONG R R. Do tidal-channel turbulence measurements support $k^{-5/3}$?[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2003, 3: 109-127.
- [94] ECKART C. An analysis of the stirring and mixing processes in incompressible fluids[J]. Journal of Marine Research, 1948, 7: 265-275.
- [95] LINDEN P F. Mixing in stratified fluids[J]. Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics, 1979, 13(1): 3-23.

- [96] KENT R E, PRITCHARD D W. A test of mixing length theories in a coastal plain estuary[J]. *Journal of Marine Research*, 1959, 18(1/3): 62-72.
- [97] RICHARDSON L F. The supply of energy from and to atmospheric eddies[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 1920, 97(686): 354-373.
- [98] SCHLICHTING H. Hauptaufsätze. turbulenz bei wä rmeschichtung[J]. *ZAMM Journal of Applied Mathematics and Mechanics: Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 1935, 15(6): 313-338.
- [99] HOLZMAN B. The influence of stability on evaporation[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1943, 44(1): 13-18.
- [100] BOWDEN K F. The mixing processes in a tidal estuary[J]. *International Journal of Air and Water Pollution*, 1963, 7: 343-356.
- [101] BRUNT D. An investigation of periodicities in rainfall pressure and temperature at certain European stations[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1927, 53(221): 1-30.
- [102] TAYLOR G I. Effect of variation in density on the stability of superposed streams of fluid[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 1931, A32(820): 499-523.
- [103] MILES J W. On the stability of heterogeneous shear flows[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1961, 10: 496-508.
- [104] MUNK W H, ANDERSON E R. Notes on the theory of thermocline[J]. *Journal of Marine Research*, 1948, 7: 276-295.
- [105] SMITH R. Buoyancy effects upon longitudinal dispersion in wide well-mixed estuaries[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1980, 296(1421): 467-496.
- [106] BOWDEN K F. Circulation and diffusion[M]//LAUFF G H. *Estuaries*. Washington D C: American Association for the Advancement of Science Publication No. 83, 1967b: 15-36.
- [107] CHEN W-B, LIU W-C. Modeling investigation of asymmetric tidal mixing and residual circulation in a partially stratified estuary[J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2016, 16: 167-191.
- [108] JAY D A. Internal asymmetry and an harmonicity in estuarine flows[C]//PARKER B B. *Progress in Tidal Hydrodynamics*. New York: John Wiley & Sons, 1991: 521-543.
- [109] JAY D A, MUSIAK J D. Internal tidal asymmetry in channel flows: origins and consequences[C]//PATTIARATCHI C. *Mixing in estuaries and coastal seas. Coastal and estuarine studies*. Washington D C: AGU, 1996, 50: 211-249.
- [110] JAY D A. *Estuarine variability*[M]//VALLE-LEVINSON A. *Contemporary issues in estuarine physics*. New York: Cambridge University Press, 2010: 62-99.
- [111] HAAS L W. The effect of the spring-neap tidal cycle on the vertical salinity structure of the James, York and Rappahannock rivers, Virginia, U.S.A.[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1977, 5(4): 485-496.
- [112] SIMPSON J H, HUNTER J R. Fronts in the Irish Sea[J]. *Nature*, 1974, 250: 404-406.
- [113] SIMPSON J H, ALLEN C M, MORRIS N C G. Fronts on the continental shelf[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1978, 83 (C9): 4607-4614.
- [114] SIMPSON J H. The shelf-sea fronts: implications of their existence and behavior[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1981, A302: 531-546.
- [115] BOWDEN K F, FAIRBAIRN L A. A determination of the frictional forces in a tidal current[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1952, 214(1118): 371-392.
- [116] OFFICER C B. *Physical Oceanography of Estuaries*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1976.
- [117] SIMPSON J H, SOUZA A J. Semidiurnal switching of stratification in the region of freshwater influence of the Rhine[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(C4): 7037-7044.
- [118] SHARPLES J, SIMPSON J H, BRUBAKER J M. Observations and modelling of periodic stratification in the Upper York River Estuary, Virginia[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1994, 38(3): 301-312.
- [119] NEPF H M, GEYER W R. Intratidal variations in stratification and mixing in the Hudson estuary[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(C5): 12079-12086.
- [120] WANG X H, WANG H J. Tidal straining effect on the suspended sediment transport in the Huanghe (Yellow River) Estuary, China [J]. *Ocean Dynamics*, 2010, 60(5): 1273-1283.
- [121] LUND-HANSEN L C, SKYUM P, CHRISTIANSEN C. Modes of stratification in a semi-enclosed bay at the North Sea-Baltic Sea transition[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1996, 42(1): 45-54.
- [122] SOUZA A J, SIMPSON J H. Controls on stratification in the Rhine ROFI system[J]. *Journal of Marine System*, 1997, 12: 311-323.
- [123] LACY J R, STACEY M T, BURAU J R, et al. Interaction of lateral baroclinic forcing and turbulence in an estuary[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(C3): 34-1-34-15. DOI: 10.1029/2002JC001392.
- [124] SCULLY M E, GEYER W R, LERCZAK J A. The influence of lateral advection on the residual estuarine circulation: a numerical

- modeling study of the Hudson River estuary[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2009, 39(1): 107-124.
- [125] SIMPSON J H, SHARPLES J. Dynamically-active models in the prediction of estuarine stratification[C]//PRANDLE D. Dynamics and exchanges in estuaries and the coastal zone, Springer-Verlag, 1991: 101-113.
- [126] STACEY M T. Turbulent mixing and residual circulation in a partially stratified estuary[D]. Stanford, California, USA; Stanford University, 1996.
- [127] MONISMITH S G, BURAU J R, STACEY M T. Stratification dynamics and gravitational circulation in northern San Francisco Bay [M]//HOLLIBAUGH J T. San Francisco Bay: the ecosystem. San Francisco, California, USA; Seventy-Fifth Annual Meeting of the Pacific Division/American Association for the Advancement of Science, 1996: 123-153.
- [128] GEYER W R, RALSTON D K. The dynamics of strongly stratified estuaries[M]//WOLANSKI E, McLUSKY D S. Treatise on estuarine and coastal science. Waltham MA, USA; Academic Press 2011, 2: 37-51.
- [129] VERSPECHT F, RIPPETH T P, HOWARTH M J, et al. Processes impacting on stratification in a region of freshwater influence: Application to Liverpool Bay[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(C11022): 1-12. DOI: 0.1029/2009JC005475.
- [130] STACEY M T, RIPPETH T P, NASH J D. Turbulence and stratification in estuaries and coastal seas[M]//WOLANSKI E, McLUSKY D S. Treatise on estuarine and coastal science. Waltham MA, USA; Academic Press, 2011, 2: 9-35.
- [131] BURCHARD H, SCHUTTELAARS H M. Analysis of tidal straining as driver for estuarine circulation in well-mixed estuaries[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2012, 42(2): 261-271.
- [132] BECHERER J, BURCHARD H, FLÖSER G, et al. Evidence of tidal straining in well-mixed channel flow from micro-structure observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38:L17611-1-L17611-5. DOI: 10.1029/2011GL049005.
- [133] BOWDEN K F. Horizontal mixing in the sea due to a shearing current[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1965, 21(2): 83-95.
- [134] GEYER W R, LAVERY A C, SCULLY M E, et al. Mixing by shear instability at high Reynolds number[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37, L22607-1-L22607-5. DOI: 10.1029/2010GL045272.
- [135] SMYTH W D, NASH J D, MOUM J N. Differential diffusion in breaking Kelvin-Helmholtz billows[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2004, 35: 1004-1022.
- [136] DEFANT A. Untersuchungen über die Gezeitenerscheinungen in Mittel-und Rand-meeren, in Buchten und Kanälen[J]. *Denkschriften Der Kaiserlichen Akademie Der Wissenschaften. Wien. Mathematisch-Naturewissenschaftliche Klasse*, 1919, 86: 57-174.
- [137] HANSEN W. Theorie zur errechnung des wasserstandes und der strömungen in randmeeren nebst anwendungen1[J]. *Tellus*, 1956, 8 (3): 287-300.
- [138] REID R O, BODINE B R. Numerical model for storm surges in Galveston Bay[J]. *Journal of Waterways and Harbours Division*, 1968, 94(1): 33-57.
- [139] LEENDERTSE J J, ALEXANDER R C, LIU S K. A three-dimensional model for estuaries and coastal seas: volume I, principles of computations[R]. Santa Monica, California, USA; Rand Corporation, 1973.
- [140] BLUMBERG A F, MELLOR G L. A coastal ocean numerical model[C]//SÜNDERMANN J, HOLZ K-P. Mathematical modelling of estuarine physics. New York; Springer-Verlag, 1980: 202-219.
- [141] PHILLIPS N A. A coordinate system having some special advantages for numerical forecasting[J]. *Journal of Meteorology*, 1957, 14: 184-185.
- [142] SIMONS T J. Verification of numerical models of Lake Ontario, part I. circulation in spring and early summer[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1974, 4: 507-523.
- [143] LYNCH D R, GRAY W G. A wave equation model for finite element tidal computations[J]. *Computers and Fluids*, 1979, 7(3): 207-228.
- [144] CASULLI V, CHENG R T. Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 1992, 15(6): 629-648.
- [145] LUYTEN P J, JONES J E, PROCTOR R, et al. COHERENS-a COupled Hydrodynamical-Ecological model for REgional and Shelf seas; user documentation[R]. MUMM Report, Management Unit of the Mathematical Methods of the North Sea, Operational Directorate Natural Environment, Belgium, 1999: 1-914.
- [146] BLUMBERG A F, MELLOR G L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model[M]//HEAPS N S. Three dimensional coastal ocean models. Washington D C, USA; AGU, 1987: 1-16.
- [147] DE BOER G J, PIETRZAK J D, WINTERWERP J C. On the vertical structure of the Rhine region of freshwater influence[J]. *Ocean Dynamics*, 2006, 56(3/4): 198-216.
- [148] GALLAND J C, GOUTAL N, HERVOUET J M. TELEMAC: a new numerical model for solving shallow water equations[J]. *Advances in Water Resources*, 1991, 14(3): 138-148.

- [149] LUETTICH R A Jr, WESTERINK J J, SCHEFFNER N W. ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves, coasts, and estuaries. Report 1. theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL[R]. Vicksburg MS, USA: Coastal Engineering Research Center, Waterways Experiment Station, US Army Corps of Engineers, 1992.
- [150] COURANT R. Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations[J]. Bulletin of the American Mathematical Society, 1943, 49(1): 1-23.
- [151] TURNER M J, CLOUGH R W, MARTIN M C, et al. Stiffness and deflection analysis of complex structures[J]. Journal of the Aeronautical Sciences, 1956, 23(9): 805-823.
- [152] CLOUGH R W. The finite element method in plane stress analysis[C]//Proceedings of the 2nd ASCE Conference on Electronic Computation, Pittsburg, 1960.
- [153] ZIENKIEWICZ O C, CHEUNG Y K. Finite elements in the solution of field problems[J]. The Engineer, 1965, 220: 507-510.
- [154] GROTKOP G. Finite element analysis of long-period water waves[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1973, 2(2): 147-157.
- [155] CHEN C, LIU H, BEARDSLEY R C. An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20: 159-186.
- [156] FRINGER O B, GERRITSEN M, STREET R L. An unstructured-grid, finite-volume, nonhydrostatic, parallel coastal ocean simulator[J]. Ocean Modelling, 2006, 14(3): 139-173.
- [157] BLUMBERG A F. Numerical model of estuarine circulation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1977, 103(3): 295-310.
- [158] BLUMBERG A F. The influence of density variations on estuarine tides and circulations[J]. Estuarine and Coastal Marine Science, 1978, 6: 209-215.
- [159] BLUMBERG A F, OEY L-Y. Modeling circulation and mixing in estuaries and coastal oceans[J]. Advances in Geophysics, 1985, 28(A): 525-547.
- [160] BOURGAULT D. Circulation and mixing in the St. Lawrence estuary[D]. Montreal, Canada: McGill University, 2001.
- [161] GUO X, VALLE-LEVINSON A. Tidal effects on estuarine circulation and outflow plume in the Chesapeake Bay[J]. Continental Shelf Research, 2007, 27(1): 20-42.
- [162] LI M, ZHONG L J. Flood-ebb and spring-neap variations of mixing, stratification and circulation in Chesapeake Bay[J]. Continental Shelf Research, 2009, 29(1): 4-14.
- [163] GROSS E, MACWILLIAMS M, KIMMERER W. Three-dimensional modeling of tidal hydrodynamics in the San Francisco estuary[J]. San Francisco Estuary and Watershed Science, 2009, 26(1): 217-220.
- [164] VALLE-LEVINSON A, REYES C, SANAY R. On the effects of bathymetry, friction and rotation on estuary/ocean exchange[J]. Journal of Physical Oceanography, 2003, 33: 2375-2393.
- [165] CHENG P, WILSON R E, CHANT R J, et al. Modeling influence of stratification on lateral circulation in a stratified estuary[J]. Journal of Physical Oceanography, 2009, 39(9): 2324-2337.
- [166] YANG Z, KHANGAONKAR T. Modeling tidal circulation and stratification in Skagit River estuary using an unstructured grid ocean model[J]. Ocean Modelling, 2009, 28(1): 34-49.
- [167] NUNES VAZ R A, SIMPSON J H. Turbulence closure modeling of estuarine stratification[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(C8): 16143-16160.
- [168] LI M, ZHONG L J, BOICOURT W C. Simulations of Chesapeake Bay estuary: sensitivity to turbulence mixing parameterizations and comparison with observations[J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110(C12004): 1-22. DOI: 10.1029/2004JC002585.
- [169] WARNER J C, GEYER W R, LERCZAK J A. Numerical modeling of an estuary: a comprehensive skill assessment[J]. Journal of Geophysical Research, 2005, 110(C05001), DOI: 10.1029/2004JC002691.
- [170] STACEY M T, FRAM J P, CHOW F K. Role of tidally periodic density stratification in the creation of estuarine subtidal circulation [J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113(C08016): 1-13. DOI: 10.1029/2007JC004581.
- [171] MACCREADY P, BANAS N S, HICKEY B M, et al. A model study of tide- and wind-induced mixing in the Columbia River estuary and plume[J]. Continental Shelf Research, 2009, 29(1): 278-291.
- [172] BURCHARD H, HOFMEISTER R. A dynamic equation for the potential energy anomaly for analysing mixing and stratification in estuaries and coastal seas[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2008, 77(4): 679-687.
- [173] DE BOER G J, PIETRZAK J D, WINTERWERP J C. Using the potential energy anomaly equation to investigate tidal straining and advection of stratification in a region of freshwater influence[J]. Ocean Modelling, 2008, 22(1): 1-11.
- [174] HOFMEISTER R, BURCHARD H, BOLDING K. A three-dimensional model study on processes of stratification and de-stratification in the Limfjord[J]. Continental Shelf Research, 2009, 29(11): 1515-1524.

- [175] MARQUES W C, FERNANDES E H L, MOLLER O O. Straining and advection contributions to the mixing process of the Patos Lagoon coastal plume, Brazil[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(C06019): 1-23. DOI: 10.1029/2009JC005653.
- [176] MARQUES W C, FERNANDES E H L, ROCHA L A O. Straining and advection contributions to the mixing process in the Patos Lagoon estuary, Brazil[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(C03016): 1-11. DOI: 10.1029/2010JC006524.
- [177] BERMÚDEZ M, PIETRZAK J D, CEA L, et al. A numerical study of mixing and stratification dynamics in the Ria de Arousa estuary (NW Spain) during summer[C]//*Proceedings of the 7th International Conference on Coastal Dynamics*, 24-28 June 2013, Bordeaux, France, 2013: 161-172.
- [178] CHENG P, VALLE-LEVINSON A. Influence of lateral advection on residual currents in microtidal estuaries[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2009, 39: 3177-3190.
- [179] SIMPSON J H, CRAWFORD W R, RIPPETH T P, et al. The vertical structure of turbulent dissipation in shelf seas[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1996, 26(8): 1579-1590.
- [180] MELLOR G.L. AND YAMADA T. A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1974, 31(7): 1791-1806.
- [181] DELEERSNIJDER E, LUYTEN P. On the practical advantages of the quasi-equilibrium version of the Mellor and Yamada level 2.5 closure applied to marine modelling[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 1994, 18: 281-287.
- [182] SIMPSON J H, BURCHARD H, FISHER N R, et al. The semi-diurnal cycle of dissipation in a ROFI: model-measurement comparisons[J]. *Continental Shelf Research*, 2002, 22(11): 1615-1628.
- [183] SOUZA A J, FISHER N R, SIMPSON J H, et al. Effects of tidal straining on the semidiurnal cycle of dissipation in the Rhine region of freshwater influence: Comparison of model and measurements[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(C01011): 1-10. DOI: 10.1029/2006JC004002.
- [184] LI M, TROWBRIDGE J, GEYER R. Asymmetric tidal mixing due to the horizontal density gradient[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2008, 38: 418-434.
- [185] FISCHER E, BURCHARD H, HETLAND R D. Numerical investigations of the turbulent kinetic energy dissipation rate in the Rhine region of freshwater influence[J]. *Ocean Dynamics*, 2009, 59(5): 629-641.
- [186] CHENG Y, CANUTO V M, HOWARD A M. An improved model for the turbulent PBL[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2002, 59(9): 1550-1565.
- [187] LI M, RADHAKRISHNAN S, PIOMELLI U, et al. Large-eddy simulation of the tidal-cycle variations of an estuarine boundary layer [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(C08003): 1-18. DOI: 10.1029/2009JC005702.
- [188] BOWMAN M J, ESALIAS W E. Fronts, stratification, and mixing in Long Island and Block Island Sounds[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1981, 86(C5): 4260-4264.
- [189] HARLMAN D R F, ABRAHAM G. One dimensional analysis of salinity intrusion in the Rotterdam Waterway[R]. Delft, Netherlands: Delft Hydrodynamics Laboratory Publication 44, 1966.
- [190] HARLMAN D R F, IPPEN A T. Two-dimensional aspects of salinity intrusion in estuaries: analysis of salinity and velocity distributions[R]. US Army Technical Bulletin No. 13, Committee on Tidal Hydraulics, Corps Engineers, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, 1967: 1-38.
- [191] SAVENIJE H H G. Salinity and tides in alluvial estuaries[M]. Amsterdam: Elsevier Science, 2005.
- [192] ELLISON T H, TURNER J S. Turbulent entrainment in stratified flows[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1959, 6: 423-448.
- [193] FISCHER H B, LIST E J, KOH R C Y, et al. *Mixing in inland and coastal waters*[M]. San Diego, California, USA: Academic Press, 1979.
- [194] LIN W B, WANG Y G, RUAN X-H, et al. Modeling residual circulation and stratification in Oujiang River estuary[J]. *China Ocean Engineering*, 2012, 26(2): 351-362.

The Physics of Circulation, Turbulence, Mixing and Stratification in Tidal Estuaries

SHI John Zhong^{1,2,3}, XIONG Long-bing¹, NI Zhi-hui¹, LI Xia¹

(1. *School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;*

2. *State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai 200030, China;*

3. *Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200030, China*)

Abstract: This paper briefly presents an overview of the physics of circulation, turbulence, mixing and stratification in tidal estuaries, including their physical concepts, contents, approaches and results. Significant progresses have been highlighted. Both the effects of suspended sediment and wind waves have not been taken into account. Classical estuarine circulation has been challenged because of the occurrence of tidal straining. Estuarine circulation is caused by both gravitational circulation and tidal straining circulation. The proposed concept of “Eddy viscosity-Shear COvariance (ESCO)” may further enable the identifications of gravitational ESCO circulation and tidal ESCO circulation, respectively. Understanding of lateral circulation, especially within the curved channel, has been furthered. Application of vorticity approach to lateral circulation shows that the latter has been caused by the different physical mechanisms and has an important effect on along-channel estuarine gravitational circulation. Turbulent shear flow in stratified fluids has enhanced our understanding of the physics of turbulence and mixing in tidal estuaries. The potential energy anomaly equation seems to enable our quantitative understanding of the three-dimensional temporal and spatial variability of mixing and stratification in tidal estuaries.

Key words: estuary; circulation; turbulence; mixing; stratification

Received: December 17, 2016