

磷和硅在湖泊沉积物上的释放特征及形态变化研究

吕昌伟^{1,2}, 高际玫³, 王维^{1,2}, 何江^{1,2}, 孙园园¹, 麻涛¹, 张细燕¹, 崔萌¹, 万丽丽¹

(1.内蒙古大学环境与资源学院, 呼和浩特 010021; 2.内蒙古大学环境地质研究所, 呼和浩特 010021; 3.内蒙古环境监测中心站, 呼和浩特 010011)

摘要:以乌梁素海(WLSH)和岱海(DH)表层沉积物为吸附剂,开展了磷硅在2个湖泊沉积物上的释放实验研究,同时采用连续提取法探讨了释放后的磷硅形态变化。结果表明,磷和硅在2个湖泊沉积物上的释放行为均可用Elovich方程描述;0~20 min为磷的快速释放阶段,此时段内约有75%的吸附磷迅速从沉积物上解吸并释放至上覆水中;0~2 h为硅的快速释放阶段,此阶段内约有40%的吸附硅从沉积物上解吸并释放至上覆水中;总体上,沉积物中Ex-P、Al-P、Fe-P及IEF-Si、CF-Si具有较强的释放潜力。

关键词:释放特征;形态分布;磷;硅;沉积物

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2011)11-2330-06

Release Characteristics and Form Changes of Phosphorus and Silicate in Lakes Sediments

LÜ Chang-wei^{1,2}, GAO Ji-mei³, WANG Wei^{1,2}, HE Jiang^{1,2}, SUN Yuan-yuan¹, MA Tao¹, ZHANG Xi-yan¹, CUI Meng¹, WAN Li-li¹

(1.College of Environment and Resources, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China; 2.Institute of Environmental Geology, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China; 3.Inner Mongolia Environment Monitoring Center Station, Huhhot 010011, China)

Abstract: Taking surface sediments from the Wuliangsuhai and Daihai Lake as adsorbent, the release experiments of phosphorus and silicate from sediments were carried out and the form distribution characters of phosphorus and silicate were studied after release using sequential extraction methods in this work. The results showed that the release characteristics of phosphorus and silicate can be expressed by the Elovich equation. In the first 20 min, there about 75% of adsorbed phosphorus were released into the overlying water with release rate of 183.495~188.791 mg·kg⁻¹·h⁻¹ or 4.287~4.424 mg·L⁻¹·h⁻¹; in the first 2 h, there about 40% of adsorbed silicate were released into the overlying water and the release capacity of the sediments from Lake Wuliangsuhai and Lake Daihai were 47.87 mg·L⁻¹·h⁻¹ and 11.88 mg·L⁻¹·h⁻¹ respectively. From the view of release capacity of different forms, the form of Ex-P had the maximum release capacity and its potential release risk should be paying more attention. Although the release rates of Al-P and Fe-P were not high, the percentage of average release capacity could be up to 60%~90%. Generally, the forms of Ex-P, Al-P, Fe-P, IEF-Si and CF-Si in the two lakes sediments had important potential bioavailability.

Keywords: release behavior; form distribution; phosphorus; silicate; sediment

湖泊沉积物作为湖泊湿地生态系统生源要素的重要源与汇,对氮磷等生源要素的生物地球化学循环具有重要意义。作为营养元素,磷和硅在土壤上的吸附特征及生物有效性得到了农学、土壤学和植物营养学等领域的广泛关注^[1-4],尤其是在土壤或颗粒物上的吸附特征^[5-9]。研究表明,磷和硅经常成为湖泊生

态系统初级生产力的限制性营养盐^[10],沉积物中磷的释放是影响水体富营养化状态的重要因素^[11],沉积物磷的最大释放量及释放强度与其污染程度呈正相关关系^[12],且沉积物中的总磷通过物理、化学、生物作用可与有机质、铁等多种矿物质结合形成不同的地球化学形态。

研究表明,表征沉积物释放过程的释放动力学的模型有Zero-order、First-order、Bi-constants、Elovich等方程,其中Elovich模型较其他模型有较好的拟合优度^[13]。湖泊沉积物在模拟释放实验中,在前20 h内,磷释放具有较大释放速度,而在20 h之后,逐渐达到

收稿日期:2011-05-14

基金项目:国家自然科学基金项目(41003049, 40863003);内蒙古自然科学基金项目(2009BS0601, 2010BS0601);“国家大学生创新性实验计划”项目(20081012614)

作者简介:吕昌伟(1979—),男,博士/副教授,主要研究方向为环境地球化学和污染生态学。E-mail:lcw2008@imu.edu.cn

最大释放量湖泊释放过程磷的释放量随时间变化趋势一般利用指数模型来描述^[14-15]。本研究以乌梁素海和岱海沉积物为吸附剂,开展了磷、硅在2个湖泊沉积物上的释放动力学及释放过程中的形态变化研究,探讨了不同形态磷、硅的释放潜力,对揭示沉积物中磷和硅的释放机理及其生物地球化学循环规律有重要意义,也可为湖泊富营养化发生机制及水环境治理与保护研究积累基础数据。

1 研究区概况

乌梁素海(40°47'~41°03'N, 108°43'~108°57'E; WLSH)位于内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗境内,系黄河改道后形成的牛轭湖,是内蒙古高原西部干旱区最典型的浅水草型湖泊,是亚洲湿地公约组织名录中的大型湿地生物多样性保护区。湖区现有水域面积333.48 km²,湖面高程1 018.5 m,库容量 $2.5\times 10^8\sim 3\times 10^8$ m³,80%水域水深0.8~1.0 m。受河套灌区农田退水的影响,近10年来乌梁素海富营养化进程加剧^[16]。

岱海(40°29'27"~40°37'6"N、112°33'31"~112°46'40"E; DH)位于内蒙古凉城县境内,是内蒙古高原中西部干旱半干旱区典型的地堑式深水藻型湖泊,位处温带半干旱区向干旱区的过渡带。湖区现有水域面积约80.72 km²^[17],湖面高程1 223 m,最大水深16.05 m,平均水深7.41 m。近年来因气候干旱,湖泊水位逐年下降,水面不断缩小,湖水咸化程度逐渐增高。

2 材料与方法

2.1 样品采集

于2009年8月对乌梁素海、岱海进行沉积物样品采集,依据湖泊生态系统观测方法^[18],针对各湖泊现有水域面积及湖泊生态系统类型设置采样点(图1)。表层沉积物(0~10 cm)视湖泊深度分别用挪威Swedaq公司产KC mod A och B型无扰动采样器或荷兰Eijkelkamp公司产SA Beeker型沉积物原状采样器采集;沉积物样品装入封口聚乙烯塑料袋后冷藏保存,回实验室于-24℃冷冻保存。

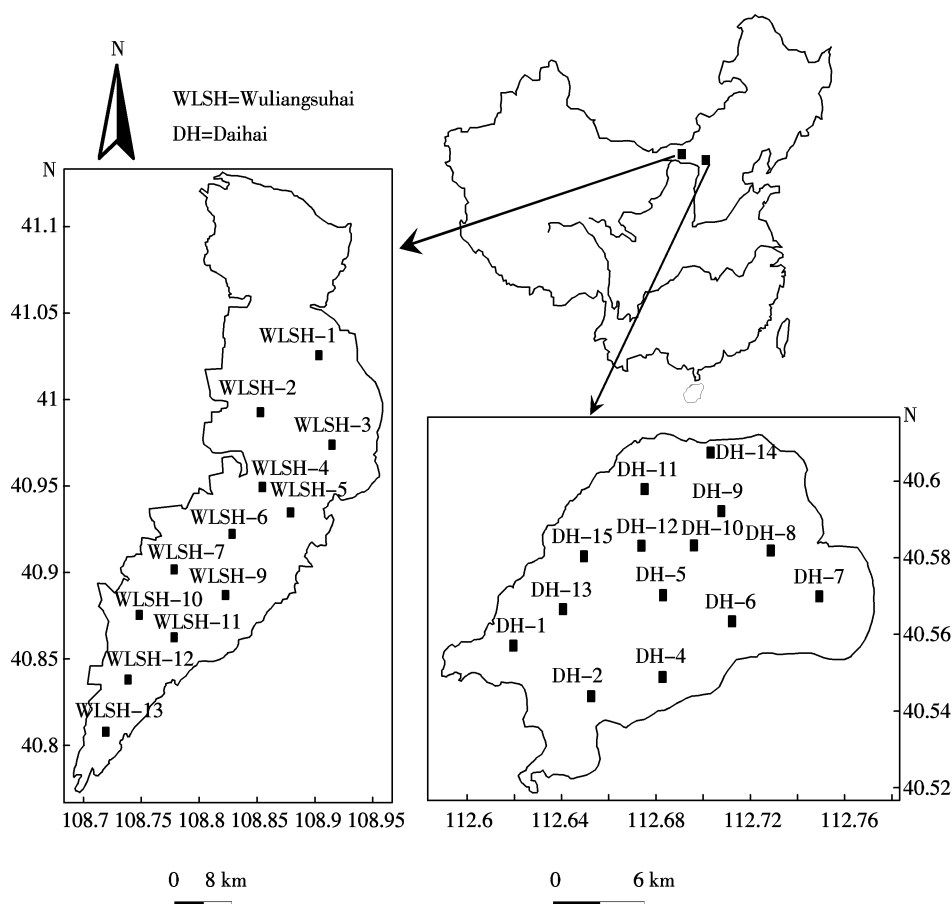


图1 乌梁素海和岱海采样站位分布示意

Figure 1 Locations of sampling points in the Wuliangsu Lake and Daihai

2.2 实验方法

2.2.1 磷的释放实验

在一系列 50 mL 离心管中分别加入乌梁素海表层沉积物样品 0.700 0 g, 于室温下加入磷含量为 $12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 KH_2PO_4 溶液, 于室温下振荡 24 h ($260 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$), 振荡后离心去除上清液, 再向每个离心管分别加入 30 mL 的去离子水后振荡, 分别于 0、10 min、20 min、40 min、1 h、2 h、4 h、8 h、24 h 时刻迅速取样, 取样后立即离心提取上清液, 过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜后用钼-锑-抗比色法测定上清液中溶解性磷酸盐的含量。同时采用连续提取法^[19-21]分析测定等温释放后沉积物中磷的形态分布。

岱海表层沉积物对磷的释放实验及释放后磷形态再分布实验同上。

2.2.2 硅的释放实验

在一系列 50 mL 离心管中分别加入乌梁素海表层沉积物样品 0.400 0 g, 于室温下加入硅含量为 $3.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 溶液, 于室温下振荡 24 h ($260 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$), 振荡后离心去除上清液, 再向每个离心管分别加入 20 mL 的超纯水后振荡, 分别于 0、10 min、20 min、30 min、40 min、1 h、2 h、6 h、12 h、24 h 时刻迅速取样, 取样后立即离心提取上清液, 过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜后用硅钼蓝比色法测定上清液中硅酸盐的含量。同时用 Tessier 连续提取法^[22]分析测定等温吸附后沉积物中硅的形态分布。

岱海表层沉积物对硅的释放实验及释放后硅形态再分布实验同上。

3 结果与讨论

3.1 磷的释放实验研究

3.1.1 磷的释放特征

释放实验结果表明, 磷在乌梁素海和岱海沉积物上的释放特征相似, 均可用 Elovich 方程描述其释放行为, 随释放时间增加, 上覆水中磷的浓度逐渐升高, 两者间的回归系数 R^2 分别为 0.872 9 和 0.810 4 (图 2)。磷在 2 个湖泊沉积物上的释放实验达到解吸/吸附平衡时的释放量相近, 释放量约为 $80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。与等温吸附实验结果相比较, 吸附后磷的再释放量约占其最大吸附量的 18.9%~22.9%。由图 2 可见, 磷的释放过程可分为 3 个阶段, 0~20 min 为快速释放阶段, 此时段内约有 75% 的吸附磷迅速从沉积物上解吸并释放至上覆水中, 释放速率可达 $183.495 \sim 188.791 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 或 $4.287 \sim 4.424 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$; 20 min~4 h 为

缓慢释放阶段, 此时段内约有 6%~18% 的吸附磷从沉积物释放至上覆水中, 0~4 h 内的累积释放量达 80%~95%, 释放速率约为 $3.364 \sim 3.541 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 或 $0.078 4 \sim 0.082 6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$; 4~24 h 为解吸/吸附平衡阶段, 此时段内释放基本达到平衡, 释放量变化不大。在饱和和吸附情况下, 两湖泊释放特征相似。说明湖泊沉积物对磷的释放能力除与其自身组成有关外, 也与其所吸附磷的含量有关。

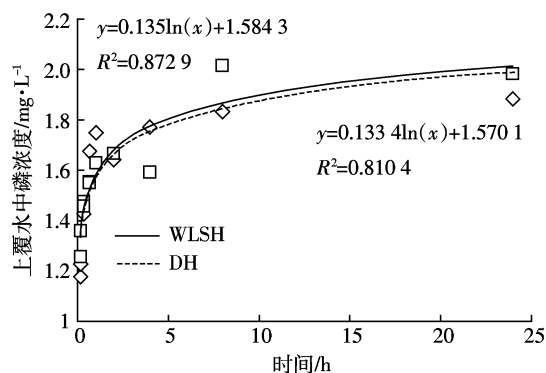


图 2 磷的释放实验

Figure 2 Release experiments of phosphorus

3.1.2 释放后磷的形态变化

实验结果显示(图 3), 饱和吸附后沉积物中 Ex-P、Al-P、Fe-P 和 Oc-P 的释放量 Q 与释放时间存在可表达的线性关系, 回归系数 R^2 在 0.57~0.68 间变动, A Ca-P、De-P 和 Or-P 的拟合效果不如前四态。Ex-P、Al-P、Fe-P 和 Oc-P 形态磷的释放可分 3 个阶段, 0~20 min 时段为快速释放阶段, 20 min~4 h 为缓慢释放阶段, 0~4 h 时段内的累积释放量达最大释放量的 90% 左右, 4~24 h 为解吸/吸附平衡阶段, 此时段内释放基本达到平衡, 释放量变化不大(图 3), 与释放实验结果相一致(图 2)。

岱海和乌梁素海沉积物中 Ex-P 的释放量 Q 与释放时间呈正的线性关系。值得注意的是, 岱海和乌梁素海沉积物中 Ex-P 释放在前 20 min 内的释放量约占其释放动力学平衡时最大释放量的 2.4 倍。释放平衡时两个湖泊沉积物中 Ex-P 的相对释放量分别在 70% 左右, 约占所释放的活性磷酸盐的 80% 和 85%(图 2 和图 3)。总体上, Ex-P 的释放量明显高于其他形态一个数量级, 揭示 Ex-P 对内源释磷的重要贡献, 其潜在释放风险最大。乌梁素海为黄河遗迹湖, 沉积物主要来源于河套地区土壤侵蚀以及黄河泥沙^[23], 与黄河沉积物具有继承性和相似性, 故乌梁素海沉积物的矿物组成及理化性质可参考黄河内蒙古

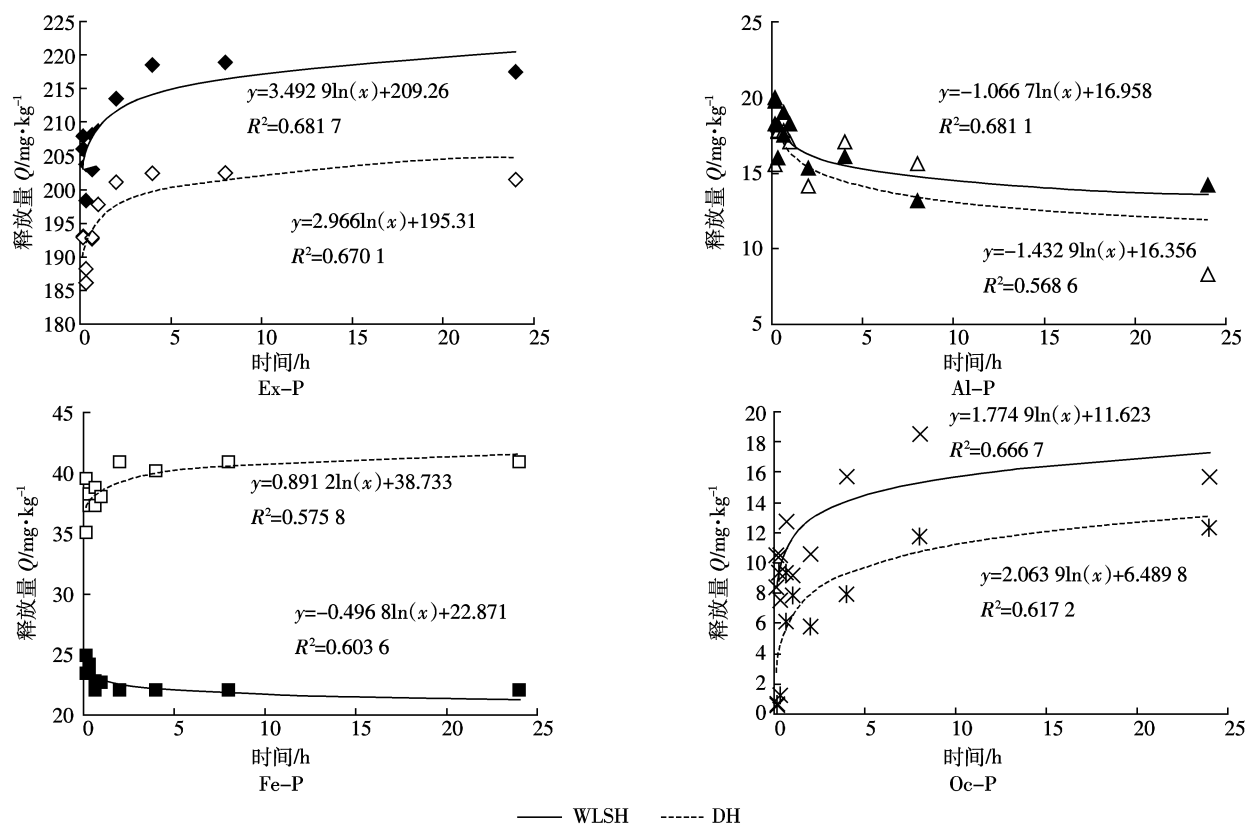


图3 释放后磷的形态变化

Figure 3 Forms variation of phosphorus after release

段沉积物。研究表明,黄河内蒙古段临河和乌拉特前旗沉积物中石英、钾长石、斜长石含量分别介于39.0%~44.6%、4.2%~5.1%和15.2%~17.4%^[7],而岱海现代沉积物中石英、钾长石、斜长石含量分别约为31.5%、37.1%和29.1%^[24]。释放过程中,乌梁素海沉积物中Ex-P释放量大于岱海,一方面可能与2个湖泊沉积物中碎屑矿物和自生矿物组成^[25]的差异性有关,另一方面可能与乌梁素海沉积物粒度较粗且砂质成分较高^[25],对磷的吸持作用有限,吸附磷易于释放有关。

2个湖泊沉积物中Al-P的释放量与释放时间则呈负的线性关系,其释放量在7~20 $mg \cdot kg^{-1}$ 范围变化(图3),可见在整个释放过程中,2个湖泊沉积物中Al-P的释放速率变化虽不大,但Al-P的平均相对释放量分别能达到63%和81%,而Fe-P平均相对释放量更高,可以分别达到90%和83%(图3)。这说明两个湖泊沉积物中的Al-P和Fe-P绝大部分释放到上覆水体中,主要是与结合Al-P、Fe-P和沉积物表面颗粒结合能力小、活性大、易于释放有关。值得注意的是,岱海沉积物Fe-P的释放量与释放时间成正的线性关系,而乌梁素海则正好相反,且平衡时前者释放

量约是后者的1.85倍,这可能与岱海沉积物Fe-P的背景值和饱和吸附后Fe-P含量高有关。

3.2 硅的释放实验研究

3.2.1 硅的释放特征

实验结果表明,Elovich方程能较好地描述2个湖泊沉积物对硅酸盐的释放动力学过程, R^2 均能达到0.900以上(图4)。沉积物释放过程可分为3个阶段,第一个阶段为快速释放阶段,在0~2 h,释放曲线的斜率最大,沉积物中约40%的硅在此阶段释放,此阶段硅的释放速率最高,乌梁素海和岱海的单位时间释放量分别为47.87 $mg \cdot L^{-1} \cdot h^{-1}$ 和11.88 $mg \cdot L^{-1} \cdot h^{-1}$ 。在吸附过程中由表面吸附与吸附点位结合的单硅酸在此过程中释放到水中;第二阶段为缓慢释放阶段,在2~6 h释放曲线斜率逐渐变小。2个湖泊单位释放量也减小,乌梁素海和岱海的单位时间释放量分别为14.08 $mg \cdot L^{-1} \cdot h^{-1}$ 和5.92 $mg \cdot L^{-1} \cdot h^{-1}$ 。在这一阶段与活性铁、活性铝以具有较强结合力的过氧桥结合的单硅酸在此阶段开始释放。随后湖泊沉积物进入吸附解吸平衡阶段,释放曲线平缓,吸附量改变处于波动状态。达到吸附/释放平衡时,乌梁素海沉积物中硅的总释放量约为岱海沉积物的3倍。释放曲线结果与在前期

吸附试验中 Langmuir 交叉型吸附等温方程中所得2个湖泊沉积物自身吸持硅含量差异明显相吻合,即在天然状态下,岱海沉积物表现为上覆水的硅源,乌梁素海表现为上覆水的硅汇。

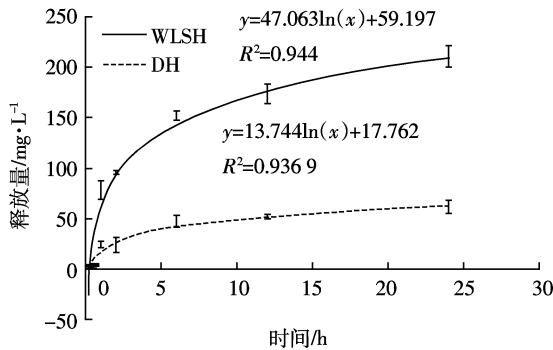


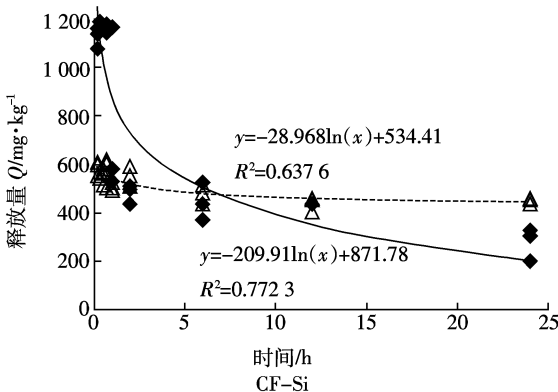
图4 硅的释放实验

Figure 4 Release experiments of silicate

3.2.2 释放后硅的形态变化

饱和吸附后,乌梁素海沉积物中 CF-Si、OSF-Si 的释放量及岱海沉积物中 CF-Si 的释放量与释放时间存在可具表达的线性关系,回归系数 R^2 在 0.66~0.77 间变动,而 IEF-Si 和 IMOF-Si 的拟合效果不如前 2 个形态(图 5)。从拟合图中可以看出,CF-Si 和 OSF-Si 形态硅的释放可分 3 个阶段,0~2 h 时段为快速释放阶段,2~6 h 为缓慢释放阶段,6~24 h 为解吸/吸附平衡阶段,此时段内释放基本达到平衡,释放量变化不大(图 4),与释放实验结果相一致(图 4)。

岱海和乌梁素海沉积物向上覆水体释放的 CF-Si 量随释放时间变化趋势有所不同,其中岱海沉积物释放量随释放时间的增加基本保持不变,而乌梁素海沉积物的 CF-Si 释放量随释放时间的增加而减小。2 个湖泊沉积物 OSF-Si 的释放量也呈现此种趋势,其中岱海沉积物释放的 OSF-Si 量在 440~600 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的



范围内变化,速率变化不大,而乌梁素海沉积物释放 OSF-Si 量随时间的增加也呈现出减小的趋势,但速率变化相对于岱海来说很大。0~2 h 时段内乌梁素海 OSF-Si 释放量是岱海沉积物的 2 倍左右,而释放达到平衡时,乌梁素海沉积物的 OSF-Si 释放量又低于岱海(图 5),这可能与乌梁素海沉积物 OSF-Si 背景值及释放前饱和吸附的 OSF-Si 量比较大有关。

4 结论

磷在 2 个湖泊沉积物上的释放行为均可用 Elovich 方程描述,0~20 min 为快速释放阶段,此时段内约有 75% 的吸附磷迅速从沉积物上解吸并释放至上覆水中,释放速率可达 183.495~188.791 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 或 4.287~4.424 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。总体上,Ex-P 的释放量明显高于其他形态一个数量级,揭示 Ex-P 对内源释磷的重要贡献,其潜在释放风险最大;2 个湖泊沉积物中 Al-P 和 Fe-P 的释放速率变化不大,但二者的平均相对释放量可达 60%~90%。

硅在 2 个湖泊沉积物上的释放行为均可用 Elovich 方程描述,0~2 h 为快速释放阶段,此阶段内约有 40% 的吸附硅从沉积物上解吸并释放至上覆水中,乌梁素海和岱海沉积物的单位时间释放量分别为 47.87 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 11.88 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。从不同形态的释放结果来看,IEF-Si 和 CF-Si 具有较强的释放潜力。

参考文献:

- [1] Wiese J, Wiese H, Schwartz J, et al. Osmotic stress and silicon act additively in enhancing pathogen resistance in barley against barley powdery mildew[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2005, 168(2): 269-274.
- [2] Liang Y, Wong J W C, Wei L. Silicon-mediated enhancement of cadmium tolerance in maize (*Zea mays* L.) grown in cadmium contaminated

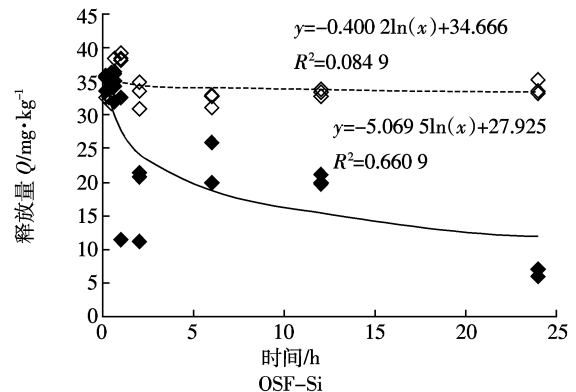


图5 释放后硅的形态变化

Figure 5 Forms variation of silicate after release

- soil[J]. *Chemosphere*, 2005, 58(4):475-483.
- [3] Qiu L P, Zhang X C, Cheng J M, et al. Isotherms and kinetics of Si adsorption in soils[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Plant Soil Science*, 2010, 60(2):157-165.
- [4] Rydin E, Malmaeus J M, Karlsson O M, et al. Phosphorus release from coastal Baltic Sea sediments as estimated from sediment profiles[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 92(1):111-117.
- [5] Andersson E, Sobek S, WANG Sheng. Comparison of a mass balance and an ecosystem model approach when evaluation the carbon cycling in a lake ecosystem [J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2006, 35(8):476-483.
- [6] Pan G, Krom M D, Herut B. Adsorption-desorption of phosphate on air-borne dust and riverborne particulates in East Mediterranean seawater [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(16):3519-3524.
- [7] 张宪伟, 潘纲, 王晓丽, 等. 内蒙古段黄河沉积物对磷的吸附特征研究[J]. *环境科学*, 2009, 30(1):172-177.
- ZHANG Xian-wei, PAN Gang, WANG Xiao-li, et al. Characteristics of phosphorus sorption on Yellow River sediments from Inner Mongolia Reach[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(1):172-177.
- [8] Zhou A, Tang H, Wang D. Phosphorus adsorption on natural sediments: Modeling and effects of pH and sediment composition[J]. *Water Research*, 2005, 39(7):1245-1254.
- [9] Qin Y C, Weng H X. Silicon release and its speciation distribution in the surficial sediments of the Pearl River Estuary, China [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2006, 67(3):433-440.
- [10] 吕昌伟, 何江, 梁英, 等. 岱海硅藻类浮游植物初级生产力 Si 限制初探[J]. *环境科学*, 2010, 31(3):639-644.
- LÜ Chang-wei, HE Jiang, LIANG Ying, et al. Examination of silicate limitation of primary production by diatoms phytoplankton in the Daihai Lake[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(3):639-644.
- [11] Wang S, Jin X, Zhao H, et al. Effects of organic matter on phosphorus release kinetics in different trophic lake sediments and application of transition state theory [J]. *Journal of Environmental Management*, 2008, 88(4):845-852.
- [12] 金丹越, 王圣瑞, 步青云. 长江中下游浅水湖泊沉积物磷释放动力学[J]. *生态环境*, 2007, 16(3):725-729.
- JIN Dan-yue, WANG Sheng-rui, BU Qing-yun. Phosphate release kinetics characteristics of the sediments from shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(3):725-729.
- [13] 徐铁群, 赵秀兰. 不同组成湖泊沉积物对磷吸附的动力学[J]. *扬州大学学报(自然科学版)*, 2008, 11(2):70-73.
- XU Yi-qun, ZHAO Xiu-lan. Adsorption kinetics of phosphorus in different lake sediments[J]. *Journal of Yangzhou University(Natural Science Edition)*, 2008, 11(2):70-73.
- [14] 晏维金, 亢宇, 章申, 等. 磷在土壤中的解吸动力学[J]. *中国环境科学*, 2000, 20(2):97-101.
- YAN Wei-jin, KANG Yu, ZHANG Shen, et al. The desorption kinetics of phosphorus from calcareous soil in China[J]. *China Environmental Science*, 2000, 20(2):97-101.
- [15] Palmer-Felgate E J, Bowes M J, Stratford C, et al. Phosphorus release from sediments in a treatment wetland: Contrast between DET and EPCO methodologies[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(6):826-832.
- [16] 孙惠民, 何江, 吕昌伟, 等. 乌梁素海氮污染及其空间分布格局[J]. *地理研究*, 2006, 25(6):1003-1012.
- SUN Hui-min, HE Jiang, LÜ Chang-wei, et al. Nitrogen pollution and spatial distribution pattern of Wuliangsu Lake[J]. *Geographical Research*, 2006, 25(6):1003-1012.
- [17] 周云凯, 姜加虎, 黄群, 等. 内蒙古岱海水体营养状况分析[J]. *干旱区地理*, 2006, 29(1):42-46.
- ZHOU Yun-kai, JIANG Jia-hu, HUANG Qun, et al. Analysis on the trophic status of the Daihai lake in Inner Mongolia[J]. *Arid Land Geography*, 2006, 29(1):42-46.
- [18] 陈伟民, 黄祥飞, 周万平. 湖泊生态系统观测方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.
- CHEN Wei-min, HUANG Xiang-fei, ZHOU Wan-ping. Observation methods of lakes ecosystem [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2005.
- [19] 李悦, 乌大年, 薛永先. 沉积物中不同形态磷提取方法的改进及其环境地球化学意义[J]. *海洋环境科学*, 1998, 17(1):15-20.
- LI Yue, WU Da-nian, XUE Yong-xian. A development sequential extraction method for different forms of phosphorus in the sediments and its environmental geochemical significance[J]. *Marine Environmental Science*, 1998, 17(1):15-20.
- [20] 朱广伟, 秦伯强, 高光, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物中磷的形态及其与水相磷的关系[J]. *环境科学学报*, 2004, 24(3):381-388.
- ZHU Guang-wei, QIN Bo-qiang, GAO Guang, et al. Fractionation of phosphorus in sediments and its relation with soluble phosphorus contents in shallow lakes located in the middle and lower reaches of Changjiang River, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(3):381-388.
- [21] Ruttenberg K C. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments [J]. *Limnology and Oceanography*, 1992, 37(7):1460-1482.
- [22] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. *Analytical Chemistry*, 1979, 51(7):844-851.
- [23] 马龙, 吴敬禄. 内蒙古乌梁素海湖泊沉积物元素地球化学特征及其影响因素[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(3):119-125.
- MA Long, WU Jing-lu. Element geochemical characteristic of lake sediments and its influence factors in Wuliangsu Lake, Inner Mongolia[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(3):119-125.
- [24] 王苏民, 余源盛, 吴瑞金, 等. 岱海: 湖泊环境与气候变化[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1990.
- [25] 吕昌伟. 内蒙古高原湖泊碳(氮, 磷, 硅)的地球化学特征[D]. 内蒙古大学, 2008.
- LÜ Chang-wei. Geochemistry character of carbon (nitrogen, phosphorus, silicon) in lakes in West Inner Mongolia Plateau[D]. Inner Mongolia University, 2008.