

郑琦, 李磊, 吕昌伟, 等. 沉积物中硅释放的影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4): 745–749.

ZHENG Qi, LI Lei, LÜ Chang-wei, et al. Factors influencing silicon releases from lake sediments[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(4): 745–749.

## 沉积物中硅释放的影响因素研究

郑琦<sup>1</sup>, 李磊<sup>1</sup>, 吕昌伟<sup>1,2\*</sup>, 王伟颖<sup>1</sup>, 何江<sup>1,2</sup>, 左乐<sup>1</sup>, 颜道浩<sup>1</sup>

(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)

**摘要:**为揭示沉积物中硅的迁移转化机制及其生物地球化学循环规律, 给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, 以乌梁素海为研究对象, 深入探讨了 pH、微生物和低分子量有机酸等环境因子对沉积物中 Si 释放的影响机制。结果表明, 随着 pH 的升高(7.0~9.5), 乌梁素海上覆水中 Si 浓度降低, 沉积物中生源硅(BSi)含量升高, 显示乌梁素海的偏碱性环境使硅在水-沉积物界面的扩散矢量方向指向沉积物。方差分析表明, 有微生物体系和无微生物体系之间上覆水 Si 浓度具有显著差异, 可能与微生物的捕食作用和降解作用有关。菖蒲区上覆水中 Si 浓度整体高于对应季节芦苇区上覆水, 而菖蒲区沉积物中 BSi 含量低于对应季节芦苇区沉积物, 主要是由于芦苇和菖蒲根分泌的低分子量有机酸不同, 进而对硅酸盐矿物的溶解能力存在差异导致的。沉水植物区沉积物冬春季和夏秋季整体表现为上覆水的硅汇, 上覆水共向沉积物中转移约 15.62 t Si; 挺水植物区沉积物冬春季和夏秋季整体表现为上覆水的硅源, 沉积物共向上覆水中释放约 33.15 t Si。

**关键词:**硅; 释放; 影响因素; 沉积物; 湖泊

中图分类号: X52 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2016)04-0745-05 doi:10.11654/jaes.2016.04.019

### Factors influencing silicon releases from lake sediments

ZHENG Qi<sup>1</sup>, LI Lei<sup>1</sup>, LÜ Chang-wei<sup>1,2\*</sup>, WANG Wei-ying<sup>1</sup>, HE Jiang<sup>1,2</sup>, ZUO Le<sup>1</sup>, YAN Dao-hao<sup>1</sup>

(1.College of Environment and Resources, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China; 2.Institute of Environmental Geology, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China)

**Abstract:** Diatoms greatly control the water's capacity to store CO<sub>2</sub>. Silicon(Si) level in water impacts diatom growth. In this work, the influences of pH, microorganism and low molecular weight organic acids on silicon releases from the sediments of Wuliangsuhe(WLSH) Lake were investigated under simulating experiments. Results showed that concentrations of Si in overlying water decreased along with pH increases(7.0~9.5), while the content of BSi in sediments increased. This indicated that the diffusion direction of Si released was towards the sediments at the water-sediment interface under weak-alkaline environment. Silicon concentrations were higher in microorganism system than in non-microorganism system in both overlying water and sediments. The differences in Si concentrations in both overlying water and sediments among different hydrophyte areas were resulted from the differences of low molecular weight organic acids excreted by hydrophytes. Sediments from both submerged and emergent plant areas acted as Si sink and source, depositing and releasing 15.62 t and 33.15 t Si in the whole year, respectively. This work would advance the understanding of the transformation, migration and biogeochemical cycle of Si in lake sediments as well as protection of terrestrial aquatic environment.

**Keywords:** silicon; release; factors; sediment; lake

收稿日期: 2015-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41003049); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2015MS0404)

作者简介: 郑琦(1993—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境地球化学。E-mail: 15248114107@163.com

\* 通信作者: 吕昌伟 E-mail: lcw2008@imu.edu.cn

硅是最常见的元素之一,在地壳中含量排名第二,但其很少以单质的形式出现在自然界。在水体中,硅是硅藻、硅鞭藻和放射虫等浮游植物有机体的重要构造组成,是聚集在沿海和深海沉积物中海洋生物起源物质的重要组成部分<sup>[1]</sup>。海洋中硅藻约生产了  $240 \text{ Tmol} \cdot \text{a}^{-1}$  的生源硅,约贡献了 45% 的海洋生产力,硅藻生长是控制海洋  $\text{CO}_2$  储蓄能力的重要过程<sup>[2]</sup>。

湖泊是高效的生物地球化学反应器<sup>[3-4]</sup>,研究湖泊中硅的生物地球化学循环具有重要意义。本文探讨了乌梁素海夏秋季和冬春季 pH、微生物和低分子量有机酸对乌梁素海硅释放的影响,揭示了乌梁素海不同季节沉水植物区和挺水植物区沉积物硅的源/汇功能,进一步阐明了湖泊中硅的迁移转化机制,以期为乌梁素海的合理开发和保护利用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

乌梁素海( $40^{\circ}47' \sim 41^{\circ}03' \text{N}$ ,  $108^{\circ}43' \sim 108^{\circ}57' \text{E}$ )位于内蒙古巴彦淖尔市乌拉特前旗境内,河套平原的东端,是黄河流域最大的淡水湖之一,是中国的八大淡水湖之一,也是全球范围内荒漠半荒漠地区极为少见的具有多种生态功能与效益的大型浅水草型湖泊。现有水域面积  $333.48 \text{ km}^2$ ,湖面程高  $1\,018.5 \text{ m}$ ,库容量  $(2.5 \sim 3) \times 10^8 \text{ m}^3$ ,80% 水域水深  $0.8 \sim 1.0 \text{ m}$ <sup>[5]</sup>。农田退水是该湖最主要的补给水源,蒸发和排入黄河为其主要支出途径。近年来水体富营养化进程加剧,以芦苇、菖蒲为优势种的挺水植物和以龙须眼子菜、穗花狐尾藻为优势种的沉水植物生长繁茂,遍布全湖<sup>[6]</sup>。目前腐烂水草以每年  $9 \sim 13 \text{ mm}$  的速度在湖底堆积,成为世界上沼泽化速度最快的湖泊之一<sup>[7]</sup>。

### 1.2 研究方法与实验材料

#### 1.2.1 样品采集

2013 年 8 月对乌梁素海进行了系统的现场监测及样品采集(用荷兰 Eijkelpamp 公司产 SA Beeker 型沉积物原状采样器采集沉积物样品)。

释放实验样品:在乌梁素海南部、中部和北部沉水植物区分别采集表层沉积物。同时,于同一站位采集用于硅释放实验的上覆水样,回到实验室后即刻使用中性的滤纸进行过滤处理,水样过滤后于  $4^{\circ}\text{C}$  下避光保存。

#### 1.2.2 实验与分析方法

释放实验按照《湖泊富营养化调查规范》进行,根据不同季节乌梁素海的实际情况,通过控制温度、光照及溶解氧条件分别模拟夏秋季节及冬春季节乌梁

素海硅的释放过程(表 1)。氧化还原条件通过通入氧气及氮气来控制。将采集的表层沉积物充分混匀,称取  $(50.00 \pm 0.10) \text{ g}$  (湿重)沉积物平铺于  $500 \text{ mL}$  培养瓶底部,缓慢加入  $400 \text{ mL}$  过滤后的湖水进行培养,并记录液面位置,分别于第 0、10、20、40、60、90、120、150、180 d 取出上覆水和沉积物样品进行分析测试。

表 1 释放实验控制因子

Table 1 Influencing factors studied in release experiments

| 项目   | 温度/ $^{\circ}\text{C}$ | 光照 |    | 氧化还原条件       |
|------|------------------------|----|----|--------------|
|      |                        | 白天 | 夜晚 |              |
| 夏秋季节 | 25                     | 有  | 无  | $\text{O}_2$ |
| 冬春季节 | 4                      | 有  | 无  | $\text{N}_2$ |

(1)pH 值对营养盐释放的影响实验:释放实验模拟乌梁素海的真实环境(pH8.0),将 pH 控制在中性条件(pH7.0)、偏碱性(pH8.0)和碱性条件(pH9.5),分别在好氧和厌氧条件下培养。

(2)微生物对营养盐释放的影响实验:释放实验设置有微生物组和无微生物组,分别在好氧和厌氧条件下培养。有微生物组通过添加葡萄糖作为微生物的营养源,促进微生物的生长繁殖;无微生物组通过添加福尔马林使体系内无微生物。

(3)低分子量有机酸对营养盐释放的影响实验:乌梁素海中挺水植物以芦苇和菖蒲为优势种,因其根系分泌不同低分子量有机酸,故通过添加不同低分子量有机酸模拟培养样品处于不同挺水植物生长区开展硅的释放实验,分别在好氧和厌氧条件下培养。菖蒲区根系会分泌柠檬酸和草酸,芦苇区的根系会分泌柠檬酸而不会分泌草酸<sup>[9-11]</sup>,因此以柠檬酸为基本酸,以草酸为菖蒲区的特征酸进行添加,有机酸的添加浓度均为  $50 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$ 。芦苇区仅添加基本酸作为影响因子,菖蒲区添加基本酸及特征酸作为影响因子。

上覆水中的可溶性总磷酸盐和可溶性正磷酸盐采用钼锑抗分光光度法测定,硅酸盐采用硅钼蓝分光光度法测定。

沉积物中生源硅(BSi)的提取方法:准确称取  $0.200 \text{ g}$  沉积物样品,盛于  $50 \text{ mL}$  聚乙烯离心管中,先加入  $5 \text{ mL}$   $10\% \text{ H}_2\text{O}_2$ ,30 min 后加入  $5 \text{ mL}$   $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HCl}$ ,摇匀并静置 30 min,再加入  $20 \text{ mL}$  超纯水,离心( $4500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ )10 min,弃去上清液,60  $^{\circ}\text{C}$  干燥一夜;加入  $40 \text{ mL}$   $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  溶液摇匀,放入  $85^{\circ}\text{C}$  水浴恒温箱保温 5 h<sup>[8]</sup>,离心取  $1 \text{ mL}$  上清液,用硅钼蓝比

色法测定提取液中的硅酸盐含量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 pH 对硅释放的影响

pH 对乌梁素海上覆水中硅浓度的影响见图 1。上覆水中 Si 的初始浓度为  $2.09 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ , 无论中性条件(pH7.0)、偏碱性条件(pH8.0)或碱性条件(pH9.5), 上覆水中 Si 浓度大体都呈现先上升后下降的趋势, 稳定后 Si 浓度都低于初始浓度。较为明显的是, 在实验 pH 范围内(7.0~9.5), pH 越高, Si 浓度越低。对不同 pH 体系 Si 浓度进行方差分析, 结果显示 pH7.0、pH8.0 和 pH9.5 条件下, 上覆水 Si 浓度具有显著差异 ( $P<0.05$ )。这可能与碱性条件下氧化物对 Si 的吸附有关。有研究表明土壤 pH 为 4~10 之间时, 氧化物对 Si 的吸附随 pH 的升高而升高, 具体数据见表 2。

pH 对乌梁素海沉积物中硅含量的影响见图 2 和表 2。沉积物中 BSi 的初始含量为  $1.77 \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , 无论酸性、偏碱性或碱性条件, 沉积物中 BSi 含量大体都呈现先上升后波动变化, 趋于稳定后 BSi 含量都低于初始浓度。90~180 d 内 pH9.5 条件下沉积物中 BSi 含量比 pH7.0 和 pH8.0 体系 BSi 含量高, 对 pH7.0 和 pH8.0 体系的 BSi 含量数据( $n=7$ )与 pH9.5 体系 BSi 含量数据( $n=4$ )进行方差分析, 结果显示两组数据沉积物 BSi 含量有显著差异 ( $P<0.05$ )。这与上覆水在 pH9.5 条件下水中 Si 浓度最低的结果相对应。由此可见, 在实验 pH 范围内(7.0~9.5), pH 越高越有利于上覆水中的硅向沉积物转移。

### 2.2 微生物对硅释放的影响

图 3 及表 3 分别列出了微生物对沉积物和上覆水中硅浓度的影响。从总体上看, 无论夏秋季还是冬春季, 就沉积物中 BSi 含量而言, 有微生物的体系略

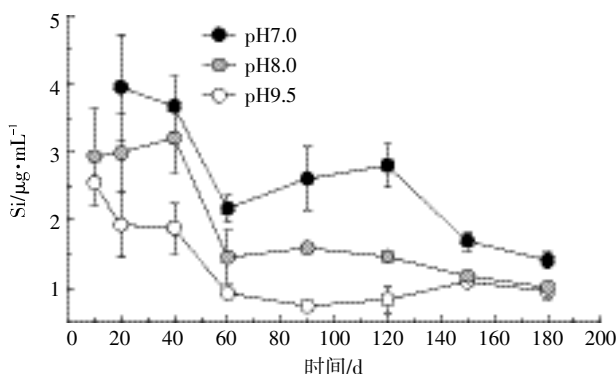


图 1 pH 对乌梁素海上覆水中硅浓度的影响

Figure 1 pH effect on silicon concentrations in overlying water of WLSH Lake

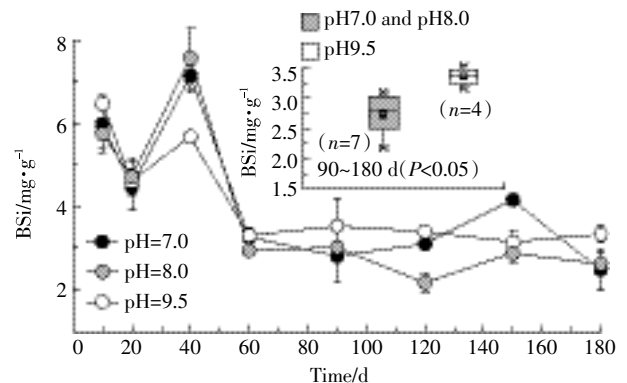


图 2 pH 对乌梁素海沉积物中硅含量的影响

Figure 2 pH effect on silicon content in sediments of WLSH Lake

表 2 不同 pH 下乌梁素海上覆水中的硅浓度和沉积物中的硅含量

Table 2 pH effect on silicon concentrations in overlying water and sediments

| 时间/d | 上覆水/ $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ |      |       | 沉积物/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ |      |       |
|------|---------------------------------------|------|-------|------------------------------------|------|-------|
|      | pH7                                   | pH8  | pH9.5 | pH7                                | pH8  | pH9.5 |
| 10   | —                                     | 2.93 | 2.54  | 5.98                               | 5.74 | 6.47  |
| 20   | 3.95                                  | 2.98 | 1.93  | 4.48                               | 4.71 | 4.60  |
| 40   | 3.67                                  | 3.20 | 1.88  | 7.13                               | 7.56 | 5.67  |
| 60   | 2.17                                  | 1.45 | 0.92  | 3.26                               | 2.95 | 3.31  |
| 90   | 2.60                                  | 1.58 | 0.74  | 2.81                               | 3.02 | 3.53  |
| 120  | 2.80                                  | 1.46 | 0.83  | 3.10                               | 2.17 | 3.40  |
| 150  | 1.69                                  | 1.17 | 1.09  | 4.16                               | 2.88 | 3.15  |
| 180  | 1.41                                  | 1.01 | 0.95  | 2.48                               | 2.62 | 3.34  |

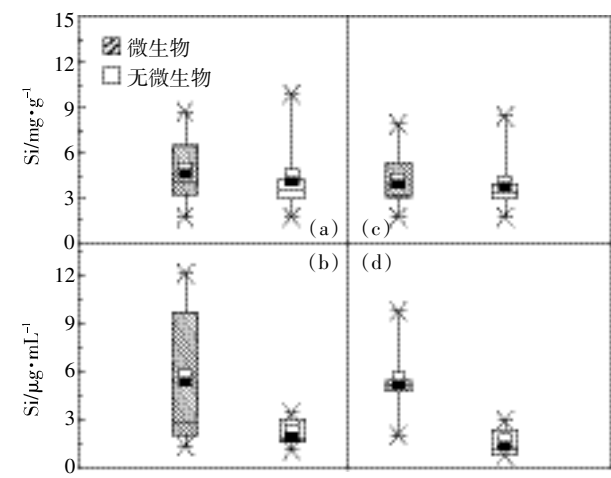
高于无微生物的体系; 就上覆水中 Si 浓度而言, 有微生物的体系明显高于无微生物的体系。对不同体系硅浓度进行方差分析, 结果显示无论夏秋季还是冬春季, 有微生物体系和无微生物体系之间上覆水 Si 浓度具有显著差异 ( $P<0.05$ )。这可能与微生物的捕食作用<sup>[11]</sup>和降解作用<sup>[12]</sup>有关。在有微生物的体系中, 就沉积物而言, 夏秋季比冬春季 BSi 含量高, 就上覆水而言, 夏秋季和冬春季 Si 浓度相近; 在无微生物的体系中, 夏秋季沉积物 BSi 含量和上覆水 Si 浓度都比冬春季对应值略高。夏秋季和冬春季 Si 浓度的差异可能是季节性环境条件综合作用的结果, 季节性的因素<sup>[13-17]</sup>如温度、光照和水动力条件等都会影响 BSi 的溶解速率。有研究表明<sup>[14-15]</sup>, BSi 溶解度随海水温度上升而上升。另外, 沉积物中 BSi 含量和上覆水中 Si 浓度的季节性差异可能与乌梁素海藻类的季节性差异有关。有研究发现乌梁素海冬季以硅藻为优势类群, 春季以绿藻、硅藻为优势类群, 夏季以绿藻和蓝藻为优势类群, 秋季以蓝藻为优势藻门, 其次为硅藻门, 因此藻类的

季节性差异可能影响沉积物中 BSi 含量和上覆水中 Si 浓度的季节性变化。

2.3 低分子量有机酸对硅释放的影响

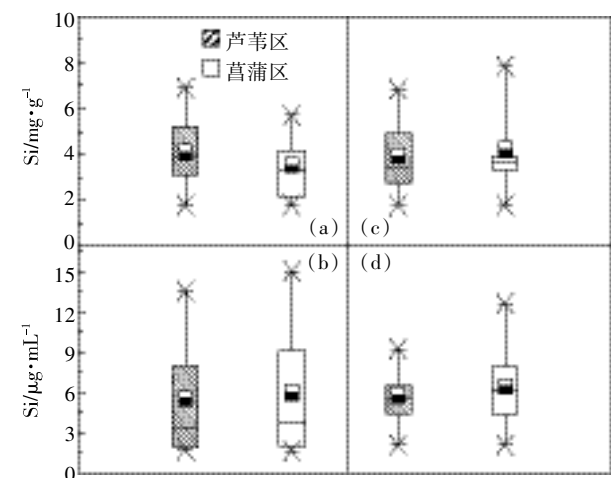
图 4 及表 4 分别列出了低分子量有机酸对沉积物和上覆水中硅浓度的影响。在 180 d 的培养周期内, 芦苇区夏秋季和冬春季上覆水中 Si 浓度和沉积物中 BSi 含量差异不大, 而菖蒲区冬春季上覆水中 Si 浓度和沉积物中 BSi 含量都比夏秋季略高。具体而言, 夏秋季和冬春季上覆水中 Si 的浓度是菖蒲区近

似于或高于芦苇区, 夏秋季和冬春季沉积物中 BSi 含量是菖蒲区近似于或低于芦苇区。有机酸溶解硅酸盐矿物主要是通过酸溶作用和络合作用两种方式<sup>[18]</sup>, 芦苇和菖蒲根基分泌的低分子量有机酸不同<sup>[9-11]</sup>, 所产生的 H<sup>+</sup>和有机配体数量不同, 有机配体对金属离子的螯合能力也不同<sup>[19-20]</sup>, 因此对硅酸盐矿物的溶解能力存在差异。草酸是菖蒲区分泌的特征酸<sup>[10,21]</sup>, 孔明明等<sup>[22]</sup>研究草酸和柠檬酸对硅酸盐矿物的溶解性发现, 草酸作用强于柠檬酸, 胡华峰<sup>[23]</sup>也在其研究中指出草



图(a)、(b)为 O<sub>2</sub> 体系(pH=8.0, DO=5.0 mg·L<sup>-1</sup>);图(c)、(d)为 N<sub>2</sub> 体系(pH=8.0, DO=2.0 mg·L<sup>-1</sup>);(a)和(c):沉积物, (b)和(d):上覆水

图 3 微生物对乌梁素海硅释放的影响  
Figure 3 Microorganism effect on silicon releases



图(a)、(b)为 O<sub>2</sub> 体系,图(c)、(d)为 N<sub>2</sub> 体系;(a)和(c):沉积物, (b)和(d):上覆水

图 4 低分子量有机酸对乌梁素海硅释放的影响  
Figure 4 Effects of low molecular weight organic acids on silicon releases

表 3 有无微生物体系下上覆水与沉积物中的硅含量

Table 3 Microorganism effect on silicon concentrations in overlying water and sediments

| 项目         | O <sub>2</sub> 体系       |           |                        |           | N <sub>2</sub> 体系       |           |                        |           |
|------------|-------------------------|-----------|------------------------|-----------|-------------------------|-----------|------------------------|-----------|
|            | 上覆水/μg·mL <sup>-1</sup> |           | 沉积物/mg·g <sup>-1</sup> |           | 上覆水/μg·mL <sup>-1</sup> |           | 沉积物/mg·g <sup>-1</sup> |           |
|            | 有                       | 无         | 有                      | 无         | 有                       | 无         | 有                      | 无         |
| Average±SD | 5.64±4.22               | 2.23±0.83 | 4.86±2.41              | 4.37±2.50 | 5.48±2.15               | 1.67±0.88 | 4.15±2.00              | 3.99±2.05 |
| Max.       | 12.10                   | 3.46      | 8.70                   | 9.88      | 9.76                    | 3.01      | 7.90                   | 8.41      |
| Min.       | 1.40                    | 1.18      | 1.77                   | 1.77      | 2.09                    | 0.85      | 1.77                   | 1.77      |

表 4 低分子量有机酸体系下上覆水与沉积物中的硅含量

Table 4 Effects of low molecular weight organic acids on silicon concentrations in overlying water and sediments

| 项目         | O <sub>2</sub> 体系       |           |                        |           | N <sub>2</sub> 体系       |           |                        |           |
|------------|-------------------------|-----------|------------------------|-----------|-------------------------|-----------|------------------------|-----------|
|            | 上覆水/μg·mL <sup>-1</sup> |           | 沉积物/mg·g <sup>-1</sup> |           | 上覆水/μg·mL <sup>-1</sup> |           | 沉积物/mg·g <sup>-1</sup> |           |
|            | 芦苇区                     | 菖蒲区       | 芦苇区                    | 菖蒲区       | 芦苇区                     | 菖蒲区       | 芦苇区                    | 菖蒲区       |
| Average±SD | 5.57±4.91               | 5.98±5.31 | 4.08±1.58              | 3.52±1.46 | 5.83±2.29               | 6.46±3.22 | 3.93±1.78              | 4.19±1.97 |
| Max.       | 13.55                   | 15.00     | 6.93                   | 5.72      | 9.25                    | 12.63     | 6.83                   | 7.87      |
| Min.       | 1.76                    | 1.62      | 1.77                   | 1.77      | 2.09                    | 2.09      | 1.77                   | 1.77      |

酸对于高岭石的溶解能力强于柠檬酸。可能是基于上述原因,菖蒲区上覆水中 Si 浓度整体高于对应季节芦苇区上覆水中 Si 浓度,而菖蒲区沉积物中 BSi 含量低于对应季节芦苇区沉积物中 BSi 含量。

### 3 结论

乌梁素海真实环境中,随着 pH 的升高(7.0~9.5),上覆水中 Si 浓度降低,沉积物中 BSi 含量升高,表明湖水本身(pH=8.0)有利于上覆水中硅的沉积而不利沉积物中硅的释放;有微生物体系 Si 浓度和 BSi 的含量都高于无微生物体系,且有微生物体系 Si 浓度和 BSi 的含量有季节性差异,表明微生物和硅质生物影响着硅循环的进程;草酸+柠檬酸体系(菖蒲区)对于硅酸盐矿物的溶解作用强于单柠檬酸体系(芦苇区),使得菖蒲区上覆水中 Si 浓度高于芦苇区,而沉积物中 BSi 含量低于芦苇区。

### 参考文献:

- [1] Tréguer P J, DeMaster D J, Leynaert A, et al. The silica balance in the world ocean: A reestimate[J]. *Science*, 1995, 268(5209): 375-379.
- [2] Opfergelt S, Eiriksdottir E, Burton K, et al. Quantifying the impact of freshwater diatom productivity on silicon isotopes and silicon fluxes: Lake Myvatn, Iceland[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 305(1): 73-82.
- [3] Benoy G, Cash K, McCauley E, et al. Carbon dynamics in lakes of the boreal forest under a changing climate[J]. *Environmental Reviews*, 2007, 15(1): 175-189.
- [4] Tranvik L J, Downing J A, Cotner J B, et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate[J]. *Limnology and Oceanography*, 2009, 54(6): 2298-2314.
- [5] 吕昌伟. 内蒙古高原湖泊碳(氮、磷、硅)的地球化学特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2008.  
LÜ Chang-wei. Inner Mongolia plateau lakes carbon(nitrogen, phosphorus, silicon) geochemical characteristics[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2008.
- [6] 吕昌伟, 何江, 梁英. 乌梁素海和岱海上覆水中碳的形态分布及其制约机制[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(2): 330-338.  
LÜ Chang-wei, HE Jiang, LIANG Ying. Wuliangsuhai and overlying water on carbon distribution and control mechanism Daihai morphology[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(2): 330-338.
- [7] 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. Wuliangsuhai nitrogen pollution and its spatial distribution pattern[J]. *Geographical Research*, 2006, 25(6): 1003-1012.
- [8] Mortlock R A, Froelich P N. A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments[J]. *Deep Sea Research Part A Oceanographic Research Papers*, 1989, 36(9): 1415-1426.
- [9] Rudrappa T, Bonsall J, Gallagher J L, et al. Root-secreted allelochemical in the noxious weed *Phragmites australis* deploys a reactive oxygen species response and microtubule assembly disruption to execute rhizotoxicity[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2007, 33(10): 1898-1918.
- [10] 王爱丽. 酞酸酯在湿地植物根际环境中的消减行为[D]. 天津: 天津大学, 2011.  
WANG Ai-li. phthalates reduction behavior in wetland rhizosphere environment[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [11] Jacobson D M, Anderson D M. The ciliate heterotrophic dinoflagellates: Feeding behavior and mechanisms[J]. *Journal of Phycology*, 1986, 22(3): 249-258.
- [12] Bidle K D, Azam F. Accelerated dissolution of diatom silica by marine bacterial assemblages[J]. *Nature*, 1999, 397(6719): 508-512.
- [13] 秦亚超. 珠江口沉积硅的生物地球化学研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.  
QIN Ya-chao. Biogeochemical silicon in sediment study[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [14] Hurd D C. Factors affecting solution rate of biogenic opal in seawater[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1972, 15(4): 411-417.
- [15] Kamatani A. Dissolution rates of silica from diatoms decomposing at various temperatures[J]. *Marine Biology*, 1982, 68(1): 91-96.
- [16] Hurd D, Theyer F. Changes in the physical and chemical properties of biogenic silica from the central equatorial Pacific; Part II: Refractive index, density, and water content of acid-cleaned samples[J]. *American Journal of Science*, 1977, 277(9): 1168-1202.
- [17] Hurd D C, Pankratz H S, Asper V, et al. Changes in the physical and chemical properties of biogenic silica from the central equatorial Pacific; Part III: Specific pore volume, mean pore size, and skeletal ultra-structure of acid-cleaned samples[J]. *American Journal of Science*, 1981, 281(7): 833-895.
- [18] Jones D, Dennis P, Owen A, et al. Organic acid behavior in soils-misconceptions and knowledge gaps[J]. *Plant and Soil*, 2003, 248(1/2): 31-41.
- [19] Song S, Huang P. Dynamics of potassium release from potassium-bearing minerals as influenced by oxalic and citric acids[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52(2): 383-390.
- [20] Cama J, Ganor J. The effects of organic acids on the dissolution of silicate minerals: A case study of oxalate catalysis of kaolinite dissolution[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(9): 2191-2209.
- [21] Wu F Y, Chung A K C, Tam N F Y, et al. Root exudates of wetland plants influenced by nutrient status and types of plant cultivation[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2012, 14(6): 543-553.
- [22] 孔明明, 郑世学, 黄丽, 等. 低分子量有机酸培养下几种层状硅酸盐矿物的变化[J]. 土壤, 2013, 45(2): 285-290.  
KONG Ming-ming, ZHENG Shi-xue, HUANG Li, et al. Cultivation of low molecular weight organic acids a layered silicate mineral changes[J]. *Soils*, 2013, 45(2): 285-290.
- [23] 胡华锋. 低分子量有机酸对高岭石溶解作用的研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2004.  
HU Hua-feng. Low molecular weight organic acids on the dissolution of kaolinite[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2004.