

滇池福保湾底泥内源氮磷营养盐释放通量估算

李宝^{1,2}, 丁士明¹, 范成新^{1*}, 钟继承¹, 赵斌³, 尹洪斌^{1,2}, 张路¹

(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:在滇池福保湾采集柱状芯样, 室内静态模拟沉积物 NH_4^+ -N 和 PO_4^{3-} -P 的释放. 结果表明, 底泥 NH_4^+ -N 和 PO_4^{3-} -P 的释放速率分别为 $22.941 \sim 163.117 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.90 \sim 2.06 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 不同区域释放速率差异极大. 相对较低的释放速率与湖湾接纳高浓度污水使上覆水与沉积物孔隙水间浓度势减弱有关. 通过 Peeper(原位渗析膜采样器)法获取间隙水-上覆水剖面样品分析, 并根据 Fick 扩散定律计算出福保湾底泥 NH_4^+ -N 和 PO_4^{3-} -P 的释放速率分别为 $2.85 \sim 81.96 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.118 \sim 0.265 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. 比较 2 种方法, 利用 Fick 定律计算出的界面氮磷释放通量明显小于柱样模拟方法. 经面积加权, 按静态释放计算出福保湾底泥 NH_4^+ -N 和 PO_4^{3-} -P 的年释放通量分别为 $(49.9 \pm 8.8) \text{ t}$ 和 $(0.79 \pm 0.53) \text{ t}$.

关键词: 营养盐; 界面; 交换通量; Fick 定律; Peeper; 滇池

中图分类号: X131.2; X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)01-0114-07

Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Nitrogen and Phosphorus in Fubao Bay in Dianchi Lake

LI Bao^{1,2}, DING Shi-ming¹, FAN Cheng-xin¹, ZHONG Ji-cheng¹, ZHAO Bin³, YIN Hong-bin^{1,2}, Zhang Lu¹

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: NH_4^+ -N and PO_4^{3-} -P release from the sediment of Fubao Bay in Dianchi Lake were simulated using static incubations of intact sediment cores. The results showed that the releasing rates of sediment NH_4^+ -N and PO_4^{3-} -P were $22.941 \sim 163.117 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ and $0.90 \sim 2.06 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, respectively, with large variation in different sampling areas. The lower releasing rates were associated with declined concentration gradients between sediment pore water and overlying water, which might be related to the high input of sewages in the bay. Using peeper (*in situ* dialysis membrane samplers) method, concentration gradients of NH_4^+ -N and PO_4^{3-} -P were obtained at the interstitial water-overlying water profiles. Based on calculations using the Fick's First Law, the releasing rates of sediment NH_4^+ -N and PO_4^{3-} -P were estimated at $2.85 \sim 81.96 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ and $0.118 \sim 0.265 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, respectively. Comparison of the two methods using to estimate the fluxes of sediment NH_4^+ -N and PO_4^{3-} -P, the NH_4^+ -N and PO_4^{3-} -P flux from the calculation using Fick's First Law was lower than that using static incubations. For the whole bay, the area-weighted releasing fluxes of NH_4^+ -N and PO_4^{3-} -P from static incubations were estimated to be $(49.9 \pm 8.8) \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ and $(0.79 \pm 0.53) \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively.

Key words: nutrients; interface; exchange flux; Fick's Law; Peeper; Dianchi Lake

沉积物是湖泊水体的营养主要储存库, 在一定条件下, 底泥中营养盐(如 N、P 等)通过扩散、对流、沉积物再悬浮等过程向上覆水体释放. 研究表明, 在外源输入逐步得到控制的情况下, 沉积物对上覆水释放的氮、磷将成为湖泊水质恶化和富营养化的重要原因^[1,2], 因此水体富营养化程度往往与底泥营养盐释放有较为密切的联系^[3].

定量获得湖泊内源负荷的方法主要有质量衡算法、孔隙水扩散模型法、表层底泥模拟法、柱状芯样模拟法和水下原位模拟法^[4]. 质量衡算法是通过对所有出入湖量进行收支平衡, 从而估算湖泊内源负荷, 该方法在没有沉积物释放数据时可参用, 但对外源输入复杂的湖泊估算误差较大; 孔隙水扩散模型

法需有离子的物化参数^[5], 以及离子在泥水界面上的垂向分布; 表层底泥模拟法由于难以保证原沉积物的表层物理状态不被破坏, 其分析结果仅能做参考; 柱状芯样法可基本不破坏沉积物性状, 且在多种控制条件下进行模拟, 因此应用较多^[6], 但柱状体系的体积通常不大, 易产生壁效应; 水下原位模拟法可在不移动沉积物情况下进行模拟, 结果最接近实际, 但费用较大.

收稿日期: 2007-01-04; 修订日期: 2007-05-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(20577053, 40601087); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2005AA601010050201); 中国科学院知识创新工程项目(KZCX3-SW-348)

作者简介: 李宝(1980~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为湖泊环境污染化学, E-mail: bli@niglas.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: cxfan@niglas.ac.cn

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 3.16 km,面积约 1 km²(图 1).福保湾底泥由于长期接纳来自大清河、海河及湖湾周边地区的污染物,受到了严重污染,因此有必要对湖底沉积物内源负荷进行定量研究.国内已有采用孔隙水扩散模型法对滇池沉积物内源磷释放进行了分析^[7,8],但均采用的是离心法提取沉积物孔隙水.该法虽操作简单,但从现场采样至实验室离心获取孔隙水,其间所需时间较长,且垂向分层中控制精度通常较低(约 2 cm),近表层的上覆水也难以采集,因此用该法不易获得沉积物-水界面上覆水和孔

隙水的平滑过渡浓度梯度曲线,一定程度上影响了借助 Fick 定律对界面释放速率的计算结果. Peeper 法是近些年从国外新引入的一种孔隙水采集法^[9],与传统离心法比较,该法虽然受平衡时间制约,但具有可批量取样且取样时间短、取样的精密度高、对环境敏感程度高,特别是可现场获取等优势.本研究通过 Peeper 法来获取福保湾底泥间隙水,对界面浓度进行指数拟合,通过对指数方程求导,获取界面浓度梯度,结合静态释放试验,确定了滇池福保湾底泥氮磷释放速率,提高对内源释放估算的保证率,以期为研究及控制福保湾水体富营养化提供基础数据.

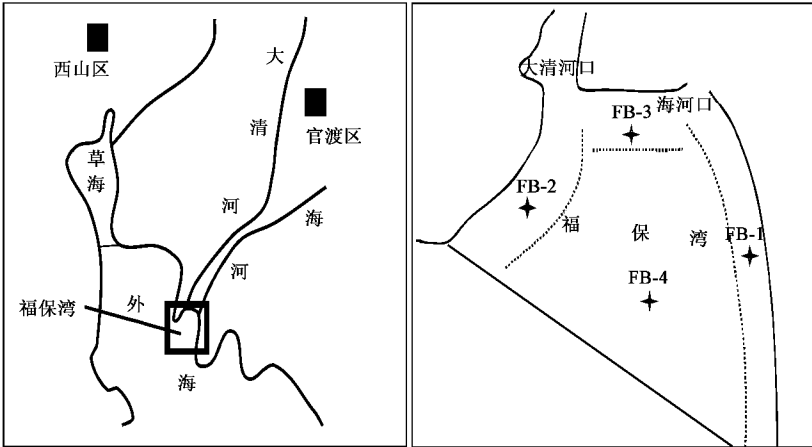


图 1 滇池福保湾采样点分布
Fig.1 Sampling locations of Fubao Bay in Dianchi Lake

1 材料与方法

1.1 Peeper 结构简介

Peeper 主体是由一系列小室组成,小室两侧覆盖 1 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 1 cm,每一小室体积约为 6.4 mL,孔径为 0.45 μm 的渗析膜,具生物惰性,使用时用双面夹板固定于采样器主体板上.

1.2 样品采集与分析

1.2.1 采样点的选择

福保湾面积约 1.0 km²,湖湾东、西部沿岸线长约分别为 1.5 km 和 0.8 km,湖湾北部沿岸线长约 0.6 km(图 1).东、西两岸由于常年受风浪冲刷,湖底底泥为坚硬而贫瘠的沙质沉积物,湾心及河口则由于常年接纳大清河、海河及湖湾周边地区的污染物,

底泥为发黑发臭、高含水率的泥炭层.为反映福保湾底泥营养盐内源释放通量的差异性,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)等 4 个区域开展研究.东、西部沿岸区面积约分别为 0.15 km² 和 0.08 km²,距离沿岸 0.1 km 内沉积物性状较为类似;河口区面积约为 0.12 km²,距离沿岸 0.2 km 内沉积物性状类似;湾心区面积约为 0.65 km²,面积最大,以软性底泥为主.所设的 4 个采样点位置的经纬度分别为:FB-1, E102°41'24.3"和 N24°55'41.6";FB-2, E102°40'59.4"和 N24°55'53.1";FB-3, E102°41'10.1"和 N24°56'3.7";FB-4, E102°41'7.4"和 N24°55'50.8".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^[10]持准备好的 Peeper 采样器,伸入水底垂直将 Peeper 投入底泥至预定深度.自投放之日(2006-10-09)起,平衡 30 d,从泥中取出 Peeper,立即用移液枪穿孔抽取适量体积孔隙水

装入具塞瓶中, 2 h 内带回实验室, 进行 NH_4^+ -N 和 PO_4^{3-} -P 的分析^[11].

1.2.3 沉积物的采集

2006-11-09 在样点处用装有 $\phi 85 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ 有机玻璃管的柱状采泥器采集泥样, 每样点采集 3 根平行样, 泥样厚度不少于 25 cm, 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.

1.3 沉积物界面物质释放试验

在室内将柱状样中上层水体用虹吸法抽去, 再用虹吸法沿壁小心滴注已过滤的原采样点水样, 至液面高度距沉积物表面 20 cm 处停止(此时水柱体积为 1 134.3 mL), 标注刻度, 所有采样管均垂直放入循环水浴器中, 蔽光培养. 即刻取原水样作起始样, 此后在指定时间用移液管于水柱中段取样, 每次取样体积为 50 mL, 同时用原样点初始过滤水样补充至刻度, 其后于 12、24、36 和 72 h 时进行采样. 全部实验于 72 h (3 d) 止, 结束时的样品分析项目与起始时同.

1.4 试验结果计算

1.4.1 柱状芯样模拟释放速率

沉积物氮磷营养盐释放速率对温度具有一定的依赖性^[4], 考虑昆明的年平均温度为 15℃ 左右, 故设置本试验温度为 14 ~ 16℃. 试验于 2006-11-09 进行, 其营养盐的释放速率按式(1)计算.

$$R = [V(c_n - c_0) + \sum_{j=1}^n V_{j-1}(c_{j-1} - c_a)] / A \cdot t \quad (1)$$

式中, R 为释放速率 [$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$]; V 为柱中上覆水体积(L); c_n 、 c_0 、 c_{j-1} 为第 n 次、初始和 $j-1$ 次采样时某物质含量 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); c_a 为添加原水后水体中某物质含量 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); V_{j-1} 为第 $j-1$ 次采样体积 (L); A 为柱样中水-沉积物接触界面 (m^2); t 为释放时间(d). 由于不考虑 NH_3 的水气界面交换, 所计算的 NH_4^+ -N 为表观释放速率.

1.4.2 孔隙水扩散通量模型

如果只考虑沉积物-上覆水界面处的营养盐交换通量, 通过表层沉积物的氮、磷扩散通量就可运用 Fick 第一定律来获得式(2)^[12]:

$$F = \varphi_0 D_s \left. \frac{\partial c}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (2)$$

式中, F 为通过沉积物-上覆水界面的扩散通量, φ_0 为表层沉积物的孔隙度, $\left. \frac{\partial c}{\partial x} \right|_{x=0}$ 为沉积物-上覆水

界面的营养盐浓度梯度, D_s 为考虑了沉积物弯曲效应的实际分子扩散系数. 沉积物弯曲度的测量是相当困难的, Ullman 等^[13]曾经给出了真实扩散系数 D_s 与孔隙度 φ 之间的经验关系式:

$$D_s = \varphi D_0 \quad \varphi < 0.7$$

$$D_s = \varphi^2 D_0 \quad \varphi > 0.7$$

式中, D_0 为营养盐在无限稀释溶液中的理想扩散系数, 对 HPO_4^{2-} , $D_0 = 7.0 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; 对 NH_4^+ -N, $D_0 = 17.6 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ^[4].

1.4.3 全湾释放量计算

全湾释放量计算公式见式(3).

$$W = \sum_j^n \sum_i^n r_{ij} A_j \Delta t_i \times 10^{-3} \quad (3)$$

式中, W 为全湾氮或磷的释放总量 ($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$); r_{ij} 表示第 j 区域沉积物在 i 温度下的释放速率 [$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$]; A_j 为 j 区域所代表的面积 (km^2); Δt_i 表示 i 温度下所代表的时间段(a).

2 结果与讨论

2.1 静态模拟条件下氮的释放及负荷计算

图 2 可看出, 福保湾沉积物各区域氮释放明显, FB-4 和 FB-3 释放速率较高, 分别达到 $(163.1 \pm 27.8) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $(161.7 \pm 22.6) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; FB-1 和 FB-2 释放速率较低, 分别为 $(22.9 \pm 10.6) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $(99.0 \pm 20.7) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. 福保湾底泥各区域 NH_4^+ -N 释放速率的大小顺序与底泥的污染程度是相一致的, 这是由于河口区和湾心区 (FB-4 和 FB-3) 常年接纳大清河和海河及周边地区的污染物, 底泥为发黑发臭的泥碳层, 具有强还原性, 间隙水 NH_4^+ -N 含量高, 而东西沿岸区底泥为坚硬且贫瘠的沙质层, 污染相对较轻 (见图 4), 间隙水 NH_4^+ -N 浓度低的缘故. 与文献[14]得到的太湖梅梁湾及东太湖释放速率数据相比 [$(42.2 \pm 18.4) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $(37.1 \pm 17.4) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$], 滇池福保湾底泥 NH_4^+ -N 释放速率要比太湖高的多, FB-4 和 FB-3 的释放速率是梅梁湾和东太湖的 4 倍, 污染相对较轻的西部沿岸区 (FB-2), 其释放速率也较之太湖高 1 倍. 由此也可以看出, 福保湾底泥氮污染要比太湖严重.

本研究中所反映的 NH_4^+ -N 释放量为水-沉积物界面对实验系统很有意义. 由于湖体需不断维持水-气界面 NH_3 的平衡以及风浪作用促使 NH_3 的逸出, NH_4^+ -N 的实际释放强度较之静态培养条件下的结

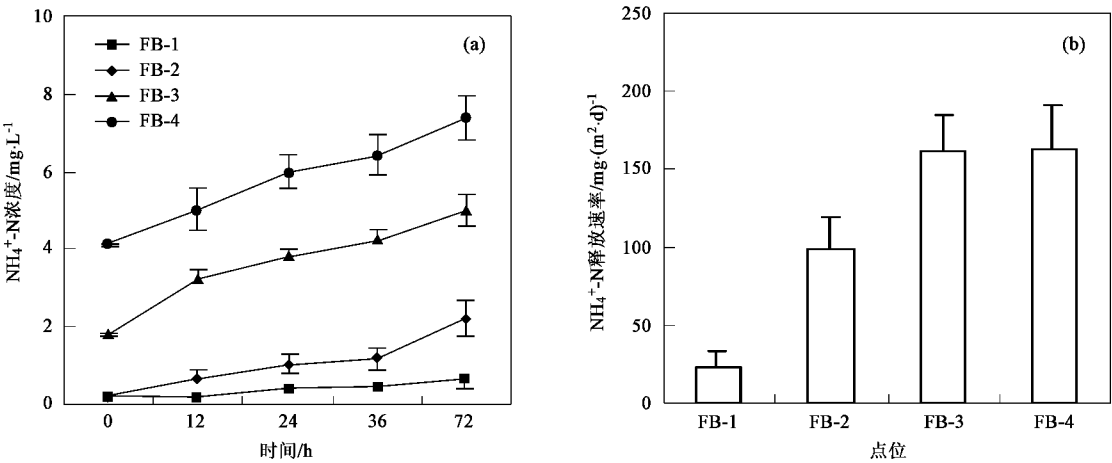


图2 静态培养条件下不同采样点上覆水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量变化(a)及其释放速率(b)
Fig.2 Changes of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentrations in the overlying water of different core samples (a) and its release rates (b) under static incubations with intact sediment cores

果高.另一方面,在还原性较强的沉积物中缺乏游离氧,微生物可利用氧化物中的氧作为氢的受体进行呼吸,此时往往伴随反硝化作用发生,初始表现为 NO_3^- 下降,中间产物 NO_2^- 积累,随时间增加, NO_2^- 也不断向低价态物质,如向 N_2O 和 N_2 转化,后两者可通过水-气界面交换逸出水面,减少水柱中氮的含量,从而也可能促进沉积物 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的释放.

根据实验计算得到 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 释放速率和各采样点所代表的各区域沉积物面积,按式(3)计算的表观释放结果列于表1,滇池福保湾由沉积物向上覆水释放 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的量为 $(49.925 \pm 8.767) \text{t}\cdot\text{a}^{-1}$.

表1 福保湾不同区域实验模拟计算的氮和磷的释放量				
Table 1 Amount of N and P release at different locations of Fubao Bay on the basis of the simulation results				
项目	点位	面积 /km ²	释放速率 R /mg•(m ² •d) ⁻¹	释放量 /t•a ⁻¹
NH ₄ ⁺ -N	FB-1	0.15	22.941 ± 10.626	1.256 ± 0.581
	FB-2	0.08	98.985 ± 20.729	2.890 ± 0.605
	FB-3	0.12	161.664 ± 22.631	7.080 ± 0.991
	FB-4	0.65	163.117 ± 27.778	38.699 ± 6.590
合计		1.00		49.925 ± 8.767
PO ₄ ³⁻ -P	FB-1	0.15	0.90 ± 0.30	0.05 ± 0.02
	FB-2	0.08	4.90 ± 2.30	0.14 ± 0.07
	FB-3	0.12	2.81 ± 0.06	0.12 ± 0.00
	FB-4	0.65	2.06 ± 1.88	0.48 ± 0.44
合计		1.00		0.79 ± 0.53

2.2 静态模拟条件下磷的释放及负荷运算

图3可看出,福保湾沉积物各区域有较明显的磷释放现象.FB-2 释放速率最高,为 $(4.90 \pm 2.30) \text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$,FB-3 和 FB-4 释放速率较低,分别为 $(2.81 \pm 0.06) \text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 和 (2.06 ± 1.88)

$\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$,FB-1 释放速率最小,只有 $(0.90 \pm 0.30) \text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$.福保湾底泥各区域 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 释放速率的大小顺序与底泥的污染程度有所出入,西部沿岸区污染相对较轻,但 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 释放速率最高,这与西部沿岸区距离大清河较近有一定关系.FB-2底泥间隙水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度并不比 FB-3 和 FB-4 低(图4),但其上覆水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量反而要比3和4号点低得多,因此导致 FB-2 表现出最高的释放速率.其它几个采样点释放速率的大小顺序是同间隙水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量相一致的.与文献[14]得到的太湖梅梁湾及东太湖释放速率数据 $[(-0.06 \pm 0.13) \text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $(3.43 \pm 3.20) \text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}]$ 相比,滇池福保湾底泥 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 释放速率比东太湖稍高一些.由此也可以看出,福保湾底泥磷污染比太湖稍高.

根据实验计算得到的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 释放速率和各采样点所代表的各区域沉积物面积,按式(3)计算的表观释放结果列于表1,滇池福保湾由沉积物向上覆水释放的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 量为 $(0.79 \pm 0.53) \text{t}\cdot\text{a}^{-1}$.

2.3 孔隙水扩散模型计算氮磷的释放量

应用 Peeper 法获得固定点位较高精度的间隙水和上覆水,间隙水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量在表层沉积物中具有随深度增加而增加的趋势(图4),表明泥水界面存在较高的浓度梯度,因此具有不可忽视的内源释放趋势存在.

离子在间隙水中的扩散服从 Fick 第一定律,将间隙水上端扰动层的 3~4 cm 以及界面向上覆水 3 cm 处的营养盐含量对深度进行指数拟合(表2).进

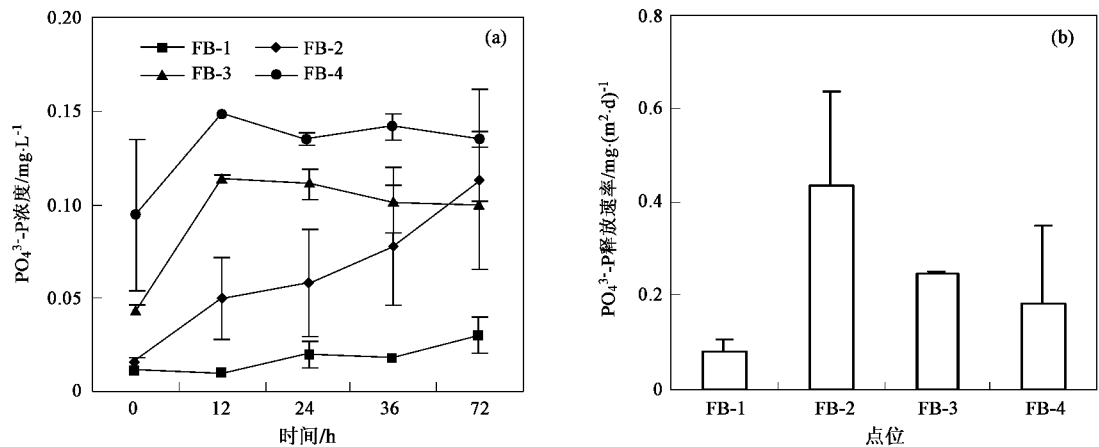


图 3 静态培养条件下不同采样点上覆水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量变化(a)及其释放速率(b)

Fig.3 Changes of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ concentrations in the overlying water of different core samples (a) and its release rates (b) under static incubations with intact sediment cores

一步按照拟合的表达式对深度 x 进行求导,并求出水土界面处的 $\frac{dc}{dx}$.

从指数拟合的结果看,4个点位拟合效果都比

较好($r > 0.811$).为求出界面交换通量,还需了解表层沉积物扰动层的孔隙度 φ .另有实验得到 FB-1、FB-2、FB-3、FB-4 的表层沉积物(0~4 cm)的平均孔

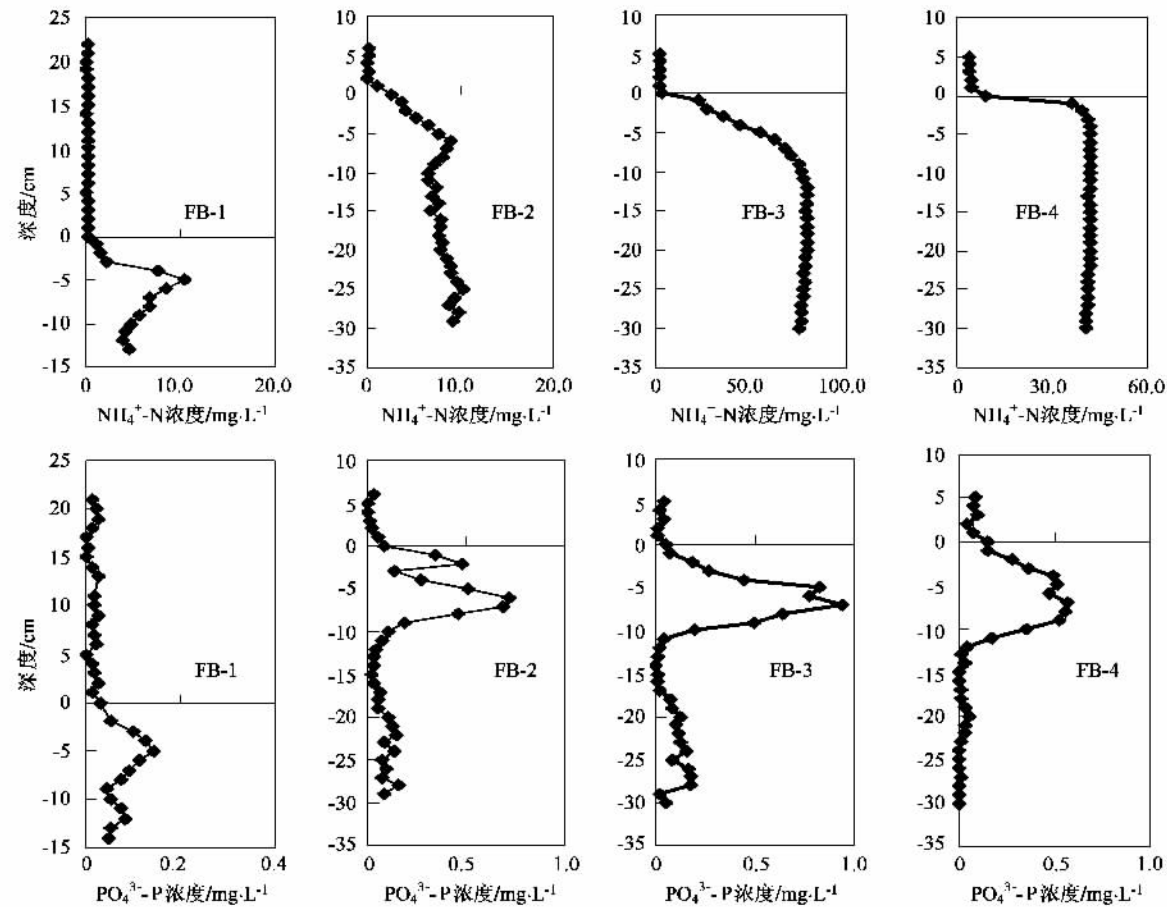


图 4 不同采样点泥水界面 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量的垂直变化

Fig.4 Vertical changes of concentrations $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ at the sediment-water interfaces of different sampling locations

隙度分别为 $(75.72 \pm 0.49)\%$ 、 $(80.72 \pm 2.24)\%$ 、 $(90.46 \pm 3.85)\%$ 和 $(91.72 \pm 2.07)\%$. 由于 4 个点位的孔隙度均 > 0.7 , 运用式 $D_s = \varphi^2 D_0$, 计算得到各点位的真实扩散系数. 通过式(2), 计算出相应点位的营养盐扩散通量 F . 由表 3 看出, 滇池福保湾由沉积物向上覆水释放的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的通量分别

表 2 福保湾泥水界面 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度对深度的拟合方程¹⁾

Table 2 Regression equations of concentrations $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ with the depth at the sediment-water interfaces for different sampling sites of Fubao Bay

点位	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$			$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$		
	拟合曲线	r	dc/dx	拟合曲线	r	dc/dx
FB-1	$y = 0.0938 \exp(0.560x)$	0.955	0.373	$y = 0.0130 \exp(0.507x)$	0.914	0.039
FB-2	$y = 0.1575 \exp(0.627x)$	0.907	0.886	$y = 0.0193 \exp(0.463x)$	0.859	0.045
FB-3	$y = 1.1381 \exp(0.561x)$	0.935	4.548	$y = 0.0125 \exp(0.487x)$	0.884	0.033
FB-4	$y = 3.2455 \exp(0.423x)$	0.927	6.034	$y = 0.0528 \exp(0.311x)$	0.923	0.049

1)代表 $x = 3.5$ 沉积物-上覆水界面; r 为相关系数

表 3 通过 Fick 定律计算出的福保湾不同区域底泥 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 的释放速率及通量

Table 3 Releasing rates and fluxes of sediment $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ at different sampling locations of Fubao Bay through calculations using Fick's Law

项目	点位	$D_s \times 10^6 / \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	释放速率 $F / \text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$	面积/ km^2	释放量/ $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	FB-1	10.09 ± 0.04	2.85 ± 0.01	0.15	0.156 ± 0.001
	FB-2	11.47 ± 0.88	8.20 ± 0.17	0.08	0.239 ± 0.005
	FB-3	14.40 ± 2.60	59.24 ± 0.45	0.12	2.594 ± 0.020
	FB-4	14.81 ± 0.75	81.96 ± 0.09	0.65	19.445 ± 0.021
合计				1.00	22.434 ± 0.047
$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	FB-1	4.01 ± 0.02	0.118 ± 0.001	0.15	0.006 ± 0.000
	FB-2	4.56 ± 0.35	0.166 ± 0.004	0.08	0.005 ± 0.000
	FB-3	5.73 ± 1.04	0.171 ± 0.013	0.12	0.007 ± 0.000
	FB-4	5.89 ± 0.30	0.265 ± 0.003	0.65	0.063 ± 0.001
合计				1.00	0.081 ± 0.001

为 $(22.434 \pm 0.047) \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $(0.081 \pm 0.001) \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$.

2.4 扩散定律与原柱样静态培养实用性比较

采用 2 种方法得到的福保湾不同湖区静态界面扩散通量有所不同(表 4). 由于 Fick 定律计算得到的扩散通量(F)只考虑了营养盐在沉积物-上覆水之间的浓度梯度以及孔隙度、颗粒阻碍因子对溶解态营养盐迁移扩散的影响, 因此是一种理论通量. 由生物的扰动作用、营养盐在水体中的水平迁移扩散、风浪作用造成的紊流扩散、沉积物表明的直接释放等其他因素在这个模型中未得到体现. 尽管静态模拟不能真实反映湖泊的物理条件, 如水平流、紊流等物理因素, 但由于考虑到生物扰动等影响因素, 在理论上比扩散定律的计算结果更接近于实际情况.

表 4 可看出, 通过原柱样静态模拟得到的扩散通量要大于扩散定律计算的结果. 这种偏差反映了生物扰动等作用的强度. 正如 Cermelj 等^[15] 在 Adriatic 海湾利用扩散模型和原柱样模拟进行扩散通量的比较研究中发现, R 和 F 值的差异反映了沉积物, 特别是表层沉积物中生物扰动和生物灌溉作用的强度, 差异越大则说明生物扰动强度越大, 且 R/F 比值与扰动强度严格相关. 如果采集的间隙水

正好有生物灌溉作用存在, 则上覆水会侵入到间隙水中造成营养盐的浓度梯度的降低而导致分子扩散降低^[12]. 因此, 如果存在生物扰动及生物灌溉作用, 则计算得到的 R/F 值会大大低于无扰动作用下的计算结果.

表 4 福保湾静态界面扩散通量(R 、 F)比较

Table 4 Comparisons of static fluxes of sediment $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ in Fubao Bay between using static incubations and calculations with Fick's Law

物质	点位	R/F
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	FB-1	8.05 ± 3.73
	FB-2	12.07 ± 2.53
	FB-3	2.73 ± 0.38
	FB-4	1.99 ± 0.34
$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	FB-1	7.60 ± 2.50
	FB-2	29.50 ± 13.80
	FB-3	16.40 ± 0.40
	FB-4	7.80 ± 6.90

综合分析, 在滇池福保湾这样一个生物扰动作用比较强烈的湖区, 运用 Fick 扩散定律计算营养盐扩散通量将与实际有效扩散通量有较大差异. 也就是说, 能否成功运用 Fick 定律计算营养盐扩散通

量,取决于研究湖泊或者湖区表层沉积物的稳定性.生物扰动越小,则 Fick 定律的适用性越强,反之则适用性弱.这也是为何多数研究者将 Fick 定律应用在生物扰动相对较弱的深海沉积物计算营养盐通量的原因^[11].

3 结论

(1)通过原柱样静态培养模拟试验以及间隙水浓度扩散模型,计算出 2 种方法下滇池福保湾不同区域氮磷的释放速率,并以 11 月温度作为福保湾全年代表性温度,计算出全湾氮磷的释放总量.福保湾河口区和湾心区是外部入湖生活污水最主要接纳区域,常年接纳大清河和海河及周边地区的污染物,底泥黑臭现象明显,具有强还原性,其间隙水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 浓度甚高,是底泥释放的驱动源.而湖湾的东西沿岸区底泥呈沙质化或硬质化,且相对贫瘠,其间隙水中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 浓度较低,故污染物释放较轻.反映区域沉积物性质是福保湾底泥释放发生空间差异的最主要原因.

(2)柱样实验表明,福保湾氮磷的内源释放强度比太湖要高,揭示福保湾沉积物氮磷的污染较为严重.将 2 种方法得到的静态界面释放通量相比较,氮的 R/F 值为 1.99 ~ 8.05,磷的 R/F 值为 7.60 ~ 29.50,表明运用 Fick 扩散定律计算福保湾营养盐扩散通量将与实际的有效扩散通量背离较大.揭示对于具有较大移动性和悬浮性的底泥,应用柱状样进行静态模拟可获取较为准确的内源释放结果.

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[J]. 科学通报,2004,49(15): 1523-1528.

[2] 尹大强,谭秋荣. 环境因子对五里湖沉积物磷释放的影响[J]. 湖泊科学,1994,6(3): 240-245.

[3] 龚春生,姚琪,范成新,等. 城市浅水型湖泊底泥释磷的通量估算——以南京玄武湖为例[J]. 湖泊科学,2006,18(2): 179-183.

[4] 范成新,张路,杨龙元,等. 湖泊沉积物氮磷内源负荷模拟[J]. 海洋与湖沼, 2002,33(4): 370-378.

[5] McDuff R E, Ellis R A. Determining diffusion coefficient in marine sediments: A laboratory study of the validity of resistivity techniques[J]. American Journal of Science, 1979,279: 666-675.

[6] Boers P C M, O Van Hese. Phosphorus release from the peaty sediments of the Loosdrecht Lakes (The Netherlands)[J]. Water Research, 1988, 22: 355-363.

[7] 高丽,杨浩,周建民,等. 滇池沉积物磷内负荷及其对水体贡献的研究[J]. 环境科学学报,2004,24(5): 776-781.

[8] 毛建忠,王雨春,赵琼美,等. 滇池沉积物内源磷释放初步研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2005,3(3): 229-233.

[9] 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[J]. 中国环境科学,2004, 24(1): 120-124.

[10] 范成新. 孔隙水采样器水下投放装置[P]. 中国专利: ZL02263161.5, 2003-05-28.

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

[12] 张路. 太湖水土界面过程与内源发生机制[D]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2004. 60-62.

[13] Ullman W J, Sandström M W. Dissolved nutrient flux from the nearshore sediments of Bowling Green Bay, Central Great Barrier Reef Lagoon (Australia)[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1987, 24(3): 289-303.

[14] 范成新,张路,秦伯强. 太湖沉积物-水界面生源要素迁移机制及量化-I. 氨态氮释放速率的空间差异及源汇通量[J]. 湖泊科学, 2004, 16(1): 10-20.

[15] Cermelj B, Bertuzzi A, Faganeli J. Modeling of pore water nutrient distribution and fluxes in shallow coastal waters (gulf of Trieste, northern Adriatic)[J]. Water, Air and Soil Pollution, 1997, 99: 435-444.