

刘晓凤, 段晓勇, 田元, 等. 三门湾水体营养盐变化及其对人类活动的响应[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(5): 46-56.

三门湾水体营养盐变化及其对人类活动的响应

刘晓凤^{1,2}, 段晓勇^{1,2}, 田元^{1,2}, 曹轲^{1,2}, 高飞^{1,2}, 印萍^{1,2*}, 刘冬雁¹

(1 中国海洋大学, 青岛 266100; 2 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071)

摘要:我国沿海重点海湾水体富营养化与陆源输入和海湾开发活动密切相关, 海湾特殊的弱交换水动力环境使得水体环境治理面临更为严峻的挑战, 浙江省近年来实施陆域生态环境治理“千万工程”和海域“蓝色海湾整治”工程, 陆域和海湾水环境提升显著。以浙江省第 2 大海湾三门湾为研究对象, 对近 30 年三门湾海域水体营养调查监测数据进行对比分析, 结合 2019 年 9 月在三门湾开展的流域-海域水体质量联合调查取得的 54 个流域水样、30 个海域水样和 6 个雨水样的营养盐分析结果 (NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^{3-}), 分析了三门湾水体营养盐的空间分布特征和影响因素, 分析营养盐长期变化特征和人类活动的影响。目前三门湾水体富营养化的问题依然突出, 湾内海域 DIN 和 DIP 含量在 0~439 和 18~59 $\mu\text{g/L}$, 平均值分别为 233 和 37 $\mu\text{g/L}$, 河流 DIN 和 DIP 含量在 77~1586 和 3~126 $\mu\text{g/L}$, 平均值分别为 466 和 48 $\mu\text{g/L}$ 。河流中氮、磷营养盐含量整体上呈现由上游到下游增长的趋势, 其中农业生产对水体 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 影响大, 城镇生活和工业生产排放对水体中 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 和 DIP 影响大。海域中氮磷营养盐的高值区主要分布在水体交换弱的港汊顶部和河流入海处, 营养盐浓度呈现由近岸高值向外海逐渐降低的趋势, 海水养殖是近岸营养盐的主要贡献者。三门湾水体营养盐在 1987—2007 年中处于持续增长趋势, 2010 年后随着海陆生态环境治理政策的实施, DIN 和 DIP 呈现明显下降趋势, 海湾水环境状况得到较大改善。

关键词: 三门湾; 营养盐; 人类活动; 土地利用; 溶解态无机氮; 溶解态无机磷

中图分类号: P736.21; P734.5

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.052

0 引言

全球人口和经济活动的大幅增长导致废水产量增加, 自 2001 年以来, 废水产量超过 3 000 亿 t/a, 约相当于淡水总取水量的 8%。人类代谢进入生活废水的氮或磷数量已成为全球氮和磷循环的关键组成部分, 该现象导致近岸海域水体营养盐普遍偏高^[1]。海湾作为近岸特殊的弱交换水动力环境, 在高强度的人类活动影响下, 将成为海洋中水质富营养化程度最高的环境之一^[2]。海湾富营养化程度越

高, 氮磷营养盐含量越高。海湾内营养盐含量主要受到近岸城镇生活、农业活动、工业生产、禽畜养殖、水产养殖以及河流输入和湾内水动力环境多种因素的影响^[3-9]。根据生态环境部和原国家海洋局发布的海洋环境监测质量公报、海洋环境公报, 我国管辖海域中主要超标要素为无机氮和活性磷酸盐, 2018 年海域劣四类水质面积 33 270 km^2 , 较上年同期减少 450 km^2 , 其中东海劣四类水质海域面积 22 110 km^2 , 较上年同期减少 100 km^2 , 主要分布在长江口、杭州湾、象山湾、三门湾、三沙湾等近岸海域。

三门湾是浙江的第 2 大海湾, 也是浙江和全国重要的水产基地, 海岸带开发活动频繁。根据浙江省海洋环境公报, 2008 年三门湾是全省重点港湾、河口海域水环境中营养盐污染程度相对较轻的海域之一, 2012 年为全省重点港湾、河口海域水质污染程度严重的海域之一, 2017 年湾内绝大部分为劣四类海水, 无机氮、活性磷酸盐较

收稿日期: 2020-05-13

资助项目: 中国地质调查局项目“浙江中部海岸带综合地质调查”(DD20190276)

作者简介: 刘晓凤(1994—), 女, 在读硕士, 主要从事海洋地球化学方面的研究工作。E-mail: 1342197204@qq.com

* 通讯作者: 印萍(1971—), 女, 博士, 研究员, 主要从事海岸带方面的研究工作。E-mail: pingyin@fio.org.cn

2012 年好转。作为一个半封闭的海湾, 港湾海域生态环境状况与周边海岸带开发活动存在很大的关联性。湾内频繁地滩涂围垦, 对水动力环境的影响也逐渐增大, 滩涂的围垦造地使湾内纳潮量减少了 7%, 对湾内的物质交换产生影响^[10]。1997—2011 年, 湾内 DIN(溶解态无机氮)、DIP(溶解态无机磷)含量成倍增长, 沿岸入湾河流所携带的浙江沿岸工业废水、农田肥源流失及生活污水、三门湾水域海水养殖的自身污染以及高营养盐的浙江沿岸流的输送均是造成三门湾水域严重富营养化的原因, 其中大量海水养殖是造成湾内营养盐含量成倍增加的主要原因^[11]。为了减轻陆地-海洋连续体水生生态系统的富营养化, 需要一种平衡和战略性的办法来适当控制这 2 种营养物质。浙江省近年来实施了陆域生态环境治理“千万工程”, 全面推进新农村建设, 改善农业面源污染现状; 以及海域“蓝色海湾整治”工程, 保护湿地, 修复岸线, 改善海洋环境质量, 提升海岸和海域生态环境功能, 缓解湾内海水的富营养化现象。

本文以青岛海洋地质研究所 2019 年在三门湾开展海岸带综合地质调查获得的陆域、海域和大气降水水体营养盐数据为基础, 分析三门湾水体营养盐分布特征和影响因素, 对比 1987 年以来三门湾调查监测文献, 分析近 30 年海湾水体营养盐变化过程和海湾生态环境综合整治成效, 为海湾水环境

联防联控对策提供基础数据。

1 调查区概况

三门湾海域面积 775 km², 属宁波市的宁海县、象山县和台州市的三门县, 共有 38 个乡镇分布于沿湾周边, 沿岸人口 70 万。海湾形状如伸开的手指, 港汊呈指状伸入内陆, 由南到北港汊依次为岳井洋水道、胡陈港、蛇盘水道、健跳港和石浦港, 其中胡陈港已经封闭为水库。沿湾地势高差大, 无外源大型河流入海, 环湾发育短小的山溪性河流, 由南到北河流依次为健跳溪、海游溪、清溪、白溪、泗洲头溪以及新岭溪, 河流流域面积 3 160 km², 多年平均径流总量为 26.8×10⁸ m³。陆上河流多建立水塘、水库对淡水进行截流, 分布有大型农场、养殖场, 沿岸分布大量的港口、水产养殖池以及港岔内海水养殖^[12]。

2 研究方法

2.1 样品采集和处理

2019 年 9 月, 青岛海洋地质研究所在三门湾近岸海域和东部入海河流域开展了水体环境调查工作, 共采集了 30 个海上站位、54 个河流站位的水样(图 1), 海域站位分别采集表层和底层水, 同步在线测量叶绿素和 pH 值等水环境参数。在长街镇

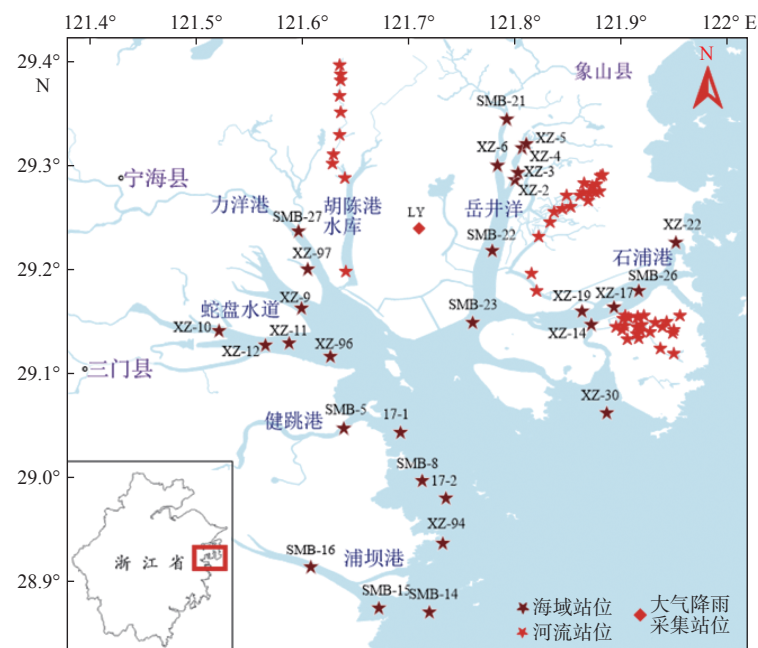


图 1 研究区位置和取样站位

Fig.1 Location of the study area and sampling stations

设置 1 个雨水采集站点, 9 月 1—5 日采集大气降雨, 不锈钢雨水采集器置于离地面 1 m 以上的置物架上, 防止地面飞溅的雨水进入盆中。采集的水样经 0.45 μm 孔径混合纤维滤膜过滤后置于超纯净水清洗过的样品瓶(500 mL)中, 冷藏保存至检测。

2.2 营养盐检测方法

营养盐检测采用 WIZ Probe 营养盐原位在线分析仪, 主要检测指标为 NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 。测量原理为标准湿化学分析原理, NO_3^- 、 NO_2^- 通过 NE-SAA 比色法测量, 氨氮通过贝特洛反应比色法测量, PO_4^{3-} 通过钼蓝法、抗坏血酸还原法测量。测试试剂配好后储存到试剂舱内, 每次测量时, 系统自动控制反应条件, 减少了人为操作误差, 保证仪器测量数据质量。实验过程中, 每间隔 5 个样品进行 1 次标样测试, 保证标准样品测试误差在 5% 以内, 有效控制数据准确度。

2.3 遥感图像获取及数据处理

选取 2019 年 1 月的 Landsat 8 影像(分辨率 30 m ×

30 m), 利用美国 RSI 公司的 ENVI5.3 软件, 结合现场调查数据, 通过非监督与监督分类进行解译。将三门湾土地利用类型划分为林地、草地、耕地、建设用地、水产养殖用地、水域和滩涂 7 种开发类型, 提取相关信息后, 通过 ArcGIS 对数据进行统计整理分析。

3 结果

3.1 营养盐空间分布特征

陆域河流水体样品中, NO_3^- 、 NH_4^+ 、 NO_2^- 、 PO_4^{3-} 、DIN 和 DIP 的浓度范围分别为 52~1 839、0~1 201、34~950、8~386、77~1 586 和 3~126 $\mu\text{g/L}$, 平均值分别为 914、101、569、148、466 和 48 $\mu\text{g/L}$ (表 1)。其中石浦河水体营养盐含量最高, DIN 和 DIP 的平均值分别为 511 和 64 $\mu\text{g/L}$, 力洋河水体营养盐含量最低, DIN 和 DIP 的平均值分别为 281 和 39 $\mu\text{g/L}$ (表 1), 3 条小河流营养盐组分呈现从从上游到下游逐渐增加的趋势(图 2)。

表 1 三门湾水体营养盐含量

Table 1 Water nutrient contents in Sanmen Bay

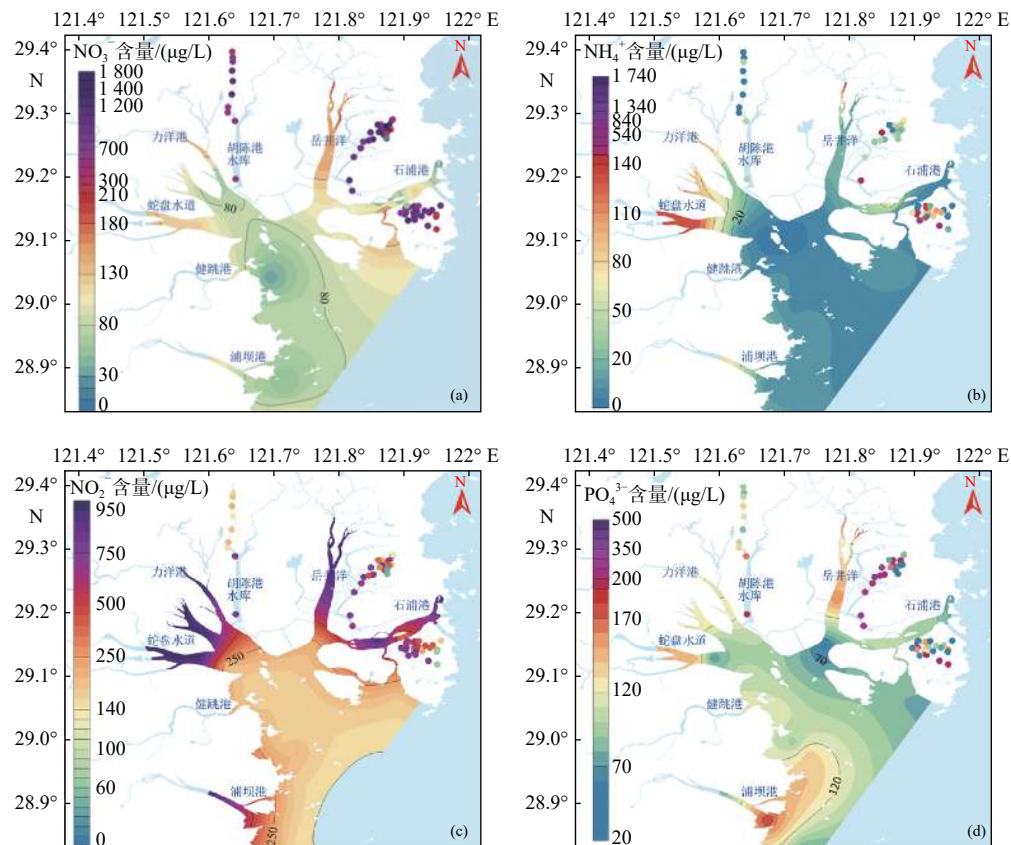
												/(μg/L)	
地理位置		NO ₃ ⁻		NH ₄ ⁺		NO ₂ ⁻		PO ₄ ³⁻		DIN		DIP	
		范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均
河流	石浦河流域	186~1 839	1 075	8~263	79	34~950	603	19~386	197	108~794	511	6~126	64
	力洋河流域	343~1 218	727	0~32	12	133~950	344	81~181	119	81~474	281	26~59	39
	鹤浦河流域	52~1 607	866	3~1 201	156	52~950	627	8~256	120	77~1 586	507	3~83	39
	平均状况	52~1 839	914	0~1 201	101	34~950	569	8~386	148	77~1 586	466	3~126	48
海域	岳井洋	105~191	156	0~140	32	181~950	831	56~176	129	79~439	313	18~58	42
	石浦港	63~124	90	0~68	17	181~950	528	56~107	89	79~357	194	18~35	29
	蛇盘水道	93~130	117	3~134	88	153~950	751	71~150	116	67~421	324	23~49	38
	开放海域	30~79	61	0~6	4	82~155	110	96~141	123	43~68	51	31~46	40
	平均状况	30~191	109	0~140	28	23~950	511	56~180	113	0~439	233	18~59	37
大气降雨		0~281	74	6~95	59	29~78	46	1~6	3	20~100	77	0~2	1

注: $\text{DIN}=\text{NO}_3^-+\text{N}+\text{NO}_2^-+\text{N}+\text{NH}_4^+-\text{N}$; $\text{DIP}=\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$;

海域水体样品中, NO_3^- 、 NH_4^+ 、 NO_2^- 、 PO_4^{3-} 、DIN 和 DIP 的浓度分别为 30~191、0~140、23~950、56~180、0~439 和 18~59 $\mu\text{g/L}$, 平均值分别为 109、28、511、113、233 和 37 $\mu\text{g/L}$ (表 1)。其中蛇盘水道 DIN 和岳井洋 DIP 含量最高, 平均值分别为 324 和 42 $\mu\text{g/L}$, 开放海域 DIN 和石浦港 DIP 含

量最低, 平均值分别为 51 和 29 $\mu\text{g/L}$, 所有港汉中石浦港水体质量最好。海域中高值区位于水体交换弱的港汉顶部和河流入海以及水产养殖处, 如蛇盘水道和岳井洋。石浦港水体流通性强, 营养盐含量较低, 无明显变化趋势(图 2)。

大气降雨采取的水体样品中 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 NO_2^- 、



(a)硝酸盐含量分布; (b)铵盐含量分布; (c)亚硝酸盐含量分布; (d)磷酸盐含量分布

图 2 三门湾水体营养盐含量分布

Fig.2 Distribution of nutrients in Sanmen Bay

PO_4^{3-} 、DIN 和 DIP 的浓度分别为 0~281、6~95、29~78、1~6、20~100 和 0~2 $\mu\text{g/L}$, 平均值分别为 74、59、46、3、77 和 1 $\mu\text{g/L}$ (表 1)。湾内由大气降雨到河流和海域的水体中, 营养盐含量先增加后降低, 整体呈现大气降雨中营养盐含量最低, 河流水体样品中营养盐含量最高。

3.2 历年湾内营养盐含量的变化

根据海湾志第五分册《上海市和浙江省北部海湾》、浙江重点养殖容量研究与应用项目、908 专项、原国家海洋局 1997 年和 2011 年开展的海域水质调查和三门核电站 3、4 号机组工程邻近海域水质环境海洋生态调查, 获得的三门湾 1987、1997、2002、2007、2011、2013 及 2019 年海域表层水体营养盐含量的调查结果(表 2)。湾内氮、磷营养盐表现为秋季呈现最高值, 高值区主要分布在陆源径流入海区与大型养殖区附近, 整体上 DIN、DIP 含量由西向东递减^[13-16]。

1987—2007 年湾内 DIN 含量的各特征值(最大值、最小值、平均值、中位数、第 1 位四分位数和

第 3 位四分位数)均表现为增长趋势, 2007—2019 年湾内 DIN 含量的特征值均表现为下降趋势。1987—2002 年湾内 DIP 含量的特征值表现为降低趋势, 平均值基本持平, 但 1987 年中位数较高, 说明该年度各采样站位普遍为低值。2002—2013 年 DIP 含量的特征值表现为增长趋势, 其中 2013 年中位数较高, 说明湾内检测站位 DIP 含量普遍降低, 2013—2019 年 DIP 含量各特征值均表现为降低(图 3)。浙江省近年来实施陆域生态环境治理“千万工程”和海域“蓝色海湾整治”工程, 对湾内水环境改善显著。

3.3 湾内土地利用类型的划分

土地利用类型可以作为人类活动的表征^[17], 不同土地利用类型代表了不同的人类活动方式以及活动的强弱。通过 Landset8 获得的 2019 年遥感图片对湾内土地利用类型进行解译(图 4)。在解译的流域区域范围内, 林地面积约占 41.4%, 分布最广; 耕地面积约占 21.0%, 聚集于流域范围以及山前冲积平原; 建设用地面积约占 9.2%, 聚集于流域与沿

表 2 1987—2019 年三门湾海域秋季表层海水营养盐含量调查数据

Table 2 Nutrient content survey data from autumn surface seawater survey in Sanmen Bay from 1987 to 2019

		/($\mu\text{g/L}$)						
年份	季节		$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NO}_2^- \text{-N}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	DIN	DIP	备注
1987	春季	范围	164.6~222	4.2~6.3	2.8~16.2	183~237.3	22.6~53.3	中国海湾志第五分册 ^[12]
		平均值	191.045	5.445	8.925	205.425	39.05	
	夏季	范围	202.4~262.8	9.2~13.9	9.9~19.9	227.4~286.6	17.4~26.7	
		平均值	223.8	11.333	13.9333	249.067	21	
	秋季	范围	279.9~311.5	1.6~2.9	8~20.9	302.6~322.4	12.3~30.4	
		平均值	291.367	2.1	16.367	310	18.4	
	冬季	范围	179.2~298.9	1.8~5.2	5~25.2	20.14~32.77	16.1~12.71	
		平均值	224.7	3.9	14.275	246.9	54.725	
1997	秋季	范围	/	/	/	166~454	7~33	施晓来 ^[13]
		平均值	/	/	/	311	20	
2002	春季	范围	323~693	1~10	2~35	345~729	17~47	宁修仁等 ^[11]
		平均值	454	4	11	468	26	
	夏季	范围	185~369	6~26	1~45	198~439	3~30	
		平均值	302	11	8	321	21	
	秋季	范围	529~641	3~15	4~32	552~671	23~34	
		平均值	588	7	12	607	30	
	冬季	范围	475~602	1~4	1~15	482~617	16~28	
		平均值	567	2	6	575	26	
2007	全年	范围	185~693	1~26	1~45	198~729	3~47	曾江宁等 ^[16]
		平均值	483	6	9	497	26	
	春季	范围	545~812	1~15	5~14	551~1 102	22~25	
		平均值	619	8	12	639	23	
	夏季	范围	304~574	6~69	1~15	311~658	22~34	
		平均值	384	18	6	408	30	
	秋季	范围	529~883	1~13	4~31	534~927	32~45	
		平均值	690	3	9	702	40	
2011	冬季	范围	469~937	1~11	7~110	477~1 058	33~41	施来晓 ^[14]
		平均值	680	4	21	705	38	
	全年	范围	304~937	1~69	1~110	306~1 116	22~45	
		平均值	592	8	12	0.612	33	
	秋季	范围	/	/	/	530~803	42~53	
		平均值	/	/	/	682	48	
2013	春季	范围	393~710	1~25	6~34	400~769	22~34	杨士瑛 ^[29]
		平均值	548	9	11	568	32	
	夏季	范围	258~431	10~31	5~23	273~485	18~52	
		平均值	354	21	13	388	35	
	秋季	范围	578~853	0~5	4~11	582~869	43~51	
		平均值	729	1	7	737	47	
	冬季	范围	549~720	1~9	6~36	556~765	25~35	
		平均值	613	5	17	635	31	
2019	秋季	范围	7~43	7~289	0~109	0~439	18~59	本文
		平均值	25	155	21	233	37	

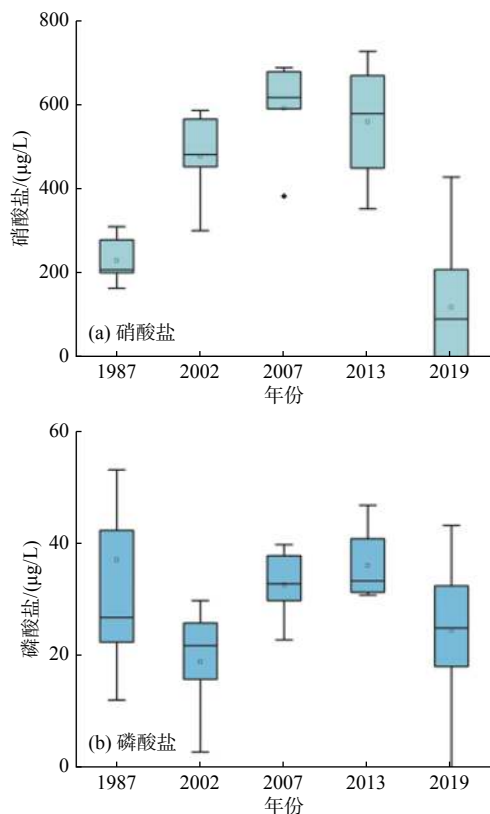


图 3 1987—2019 年三门湾全年营养盐含量变化趋势

Fig.3 The trend of annual nutrient contents in Sanmen Bay from 1987 to 2019

湾区域; 滩涂面积约占 3.2%; 沿湾水产养殖池面积约占 3.9%; 港汊内鱼排养殖面积约占 0.4%。

4 讨论

4.1 人类活动对河流水体营养盐的影响

流域内人类活动越频繁水体中营养盐含量越大。根据河流站位的分布状况, 选取 3 个河流剖面分析人类活动对河流水体营养盐的影响, 剖面 A 位于石浦流域, 剖面 B 位于鹤浦流域, 剖面 C 位于力洋流域(图 4)。3 个流域内石浦流域面积最广, 建设用地和耕地数量多, 集中分布在中下游区域; 鹤浦流域面积在 3 个流域中居中, 耕地集中分布在中上游区域, 人口集中分布在下游区域; 力洋流域面积在 3 个流域中最窄, 人口密度低, 建设用地、耕地数量少, 集中在下游区域。说明 3 个流域内石浦流域人类活动最频繁, 从上游到下游人类活动逐渐增强。A、B、C 3 个剖面中 DIN 含量范围为 228~684、103~881 和 81~475 $\mu\text{g/L}$, 平均值分别为 495、445 和 281 $\mu\text{g/L}$, DIP 含量范围为 26~90、11~83 和 26~59 $\mu\text{g/L}$, 平均值分别为 57、50 和 39 $\mu\text{g/L}$, 整

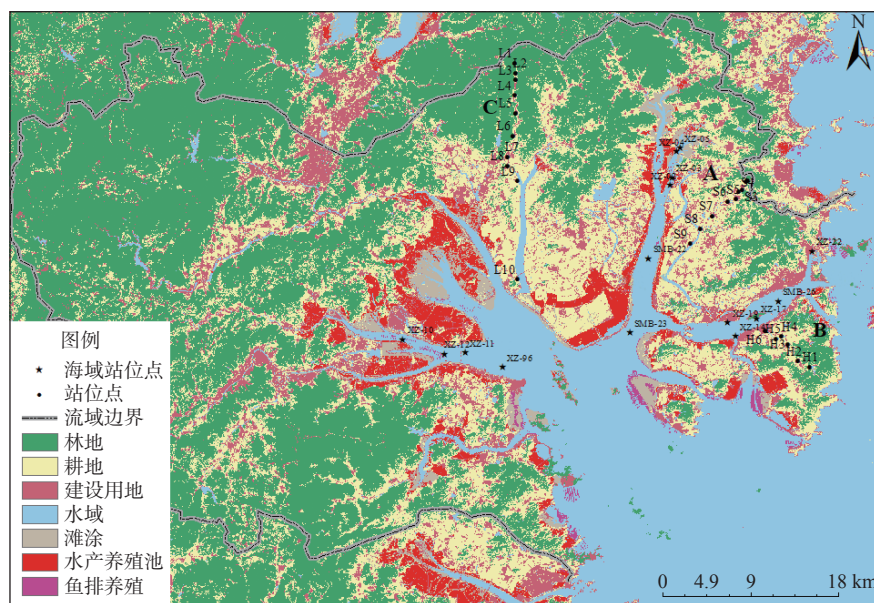


图 4 2019 年 1 月土地利用类型划分

Fig.4 Land use map for January 2019

体上剖面 A 营养盐浓度最高, 剖面 C 营养盐浓度最低。

不同的人类活动方式会对土壤中富集的氮、磷含量以及形态产生影响, 进而影响周围河流中营养盐的含量。本区域内农业生产对水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、

$\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量影响大, 城镇生活和工业生产对水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 DIP 含量影响大。对比 A 与 C 剖面的上中下游, 上游随耕地以及建设用地面积的增加, 河流中 DIN 含量逐渐增加, 其中以 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的增加为主, 上游耕地周围水体中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 占

比在 50% 左右, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 占比在 10% 左右; 中下游河流流速慢, DIN 增加缓慢, 以 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 含量增加为主。对比 C 与 A、B 剖面, 水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量较低, 建设用地 DIN 含量要低于耕地周围水体, 且 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 占比在 18% ~ 76% 左右, DIP 含量也比其他区域要高。A 剖面所在区域水体中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量高, B 剖面所在区域水体中 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 含量高, 对比 3 个剖面, C 剖面所在区域 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 含量最低, 水质最好(图 5)。

农业生产和城市活动是水生生态系统磷和氮的主要来源, 农业对氮的利用率特别低, 施用于农田中的氮肥约有 50% 不能被植物吸收, 这些氮以 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 N_2O 的形式流失到水体和大气中, 增加水体的 NH_4^+ 、 NO_3^- 含量^[18-21]; 城市地表径流汇集大量营养物质进入河流^[22]; 水库导致水体流速减慢, 水体的滞留会为周围微生物提供适宜的生活环境, 微生物会消除水体中的营养物质^[23]。

4.2 水产养殖湾内水体营养盐的影响

三门县面积 1 510 km^2 , 2019 年年平均降雨量 1 686.6 mm; 宁海县面积 1 843 km^2 , 2019 年年平均

降雨量 1 630.6 mm; 象山县面积 1 382 km^2 , 2019 年年平均降雨量 1 455.1 mm, 经计算 3 个县年平均降雨总水量为 52 711 206 m^3 , 按照大气降雨 DIN 和 DIP 平均浓度计算(表 1), 大气降雨每年向湾内输入 DIN 和 DIP 为 4.06 和 0.05 t。根据湾内河流年径流量以及陆域河流 DIN 和 DIP 平均浓度, 计算出湾内河流年均向湾内输入 DIN 和 DIP 为 1 248.88 和 128.64 t。假定三门湾鱼排养殖区氮、磷的扩散释放速率与宁修仁^[11] 计算的乐清湾网箱养殖区沉积物模拟实验所得的释放速率基本相同(氮、磷释放速率分别为 34.36 和 0.58 $\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$), 获得湾内鱼排养殖氮、磷年释放量分别为 189.39 和 3.20 t。此外, 沿湾水产养殖池分布面积是鱼排养殖分布面积的 9.4 倍, 水产养殖对湾内氮、磷的年释放量分别为 1 780.27 和 30.08 t, 氮的排放量与河流输入量相当, 磷的排放量要低于河流的输入量。

水产养殖对湾内水体营养盐的输入量要大于城镇以及港口对水体营养盐的输入量。石浦港、岳井洋和蛇盘水道中 DIN 和 DIP 含量相比较(表 1), 石浦港的营养盐浓度最低, 蛇盘水道的营养盐浓度最高(图 6)。河流与水产养殖共同影响蛇盘水道与

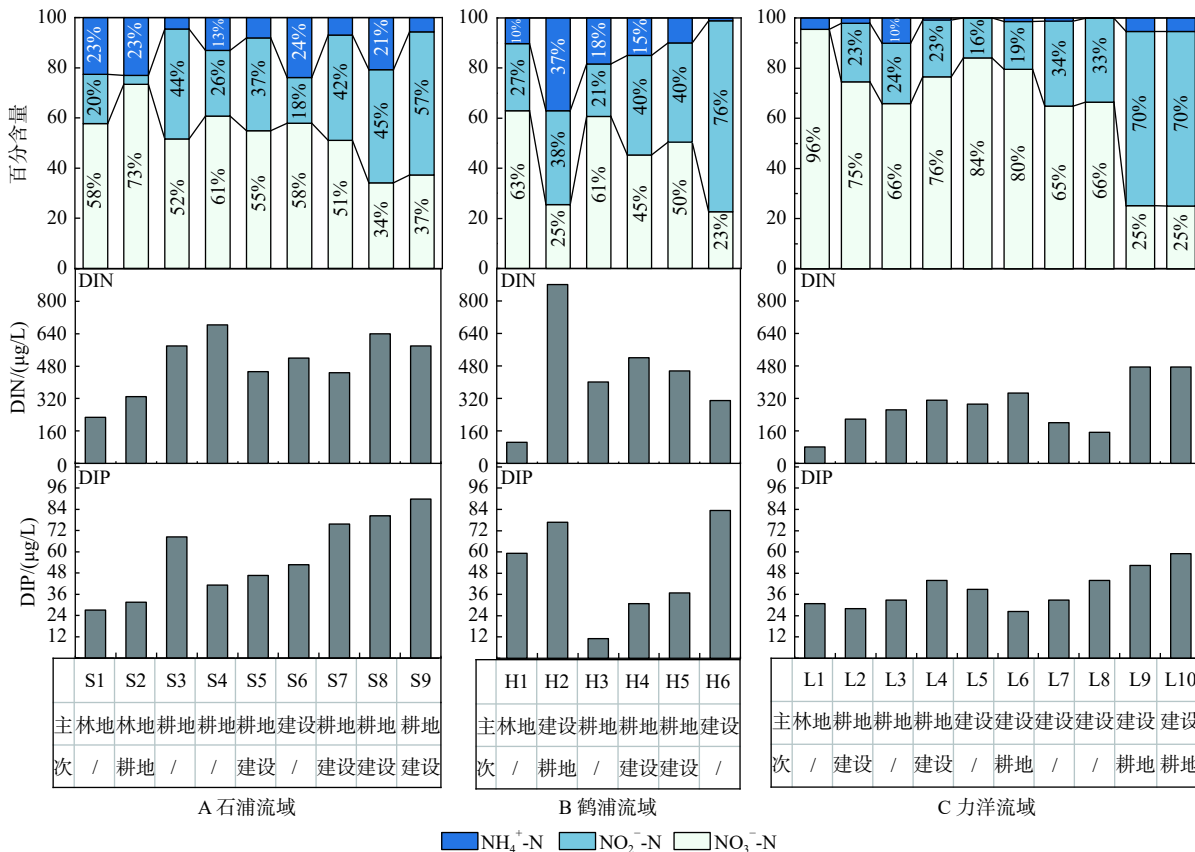


图 5 河流上中下游营养盐含量剖面

Fig.5 Profiles of nutrient content in the middle and lower reaches of the river



图 6 蛇盘水道港汊内牡蛎养殖区

Fig.6 Oyster farming area in the harbor branch of Snake Channel

岳井洋水体中的 DIN 和 DIP 含量,由陆域向外,随着海水的稀释以及水产养殖密度的降低,DIN 和 DIP 表现为含量快速降低(图 7)。城镇以及港口共同影响石浦港水体中的 DIN 和 DIP 含量,整体低于蛇盘水道和岳井洋。说明水产养殖对水体营养盐的输入量要高于城镇以及港口对水体营养盐的输入量。

海水养殖活动,对近岸海域尤其是养殖区局部海域的营养盐含量具有显著影响^[24-25]。沿湾的水产养殖池采用混养模式,养殖鱼、虾、蟹和贝类,养殖密度高,饲料投放量大。鱼类网箱养殖过程中以饵料的形式输入营养元素,养殖鱼类同化吸收的氮和磷仅占 36%、33%,其余以各种形态散失在养殖环境中,采用鲜杂鱼作为饵料时仅有 17%、10% 的氮和磷被鱼吸收,其余也进入养殖水域中^[26],这是

引起许多海域富营养化的重要原因^[27]。养殖密度越高,排泄物越多,周围水体营养盐含量越高。

4.3 人类活动变化对历年湾内营养盐含量的影响

通过三门湾沿岸各县年鉴数据收集,获得近 20 年来三门湾社会经济发展的状况。2002—2019 年三门县、宁海县和象山县人口数量由 151.21 万增长至 167.98 万。2002—2019 年三门县与宁海县水产总量由 29.42 万 t 增长至 45.67 万 t,2004—2017 年三门县与宁海县粮食总产量由 15.97 万 t 增长至 16.71 万 t,2002—2019 年三门县、宁海县和象山县总生产总值由 112.7 亿元增长至 966.62 亿元。

2007 年以来,随着人口数量、生产总值、水产品产量的不断增加,人类活动越来越频繁,尤其是

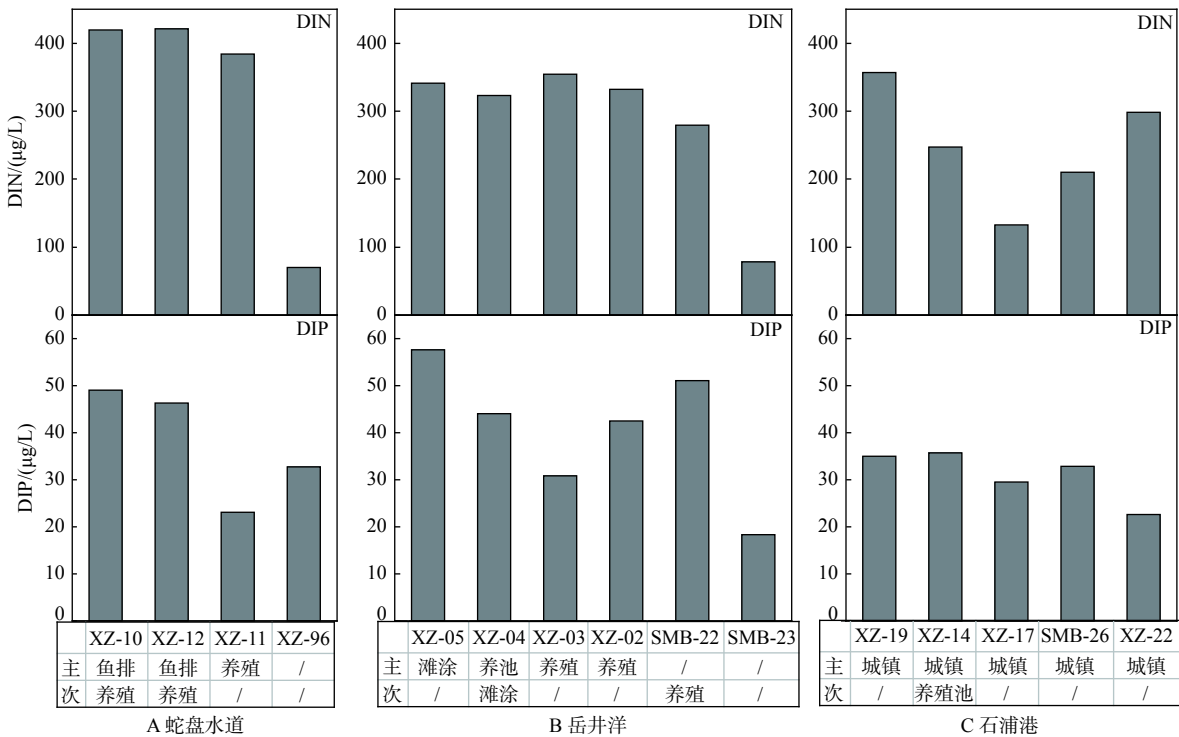


图 7 港汊盐度与营养盐含量

Fig.7 Salinity and nutrient content of harbor branches

2003—2013 年以来^[28], 三门湾的湾顶开展了大规模、大面积的滩涂围垦造地工程, 围海水产养殖池以及港岔内海水养殖面积和数量急剧增加, 蛇蟠岛以及花鼓岛两大岛屿已经消失, 湾内纳潮量减少, 潮动力降低, 淤积加剧, 湾顶竣工围垦面积达到 63.7 km², 是 60 年来围垦面积增加最快的时期^[10, 29], 也是湾

内水体营养盐含量快速增加的时期。随着环境治理政策“千万工程”和海域“蓝色海湾整治”工程的推行、实施与完善, 2011 年湾内 DIN 和 DIP 含量稍微稳定, 不再快速增加, 截止 2019 年, 湾内水体中 DIN 和 DIP 含量降低, 湾内水体质量状况得到改善 (图 8)。

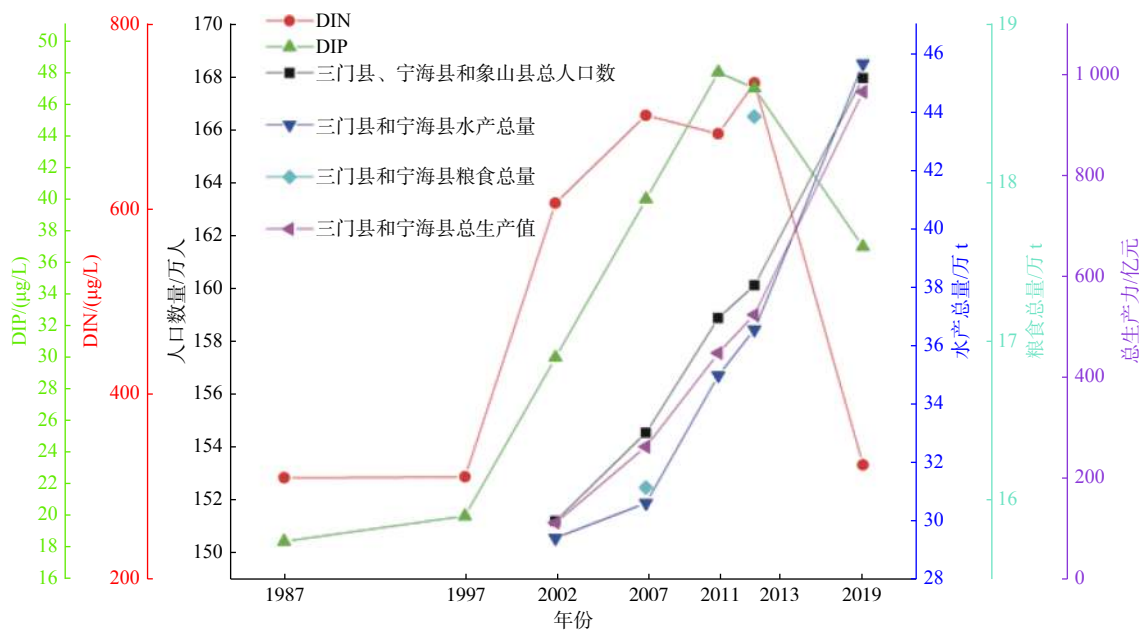


图 8 1987—2019 年三门湾秋季营养盐含量分布

Fig.8 Distribution of autumn nutrient contents in Sanmen Bay from 1987 to 2019

5 结论

本文对 2019 年 9 月采集的 84 个水体样品 (30 个海上站位和 54 个河流站位) 进行 NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ 、 PO_4^{3-} 含量检测, 对其来源和分布进行研究; 并通过 landset8 卫星遥感数据, 对湾内土地利用类型进行划分, 探讨人类活动与河流水体中 DIN、DIP 含量的相关性, 结果发现:

(1) 三门湾水体富营养化的问题依然突出, 湾内大气降雨中 DIN 和 DIP 含量最低, 河流和海域中水体受周围环境影响, 海域 DIN 和 DIP 含量在 0~439 和 18~59 µg/L, 平均值分别为 233 和 37 µg/L, 河流 DIN 和 DIP 含量在 77~1 586 和 3~126 µg/L, 平均值分别为 466 和 48 µg/L;

(2) 河流中氮、磷营养盐含量整体上呈现由上游到下游增长的趋势, 与从上游到下游的人口密度增加和农业用地面积增加密切相关, 其中农业生产对水体中 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 含量影响大, 城镇生活和工业生产排放对水体中 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 和 DIP

影响大;

(3) 海域中氮、磷营养盐的高值区主要分布在水体交换弱的港汊顶部和河流入海处, 营养盐浓度呈现由近岸高值向外海逐渐降低的趋势, 海水养殖是近岸营养盐的主要贡献者;

(4) 通过历年营养盐数据的收集发现, 湾内 DIN 含量由 1987—2007 年呈增长趋势, DIP 含量由 1987—2011 年呈增长趋势, 近几年虽然人口数量一直在增加, 但 2010 年后随着海陆生态环境治理政策的实施, 近几年 DIN 和 DIP 含量呈下降趋势, 海湾水环境状况得到较大改善。

参考文献:

- [1] WANG X, DAIGGER G, DE VRIES W, et al. Impact hotspots of reduced nutrient discharge shift across the globe with population and dietary changes. [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1-12.
- [2] DANIEL J C, HANS W P, ROBER W H, et al. Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus [J]. *Science*, 2009, 323: 1014-1015.
- [3] WILSON H F, XENOPOULOS M A. Effects of agricultural land

- use on the composition of fluvial dissolved organic matter[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(1): 37-41.
- [4] BEMAN J, ARRIGO K, MATSON P. Agricultural runoff fuels large phytoplankton blooms in vulnerable areas of the ocean[J]. *Nature*, 2005, 434(7030): 211-214.
- [5] ENZAI D, CÉSAR T, ADAM F A P, et al. Global patterns of terrestrial nitrogen and phosphorus limitation[J]. *Nature Geoscience*, 2020, 13(3): 221-226.
- [6] AMATO H K, WONG N M, PELC C, et al. Effects of concentrated poultry operations and cropland manure application on antibiotic resistant *Escherichia coli* and nutrient pollution in Chesapeake Bay watersheds[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 735(15): 1-11.
- [7] HUMBORG C, ITTEKKOT V, COCIASU A, et al. Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure[J]. *Nature*, 1997, 386(6623): 385-388.
- [8] MEIER H E M, MÜLLER-KARULIS B, ANDERSSON H C, et al. Impact of climate change on ecological quality indicators and biogeochemical fluxes in the Baltic Sea: a multi-model ensemble study[J]. *Ambio*, 2012, 41(6): 558-573.
- [9] SANTOS I R S, BURNETT W C, CHANTON J, et al. Nutrient biogeochemistry in a Gulf of Mexico subterranean estuary and groundwater - derived fluxes to the coastal ocean[J]. *Limnology and Oceanography*, 2008, 53(2): 705-718.
- [10] 黄潘阳, 陈培雄, 来向华, 等. 三门湾2003—2013年间围涂工程对水动力环境的影响研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2017, 47(10): 91-98.
- [11] 宁修仁. 乐清湾、三门湾养殖生态和养殖容量研究与评价[M]. 北京: 海洋出版社, 2005.
- [12] 《中国海湾志》编纂委员会. 中国海湾志第五分册·上海市和浙江省北部海湾[M]. 北京: 海洋出版社, 1992: 234-308.
- [13] 施晓来. 春秋季三门湾表层海水氮磷营养盐等要素含量的分布特征[J]. *应用海洋学学报*, 2013, 32(4): 461-467.
- [14] 施晓来. 近15 a来三门湾海域氮、磷营养盐分布与富营养化状况的变化分析[J]. *海洋学研究*, 2013, 31(4): 63-67.
- [15] 庞卫文. 三门湾表层海水氮磷营养盐含量及分布特征[J]. *农业与技术*, 2014, 34(8): 2.
- [16] 曾江宁, 潘建明, 梁楚进. 浙江省重点港湾生态环境综合调查报告[M]. 北京: 海洋出版社, 2011.
- [17] 许尔琪. 土地利用对水体营养物影响的研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2019, 27(12): 1880-1891.
- [18] 郑明凤, 陈斯典, 秦华鹏, 等. 降雨径流污染对深圳湾富营养化影响的模拟研究[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(9): 133-138.
- [19] 樊银鹏, 胡山鹰, 陈定江, 等. 中国磷元素代谢模式的演化与分析[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2008, 48(6): 1027-1031.
- [20] 冯绍元, 郑耀泉. 农田氮素的转化与损失及其对水环境的影响[J]. *农业环境保护*, 1996(6): 277-280.
- [21] COSKUN D, BRITTO D T, SHI W, et al. Nitrogen transformations in modern agriculture and the role of biological nitrification inhibition[J]. *Nature Plants*, 2017, 3(6): 812-818.
- [22] CARPENTER S R, CARACO N F, CORRELL D L, et al. Correll nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen[J]. *Ecological Applications*, 1998, 8(3): 559-568.
- [23] TAYLOR M, QIUWEN C, KIMBERLY VAN M, et al. River dam impacts on biogeochemical cycling[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(4): 103-117.
- [24] FIORENZA M, BENJAMIN S H, SHAUN W, et al. Cumulative human impacts on Mediterranean and Black Sea marine ecosystems: assessing current pressures and opportunities[J]. *Plo-sone*, 2017, 8(12): 103-109.
- [25] 徐淑敏, 齐占会, 史荣君, 等. 水产养殖对亚热带海湾氮磷营养盐时空分布的影响——以深澳湾为例[J]. *南方水产科学*, 2019, 15(4): 29-38.
- [26] 舒廷飞, 温琰茂, 陆雍森, 等. 网箱养殖N、P物质平衡研究——以广东省哑铃湾网箱养殖研究为例[J]. *环境科学学报*, 2004, 24(6): 1046-1052.
- [27] BOUWMAN L, KLEIN K, KLAAS W V, et al. Exploring global changes in nitrogen and phosphorus cycles in agriculture induced by livestock production over the 1900–2050 period[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(52): 20882-21195.
- [28] 陈晓英, 张杰, 马毅, 等. 近40 a来三门湾海岸线时空变化遥感监测与分析[J]. *海洋科学*, 2015, 39(2): 43-49.
- [29] 杨士瑛, 陈培雄. 三门湾自然环境特征与资源可持续利用[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2018.

VARIATION OF NUTRIENTS IN SANMEN BAY AND ITS RESPONSE TO HUMAN ACTIVITIES

LIU Xiaofeng^{1,2}, DUAN Xiaoyong^{1,2}, TIAN Yuan^{1,2}, CAO Ke^{1,2}, GAO Fei^{1,2}, YIN Ping^{1,2*}, LIU Dongyan¹

(1 Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China)

Abstract: Some key gulfs in China are facing eutrophication related to terrigenous input and human activities. The weak hydrodynamics of the gulf brings about more serious challenges to the water management organizations. In recent years, many projects have been launched in Zhejiang province to improve the water environment of gulfs. As the result, water qualities are significantly improved. Sanmen Bay, the second largest in the province has been a key research object of nutrition survey for almost 30 years. Based on the monitoring data in the past 30 years and the joint survey results conducted in September 2019, acquired are 54 samples from river basins, 30 samples from sea water and 6 samples from precipitation. All the samples are analyzed for nutrient contents, such as NO_3^- and NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} . Based on the results and the spatial distribution patterns of the nutrients in the bay, the influence factors on the nutrient spatial distribution patterns are revealed, especially the long-term changes of nutrients and their response to human activities. At present, the eutrophication problem remains prominent in Sanmen Bay. The contents of DIN and DIP in the sea sample range from 0 to 439 $\mu\text{g/L}$ and from 18 to 59 $\mu\text{g/L}$, with an average of 233 $\mu\text{g/L}$ and 37 $\mu\text{g/L}$, respectively. The contents of DIN and DIP in the river sample range from 77 to 1 586 $\mu\text{g/L}$ and from 3 to 126 $\mu\text{g/L}$, with an average of 466 $\mu\text{g/L}$ and 48 $\mu\text{g/L}$, respectively. The contents of nitrogen and phosphorus increased from the upstream to the downstream. Agriculture has great influences on $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$, while urban living and industrial production have great influences on $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ and DIP. The high values of nitrogen and phosphorus in the bay were mainly distributed at the head of the bay and the entrance to the sea where water exchanges are rather weak. The nutrient concentration shows a decreasing trend from the high values nearshore to the low value offshore. The mariculture was the main contributor of nutrients to the environment nearshore. During the period of 1987-2007, Sanmen Bay suffered a continuous increase in water nutrients. After 2010, with the enforcement of marine and land ecological environmental management policies, DIN and DIP have showed an obvious decreasing trend, and the water environment of the bay is greatly improved.

Key words: Sanmen Bay; nutrient; human activity; land use; DIN; DIP