

粤东柘林湾柱状沉积物中氮、磷的垂直分布

杜虹¹, 李金¹, 黄长江², 董巧香²

(1. 汕头大学生物系, 广东 汕头 515063; 2. 温州医学院, 浙江 温州 325035)

摘要: 对柘林湾代表性水区柱状样沉积物中不同形态氮、磷的含量进行了分析, 研究了其垂直分布规律及其历史演变趋势。研究结果显示, 除湾西北三百门(S₂站)和湾中央大规模网箱渔排养殖区中心(S₆站)外, 其余各测站柱状沉积物中的有机氮(TOM)、凯氏氮(TKN)及各形态磷含量基本呈现“沉降-降解-堆积”三阶段的分布特征, 反映了成岩作用的结果。S₂、S₆测站柱状沉积物中的多项氮磷指标, 在表层10 cm以深不降反升与这两测站的高污染压力和弱水体交换能力导致的污染物快速堆积有关。底栖动物对沉积物垂直方向的扰动可能是各氮磷指标在沉降和降解阶段产生波动变化的重要原因之一, 但生物扰动对NH₄⁺的垂直变化影响最大。自生磷(AuP)与有机磷(OP)在表层以下随深度呈一定的镜像关系, 与AuP和OP在成岩过程中的相互转化有关。AuP随深度的变化幅度比OP的大, 表明磷在AuP和OP之间的转移并不是磷再分配的唯一途径, 其它形态的磷也可能参与磷的再分配, 而两者在表层不呈镜像关系主要与微生物对两者的降解有关。

关键词: 柘林湾; 沉积物; 垂直分布; 氮; 磷

中图分类号: P762.33

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2007)06-0043-09

近海沉积物是陆地生态系统中氮、磷的主要归宿场所, 是海域氮、磷的重要蓄积库^[1, 2]。Slomp^[3]等指出, 近海沉积物中储存着整个海洋80%的有机物, 每年接纳其上覆水体初级生产力的10%~50%。海洋沉积物又是海域水体中氮、磷的重要补给源。海底沉积物中氮、磷的再生与再悬浮, 对水体中氮、磷的收支、循环动力学和初级生产力的维持都有着极为重要的作用^[4-7]。柘林湾是粤东地区规模最大的海水增养殖区。近年来, 不断增长的养殖规模使该湾水体富营养化情况日益加重, 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。作者通过对该湾柱状沉积物中氮磷含量的分析, 探讨了该区域氮磷的地球化学特征及其反映的环境意义。

1 材料与方法

1.1 采样站位

采样站位的布置如图1所示, 其中S₁位于黄冈河口, S₂, S₅, S₇位于渔排养殖区边缘, S₃为牡蛎养殖区和渔排养殖区的过渡区, S₄为牡蛎养殖区中心, S₆为渔排养殖区中心, S₈为养殖区与非养殖区的过渡区, S₉位于湾外主航道上。由S₁至S₉基本上形成了从黄冈河口至湾外的站位布局。

1.2 柱状沉积物样品的采集与预处理

沉积物柱状样采集于2002年9月24日, 使用直径5 cm, 长50 cm的单管重力型柱状采泥器(K-BTM, Cole Parmer, USA), 有效采样深度为30 cm。每一站位采3根平行柱样。柱样采集后立即用塑料盖将采样时套装柱样的PVC管两端封好, 尽量减少柱样与空气接触的机会, 竖直放置(表层朝上)于带冰块的保温箱中。运回实验室后, 立即以1 cm(0~5 cm深度), 2 cm(5~11 cm深度), 3 cm(11~20 cm深度), 5 cm(20~30 cm深度)的厚度对柱样进行分割, 每根柱样共得13个分样。合并同一站位同一深度的3个分样, 用玻璃棒搅拌直到混和均匀为止。取样品置于温度为50℃的电热恒温鼓风干燥箱(10F1-S, 上海跃进医疗器械厂)中风干24 h, 磨碎过80目筛后, 装于用酸预处理过的密封袋中保存于-20℃下待用。

收稿日期: 2005-07-02; 修回日期: 2006-01-23

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(021260); 广东省重大科技兴海项目(A200005F02); 广东省科技计划项目(2006A36502001)

作者简介: 杜虹(1976), 女, 广东澄海人, 助理研究员, 主要从事海洋环境学研究, E-mail: hdu@stu.edu.cn

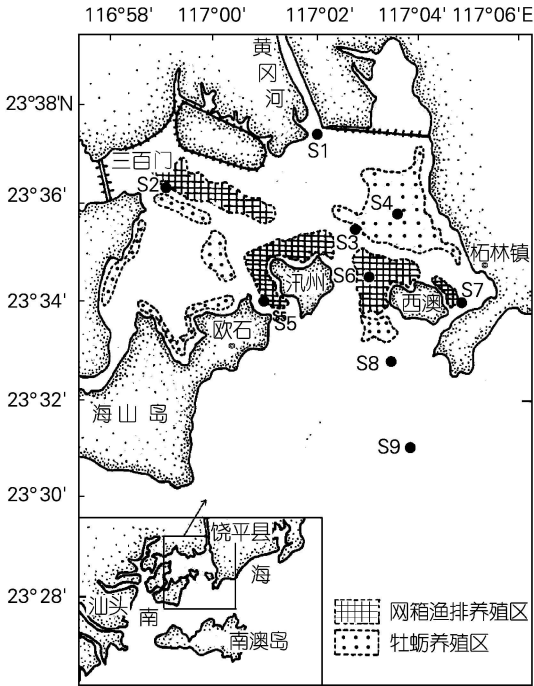


图 1 调查站点

Fig. 1 The map of sampling stations

1.3 分析方法

有机氮(TOM):称取 10 g 新鲜泥样, 于 105 °C 下烘 24 h, 用电子天平准确称取 1.0 g, 置于温度为 550 °C 的马弗炉 (NEY 2-525, U. S. A) 中灼烧 5 h, 灼烧前后的质量差即为泥样中有机物的质量, 以泥样干质量为基准计算有机物所占的百分率, 即为 TOM。

凯氏氮 (Kjeldhal nitrogen, 缩写为 TKN):用电子天平准确称取 0.5 g 置于 - 20 °C 冷冻保存的风干泥样消化后用凯氏定氮仪 (Tecator Kjeltac Auto 1 035 Sampler System, Sweden) 进行测定。

氨态氮 (Ammonium, 缩写为 NH_4^+):用电子天平准确称取 1.0 g 风干泥样于 100 mL 离心管中, 加入浓度为 2 mol/L 的 KCl 溶液 20 mL, 并将其置于振荡器 (IKA KS 250B, Germany) 上振荡 1 h 后, 置于转速为 4 000 r/min 的离心机 (TDL-40B, 上海安亭科学仪器厂) 中离心, 分离出上清液, 用荷兰 Skalar 微量连续自动分析仪 (SA 4000, Netherlands) 测定其中的 NH_4^+ 的含量 (次氯酸钠氧化靛酚蓝法)。氮含量以每克干泥所含氮的质量 (μg) 表示。

不同形态磷的提取:称取 0.5 g 风干泥样于 100 mL 离心管中, 按如下步骤提取无机磷:

(1) 可交换磷 (Exchangeable phosphorus, 缩写为 Ex P): 往离心管中加浓度为 1 mol/L 的 MgCl_2 溶液 (pH 为 8.0) 50 mL, 在振荡器上连续振荡提取 2 h 后, 于 4 000 r/min 离心分离出上清液, 重复以上操作一次, 再用 50 mL 去离子水代替 MgCl_2 溶液, 重复以上操作两次。合并 4 份离心出的上清液, 沉淀物进入下一步实验。

(2) 铁结合磷 (Iron bound phosphorus, 缩写为 Fe P): 往离心管中加 0.1 mol/L BD (0.1 mol/L $\text{NaHCO}_3 + 0.1 \text{ mol/L Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$, pH 为 7.0) 溶液 50 mL, 连续振荡提取 8 h, 离心分离上清液, 再依次用 50 mL MgCl_2 溶液和 50 mL 去离子水代替 BD 溶液各提取 2 h。合并 3 次离心出的上清液, 沉淀物进入下一步试验。

(3) 自生磷 (Authigenic phosphorus, 缩写为 Au P): 往离心管中加 1 mol/L 的 NaAc-HAc 缓冲液 (pH 为 4.0) 50 mL, 连续振荡提取 6 h, 离心分离上清液, 再用 50 mL MgCl_2 溶液代替 NaAc-HAc 缓冲液提取 2 次, 提取时间各为 2 h。然后用 50 mL 去离子水提取 2 h, 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 (Detrital phosphorus, 缩写为 De P): 加入 1 mol/L 的 HCl 溶液 50 mL, 连续振荡提取 16 h, 离心分离上清液, 沉淀物进入下一步试验。

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

(6) 总磷 (TP): 为无机磷与有机磷之和。

由于风干泥样仍然含有少量水分, 因此以上风干泥样需另取一份测定其含水量, 扣除风干泥样水分的质量, 即为泥样的干质量。

各步骤中上清液都用荷兰 Skalar 微量连续自动分析仪 (SA 4000, Netherlands) 测定其中的正磷酸盐 ($\text{PO}_4\text{-P}$) 的含量 (磷钼兰法)。

1.4 数据处理方法

所有数据的处理均使用 Excel 2000 完成。表层沉积物各项指标的时空分布图均使用 Origin 7.0 完成。沉积物中各项指标之间以及各项指标与理化因子之间的相关关系采用双变量相关分析, 相关系数采用彼尔森相关系数, 所有数据均为实测数据。

2 结果

2.1 柱状沉积物中凯氏氮的垂直分布

柱状沉积物中 TKN 随深度的变化范围为 362.4~

1 819.0 $\mu\text{g/g}$, 各测站平均值的变化范围为(487.6 \pm 60.5) $\mu\text{g/g}$ ~(1 610.3 \pm 117.3) $\mu\text{g/g}$, 总平均值为(1 176.6 \pm 374.9) $\mu\text{g/g}$ 。平均值最高为 S_6 测站, 最低为 S_1 测站。三百门的 S_2 站柱状沉积物中的 TKN 随着深度的降低趋势最为显著, 最高值与最低值的差值为 745.7 $\mu\text{g/g}$, 标准差(SD)为 283.1。其次为 S_5 和 S_6 , 差幅分别为 556.2 $\mu\text{g/g}$ 和 409.6 $\mu\text{g/g}$, (SD)分别为 165.8 和 117.3(图 2)。其余测站 TKN 随深度的变化较小, 各柱样的差幅仅为 169.3~286.9 $\mu\text{g/g}$, SD < 90.0。由实测值和曲线变化趋势来看, 在表层 0~10 cm 之间, 除 S_7 外的其余各站均呈降低趋势。其中, 以 S_2, S_5 和 S_6 三测站为最高。在 10 cm 以深就比较复杂, 各柱的变化趋势有所不同。 S_2, S_5 和 S_7 呈降低趋势, S_6 呈波动升高趋势, 其余测站呈稳定的波动变化。

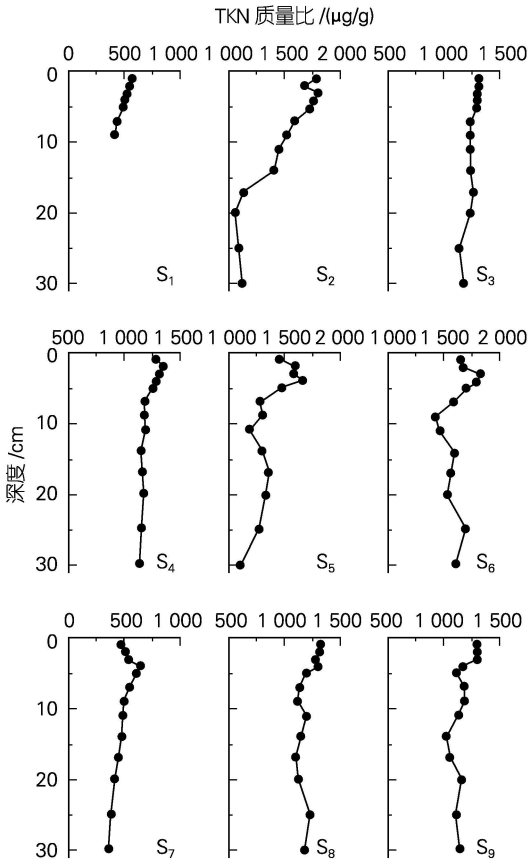


图 2 柱状沉积物中凯氏氮的垂直分布

Fig. 2 Vertical distributions of Kjeldhal nitrogen (TKN) in sediment cores

2.2 柱状沉积物中氨态氮的垂直分布

柱状沉积物中 NH_4^+ 随深度的变化范围为 6.1~

16.9 $\mu\text{g/g}$, 各测站平均值的变化范围为(6.7 \pm 0.6) $\mu\text{g/g}$ ~(14.9 \pm 1.4) $\mu\text{g/g}$, 总平均值为(11.3 \pm 2.6) $\mu\text{g/g}$ 。平均值最高的为 S_2 测站, 最低的为 S_7 测站。各测站 NH_4^+ 的垂直变化规律相差较大: S_1, S_7, S_8 和 S_9 测站随深度的变化较小, 且 S_1, S_7 和 S_9 略呈降低趋势, S_8 略呈升高趋势, S_2, S_3 和 S_4 随深度的变化波动较大; S_5 测站随深度亦呈较大的波动变化, 但总体上呈直线降低趋势($P < 0.0001$); S_6 测站波动较小, 呈明显的直线升高趋势($P < 0.0001$) (图 3)。由实测值和曲线变化趋势来看, 在表层 0~10 cm 之间, S_1, S_2, S_3 和 S_9 测站呈下降趋势, S_6 呈上升趋势, 其余的则呈波动变化。在 10 cm 以深, S_4, S_5, S_7 和 S_9 呈降低趋势, S_6 和 S_8 呈升高趋势, S_2 和 S_3 呈较大幅度的波动变化。

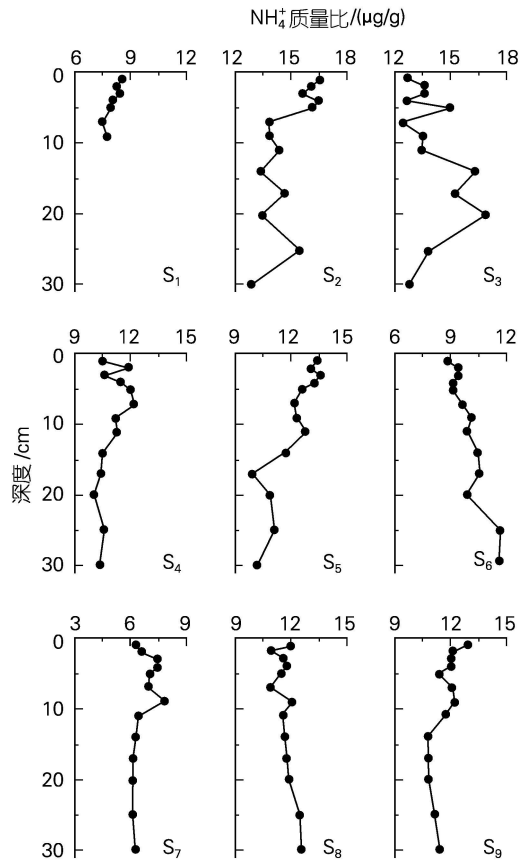


图 3 柱状沉积物中 NH_4^+ 的垂直分布

Fig. 3 Vertical distributions of NH_4^+ in sediment cores

2.3 柱状沉积物中总磷的垂直分布

柱状沉积物中 TP 随深度的变化范围为 248.7~1 208.5 $\mu\text{g/g}$, 各测站平均值的变化范围为(273.3 \pm

20.5) $\mu\text{g/g} \sim (941.7 \pm 165.7) \mu\text{g/g}$, 总平均值为 $(603.7 \pm 200.1) \mu\text{g/g}$ 。平均值最高为 S_6 测站, 最低为 S_1 测站。位于大规模网箱渔排养殖区中心的 S_6 测站 TP 随深度的变化最大, 差幅达 $477.0 \mu\text{g/g}$, SD 为 168.0; 其次为 S_5 , 差幅为 $410.4 \mu\text{g/g}$, SD 为 128.0 (图 4)。其余测站则变化较小, 特别是 S_3, S_9 两站, 差幅仅为 $34.5 \mu\text{g/g}$ 和 $35.9 \mu\text{g/g}$ 。由实测值和曲线变化趋势来看, 在表层 0~10 cm 之间, 除 S_8 外的其余各站均呈降低趋势。其中, 以 S_1, S_2, S_6, S_7 四测站为最。在 10 cm 以深, S_2 和 S_6 呈升高趋势, S_4 和 S_5 呈降低趋势, 其余的变化不大。

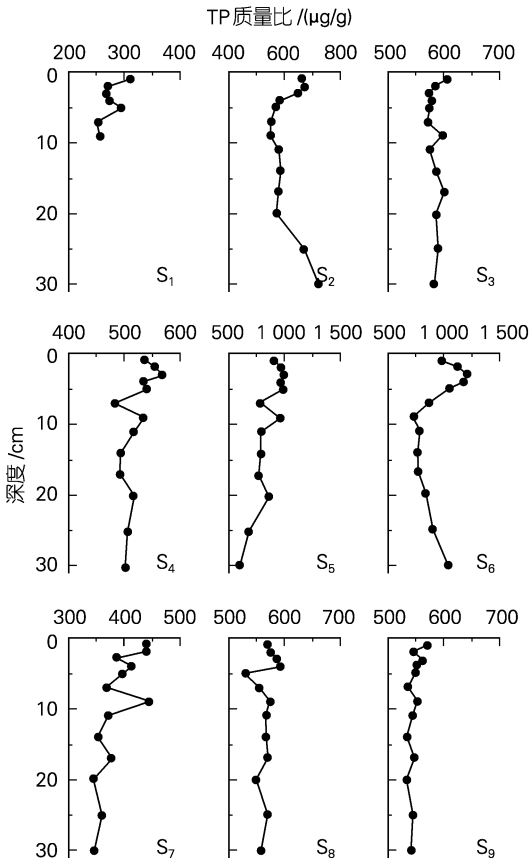


图 4 柱状沉积物中 TP 的垂直分布

Fig. 4 Vertical distributions of TP in sediment cores

2.4 柱状沉积物中可交换磷的垂直分布

柱状沉积物中 Ex-P 随深度的变化范围为 $11.5 \sim 130.7 \mu\text{g/g}$, 各测站平均值的变化范围为 $(15.8 \pm 2.9) \mu\text{g/g} \sim (76.2 \pm 24.9) \mu\text{g/g}$, 总平均值为 $(45.6 \pm$

$21.4) \mu\text{g/g}$ 。平均值最高为 S_2 测站, 最低为 S_1 测站。各测站 Ex-P 均随深度均呈降低趋势 (图 5)。 S_2 的降低幅度最大, 达 $74.4 \mu\text{g/g}$, 其次为 $S_6 (34.0 \mu\text{g/g})$ 和 $S_5 (33.5 \mu\text{g/g})$ 。由实测值和曲线变化趋势来看, 在表层 0~10 cm 之间, 各站均呈显著的降低趋势。在 10 cm 以深, S_2 和 S_6 呈升高趋势, S_4 和 S_5 呈降低趋势, 其余的变化不大。

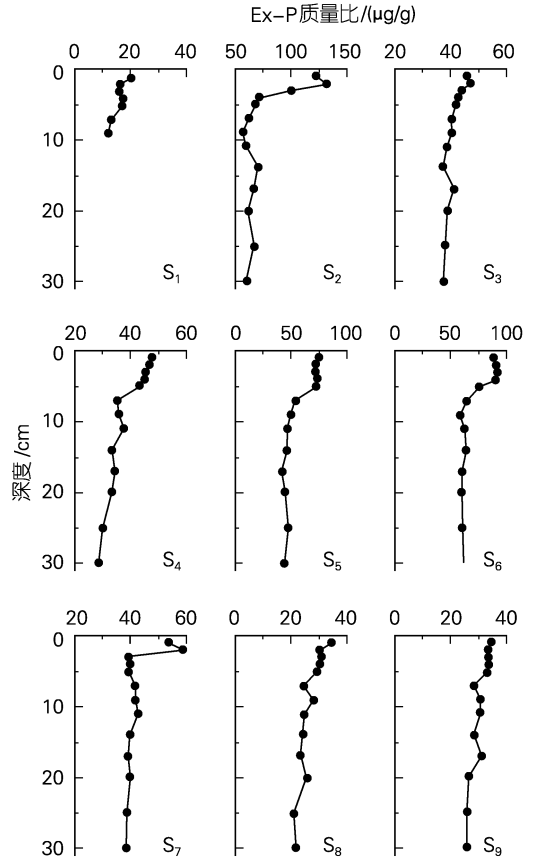


图 5 柱状沉积物中 Ex-P 的垂直分布

Fig. 5 Vertical distributions of Ex-P in sediment cores

2.5 柱状沉积物中铁结合磷的垂直分布

柱状沉积物中 Fe-P 随深度的变化范围为 $20.8 \sim 138.0 \mu\text{g/g}$, 各测站平均值的变化范围为 $(27.5 \pm 5.9) \mu\text{g/g} \sim (100.9 \pm 19.6) \mu\text{g/g}$, 总平均值为 $(45.0 \pm 23.8) \mu\text{g/g}$ 。平均值最高为 S_6 , 最低为 S_7 。Fe-P 随深度变化最大的测站为 S_1, S_2, S_5 和 S_6 , 最高值与最低值的差幅为 $22.6 \sim 59.1 \mu\text{g/g}$; 其余测站均较小, 差幅为 $11.1 \sim 17.9 \mu\text{g/g}$ (图 6)。由实测值和曲线变

化趋势来看,在表层 0~ 10 cm, S₁, S₂, S₅, S₆和 S₇站 Fe P 随深度加深而降低, S₃, S₄, S₈和 S₉站则呈小幅波动变化; 10 cm 以深, S₂, S₃和 S₆站的 Fe P 随深度呈升高趋势, S₄, S₅, S₇, S₈和 S₉站则随深度呈降低趋势。

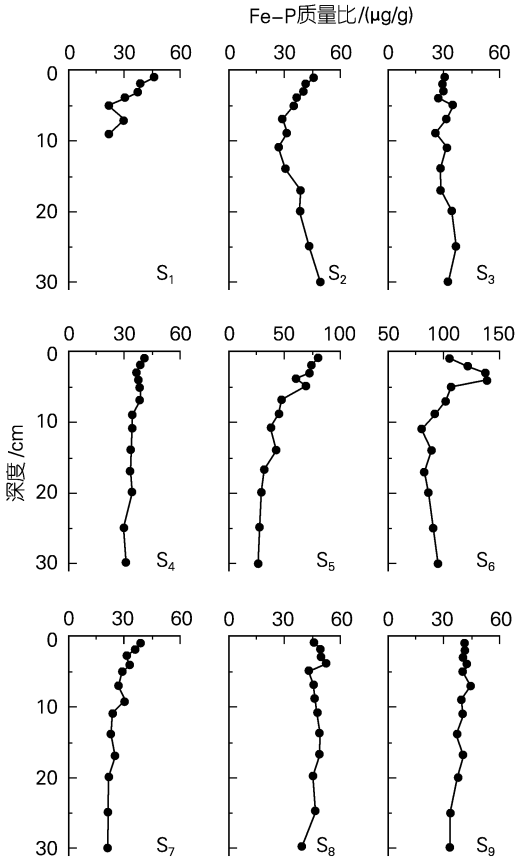


图 6 柱状沉积物中 Fe-P 的垂直分布

Fig. 6 Vertical distributions of Fe-P in sediment cores

2.6 柱状沉积物中自生磷的垂直分布

柱状沉积物中 Au-P 随深度的变化范围为 122.4~ 679.7 μg/g, 各测站平均值的变化范围为(135.0 ± 13.1) μg/g ~ (533.1 ± 122.5) μg/g, 总平均值为 (294.9 ± 132.1) μg/g。平均值最高为 S₆测站, 最低为 S₁测站。渔排养殖区各测站 (S₂, S₅, S₆和 S₇) 的 Au-P 随深度变化最为显著, 特别是 S₆, 其最高值与最低值的差幅高达 302.0 μg/g (图 7)。由实测值和曲线变化趋势来看, S₈, S₉随深度呈直线小幅升高的趋势, 而 S₄则呈小幅降低的趋势。S₂, S₆, S₇由表层

到 15~ 20 cm 深呈显著降低趋势, 15~ 20 cm 以深 S₂, S₆转呈升高趋势。而 S₇则几乎为直线向下。S₃测站随深度的变化不显著, S₅在 0~ 20 cm 大幅波动, 20 cm 以深则呈显著降低趋势。

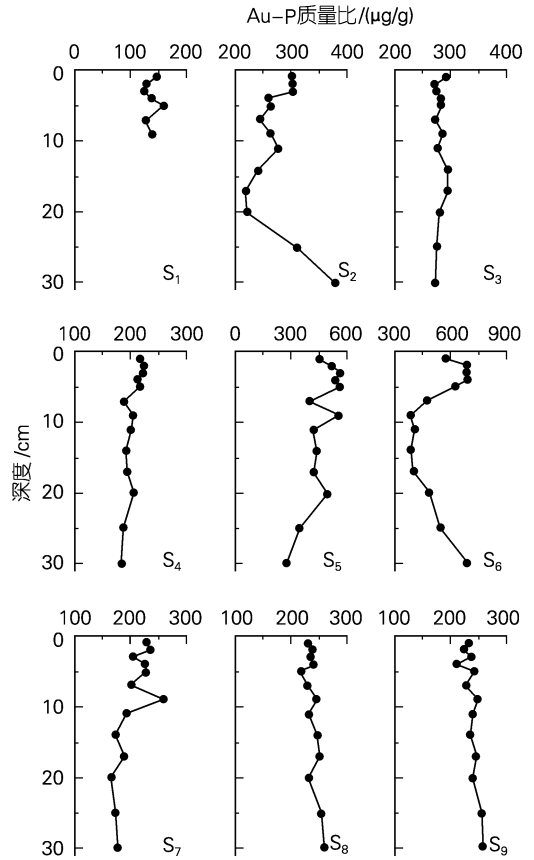


图 7 柱状沉积物中 Au-P 的垂直分布

Fig. 7 Vertical distributions of Au-P in sediment cores

2.7 柱状沉积物中岩屑磷的垂直分布

柱状沉积物中 De-P 随深度的变化范围为 31.3~ 191.5 μg/g, 各测站平均值的变化范围为 (35.3 ± 2.8) μg/g ~ (135.5 ± 13.1) μg/g, 总平均值为 (103.6 ± 30.5) μg/g。平均值最高为 S₃测站, 最低为 S₁测站。S₆测站 De-P 随深度变化最大, 差幅达 84.9 μg/g, 其次为 S₅ (44.6 μg/g) 和 S₂ (36.7 μg/g), 其余的变化很小, 差幅为 7.0~ 16.5 μg/g (图 8)。由实测值和曲线变化趋势来看, S₂随深度呈下降趋势, S₃, S₈则整体波动幅度很小。其余的在表层 0~ 10 cm 均随深度呈降低趋势, 幅度以 S₆的最为显著。在 10 cm 以深, S₄和 S₆变化不大, S₅呈较大幅度的波动

降低趋势, S_7 和 S_9 在 10~25 cm 呈升高趋势, 25 cm 以深转呈降低趋势。

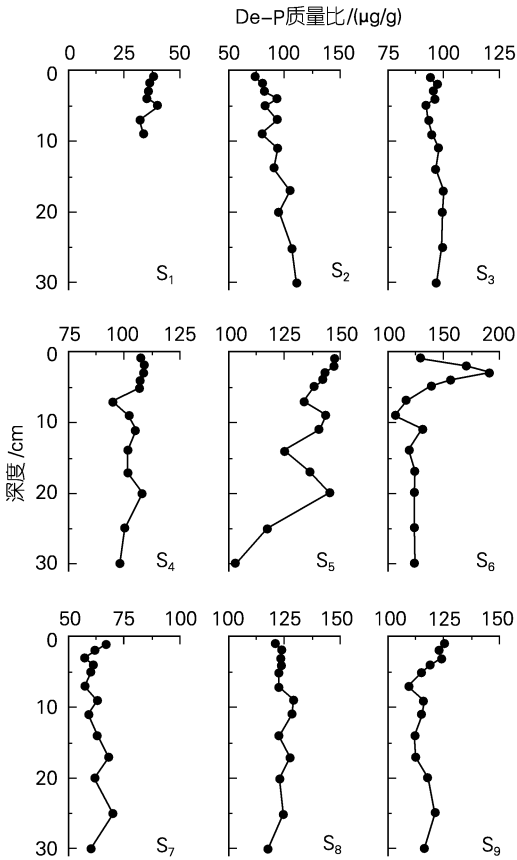


图 8 柱状沉积物中 De-P 的垂直分布

Fig. 8 Vertical distributions of De-P in sediment cores

2.8 柱状沉积物中有机磷的垂直分布

柱状沉积物中 OP 随深度的变化范围为 41.8~157.9 $\mu\text{g/g}$, 各测站平均值的变化范围为 (52.9 \pm 5.0) $\mu\text{g/g}$ ~ (143.6 \pm 6.2) $\mu\text{g/g}$, 总平均值为 (119.2 \pm 35.9) $\mu\text{g/g}$ 。平均值最高为 S_5 测站, 最低为 S_7 测站。 S_2 , S_4 , S_6 和 S_9 测站的 OP 随深度变化较大, 最高值与最低值的差幅为 36.8~54.2 $\mu\text{g/g}$, 其它测站变化较小, 差幅为 7.6~28.0 $\mu\text{g/g}$ 。由实测值和曲线变化趋势来看, 在表层 0~10 cm, S_1 , S_2 变化幅度很小, S_4 大幅波动, S_3 , S_5 , S_8 和 S_9 呈较低趋势, S_6 呈升高趋势。10 cm 以深, S_3 , S_4 和 S_5 呈升高趋势, S_6 , S_7 , S_8 和 S_9 呈降低趋势, S_2 在 10~15 cm 呈升高趋势, 15 cm 以深转呈降低趋势(图 9)。

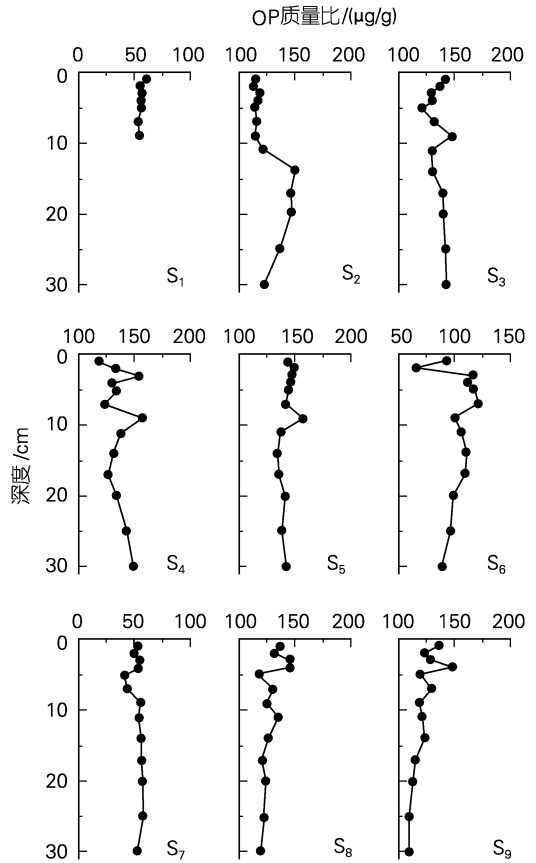


图 9 柱状沉积物中 OP 的垂直分布

Fig. 9 Vertical distributions of OP in sediment cores

2.9 柱状沉积物中各项指标之间的相关关系

将柱状沉积物中的 TKN, NH_4^+ , Ex-P, Fe-P, Air-P, De-P, OP 和 TP 等指标进行双变量相关分析, 所得的彼尔森相关系数(r)列于表 1。

表 1 柱状沉积物中各项指标之间的 Pearson 相关系数

Tab 1 Pearson correlations of targets in sediment cores

指标	NH_4^+	TKN	Ex-P	Fe-P	Air-P	De-P	OP	TP
NH_4^+	1.00							
TKN	0.69 ^a	1.00						
Ex-P	0.34 ^a	0.62 ^a	1.00					
Fe-P	0.02	0.57 ^a	0.53 ^a	1.00				
Air-P	0.17	0.66 ^a	0.63 ^a	0.80 ^a	1.00			
De-P	0.36 ^a	0.73 ^a	0.30 ^a	0.62 ^a	0.70 ^a	1.00		
OP	0.68 ^a	0.60 ^a	0.02-0.22 ^b	0.15	0.65 ^a	0.65 ^a	1.00	
TP	0.32 ^a	0.79 ^a	0.63 ^a	0.81 ^a	0.96 ^a	0.84 ^a	0.39 ^a	1.00

注: a. 显著性水平为 0.01, b. 显著性水平为 0.05; 进行相关分析的样本数为 111

NH_4^+ 与 TKN 呈极显著的正相关关系, $r = 0.69$ 。 NH_4^+ 与 Ex-P 、 De-P 、 OP 和 TP 均呈显著的正相关关系, 其中与 OP 的相关性最为显著, r 值达到 0.68。TKN 与各形态的磷均呈极显著的正相关关系, r 值均大于 0.5。

不同形态磷之间也存在相关关系。除 OP 与 Ex-P 和 Air-P 之间无显著的相关关系, 且 OP 与 Fe-P 之间呈显著的负相关关系 ($r = -0.22$) 外, 各形态磷之间均呈极显著的正相关关系。

3 讨论

氮、磷是海洋水体中浮游生物正常生长所必需的营养元素, 但生物对不同形态的氮、磷的吸收利用率差别很大。这表明, 沉积物中不同形态的氮、磷具有不同的生物有效性和地球化学行为, 其含量与分布特征包含着许多生物地球化学信息。因此, 对氮、磷的形态研究具有重要的生物地球化学意义。

一般来说, 近海沉积物中有机碳 (OC) 和 TP 的垂直变化均呈现明显的“沉降-降解-堆积”三阶段的分布特征^[8-10]。沉降阶段 (0~5 cm) 主要是水体中颗粒物质的沉降过程, 各形态氮、磷含量呈波动变化状态。在降解阶段, 伴随着有机物的降解, 各形态氮、磷含量急剧降低, 构成了沉积物的氧化带 (5~10 cm)。堆积阶段发生在沉积物的还原带 (10~20 cm 以下), 为稳定的积累过程, TOM 和各形态氮、磷含量通常均低于前两阶段。本调查结果表明, 除 S_2 和 S_6 外, 柘林湾各测站柱状沉积物中的 TOM、TKN 及各形态磷含量基本都呈现这种分布的特征。有机物的矿化分解是磷释放的驱动力^[11], 这是因为有机物的分解会引起沉积物 pH 降低, 进而加速 Ex-P 的释放。因此, 柘林湾各测站柱状沉积物中 Ex-P 垂直变化的三阶段分布特征比其它形态的氮、磷更为明显。 Ex-P 中的磷主要是通过吸附作用而沉积, 其结合力远比其它化学结合形式的磷弱, 是沉积物中最容易溶解并释放到水体的磷形态^[12]。因此, 它的垂直变化均呈现降低趋势。

人类养殖生产中由残饵、排泄物等对沉积物造成大量污染, 最终导致富营养化, 关于这方面的研究已见报道。王文强等^[13] 比较了哑铃湾网箱养殖对沉积物的影响, 结果发现养殖网箱下已养殖区沉积物氮、磷含量均高于非养殖区。本研究结果也体现了这一点。 S_2 测站位于三百门港, 受网箱渔排养殖和陆源排污双重污染的影响。 S_6 测站位于柘林湾的最大规模网箱渔排养殖区的中央, 该养殖区位处该湾向湾外过渡的最大的中央湾口, 水质条件优越, 是该湾养

殖历史最悠久的网箱渔排养殖区。因此这两站是柘林湾受污染最严重的区域, 各种污染物质及其所携带的氮、磷远较其它测站多。另外, 三百门港远离黄冈与中央湾口构成的主航道, 为柘林湾内最为封闭的区域, 水流速度很小。而渔排养殖区的网箱、浮筒等对水流有强大阻碍作用。因而, 这两处水体中的颗粒物沉降速率较高, 沉积物的堆积速率也较其它测站的高, 容易产生快速沉积, 有机物及其携带的各种氮、磷来不及转化就被埋藏, 导致各形态氮、磷的大量积累。因此, 在这两测站的柱状沉积物中 TKN、TP、 Fe-P 、 Air-P 、 De-P 和 OP 的垂直变化呈现表层 (0~10 cm) 降低、表层以下升高的趋势。

沉降和降解阶段各项指标的波动变化会受到底栖动物, 特别是穴居动物 (如蟹、沙蚕等) 的生物扰动的影响。生物扰动是指底栖动物, 特别是沉积食性的大型动物由于摄食、建管、筑穴等生物活动对沉积物初级结构产生的影响。生物扰动既可以增大氧化层的下渗深度, 也会把某些还原性的化合物从沉积物还原带垂直输送到氧化带, 或把有机物含量丰富的新近沉积物颗粒垂直输送到沉积物深层, 或排出一些酸性新陈代谢产物, 改变沉积物的 pH 值^[14, 15]。生物扰动对无机氮 (特别是 NH_4^+) 的影响最为显著, 因为细菌等微生物控制着氮在沉积物中的多种化学转化 (有机物矿化、固氮、硝化和反硝化等), 这些微生物有的是好氧的, 有的是厌氧的, 底栖动物的扰动会造成沉积物中含氧量的变化, 促进或是抑制微生物的活动^[12]。因而, 与这些微生物相联系的氮的交换过程也相应地得到加速或减缓^[15]。这应是柘林湾沉积物中 NH_4^+ 的垂直变化波动较大, 且规律性差的重要因素。

Fe-P 在沉积物中的含量可以作为污染的指标之一^[16, 17]。本研究中 S_6 站的 Fe-P 含量最高, 也反映了这一结果。 Fe-P 在次表层以上 (表层至 10~15 cm 以深) 的垂直变化, 主要是沉积物中氧化还原电位随深度变化的结果^[8, 14]。因为随着沉积物深度的增加, 含氧量降低会引起氧化还原电位的下降, 促使 Fe^{3+} 还原为 Fe^{2+} , 从而释放其所结合的磷, 导致 Fe-P 随深度降低。在次表层以下的深层沉积物中的 Fe-P , 受氧化还原条件影响较小, 其含量的变化与活性铁在深层沉积物中的转化有关。在沉积物深层, 活性铁可能会发生以下的转化: 1) 硫酸盐被还原为 S^{2-} , 铁氧化物与 S^{2-} 反应生成难溶 FeS , 进而形成黄铁矿 (FeS_2); 2) 形成稳固的铁氧化物晶体, 如赤铁矿 (Fe_2O_3); 3) 转变成不能被化学试剂 (BD 或者 CDB) 提取的矿物质, 如菱铁矿 (FeCO_3) 或富铁硅酸盐; 4) 在细菌分解有机碳过程中作为电子受体。Anschutz^[18] 在

研究中发现,随着圣劳伦斯海湾(Gulf of St. Lawrence, Canada)柱状沉积物中CDB提取态铁(CDB提取 $Fe-P$ 溶液中的铁含量)含量的降低, FeS_2 在这一深度的含量有所增加。在加拿大和葡萄牙的大陆边缘沉积物的垂直剖面中亦发现,随着CDB提取态铁消失,可溶性铁在这一深度出现峰值^[18]。活性铁经过以上转化后失去对活性磷的结合能力,并释放其所结合的磷。因此,深层沉积物中 $Fe-P$ 的含量一般低于表层和次表层的^[19]。本调查海区,多数站位柱状沉积物中的 $Fe-P$ 含量随深度而降低应该是以上机制作用的结果。然而,沉积物中的 $Fe-P$ 含量还与有机物的分解有关。在沉积物深层,由于厌氧细菌对有机物的矿化分解作用,OP转变为无机可溶性磷,在间隙水中与铁结合形成 $Fe-P$,导致 $Fe-P$ 的增加。 S_2 和 S_6 两测站柱状沉积物中 $Fe-P$ 含量在次表层以下不降反升,与OP的变化趋势恰好相反(图6、图9),可能就是厌氧细菌对OP的矿化分解起主导作用导致的结果。相关分析结果也表明,柱状沉积物中 $Fe-P$ 与OP呈显著差异($P < 0.05$)的弱负相关关系。

本调查中柱状沉积物 $Aur-P$ 与OP在表层以下的垂直变化趋势相反,呈现出一定的镜像关系(图7、图9),这与 $Aur-P$ 和OP在成岩过程中的相互转化有关。Ruttenberg^[8]指出,在早期成岩过程中,OP通过微生物的矿化分解作用释放到间隙水,并以自生钙氟磷灰石($Aur-P$ 的一种)的形式保存。宋金明^[20]的研究结果表明,微生物对生物磷灰石($Aur-P$ 的主要形式)的再成矿作用会导致 $Aur-P$ 向间隙水的释放,最终形成有机硫化物结合磷。由于有机硫化物结合磷中的大部分是惰性磷化合物,不易被细菌降解,从而导致OP的不断聚集。从垂直分布上看,柘林湾底层沉积物 $Aur-P$ 随深度的变化幅度大于OP随深度的变化幅度,这说明磷在 $Aur-P$ 和OP之间的转移并不是磷再分配的唯一途径,其它形态的磷(如 $Fe-P$)也可能参与再分配过程。同时,溶解磷从间隙水中的扩散损失也影响了磷的再保存。在沉积物表层(0~10 cm), $Aur-P$ 与OP的垂直分布不呈镜像关系,而是呈现波动降低趋势,这是由于微生物对表层沉积物 $Aur-P$ (主要是生物磷灰石)和OP的共同降解作用所致。呈波动变化的主要原因是底栖生物的扰动作用导致不同深度含氧量的波动变化,进而引起微生物的生物量及活动强度呈波动变化。

参考文献:

[1] Jensen H S, Mortensen P B, Andersen F Ø, *et al.* Phosphorus cycling in coastal marine sediment, Aar-

hus Bay, Denmark [J]. *Limnology and Oceanography*, 1995, 10 (5): 908-917.

- [2] Danielsson A, Carman R, Rahm L, *et al.* Spatial estimation of nutrient distributions in the gulf of riga sediments using okriging [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998, 46: 713-722.
- [3] Slomp C P, Malschaert J F P, Raaphorst W V. The role of adsorption in sediment water exchange of phosphate in North Sea continental margin sediments [J]. *Limnology and Oceanography*, 1998, 43 (5): 832-846.
- [4] 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, 45 (3): 277-300.
- [5] 焦念志. 关于沉积物释磷问题的研究 [J]. 海洋湖沼通报, 1989, 2: 80-84.
- [6] 蒋凤华, 王修林, 石晓勇, 等. 胶州湾海底沉积物-海水界面磷酸盐交换速率和通量研究 [J]. 海洋科学, 2003, 27(5): 50-54.
- [7] 王汉奎, 董俊德, 黄良民, 等. 三亚湾沉积物中磷释放的初步研究 [J]. 热带海洋学报, 2003, 22(3): 1-8.
- [8] 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.
- [9] Jensen H S, McGlathery K J, Roxanne M, *et al.* Forms and availability of sediment phosphorus in carbonate sand of Bermuda seagrass beds [J]. *Limnology and Oceanography*, 1998, 43 (5): 799-810.
- [10] 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: 279-291.
- [11] Gonsiorczyk T, Casper P, Koschel R. Phosphorus-binding forms in the sediment of an oligotrophic and a eutrophic hardwater lake of the Baltic Lake District (Germany) [J]. *Water Science Technology*, 1998, 37 (3): 51-58.
- [12] Falcão M, Vale C. Sediment water exchanges of ammonium and phosphate in intertidal and subtidal areas of a mesotidal coastal lagoon (Ria Formosa) [J]. *Hydrobiologia*, 1998, 374: 193-201.
- [13] 王文强, 韦献革, 温琰茂. 哑铃湾网箱养殖对表层沉积物的污染 [J]. 热带海洋学报, 2006, 25(1): 56-60.
- [14] Jensen H S, Thamdrup B. Iron bound phosphorus in marine sediments as measured by bicarbonate dithionite extraction [J]. *Hydrobiologia*, 1993, 253: 47-

- 59.
- [15] Herbert R A. Nitrogen cycling in coastal marine ecosystems[J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 1999, 23: 563-590.
- [16] 岳维忠, 黄小平. 近海沉积物中氮磷的生物地球化学研究进展[J]. 台湾海峡, 2003, 22(3): 407-414.
- [17] 侯立军, 刘敏, 许世远. 长江口岸带柱状沉积物中磷的存在形态及其环境意义[J]. 海洋环境科学, 2001, 20(2): 7-12.
- [18] Anschutz P, Zhong S, Sundby B, *et al.* Burial efficiency of phosphorus and the geochemistry of iron in continental margin sediments[J]. *Limnology and Oceanography*, 1998, 43(1): 53-64.
- [19] Krom M D, Berner R. Adsorption of phosphate in anoxic marine sediments[J]. *Limnology and Oceanography*, 1980, 25(5): 797-806.
- [20] 宋金明, 罗延馨. 渤海南部海域柱状沉积物中磷与硅的形态特征[A]. 中国科学院海洋研究所. 海洋科学集刊(43) [C]. 北京: 科学出版社, 2001. 83-95.

Vertical distributions of nitrogen and phosphorus in sediment cores of Zhelin Bay

DU Hong¹, LI Jin¹, HUANG Changjiang² DONG Qiaoxiang²

(1. Department of Biology, Shantou University, Shantou 515063, China; 2. Wenzhou Medical College, Wenzhou 325035, China)

Received: Jul. , 2, 2005

Key words: Zhelin Bay; sediment; nitrogen; phosphorus

Abstract: The main objects of this thesis are to describe the vertical distributions and historical developmental tendency of nitrogen and phosphorus forms in the sediments at nine key sampling stations of Zhelin Bay. The results showed that except for S₂ and S₆ where are located in Sanbaimen northwest of the bay and the center of a large scale cage fish culture, respectively, vertical profiles of TOM (total organic nitrogen), TKN (Kjeldhal nitrogen) and phosphorus forms in all other stations generally presented such a characteristic with three stages of “deposition-decomposition-accumulation” resulted from diagenesis. Some nitrogen and phosphorus forms in S₂ and S₆ did not decrease but increase in the cores below 10 cm, indicating the fast accumulation of pollutants resulted from high pollution and weak water exchanging in these waters. Vertical bioturbation from zoobenthos might be one of the most important factors to cause fluctuant change of concentrations of nitrogen and phosphorus forms with depth in deposition and decomposition stages. However, vertical bioturbation affected NH₄⁺ the most significantly. ArP (authigenic phosphorus) and OP (organic phosphorus) mirrored with each other below the subsurface, suggesting that a transformation between them is not the only way of phosphorus redistribution, and other forms may be related with that. No mirror relationship between ArP and OP found in the subsurface might be because of the decomposition of microbials.

(本文编辑: 张培新)