

柘林湾表层沉积物中氮和磷的时空分布

李金¹, 董巧香², 杜虹¹, 乔永民¹, 张瑜斌¹, 黄长江¹

(1. 汕头大学水生生物技术与环境资源保护研究所, 广东 汕头 515063;

2. Aquaculture Research Station of Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70820 USA)

摘要:于2002年7月19日至12月15日调查了柘林湾表层沉积物中2种形态氮和5种形态磷的时空分布,同时测定了含水量和有机质含量。结果表明,柘林湾表层沉积物中的含水量与有机质、凯氏氮、氨态氮、总磷、岩屑磷和有机磷含量均呈显著正相关关系。凯氏氮的平均含量为 $1060.3\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,氨态氮在凯氏氮中所占的比例小于4.0%。总磷的平均含量为 $526.0\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,自生钙结合磷含量最高,占总磷的47.5%。氮、磷的平面分布基本呈现出湾内高于湾外、养殖区高于非养殖区的总体趋势。有机质、氮、磷含量的季节变化相对显著,夏季呈上升趋势,秋季有所下降,然后处于上下波动的平衡状态。影响有机质、氮、磷含量季节变化规律的因素主要是养殖动物的种类、陆地排污、鱼虾贝类死亡产生的生物碎屑、水动力和生物扰动。

关键词:柘林湾;沉积物;氮;磷

中图分类号:P762.33

文献标识码:A

氮、磷是浮游植物生长的重要营养元素,也是引起水体富营养化的主要因素^[1]。海底沉积物是海域氮、磷的重要蓄积库或释放源,它通过间隙水和上覆水与上层水体进行营养盐交换,从而影响水体的营养状态,是水域营养盐循环的重要环节^[2-3]。沉积物中磷的释放受到多种外部因素的影响,如氧化还原电位、pH、温度等。当这些外部因素相似时,磷的形态就起着决定作用^[4]。因此,研究磷的化学组成可以更好地了解磷的释放过程和机理,为生态环境的评价提供科学依据;同时,对于评价磷的生物可利用性也具有重要意义,因为生物可以利用的磷只是系统中总磷的一部分^[5,6]。

柘林湾位于闽粤两省交界处(23°36'N,117°E),是一个半封闭小型河口湾^[7],是广东省海水网箱养殖基地之一。近年来,不断增长的养殖规模使得该湾水体富营养化日益加重,赤潮频繁发生,给水产养殖业和海湾生态环境带来了极大的危害^[8]。为了探索柘林湾赤潮频发的原因与生态退化的趋势,本课题组对该湾进行了海水化学、浮游生物、微生物和沉积物污染等综合性生态调查。本文着重介绍表层沉积物中氮、磷含量的时空分布。

1 材料与方 法

1.1 采样站位的布 设

采样站位的布设如图1所示,其中S1站位于黄冈河河口,S2、S5、S7站位于渔排养殖

收稿日期:2003-08-26;修订日期:2003-10-04

基金项目:广东省重大科技兴海项目(A200005F02);广东省自然科学基金项目(021260)

作者简介:李金(1979—),男,江西省萍乡市人,硕士研究生,研究方向为海洋污染生态学。

通讯作者:黄长江。E-mail:cjhuang@stu.edu.cn

区边缘, S3 站为牡蛎养殖区和渔排养殖区的过渡区, S4 站为牡蛎养殖区中心, S6 站为渔排养殖区中心, S8 站为养殖区与非养殖区的过渡区, S9 站位于湾外主航道上。

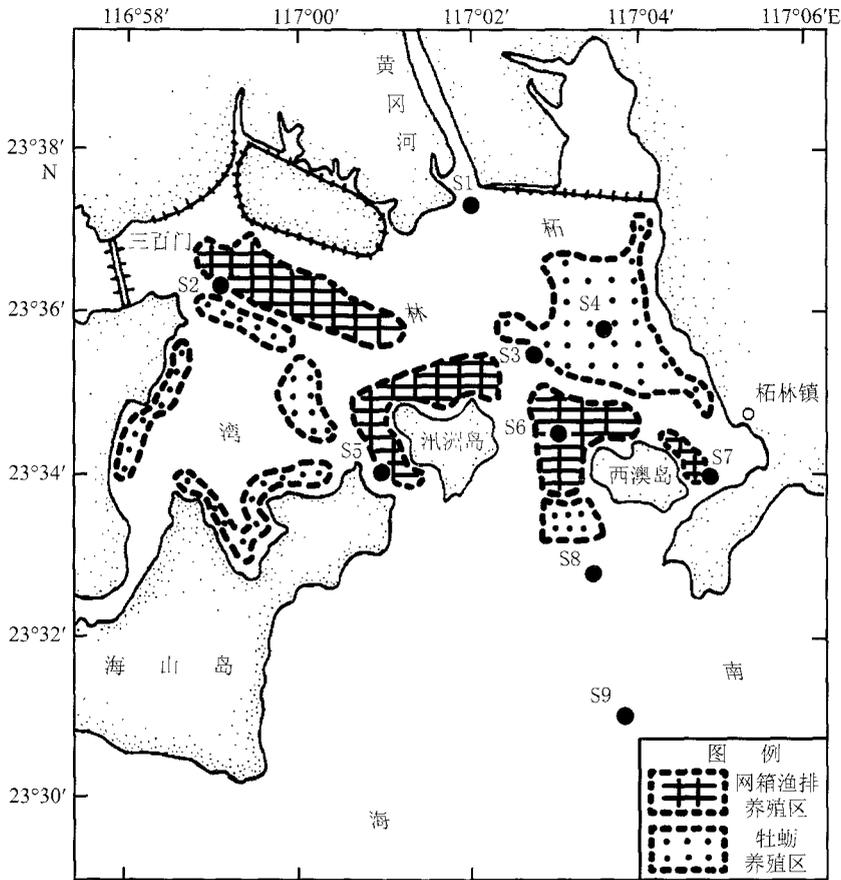


图1 调查站位图

Fig. 1 Locations of sampling stations

1.2 样品采集和预处理

于2002年7—12月(每月1次)进行了6个航次的表层泥样采集。使用 0.1m^2 的彼得森采泥器,取中央表层0—2 cm未受干扰的泥样封装于聚乙烯瓶中,冷藏运回实验室分析。取10g左右样品用于含水量和有机质含量分析,其余样品于 50°C 风干,磨细过80目筛。

1.3 分析方法

含水量^[9]:称取10g新鲜泥样,于 105°C 下烘24h。烘干前后重量差即为水分的重量,以泥样湿重为基准计算水分所占百分率。

有机质含量^[10]:称取上述测定含水量后的泥样1g,于 550°C 下灼烧5h。灼烧前后的重量差即为泥样有机质重量,以泥样干重为基准计算有机质所占的百分率。

用凯氏定氮仪测定凯氏氮(瑞典 Tecator Kjeltac Auto 1035 Sampler System 产品)。

氨态氮^[11]:取5g风干泥样于100ml离心管中,加入 $2\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl溶液50ml,振荡

1h,离心分离出上清液,用荷兰 Skalar SA4000 微量连续自动分析仪测定氨态氮含量。

有机氮:为凯氏氮与氨态氮的差值。

无机磷^[12, 13]:称取 0.5g 风干泥样于 100ml 离心管中,按如下步骤提取无机磷:

1)可交换磷:往离心管中加 $1\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ MgCl_2 溶液(pH 为 8.0)50ml,在振荡器上连续振荡提取 2h 后,于 $4000\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心分离出上清液,重复以上操作 1 次;再用 50ml 去离子水代替 MgCl_2 溶液,重复以上操作 2 次。合并 4 次离心出的上清液,沉淀物进入下一步试验。

2)铁结合磷:往离心管中加 $0.1\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ BD ($0.1\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaHCO_3 + $0.11\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$, pH 为 7.0)溶液 50ml,连续振荡提取 8h,离心分离出上清液,再依次用 50ml MgCl_2 溶液和 50ml 去离子水代替 BD 溶液各提取 2h。合并 3 次离心出的上清液,沉淀物进入下一步试验。

3)自生钙结合磷:往离心管中加 $1\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaAC-HAC 缓冲液(pH 为 4.0) 50ml,连续振荡提取 6h,离心分离出上清液,再用 50ml MgCl_2 溶液代替 NaAC-HAC 缓冲液提取 2 次,提取时间各为 2h。然后用 50ml 去离子水提取 2h,合并 4 次离心出的上清液,沉淀物进入下一步试验。

4)岩屑磷:加入 $1\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HCl 溶液 50ml,连续振荡提取 16h,离心分离出上清液,沉淀物进入下一步试验。

有机磷^[14]:将沉淀物全部转入 50ml 消化管中,加入酸性 $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ (5%)溶液 10ml,置于 120°C 的高压锅中反应 1h,离心分离出上清液。

上述各上清液中的磷含量都用荷兰产 Skalar SA4000 微量连续自动分析仪测定。

总磷(TP):为无机磷与有机磷之和。

2 结 果

2.1 含水量和有机质含量

各测站样品含水量和有机质含量分别为 28.1%—75.9%和 2.2%—12.5%,平均值分别为 $58.6\% \pm 13.0\%$ 和 $8.5\% \pm 3.0\%$ (图 2)。含水量和有机质含量的最低值均出现在黄冈河河口的 S1 站,次低值位于 S7 站。含水量最高值位于 S3 站,有机质含量最高值位于 S5 站。除 S1、S7 站外,含水量和有机质含量基本呈由湾内向湾外递减的平面分布趋势。不同航次之间各测站含水量随季节的变化不明显,有机质含量则变化较大。各航次有机质含量平均值的变化范围为 6.5%—9.7%,最低值出现在 10 月,最高值出现在 7 月。由夏季(7、8 月)至秋季(9—11 月)含量呈明显下降趋势,进入秋季后呈波动变化。

2.2 凯氏氮和氨态氮

凯氏氮的含量为 150.0 — $1576.3\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,平均值为 $1060.3 \pm 386.0\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$;氨态氮的含量为 1.7 — $27.0\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,平均值为 $9.7 \pm 4.9\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ (图 2)。两者的最低值都出现在黄冈河口的 S1 站,最高值分别出现于 S6、S3 站。所有测站的氨态氮在凯氏氮中的质量分数都低于 4.0%,其余均为有机氮。除 S1、S7 站外,凯氏氮呈现由湾内向湾外递减的趋势,而且其平面分布格局在 6 个航次都基本相似,但各测站含量随季节的变化较

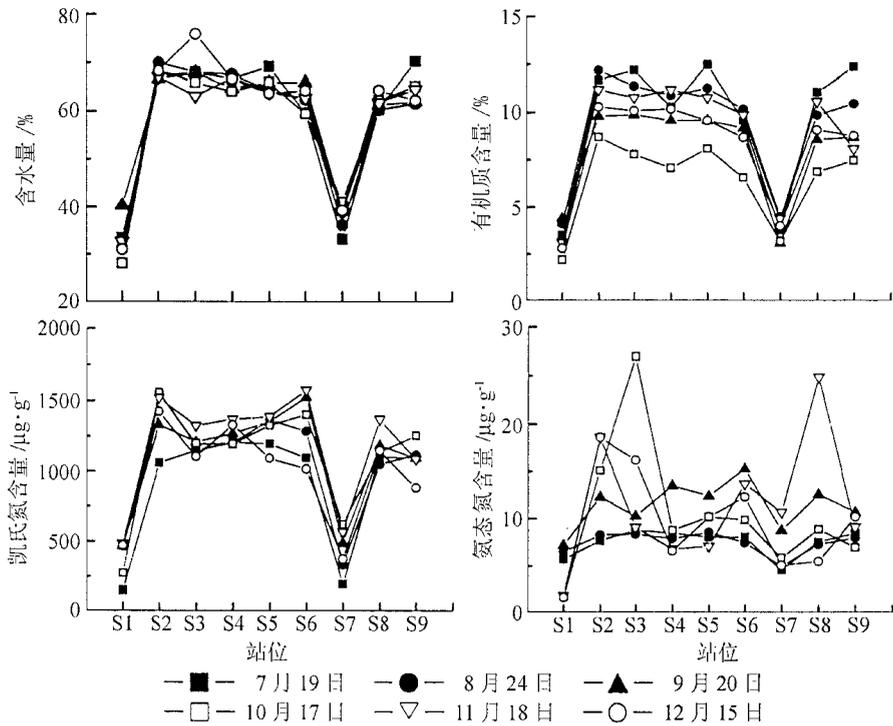


图 2 含水量、有机质含量、凯氏氮和氨态氮的平面分布

Fig. 2 Horizontal distributions of water content, total organic matter, Kjeldahl nitrogen and ammonia nitrogen

大。其中, S2 站(标准偏差 SD 为 191.4)、S6 站(SD 为 226.5)和 S7 站(SD 为 158.9)比其它站(SD 小于 140.0)的变化更显著。各航次凯氏氮含量平均值为 $916.3\text{--}1188.8\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 最低和最高值分别出现在 7 月和 11 月, 夏季呈上升趋势, 秋季(9—11 月)呈波动变化。氨态氮的平面分布规律性较差, 但同一航次的调查中, 养殖区(S2、S3、S4、S5、S6 和 S7 站)的平均值($10.4\pm 4.6\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)略高于非养殖区(S1、S8 和 S9 站)的平均值($10.0\pm 4.8\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)。各测站氨态氮随季节的变化非常显著, 特别是 S3、S8 站, 其 6 次测值的 SD 分别为 7.3 和 7.1, 其它站的 SD 均小于 5.0。各航次氨态氮的平均值变化范围为 $7.5\text{--}11.5\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 最低和最高值分别出现在 7 月、11 月, 随季节呈波动变化。

2.3 磷

2.3.1 总磷

总磷的变化范围为 $121.0\text{--}1177.6\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 $526.0\pm 203.1\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (图 3)。其中位于大规模网箱渔排养殖区中心的 S6 站含量最高($915.9\pm 143.2\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), 其次是位于三百门港的 S2 站($653.6\pm 91.6\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)和大规模网箱渔排边缘的 S5 站($648.2\pm 95.9\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), 位于黄河河口的 S1 站($235.9\pm 68.6\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)含量最低。除 S1、S7 站外, 同一航次的湾内各测站的总磷明显高于湾外的 S8、S9 站。总磷随季节的变化与有机质相似, 各航次总磷平均值的变化范围为 $475.0\%\text{--}577.3\%$, 最低值出现在 10 月, 最高值出现在 8 月。夏季呈上升趋势, 进入秋季(9—11 月)后呈波动变化。

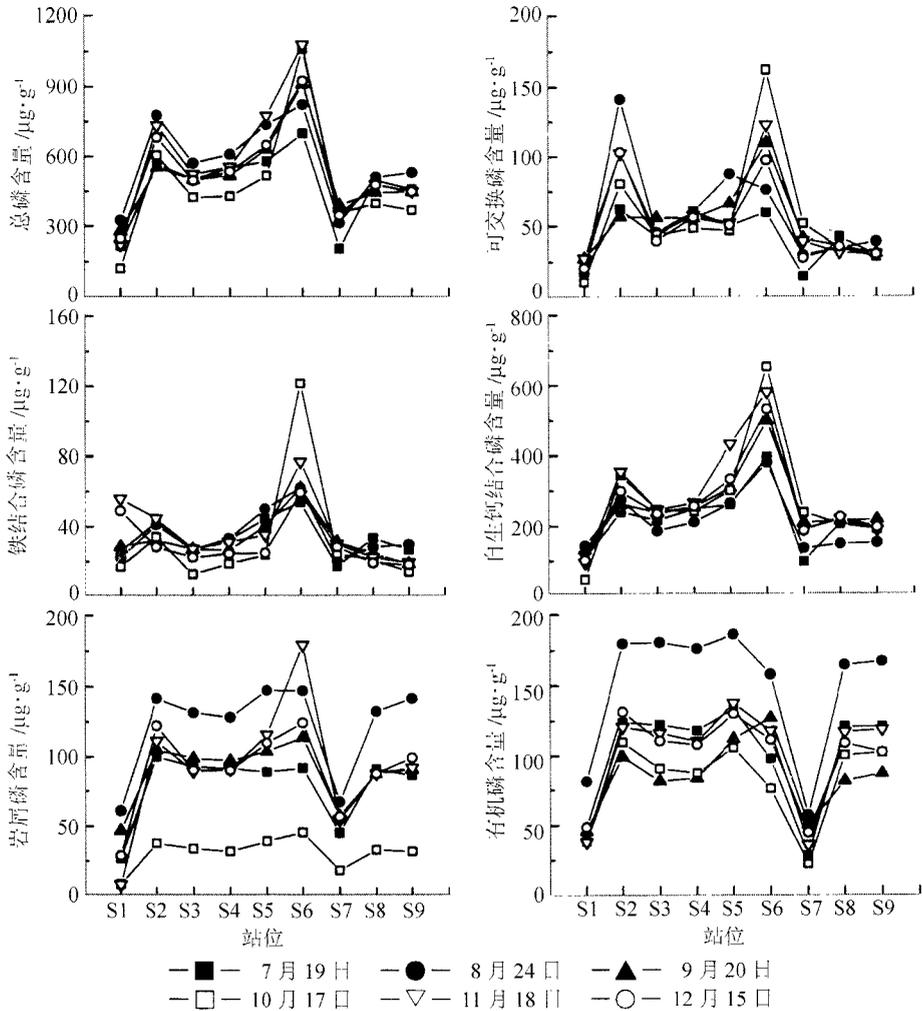


图3 总磷和不同形态磷的平面分布

Fig. 3 Horizontal distributions of total phosphorus and phosphorus in different forms

2.3.2 不同形态磷

可交换磷:变化范围为 $10.5\text{--}162.2\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,平均值为 $53.1\pm 31.4\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,占总磷的 $9.7\%\pm 2.6\%$ (图3)。大规模网箱渔排养殖区中心的S6站($104.6\pm 36.2\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)含量最高,三百门港的S2站($90.8\pm 31.4\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)含量也比其它站高出1--3倍。除S7站外,养殖区各测站的含量均比非养殖区高。各航次可交换磷的平均值变化范围为 $42.4\text{--}58.9\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,最低值出现在7月,最高值出现在8月。夏季(7、8月)呈上升趋势,进入秋季(8--11月)后呈波动变化。S2、S6站可交换磷含量随季节的变化比其它站更明显,6个航次测值的SD分别为31.4和36.2,其它站均小于16.0。

铁结合磷:含量最低,变化范围为 $12.7\text{--}121.5\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,平均值为 $33.6\pm 18.3\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,占总磷的百分比为 $(6.8\pm 3.8)\%$ 。除S6站的含量明显较高外,其余各站基本上呈由湾内向湾外递减的趋势。

自生钙结合磷:含量最高,变化范围为 $46.5\text{--}653.6\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,平均值为 $252.3\pm 118.7\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,占总磷的 $(47.5\pm 7.8)\%$ 。其平面分布趋势与总磷相同。除大规模网箱渔排养殖区中心的S6站外,其余各站的自生钙结合磷随季节的变化不大。

岩屑磷:变化范围为 $8.2\text{--}179.5\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,平均值为 $84.0\pm 39.6\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,占总磷的 $(15.9\pm 5.3)\%$ 。平面分布呈由湾内向湾外递减的趋势(S1、S7站除外)。岩屑磷随季节的变化非常显著,各航次的平均值变化范围为 $31.4\text{--}122.1\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,最高值出现在8月,最低值出现在10月。夏季(7、8月)呈上升趋势,进入秋季(8—11月)后呈波动变化。

有机磷:含量的变化范围为 $22.3\text{--}186.4\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,平均值为 $103.1\pm 41.1\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,占总磷的 $(20.1\pm 5.9)\%$ 。平面分布趋势和季节变化都与有机质含量相似。

2.4 相关性分析

将有机质、凯氏氮、氨态氮、总磷、岩屑磷和有机磷含量与含水量进行直线回归分析,结果表明,各要素与含水量都呈极显著正相关关系,相关系数的平方(r^2)分别为0.82、0.83、0.26、0.38、0.35和0.58, p 均小于0.0001。

3 讨论与结语

在海湾沉积物的组成上,含水量与沉积物中的有机质、氮、磷等密切相关,因为水的渗透性可以反映沉积物颗粒的大小,而后者影响有机质、氮、磷等要素在沉积物中的吸附。因此,用含水量与这些要素的回归公式就可以估算出这些要素在沉积物中含量的大小^[31]。

沉积物中氮、磷的含量与沉积物粒径和有机质含量有关。粒径越小,沉积物的比表面积越大,吸附有机质和营养盐的能力越强;反之则吸附能力越弱。柘林湾内的沉积物大多以黏土和粉砂质黏土为主^[7],颗粒细小,有机质含量高,故该湾表层沉积物中的总磷含量明显高于国内外许多同类型海湾(表1)。湾外主航道的S9站因流速较大而颗粒较粗,其沉积物属于泥质细砂和粉砂。S8站为养殖区向湾外的过渡区,其沉积物颗粒也比养殖区的粗。因此,调查海区表层沉积物氮、磷的平面分布呈现湾内(除S1、S7站外)高于湾外的总体趋势。在湾内,黄冈河口S1站的沉积物中含有大量粗砂。S7站虽然位于渔排养殖区的边缘,但因地处狭窄航道,水流速度较大,产生沿岸侵蚀,同时又受风沙入海的影响,其沉积物属于中粗砂型^[7]。因此,这2个站各种形态的氮、磷含量都显著低于其它站。

养殖模式和陆地排污对沉积物氮、磷的分布有很大的影响。网箱渔排养殖所投饵料中鱼粉和杂鱼糜较多,残饵中含有丰富的氮、磷。这些残饵腐烂分解后进入水体形成无机氮和溶解性磷酸盐,在一定条件下被颗粒物质吸附沉降成为表层沉积物中的无机氮和可交换磷,更主要的是直接沉降后有以有机氮和有机磷的形式进入沉积相。养殖区内腐烂的鱼类、贝类等生物碎屑进入沉积物后可引起有机氮和有机磷的增加,提高凯氏氮和总磷的含量。S2、S5站位于大规模网箱渔排养殖区的边缘,S6站位于大规模网箱渔排养殖区的中心,这3个站的氨态氮、凯氏氮、可交换磷、有机磷和总磷含量均比其它站高。另外,S2站位于湾的西部,该处水体比较封闭,与外界交换最弱,而且不远处正是人类活动最频繁和周边人口密度最大的三百门港,受陆地排污的影响比较严重,导致其沉积物中可交换磷含量仅次于大规模网箱渔排养殖区中心的S6站。牡蛎养殖区(S3和S4站)受以上3种

因素的影响较网箱渔排养殖区小,故同一航次的牡蛎养殖区表层沉积物中的凯氏氮、氨态氮和各种形态的磷含量均比网箱渔排养殖区低(图 2,3)。

表 1 柘林湾与其它海湾表层沉积物中磷含量的对比

$\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$

Tab. 1 Comparison of phosphorus contents in surface sediments between investigated area and other bays

$\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$

研究地点	总磷	可交换磷	铁结合磷	自生钙结合磷	岩屑磷	有机磷
柘林湾	526.0	53.1	33.6	252.3	84.0	103.1
珠江口 ^[13]	501.3	—	79.7 ^a	30.5	222.6	167.5 ^b
Pond 1, USA ^[16]	369.0	19.0	68.0	151.0 ^c	—	67.0 ^b
Little Madeira, USA ^[16]	106.0	2.5	<1.0	74.0 ^c	—	28.0 ^b
Terrapin Bay, USA ^[16]	124.0	3.8	<1.0	82.0 ^c	—	70.0 ^b
Crocodile Point, USA ^[16]	143.0	2.8	<1.0	123.0 ^c	—	64.0 ^b
Mississippi Delta, USA ^[17]	605.0	48.8	181.5 ^d	139.2	66.6	169.4 ^b
Long Island Sound, USA ^[17]	436.0	34.9	nd	126.4	178.8	95.9 ^b
Bay of Seine, France ^[1]	329.0	25.3	42.5	186.4 ^c	—	75.5 ^b

注:a. NaOH + Na₂CO₃; b. 550℃灰化, HCl; c. HCl, 含岩屑磷; d. DCB (BD+citrate); nd. 低于检测限; —. 未单独测定。

柘林湾的鱼类养殖是春季放苗,于盛夏 7、8 月进入高速成长期,所以 7、8 月是渔排养殖区投饵最多的时期,沉淀的残饵比其它季节均高得多。同时,7、8 月该湾水温最高,雨量少,是鱼虾贝类的高死亡季节^[18],由此产生的生物碎屑增多,这可能是柘林湾表层沉积物中凯氏氮、氨态氮和各种形态的磷含量在 7、8 月呈上升趋势,且 8 月达到较高水平的主要原因。有机质含量与微生物分解作用有密切关系^[19, 20]。7、8 月虽然水温最高,微生物活动最强烈,但残饵和生物碎屑的增加速度在这一时期可能仍然超过分解速度,最终导致有机质含量在这一时期的净增长趋势。进入秋季,虽然投饵和鱼虾贝类死亡减少,水温略有下降,但微生物的分解作用可能占主导作用,导致有机质含量呈下降趋势,随后进入相对平衡的阶段,使海区有机质含量处于波动平衡的状态。

氮、磷的含量变化还受水动力和生物扰动的影响。S1 站位于黄冈河河口,水深 1—2 m,涨潮、退潮和地表径流对其表层沉积物扰动很大。S2、S5、S6、S7 站位于渔排养殖区,受生物扰动大,因而这 5 个站沉积物中的凯氏氮、可交换磷随时间的变化比其它站明显。同时,秋季(特别是 10 月)是该湾台风比较集中的季节,台风对水体的搅动非常强烈,沉积物中磷的释放过程大于吸附过程^[21]。因此,各测站表层沉积物中的可交换磷、有机磷和总磷在 10 月航次中均为低值。

与国内外的研究相比,柘林湾表层沉积物中的铁结合磷含量处于较低水平(表 1),这可能与浮游植物的利用有关。调查期间,柘林湾浮游植物生长的主要限制因子是磷^[16],因此,沉积物中的铁结合磷有可能释放出来以满足浮游植物生长所需。另外,沉积物中铁结合磷的含量还受硫酸盐含量、pH 和盐度等因素的影响。在厌氧条件下,微生物如硫化细菌等能将硫酸盐还原为硫化物,阻碍铁与磷酸盐的结合^[22]。pH 和盐度过高也会抑制磷的吸附、沉淀和结晶过程,当盐度为 30—50 时,铁结合磷占总磷的质量分数小于 5%^[23]。柘林湾海域底层海水的 pH 为 7.9±0.2,盐度为 29.8±3.0,可能是导致该湾表层沉积物中铁结合磷含量低的原因。当然,这可能与微生物的作用有关,还有待于进一步研究。

自生钙结合磷为内源生物成因的钙结合磷,来源于生物代谢产物及生物碎屑的矿化,是活性磷的“汇”^[12]。因此,柘林湾表层沉积物中的自生钙结合磷含量显著高于非养殖型海湾(表1)。S6站位于大规模网箱渔排养殖区的中心,其自生钙结合磷随季节的变化必然比其它站显著。岩屑磷是钙结合磷的一种类型,来源于火成岩或变质岩,但与自生钙结合磷不同,它不是活性磷的“汇”,很难再生为生物所利用。

研究沉积物中磷的目的是为了了解其生物可利用性,从而评价其对环境的影响。可交换磷通过吸附、解吸过程与水体进行磷的交换,是沉积物中最容易为生物生长提供营养的磷形态的一种。铁结合磷是在沉积物氧化还原电位下降的情况下, Fe^{3+} 被还原成 Fe^{2+} ,从而释放出其结合的磷,并被生物利用。有机磷通过微生物矿化变成无机磷进入水体参与生物循环。自生钙结合磷在适当的物理化学条件下能转化成有机磷。以上4种都是生物可利用磷,而岩屑磷很难进入水体为生物所利用,是非生物可利用磷。因此,柘林湾表层沉积物中的生物可利用磷包括了可交换磷、铁结合磷、自生钙结合磷和有机磷,其质量分数占总磷的 $(84.1 \pm 5.3)\%$ 。与国内外其它海湾相比,它处于较高水平(表1)。

参考文献:

- [1] Andriex F, Aminot A. A two-year survey of phosphorus speciation in the sediments of the Bay of Seine (France) [J]. *Continental Shelf Research*, 1997, **17**(10): 1229—1245.
- [2] Nasnolkar C M, Shirodkar P V, Singbal S Y S. Studies on organic carbon, nitrogen and phosphorous in the sediments of Mandovi Estuary, Goa [J]. *Indian Journal of Marine Sciences*, 1996, **25**: 120—124.
- [3] McComb A J, Qiuo S, Lukatelich R J, *et al.* Spatial and temporal heterogeneity of sediment phosphorus in the Peel-Harvey estuarine system [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998, **47**(5): 561—577.
- [4] Gerdes P, Kunst S. Bioavailability of phosphorus as a tool for efficient P reduction schemes [J]. *Water Science Technology*, 1998, **37**(3): 241—247.
- [5] Schenau S J, De Lange G J. Phosphorus regeneration vs. burial in sediments of the Arabian Sea [J]. *Marine Chemistry*, 2001, **75**: 201—217.
- [6] Kaiserli A, Voutsas D, Samara C. Phosphorus fractionation in lake sediments-lakes Volvi and Koronia, N. Greece [J]. *Chemosphere*, 2002, **46**: 1147—1155.
- [7] 蔡爱智. 粤东柘林湾的泥沙来源和沉积环境[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 1994, **33**(4): 515—520.
- [8] 黄长江,董巧香,郑磊. 1997年底中国东南沿海大规模赤潮原因生物的形态分类与生态学特征[J]. *海洋与湖沼*, 1999, **30**(6): 581—590.
- [9] GB/T 13909-1992, 海洋调查规范[S].
- [10] Watts C J. Seasonal phosphorus release from exposed, re-inundated littoral sediments of two Australian reservoirs [J]. *Hydrobiologia*, 2000, **431**: 27—39.
- [11] 金相灿,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范(第二版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 182—183.
- [12] Ruttenberg K C. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments [J]. *Limnology and Oceanography*, 1992, **37**: 1460—1482.
- [13] Jensen H S, Thamdrup B. Iron-bound phosphorus in marine sediments as measured by bicarbonate-dithionite extraction [J]. *Hydrobiologia*, 1993, **253**: 47—59.
- [14] 扈传显,王正方,吕海燕. 海水和海洋沉积物中总磷的测定[J]. *海洋环境科学*, 1999, **18**(3): 48—52.
- [15] 扈传显,潘建明,刘小涯. 珠江口沉积物中磷的赋存形态[J]. *海洋环境科学*, 2001, **20**(4): 21—25.
- [16] Koch M S, Benz R E, Rudnick D T. Solid-phase phosphorus pools in highly organic carbonate sediments of northeastern Florida Bay [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2001, **52**(2): 279—291.

- [17] Ruttenberg, K C, Berner R A. Authigenic apatite formation and burial in sediments from non-upwelling, continental margin environments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, **57**: 991—1007.
- [18] 杜虹. 粤东柘林湾水化学指标的时空分布及其相互关系[D]. 广州:暨南大学, 2003.
- [19] Gomez E, Durillon C, Rofes G, *et al.* Phosphate adsorption and release from sediments of brackish lagoons: pH, O₂ and loading influence [J]. *Water Research*, 1999, **33**(10): 2437—2447.
- [20] Yamamuro M, Koike I. Concentrations of nitrogen in sandy sediments of an eutrophic estuarine lagoon [J]. *Hydrobiologia*, 1998, **386**: 37—44.
- [21] 张路, 范成新. 模拟扰动条件下太湖表层沉积物磷行为的研究[J]. *湖泊科学*, 2001, **13**(1): 35—42.
- [22] Caraco N F, Cole J J, Likens G E. Evidence for sulphate-controlled phosphorus release from sediments of aquatic systems [J]. *Nature*, 1989, **341**: 316—318.
- [23] 翁焕新, 刘云峰. 滨海沉积物和间隙水中的磷研究[J]. *环境科学学报*, 1997, **17**(2): 148—153.

SPATIAL AND TEMPORAL DISTRIBUTIONS OF NITROGEN AND PHOSPHORUS IN SURFACE SEDIMENTS OF ZHELIN BAY

LI Jin¹, DONG Qiao-xiang², DU Hong,

QIAO Yong-min¹, ZHANG Yu-bin¹, HUANG Chang-jiang¹

(1. *Institute of Aquatic Technology and Environmental Resources Protection, Shantou University, Shantou 515063, China*; 2. *Aquaculture Research Station of Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70820, USA*)

Abstract: The temporal and spatial distributions of two forms of nitrogen and five forms of phosphorus were studied in the surface sediments collected in six cruises from 19 July to 15 December, 2002 in the Zhelin Bay. The water content and total organic matter content were also analyzed. The results indicated that there were significant correlations between the water content and the total organic matter, Kjeldahl nitrogen, ammonia nitrogen, total phosphorus, detrital apatite phosphorus and organic phosphorus. The mean content of Kjeldahl nitrogen was $1\,060.3\ \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ in the study area, with ammonia nitrogen accounting for a low percentage ($< 4.0\%$). Averaged total phosphorus concentration was $526.0\ \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$. Calcium-bound phosphorus had the highest percentage (47.5%). Horizontal distributions of nitrogen and phosphorus showed a trend of being higher in the inner bay than in the outer bay, and in the culture areas than in the control ones. The contents of total organic, nitrogen and phosphorus varied significantly with seasons, increasing in summer and decreasing slightly in the beginning of autumn, then varying fluctuantly. The main factors affecting the temporal variations were culture manner, drainage, bio-detritus brought by dead fishes, shrimps and shellfishes, hydrodynamics and bio-disturbance.

Key words: Zhelin Bay; sediment; nitrogen; phosphorus