

乳山湾东流区沉积物中不同形态磷的分布特征

王迪迪^{1,2}, 孙 耀^{2,*}, 石晓勇¹, 徐林梅^{1,2}, 孟 伟³, 姜守轩³, 宋健中³

(1. 中国海洋大学化学化工学院, 青岛 266003; 2. 中国水产科学院黄海水产研究所, 青岛 266071;

3. 乳山市海洋与渔业局, 威海 264500)

摘要:对 2003 年 8 月在乳山湾东流区采集的沉积物样品中的不同形态磷的平面和垂直分布特征进行了分析,并探讨了这些磷的形态分布与贝类养殖的关系,结果表明,不同形态磷在贝类高密度养殖区含量大于低密度养殖区。养殖区的垂直分布比较复杂,在 1~20cm 范围含量均出现较大波动,这与贝类养殖活动有关。Fe-P、Al-P 含量出现较大波动还与污染程度有关,Or-P 还与浮游植物活动有关。养殖区 Ex-P、Fe-P、NAIP 占 TP 的平均百分含量大于非养殖区,De-P、Oc-P 恰好相反。Ca-P 是乳山湾沉积物中含量最高的磷形态,Fe-P 和 Or-P 是最主要的两种生物可获得磷。TP、Or-P 含量在养殖区与非养殖区之间没有显著差异,养殖区 Fe-P 含量高于非养殖区,3 种磷的平均含量一般大于其它海区。非生物可获得磷约占 TP 的 60% 左右。

关键词:磷形态;沉积物;乳山湾

文章编号:1000-0933(2008)05-2417-07 中图分类号:Q178 文献标识码:A

Distribution of different phosphorus forms in sediments of Eastern Rushan Bay

WANG Di-Di^{1,2}, SUN Yao^{2,*}, SHI Xiao-Yong¹, XU Lin-Mei^{1,2}, MENG Wei³, JIANG Shou-Xuan³, SONG Jian-Zhong³

1 Institute of Chemistry and Chemical Engineering Ocean University of China, Qingdao 266003, China

2 Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China

3 Ocean and Fishery Bureau of Rushan, Weihai 264500, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 2417 ~ 2423.

Abstract: The horizontal and vertical distribution of different phosphorus forms was analyzed in sediment samples collected from Eastern Rushan Bay in August 2003 and the relationship was discussed between the distribution of different phosphorus forms and the bivalve culture. The result showed that the contents of different phosphorus forms in high density cultivating areas were usually higher than those of low density cultivating areas. The vertical distribution of the different phosphorus forms in the cultural areas was complex, their contents were not steady in 1—20cm layer, these were influenced by the bivalve culture. Fluctuation of the contents of Fe-P and Al-P were also influenced by pollution, Or-P was also influenced by activity of phytoplankton. The average percentage of Ex-P、Fe-P、NAIP in TP in the cultural areas was higher than those in the natural areas, De-P and Oc-P were the opposite. The content of Ca-P was the highest, Fe-P and Or-P were the prevalent forms of NAIP. The contents of TP and Or-P had no significant difference between two areas, The content of Fe-P in the cultural areas was higher than that of the natural areas. The contents of three phosphorus forms were general higher

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30271021);中国水产科学研究院科研基金资助项目(2003-1-3)

收稿日期:2007-02-08; **修订日期:**2007-12-07

作者简介:王迪迪(1982~)女,山东淄博人,硕士生,主要从事海洋环境化学研究. E-mail: wangdi1982214@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sunyao@ysfri.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30271021); Scientific Foundation of Chinese Academy of Fishery Science (2003-1-3)

Received date: 2007-02-08; **Accepted date:** 2007-12-07

Biography: WANG Di-Di, Master, mainly engaged in chemistry of marine environment.

than the other areas. Non-bioavailable phosphorus accounted for about 60 percent of TP.

Key Words: phosphorus forms; sediment; Rushan Bay

磷(P)是海洋浮游植物生长所必需的营养元素,在海洋生态系统物质循环中浮游植物起着非常重要的作用。沉积物对上覆水体中P含量有一定的缓冲作用,也是海水中P的重要来源之一^[1~3]。P能否与沉积物发生界面交换取决于其形态,不同结合态的P具有不同的地球化学行为和生物有效性,只有某些形态的磷,在物理化学及生物学等因素的作用下,通过解吸、溶解、还原等过程而释放到水中,转化为生物可直接利用的磷,成为影响水域营养状况及诱发富营养化的重要因素^[4]。在养殖水域,生物体自身的代谢作用,对养殖环境产生很大的影响。研究发现^[5],养殖区沉积物中P的含量随着沉积物的积累逐渐升高,沉积物溶解态P的释放提高上覆水体18%的P水平。因此,研究养殖海域P的形态分布特征对该海域的生态环境具有深远的意义。

目前,国内外对沉积物中P的存在形态研究不少^[4~15],但对海水养殖水域沉积物中磷的形态研究并不多见^[4~6]。本文通过对乳山湾东流区沉积物中P的调查,研究了养殖区与非养殖区各形态磷的分布特征,进一步探讨了各形态磷的分布与贝类养殖的关系。

1 研究区域

乳山湾位于山东半岛南部,即121.42°~121.62°E、36.73°~36.87°N范围内,呈V字形,自然形成西流区和东流区。东流区湾口宽约600m,长约13km,面积32km²,水深较浅,平均水深3.5m,是典型的半封闭式内湾,湾内为正规半日潮。乳山湾滩涂广阔,底质以粘土质粉砂为主,为贝类养殖的良好场所,是重要的经济贝类养殖区。主要养殖品种为牡蛎、杂色蛤、缢蛏、青蛤等。

2 研究方法

本次调查时间为2003年8月,调查站位见图1,共设6个站位,其中S5号站位分为S5贝类养殖区和S5'非养殖区(位于S5号贝类养殖区附近100m处)两个取样点,其余站位均设在贝类养殖区内。用自制的柱状采样器($\Phi=8\text{cm}$, $L=60\text{cm}$)采集柱状沉积物样品,上下加PVC盖密封。将采集的柱状沉积物样品避光冷冻带回实验室后,分层(间隔一般为2~5cm)后,冷冻保存。取分层沉积物60℃恒温烘干至恒重,用电动研钵仪研磨,过100目筛,待测定。

不同形态磷的提取方法见文献^[7],主要包括交换态磷(Ex-P)、铝结合磷(Al-P)、铁结合磷(Fe-P)、闭蓄态磷(Oc-P)、自生磷(De-P)、碎屑磷(Ca-P)、有机磷(Or-P),其中,Ex-P、Al-P、Fe-P和Or-P统称为生物可获得磷(NAIP),是指能参与生物循环,即通过物理化学生物过程转变成生物可利用形态的磷^[8,9,16]。De-P、Ca-P和Oc-P统称为非生物可获得磷,一般指不能转变成生物可利用形态的磷^[17]。按1998年国家海洋监测规范方法^[18],采用磷钼蓝法测定活性磷酸盐;总磷(TP)的测定方法参见文献^[18]。

3 结果与分析

3.1 养殖区不同形态磷的平面分布

图2反映了所调查站位不同形态磷的平面分布特征,可以看出,TP在S4站位含量最高,S8、S7次之;NAIP在S8站位含量最高,S4次之;Fe-P、Al-P均在S4站位含量最高,S7、S5次之;Or-P、Ex-P均在S8站位含量最高,S7次之;Ca-P在S7含量最高,S8次之;De-P在S4站位含量最高,S1次之;Oc-P在S5站位含量最高,

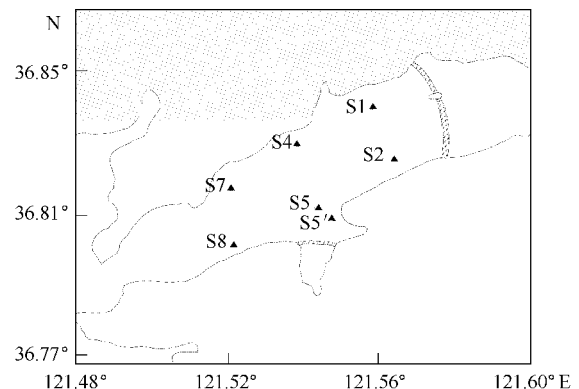


图1 调查海区及采样站位

Fig. 1 Location of the study area and sampling sites

S4 次之。除 De-P 外,不同磷形态均在 S1 站位出现最小值。

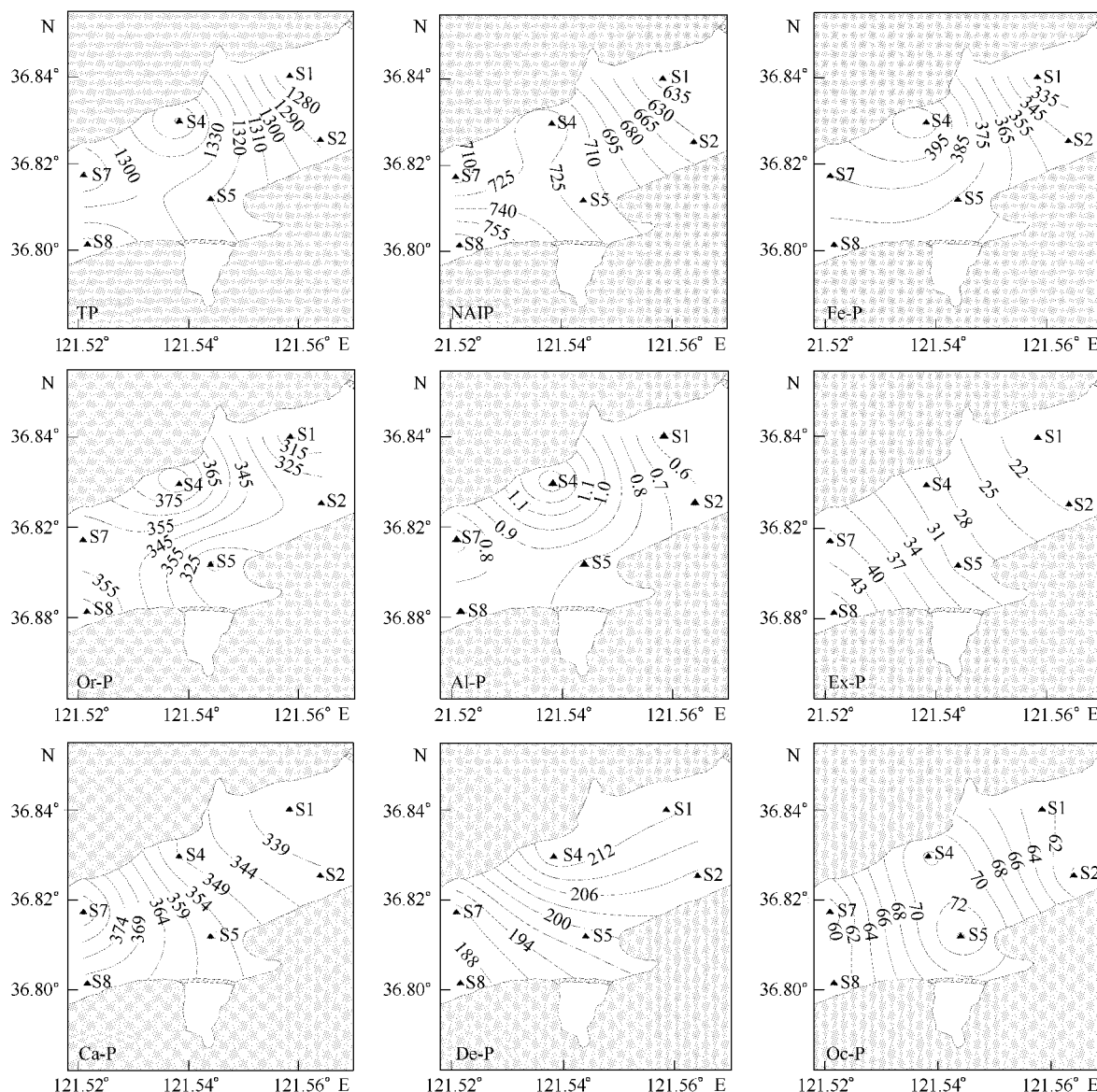


图2 养殖区和非养殖区不同磷形态含量(mg/kg)的平面分布

Fig.2 The horizontal distribution of the content of different phosphorus forms in the cultural areas and natural areas

3.2 养殖区和非养殖区不同形态磷的垂直分布

由图3可以看出,养殖区和非养殖区 TP 的垂直变化趋势相似,两区均在 1~20cm 波动较大,非养殖区的垂直含量相对于养殖区来说较稳定。

养殖区 NAIP 垂直变化较为复杂,1~20cm 范围波动尤为明显,表层含量大于底层。养殖区和非养殖区 Fe-P 在 1~20cm 内垂直变化均较复杂。养殖区 Or-P 垂直含量出现多次波动,1~20cm 深度波动尤为明显,表层含量高于底层。养殖区 Ex-P 的垂直含量 1~20cm 深度波动较大。养殖区 Al-P 含量在 13cm 处出现明显的最大值,1~20cm 范围波动较大,表层含量较小。非养殖区除 Fe-P 1~20cm、Or-P 表层(1~10 cm)出现较大波动外,NAIP、Ex-P、Al-P 垂直含量均较稳定。除非养殖区 Ca-P 的垂直分布曲线 1~5cm 出现较小波动外,De-P、Ca-P 和 Oc-P 垂直含量随深度增加变化较小。

3.3 养殖区和非养殖区沉积物中不同形态磷占总磷的百分比

表1给出了5号站位养殖区与非养殖区各形态磷占 TP 的平均百分含量,可以看出,NAIP、Fe-P 和 Ex-P

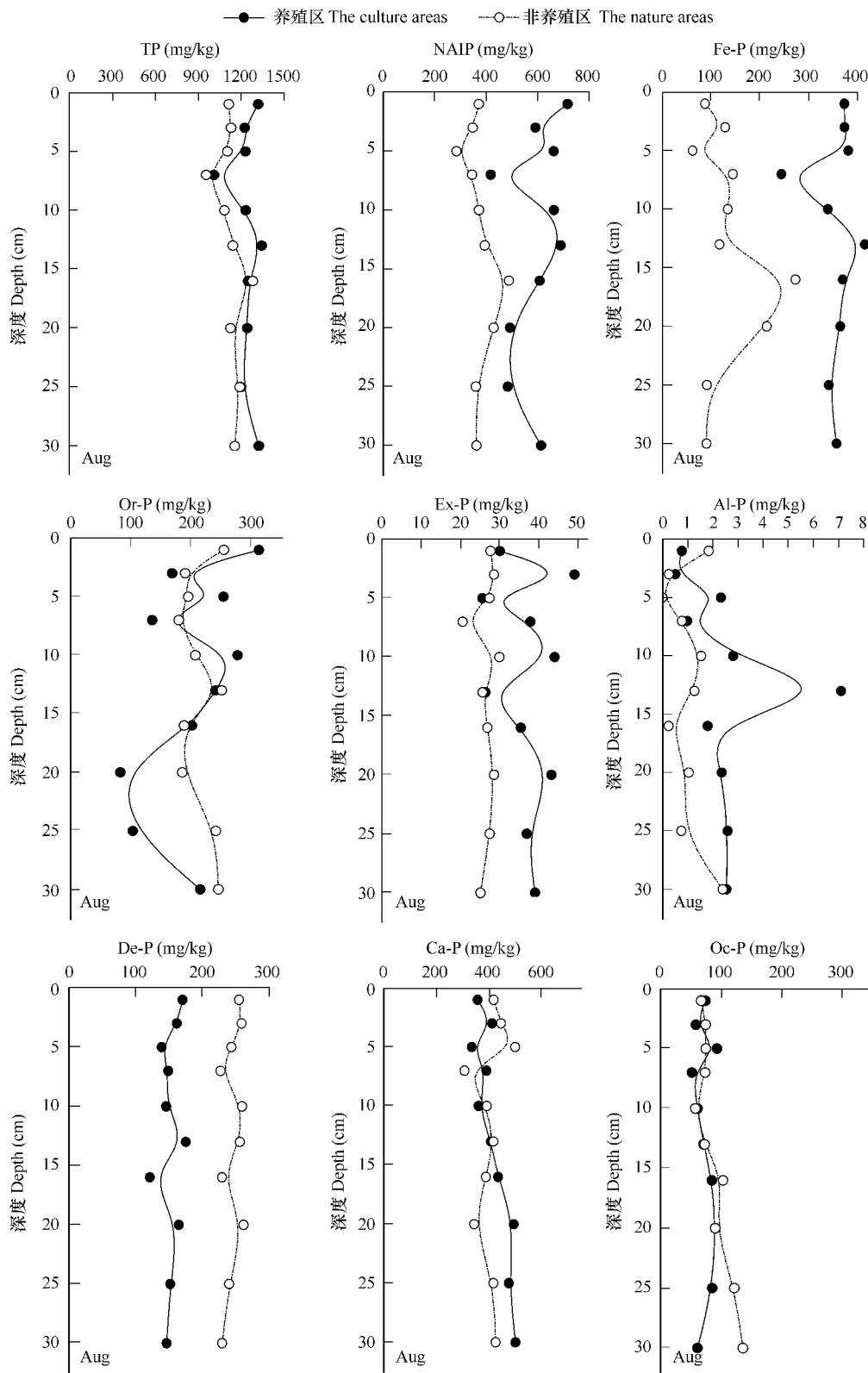


图3 养殖区和非养殖区不同磷形态含量的垂直分布

Fig. 3 The vertical distribution of the content of different phosphorus forms in the cultural areas and natural areas

占 TP 的平均百分含量在养殖区和非养殖区间存在显著差异,养殖区大于非养殖区。De-P、Oc-P 在两区域间也存在显著差异,非养殖区大于养殖区。Or-P、Al-P 和 Ca-P 在两区域间没有显著差异。

表 1 养殖区与非养殖区各形态磷占 TP 的平均百分含量

Table 1 The average percentage of phosphorus forms in TP both cultural and natural areas (%) (Means $\pm$ SD)

调查区域 The research areas	Ex-P	Al-P	Fe-P	Or-P	NAIP	Ca-P	De-P	Oc-P
养殖区 The cultural areas	3.00 $\pm$ 0.72a	0.19 $\pm$ 0.14a	28.73 $\pm$ 2.10a	15.96 $\pm$ 5.59a	47.88 $\pm$ 5.71a	33.80 $\pm$ 5.09a	12.40 $\pm$ 1.42a	5.93 $\pm$ 1.14a
非养殖区 The natural areas	2.38 $\pm$ 0.22b	0.09 $\pm$ 0.07a	11.89 $\pm$ 5.20b	19.00 $\pm$ 2.61a	33.36 $\pm$ 3.84b	35.97 $\pm$ 4.46a	22.01 $\pm$ 1.98b	8.65 $\pm$ 3.31b

* 数值后字母不同表示在 0.05 水平上差异显著 Values followed by a different letter in rows mean significantly different at 0.05 levels

4 讨论

乳山湾沉积物中不同形态磷的含量具有明显的地域特征,其高值区主要集中在 S4、S5、S7、S8 号站位,造成此差异的原因可能是:S4 紧靠排污口,受陆源输入的影响较大;S5、S7、S8 处于贝类高密度养殖区,贝类滤食大量有机颗粒物质,产生大量粪便^[19],从而加重底质沉积物中各形态磷的含量。Kautsky^[20]利用沉积物捕捉器现场收集北海湾贻贝床沉积物,同样证实了贻贝每年可增加沉积物中 10% 的 P。S1、S2 含量较小与两站位处于低密度养殖区有关。由此可得,贝类养殖密度大小对各形态磷的含量影响较大,高密度养殖区含量一般大于低密度养殖区。

目前,乳山湾的沉积速率尚无数据,Hatcher^[21]的研究表明贝类养殖区的沉降通量往往是非养殖区 2 倍以上,据此本文引用胶州湾自然沉积速率(0.64 cm/a)^[22]的二倍代替乳山湾贝类养殖区沉积速率即 1.28cm/a。据了解,乳山湾集约化贝类养殖始于 20 世纪 80 年代,大约有 25a 左右的历史,因此可推算出乳山湾集约化贝类养殖造成的底质沉积深度大约 20cm 左右。据此本文所测乳山湾底层 20cm 以下未受到集约化贝类养殖的影响。此次调查结果显示:乳山湾沉积物中各形态磷在 20cm 以下含量比较稳定,说明贝类养殖对各形态磷的含量和分布产生很大的影响。

Fe-P 通常被认为是沉积物中易变的部分,因为它会随着氧化还原环境的变化而改变,研究者多倾向于用污染源来解释,认为沉积物中 Fe-P 含量与污染程度正相关^[7,10]。所以非养殖区 Fe-P 含量 1~20cm 范围出现较大波动与该区污染程度大小有关。岳维忠等人^[11]发现,作为 Or-P 主要来源的浮游生物,其遗体沉积后,在沉积物表面被微生物分解转化成 Or-P,这与 Or-P 一般表层含量较高相符;养殖区 1~20cm 范围出现很大波动与该区域贝类和浮游植物在沉积物中的生命活动有关;非养殖区表层以下由于沉积作用和生物活动减少,垂直变化不大,Or-P 含量相对稳定。侯立军^[12]等发现,Al-P 含量在排污口处明显高于非排污口处,它可作为指示沉积物质量的重要指标,所以养殖区 Al-P 在 13cm 处出现明显的最大值、且 1~20cm 深度波动较大与贝类养殖活动和污染有关,非养殖区垂直含量出现小的波动与环境污染有关。

研究发现^[8,23,24],钙结合磷应分为两组:一组指生物骨骼碎屑、碳酸钙结合磷即自生钙磷 De-P,它在通常情况下不易被利用,只有在沉积物的物理化学性质发生强烈变化的情况下(如 pH、氧化还原电位下降)才能被释放。另一组指原生碎屑磷灰石和其他无机磷灰石即 Ca-P,它来源于火成岩或变质岩,只能在酸性条件下才能被溶解,在海洋沉积物的碱性环境下很难溶解。Oc-P 是“惰性”磷,生物不能利用。这与 De-P、Ca-P 和 Oc-P 的垂直含量随深度增加一般变化较小相符。

NAIP、Fe-P 占 TP 的平均百分含量在养殖区和非养殖区间存在显著差异,说明贝类养殖活动对 NAIP、Fe-P 的含量和分布产生较大影响。Fe-P 和 Or-P 占 TP 的平均百分含量较大,是乳山湾沉积物中可以被生物利用的最主要的两种磷形态。Al-P 和 Ex-P 占 TP 的平均百分含量很小,对贝类养殖活动影响较小。Ca-P 在两区域间同样不存在显著差异,但它在 TP 中的含量最大,是乳山湾沉积物中含量最高的磷形态。养殖区 De-P 和 Oc-P 占 TP 的平均百分含量均小于非养殖区,在两区域间存在显著差异。Ca-P、De-P 和 Oc-P 为非生物可利用磷,受贝类养殖影响较小。

贝类在滩涂中活动的深度范围大约为 1~10cm,养殖区 NAIP 均在表层(1~10cm)出现较大的波动,可见贝类养殖活动对 NAIP 的含量和分布产生很大影响。

表 3 列出了乳山湾养殖区和非养殖区沉积物中 TP、Fe-P 和 Or-P 的平均含量与其它海域相比较的情况,

表 3 乳山湾沉积物中 TP、Fe-P 和 Or-P 的平均值与其它海域比较

Table 3 Comparison of TP, Fe-P and Or-P in Rushan Bay sediment and the other seas

海区 Sea area	TP (mg/kg)	Fe-P (mg/kg)	Or-P (mg/kg)	参考文献 References
养殖区 The cultural areas	1189.93 ± 205.67a	247.26 ± 126.78a	227.03 ± 63.71a	本研究 this study
非养殖区 The natural areas	1112.27 ± 96.99a	138.15 ± 80.54b	206.42 ± 61.74a	本研究 this study
东海特定海区 East China Sea	508.44	27.04	74.80	[13]
长江口 The Yangtze Estuary	1078.50	3.71	483.39	[14]
嵊泗湾养殖区 The Yiwu Gulf	624.4	115.7	79.2	[5]
黄海海区 The Yellow Sea	483.60		134.23	[10]
渤海海区 The Bohai Sea	538.16		128.96	[10]
Bay of Seine, France	329.00	42.5	75.5	[8]
Mississippi Delta, USA	605.00	181.5	169.4	[15]

* 数值后字母不同表示在 0.05 水平上差异显著 Values followed by a different letter in rows mean significantly different at 0.05 levels

结果显示:养殖区 TP、Or-P 的平均含量与非养殖区相比没有显著差异,养殖区 Fe-P 的平均含量大于非养殖区,除美国的密西西比河三角洲 Fe-P 平均含量大于乳山湾非养殖区外,3 种形态磷均大于其它海域。贝类是一种滤食性动物,具有很强的滤水能力,它们能通过过滤大量水体浮游植物和有机颗粒,产生生物沉降排放于底泥中,改变底泥的数量和质量,增加底泥中营养元素的浓度^[25]。从而导致乳山湾沉积物中 TP、Or-P 和 Fe-P 的平均含量较高且养殖区含量大于非养殖区。

References:

- [1] Giblin A E. Benthic metabolism and nutrient cycling in Boston Harbor. *Massachusetts Estuaries*, 1997, 20(2): 346—364.
- [2] Zabel M, Dahmke A, Schulz H D. Regional distribution of diffusive phosphate and silicate fluxes through the sediment-water interface: The eastern south Atlantic. *Deep-Sea Research*, 1998, 1(45): 277—300.
- [3] Harter R D. Adsorption of phosphorus by lake sediments. *Soil Sci Am Proc*, 1968, 32: 514—518.
- [4] Wu F, Guo W D, Zheng P R, *et al.* Distribution of phosphorus species in sediments of maricultural waters in Sandu Bay. *Marine Environmental Science*, 2005, 24(4): 24—27.
- [5] Jiang J H, Ke S S, Ding L F, *et al.* Phosphorus states, distribution and environmental impacts in the sediments of cage aquaculture. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*. 2004, 23(4): 311—314.
- [6] Wei X G, Wen Y M, Chen J X, *et al.* Phosphorus contents in sediments from cage culture in Yaling Bay. *Fisheries Science*, 2005, 24(8): 4—7.
- [7] Zhu G W, Qin B Q. Chemical sequential extraction of phosphorus in lake sediments. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(3): 349—352.
- [8] Andrieux F, Aminot A. A two year survey of phosphorus speciation in the sediments of the Bay of Seine (France). *Cont. Shelf Res*, 1997, 17: 1229—1245.
- [9] Qixing Z, Christopher E G, Yinmei Z. Evaluation of phosphorus bioavailability in sediments of three contrasting lakes in China and the UK. *Chemosphere*, 2001, 42: 221—225.
- [10] Feng Q, Liu S M, Zhang J. Distribution of phosphorus in sediment of the Bohai and Yellow Sea. *Marine Environmental Science*, 2001, 20(2): 24—27.
- [11] Yue W Z, Huang X P. Distribution characteristics of phosphorus in core sediments from Zhujiang River Estuary and its environmental significance. *Journal of Tropical Oceanography*, 2005, 24(1): 21—27.
- [12] Hou L J, Liu M, Xu S Y, *et al.* Species of phosphorus in core sediments from the Changjiang Estuary and its environmental significance. *Marine Environmental Science*, 2001, 20(2): 7—12.
- [13] Zheng L B, Zhou H Y, Ye Y. Variations in different forms of phosphorus in the column sediments of east china sea and its environmental indicative significance. *Shanghai Environmental Sciences*, 2003, 22(6): 414—417.
- [14] Liu M, Lu M, Xu S Y, *et al.* Phosphorus species in aquatic sediments at the Yangtze estuary and Shanghai coast. *Earth Science Frontiers*, 2000, Vol. 7 Suppl.

- [15] Zhou Q X, Christopher E G, Zhu Y M. Evaluation of phosphorus bioavailability in sediments of three contrasting lakes in China and the UK. *Chemosphere*, 2001, 42: 221—225.
- [16] Schenau S J, De Lange G J. Phosphorus regeneration vs. burial in sediments of the Arabian Sea. *Mar. Chem.*, 2001, 75: 201—217.
- [17] The specification for marine monitoring. GB 17378.4—1998. Part 4: Seawater analysis.
- [18] Hu C Y, Wang Z F, Lü H Y. A method of determination of total phosphate in the sea water and marine sediment. *Marine Environmental Science*, 1999, 18(3): 48—52.
- [19] Zhou Y, Yang H S, Zhang F S. Biodeposition by Seawater bivalve mollusk. *Marine Sciences*, 2003, 27(2): 23—26.
- [20] Kautsky N, Evans. Role biodeposition by *Mytilus edulis* in the circulation of matter and nutrients in a Baltic coastal ecosystem. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 1987, 38: 201—212.
- [21] Hatcher A, J Grant, B Schield. Effects of suspended mussel culture (*Mytilus* spp.) on sedimentation benthic respiration and sediment nutrient dynamics in a coastal bay. *Marine Ecology Progress Series*, 1998, 115: 219—235.
- [22] Li F Y, Song J M, Li X G, *et al.* Modern sedimentation rate and flux in the Jiaozhou Bay. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2003, 23(4): 29—33.
- [23] Ruttenberg K C. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments. *Limnology & Oceanography*, 1992, 37(7): 1460—1482.
- [24] Berner R A, Ruttenberg K C, Ingall E D, *et al.* The nature of phosphorus burial in modern marine sediments. *Nato Asi Series*, 1993, 14: 365—378.
- [25] Qin P B, Lu J W. Effect of Filter-Feeding Bivalves on Nutrient Cycle of Mariculture System: A View. *Marine Sciences*, 2001, 25(5): 27—29.

参考文献:

- [4] 吴芳, 郭卫东, 郑佩如, 等. 三都澳养殖海域沉积物中 P 的形态分布特征. *海洋环境科学*, 2005, 24(4): 24~27.
- [5] 江锦花, 柯世省, 丁理法, 等. 围塘养殖沉积物中磷的存在形态、分布及环境效应. *浙江海洋学院学报(自然科学版)*, 2004, 23(4): 311~314.
- [6] 韦献革, 温琰茂, 陈璟璇, 等. 哑铃湾网箱养殖海区表层沉积物磷的含量特征. *水产科学*, 2005, 24(8): 4~7.
- [7] 朱广伟, 秦伯强. 沉积物中磷形态的化学连续提取法应用研究. *农业环境科学学报*, 2003, 22(3): 349~352.
- [10] 冯强, 刘素美, 张经. 黄、渤海区沉积物中磷的分布. *海洋环境科学*, 2001, 20(2): 24~27.
- [11] 岳维忠, 黄小平. 珠江口柱状沉积物中磷的分布特征及其环境意义. *热带海洋学报*, 2005, 24(1): 21~27.
- [12] 侯立军, 刘敏, 许世远, 等. 长江口岸带柱状沉积物中磷的存在形态及其环境意义. *海洋环境科学*, 2001, 20(2): 7~12.
- [13] 郑丽波, 周怀阳, 叶瑛. 东海特定海区柱状沉积物中磷的存在形态及其环境指示意义. *上海环境科学*, 2003, 22(6): 414~417.
- [14] 刘敏, 陆敏, 许世远, 等. 长江河口及其上海岸带水体沉积物中磷的存在形态. *地学前缘*, 2000, 第 7 卷增刊.
- [17] 海洋监测规范. GB 17378.4-1998. 第 4 部分: 海水分析.
- [18] 扈传昱, 王正方, 吕海燕. 海水和海洋沉积物中总磷的测定. *海洋环境科学*, 1999, 18(3): 48~52.
- [19] 周毅, 杨洪生, 张福绥. 海水双壳贝类的生物沉积及其生态效应. *海洋科学*, 2003, 27(2): 23~26.
- [22] 李凤业, 宋金明, 李学刚, 等. 胶州湾现代沉积速率和沉积通量研究. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23(4): 29~33.
- [25] 秦培兵, 卢继武. 滤食性贝类对浅海养殖系统中营养盐循环的影响. *海洋科学*, 2001, 25(5): 27~29.