J. Lake Sci.(湖泊科学), 2008, **20**(4): 420-427
http://www.jlakes.org. E-mail: jlakes@niglas.ac.cn
©2008 by *Journal of Lake Sciences*

滇池福保湾间隙水氮磷分布及其与底泥微生物和磷酸酶相互关系*

李　宝[1,2], 丁士明[1], 范成新[1], 钟继承[1], 张　路[1], 尹洪斌[1,2], 赵　斌[3]
(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)
(2: 中国科学院研究生院, 北京 100049)
(3: 西安建筑科技大学, 西安 710055)

摘　要: 在滇池福保湾不同区域应用 Peeper(渗析膜式)技术, 分析了底泥间隙水 NH_4^+-N、PO_4^{3-}-P 的垂向分布特征和近表层 10cm 内底泥的微生物活性(FDA)、碱性磷酸酶活性(APA), 并对它们之间的相互关系进行了统计分析. 结果表明, NH_4^+-N 和 PO_4^{3-}-P 浓度自上覆水向下层间隙水呈先升后降趋势, 反映它们有自间隙水向上覆水扩散的潜在危害; 底泥有机质(Loss-on-Ignition, LOI)、APA 和 FDA 活性也有从表层底泥向下层逐步降低的趋势. 在空间分布上, NH_4^+-N、PO_4^{3-}-P 浓度变化为河口区>湾心区>西部沿岸区>东部沿岸区, 与沉积物中 LOI、APA 和 FDA 活性的大小顺序基本相同. 间隙水 NH_4^+-N 浓度与表层 10cm 内底泥的 APA 和 FDA 活性具有显著正相关性(α=0.01), PO_4^{3-}-P 浓度与底泥 APA 和 FDA 活性具有负相关性, 但相关系数很低.
关键词: Peeper; 营养盐; 沉积物; 微生物活性; 碱性磷酸酶; 滇池

Distributions of nitrogen and phosphorus in interstitial waters in the sediments of Fubao Bay in Lake Dianchi and their relationships with the activities of microbe and alkaline phosphatase in the surface sediments

LI Bao[1,2], DING Shiming[1], FAN Chengxin[1], ZHONG Jicheng[1], ZHANG Lu[1], YIN Hongbin[1,2] & ZHAO Bin[3]
(1: *State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210008, *P.R.China*)
(2: *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *P.R.China*)
(3: *Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an* 710055, *P.R.China*)

Abstract: Peeper technique was used to sample the interstitial waters in the sediments of Fubao Bay in Lake Dianchi, and the vertical distributions of NH_4^+-N and PO_4^{3-}-P in the waters were analyzed. The activities of microbe (the activity of FDA) and alkaline phosphatase (APA) in the surface sediments were also studied. The results showed that concentrations of NH_4^+-N and PO_4^{3-}-P in the interstitial waters generally increased, then decreased, with the depth, reflecting a possible diffusion trend for these nutrients. The decreasing trend was observed for the contents of organic matter (Reflected by Loss-on-Ignition, LOI), the activity of FDA and the APA in the 10cm surface sediments. The order of concentrations of NH_4^+-N and PO_4^{3-}-P in the interstitial waters, as well as the LOI, the activity of FDA and the APA in the surface sediments, ranked as estuary> the center of the bay > the west coast of the bay > the east coast of the bay. Regression analyses showed that concentrations of NH_4^+-N in the interstitial water were positively correlated with the activity of FDA and the APA in the surface sediments (0-10cm), while the concentrations of PO_4^{3-}-P were negatively correlated with them and the coefficient was very low.
Keywords: Peeper; nutrients; sediment; activity of microbe; alkaline phosphatase; Lake Dianchi

底泥是水生态系统重要的环境要素之一, 其理化特性直接影响水生态系统的结构与功能[1-2]. 研究表

* 国家高技术研究发展计划(863)项目(2005AA601010050201)、国家自然科学基金项目(20577053, 40601087)和中国科学院知识创新工程项目(KZCX3-SW-348)联合资助. 2007−05−28 收稿; 2007−08−15 收修改稿. 李宝, 男, 1980 年生, 博士研究生; E-mail: bli@niglas.ac.cn.

明, 底泥是湖泊氮磷营养盐的主要储存库, 在外源控制达到相当程度后, 底泥的内源释放表现出的二次污染日趋明显[3], 在内源营养盐释放过程中, 间隙水扮演着重要角色, 是水体界面交换的重要界质[4]. 近年来, 人们对湖泊底泥氮磷的化学行为较为重视, 对底泥营养物和间隙水营养物含量的分布做了较多的调查和分析[4-7], 同时人们也认识到底泥微生物和酶活性的重要作用, 对滇池表层底泥微生物的时空分布研究也有很多文献报道[8-9]. 但这些研究没有把间隙水氮磷营养盐含量同底泥微生物、酶活性结合起来, 对它们之间的相互关系进行系统分析. 环境中 NH_4^+-N 和 PO_4^{3-}-P 的产生与去向受到多种条件的制约和影响. 在沉积物中, 它们的存在主要与底泥污染水平、生物作用大小、氧化还原状况和水动力影响程度等多种条件有关. 底泥中的微生物活性和碱性磷酸酶活性大小是影响底泥氮磷营养盐形态转换的重要因素之一, 对间隙水中 NH_4^+-N 和 PO_4^{3-}-P 的影响不容忽视.

福保湾位于滇池东北岸, 是由大清河和海河冲击扇包围形成的湖湾, 湖岸线长约 3.16km, 面积约 1km^2(图 1). 福保湾原有的湖滩湿地全部被围垦, 湖岸为混泥土“防浪堤”, 丧失了沿岸带环境连续性和生态连续过渡特点; 人工岸堤前风浪强烈冲刷, 造成湖底侵蚀; 湖底沿岸带为坚硬而贫瘠的砂质层, 不利于水生植被和底栖动物的生长[10]. 福保湾由于长期接纳来自大清河、海河及湖湾周边地区的污染物, 底泥污染十分严重, 这些污染的底泥在适当条件下可向上覆水体大量释放氮、磷等营养物质和有毒化学物质, 使水质严重恶化. 1976 年 Hesslein[11]根据内外膜渗透平衡原理发明了平衡式间隙水采样器(Pore Water Equilibrators, Peeper). 此后, Peeper 技术在研究间隙水物化特性时得到了广泛的应用. 本文利用 Peeper 法采集福保湾底泥间隙水并分析了氮磷营养盐的垂直分布特征, 考察了氮磷营养盐分布与底泥微生物、碱性磷酸酶活性的相互关系.

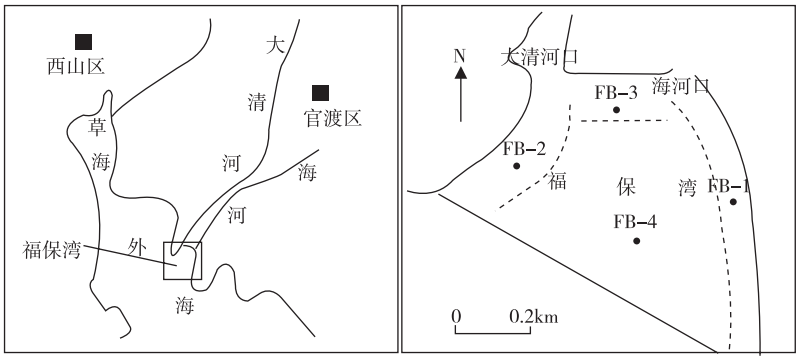


图 1 滇池福保湾采样点分布

Fig.1 Sampling locations of Fubao Bay in Lake Dianchi

1 材料与方法

1.1 Peeper 技术

Peeper主体是由一系列小室组成, 小室两侧覆盖一层渗析膜, 室内预先封装去离子水, 利用渗析膜过滤的特性, 使膜两侧水体(如去离子水和间隙水)中一些可溶离子和分子交换达到平衡.

Peeper 制作材料为有机玻璃, 36 个小室并行排列, 间隔 1cm, 每一小室体积约为 6.4ml, 孔径为 0.45μm 的渗析膜由美国 Pall 公司生产, 具生物惰性, 使用时用双面夹板固定于采样器主体板上[12].

Peeper 法与传统方法比较, 虽然受平衡时间制约, 但具有取样时间短、可批量取样、对环境敏感程度高、取样的准确性和精密性好等优势, 因此在间隙水获取中, Peeper 法能更有效的提供水–沉积物界面的赋存信息.

1.2 试验方法

1.2.1 采样点的选择　福保湾东西两岸由于常年受风浪冲刷, 湖底底泥为坚硬而贫瘠的砂质层; 湾心及河

口由于常年接纳大清河、海河排放的城市污水及湖湾周边地区的污染物, 底泥发黑发臭, 污染严重. 为了更好地了解整个福保湾的底泥情况, 将福保湾划分为东部沿岸区(FB-1)、西部沿岸区(FB-2)、河口区(FB-3)和湾心区(FB-4)四个区域开展研究. FB-1 的经纬度为 102°41′24.3″E 和 24°55′41.6″N; FB-2 的经纬度为 102°40′59.4″E 和 24°55′53.1″N; FB-3 的经纬度为 102°41′10.1″E 和 24°56′3.7″N; FB-4 的经纬度为 102°41′7.4″E 和 24°55′50.8″N. 具体采样点及区域划分见图 1.

1.2.2 间隙水的采集与分析 用自制的Peeper投放器[13]向水下垂直投放Peeper并插入底泥至预定深度. 自Peeper投放时间(2006年10月9日)计起, 平衡30d, 从泥中拔出Peeper, 即刻用低压水枪冲洗其单面所附泥块, 并用吸水纸吸干膜外部湖水, 立即用便携式电位测定仪测定氧化还原电位, 并从已穿刺破的孔中抽取适量体积间隙水装入具塞小瓶中, 2h内带回实验室, 进行NH_4^+-N和PO_4^{3-}-P的分析[14].

1.2.3 底泥的采集 2006年11月9日在样点处用装有 ϕ85×600mm有机玻璃管的柱状采泥器采集泥样, 每点采集3根平行样, 泥样厚度不少于25cm, 上部用原样点水样注满后两端用橡皮塞塞紧, 垂直放置, 小心带回实验室, 在实验室内按0–2cm、2–4cm、4–6cm、6–8cm和8–10cm进行切样, 切好的泥样4℃保存备用.

1.2.4 含水率及烧失重(LOI)分析 主要采用朱广伟等[15]的方法. 将湿沉积物填满金属小环(h=0.9cm, ϕ=1.75cm), 在105℃下烘4h, 含水率为沉积物烘干前后质量差值与原有湿沉积物质量的比值; 将烘干的沉积物(105℃下4h)在550℃下烧5h, LOI(Loss-on-Ignition)来自于550℃前后损失的质量与原有沉积物质量的比值, 沉积物中有机质含量可以用烧失重(LOI)来表示.

1.2.5 微生物活性分析 底泥中微生物活性采用FDA(荧光素双醋酸酯)法[16-17]. 称取1.00g左右湿沉积物样, 加入10ml灭菌后pH=7.0的0.01mol/L的磷酸缓冲溶液, 于30℃、200r/min摇床中分散15min, 之后加入2g/L的FDA液0.5ml, 于30℃摇床中显色3h, 离心、过滤, 于490nm波长处比色, 测定吸光度, 换算成单位质量干泥的吸光度值, 以此来表示沉积物中微生物FDA活性.

1.2.6 表层沉积物氨化细菌数量测定 表层沉积物中氨化细菌的数量以 MPN 三管法测定[18]. 以蛋白胨 5.0g、K_2HPO_4 0.5g、$MgSO_4{\cdot}7H_2O$ 0.5g、蒸馏水 1000ml 配制 pH=7.0 的培养基, 选取 4 个稀释度(10^6–10^9)的菌悬液进行接种, 在 30℃生化培养箱中培养 7d 后, 记录结果, 换算成单位质量干泥的数量.

1.2.7 碱性磷酸酶活性分析 碱性磷酸酶能催化水解对硝基苯磷酸二钠(p-NPP), 水解产生稳定的黄色对硝基苯酚(PNP), 用比色法测定 PNP 的产生速率, 作为碱性磷酸酶的活性(APA)指标[19]. 具体方法为: 称取 0.5g 左右湿沉积物于灭菌的反应管中, 加入具有一定浓度反应底物 pH=8.4 的 0.5mol/L 的 Tris-HCl 缓冲液 10ml, 混匀 37℃反应 1h, 然后加入 1mol/L 的 NaOH 液 2ml 终止反应, 离心过滤上清液, 410nm 比色, 转换成单位质量干泥的活性强度. 以不同浓度的 PNP 液做标准曲线.

2 结果与讨论

2.1 底泥间隙水主要理化特征

Peeper 所获福保湾底泥间隙水主要理化特征的变化情况(图 2)说明: 间隙水中 Eh 和 pH 在垂直方向上发生波动的位置有很大差异. 在沉积物–水界面处, 间隙水中 pH 变化最大, FB-1 和 FB-2 自界面上的 9.23 急剧降低到界面下的 8.12, 这是由于底泥中含有较丰富的无机碳酸盐和腐殖酸, 以上成分与底泥中具酸碱官能团的有机物共同维持着底泥的酸碱平衡[20]. 在空间分布上, FB-3 和 FB-4 底泥间隙水 pH 值比 FB-1 和 FB-2 要低得多, 在 7.6 左右, 这可能是由于 3 和 4 号点有机质含量丰富, 受昆明市城市污水影响严重, 微生物在此活动强烈, 微生物降解出大量酸性物质(如 CO_2 和部分酸性中间体)[20]的缘故.

FB-1 和 FB-2 界面上覆水的 Eh 变化不大, 基本维持在 150mV 左右, 呈中度氧化环境. 这是由于福保湾较浅, 在风浪的扰动下, 使水体氧的溶解度有所提高造成. 界面以下 4cm 内间隙水的 Eh 都是缓慢减小, 这是由于表层底泥为风浪作用的易扰动层, 氧含量相对比下层要高得缘故. 5cm 以下, 四个点位的 Eh 都是负值, 约为–50 左右, 处于强还原环境, 其 Eh 大小顺序为 FB-1>FB-2>FB-4>FB-3, FB-3 距离大清河与海河口近, 接纳的污染物多, 有机质含量高, 底泥污染最严重, 黑臭现象明显, 其还原性也最强; FB-4 距离河口较远, 污染相对较轻, 其还原性也比 3 号点弱; FB-1 和 FB-2 位于东西沿岸区, 相对来讲水更浅, 风

浪的作用更明显, 且污染较轻.

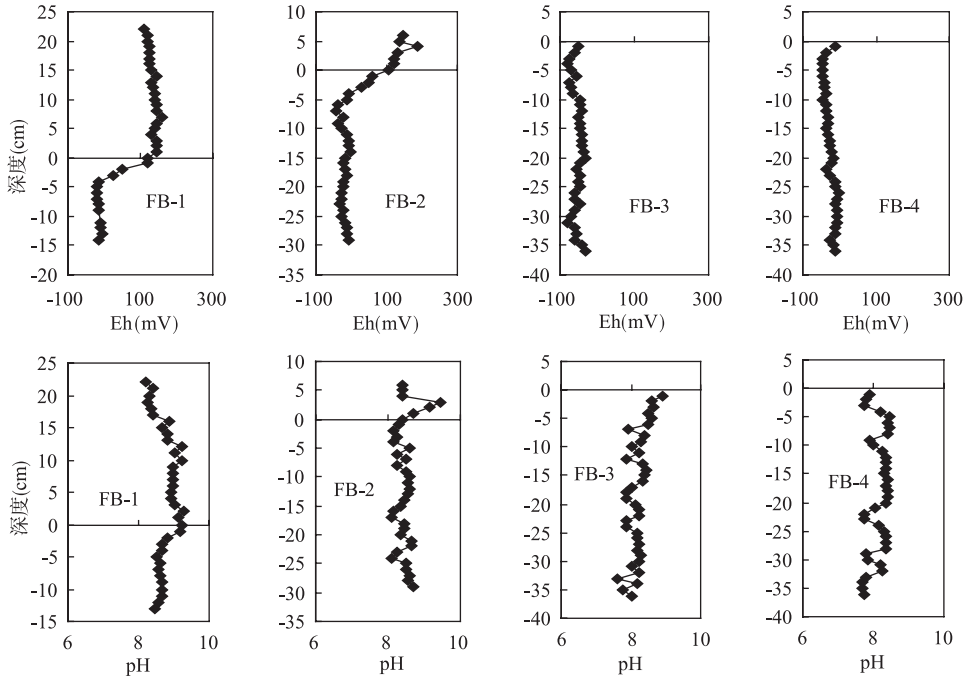


图 2 福保湾间隙水中主要物理参数垂直变化

Fig.2 Vertical profiles of main physical index in the interstitial waters of Fubao Bay

2.2 底泥间隙水氮磷营养盐分布特征

图 3 为福保湾不同区域底泥间隙水 NH_4^+-N 和 PO_4^{3-}-P 含量的垂直分布图. 总体而言, 上覆水 NH_4^+-N 和 PO_4^{3-}-P 含量较低, NH_4^+-N 维持在 0.2mg/L 左右, PO_4^{3-}-P 维持在 0.02mg/L 左右; 间隙水 NH_4^+-N 和 PO_4^{3-}-P 含量垂向上都具有先升高后降低的趋势. 比较 4 个点位间隙水 NH_4^+-N 含量可以看出, FB-3>FB-4>FB-2>FB-1, FB-3、FB-4 和 FB-2 点间隙水 NH_4^+-N 含量分别约为 80mg/L、40mg/L 和 10mg/L. 环境中 NH_4^+-N 的产生和去向受到多种条件的制约和影响. 在沉积物中, 氨氮的存在主要与底泥污染水平、生物作用大小、氧化还原状况和水动力影响程度等多种条件有关[7]. FB-4 和 FB-3 底泥有机质丰富, 表层微生物数量多, 相对 1 和 2 号点来说, 由于生物分解作用显著, 使近表层缺氧, 处于强还原环境, 生物参与的反硝化作用和氨化作用显著, 使底泥间隙水中含有较多的氨氮. 另一方面, 1 和 2 号点同 3、4 号点相比, 风浪扰动更强烈, 间隙水中以及吸附于底泥颗粒上的分子态 NH_3 在底部湖流运动及悬浮作用下, 更易进入上覆水体, 部分经物理挥发逸出水面进入大气, 较大程度上降低了底泥间隙水中 NH_4^+-N 的含量[7].

相对于上层, 下层沉积物通常缺氧程度较高, 适宜于厌氧微生物活动, 反硝化作用和氨化作用强烈, 高价态氮向氨氮等低价态氮转换, 并且下层受到水动力扰动较小, 比上层沉积物更有利于NH_4^+-N在沉积物中保存. 但深度达到10cm以后, 微生物活动变小, 有机质含量也降低, NH_4^+-N含量也随之有降低的趋势.

福保湾 PO_4^{3-}-P 含量在间隙水中的分布与 NH_4^+-N 含量分布有些差异, 首先是在近表层 15cm 内, PO_4^{3-}-P 含量出现较大的跳跃式上升, 15cm 以下, 含量又出现较大的跳跃式下降. 比较 4 个点位间隙水 PO_4^{3-}-P 含量可以看出, FB-3>FB-2>FB-4>FB-1, FB-3 在 12cm 处含量接近 1mg/L, 是 2 和 4 号点的 2 倍, 更是 1 号点的 5 倍, 这是同 3 号点距离河口比较近, 污染严重相吻合的. PO_4^{3-}-P 浓度在垂直方向的差异也表明了底泥有向上覆水释放的潜在性. 界面 15cm 以下, 底泥比较密实, 存在活性的有机碎屑减少, 所以 PO_4^{3-}-P 浓度也维持在较低水平.

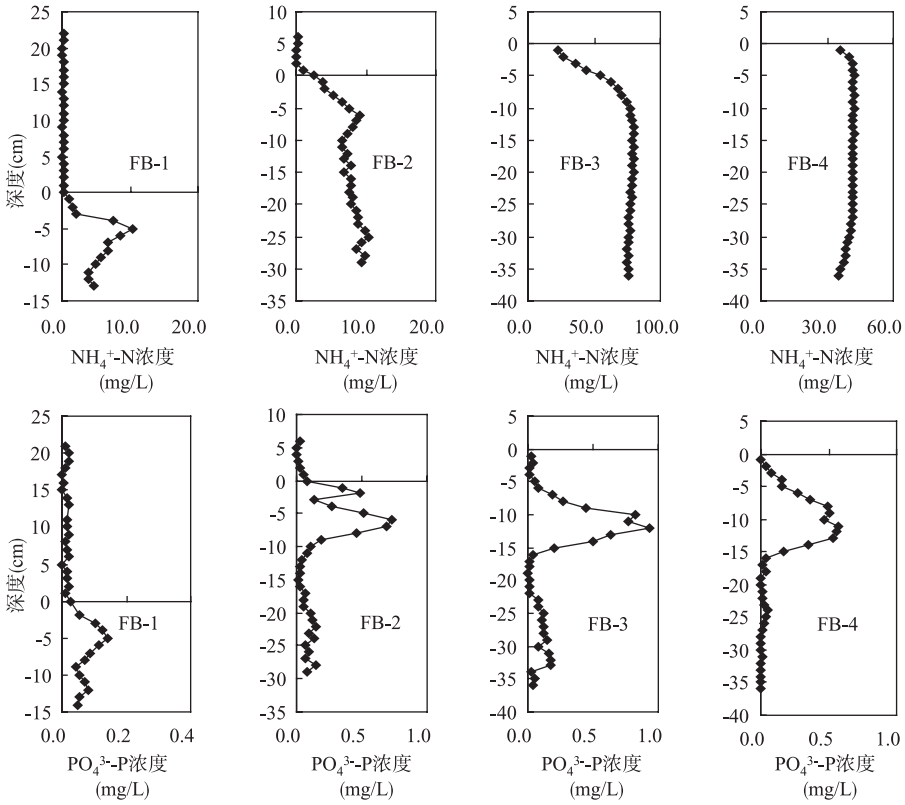


图 3 福保湾间隙水氮磷营养盐垂直变化

Fig.3 Vertical changes of NH_4^+-N and PO_4^{3-}-P in the interstitial waters of Fubao Bay

2.3 沉积物主要物理性质

沉积物的含水率在表层 10cm 内基本上是随深度的增加在降低, FB-1 和 FB-2 含水率从表层的 75%迅速降低到 10cm 的 25%, FB-3 和 FB-4 含水率较高，在 85%左右，而且随深度的增加其减小并不明显(图 4).

从图 4 可以看出，沉积物有机质的含量与深度有着相当的关系. FB-1 表层含量高达 13%, 0–6cm 左右, LOI 随深度的增加而降低至 2.28%，到 6–10cm 时，又增加至 7.94%，这是由于 FB-1 点在 2–6cm 间属于砂

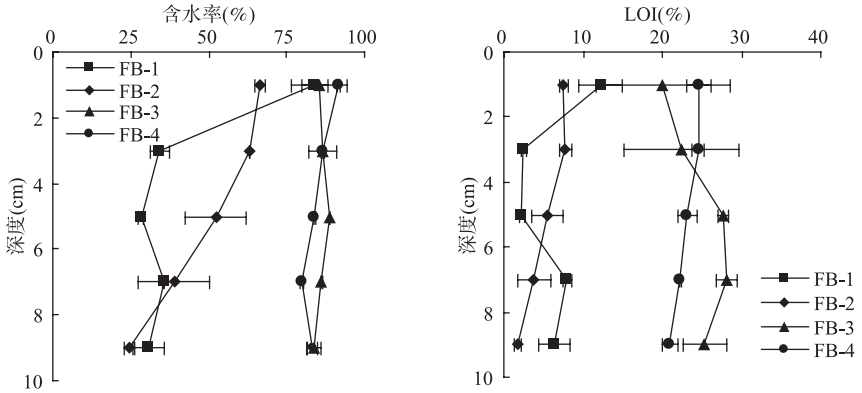


图 4 福保湾沉积物主要物理参数垂直变化

Fig.4 Vertical changes of main physical index in the sediments of Fubao Bay

质层, LOI 很低. FB-2 也属砂质层, LOI 含量较低, 都在 8%以下, 而且随深度的增加在逐步降低. FB-3 和 FB-4 有机质含量相当高, 最高处可以达到 28%, 且随深度的增加变化不大. 总体看来, 福保湾底泥有机质在表层 10cm 内随深度的增加有所降低.

2.4 沉积物中微生物和磷酸酶的分布特征

氨化细菌数的大小顺序是 FB-3>FB-4>FB-1>FB-2, 同各点 NH_4^+-N 浓度的大小顺序是一致的(图 5). FB-3 位于河口区, 还原性要强于其它几个点位, 且有机质含量高, 故其表层氨化细菌数高达 12.94×10^8cells/g. FB-2 和 FB-1 属于贫瘠的砂质层, 且表层泥经常受到风浪的冲刷, 其氨化细菌数只有 0.2×10^8cells/g 和 1.3×10^8 cells/g.

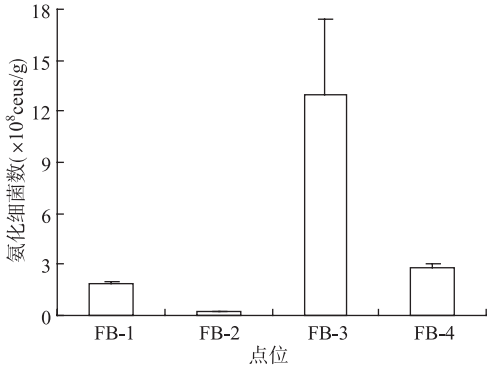


图 5 福保湾表层沉积物氨化细菌的分布

Fig.5 Distributions of ammonia bacteria in the surface sediments of Fubao Bay

微生物通过磷酸酶水解有机磷的磷酯键而释放磷酸根. 福保湾沉积物中碱性磷酸酶主要来自于微生物以及生物碎屑, 对沉积物碱性磷酸酶活性的研究有助于理解沉积物内源磷负荷的贡献[21]. 沉积物碱性磷酸酶在表层表现出了较高活性, FB-3 和 FB-4 高达 9μmol/(g·h)左右, 提示有机磷在此有较强的分解作用. APA 在 3cm 以下随深度的增加逐步降低, 到 10cm 时, FB-3 和 FB-4 已经减小到 5μmol/(g·h)左右, FB-1 和 FB-2 更是减小到了 0.5μmol/(g·h)左右, 表明生物对有机磷的利用随深度的增加在减弱. 总体来看, 福保湾底泥 APA 在垂直方向上具有上高下低的趋势. 4 个不同点位 APA 的大小顺序大体上是 FB-3>FB-4>FB-2>FB-1 (图 6).

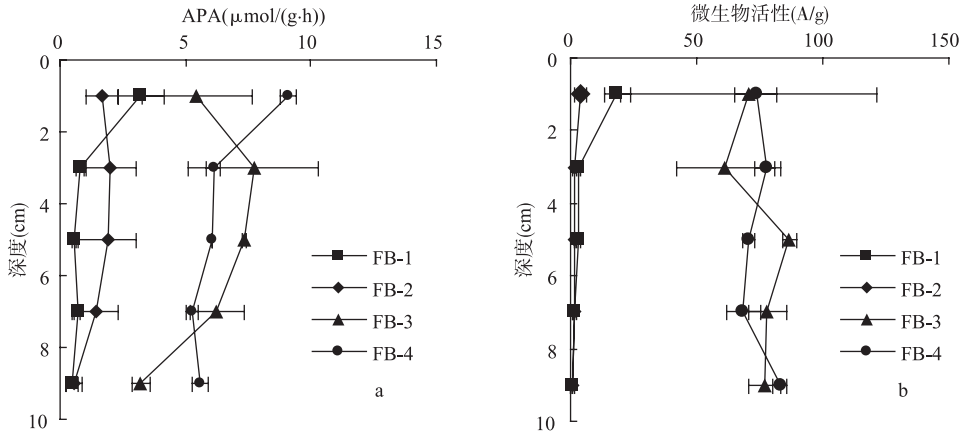


图 6 福保湾沉积物中碱性磷酸酶活性(a)和微生物活性(b)分布

Fig.6 Distributions of activities of alkaline phosphatase(a)and microbe(b)in the sediments of Fubao Bay

底泥微生物活性在 FB-3 和 FB-4 这两个点位上要比 FB-1 和 FB-2 高得多, 前两个点位每克干泥的微生物活性可以达到 80, 后两个点位每克干泥仅有 3 左右, FB-3 和 FB-4 有机质含量丰富, 微生物数量多, 活性也高. 在垂向分布上, 表层前 10cm 底泥内, FB-3 和 FB-4 变化不大, 具有波动性, 而 FB-1 和 FB-2 则有明显减小的趋势, 这是因为 3 和 4 号点在垂向上有机质含量变化不大, 且底泥没有明显的压实, 微生物数量和活性也变化不大, 呈波动性; 而 1 和 2 号点在 4cm 以下, 砂质层被压实, 有机质含量也低, 微生物活性自然要下降(图 6). 总体而言, 微生物活性在垂向上随深度的增加具有逐步降低的趋势.

2.5 间隙水 NH_4^+–N 和 PO_4^{3-}–P 浓度同底泥微生物和磷酸酶活性之间的相关性

氮在间隙水中存在的形态较多，主要为 NH_4^+-N、NO_3^--N、NO_2^--N 和一些有机小分子化合物，磷则主要为 PO_4^{3-}-P. 而在底泥中，无机氮化合物因易溶于水而形态较简单，磷则与多种元素相结合形成难溶物甚至结晶体，以及与多种有机体相结合而形态复杂[7]. 环境中 NH_4^+-N 和 PO_4^{3-}-P 的产生与去向受到多种条件的制约和影响. 底泥中的微生物活性和碱性磷酸酶活性大小是影响底泥氮磷营养盐形态转换的重要因素之一.

将福保湾不同区域间隙水 NH_4^+-N 和 PO_4^{3-}-P 浓度(浓度为 0–2cm、2–4cm、4–6cm、6–8cm 和 8–10cm 的均值)同底泥 LOI、微生物活性和 APA 进行相关性分析，结果见表 1. 福保湾表层 10cm 内间隙水 NH_4^+-N 浓度同底泥 LOI、微生物活性和 APA 具有显著正相关性(α=0.01); PO_4^{3-}-P 浓度同 APA 和微生物活性之间呈负相关，但相关系数很低；底泥微生物活性、APA 同 LOI 之间具有很高的正相关性，相关系数分别达到 0.969 和 0.959，说明微生物活性和 APA 决定于底泥有机质的含量. 王建军等[22]认为 APA 同有机质含量具有很高的相关性，本研究也验证了此结论.

表 1 福保湾间隙水 NH_4^+-N 和 PO_4^{3-}-P 浓度同底泥微生物及酶活性的相关关系

Tab.1 Regression analyses of concentrations of NH_4^+-N and PO_4^{3-}-P in the interstitial waters with the microbe and alkaline phosphatase in the sediments of Fubao Bay

	NH_4^+-N	PO_4^{3-}-P	LOI	氨化细菌	微生物活性	APA
NH_4^+-N(mg/L)	1.000					
PO_4^{3-}-P(mg/L)	0.172	1.000				
LOI	0.904**	–0.089	1.000			
氨化细菌	0.425	–0.472	0.499	1.000		
微生物活性	0.898**	–0.031	0.969**	0.670	1.000	
APA	0.859**	–0.077	0.959**	0.157	0.940**	1.000

*显著性水平 α=0.05; **显著性水平 α=0.01, n=20.

高光等[23]认为水体中碱性磷酸酶活性与水体中 PO_4^{3-}-P 浓度之间呈负相关，当水体中 PO_4^{3-}-P 浓度低时，碱性磷酸酶的活性得以激发、增加，从而来增加水体中 PO_4^{3-}-P 的浓度，随着水体中 PO_4^{3-}-P 浓度的增加，水中的碱性磷酸酶活性又受到抑制. 本试验得出了同样的结论，但相关系数很低，这与间隙水 PO_4^{3-}-P 浓度同上覆水体 PO_4^{3-}-P 浓度相比，受到更多的影响因素有关.

3 结论

用 Peeper 法在滇池福保湾所获间隙水的分析结果显示，间隙水 NH_4^+-N 和 PO_4^{3-}-P 浓度在垂向上都有先增加后降低的趋势，具有向上覆水释放的潜在危害. 福保湾是由大清河和海河冲击扇包围形成的湖湾，整个湖湾底泥间隙水成强还原性，河口区间隙水 NH_4^+-N 和 PO_4^{3-}-P 浓度最高可达到 80mg/L 和 1mg/L，湾心区分别达到 40mg/L 和 0.5mg/L，福保湾底泥污染相当严重，属于超富营养化水体.

福保湾底泥有机质、微生物活性和碱性磷酸酶活性在垂向上具有逐步降低的趋势，福保湾河口区和湾心区底泥发黑发臭，含水率高，有机质高，LOI 高达 20%多，微生物活性和碱性磷酸酶活性也比东西沿岸区要高. 在底泥表层 10cm 内，福保湾间隙水 NH_4^+-N 浓度同底泥有机质、微生物活性和碱性磷酸酶活性呈显著正相关性(α=0.01)，PO_4^{3-}-P 浓度同微生物活性和碱性磷酸酶活性呈负相关性，但相关系数很低.

致谢：中国科学院水生生物研究所滇池野外站为本研究提供了所需场地和试验设备，中国环境科学研究院李英杰博士，中国科学院水生生物研究所王智硕士、涂新海硕士，华中师范大学张彦辉硕士、孙小磊硕士在采样和切样时给予帮助，在此表示感谢！

4 参考文献

[1] 范成新, 张　路, 王建军等. 湖泊底泥疏浚对内源释放影响的过程与机理. 科学通报, 2004, **49**(15): 1523-1528.

[2] 罗潋葱, 秦伯强, 朱广伟. 太湖底泥蓄积量和可悬浮量的计算. 海洋与湖沼, 2004, **35**(6): 491-496.

[3] 刘德起, 李　敏, 朱成文等. 模拟太湖底泥疏浚对氮磷营养盐释放过程的影响研究. 农业环境科学学报, 2005, **24**(3): 521-525.

[4] 张　路, 范成新, 王建军等. 太湖草藻型湖区间隙水理化特性比较. 中国环境科学, 2004, **24**(5): 556-560.

[5] 高　丽, 杨　浩, 周建民等. 滇池水体和沉积物中营养盐的分布特征. 环境科学研究, 2004, **17**(4): 1-4.

[6] Garber KJ, Hartman RT. Internal phosphorus loading to shallow Edinbro Lake in northwestern Pennsylvania. *Hydrobiologia*, 1985, **122**(1): 45-52.

[7] 范成新, 杨龙元, 张　路. 太湖底泥及其间隙水中氮磷垂直分布及相互关系分析. 湖泊科学, 2000, **12**(4): 359-366.

[8] 许传坤, 刘艳芳, 钱　军. 滇池底泥菌类组成及与污染关系的研究. 西部林业科学, 2004, **33**(1): 89-93.

[9] 夏学惠, 东野脉兴, 周建民等. 滇池现代沉积物中磷的地球化学及其对环境影响. 沉积学报, 2002, **20**(3): 416-420.

[10] 李文朝, 刘正文, 胡耀辉等. 滇池东北部沿岸带生态修复技术研究及工程示范——环境恶化、生态退化现状及其成因. 湖泊科学, 2004, **16**(4): 305-311.

[11] Hesslein RG. An in situ sampler for close interval pore water studies. *Limnology and Oceanography*, 1976, **21**: 912-914.

[12] 张　路. 太湖水土界面过程与内源发生机制[学位论文]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2004: 19-20.

[13] 范成新. 孔隙水采样器水下投放装置. 中国专利: (ZL02263161.5), 2003.

[14] 金相灿主编. 湖泊富营养化调查规范(第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 164-187.

[15] 朱广伟. 水动力作用与浅水湖泊磷的内源负荷研究[博士后工作研究报告]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2003.

[16] Schnurer J, Rosswall T. Fluorescein *Diacetate Hydrolysis* as a measure of total microbial activity in soil and litter. *Applied and Envir Microbiol*, 1982, **43**: 1256-1261.

[17] 陈　嫣, 李广贺, 张　旭等. 石油污染土壤植物根际微生态环境与降解效应. 清华大学学报(自然科学版), 2005, **45**(6): 784-87.

[18] 俞毓馨, 吴国庆, 孟宪庭. 环境工程微生物检验手册. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.

[19] 高　光, 高锡云, 秦伯强等. 太湖水体中碱性磷酸酶的作用阈值. 湖泊科学, 2000, **12**(4): 353-358.

[20] 王建军, 范成新, 张　路等. 太湖底泥间隙水中金属离子分布特征及相关性. 中国环境科学, 2004, **24**(1): 120-124.

[21] Zhou Yiyong. Vertical variations in kinetics of alkaline phosphatase and P specials in sediments of a shallow Chinese eutrophic lake(Lake Donghu). *Hydrobiologia*, 2001, **450**: 90-98.

[22] 王建军. 湖泊疏浚后新生表层生物地球化学过程对内源恢复的影响[学位论文]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2003: 29-31.

[23] 高　光, 秦伯强, 朱广伟. 太湖梅梁湾中碱性磷酸酶的活性及其与藻类生长的关系. 湖泊科学, 2004, **16**(3): 245-251.