

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2012.05.010

乐清湾海洋环境季节特征及水交换过程研究

罗 锋^{1,2}, 廖光洪³, 盛建明⁴, 杨成浩³

(1. 江苏省海涂研究中心, 江苏 南京 210036; 2. 解放军理工大学气象学院, 江苏 南京 211101;
3. 国家海洋局第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012; 4. 国家海洋局海涂研究中心, 江苏 南京 210036)

摘要:基于 4 个航次的实测资料,分析乐清湾的温(度)盐(度)、潮汐、潮流和余流等海洋环境季节分布特征,并采用环境流体动力学模型研究乐清湾的水交换过程,提出一个计算海湾水体平均置换率的简单公式,以直观描述湾内水体与湾外水体交换的过程特征。结果表明,乐清湾的水交换能力与湾内温(度)盐(度)水平及断面分布特征一致,从口门到湾顶,水交换能力差别较大,连屿至打水山断面以南的水体基本 1 个月可完全交换,连屿至打水山断面以北的水体 2 个月仍然无法交换到湾口水平。

关键词:海洋环境;季节特征;水交换;乐清湾;环境流体动力学模型

中图分类号:P714 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-6933(2012)05-0048-04

Seasonal characteristics of marine environment and water exchange in Yueqing Bay

LUO Feng^{1,2}, LIAO Guang-hong³, SHENG Jian-ming⁴, YANG Cheng-hao³

(1. Tidal Flat Research Center of Jiangsu Province, Nanjing 210036, China;
2. Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China;
3. Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China;
4. Tidal Flat Research Center, State Oceanic Administration, Nanjing 210036, China)

Abstract: Based on observed data from four cruises, the seasonal distributions of temperature, salinity, tides, currents, and residual currents of Yueqing Bay were analyzed. The EFDC was used to study the water exchange processes in the bay. A simple formula, which can directly describe the exchange process of the water bodies inside and outside the bay, was proposed to compute the average exchange rate. The results show that the water exchange capability is in accordance with temperature, salinity, and distribution characteristics of sections. The water exchange capability varied significantly from mouth to top of the bay. The water bodies to the south of the Lianyu-Dashuishan section could be fully exchanged, while those to the north could not be exchanged as well as that at the bay mouth within two months.

Key words: marine environment; seasonal characteristic; water exchange; Yueqing Bay; EFDC

乐清湾位于浙江省南部瓯江口北侧,是三面环陆、南面朝海的葫芦状半封闭型海湾,潮汐作用显著。由图 1 可见,乐清湾湾口岛屿众多,以玉环西南大岩头—小门岛—乐清歧头咀一线与外海相通,岸线长达 184.7 km,南北纵深 42 km,东西向平均宽度约 10 km,中部连屿至打水山断面最窄,约 4.5 km,海域总面积约为 463.6 km²。乐清湾东部深槽发育,水深一般在 10~30 m,最大水深达 100 m;西部为水

基金项目:国家海洋公益性行业科研专项经费资助项目(201205005、201005006);中国博士后科学基金(20100481459)
作者简介:罗锋(1979—),男,博士,主要从事海洋环境及河口近岸物质输运研究。E-mail:fluo@hhu.edu.cn

下浅滩,宽度自 10 m 等深线至岸边可达 6 ~ 10 km。水下地貌主要包括水下浅滩、潮流冲刷槽和潮汐汉道潮沟。大荆溪、水涨溪、白溪、清江、淡溪、灵溪、江下等注入湾内,各河溪口门处形成了大小不一的冲积-洪积小平原,海湾流域总集雨面积 1470 km²,多年平均径流量为 10.29 亿 m³[1]。

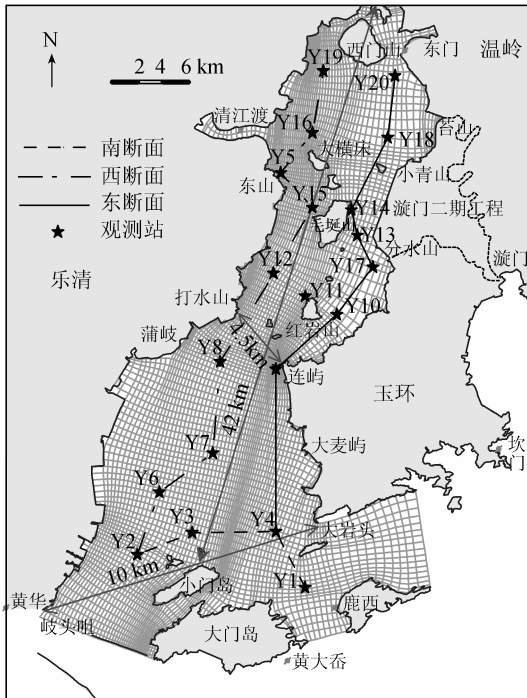


图 1 乐清湾计算网格和观测站位分布

海湾的海洋环境特征和水交换能力对确定海洋环境容量、制定海洋功能区划、评估海岸工程环境影响等均有重要参考价值,对海湾污染的预防、治理和预测也有指导意义。乐清湾是典型半封闭海湾,水交换能力有限,污染形势十分严峻,在我国闽浙沿海具有代表性。近年对乐清湾的相关研究主要涵盖动力环境^[2-4]、水质及生态环境^[5]、海岸资源环境开发及管理^[6]等方面,而对有关乐清湾海洋环境特征和水交换能力的系统研究甚少。因此,本研究基于 2008—2009 年 4 个季节航次 20 个大面观测站的温度、盐度资料以及 3 个连续观测站的潮位和海流数据,系统分析和研究乐清湾的温度、盐度、潮位、潮流和余流等海洋环境季节分布特征和规律,在此基础上,采用环境流体动力学模型^[7](environmental fluid dynamics code,以下简称 EFDC)对乐清湾的水交换过程进行研究。

1 乐清湾的海洋环境季节特征

为获得乐清湾海洋环境季节分布特征,分别在 2008 年 7 月(夏)、2008 年 10 月(秋)、2009 年 1 月(冬)、2009 年 4 月(春)开展了 4 个季节的海上调查

航次,观测站位见图 1,其中 Y4、Y14 和 Y15 为连续观测站和大面观测站,其余均为大面观测站。

1.1 温(度)盐(度)分布特征

受太阳辐射影响,乐清湾海水温度夏高冬低,季节变化显著。4 个航次的调查结果显示,乐清湾最高水温表层是 32℃(夏季,Y18)、底层是 30.9℃(夏季,Y20),而最低水温表底层均为 7.6℃(冬季,Y19)。春、夏季打水山至连屿断面以南海域的表层呈现明显的低温区,乐清湾口门的东侧温度比西侧低,温度梯度大致为东西向,断面以北区域为温度相对较高的区域。春季温度梯度较大,夏季温度分布则较均匀,秋季较其他季节而言温度分布较复杂。乐清湾口东侧和清江东南区域有明显的高温区,而乐清湾湾顶及东侧表现为低温区,且温度变化较大,湾口中部和连屿西侧还分别出现一个低温核。冬季与春、夏季相反,打水山至连屿断面以南区域的水温较高,且分布较均匀,北面区域的水温则较低。就 4 个季节底层的水温而言,乐清湾春季南面呈现低温区,温度梯度东西方向,北部区域温度相对较高,温度梯度南北方向;夏季与春季相似,高温区主要出现在乐清湾北部,南部为低温区,乐清湾南部温度梯度较大,接近东西方向,北部温度梯度较小,近似南北方向;秋、冬季乐清湾的温度分布态势则与春、夏季相反,主要体现在湾的北部为低温区,温度梯度较大,南部为高温区,温度梯度较小。如图 1 所示,把调查站位划分成东、西和南 3 个断面,根据实测数据分析温(度)盐(度)断面分布特征。南断面的春、夏季水温表现为西高东低、表高底低,垂向梯度明显;秋、冬季则东高西低,水平梯度明显而垂向梯度不显著。西断面的春、夏季温度水平梯度较弱,垂向梯度比较明显;秋、冬季的温度水平梯度显著,断面北端(Y12—Y19)表现特别明显,垂向分布较均匀。东断面的春、夏季水温表现北高南低,秋、冬季水温分布水平梯度明显,南高北低。

4 个季节乐清湾表层和底层的盐度分布情况是:冬、春季盐度较低,夏、秋季盐度较高。乐清湾口门终年均表现为高盐区,从湾口往湾内盐度逐渐降低,到湾顶盐度最低。乐清湾盐度分布规律与其周围的径流、浙江沿岸流和外海的高盐水有关。以打水山至连屿断面为界,乐清湾南部及西侧的浅水区比乐清湾东侧的盐度要低,且由于乐清湾的西南侧淡水明显,春、夏季盐度水平梯度明显,而乐清湾南部秋、冬季的盐度分布较均匀。这种规律与两种因素有关:① 乐清湾东侧为深水区,外海水通过潮波进入湾内,而潮波的传播速度东岸比西岸快,② 春、夏季雨量充沛,受径流量影响。乐清湾的北部区域

在 4 个季节盐度都较小,且盐度梯度都较大。分析南断面、西断面和东断面 3 个断面的盐度特征:南断面春、夏、秋季盐度分布特征相似,东高西低,盐度水平梯度显著;西断面春季 Y7—Y12 观测站由表层至底层均表现为高盐水体,夏季高盐水体面积减小,断面的南端(Y2)和北端(Y19)出现明显的低盐水体,这与夏天径流量的增加有关,秋季北端(Y5—Y19)的低盐水体进一步扩大和加深,冬季北端则几乎由高盐的水体占据;东断面北端(Y14—Y20)四季均呈现低盐水体,南端(Y4—Y13)则由高盐水体支配,春、夏季该高盐水体垂向梯度较明显,存在一定的层化现象,而秋、冬季盐度的垂向分布则表现较均匀。

乐清湾温度和盐度断面分布特征可综合为:南断面温度表层比底层高,西侧比东侧高;盐度分布则表现为表层低于底层,西侧低于东侧。这种温(度)盐(度)的分布格局在春、夏季尤其明显,表明在乐清湾的口门存在河口重力环流,即表层低盐水向东运动,而高盐的外海水则由底层向西入侵。从东断面和西断面情况来看,乐清湾从南至北存在着性质不同的水团。

1.2 温(度)盐(度)属性分布特征

20 个大面观测站 4 个季节的温度、盐度调查数据表明:春季,乐清湾东侧及中部水体性质相近,温度较低,盐度较高;西南角的 Y2、Y3 和 Y6 观测站表、底层水体盐度差较大;乐清湾顶部的水体温度较高,盐度较低。夏季,乐清湾南部和东侧呈现高温高盐水体,湾东北角(Y18、Y19 和 Y20)与西南角(Y2)水体温度更高、盐度最低;湾中部东西两侧的水体性质相似,介于上述两个水体属性之间。秋、冬季,乐清湾温(度)盐(度)属性分布没有规律。秋季乐清湾口南部的水体属性基本一致,表现为高温高盐;位于东北角的 Y18 和 Y20 观测站的盐度较低,水温较高。冬季,由 Y12、Y10 和 Y11 观测站连线以南的水体属性几乎一致,表现为高盐、高温,由 Y12、Y10 和 Y11 观测站连线以北的水体温度和盐度均较低,但与其他三季比,整个湾的盐度南北变化均较小,可能与枯冬季的径流量小关系密切。

1.3 潮汐、潮流及余流特征

潮汐方面,由连续观测站 Y4、Y14 和 Y15 的准调和分析结果显示,乐清湾潮汐为正规半日潮型,从湾口至湾顶潮汐作用逐渐增强,半日潮类型潮汐增强作用更为明显,浅水分潮强度增大,湾口(Y4)浅水分潮振幅明显低于湾顶(Y14、Y15)。潮流方面,受地形的影响,各观测站位往复流特征明显,Y4 处于海面开阔水深大的潮流进出通道,涨潮流呈西北方向流入湾口中部海域,落潮流呈东南方向,清晰地

显示出该站位往复流的特征,且涨潮流速小于落潮流速;Y14 位于茅埭岛和漩门二期大坝中间,涨潮流呈东北偏北方向以北向流为主,落潮流呈西南偏南方向,涨潮流速小于落潮流速;Y15 西边为较深的航道,东边为由茅埭岛、毛担山和大横床组成的不连续弧形岛链,涨潮流呈东北向,落潮流为西南向,涨潮流速小于落潮流速。3 个连续观测站位春、夏、秋季观测结果与冬季观测结果相似。余流方面,准调和分析结果表明,各观测站位半日分潮占绝对优势,Y4 各分潮的椭圆倾角均朝西北方向,Y14 和 Y15 各分潮的椭圆倾角均朝东北方向,Y14 站位椭圆倾角比 Y15 向北偏移。4 个季节航次 Y4、Y14 和 Y15 站位的 M₂ 分潮的潮流椭圆倾角和椭圆长轴长度均变化不大,Y4 为西北方向,Y14 为东北偏北方向,Y15 为东北方向。乐清湾的潮位、潮流和余流特征详见文献[3]。

2 乐清湾的水交换过程

在研究分析乐清湾的温(度)盐(度)分布,潮汐、潮流和余流特征的基础上,采用 EFDC^[7] 模拟乐清湾水交换过程,通过湾内水示踪浓度计算湾内各点水体被外海水置换情况。EFDC 已在很多水域有过成功的应用^[8-10],包括耦合温盐输运的三维水动力过程、水质与富营养化耦合、泥沙及有毒污染物输运与预测、完整的近场混合带模拟和水面追踪等。与 POM(princeton ocean model)等模型相比,EFDC 边界处理技术更灵活,计算稳定性更强,能快速耦合水动力、泥沙和水质模块,在河口海岸区域的适应性好,可快速解决模型网格绘制及水深等海洋参数插值问题。模拟过程中水平方向采用正交曲线网格拟合乐清湾复杂的岸线和地形(图 1),垂直方向采用 Sigma 变换坐标,垂向混合系数采用 M-Y 紊动封闭模型,数值格式采用高效 3 层时间半隐式解,对流项处理采用 COSMIC 标量对流格式,浅水区域采用干湿网格处理动边界,具体离散求解可参考文献[7]。开边界采用水位控制,由开发的东中国海潮波模型导出的潮位值插值得到开边界处的调和常数。水动力计算结果表明,受潮汐和地形作用共同影响,进入湾内的潮波发生浅水变形,潮差由湾口至湾顶渐增,潮流运动以往复流为主,涨潮流流向为 NW(西北)向,水流呈漫滩状,流速缓慢,落潮流流向为 SE(东南)向,滩水归槽入海,落潮流速大于涨潮流速,落潮历时短于涨潮历时^[4]。

在不改变上述水动力条件计算情况下,自 2009 年 1 月 1 日 0 时起,模式运行 70 d,假设湾内均匀分布初始质量浓度为 1.0 mg/L 的溶解态保守性示踪

物质,开边界入流时的质量浓度为 0 mg/L,运行潮波模式,当潮波模拟稳定后启动溶解态保守性示踪物质的对流-扩散模式,并通过示踪剂浓度计算湾内各点水体交换情况。由计算结果可知,乐清湾水体纵向混合较好,表、底层示踪剂浓度的分布差异小,保守性示踪物质的浓度值代表的不仅是其本身的浓度高低,同时也是此时当地水体交换率的直观显示。

在水交换能力研究的常用方法中,通常将海湾看做一个箱体,假设箱外水进入箱内后能立即与整个箱内水体完全混合,利用观测资料(某种物质在湾内、湾外及海湾口门的浓度值)计算得到半交换时间、平均滞留时间等,通过这些时间概念描述水交换能力。这种方法的提出主要是在 20 世纪 70—80 年代计算机和数值模拟水平还较低的时候。随着计算机水平和数值模式的改进,现可采用保守性示踪物质的输移扩散数学模型,模拟每个计算网格保守性示踪物质的扩散输移以及稀释的快慢,进而得到整个海湾的水交换特征。

假设湾内水在不同时刻被外海水置换的平均比率为 $R(t)$,本研究采用下式计算乐清湾水体平均置换率:

$$R(t) = \frac{\left(\sum_{i=1}^n A_i(t) H_{i0} C_{i0} - \sum_{i=1}^n A_i(t) H_i(t) C_i(t) \right)}{\sum_{i=1}^n A_i(t) H_{i0} C_{i0}} \quad (1)$$

式中: H_{i0} 、 C_{i0} 分别为第 i 个计算网格初始时刻的总水深和示踪剂质量浓度, $A_i(t)$ 、 $H_i(t)$ 和 $C_i(t)$ 分别为第 i 个计算网格 t 时刻对应的面积、总水深和示踪剂质量浓度。计算结果如图 2 所示。

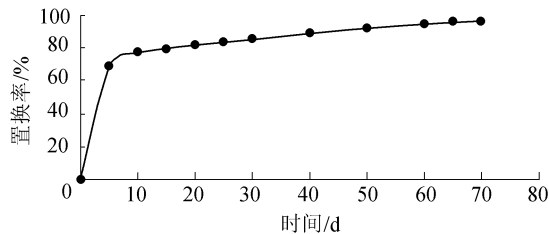


图2 乐清湾水体平均置换率

乐清湾的水体交换主要是由鹿西岛两侧流入的外海水体与湾内水体的交换,以及湾口门西侧附近的湾内水体与瓯江口径流冲淡水的水体交换。从口门到湾顶,乐清湾水交换能力差别较大。根据乐清湾水体平均置换率(图2),乐清湾口门附近 90% 以上的水体被外海置换所需时间不到 5 d,而此时湾顶示踪剂的质量浓度未有太大改变;到 15 d 左右,80% 的湾内水体被外海水置换;40 d 后,90% 湾内水体被置换;70 d 后,置换率达 97%。乐清湾的水交

换能力与湾内温(度)盐(度)水平及断面分布特征一致,以最窄的连屿至打水山断面为界,断面以南的水体 1 个月基本可以完全交换,断面以北的水体交换 2 个月仍无法达到湾口的水平。乐清湾温度、盐度的分布特征也同样说明断面以北的水体主要受季节影响,与外海水交换混合能力很差。

3 结 语

基于 4 个航次实测资料分析了乐清湾的温(度)盐(度)、潮汐、潮流和余流等海洋环境季节分布特征,并采用 EFDC 研究了乐清湾的水交换过程。结果表明,乐清湾水域中的水体交换能力差别很大,其水交换能力与湾内温(度)盐(度)水平及断面分布特征一致,说明温(度)盐(度)分布和梯度可从另一个方面反映乐清湾水体交换能力。

参考文献:

- [1] 《中国海湾志》编纂委员会. 中国海湾志: 第 6 分册 [M]. 北京: 海洋出版社, 1993: 110-187.
- [2] 毛龙江, 殷勇, 郭伟, 等. 浙江乐清湾现代沉积与悬沙质量浓度分布特征及意义 [J]. 海洋科学, 2005, 29(10): 93-96.
- [3] 杨成浩, 廖光洪, 罗锋. 乐清湾的潮位、潮流和余流特征 [J]. 海洋学研究, 2010, 28(2): 1-12.
- [4] 罗锋, 廖光洪, 杨成浩, 等. 乐清湾水交换特征研究 [J]. 海洋学研究, 2011, 20(2): 79-88.
- [5] 陈雷, 徐兆礼, 陈胜, 等. 2007 年乐清湾富营养化空间特征及其成因分析 [J]. 上海海洋大学学报, 2010, 19(1): 91-97.
- [6] 李春平, 张灵杰, 董丽晶. 浙江乐清湾海岸带功能区划分与海洋产业发展 [J]. 海洋通报, 2003, 22(5): 38-43.
- [7] HAMRICK J M. A three-dimensional environmental fluid dynamics computer code: theoretical and computational aspects [R]. Williamsburg: College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, 1992.
- [8] 李瑞杰, 严以新, 宋志尧. 太平水道悬移质输运数学模型 [J]. 泥沙研究, 2003(4): 46-51.
- [9] 罗锋, 李瑞杰, 廖光洪, 等. 水文气象条件变化对长江口盐水入侵影响研究 [J]. 海洋学研究, 2011, 29(3): 8-17.
- [10] LUO Feng, LI Rui-jie. 3D water environment simulation for north Jiangsu offshore sea based on EFDC [J]. J Water Resource and Protection, 2009(1): 41-47.

(收稿日期: 2011-04-25 编辑: 彭桃英)