

# 象山港氮、磷营养盐环流和分布规律的研究\*

吕华庆<sup>1</sup> 常抗美<sup>1</sup> 石钢德<sup>2</sup>

(1. 浙江海洋学院海洋科学学院 舟山 316004; 2. 宁波市象山港海洋环境监测站 宁波 315141)

**提要** 采用定点监测分析方法,研究了象山港狭湾内设置的六个固定站位 1992—2007 年时间段内的硝酸氮( $\text{NO}_3\text{-N}$ )、亚硝酸氮( $\text{NO}_2\text{-N}$ )、铵氮( $\text{NH}_4\text{-N}$ )和磷酸盐( $\text{PO}_4\text{-P}$ )浓度的监测数据,探讨了象山港狭湾内( $122^\circ00'\text{E}$ 以西)氮、磷营养盐的环流和分布规律。结果表明,(1)除个别年份外,16年内硝酸氮、亚硝酸氮、铵氮和磷酸盐浓度的空间分布,从港顶 1 号站向港口 6 号站呈降低趋势,其中以  $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$  的降低趋势最为明显,而  $\text{NH}_4\text{-N}$  的降低趋势相对较弱。(2)  $\text{NO}_3\text{-N}$  的空间变化规律较为复杂,并且 3 号站的浓度往往达到最大值。(3)无论是平水期(4月)还是丰水期(7月),表层盐度均低于底层,而表层温度高于底层;盐度从港顶 1 号站向港口 6 号站递增,而温度递减。这种分布规律基本上可用余环流模式进行解释,但余环流输运并不是促使营养盐入海的唯一原因,潮振荡的垂向剪切造成的纵向弥散和潮混合亦对营养盐输运有重大贡献。(4)与 1992 年相比,2007 年各站的  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度几乎都增加了一倍,  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度增幅更大,说明象山港的氮、磷污染与日俱增。

**关键词** 象山港,硝酸氮,亚硝酸氮,铵氮,磷酸盐

**中图分类号** P734.4

象山港流域由象山港狭湾、牛鼻山水道和佛渡水道三大部分组成,流域面积为  $1455\text{km}^2$ 。从最新卫星遥感地图数据知,象山港狭湾地处  $121^\circ25'\text{E}$ — $122^\circ00'\text{E}$  和  $29^\circ23'\text{N}$ — $29^\circ49'\text{N}$  之间<sup>1)</sup>。从  $122^\circ00'\text{E}$  向西计算<sup>1)</sup>,它是一个纵长约为  $62.8\text{km}$ 、面积  $563\text{km}^2$  的半封闭海湾,其中水域面积为  $391.8\text{km}^2$ ,滩涂面积为  $171.2\text{km}^2$ ,平均水深  $10\text{m}$ ,港口宽度  $9.5\text{km}$ 。坐落在港口的六横岛把象山港狭湾以外的区域分成了东南侧的牛鼻山水道和西北侧的佛渡水道。牛鼻山水道是连接象山港与东海的重要通道,佛渡水道通过其外侧的条帚门、虾峙门等潮流通道又将象山港与东海相连。象山港流域主要通过这两个水道与外海进行水交换,其年均径流量为  $1.3 \times 10^9 \text{m}^3$  (董礼先等, 1999a, b),其中 60% 的流量集中在 6—9 月份(张丽旭等, 2006)。平水期、丰水期和枯水期分别在 4 月、7 月和

11 月左右(翟滨等, 2007)。港内水产养殖条件良好,是浙江省最大的水产养殖基地(Lü *et al.*, 2008)。二十多年来,港内工农业、养殖业迅猛发展。由于缺乏科学管理,工农业污水以及养殖业产生的污染物大量滞留港内,使整个港的水质处于严重的富营养化状态,赤潮频发(郑云龙等, 2000)。象山港表层沉积物中氮、磷含量较高(尹维翰等, 2007),已对底栖生物产生生态毒性。水产养殖是本海域氮、磷元素超标的主要原因,也是控制营养盐在空间和时间上变化的主要因素(尹维翰等, 2007)。

象山港沿岸山溪小川发达,其中最大的径流来自港顶的鳧溪,是象山港平均年径流总量的  $1/7$ — $1/8$ (陈伟等, 1999)。与该港生态环境有关的单项观测和研究不少,迄今在中国核心期刊上公开发表的论文已接近 40 篇(不含水产养殖类论文),但综合研究

\* 浙江省教育厅项目“象山港温盐等主要养殖要素时空变化的研究(20061134)”, 2006—2008; 卫星海洋环境动力学国家重点实验室项目“象山港动力环境与营养盐循环研究(SOED0605)”, 2006—2008; 国家“八五”科技攻关专题,象山港水产开发技术(85-14-02-01), 1991—1995。吕华庆, 副教授, E-mail: huaqinglu@yahoo.com.cn

1) M\_map GSHHS 数据库, <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/shorelines/data/gshhs>

收稿日期: 2007-12-27, 收修改稿日期: 2008-02-18

港内营养盐环流的尚未见到,更未见关于营养盐分布的年代际变化的文章发表。作者结合前人的研究,历经三个课题,时间跨度十六年的系统调查,运用环流理论,研究了港内氮、磷营养盐环流和分布的特征,以及这些分布的年代际变化,以期认识港内营养盐环流提供理论基础。

## 1 材料与方法

本文中所涉及的环境监测数据由“象山港温盐等主要养殖要素时空变化的研究”、“象山港动力环境与营养盐循环研究”和“象山港水产开发技术”共三个课题,跨时 16 年所完成。

### 1.1 调查地点

如图 1 所示,在象山港狭湾内(122°00'E 以西)从港顶至港口依次设定 6 个站位,坐标见表 1。

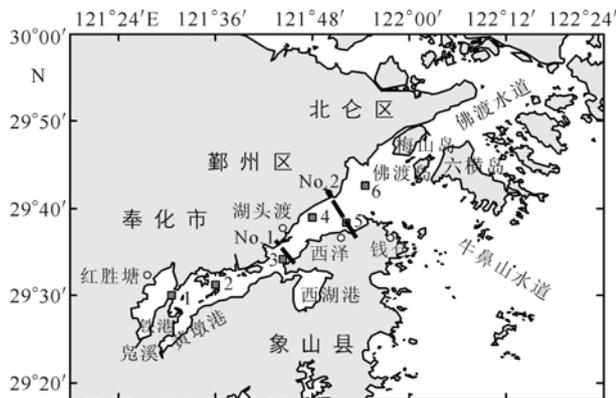


图 1 象山港狭湾内监测站位置

Fig.1 Monitoring stations in Xiangshan Bay

表 1 监测站坐标

Tab.1 The coordinates of monitoring stations

站位编号	经度(°E)	纬度(°N)
1	121.51	29.50
2	121.60	29.52
3	121.74	29.57
4	121.80	29.65
5	121.87	29.64
6	121.91	29.71

### 1.2 调查时间

2006—2007 年为平水期(4 月)和丰水期(7 月),采样深度为 1m。为比较表层与底层营养盐的差别,课题组于同期监测了 1、3、5、6 号站位的底层水体。

2002—2005 年的表层数据摘自张丽旭等(2006),缺 5 号站的数据。现场采样时间为 4—9 月,采样深

度与上述相同,表 2、表 3、表 4、表 5 中数据均为每年六个月的平均值。

1992 年,采样在 2、4、6、7、8 和 10 月份进行,覆盖平水期、丰水期。现场采样时间在高平潮前后 3h 进行,采样深度为 1m。由于 1992 年课题的研究目的与 2006、2007 年有所不同,故采样站位只涉及 1、3、6 号。

1992—2007 年时间段内,表层硝酸氮、亚硝酸氮、铵氮和磷酸盐数据如表 2、表 3、表 4、表 5 所示;2006 年 4、7 月表、底层温度、盐度和硝酸氮对照分别见表 6、表 7。

### 1.3 测定方法

盐度测量,1992 年采用 WUS 感应式盐度计,2002—2007 年采用美国产海鸟 CTD(温度、盐度和深度联合测量仪)。该仪器在未作任何调节的情况下,精度仍可达到 0.005。硝酸氮采用锌粉还原法,亚硝酸氮采用重氮偶氮法,铵氮采用次溴酸钠氧化法,磷酸盐采用磷钼蓝法测定。

## 2 结果

从表 2—表 7,得硝酸氮、亚硝酸氮、铵氮、磷酸盐、温度和盐度的分布规律如下。

由表 2 可知,平水期(4 月)硝酸氮浓度,1992 和 2007 年在 3 号站位达到最大值,分别为 324.5 $\mu\text{g/L}$  和 763.0 $\mu\text{g/L}$ ;丰水期(7 月),1992、2006 和 2007 年 1 号站至 5 号站间硝酸氮浓度分布均匀。2006、2007 年两年 6 号站的值与 5 号站相比有明显减小。2002—2005 年 4 年间,各年 6 个月的平均值分布规律较复杂,其中 2002 年,3 号站硝酸氮含量达到 1011.9 $\mu\text{g/L}$ ,创历史记录,其余各站的值无悬殊差别;2003 年,各站的平均值呈均布状态;2004 年,4 号站的值为最大,达到 647.4 $\mu\text{g/L}$ ,其余各站的值相对较小;2005 年,从港顶 1 号站到港口 6 号站呈递减规律。

由表 3 可知,16 年内,无论是平水期(4 月),还是丰水期(7 月),亚硝酸氮浓度从港顶 1 号站到港口 6 号站基本呈递减规律。各年度丰水期含量均高于平水期(与生物量分布有关,本文不予讨论)。最大值出现于 2007 年丰水期港顶 1 号站(53 $\mu\text{g/L}$ ),最小值出现在 2006 和 2007 年的平水期 6 号站(1 $\mu\text{g/L}$ )。

由表 4 可知,2002—2005 年铵氮浓度的平均值,以及 2006 年 4 月和 2007 年 4、7 月的相应值,从港顶 1 号站到港口 6 号站均基本呈递减规律;而 1992 年 4、7 月和 2006 年 7 月无此规律。但总体上看,变

化幅度较小,分布均匀,与张丽旭等(2005)报道的一致。

由表5可知,2002—2005年6个月磷酸盐平均浓度,以及2006、2007年的平水期(4月)和丰水期(7月)

的磷酸盐浓度,从港顶1号站到港口6号站均基本呈递减规律,而且递减速度有逐年加大的趋势。1992年无此规律,可能是浓度本身较小,而又受偶然因素扰动之故。

表2 1992—2007年象山港狭湾内硝酸盐浓度统计数据( $\mu\text{g/L}$ )  
Tab.2  $\text{NO}_3\text{-N}$  concentration in Xiangshan Bay from 1992 to 2007 ( $\mu\text{g/L}$ )

站位	1992年		2002年	2003年	2004年	2005年	2006年		2007年	
	4月	7月	平均值	平均值	平均值	平均值	4月	7月	4月	7月
1号站	190.6	226.6	683.1	655.9	426.5	627.7	588.0	560.0	622.0	444.0
2号站	—	—	680.5	564.9	535.7	627.9	—	—	—	—
3号站	324.5	222.8	1011.9	619.4	496.7	599.4	619.8	536.0	763.0	473.0
4号站	—	—	665.4	622.9	647.4	561.4	—	—	—	—
5号站	—	—	—	—	—	—	646.0	538.0	700.0	508.0
6号站	273.0	278.4	662.1	614.6	566.2	564.8	624.0	489.0	624.0	432.0

表3 1992—2007年象山港狭湾内亚硝酸盐浓度统计数据( $\mu\text{g/L}$ )  
Tab.3  $\text{NO}_2\text{-N}$  concentration in Xiangshan Bay from 1992 to 2007 ( $\mu\text{g/L}$ )

站位	1992年		2002年	2003年	2004年	2005年	2006年		2007年	
	4月	7月	平均值	平均值	平均值	平均值	4月	7月	4月	7月
1号站	6.7	22.6	29.0	36.9	20.7	27.0	28	40	14	53
2号站	—	—	28.1	37.5	18.4	22.4	—	—	—	—
3号站	2.6	22.3	22.3	20.9	21.0	18.3	7	44	11	11
4号站	—	—	15.3	13.0	20.9	15.2	—	—	—	—
5号站	—	—	—	—	—	—	5	33	2	4
6号站	5.6	8.8	8.1	9.6	8.0	13.6	1	15	1	4

表4 1992—2007年象山港狭湾内铵氮浓度统计数据( $\mu\text{g/L}$ )  
Tab.4  $\text{NH}_4\text{-N}$  concentration in Xiangshan Bay from 1992 to 2007 ( $\mu\text{g/L}$ )

站位	1992年		2002年	2003年	2004年	2005年	2006年		2007年	
	4月	7月	平均值	平均值	平均值	平均值	4月	7月	4月	7月
1号站	21.8	26.0	27.7	29.3	30.7	31.5	28	69	94	12
2号站	—	—	22.5	25.7	45.4	32.0	—	—	—	—
3号站	40.4	29.4	17.4	15.3	31.0	30.5	4	164	28	14
4号站	—	—	23.0	18.8	39.8	29.0	—	—	—	—
5号站	—	—	—	—	—	—	8	19	28	17
6号站	49.5	26.7	20.4	23.5	38.9	26.6	7	36	24	19

表5 1992—2007年象山港狭湾内磷酸盐浓度统计数据( $\mu\text{g/L}$ )  
Tab.5  $\text{PO}_4\text{-P}$  concentration in Xiangshan Bay from 1992 to 2007 ( $\mu\text{g/L}$ )

站位	1992年		2002年	2003年	2004年	2005年	2006年		2007年	
	4月	7月	平均值	平均值	平均值	平均值	4月	7月	4月	7月
1号站	5.5	8.2	38.1	37.0	35.8	36.0	51.2	58.0	48.8	49.9
2号站	—	—	37.2	38.4	38.9	36.6	—	—	—	—
3号站	2.7	8.9	31.3	29.8	26.4	29.5	33.3	33.5	48.8	36.1
4号站	—	—	28.2	30.1	31.1	29.3	—	—	—	—
5号站	—	—	—	—	—	—	33.3	32.9	38.3	22.5
6号站	14.2	6.9	29.1	26.4	32.0	24.7	29.6	29.5	31.3	21.4

综上所述,除个别年份外,16年内硝酸氮、亚硝酸氮、铵氮和磷酸盐浓度的空间分布从港顶1号站向港口6号站呈降低趋势,其中以 $PO_4\text{-P}$ 、 $NO_2\text{-N}$ 的降低趋势最为明显,而 $NH_4\text{-N}$ 的降低趋势相对较弱; $NO_3\text{-N}$ 的空间变化规律性复杂,与张丽旭等(2007)报道相近。3号站 $NO_3\text{-N}$ 浓度往往达到最大值。

表6、表7表明,无论是平水期,还是丰水期,表层盐度均低于底层,而表层温度均高于底层;盐度从港顶1号站向港口6号站递增,而温度递减。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 无机氮浓度

研究表明,象山港狭湾中无机氮成分有 $NH_4^+$ 、 $NO_3^-$ 和 $NO_2^-$ ,其中 $NO_3^-$ 含量较高,占80%以上, $NO_2^-$ 和 $NH_4^+$ 的含量均较少,与沈国英等(2002)报道的完全一致。这是因为还原态的 $NH_4^+$ 主要是生物代谢产物和死亡分解的最终产物, $NO_2^-$ 则是 $NH_4^+$ 氧化或 $NO_3^-$ 还原过程的中间产物。

大陆径流把一定数量的溶解无机氮、溶解有机氮和颗粒有机氮带入海洋,是海湾补充氮的主要来源。但是,象山港内氮的主要来源是水产养殖业,港内的养殖区主要是西湖港,其次是港顶的黄墩港和铁港,再次是No.1断面以西的北侧滩涂(蔡惠文等,2006)。这是3、4号站位 $NO_3^-$ 浓度经常在港内分布中处于最

大值的原因。

#### 3.2 无机磷浓度

由表5可知,除1992年外,2002—2005年每年六个月无机磷的平均浓度,以及2006、2007年的平水期(4月)和丰水期(7月)无机磷浓度,从港顶1号站到港口6号站基本呈递减规律,而且递减速度有逐年加大的趋势,而在港顶1号站该值逐年增加。说明养殖规模不断扩大,而无机磷又不能及时顺利排出。董礼先等(1999a, b)采用水平二维对流-扩散水交换模式,模拟研究了象山港狭湾的水交换,对不同区域的水交换控制机理作了探讨,计算出1至6号站90%水交换所需的时间分别约为79、78、70、57、45和27天。说明营养盐容易在港顶积聚,与本研究吻合。

但是,无机磷总体浓度很小。海水中的溶解无机磷几乎都是以正磷酸盐的形式存在。值得注意的是,海洋中磷酸盐容易被一些无定形颗粒所吸附,同时又容易与某些金属离子形成不溶性化合物。以上两点是引起海水中可溶性磷浓度很低的重要原因(沈国英等,2002)。所以,当磷酸盐浓度很小时,偶然因素对分布的影响远大于水体环流的影响。1992年就属于这种情况。

#### 3.3 年代际变化

1992年养殖区主要是西湖港,至2000年养殖区域扩展到港顶的黄墩港、铁港和No.1断面以西的北侧滩涂。从表2至表5知,2007年与1992年相比,各站

表6 2006年4月表、底层温度、盐度和硝酸氮浓度对比

Tab.6 The comparison in temperature, salinity and  $NO_3\text{-N}$  between surface and bottom layers in April 2006

站位		1号站	2号站	3号站	4号站	5号站	6号站
温度( $^{\circ}\text{C}$ )	表层	17.0	—	16.0	—	16.3	15.4
	底层	16.8	—	15.4	—	15.8	14.9
盐度	表层	25.233	—	26.549	—	26.637	27.588
	底层	25.269	—	26.618	—	26.678	27.628
硝酸氮 ( $\mu\text{g/L}$ )	表层	588.0	—	619.0	—	646.0	624.0
	底层	633.0	—	626.0	—	658	636.0

表7 2006年7月表、底层温度、盐度和硝酸氮浓度对比

Tab.7 The comparison of temperature, salinity and  $NO_3\text{-N}$  between surface and bottom layers in July 2006

站位		1号站	2号站	3号站	4号站	5号站	6号站
温度( $^{\circ}\text{C}$ )	表层	29.8	—	28.3	—	28.7	27.7
	底层	29.6	—	27.9	—	27.5	26.5
盐度	表层	24.820	—	26.740	—	27.012	28.217
	底层	24.806	—	26.995	—	28.021	28.445
硝酸氮 ( $\mu\text{g/L}$ )	表层	560.0	—	536.0	—	538.0	489.0
	底层	536.0	—	532.0	—	489.0	452.0

的硝酸氮浓度几乎都增加了一倍,磷酸盐浓度增幅更大,说明象山港的污染越来越严重。

### 3.4 水文特征

**3.4.1 温度、盐度** 影响象山港温度、盐度结构的因子颇为复杂,主要受到潮汐、外海水系、径流、气温及降水量的影响。曹欣中等(1995)报道,象山港盐度有港口段明显高于港内的特征。本研究发现,2006年平水期(4月)表层6号站的盐度为27.588,而在港顶1号站只有25.233;底层6号站的盐度为27.628,1号站为25.269。2006年丰水期(7月),表层6号站的盐度为28.217,1号站只有24.820;底层6号站的盐度为28.445,1号站为24.806。由此可见,港口与港顶有着显著的盐较差,充分表明港口段受外海水的影响。水温分布,港口段,尤其是表层,明显受涨落潮水影响,因而有港口水温低于港内的特征。

平水和丰水期间,表层盐度均低于底层,而表层温度均高于底层。表明大陆径流对象山港水体的环流影响较甚。淡水密度低于海水,浮于海水上面,导致表层水的盐度降低。同时, No.2(图1)断面处,在夏、冬季均存在盐度锋面(董礼先等,2000a),表明该断面以东,象山港狭湾水与港外水系交换充分,这是6号站硝酸氮、亚硝酸氮、铵氮和磷酸盐浓度与5号站相比显著减小的原因。

**3.4.2 潮汐** 象山港潮差较大,并且自港口至港顶逐渐增大。1990年6、11月大潮期间的观测表明,口外的钱仓站平均潮差为284cm,港中部的湖头渡平均潮差为333cm,至港顶的红胜塘站达37cm(曹欣中等,1995)。如果以国家85高程计算<sup>1)</sup>(黄祖珂等,2005),则

钱仓站的平均海平面为39cm,西泽站42cm,港中部的湖头渡站44cm,而位于港顶的红胜塘站平均海平面已高达61cm。因此,平均海平面有内高外低的特征。这一现象固然与港内潮波呈现驻波为主的性质及象山港窄长的地理环境有关,更重要的是,与径流量较大有关。从而,表层余流必然流向港口。

**3.4.3 潮流** 曹欣中等(1995)报道,象山港港顶至港口各站的 $(W_{O1} + W_{K1})/W_{M2}$ 值均小于0.5,并且 $W_{M4}/W_{M2}$ 大于0.04,故其潮流属于浅水分潮流显著的正规半日潮流(方国洪等,1986),潮流中主要分潮流的椭圆率皆小于0.3,因此象山港的潮流基本属往复流性质。从而,象山港中的环流必定存在重力式环流。

**3.4.4 余流** 董礼先等(2000a)报道,象山港余流基本上呈表层向海而底层向湾顶的重力环流结构,余流流速大多为表层大于底层,但在分布上有明显的区域性。如图1所示, No.2断面以东水域的余环流基本上以水平结构为主; No.1断面以西的余环流基本上是以表层向海而底层向湾顶的重力环流为主; No.1和 No.2断面之间的区域,即狭湾中段,是两种环流的叠加,环流的断面结构取决于狭湾内段重力环流和狭湾外段水平环流二者的强弱对比。

如图2所示,位于口部6号站的余流流向:表层为东北偏北向流出,底层余流则反方向流入。西沪港口的表层余流是向象山港主港内段流去,底层则相反。黄墩港口的表层余流流向西北而底层流向西南。位于港顶的铁港口的表层余流流向为东北,明显向象山港主港外流去,底层则反之(董礼先等,2000a)。

No.1断面处,冬、夏两季的余流均以15—20m

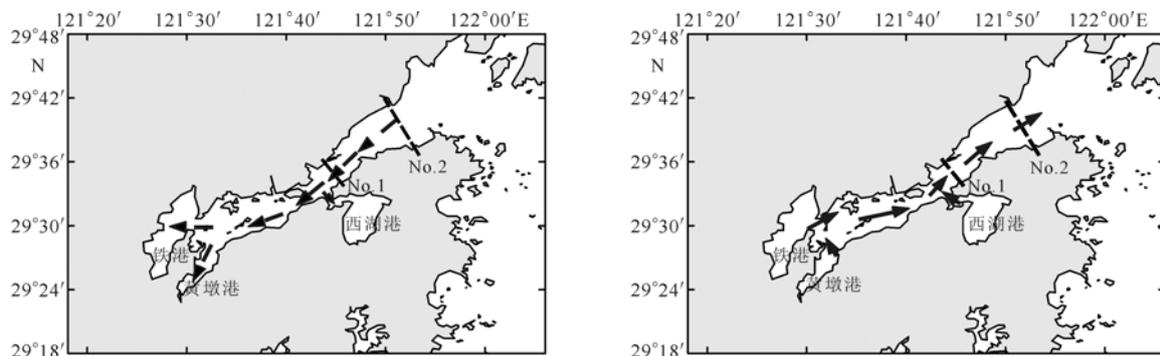


图2 象山港余环流示意图

Fig.2 Residual circulation in Xiangshan Bay

左图: 底层余环流; 右图: 表层余环流

1) “国家85高程”是指以青岛水准原点和青岛验潮站1952年到1979年的验潮数据确定的黄海平均海面所定义的高程基准,其水准点起算高程为72.260m

水深为界,呈上、下两层相向流动,上层向海而底层向湾顶,最大流速可达 0.1 m/s; 不管何时, No.2 断面 10 m 水深附近的余流总是向湾顶方向流动,上层的余流总是向海流动(董礼先等, 2000a)。

### 3.5 营养盐环流

象山港港湾纵深,岔道众多,滩地广而平缓,湾内掩蔽程度高,波浪作用微弱。港内纳潮量大,涨潮时水体成浸溢滩状扩散,流速和水位变化都较为缓慢;落潮时流速大增,水位骤然下降(Gao *et al*, 1990)。这种水文特征有利于营养盐在底部尤其在支港聚集,促进局部区域富营养化(Liu *et al*, 2000)。

港内养殖区主要是西湖港,其次是港顶的黄墩港和铁港,再次是 No.1 断面以西的北侧滩涂。20 世纪 90 年代,主要集中在西湖港。

西湖港内流速缓慢,营养盐沉积较甚。西湖港的营养盐主要经潮振荡弥散和潮交换混合,流向象山港主港内段,以底层为主(表层营养盐经表层余流直接参与主港向海的表层环流)。出西湖港后,进入主港底层余环流。同时,由黄墩港、铁港和 No.1 断面以西的北侧滩涂养殖区产生的沉积于底层的营养盐,亦参与主港底层余环流。由于 No.1 断面以西的余环流基本以底层向湾顶,而表层向海的重力环流,所以营养盐便被不断地输送到表层而进一步参与表层向海的余环流。这是导致十六年内硝酸氮、亚硝酸氮、铵氮和磷酸盐浓度的空间分布,有从港顶 1 号站向港口 6 号站呈现降低趋势,并且在 3 号站硝酸氮浓度往往达到最大值的重要原因。

按照上述理论,底层营养盐浓度应该高于表层。这在 2006 年 4 月(表 6)的硝酸氮分布中已得到了证实。但由于 No.2 断面以东水域的余环流基本上以水平结构为主,按照余环流理论,5、6 号站的表层硝酸氮浓度应高于底层(因为 No.2 断面以东水域没有养殖区),但事实刚好相反。说明余环流理论在解释营养盐浓度分布时稍有不足。

2006 年 7 月,象山港处于丰水期,表层余环流加速,营养盐来不及沉积,因此表层硝酸氮浓度比底层略高些。所以,余环流理论能够解释丰水期的硝酸氮浓度分布规律(表 7)。

董礼先等(1999a, b)的水平二维对流-扩散水交换模式认为,重力环流、潮振荡的垂向剪切造成的纵向弥散和潮混合作用是水体输运和混合的主要动力。后者能够解释十六年内硝酸氮、亚硝酸氮、铵氮和磷酸盐浓度的空间分布有从港顶 1 号站向港口 6 号站所

呈现的降低规律。尤其能解释 2006 年 4 月(表 6), 5、6 号底层硝酸氮浓度高于表层的现象。但该模式不能解释 2006 年 7 月(丰水期)表层硝酸氮浓度比底层略高的现象。

因此,本文认为余环流(含重力环流)在解释象山港内营养盐环流时,至少与潮振荡的垂向剪切造成的纵向弥散和潮混合同样重要,与董礼先等(2000b)报道的一致。

## 4 结论

(1) 本研究证实了,象山港余环流基本上呈表层向海而底层向湾顶的重力环流结构,余流流速大多为表层大于底层,但在分布上有明显的区域性。如图 1 所示, No.2 断面以东的外段水域的余环流基本上以水平结构为主; No.1 断面以西的内段的余环流基本上是以表层向海而底层向湾顶的重力环流为主; No.1 和 No.2 断面之间的中段区域,是两种环流的叠加,环流的断面结构取决于狭湾内段重力环流和狭湾外段水平环流二者的强弱对比。

(2) 象山港营养盐的余环流模式为:西湖港的营养盐主要经潮振荡弥散和潮交换混合,输往象山港主港内段,以底层为主(表层营养盐经表层余流直接参与主港向海的表层环流)。经沉积后,进入主港底层余环流;同时,由黄墩港、铁港和 No.1 断面以西的北侧滩涂养殖区产生的沉积于底层的营养盐,亦参与主港底层余环流。由于 No.1 断面以西的余环流基本以底层向湾顶,而表层向海的重力环流,所以营养盐被源源不断地输送到表层而进一步参与表层向海的余环流。余环流进入 No.2 断面以东段后,以水平结构为主,流向港外。

(3) 余环流理论在解释象山港内营养盐环流方面,并非完整,因为它不能解释平水期(2006 年 4 月,表 6), No.2 断面以东的外段(5、6 号站)底层硝酸氮浓度高于表层的现象;而潮振荡的垂向剪切造成的纵向弥散和潮混合的作用能够解释此现象。

(4) 完整地解释象山港内营养盐环流必须同时考虑余环流(包括重力环流)、潮振荡的垂向剪切造成的纵向弥散和潮混合三者的共同作用。

(5) 2007 年与 1992 年相比,各站的硝酸氮含量几乎都增加了一倍,磷酸盐含量增幅更大,说明象山港的氮、磷污染与日俱增。

## 参 考 文 献

方国洪, 郑文振, 陈宗镛等, 1986. 潮汐和潮流的分析和预报.

- 北京: 海洋出版社, 9—11
- 尹维翰, 曹志敏, 蓝东兆等, 2007. 象山港表层沉积物中营养元素的分布特征及影响因素. 环境化学, 26(3): 388—391
- 沈国英, 施并章, 2002. 海洋生态学(第二版). 北京: 海洋出版社, 292—300
- 张丽旭, 任松, 蒋晓山, 2005. 象山港海域 N、P 污染特征及潜在性富营养化程度评价. 海洋环境科学, 24(3): 68—71
- 张丽旭, 蒋晓山, 蔡燕红, 2006. 近 4 年来象山港赤潮监控区营养盐变化及其结构特征. 海洋通报, 25(6): 1—9
- 张丽旭, 蒋晓山, 蔡燕红等, 2007. 近 4 年来象山港赤潮监控区水质状况综合评价. 海洋湖沼通报, 2007(4): 98—103
- 陈伟, 苏纪兰, 1999. 狭窄海湾潮交换的分段模式——在象山港的应用. 海洋环境科学, 18(3): 7—10
- 郑云龙, 朱红文, 罗益华, 2000. 象山港海域水质状况评价. 海洋环境科学, 19(1): 56—59
- 黄祖珂, 黄磊, 2005. 潮汐原理与计算. 青岛: 中国海洋大学出版社, 216—217
- 曹欣中, 唐龙珠, 张月秀, 1995. 象山港水文特征及纳污能力的分析. 东海海洋, 13(1): 10—19
- 董礼先, 苏纪兰, 1999a. 象山港水交换数值研究 I. 对流-扩散型的交换模式. 海洋与湖沼, 30(4): 410—415
- 董礼先, 苏纪兰, 1999b. 象山港水交换数值研究 II. 模型应用和水交换研究. 海洋与湖沼, 30(5): 465—470
- 董礼先, 苏纪兰, 2000a. 象山港盐度分布和水体混合 I——盐度分布和环流结构. 海洋与湖沼, 31(2): 151—158
- 董礼先, 苏纪兰, 2000b. 象山港盐度分布和水体混合 II——混合分析. 海洋与湖沼, 31(3): 322—326
- 蔡惠文, 孙英兰, 张学庆, 2006. 象山港网箱养殖对海域环境的影响及其养殖环境容量研究. 环境污染治理技术与设备, 7(11): 71—76
- 翟滨, 曹志敏, 蓝东兆等, 2007. 象山港养殖海域水体和沉积物中营养元素的分布特征及其控制过程的初步研究. 海洋湖沼通报, 2007(3): 49—56
- Gao S, Chun Q, Jun Y, 1990. Fine-grained sediment transport and sorting by tidal exchange in Xiangshan Bay, Zhejiang, China. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 31(4):397—409
- Liu Z L, Cai Y M, Shi J X *et al*, 2000. Standing stock of phytoplankton and primary productivity in *Penaeus orientalis* larval multiplication releasing area of the Xiangshan Bay. Acta Oceanologica Sinica, 19(1): 109—118
- Lü H Q, Xu J Z, Haegen G V, 2008. Supplementing marine capture fisheries in the East China Sea: sea ranching of prawn *Penaeus orientalis*, restocking of large yellow croaker *Pseudosciaena crocea*, and cage culture. Reviews in Fisheries Science, 16(1—3): 366—376

## CIRCULATION AND DISTRIBUTION OF NITROGEN AND PHOSPHORUS IN XIANGSHAN BAY, CHINA

LÜ Hua-Qing<sup>1</sup>, CHANG Kang-Mei<sup>1</sup>, SHI Gang-De<sup>2</sup>

(1. Marine Science School of Zhejiang Ocean University, Zhoushan, 316004; 2. Xiangshan Bay Marine Environment Monitoring Station of Ningbo City, Ningbo, 315141)

**Abstract** To study the circulation and distribution of nitrogen and phosphorus nutrients in Xiangshan Bay, Zhejiang, China (to the west of 122°00'E), concentrations of nitrate nitrogen (NO<sub>3</sub>-N), nitrite nitrogen (NO<sub>2</sub>-N), ammonium nitrogen (NH<sub>4</sub>-N) and phosphate (PO<sub>4</sub>-P) were studied in six stations from 1992 to 2007. Results showed that: (1) The concentrations, especially those of PO<sub>4</sub>-P and NO<sub>2</sub>-N, declined overall from Stations 1 to 6 in the 16 years; (2) The distribution of NO<sub>3</sub>-N was more complicated than others, and often with the maximum at Station 3; (3) Whether in dry (April) or wet season (July), the salinity at all stations was lower at surface and high at the bottom, and it was warmer at surface than at the bottom. The salinity increased from Stations 1 to 6, while the tendency of temperature was reversed. The distribution could be explained with a residual circulation mode that the nutrients accumulated in the Xihu Bay mostly enter the inner section of the Xiangshan Bay (to the west of No.1 cross section) with mixing-dispersion by tide-wave action. The nutrients move westward at the bottom layer in residual circulation. At the same time, the accumulated nutrients in the bottom layer of Huangdun Bay, Tie Bay and the northern beach to the west of No.1 cross section also go into the westward bottom residual circulation. As the residual circulation to the west of No.1 section features a gravitational nature, its direction at the bottom is westward and at the surface eastward; therefore, nutrients are transported constantly to the surface layer, pass eastward across the No.2 section, and then leave the bay mouth. However, tide-wave action contributes greatly in addition to the residual circulation; (4) The concentrations of NO<sub>3</sub>-N and PO<sub>4</sub>-P at all stations in 2007 nearly and more than doubled from those of 1992, respectively, indicating a worsening trend of nitrogen and phosphorus pollution in Xiangshan Bay.

**Key words** Xiangshan Bay, Nitrate nitrogen, Nitrite nitrogen, Ammonium nitrogen, Phosphate