

乳山湾外低氧海域沉积物中有机碳、氮、磷及其形态特征分析

刘军, 臧家业, 冉祥滨, 韦钦胜, 孙涛, 车宏, 汪鲁, 刘玮

(国家海洋局 第一海洋研究所 生态研究中心, 山东 青岛 266061)

摘要: 根据 2009 年 8 月在乳山湾及其毗邻海域的综合调查, 分析了该海域表层沉积物中有机碳、氮、磷含量及其组成形态的变化, 初步探讨了影响底质理化参数变化的原因及对乳山湾外近岸底层低氧形成的影响。结果表明, 乳山湾外近海为粉砂质岸滩, 以细颗粒为主; 底质中有机碳含量介于 0.49%~0.93%, 平均值为 0.69%; 总氮含量介于 382~1 020 mg/kg, 平均值为 671 mg/kg; 可溶性总氮含量介于 23.0~60.0 mg/kg, 平均值为 44.0 mg/kg, 其中可溶性有机氮和氨氮分别占可溶性总氮的 58.8% 和 38.8%; 总磷含量介于 138~769 mg/kg, 平均值为 356 mg/kg, 有机磷是占有绝对优势的磷形态(62.5%)。研究区域沉积物中总氮和湾内相当, 有机碳、总磷含量普遍低于乳山湾内, 但均明显高于南黄海区域, 且呈还原性状态。调查区域内沉积物中相对较高的有机碳、氮、磷可能是在潮流作用下乳山湾与外海的物质交换所致, 其耗氧过程是导致底层溶解氧亏损的重要原因, 值得进一步关注。

关键词: 乳山湾; 低氧区; 沉积物; 有机碳、氮磷; 形态分析

中图分类号: P76

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2012)07-0070-09

碳(C)、氮(N)、磷(P)是海洋生物生长所必需的营养元素, 其含量及形态在一定程度上影响着海洋生物的种群发育及生长^[1-2]。沉积物对上覆水体中 N、P 含量有一定的缓冲作用, 同时也是海水中 N、P 的重要来源之一^[3-4]。不同形态的 N、P 具有不同的地球化学行为和生物有效性, 某些形态的 N、P, 在物理化学及生物等因素的作用下, 可通过解析、溶解、还原等过程释放到水中, 并转化为生物可利用的形态, 从而成为影响水域营养状况及诱发富营养化的重要因素^[5-6]。海洋沉积中有机碳的堆积在碳、氮、磷的收支循环中具有重要意义^[7], 同时反映了该海域生产力状况。因此, 研究沉积物中 N、P、有机碳的形态、分布特征是进一步研究它们在海洋生态系统中作用的前提。

乳山湾邻近海域滩涂广阔, 水深较浅, 是十分重要的海水养殖区。乳山湾养殖业及工农业的快速发展导致排海的有机物量显著增加, 极大地影响了该海域海洋环境质量状况^[8]。已有研究表明, 养殖区氮、磷含量明显高于非养殖区^[9-10], 底质环境也呈现弱还原性^[11]。大量有机质和还原性物质在一系列生物、化学过程后消耗了底层的大量氧气, 这也使得乳山湾水体溶解氧浓度显著较低^[12-13], 在夏季最低值仅为 3.21mg/L(饱和度为 35.5%), 远低于溶解氧的理

论的饱和浓度。缺氧现象的存在, 对其海区的生态系统稳定有着重要影响, 同时, 由于表层沉积物的氧化性环境遭到破坏, 这可能显著影响该海域物质形态和循环过程。本研究根据 2009 年 8 月份在乳山湾及其毗邻海域的综合调查, 分析了该海域表层沉积物氮、磷、碳的形态分布特征, 并结合溶解氧调查资料, 分析了该海域表层沉积物中有机碳、氮、磷含量及其组成形态的变化, 初步探讨了影响底质理化参数变化的原因及对乳山湾外近岸底层低氧形成的影响, 旨在丰富和加深对低氧水域生物地球化学过程的认识, 以为近海海洋环境管理和保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 站点布设

本次调查于 2009 年 8 月在山东烟台乳山湾口及其邻近海域(36.2°~37°N, 120.9°~122.25°E)进行。调查水域的平均水深约为 15 m, 共设有 47 个站位, 主

收稿日期: 2011-03-21; 修回日期: 2011-04-29

基金项目: 中国近海海洋综合调查与评价专项课题(908-01-BC14)

作者简介: 刘军(1985-), 男, 湖北宜昌人, 硕士研究生, 主要从事水环境化学研究, 电话: 13953244600, E-mail: liu009liu@sina.com; 臧家业, 通信作者, E-mail: zjy@fio.org.cn

要进行了水文、气象水体化学和生物等参数的调查,并在其中 23 个站位采集了表层沉积物, A、E 站位

位于湾口, 其他位于湾口外邻近水域。采样站位见图 1。

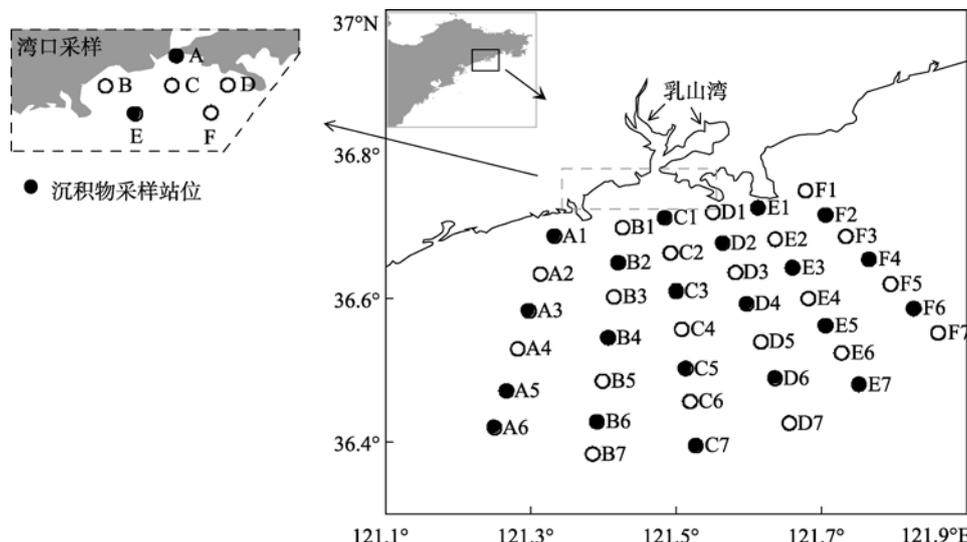


图 1 乳山湾及其邻近海域采样站位

Fig. 1 Location of study area and sampling stations

1.2 样品采集与分析

1.2.1 样品采集

用蚌式采泥器采集表层沉积物, 除去上覆水, 用塑料勺子挖取表层泥土于样品袋, 密封后冷冻 (-20℃) 储存。返回实验室后用冷冻干燥仪(德国, Christ 公司, CT ALPHA 2-4/LSC)干燥样品, 研磨, 过 80 目筛, 用于烧失率、总有机碳、总氮、总磷、有机磷、可溶性有机氮等测定。另取部分已混匀的样品用于含水率、粒度的测定。

1.2.2 样品分析方法

按照《海洋监测规范》(GB 17378-2007)中规定以及相关文献方法进行分析处理, 总氮、总磷、有机磷、可溶性有机氮提取所用试剂纯度均为优级纯, 并测定提取液空白。

含水率、烧失率基于差重法(GB/T 12763.8-2007), 粒度采用激光粒度仪(英国, Malvern 公司, Mastersizer 2000)。总有机碳采用重铬酸钾氧化-还原容量法(GB 17378.5-2007)。总氮采用碱性过硫酸钾氧化法, 预处理依据《海洋调查规范》(GB/T 12763.8-2007), 可溶性总氮(TSN)、氨氮(NH₄-N)、硝氮(NO₃-N)和亚硝氮(NO₂-N)预处理^[14]后用连续流动分析仪(SKALAR San++)测定, TSN 与可溶性无机氮(NH₄-N、NO₃-N、NO₂-N 之和)的含量之差即为可溶性有机氮(SON)的含量。总磷(TP)、无机磷(IP)预处理后用磷钼兰法测定^[15-17], 差值即为有机磷(OP)。

DO 在现场用 Winkler 法测定(《海洋监测规范》GB 17378.4-2007), COD 按照 GB 17378.4-2007 规定的方法测定。

2 结果与分析

2.1 表层沉积物特征

2.1.1 粒度

粉砂为研究区域主要的控制粒级, 其含量变化范围为 53.8%~82.9%, 平均值为 71.0%, 除了 B2 和 D6 站位, 其余站位粉砂的含量均超过 60%。黏土是该区沉积物次优势组分, 平均值为 19.9%, 其中有 9 个站位含量超过 20%。砂组分含量的均值为 9.1%, B2 站位砂含量高达 32.3%。所测站位均未检出砾级组分。综上所述, 乳山湾外近海为粉砂质岸滩, 且以细颗粒为主。

按照优势组分定名的原则(谢帕德命名法), 研究区域的沉积物类型主要有砂质粉砂(ST)、粉砂(T)和黏土质粉砂(YT)三种。从图 2 可以看出, 砂质粉砂主要分布在乳山湾内及近岸海域, 黏土质粉砂主要分布在乳山湾外海以及 B6、C3、C5、D2 附近海域, 其余区域以粉砂为主。黏土的高值区主要分布在 D2、D4 站位和远岸海域。砂组分的高值主要分布于乳山湾湾口和西侧近岸。总体来说, 研究区域沉积物类型从近岸到外海呈带状分布, 近岸沉积物粒度明显大于远岸。

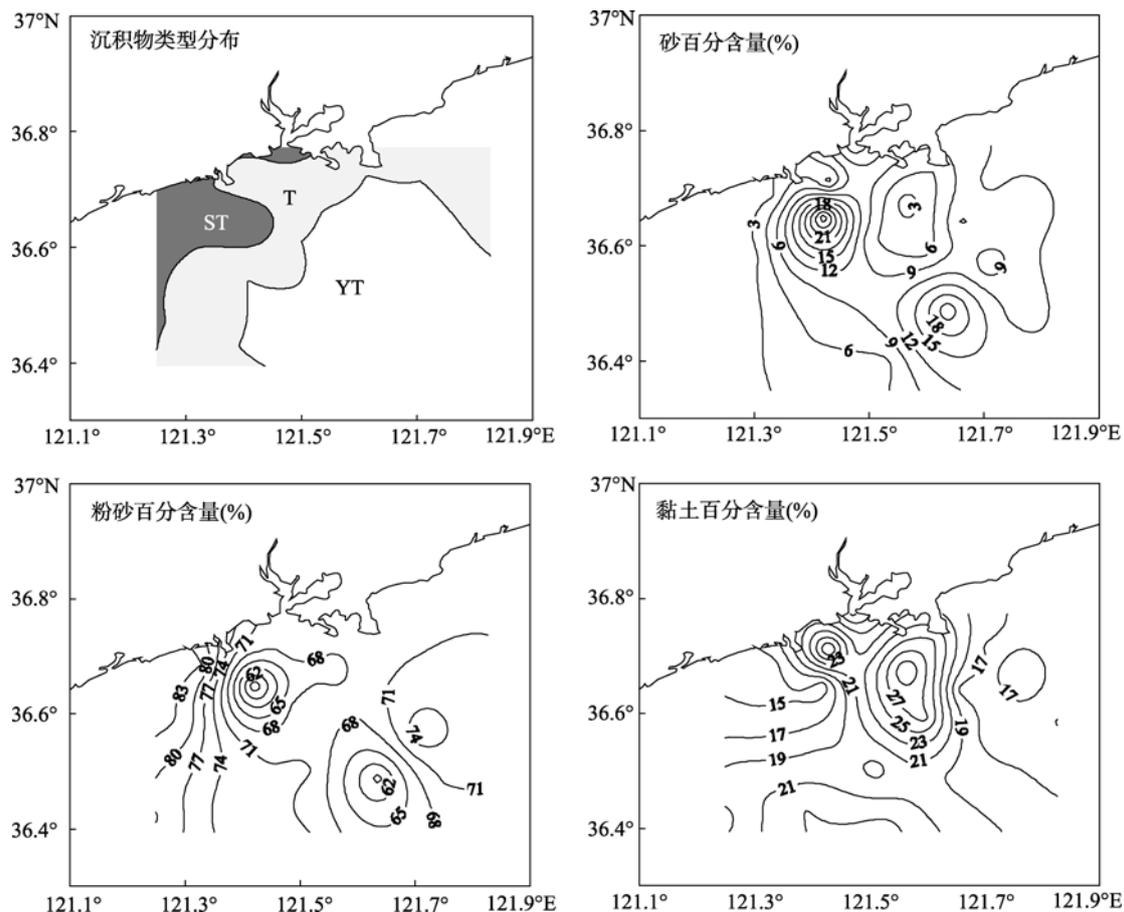


图2 沉积物类型分布及砂、粉砂、黏土百分含量分布图

Fig. 2 Distributions of sediment types and sand, silt and clay percentages

2.1.2 含水率、烧失率

研究区域表层沉积物含水率的变化范围为 26.2%~55.6%，平均值为 39.5% (表 1)，其中最大值出现在 B6 站位，B4 和 D4 站位次之，C1 站位最小；烧失率变化范围为 1.7%~17.5%，平均值为 6.4% (表 1)，其中最大值出现在 A3 站位，D6 站位次之，E7 站位最小。从整体上看，含水率有从近岸到外海逐渐增大的趋势，这与粒度从近岸到外海逐渐变化趋势相一致；烧失率没有明显的变化趋势。

2.2 有机碳、氮、磷形态及分布特征

2.2.1 沉积物中的有机碳

研究区域表层沉积物 TOC 变化范围为 0.49%~0.93%，平均值为 0.69% (表 2)。从调查数据看，乳山湾邻近海域底层沉积物有机碳变化幅度较大，最大值为最小值的 1.9 倍。

图 3 反映了所调查站位 TOC 的平面分布特征，可以看出，B4、E5 站位含量最高，A5、E3 站位次之；

TOC 在 E 站位出现最小值，A6、C1 站位次之。总体来看，研究区域表层沉积物中 TOC 的含量在湾口附近及外海较低，中部区域相对较高。

2.2.2 沉积物中氮的含量

研究区域表层沉积物 TN 的变化范围为 446~1 020 mg/kg，平均值为 685 mg/kg，可溶性总氮的变化范围为 23.0~60.0 mg/kg，平均值为 44.0 mg/kg，SON 的浓度相对较低，变化范围为 9.0~42.6 mg/kg，平均值为 25.8 mg/kg； NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 平均含量分别为 17.0 mg/kg 和 1.10 mg/kg，其中 SON 和 NH_4 -N 分别占可溶性总氮的 56.7%和 40.6% (表 2)，是该海域表层沉积物中可溶性氮的主要存在形式，这可能是由于表层沉积物中有机物质的含量较高的原因。另外，TN 和 SON 都在 A1、B4、B6 站位含量较高，E3、E5、C7 含量较低，且 SON、 NH_4^+ -N 与 TSN 呈较强的正相关关系 ($r=0.965$, $P<0.01$, $n=22$, $[\text{SON}]=0.825 \times [\text{TSN}]-10.4$; $r=0.635$, $P<0.01$, $n=22$, $[\text{NH}_4^+ \text{-N}] =$

0.175×[TSN]+9.35), 同时 NH₄⁺-N 和 SON 也存在线性相关关系($r=0.4118, P<0.01, n=22, [NH_4^+-N]=0.133\times$

[SON]+13.6), 表明该区域 SON 含量与氨氮有着密切的联系, 其可能是 NH₄⁺-N 的主要来源之一。

表 1 乳山湾及外海表层沉积物粒度、含水率、烧失率分析结果(%)
Tab. 1 Granularity, moisture content and ignition loss in sediment(%)

项目	粒度				含水率	烧失率
	砾	砂	粉砂	黏土		
范围	0.0	0.7~32.3	53.8~82.9	14.0~31.0	26.2~55.6	1.7~17.5
平均值	0.0	9.1	71.3	19.9	39.5	6.4

表 2 乳山湾及外海表层沉积物碳、氮、磷分析结果
Tab. 2 Concentrations of carbon, nitrogen and phosphorus in sediment

项目	变化范围	平均值
TOC(%)	0.49~0.93	0.69
TN(mg/kg)	382~1020	671
TSN(mg/kg)	23.0~60.0	44.0
NH ₄ -N(mg/kg)	11.3~22.5	17.0
NO ₃ -N(mg/kg)	0.89~1.89	1.10
SON(mg/kg)	9.0~42.6	25.8
TP(mg/kg)	138~769	356
IP(mg/kg)	63~172	109
OP(mg/kg)	4~661	247

769 mg/kg, 平均值为 372 mg/kg; 有机磷变化范围为 4~661 mg/kg, 平均值为 247 mg/kg; OP 占 TP 的百分含量变化为 3.0%~87.8%, 平均值为 62.5%(表 2)。从中可以看出有机磷是该海域表层沉积物中磷的主要存在形式。TP 与 OP 极显著相关性($r=0.983, P<0.01, n=22, [OP]=1.02\times[TP]-115$)。表明该区域具有较高的初级生产力, 生物有机质是构成 TP 的重要来源。

图 5 是 TP、OP 的平面分布特征, 可以看出, TP 在 F4 站位含量最高, A3、C3、F2 次之; OP 在 F4 站位含量最高, C3、F2 次之; 不同磷形态均在 C5 站位出现最小值。总体来说, 乳山湾沉积物中不同 P 形态的含量具有明显的地域特征, TP 和 OP 的高值区主要集中在乳山湾湾口以外附近, 而到了外海 TP、OP 含量则逐渐减小。

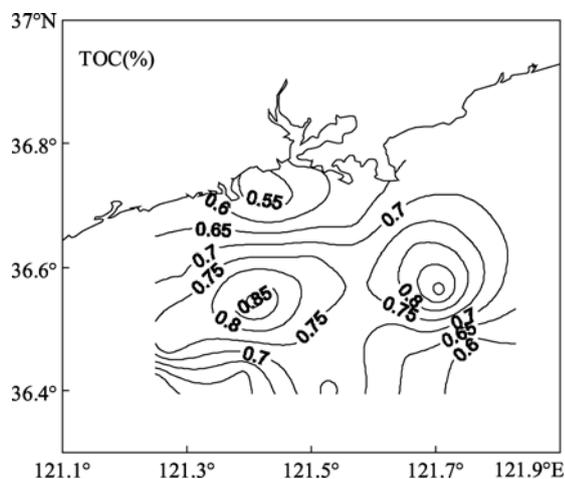


图 3 有机碳的平面分布

Fig. 3 Horizontal distribution of total organic carbon

从不同 N 形态的平面分布图可以看出, TN 在 E1 站位出现最大值, B6 和 F4 站位次之, SON 在 A1 站位出现最大值, B4 和 B6 站位次之(图 4)。总体来说, 乳山湾沉积物中不同 N 形态的含量呈现东部水域较西部水域低的特点。

2.2.3 沉积物中磷的含量

研究区域表层沉积物总磷的变化范围为 138~

3 讨论

3.1 影响有机碳、氮和磷分布的因素

乳山湾邻近水域泥沙主要来源于乳山河、锯河的河流输送^[18]。根据孙永根等的研究^[19], 乳山湾内河流带来的泥沙大部分由落潮流带出湾外, 在其门口附近沉积形成落潮流三角洲。表层沉积物在海水的动力作用下, 不断受到侵蚀、冲刷、搬运, 由岸向外海输送。在沉积物输送过程中, 较粗颗粒的砂质粉砂较容易在近岸沉积, 粉砂其次; 黏土质粉砂淤积一般在离岸较远的水域沉积。渐次变化的沉积环境是导致泥沙类型分布的主要原因。

通常而言, 有机碳一般富集于细颗粒沉积物中, 但该区域 TOC 分布与沉积物粒度并没有发现明显的相关关系, 这可能与研究区域特殊的沉积环境(包括陆源输入、海洋自生以及复杂的水动力输送等)有关。整个调查区域有机碳含量均低于海洋沉积物质量(GB 18668-2002)标准第 I 类规定; 相对于养殖业较

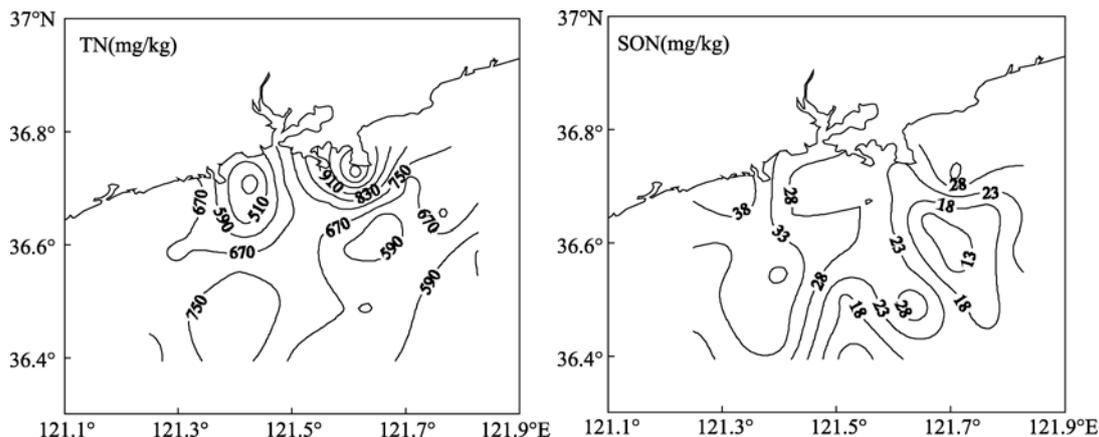


图 4 总氮、可溶性有机氮的平面分布

Fig. 4 Horizontal distributions of total nitrogen and soluble organic nitrogen

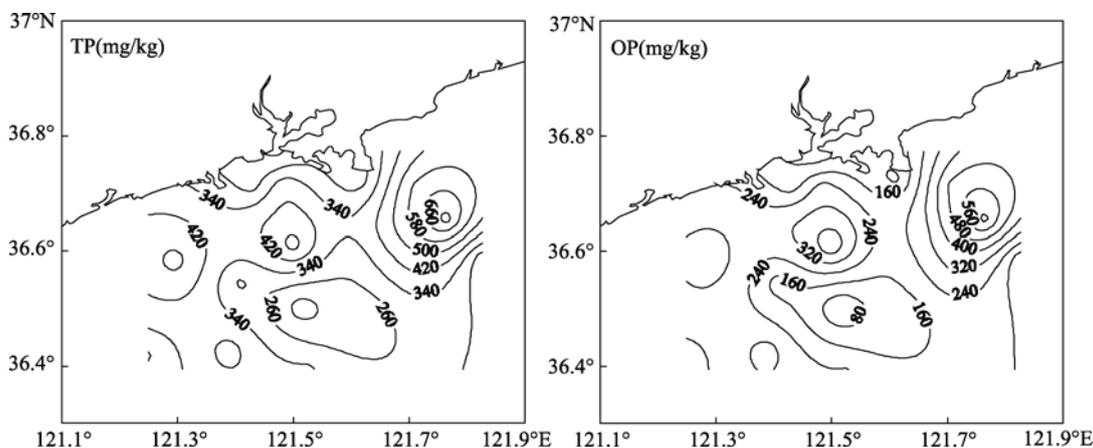


图 5 总磷、有机磷的平面分布

Fig. 5 Horizontal distributions of total phosphorus and organic phosphorus

为发达的乳山湾湾内而言, 研究区域内有机碳含量普遍较低^[11], 但明显高于南黄海区域^[20], 这说明乳山湾外海沉积物中有机物含量受到一定程度上的人文活动影响。由于人类活动的增加, 养殖业急剧发展等因素, 导致近海有机物含量升高, 增加的有机物的可能使底质有机物含量增加。在 2009 年的调查中, 乳山湾口 COD 浓度(0.71~1.77 mg/L)明显高于历史同期^[8], 这也从一个侧面表明乳山湾养殖业及工农业的快速发展导致排海有机物的量显著增加, 并可能导致调查区域有机物含量进一步升高。统计分析显示, 烧失率与有机碳之间存在正相关关系($r=0.551$, $P<0.01$, $n=22$), 这表明生物沉积作用可能是该海域碳的重要来源之一。

由于沿岸人类活动的加剧, 乳山湾养殖业的快速发展, 导致水体中氮、磷浓度升高, 这可能导致沉

积物中氮、磷含量增加。乳山湾外近海沉积物中总氮和湾内相当, 总磷浓度相对于南黄海偏高, 这表明滨岸养殖业在很大程度上影响了沉积物中氮、磷的含量, 并可能对近岸环境产生较大地影响。调查区域还受到黄海冷水团和潮汐作用的共同影响^[19,21], 这种影响可在一定程度上致使潮水携带的湾内物质在调查区域淤积, 从而致使沉积物中有机碳、氮和磷浓度偏高。

表 3 列出了研究区域表层沉积物中不同形态氮、磷和有机碳的平均含量与其他海域相比较的情况。从表中可以看出: 研究区域内有机碳、总磷含量普遍低于乳山湾内, 总氮和湾内相当, 有机碳、总氮、总磷明显高于南黄海区域。就乳山湾及其邻近海域而言, 高值区主要集中在乳山湾近岸, 低值区则主要分布在外海和湾口处。造成上述差异的

可能原因是：一方面受陆源输入的影响,近岸海域受陆地影响较大,陆地输送的氮、磷营养盐负荷较高,显著影响了近岸海域营养盐生物地球化学过程,相对于湾外开阔水域而言,湾内较为封闭的环境不利于氮、磷的排出;其二是靠近湾内养殖区,养殖密度大,贝类滤食大量有机颗粒物,产生

大量粪便,在潮水的作用下,湾内物质被排入到湾口及外海^[19],并在外海积累,从而加重了该区域站位底质沉积物中各形态 N、P 和 TOC 的含量,使之明显高于南黄海水域。由此可得,养殖、乳山湾与外海的物质交换对乳山湾及其邻近水域各形态 N、P 和 TOC 的含量影响较大。

表 3 研究区域沉积物中氮、磷、有机碳平均值与其他区域比较

Tab. 3 Comparison of nitrogen, phosphorus and organic carbon in sediment of different sea areas

海区	TN(mg/kg)	TP(mg/kg)	OP(mg/kg)	TOC(%)	引用文献
乳山湾邻近水域	671	356	247	0.69	本研究
乳山湾东流区滩涂	540	460		0.86	[11]
南黄海	535	307		0.30~0.79	[20,22]
乳山湾东流区养殖区	654	1190	227		[9,10]
乳山湾东流区非养殖区	564	1110	206		[9,10]
山东南部近海	520	240		0.33	[23]
黄海		484	134		[24]

3.2 有机碳的物源分析

在海洋沉积物研究中经常用碳、氮比的大小来判断有机物的来源,即海生来源还是陆生来源。 C/N (原子比)大于 12 的划为陆源有机物, C/N 小于 8 的划为海源有机物^[25], C/N 越大陆源输入的有机质成分就越大。分析结果表明,所有站位 C/N 值均大于 8,说明研究区域沉积物中有机物主要受沿岸的工农业生产以及乳山湾海水养殖的影响。参照钱君龙、贾国东等利用 C/N 值估算总有机碳中水生有机碳和陆源有机碳的方法^[26-27],则 TOC、TN、海洋自生有机碳(C_w)和陆源有机碳(C_L)有如下关系:

$$TOC = C_w + C_L$$

$$TN = N_w + N_L$$

$$C_w / N_w = 5$$

$$C_L / N_L = 20$$

求解上述方程组可得到海洋自生有机碳和陆源有机碳的含量。其中陆源输入有机碳的含量变化范围为 0.23%~0.81%,平均值为 0.49%,陆源输入有机碳占总有机碳的百分含量变化范围为 39%~89%,平均值为 69%,除了 B6 站位,所有站位有机碳的陆源输入含量均比海洋自生有机碳大(图 6),说明沉积物有机碳主要来源于陆源输入。

3.3 碳、氮、磷形态分布特征与低氧区沉积环境的相互影响

根据 2009 年 8 月份调查获得的乳山湾外近海溶解氧(DO)的浓度分布(图 7)发现:8 月份底层溶解氧

最低浓度仅为 3.21mg/L(饱和度: 35.5%),存在溶解氧低值区,其中低值主要分布在 A5、C2、F2 站位附近,调查水域表、底层溶解氧差值(ΔDO)的平均值为 0.42 mg/L,而在 DO 低值区站位 ΔDO 均超过 1.0 mg/L,最大值为 3.89 mg/L。然而相关分析表明,表、底层 ΔDO 与 COD 无显著的相关关系,这表明水柱内化学氧化作用有限,那么不难推出底泥耗氧过程是导致该海域底层低氧的重要原因。处于底层溶解氧相对低值区($DO < 5$ mg/L)的站位 TOC 含量相对较高,原因是:一方面,从自生有机碳分布可以看出(图 6),自生有机碳高值区处在溶解氧相对低值的区域(A5、F2 站位),其平均值为 0.24%;除高值以外的其他站位平均值为 0.20%,这说明低氧区具有较高的有机碳积累(陆源以及自生作用);另一方面,低氧的存在降低了沉积物中有机质的氧化分解。研究区域表层沉积物的氧化还原电位偏低(-168~75 mV,平均值为-96 mV),呈现还原环境^[28];乳山湾及其邻近水域内表层沉积物主要以快速的化学耗氧为主^[13],耗氧物质可能有铁、锰和硫等无机物质的贡献,其也在一定程度上减少了表层有机质的消耗,致使乳山湾邻近海域表层沉积物中的 N、P 主要以有机形态存在。通过分析沉积物氨氮和硝氮比值($NH_4: NO_3$)还发现,在底层溶解氧低值区站位 A5、F2 氨氮和硝氮的比值最高,分别为 20、21,平均值为 16,这是因为海洋沉积物中氮的存在形态与沉积物所处的微环境有极其重要的关系,在缺氧条件下,由于硝化作用的

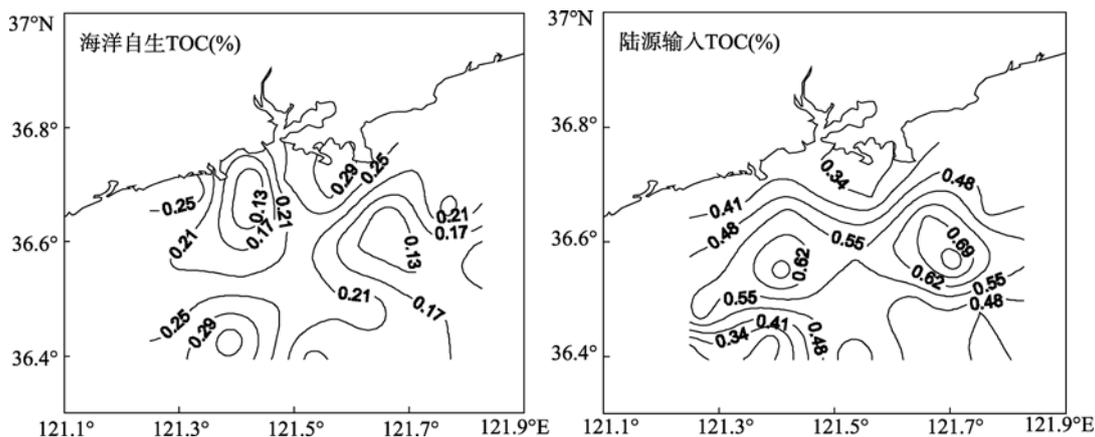


图6 海洋自生和陆源输入有机碳的含量分布
Fig. 6 Distributions of total organic carbon form land and sea

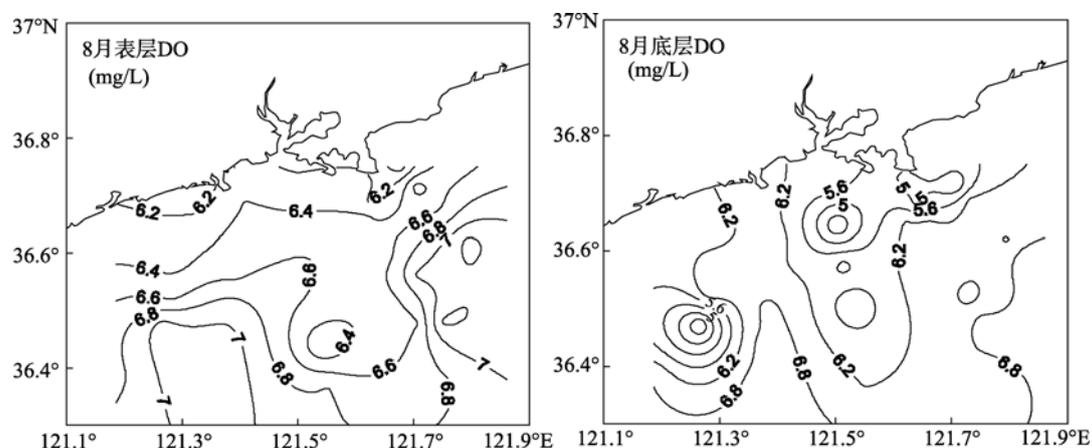


图7 乳山湾邻近海域8月表、底层溶解氧的平面分布
Fig. 7 Horizontal distributions of dissolved oxygen at the surface and bottom water layers in August in the Ruzhuan Bay

停止及氨氮的不断生成,致使还原条件下沉积物中可溶性氨氮含量比氧化环境下的高^[29]。调查区域内沉积物中相对较高的有机碳、氮、磷可能是在潮流作用下乳山湾与外海的物质交换所致,其耗氧过程也可能是导致底层溶解氧亏损的重要原因,值得进一步关注。

4 结论

(1)乳山湾邻近海域的底质沉积物类型主要砂质粉砂、粉砂和黏土质粉砂三种,乳山湾外近海为粉砂质岸滩,以细颗粒为主。研究区域表层沉积物含水率的变化范围为 26.2%~55.6%,平均值为 28.6%,烧失率变化范围为 1.7%~17.5%,平均值为 6.4%。

(2)沉积物中有机碳含量介于 0.49%~0.93%,平均值为 0.69%;总氮含量介于 382~1 020 mg/kg,平均值为 671 mg/kg;可溶性总氮含量介于 23.0~60.0

mg/kg,平均值为 44.0 mg/kg,在其中可溶性有机氮和氨氮分别占可溶性总氮的 58.8%和 38.8%;总磷含量介于 138~769 mg/kg,平均值为 356 mg/kg,有机磷是占有绝对优势的磷形态(62.5%)。

(3)研究区域沉积物中总氮和湾内相当,有机碳、总磷含量普遍低于乳山湾内,但均明显高于南黄海区域,且呈还原性状态。有机碳、氮和磷的分布及形态特征与陆源输入、滨海养殖和潮汐密切相关,其耗氧过程可能对近岸水体底层溶解氧浓度产生重要影响。

参考文献:

[1] Hecky R E, Kilham P. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effects of enrichment[J]. *Limnology and Oceanography*, 1988, 3: 796-822.

- [2] Fielding P J, Damstra J, Branch G M. Benthic diatom biomass, production and sediment chlorophyll in Langebaan Lagoon, South Africa[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1988, 27: 413-426.
- [3] Zabel M, Dahmke A, Schulz H D. Regional distribution of diffusive phosphate and silicate fluxes through the sediment-water interface: The eastern south Atlantic[J]. *Deep-Sea Research*, 1998, 1(45): 277-300.
- [4] Ulloa O, Pantoja S. The oxygen minimum zone of the eastern South Pacific[J]. *Deep-Sea Research II*, 2009, 56: 987-991.
- [5] Conley D L, Paerl H W, Howarth R W, et al. Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus[J]. *Science*, 2009, 323(20): 1014-1015.
- [6] Wu F, Guo W D, Zheng P R, et al. Distribution of phosphorus species in sediments of mariculture waters in Sandu Bay[J]. *Marine Environmental Science*, 2005, 24(4): 24-27.
- [7] Middelburg J J, Levin L A. Coastal hypoxia and sediment biogeochemistry[J]. *Biogeosciences*, 2009, 6: 1273-1293.
- [8] 马绍赛, 赵俊, 周诗赉, 等. 乳山湾水化学环境[J]. *海洋水产研究*, 1996, 17(1): 63-70.
- [9] 王迪迪, 孙耀, 石晓勇, 等. 乳山湾东流区沉积物中氮形态的分布特征[J]. *海洋环境科学*, 2009, 28(6): 639-642.
- [10] 王迪迪, 孙耀, 石晓勇, 等. 乳山湾东流区沉积物中不同形态磷的分布特征[J]. *生态学报*, 2008, 28(5): 2417-2423.
- [11] 幸福言, 崔毅, 陈聚法, 等. 乳山湾表层沉积物质量现状及其评价[J]. *海洋水产研究*, 2004, 25(6): 42-46.
- [12] 崔毅, 马绍赛, 陈碧鹃, 等. 乳山湾生物理化环境现状研究[J]. *中国水产科学*, 1999, 6(4): 76-80.
- [13] 冉祥滨, 臧家业, 韦钦胜, 等. 乳山湾口及其邻近海域溶解氧分布特征及影响因素研究[J]. *海洋学报*, 2011, 33 (4): 173-180.
- [14] 林素梅, 王圣瑞, 金相灿, 等. 湖泊表层沉积物可溶性有机氮含量及分布特性[J]. *湖泊科学*[J], 2009, 21(5): 623-630.
- [15] Aspila K I, Agemian H, Chan A S Y. A semi-automatic method for the determination of inorganic, organic and total phosphate in sediments[J]. *Analyst*, 1976, 101: 187-197.
- [16] 曹文卿, 刘素美. 东、黄海柱状沉积物中有机磷与无机磷的含量与分布研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2010, 40(1): 069-074.
- [17] Parsons T R, Maita Y, Lalli C M. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis[M]. UK: Pergamon Press, 1984.
- [18] 《中国海湾志》编纂委员会. 中国海湾志第四分册[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
- [19] 孙永根, 吴建政, 朱龙海, 等. 乳山湾泥沙运移趋势及蚀淤分析[J]. *海洋地质动态*, 2007, 23(4): 26-31.
- [20] 陈建芳, 金海燕, 刘小涯, 等. 黄海和东海沉积物有机质活性及营养盐再生潜力初探[J]. *地球化学*, 2005, 34(4): 387-394.
- [21] 于非, 张志欣, 刁新源, 等. 黄海冷水团演变过程及其与邻近水团关系的分析[J]. *海洋学报*, 2006, 28(5): 26-34.
- [22] 宋金明, 李学刚, 邵君波, 等. 南黄海沉积物中氮、磷的生物地球化学行为[J]. *海洋与湖沼*, 2006, 37(4): 370-376.
- [23] 吕桂才, 张哲, 王江涛, 等. 山东南部近海沉积物中碳、氮、磷的分布特征[J]. *海洋科学*, 2010, 34(9): 1-4.
- [24] 冯强, 刘素美, 张经. 黄、渤海区沉积物中磷的分布[J]. *海洋环境科学*, 2001, 20(2): 24-27.
- [25] Milliman J D, Xie Q C, Yang Z S. Transport of particulate organic carbon and nitrogen from the Yangtze river to the ocean [J]. *American Journal of Science*, 1984, 284: 824-834.
- [26] 钱君龙, 王苏明, 薛斌, 等. 湖泊沉积研究中一种定量估算陆源有机碳的方法[J]. *科学通报*, 1997, 42(15): 1655-1658.
- [27] 贾国东, 彭平安, 傅家谟, 等. 珠江口近百年来富营养化加剧的沉积记录[J]. *第四季研究*, 2002, 22(2): 158-165.
- [28] 侯保荣, 郭公玉, 马士德, 等. 海洋腐蚀环境理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 85.
- [29] Hansen L S, Blackburn T H. Aerobic and anaerobic mineralization of organic material in marine sediment microcosms[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1991, 75: 283-291.

Characteristics of different forms of nitrogen and phosphorus and organic carbon in the sediments of low-oxygen zones in adjacent Rushan Bay

LIU Jun, ZANG Jia-ye, RAN Xiang-bin, WEI Qin-sheng, SUN Tao, CHE Hong, WANG Lu, LIU Wei

(Research Center for Marine Ecological Environment of The First Institute of oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

Received: Mar.,21,2011

Key words: Rushan Bay; low-oxygen zones; sediment; organic carbon, nitrogen and phosphorus; form analysis

Abstract: A comprehensive survey of Rushan Bay and its adjacent area was carried out in August, 2009. The content and forms of organic carbon, nitrogen and phosphorus in surface sediments were analyzed. Fine sediment is the major components of the sediment in this area. The contents of organic carbon, total nitrogen and phosphorus in the marine sediments range from 0.49% to 0.93%, from 382 to 1020 mg/kg and from 138 to 769 mg/kg, with their average value of 0.69%, 671 mg/kg and 356 mg/kg, respectively. In addition, dissolved organic and ammonia nitrogen account for 58.8% and 38.8% of the total dissolved nitrogen. The organic phosphorus is the dominant part of the total phosphorus (62.5%). The concentration of total nitrogen is equal to that in Rushan Bay, The organic carbon and phosphorus concentrations are lower than those in Rushan Bay, but higher than those in the South Yellow Sea. The relatively high content of organic carbon, nitrogen and phosphorus in the sediments might due to the material exchange between Rushan Bay and the open seas. The sediment oxygen consumption may be the major cause of loss of dissolved oxygen in the bottom water, which needs further research.

(本文编辑: 康亦兼)