

湖泊水-沉积物界面 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 交换通量研究颜道浩¹, 吕昌伟^{1,2*}, 何江^{1,2}, 王伟颖¹, 左乐¹, 李磊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)

摘要:以乌梁素海(WLSH)和岱海(DH)为研究对象,采用柱状芯样模拟法,开展了湖泊水-沉积物界面溶解性硅酸盐($\text{SiO}_3\text{-Si}$)扩散通量研究。结果表明,在夏季 90 d 的时间内,浅水草型湖泊乌梁素海明水区沉积物-水界面交换速率约为 $1.28 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,沉积物约向上覆水体释放了 963.07 t $\text{SiO}_3\text{-Si}$;而深水藻型湖泊岱海深、浅湖区沉积物-水界面交换速率分别为 1.10 、 $1.95 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,沉积物约向上覆水体释放了 893.41 t $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 。 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 在水-沉积物界面的交换速率与两湖沉积物中粘土矿物含量、生物硅(BSi)含量及沉积物的粒度有较好的相关性。沉积物释放的 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 对维持湖泊初级生产力有重要作用,乌梁素海沉积物释放的硅可提供浮游植物所需硅的 11.96%,岱海沉积物释放的硅可提供浮游植物所需硅的 41.3%。从元素化学计量学角度考虑,结合两个湖泊上覆水营养盐浓度变化,随湖泊富营养化水平的逐渐提高,磷有可能成为乌梁素海初级生产力的潜在限制因子,而 Si 是岱海初级生产力可能的限制因子。

关键词:硅;扩散通量;释放速率;水-沉积物界面;湖泊

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)12-2349-08 doi:10.11654/jaes.2015.12.014

Exchange Fluxes of $\text{SiO}_3\text{-Si}$ Across Water-Sediment Interface in Different LakesYAN Dao-hao¹, LÜ Chang-wei^{1,2*}, HE Jiang^{1,2}, WANG Wei-ying¹, ZUO Le¹, LI Lei¹

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

Abstract: Silicon (Si) flux greatly influences Si concentrations and primary productivity of aquatic ecosystems. An investigation was conducted to examine the release characteristics and fluxes of $\text{SiO}_3\text{-Si}$ across the water-sediment interface in Lake Wuliangsu (WLSH) and Daihai (DH) by employing columnar simulation method. During the summer of 90 days, the exchange rate of $\text{SiO}_3\text{-Si}$ at the water-sediment interface was about $1.28 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, with 963.07 t of $\text{SiO}_3\text{-Si}$ released into lake water in WLSH, while it was about $1.10 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ and $1.95 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ in the deep and shoal water zones, respectively, with 893.41 t of $\text{SiO}_3\text{-Si}$ entered in Lake DH. This indicated that the sediments in WLSH and DH functioned as source of $\text{SiO}_3\text{-Si}$ in the summer. The exchange rate of $\text{SiO}_3\text{-Si}$ at sediments-water interface was correlated with clay and biogenic silica (BSi) content and particle size of the sediments. Silicon released from sediments played an important role in maintaining lake primary productivity, providing 15% and 49.5% of $\text{SiO}_3\text{-Si}$ required by phytoplankton in WLSH and DH, respectively. The stoichiometry results showed that phosphorus and $\text{SiO}_3\text{-Si}$ would be the limiting nutrients for the primary productivity of phytoplankton in WLSH and DH, respectively.

Keywords: $\text{SiO}_3\text{-Si}$; diffusion flux; release rate; sediment-water interface; lake

硅是重要的生源要素,对水体初级生产力有重要贡献。硅藻构成了全球海洋初级生产力的 40%以上,

在河口近岸以及高营养盐水域,甚至达到 75%^[1],进而影响全球碳循环及气候变化。研究表明,东海和黄海沉积物的释放可分别贡献上覆水中 86%和 90%的 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ ^[2],南大西洋东部沉积物^[3]释放的 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 是陆源输入量的 4 倍,波士顿港^[4]沉积物的释硅量相当于硅藻等浮游植物需求量的 60%,地中海 Lions 湾^[5]沉积物溶解态硅的释放速率接近 $165 \text{ kt}\cdot\text{a}^{-1}$,可提供初

收稿日期:2015-06-21

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(2015MS0404,2009BS0601)

作者简介:颜道浩(1989—),男,硕士研究生,研究方向为环境地球化学。E-mail:975185786@qq.com

*通信作者:吕昌伟 E-mail:lchw2008@imu.edu.cn

级生产力需求量的 28%。因此,硅在水-沉积物界面的界面行为与过程影响着上覆水中生物可利用硅的含量水平及初级生产力。

目前,水-沉积物界面交换通量模拟研究方法主要包括质量衡算法^[6]、孔隙水扩散模型法^[7]、表层底泥模拟法^[8]、柱状芯样模拟法^[9]及水下原位模拟法^[10]等,由于柱状芯样模拟法能基本保持沉积物性状,并可控制实验条件(pH、光照、扰动等),实验结果接近实际情况,且操作简单、费用低,得到了广泛应用。有关水-沉积物界面硅的交换通量方面的研究多集中于大洋、海湾和河口湿地,而对具有重要生态环境功能的湖泊生态系统而言,则缺乏相关的基础数据和资料的积累。本文以乌梁素海(WLSH)和岱海(DH)为研究对象,采用柱状芯样模拟法,实验模拟了 2 个湖泊水-沉积物界面硅的界面行为与过程,初步估算了沉积物对 SiO₃-Si 的释放量及其对湖泊初级生产力的贡献,对丰富湖泊生态系统中硅的界面行为与过程等基础理论,阐释湖泊水体富营养化机制及生态系统保护等具有重要理论和实践意义。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

乌梁素海(40°47'~41°03'N, 108°43'~108°57'E)位于内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗境内,据 2010 年遥感解译结果,湖区水域面积为 305.7 km²,湖区多数水域水深 0.5~2.5 m,是内蒙古高原西部干旱区最典型的浅水草型湖泊。湖中有大型水生植物共 6

科 6 属 11 种,以芦苇、龙须眼子菜和穗花狐尾藻为优势种,沉水植物和挺水植物生长繁茂,遍布全湖。农田退水、工业废水和生活污水是该湖主要的补给水源,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^[11],已成为世界上沼泽化速度最快的湖泊之一。

岱海(40°29'27"~40°37'6"N, 112°33'31"~112°46'40"E)位于内蒙古凉城县境内,现有水域面积约 80.72 km²,最大水深 16.05 m,平均水深 7.41 m^[12],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。湖中有藻类共 76 属,其中绿藻门 28 属、硅藻门 21 属、蓝藻门 16 属、裸藻门 16 属、甲藻门、隐藻门、黄藻门、金藻门各 2 属^[13]。岱海补给水源来自大气降水、湖周分布的间歇性河流以及工农业废水。近年来由于气候干旱及工农业用水的增加,湖泊水位逐年降低、湖面不断减小,湖水咸化程度不断加强,富营养化程度日益加剧。

1.2 研究方法与材料

1.2.1 样品采集与模拟实验

2007 年 8 月,分别在乌梁素海的北部(WLSH-2)、南部(WLSH-9)和岱海的南部(DH-2)、中部(DH-5)及北部(DH-10)采集沉积物柱芯样(图 1)。为使模拟实验能反映湖泊真实环境,采样时保持沉积物柱上方的上覆水并使沉积物柱与上覆水柱界面清晰,柱芯样要现场密封冷藏,垂直放置于垫有塑料泡沫的搁架中,于 6 h 内带回实验室;同步采集同一站位的上覆水样,现场过 0.45 μm 滤膜,过滤后水样低温蔽光保

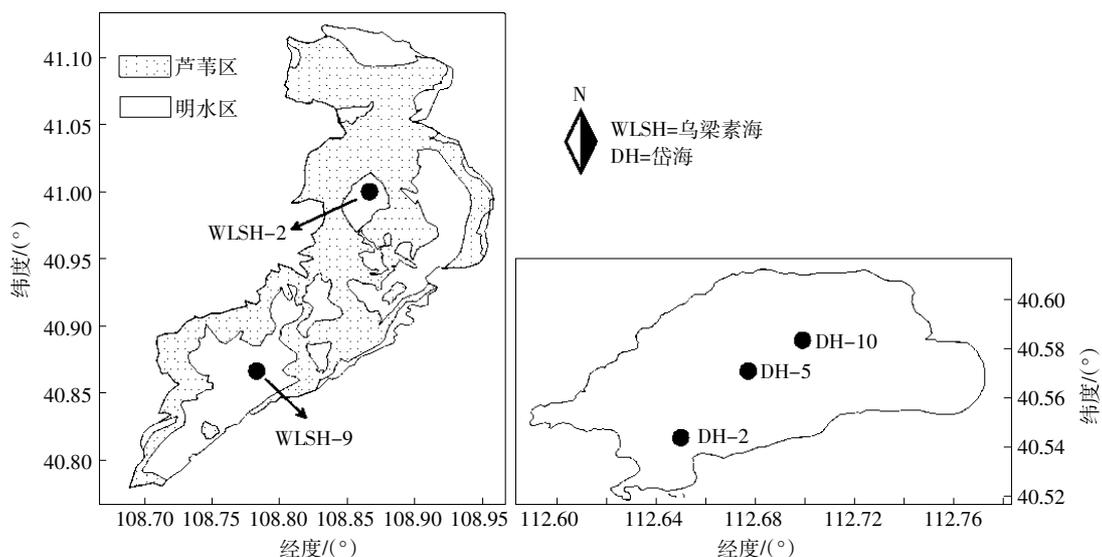


图 1 乌梁素海和岱海采样点位图

Figure 1 Location of sampling sites in Lakes WLSH and DH

存,用于交换通量模拟实验。2个湖泊水体与沉积物背景参数如表1所示。

回实验室后,用虹吸法抽去柱芯样上覆水,加入过滤后的上覆水,保持水-沉积物界面清晰;实验过程中,为减小或避免光照等对水-沉积物界面 SiO₃-Si 扩散通量的影响,于采样管外壁用黑色塑料薄膜对沉积物部分进行包裹处理。在指定时刻采集上覆水样,分析测试其中溶解性硅酸盐(SiO₃-Si)的含量,模拟实验进行至所取水样中 SiO₃-Si 的含量趋于稳定时结束。采用硅钼蓝分光光度法测定,分析测试仪器为日本岛津公司 UV-2550 型分光光度计。

1.2.2 实验结果计算

实验中上覆水硅酸盐 SiO₃-Si 的释放速率按下式计算^[14]:

$$R=[V(C_n-C_0)+\sum_{j=1}^n V_{j-1}(C_{j-1}-C_a)]/(S \cdot t)$$

式中:R 为释放速率,mg·m⁻²·d⁻¹;V 为柱中上覆水体积,L;C_n,C₀,C_{j-1} 分别为第 n 次、0 次和 j-1 次采样时 SiO₃-Si 含量,mg·L⁻¹;C_a 为添加水样中 SiO₃-Si 含量,mg·L⁻¹;V_{j-1} 为第 j-1 次采样体积,L;S 为柱样中水-沉积物接触面积,m²;t 为释放时间,d。

由于不考虑水体生物、化学过程及水-气界面交换等对水-沉积物界面 SiO₃-Si 交换通量的影响,所计算的 SiO₃-Si 为平均表观释放速率。

2 结果与讨论

2.1 模拟实验平衡时间确定

乌梁素海水-沉积物界面 SiO₃-Si 交换通量模拟实验结果表明(图 2a),在释放时间段内,SiO₃-Si 浓度呈波动变化的趋势,且 WLSH-9 柱芯上覆水柱中 SiO₃-Si 含量明显大于 WLSH-2 柱芯。在模拟真实环境条件下,乌梁素海水-沉积物界面 SiO₃-Si 交换通量

模拟实验 WLSH-2 柱芯在 13 d 达到平衡,而 WLSH-9 柱芯在 15 d 后达到平衡,可选取两个点位的平均释放速率估算乌梁素海水-沉积物界面的 SiO₃-Si 交换通量。与乌梁素海相比,岱海模拟实验三个柱芯上覆水柱中 SiO₃-Si 含量变化较乌梁素海两个柱芯小得多,三个柱芯 SiO₃-Si 含量在实验开始的几天内变化幅度较大,其后呈现小幅波动的趋势(图 2b)。DH-5 和 DH-10 柱芯上覆水柱中 SiO₃-Si 含量约在 12 d 后渐趋稳定,DH-2 柱芯则在 15 d 后渐趋稳定,可选取三个点位的平均释放速率估算乌梁素海水-沉积物界

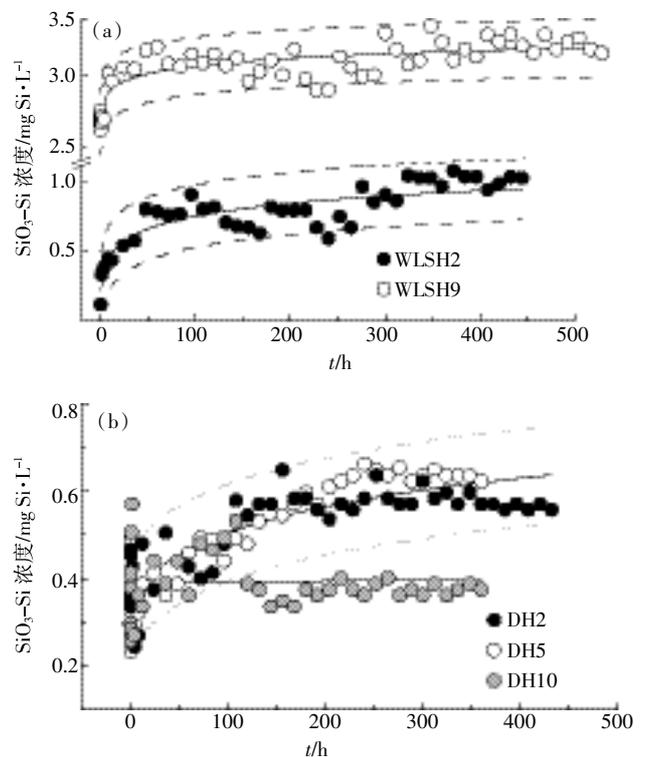


图 2 模拟实验上覆水中 SiO₃-Si 浓度变化
Figure 2 Concentrations of SiO₃-Si in overlying water in simulated release experiment

表 1 乌梁素海和岱海的水体沉积物背景参数

Table 1 Physi-chemical properties of overlying water and sediments from Lakes WLSH and DH

点位	水深/m	pH	EC/mS·cm ⁻¹	TN/mg·L ⁻¹	TP/mg·L ⁻¹	DSi/mg·L ⁻¹
WLSH-2	1.57	8.40	3.42	2.2	0.69	2.81
WLSH-9	1.77	8.79	3.12	1.7	0.19	1.96
DH-2	4.5	9.62	13.12	3.58	0.16	1.0
DH-5	6	9.32	13.08	1.50	0.17	0.91
DH-10	8	9.34	13.04	1.51	0.23	0.95
湖泊	粒径/Φ	pH	TOC/g·kg ⁻¹	TN/mg·kg ⁻¹	TP/mg·kg ⁻¹	BSi/g·kg ⁻¹
WLSH	3.41~6.02	8.07~8.95	4.5~22.83	0.3~3.31	0.37~0.99	3.86~7.79
DH	3.0~7.73	7.86~8.91	6.84~23.46	0.76~2.84	0.57~0.91	3.34~9.48

面的 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 交换通量。

由模拟实验可以看出,乌梁素海两个柱芯上覆水中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 含量介于 $0.6\sim 2.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 间,平均值为 $1.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,岱海三个柱芯上覆水中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 含量介于 $0.3\sim 0.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 间,平均值为 $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,将 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 转化成为 SiO_3^{2-} 可得:乌梁素海上覆水 SiO_3^{2-} 平均浓度为 $4.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,岱海上覆水 SiO_3^{2-} 平均浓度为 $1.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。两个湖泊上覆水 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度的差异与湖泊中藻类组成和采样季节有关。乌梁素海主要以挺水和沉水植物为主,岱海中硅藻门则有 21 属,为主要优势藻类之一;采样季节正值夏季藻类繁盛期,岱海上覆水中的溶解态 SiO_3^{2-} 存在被硅藻大量吸收利用的可能,这种生物泵作用是导致岱海上覆水中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度降低,沉积物中生源硅(BSi)累积的关键机制。

2.2 水-沉积物界面 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 释放速率

如图 3a 所示,在 0~20 d 的释放时间内,WLSH-2 柱芯的 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 释放速率均为正值且释放速率由大变小,在实验进行 8 d 后,释放速率基本趋于稳定。与 WLSH-2 柱芯相比,WLSH-9 柱芯的 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 释放速率变化较大,实验前 12 d,释放速率为负值,12 d 以后,释放速率变成正值并趋于稳定,说明 WLSH-9 柱芯对上覆水中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 先吸附后释放。两个柱芯相比,WLSH-2 柱芯硅释放速率大于 WLSH-9 柱芯。这是因为 WLSH-2 柱芯沉积物粘土矿物含量相对较高,粘土矿物晶格上 Si 原子易被其他离子取代而溶于水,加快硅的释放。WLSH-2 沉积物粘土矿物平均含量为 23.99%,WLSH-9 沉积物粘土矿物平均含量为 10.21%^[15],利于硅的释放。整体上看,乌梁素海两个柱芯在达到释放平衡后释放速率均为正值,释放速率变化范围为 $0.24\sim 2.32\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,平均为 $1.28\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,揭示 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 通过水-沉积物界面向上覆水转移和扩散,即乌梁素海沉积物在整个夏季均表现为上覆水中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的源。

如图 3b 所示,岱海 3 个柱芯在释放实验前期释放速率快速减小,DH-2 和 DH-5 在 6 d 以后达到释放平衡,DH-10 在 10 d 以后释放速率趋于稳定。在释放时间内,岱海三个沉积柱芯 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 释放速率变化范围为 $0.19\sim 2.01\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,平均释放速率为 $1.36\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,其中浅水区(DH-2) $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 释放速率为 $1.95\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,深水区(DH-5、DH-10)释放速率为 $1.10\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。这可能与沉积物中含铝矿物的含量有关。研究表明,沉积物中 Al 元素可降低 BSi 溶解度和溶出速率,进而降低间隙水中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度,降

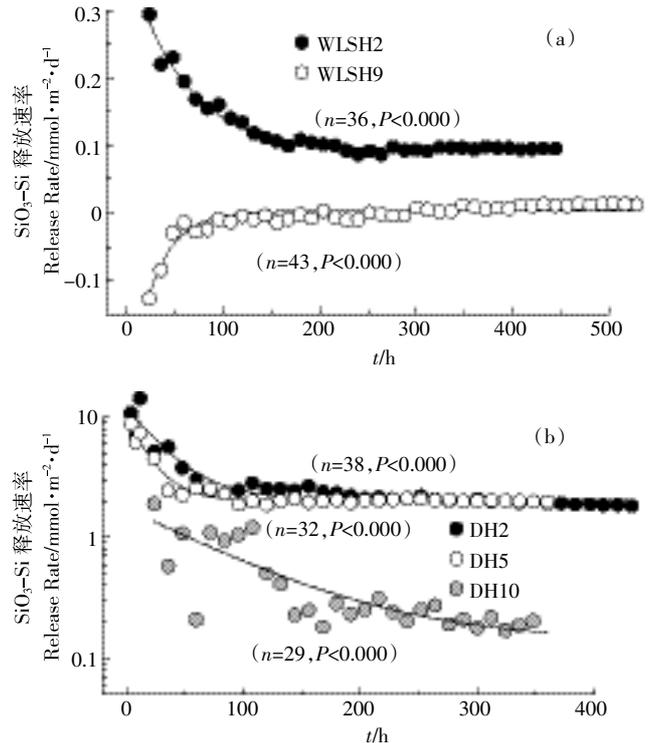


图 3 模拟实验中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 释放速率变化

Figure 3 Rates of $\text{SiO}_3\text{-Si}$ releases in simulated experiment

低 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 释放速率,不利于硅的释放。岱海浅水区沉积物含铝矿物约为 10.3%(以 Al_2O_3 计),深水区沉积物 Al_2O_3 含量为 14.6%^[13],深水区含量较高的含铝矿物抑制了沉积物中硅的释放。释放实验中,三个柱芯平均释放速率都是正值,表明 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 通过水-沉积物界面向上覆水转移和扩散,即岱海沉积物在整个夏季均表现为上覆水中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的源。

两个湖泊相比,乌梁素海 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 平均释放速率要低于岱海。两个湖泊沉积物等温吸附实验^[16]拟合结果表明,乌梁素海和岱海沉积物吸附硅的吉布斯自由能(ΔG_0)分别为 -21.329 、 $-20.518\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$,说明乌梁素海沉积物与单硅酸间的吸附力、吸附能级及吸附反应的自发程度略高于岱海沉积物,相应地吸附反应的生成物较稳定,对硅的吸附能力相对较强,不利于 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的释放;另外,沉积物粒度是影响沉积物中硅释放的重要因素,沉积物粒径越小,沉积物中富硅矿物比表面积越大,与水接触面积越大,其更易于溶解,其包含的 Si 越易于向上覆水迁移^[17]。岱海开阔水域沉积物平均粒径(MS)基本都在 6Φ 以上,最细粒径分布在湖心深水区,MS 在 7.5Φ 以上,最细值为 7.73Φ ^[13],乌梁素海沉积物粒径介于 $3.41\sim 6.13\Phi$,均值为 5Φ 左右^[15],岱海沉积物粒度较细,更利于硅的溶解释放。此

外,生物硅是沉积物中硅的重要组成部分,其一般易于矿化溶解释放到上覆水中^[18-19],是影响沉积物-水界面释放速率的重要因素。乌梁素海表层沉积物中生物硅含量为 2.00~5.80 mg·g⁻¹,平均值为 3.50 mg·g⁻¹;岱海表层沉积物中生物硅含量为 3.30~9.50 mg·g⁻¹,平均值为 7.50 mg·g⁻¹^[20],岱海中高含量的生物硅的矿化溶解提高了硅在水-沉积物界面的释放速率。最后,岱海是深水藻型湖泊,硅藻是岱海的优势藻类之一,而乌梁素海中生长大量的挺水植物和沉水植物,藻类的生物量相对较小,藻类对硅的需求量较小,硅藻类浮游生物生长需要从水中吸收大量的硅,硅从沉积物转移至上覆水的生物泵功能相对较强,促进了沉积物硅的释放。

乌梁素海和岱海水中 SiO₃-Si 在沉积物-水界面上的交换速率与其他水体(表 2)对比可以看出,两个湖泊沉积物-水界面上 SiO₃-Si 交换速率($V_{\text{WLSH}}=1.28 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, $V_{\text{DH}}=1.36 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)小于胶州湾、东海、黄海、长江口和黄河口,可能是湖泊和海洋沉积物理化性质的差异造成的。首先, Lisitzin^[21]对海洋表层沉积物中生物硅调查显示,中国东部海和南部海沉积物生物硅含量近似为 1%,高于乌梁素海(0.35%)和岱海(0.75%),生物硅的矿化溶解提高了海洋沉积物-水界面上 SiO₃-Si 交换速率;其次,沉积物中富硅矿物(主要是粘土矿物)溶解过程控制着沉积物-水界面 SiO₃-Si 交换速率,粘土矿物晶格上 Si 原子易被其他离子取代而溶于水,促进沉积物硅的释放。换句话说,沉积物中富硅矿物(如伊利石)含量越多,其溶解释放的 SiO₃-Si 量越高^[22-23]。海洋表层沉积物中粘土矿物含量较高,约占沉积物总量的 1/3^[24],且粘土矿物中以伊利石矿物为主,伊利石在粘土矿物中平均含量可达 60%左右^[25],而岱海属于半干旱区封闭型内陆湖泊,此类湖泊具有粒径粗、粘土质含量少,分选差的特点,沉积物粘土矿物含量较少^[13],乌梁素海是黄河改道形成的牛轭湖,沉积物中粘土矿物($d<4 \mu\text{m}$)平均含量为 28.7%^[26],海洋沉积物中高含量的粘土矿物是其 SiO₃-Si 释放速率较大的原因。此外,本研究小组前期研究成果表明,铁锰氧化物结合态是两个湖泊沉积物中硅的主导形态^[27],王苏民等^[13]对岱海沉积物 Eh 研究显示,岱海表层沉积物 Eh 变化较大,范围在 29~362 mV 之间,均值为 175 mV;乌梁素海表层沉积物大致变化范围为 27~180 mV^[28],两湖大部分处于弱氧化环境,少部分处于弱还原环境;与湖泊相比,海洋沉积物 Eh 变化范围较大,由近岸到外海一般是由弱还

表 2 不同区域 SiO₃-Si 交换速率对比Table 2 Exchange rates of SiO₃-Si at water-sediment interface in different areas

研究区域	Si 交换速率/mm ² ·d ⁻¹	pH	盐度
胶州湾 ^[20]	1.39~5.25	7.99~8.60	20.38~32.17
南沙群岛 ^[31]	-0.348~0.26	8.19~8.29	32.70~34.0
东海 ^[2]	1.67	8.12~8.22	30.48~34.74
黄海 ^[2]	1.72	8~8.3	31.3~33.9
长江口 ^[18]	0.13~13.2	7.1~7.8	5~31
黄河口 ^[2]	1.63	7.99~8.34	27~31
乌梁素海	1.28	8.18~8.80	0.8~3.0
岱海	1.36	8.53~9.34	7.4~7.5

原环境到强还原环境过渡,外海大部分低于 0 mV,处于一种强还原环境,还原环境下铁锰氧化物结合态硅易溶出释放到上覆水中,但两个湖泊水-沉积物界面 SiO₃-Si 交换速率大于南沙群岛,可能与南沙群岛 SiO₃-Si 交换速率采用间隙水浓度梯度法计算有关。研究表明,实验室柱状模拟芯样法结果要高于孔隙水浓度梯度法,甚至高出一个数量级^[29]。

2.3 SiO₃-Si 对水体中初级生产力的贡献及营养盐对初级生产力的制约作用

氮、磷、硅是水生生态系统中重要的生源要素,是维持生物量的物质基础,其在水体中所占的比例决定着水生生物的种类及数量。一般认为,浮游植物按 Redfield 比^[33](C:N:P:Si=106:16:1:16)从水体中吸收和释放这些营养元素,根据 Redfield 比,可估算出湖中浮游植物对无机营养盐的需求。岱海初级生产力^[13](以 C 计)约为 261.65 mg·m⁻²·d⁻¹,根据 Redfield 比值,岱海浮游植物每天需从水体中摄取 3.29 mmol·m⁻²·d⁻¹ SiO₃-Si,由室内模拟实验可得,岱海沉积物-水界面 SiO₃-Si 的交换通量为 1.36 mmol·m⁻²·d⁻¹,沉积物释放的 SiO₃-Si 可提供岱海初级生产力所需硅的 41.3%;乌梁素海浮游植物初级生产力^[34](以 C 计)为 850.5 mg·m⁻²·d⁻¹,根据 Redfield 比值,乌梁素海浮游植物每天需从水体中摄取 10.70 mmol·m⁻²·d⁻¹ SiO₃-Si,由室内模拟实验可得,乌梁素海沉积物-水界面 SiO₃-Si 的交换通量为 1.28 mmol·m⁻²·d⁻¹,沉积物释放的 SiO₃-Si 可提供乌梁素海初级生产力所需硅的 11.96%。由此可以看出,沉积物释放的 SiO₃-Si 对维持湖泊的初级生产力有重要意义。

在理想条件下,上覆水中营养盐浓度比应满足 Redfield 比。根据实测上覆水中 N、P、Si 元素比值与 Redfield 值的关系,可以判断某一水域浮游植物生长

的限制因素。但浮游植物的限制因子并不能仅考虑化学计量限制因素,还需要比较水体中营养盐的实际浓度与浮游植物所需营养盐阈值的关系^[35]。基于藻类对营养盐的吸附动力学研究,浮游植物生长吸收营养盐最低阈值为 $c(\text{Si})=2 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, $c(\text{DIN})=1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, $c(\text{P})=0.1 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。模拟实验中乌梁素海和岱海五个柱芯 DIN、 PO_4^{3-} 、Si 的浓度与释放速率如表 3 所示。由表 3 可以看出两个湖泊中营养盐的浓度均高于浮游植物生长最低阈值。根据湖中 DIN、Si、 PO_4^{3-} 的比值关系可以看出,乌梁素海两个柱芯的上覆水中 N、Si、P 元素比均高于 Redfield 值(16:16:1),平均值为 23:41:1,从元素化学计量学角度考虑,随乌梁素海富营养水平的逐渐提高,磷有可能成为初级生产力的潜在限制因子。对于岱海而言,三个柱芯中 N、Si、P 元素比差异较大,可能与不同柱芯本身的理化性质差异有关,N、Si、P 元素比值平均为 16:14:1,说明 Si 可能是岱海初级生产力的主要限制因子,与本研究小组前期的研究结果一致。

2.4 水-沉积物界面 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 源汇通量

本次样品采集于明水区(不包括芦苇区),水深和水生植物分配相对均一。本研究小组前期研究表明,乌梁素海明水区面积约为 110 km^2 ,因此可取乌梁素海两个柱芯的平均释放速率作为其夏季湖泊明水区水-沉积物界面的 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 释放速率,并以此来估算乌梁素海夏季明水区水-沉积物界面的 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 交换通量。对岱海而言,其水深分布相差较大,取 DH-2 柱芯的释放速率作为其浅水区水-沉积物界面 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的释放速率,取 DH-5 和 DH-10 柱芯释放速率的均值作为其深水区水-沉积物界面 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的释放速率,以此估算岱海水-沉积物界面 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的交换通量。

根据室内水-沉积物界面静态模拟实验结果可以看出(表 4), $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 在岱海、乌梁素海水-沉积物界面

表 4 夏季(90 d)乌梁素海和岱海水-沉积物界面

$\text{SiO}_3\text{-Si}$ 交换通量

Table 4 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ fluxes at water-sediment interface of WLSH and DH during summer

项目	释放速率/ $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$	面积/ km^2	交换通量/ t	合计/ t
WLSH(明水区)	1.28	110.00	963.07	963.07
DH-浅水区	1.95	50.00	667.61	893.41
DH-深水区	1.10	30.00	225.80	

上的转移扩散的矢量方向均是由沉积物指向上覆水的,即湖泊沉积物在水-沉积物界面的硅循环中发挥着上覆水中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 源的功能。在夏季 90 d 内,乌梁素海和岱海沉积物始终向上覆水体释放 $\text{SiO}_3\text{-Si}$,其中乌梁素海约释放了 963.07 t,岱海约释放了 893.41 t。沉积物中硅的矿化溶解为湖泊硅藻类浮游植物生长提供了大量硅源,对维持湖泊生态系统初级生产力具有不可替代的作用。

3 结论

$\text{SiO}_3\text{-Si}$ 在乌梁素海和岱海水-沉积物界面的交换均表现为由沉积物向上覆水迁移,乌梁素海水-沉积物界面 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 平均释放速率为 $1.28 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,岱海浅水区 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 释放速率为 $1.95 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,深水区释放速率为 $1.10 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。据水-沉积物界面 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 交换通量结果估算,在夏季 90 d 的时间内,乌梁素海明水区沉积物约向上覆水体释放了 963.07 t $\text{SiO}_3\text{-Si}$,岱海深水区 and 浅水区分别向上覆水体释放了 225.80 t、667.61 t $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 。

溶解和扩散过程控制着 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 在水-沉积物界面的交换,乌梁素海和岱海 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 在水-沉积物界面的交换速率与两湖沉积物中粘土矿物含量、可矿化生物硅(BSi)含量及沉积物的粒度有较好的相关性。

表 3 模拟实验中上覆水中 DIN、 PO_4^{3-} 、Si 浓度与释放速率

Table 3 Concentrations and release rates of DIN, PO_4^{3-} and $\text{SiO}_3\text{-Si}$ from core samples

项目	WLSH-2	WLSH-9	DH-2	DH-10	DH-5	
浓度/ $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	DIN	0.027	0.041	0.027	0.024	0.013
	$\text{SiO}_3\text{-Si}$	0.027	0.093	0.021	0.013	0.023
	PO_4^{3-}	0.001 3	0.001 6	0.001 2	0.001 5	0.001 3
释放速率/ $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$	DIN	3.16	-2.46	1.94	6.29	-0.14
	$\text{SiO}_3\text{-Si}$	2.36	0.24	1.95	0.20	2.01
	PO_4^{3-}	0.167	0.020	-0.070	-0.063	-0.061
DIN:Si: PO_4^{3-}	21:21:1	26:58:1	23:18:1	16:9:1	10:18:1	
DIN:Si: PO_4^{3-} 平均值	23:41:1			16:14:1		

沉积物释放的 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 对维持湖泊初级生产力有重要贡献, 岱海沉积物释放的 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 可提供岱海初级生产力所需硅的 41.3%, 乌梁素海沉积物释放的 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 可提供乌梁素海初级生产力所需硅的 15.0%。从元素化学计量学角度考虑, 随乌梁素海富营养水平的逐渐提高, 磷有可能成为初级生产力的潜在限制因子, 硅是岱海初级生产力的重要限制因子。

参考文献:

- [1] Nelson D M, Tréguer P, Brzezinski M A, et al. Production and dissolution of biogenic silica in the ocean; Revised global estimates, comparison with regional data and relationship to biogenic sedimentation [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(3): 359-372.
- [2] 戚晓红, 刘素美, 张 经. 东、黄海沉积物-水界面营养盐交换速率的研究[J]. *海洋科学*, 2006, 30(3): 9-15.
QI Xiao-hong, LIU Su-mei, ZHANG Jing. Sediment-water fluxes of nutrients in the Yellow Sea and the East China Sea [J]. *Marine Science*, 2006, 30(3): 9-15.
- [3] Zabel M, Dahmke A, Schulz H. Regional distribution of diffusive phosphate and silicate fluxes through the sediment-water interface; The Eastern South Atlantic [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1998, 45(2): 277-300.
- [4] Giblin A E, Hopkinson C S, Tucker J. Benthic metabolism and nutrient cycling in Boston Harbor, Massachusetts [J]. *Estuaries*, 1997, 20(2): 346-364.
- [5] Denis L, Grenz C. Spatial variability in oxygen and nutrient fluxes at the sediment-water interface on the continental shelf in the Gulf of Lions (NW Mediterranean) [J]. *Oceanologica Acta*, 2003, 26(4): 373-389.
- [6] 黄绍基, 赵海洲, 方满萍. 质量衡算模型计算太湖底泥磷的交换量 [J]. *环境科学*, 1992, 13(1): 83-84.
HUANG Shao-ji, ZHAO Hai-zhou, FANG Man-ping. Sediment-water exchange capacity of total phosphorus in Taihu Lake calculated by mass budget model [J]. *Environmental Science*, 1992, 13(1): 83-84.
- [7] Seiki T, Izawa H, Date E. Benthic nutrient remineralization and oxygen consumption in the coastal area of Hiroshima Bay [J]. *Water Research*, 1989, 23(2): 219-228.
- [8] Austin E R, Lee G F. Nitrogen release from lake sediments [J]. *Journal Water Pollution Control Federation*, 1973, 45(5): 870-879.
- [9] Boers P, Van Hese O. Phosphorus release from the peaty sediments of the Loosdrecht Lakes (The Netherlands) [J]. *Water Research*, 1988, 22(3): 355-363.
- [10] Markert B E, Tesmer M G, Parker P E. An in situ sediment oxygen demand sampler [J]. *Water Research*, 1983, 17(6): 603-605.
- [11] 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*, 2007, 25(6): 1003-1012.
SUN Hui-min, HE Jiang, LÜ Chang-wei, et al. Nitrogen pollution and spatial distribution pattern of Wuliangsuhai Lake [J]. *Geographical Research*, 2007, 25(6): 1003-1012.
- [12] 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]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2008.
- [13] 王苏民, 吴瑞金, 余源盛. 岱海: 湖泊环境与气候变化 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990.
WANG Su-min, WU Rui-jin, YU Yuan-sheng. The Daihai Lake-lake environment and climate change [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1990.
- [14] 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.
FAN Cheng-xin, ZHANG Lu, YANG Long-yuan, et al. Simulation of internal loadings of nitrogen and phosphorus in a lake [J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2002, 33(4): 370-378.
- [15] 张经国, 王 炜, 裴 浩, 等. 乌梁素海沉积物沉积速率与粒度特征研究 [J]. *内蒙古大学学报: 自然科学版*, 2014, 45(6): 643-652.
ZHANG Jing-guo, WANG Wei, PEI Hao, et al. Deposition rate and grain size distribution characteristics of core sediments in Wuliangsuhai Lake [J]. *Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition)*, 2014, 45(6): 643-652.
- [16] 吕昌伟, 崔 萌, 高际玫, 等. 硅在湖泊沉积物上的吸附特征及形态分布研究 [J]. *环境科学*, 2012, 33(1): 135-141.
LÜ Chang-wei, CUI Meng, GAO Ji-mei, et al. Adsorption characteristic and form distribution of silicate in lakes sediments [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(1): 135-141.
- [17] 石 峰. 营养盐在东海沉积物-海水界面交换速率和交换通量的研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2003.
SHI Feng. Benthic exchange rates and fluxes of dissolved nutrients at the sediment-water interface in the East China Sea [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2003.
- [18] Aller R C, Mackin J E, Ullman W J, et al. Early chemical diagenesis, sediment-water solute exchange, and storage of reactive organic matter near the mouth of the Changjiang, East China Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 1985, 4(1): 227-251.
- [19] 刘素美. 黄渤海沉积物-水界面营养盐的交换及其质量平衡 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2000.
LIU Su-mei. The exchange and mass-balance of nutrients between sediment-water interface in Yellow Sea and Bohai Sea [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2000.
- [20] 麻 涛. 呼伦湖沉积物中硅的地球化学特征及对比研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2012.
MA Tao. The geochemical characteristic of silicon in Hulun Lake sediment and the contrastive study on silicon fractions in four typical lakes, Inner Mongolia Plateau [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2012.
- [21] Listzín A P. Asic relationship in distribution of modern siliceous sediments and their connection with climatic zonation [J]. *International Geology Review*, 1967, 9(6): 631-652.
- [22] Mozeto A A, Silvério P F, Soares A. Estimates of benthic fluxes of nutrients across the sediment-water interface (Guarapiranga reservoir, São Paulo, Brazil) [J]. *Science of the Total Environment*, 2001, 266(1):

- 135-142.
- [23] 王修林, 辛宇, 石峰, 等. 溶解无机态营养盐在渤海沉积物-海水界面交换通量研究[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2007, 37(5): 795-800.
- WANG Xiu-lin, XIN Yu, SHI Feng, et al. The exchange rate and flux of macro-nutrients and the regulating factors at the seawater-sediment interface in the Bohai Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2007, 37(5): 795-800.
- [24] 何良彪. 中国海及其邻近海域的粘土矿物[J]. 中国科学 B 辑, 1989(1): 75-83.
- HE Liang-biao. Clay mineral of China sea and adjacent sea areas[J]. *Science in China, Ser B*, 1989(1): 75-83.
- [25] 李国刚. 中国近海表层沉积物中粘土矿物的组成、分布及其地质意义[J]. 海洋学报(中文版), 1990, 12(4): 470-479.
- LI Guo-gang. The composition, distribution and geological significance of clay mineral in surface sediments of China's coast[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1990, 12(4): 470-479.
- [26] 马龙, 吴敬禄, 温军会, 等. 乌梁素海湖泊沉积物粒度特征及其环境指示意义[J]. 沉积学报, 2013, 31(4): 646-652.
- MA Long, WU Jing-lu, WEN Jun-hui, et al. Grain size characteristics and its environmental significance of lacustrine sediment recorded in Wuliangsu Lake, Inner Mongolia[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(4): 646-652.
- [27] 刘二东. 岱海乌梁素海硅的地球化学特征[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2009.
- LIU Er-dong. Geochemistry character of silicon in the Daihai and Wuliangsu Lake[D]. Huhhot: Inner Mongolia University, 2009.
- [28] 赵锁志. 内蒙古乌梁素海湖水及底泥营养元素和重金属污染及其环境效应研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
- ZHAO Suo-zhi. A study of nutrient elements and heavy metal pollutants and their environmental effects of the water and bed sediments of the Wuliangsu Lake in Inner Mongolia[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013.
- [29] 孙珊. 东、黄海营养盐的分布和沉积物-水界面交换通量[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- SUN Shan. Distribution features of nutrient and flux between the sediment and water interface of East China Sea and Yellow Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [30] 蒋风华, 王修林. Si 在胶州湾沉积物-海水界面上的交换速率和通量研究[J]. 青岛海洋大学学报: 自然科学版, 2002, 32(6): 1012-1018.
- JIANG Feng-hua, WANG Xiu-lin. Benthic exchange rate and flux of dissolved silicate at the sediment-water interface in Jiaozhou Bay[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2002, 32(6): 1012-1018.
- [31] 周伟华, 吴云华. 南沙群岛海域沉积物间隙水营养盐(氮、磷、硅)的研究[J]. 热带海洋学报, 2001, 20(4): 49-55.
- ZHOU Wei-hua, WU Yun-hua. Study on nutrient(N, P, Si) in sediment interstitial waters in the district of Nansha Islands Sea area[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2001, 20(4): 49-55.
- [32] 李玲玲. 黄河口湿地沉积物中营养盐分布及交换通量的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- LI Ling-ling. Study on distribution and benthic fluxes of nutrients in sediment of the Yellow River estuary wetland[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [33] Redfield A C, Ketchum B H, Richards F. The influence of organisms on the composition of sea-water[J]. *The Sea*, 1963: 26-77.
- [34] 何志辉. 中国湖泊水库的初级生产力及其能量转化效率[J]. 水产科学, 1987, 6(1): 24-30.
- HE Zhi-hui. The primary productivity and the energy transform efficiency of lakes and reservoir China[J]. *Fisheries Science*, 1987, 6(1): 24-30.
- [35] 宋秀贤, 俞志明, 殷克东, 等. 香港近岸海域营养盐结构特征及其对浮游植物生长的影响[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(4): 846-852.
- SONG Xiu-xian, YU Zhi-ming, YIN Ke-dong, et al. Temporal and spatial distribution of nutrients and chl a in the coastal area of Hongkong[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2013, 44(4): 846-852.