岱海硅藻类浮游植物初级生产力 Si 限制初探

吕昌伟,何江*,梁英,毛海芳,刘华琳,王凤娇
(内蒙古大学环境与资源学院,呼和浩特 010021)

摘要:以岱海水-沉积物系统中 BSi 的地球化学特征为基础,结合沉积物中 BSi 的空间分布和垂向分布以及 BSi 与古环境古气候的响应关系,对岱海硅藻类浮游植物初级生产力的 Si 限制理论进行了探索. 研究发现,岱海上覆水中 Si 的平均含量仅为 0.38 mg/L,而表层沉积物中 BSi 的平均含量达到 7.5 mg/g;水-沉积物系统中 SiO_3^{2-} 和 BSi 的空间分布特征揭示了生源硅的主要来源;水-沉积物系统中 Si 与 C、N、P 的比值及 BSi 与古环境古气候的响应关系阐明了 Si 成为硅藻浮游植物初级生产力限制因子的主要原因;不同历史时段内,Si 成为岱海硅藻浮游植物初级生产力限制因子的主导原因不同.

关键词:限制因子;生源硅;地球化学;湖泊
中图分类号:X173;X141 **文献标识码**:A **文章编号**:0250-3301(2010)03-0639-06

Examination of Silicate Limitation of Primary Production by Diatoms Phytoplankton in the Daihai Lake

LÜ Chang-wei, HE Jiang, LIANG Ying, MAO Hai-fang, LIU Hua-lin, WANG Feng-jiao
(College of Environments and Resources, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China)

Abstract: The Daihai Lake (40°29′27″-40°37′6″N, 112°33′31″-112°46′40″E) is a typical inland lake in a semiarid region in Inner Mongolia, China. Based on the geochemistry character of biogenic silica (BSi) in the water-sediments system of the Daihai Lake, the theory of silicate limitation of Primary Production by Diatoms phytoplankton in the Daihai Lake are discussed in this work by interpreting the information of the BSi concentrations, horizontal and vertical distributions and the response relation between BSi and past environmental conditions. It is found that the concentration of Si is very low in overlying water while very high in the sediments. The spatial distribution patters of SiO_3^{2-} and BSi suggest the Si source of the lake. The geochemistry information of BSi is well archived in the lake sediment profiles, and the geochemistry information of BSi well responses to the past environmental conditions of the Daihai drainage basin. The ratios between Si, and C, N, P in the water-sediment system and the response relation between BSi and past environmental conditions indicate the main reasons for the theory of silicate limitation of Primary Production by Diatoms phytoplankton. Furthermore, the dominant factor for silicate limitation of Primary Production by Diatoms phytoplankton is different in different periods.

Key words: limiting factor; biogenic silica; geochemistry; lakes

近 10 年来,涉及硅的输运、生产、沉积、再生及时空变化等的硅循环研究已经成为国际热点领域[1~6]. 有研究表明[7],在河口近岸以及高营养盐水域,硅藻构成了其初级生产力的 75%;从全球角度看,硅藻对全球海洋生态系统初级生产力的贡献达 40% 以上. 硅作为重要的生源要素,对水环境中硅藻类浮游植物的初级生产力具有不可替代的作用[8]. 许多大洋、海湾、河口等水域存在高营养盐、低叶绿素量现象,一些河口区初级生产力的迅速增加引起浮游植物组成和结构的变换,一些河口区富营养化水平较高但初级生产力却维持在较低水平,这些特殊现象往往揭示了 Si 对浮游植物生长的关键限制作用[9]. 外源 Si 输入极大地促进了硅藻类浮游植物的初级生产力,浮游植物对 Si 的同化作用使上层水体中 Si 的含量降低并转移至沉积物中,限制了 Si 参与再循环. Si 在沉积物中的积累将严重影响水体中 Si 的生物可给性,甚至使 Si 成为硅藻类浮游植物初级生产力的限制因子.

硅质浮游植物是水体初级生产力的主要组成部分,是底部沉积物生物硅(BSi)的主要来源. 沉积物中 BSi 的累积与水体初级生产力有着密切的关系,是水生生态系统初级生产力的一个重要指标[7,10]. BSi 在沉积物中的积累可反映水环境营养盐变化对硅藻等浮游植物生长的影响,记录着富营养化发生、发展的历程[10]和表层水体的古生产力,常被作为重建水生生态系统古生产力的替代性指标以及追踪古气候环境变化的有效手段[11~13]. 本研究以深水藻型湖泊岱海为对象,以水-沉积物系统中 BSi 的地球化

收稿日期:2009-04-20;修订日期:2009-06-19
基金项目:国家自然科学基金项目(40863003);内蒙古自然科学基金项目(2009BS0601);内蒙古大学"513 工程"基金项目;内蒙古大学高层次引进人才科研启动基金项目(Z20080209)
作者简介:吕昌伟(1979~),男,博士,讲师,主要研究方向为环境地球化学、污染生态学及湿地科学,E-mail:lcw2008@imu.edu.cn
* 通讯联系人,E-mail:ndjhe@imu.edu.cn

学特征为基础,以营养盐限制法则为判据,结合 BSi 对流域古环境古气候的响应关系,尝试性地探讨了岱海浮游植物初级生产力 Si 限制的可能性.

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

岱海(40°29′27″~40°37′6″N、112°33′31″~112°46′40″E)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,是西伯利亚干冷气团南下与热带海洋湿暖气团北上交锋的敏感地带[14],为气候变化的敏感反应区. 湖区位于内蒙古凉城县境内,现有水域面积约 80.72 km^2,最大水深 16.05 m,平均水深 7.41 m. 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[14];湖区西北岸和南岸浅水区有小面积的芦苇分布. 岱海补给水源来自大气降水以及湖周分布的间歇性河流. 流域内工业企业数量少、规模小,所排放的工业废水经弓坝河直接入湖,农田面源污染是湖泊的主要污染源. 近年来湖泊水位逐年下降、水面不断缩小,湖水咸化程度逐渐增高,富营养化程度加剧,环境问题日益突出,成为我国全球变化研究中备受重视的地区.

1.2 样品采集及分析方法

依据《湖泊生态系统观测方法》,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. 于 2007 年 8 月对乌梁素海和岱海进行了系统的现场监测和样品采集(图 1). 沉积物柱芯样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,现场以 2 cm 间隔分层;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;同步采集上覆水样(4℃ 保存);视测试目标元素和项目的不同,分别用玻璃瓶和聚乙烯塑料袋或瓶盛装样品. 采样点用 GPS 定位.

上覆水中硅酸盐含量采用硅钼蓝分光光度法测定,氨氮采用纳氏试剂光度法测定,硝态氮采用酚二磺酸法光度法测定,亚硝态氮采用 *N*-(1-萘基)-乙二胺光度法测定,总磷采用钼锑抗分光光度法测定. 沉积物中总氮采用半微量凯氏法测定,总磷采用钼锑抗分光光度法测定,有机质采用重铬酸钾氧化外加热法测定,生源硅(BSi)的提取测定方法如下.

准确称取0.200 0 g 沉积物样品,盛于 50 mL 聚乙烯离心管中,向管内加入 5 mL 10% H_2O_2,振荡摇匀,30 min 后加入 5 mL 1 mol/L HCl,摇匀并静置 30 min,再加入 20 mL 超纯水,离心(4 500 r/min)10 min,弃去上清液;将样品置于干燥箱,60℃ 下干燥 12 h 后,加入 50 mL 2 mol/L 的 Na_2CO_3,振荡 10 min,放入 85℃ 水浴恒温箱,每隔 1 h 离心获取 0.2 mL 上清液,连续提取 8h[15~17]. 提取液中的硅酸盐含量用硅钼蓝比色法测定[18],根据提取液中硅随时间的变化做动力学曲线,利用其直线部分的反延线与 Y 轴的交点值确定样品中 BSi 含量[19]. 每个样品设定 3 个平行样,BSi 测定结果的相对标准偏差均小于 10%.

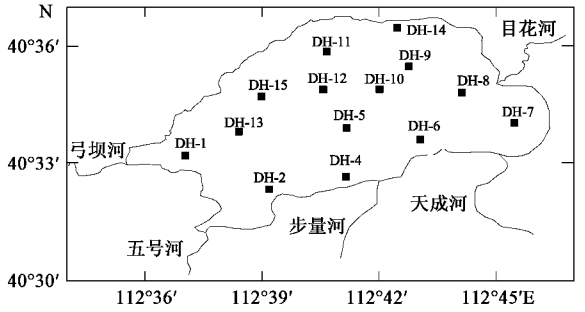

图 1 岱海样点分布示意

Fig. 1 Location of sampling sites in the Daihai Lake

2 结果与讨论

2.1 上覆水和表层沉积物中硅的空间分布

2.1.1 上覆水中 SiO_3^{2-} 的空间分布

自然水体中,硅作为主要生源要素通常以溶解态单体正硅酸盐 $Si(OH)_4$ 形态存在,它是水生植物(特别是硅藻类)生长繁殖所必需的营养成分. 岱海上覆水中 SiO_3^{2-} 的含量介于 0.7~1.2 mg/L,平均值为 1.0 mg/L(图 2). 岱海为深水藻型湖泊,有藻类 76 属,其中硅藻门 21 属[14],硅藻类浮游植物的生长需求是造成岱海上覆水中 SiO_3^{2-} 含量偏低的主要原因. 通常认为河流湖泊中的溶解性硅(DSi)主要来源于岩石土壤的风化作用,而受人为影响不大. 岱海上覆水中 SiO_3^{2-} 的高值区位于湖泊西北岸和南岸,这与元子沟、弓坝河、五号河、步量河和天成河等主要入湖河流分别从西北岸和南岸入湖有关. 另外,岱海西北岸和南岸的浅水湖区已有小面积芦苇等挺水植物分布,间有狐尾藻等沉水植物分布. 已有研究表明,沉水植物和挺水植物能通过化感作用抑制藻类生长[20,21]. 芦苇和狐尾藻等对藻类生长的抑制作用导致硅藻对 SiO_3^{2-} 需求的锐减也可能是影响岱海上

覆水中 SiO_3^{2-} 空间分布的原因之一. 可见,地表径流输入和局部水生生态系统演替是造成岱海西北岸和南岸为 SiO_3^{2-} 高值区的主要原因.

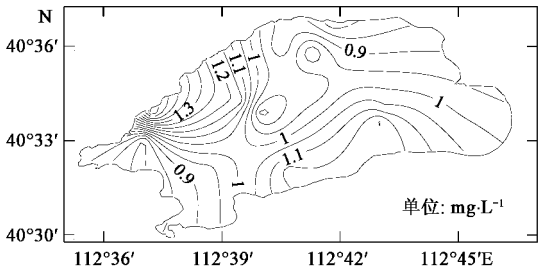

图 2　岱海上覆水中 SiO_3^{2-} 水平分布

Fig. 2　Patter of horizontal distribution of SiO_3^{2-} in DH overlying water

与长江口[22,23]、胶州湾[5]和广东湖光岩玛珥湖[24]相比,岱海表层沉积物中 BSi 的含量较低. 长江口、胶州湾和湖光岩玛珥湖均属我国湿润半湿润气候区,区内化学风化作用及地表冲刷作用均强于岱海流域,陆源输入的差异是我国河口、海岸地区及南方湖泊硅藻初级生产力及沉积 BSi 高于内陆干旱半干旱区湖泊的主控因子. 此外,湖泊水体温度也是硅藻初级生产力的重要影响因子,干凉气候条件不利于硅藻的生长发育[24],我国南北方温度的差异也可能是导致研究区沉积物中 BSi 含量相对较低的原因之一.

2.1.2　表层沉积物中 BSi 的空间分布

岱海表层沉积物中 BSi 的含量介于 3.3 ~ 9.5 mg/g,平均值为 7.5 mg/g(图 3),湖内硅藻类浮游植物的繁盛是导致 BSi 在湖底大量累积的主要原因. 岱海表层沉积物中 BSi 的空间分布具有湖心深水区为高值区,湖周浅水区为低值区的特点. 已有研究也表明,沉积物颗粒越细 BSi 含量越高,即沉积物颗粒越细越有利于 BSi 的赋存与累积[17,25]. 岱海沉积物粒度随水深增加而变细,沉积物平均粒径呈环带状分布[14],湖滨区沉积物颗粒较粗,渗透性较好,有利于沉积物中 BSi 的溶解[5],因而湖周浅水区为 BSi 低值区. 此外,岱海表层沉积物中 BSi 的空间分布也可能反映了湖心深水区有利于硅藻类浮游植物的繁盛,沉积物中 BSi 含量高,湖周浅水区因挺水或沉水植物等与硅藻类浮游植物竞争生存空间而导致浅水区沉积物 BSi 的累积量减少.

2.2　硅与氮、磷、碳的比值及意义

根据化学计量限制评估法则[26]中营养盐相对浓度的比值可判识营养盐对浮游植物生长的影响.

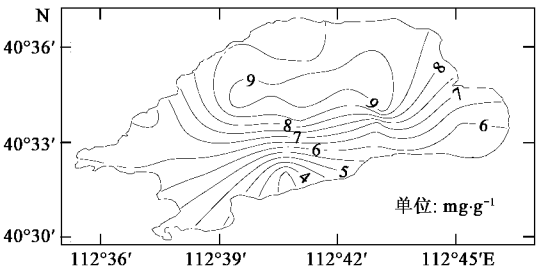

图 3　岱海沉积物中 BSi 水平分布

Fig. 3　Patter of horizontal distribution of BSi in DH surface sediment

①若同时满足 Si: P > 22 和 DIN: P > 22,为 P 限制;
②若同时满足 DIN: P < 10 和 Si: DIN > 1,为 N 限制;
③若同时满足 Si: P < 10 和 Si: DIN < 1,则为 Si 限制. 岱海上覆水体中 DIN、P、Si 间的比值同时满足 Si: P < 10 和 Si: DIN < 1(表 1),加之上覆水中 Si 的含量低(平均值仅为 0.38 mg/L),而表层沉积物中 BSi 的含量高(平均值为 7.5 mg/g),可初步判识 Si 为岱海硅藻类浮游植物初级生产力的限制因子.

表 1　岱海上覆水中 DIN、P、Si 的浓度及比值

Table 1　Concentrations and ratios of DIN, P, Si in the overlying water from the Daihai Lake

DIN /μmol·L⁻¹	TP /μmol·L⁻¹	Si /μmol·L⁻¹	Si: P	DIN: P	Si: DIN
53.70	4.29	13.41	5.35	20.92	0.25

Si 成为岱海硅藻类浮游植物初级生产力的限制因子是多种过程综合作用的结果,其中浮游植物对 Si 具有同化作用,通过生物泵向下运输并在沉积物中累积可能是主要原因. 硅藻中 Si: N: P 的比值为 16: 16: 1[27],若沉积物中 Si、N、P 均来自于浮游植物,沉积物中 Si: N: P 的比值应接近 16: 16: 1. 沉积物中 Si 与 C、N、P 的比值变化必然反映 Si 的累积状况,如果 Si: N: P 的比值大于 16: 16: 1,则标明 Si 在沉积物中积累[5]. 研究结果显示,岱海表层沉积物和沉积柱芯中 BSi: TN 比值均大于 1(表 2),揭示沉积物早期成岩过程中 N 比 BSi 的分解速率快,表明 BSi 有通过生物泵向下运输并在沉积物中累积的趋势,导致水体中 Si 的相对缺乏. 表层沉积物和沉积柱芯中 BSi: TP 比值虽略小于 16(表 2),但这并不表明 P 有可能成为岱海湖泊初级生产力的限制因子. 由上覆水中 TP 的平均浓度(表 1)可知,TP 高出营养盐绝对限制浓度的 40 多倍,P 不可能成为岱海湖泊初级生产力的限制因子. 通常认为人类活动对河流湖泊中溶解性硅(DSi)的影响不大,而对P的影

表 2 岱海沉积物中 Si:TN、Si:TP 和 OC:Si 的比值

Table 2 Ratios of Si:TN, Si:TP and OC:Si in the sediments from the Daihai Lake

样点	统计项	BSi:TN	BSi:TP	OC:BSi
表层沉积物	最大值	6.28	13.21	6.03
	最小值	1.89	5.68	1.96
	平均值	2.92	10.65	4.52
DH-5 柱芯	最大值	2.71	11.76	6.63
	最小值	1.89	9.06	5.08
	平均值	2.31	10.08	5.98
DH-10 柱芯	最大值	2.80	10.68	7.22
	最小值	1.90	7.68	4.26
	平均值	2.18	9.48	6.22

响较大,尤其是生活污水排放及农田退水对湖泊中 TP 的贡献巨大. 沉积物中 BSi:TP 比值从另一角度揭示了凉城县生活污水排放及湖周农田面源污染导致岱海上覆水中 TP 浓度急剧升高并在沉积物中累积的现状.

沉积物中 BSi 的累积与水体初级生产力关系密切,常被作为重建水生生态系统古生产力的替代性指标以及追踪古气候环境变化的有效手段[11~13]. 岱海沉积柱芯中 BSi 与 TOC 存在显著或极显著正相关关系,相关系数分别为 $r = 0.74$ 和 $r = 0.50$(图 4),表明沉积物中 BSi 与 TOC 有明显的依赖关系,揭示 BSi 可较好地反映湖泊硅藻类浮游植物的初级生产力. 沉积物中 OC:BSi 比值(表 2)均小于 Redfield 比(106:16),表明岱海沉积环境中有机质的分解速率大于 BSi 的溶解速率,揭示沉积物中累积的有机碳参与再循环的速率较 BSi 快,使 BSi 表现出在沉积物中累积的趋势,不再参与 Si 的生物地球化学循环,这也从另一个侧面揭示了岱海浮游植物初级生产力 Si 限制的主要原因之一.

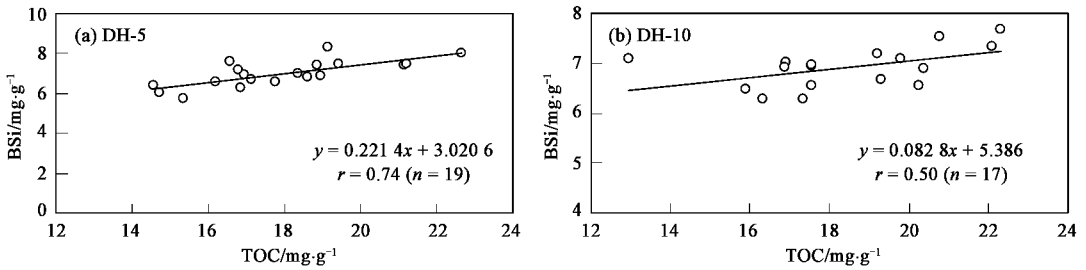

图 4 沉积柱芯中 BSi 与 TOC 的相关性

Fig. 4 Correlation between BSi and TOC in the sediment cores

2.3 BSi 对古环境的响应

Si 是一种保守的营养元素,主要来源于地表岩石和土壤中硅酸盐的风化和侵蚀,受人为的影响较小[28]. BSi 在沉积柱芯中的积累及含量变化趋势与水生生态系统的初级生产力关系密切[7]. BSi 在沉积剖面中的变化规律可反映水体营养盐变化对硅藻等浮游植物生长的影响,记录着水体富营养化发生、发展的历程以及水生生态系统类型的演变过程[10].

前期研究中,笔者提取了岱海沉积柱芯中陆源有机碳(Allochthonous OC)的沉积信息,并利用陆源有机碳恢复与重建了流域近 250 年来的古环境古气候[29]. 本研究以 BSi 与古环境间的响应关系为基础,尝试在较长历史时段的尺度下探寻 Si 限制湖泊硅藻类初级生产力的直接或间接证据.

BSi 与陆源有机碳在岱海沉积剖面的分布规律相一致,在 38~20 cm 沉积剖面总体呈递减趋势,在 20~0 cm 沉积剖面呈递增趋势(图 5),揭示 BSi 对古环境古气候具有较好的响应关系. 前期研究表明[29],38~20 cm 沉积剖面所代表的时段属冷偏干气候期,该时段内流域温度逐渐降低、降水减少. BSi 在该沉积剖面的递减趋势恰能反映随地表径流入湖外源硅的减少限制了湖内硅藻类浮游植物的初级生

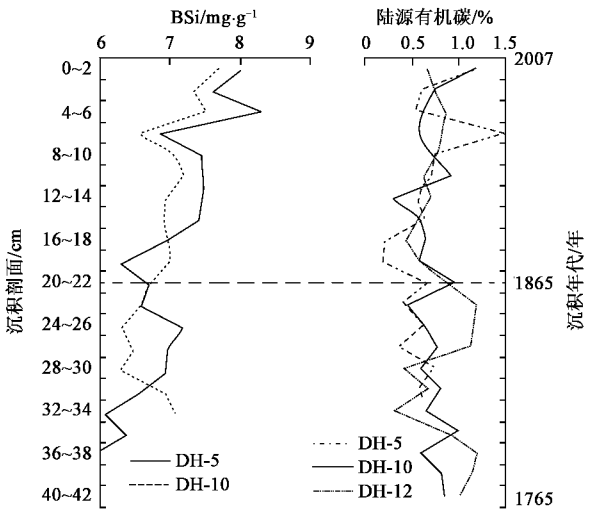

图 5 BSi 对古环境与古气候的响应

Fig. 5 Response relations between BSi and Allochthonous OC in the sediment cores

产力,导致 BSi 在湖底的累积量减少,揭示了硅藻类浮游植物对小冰期最后一次冷波动的响应. 20 ~ 0 cm 沉积剖面所代表的时段属暖偏湿气候期[29],该时段内流域温度逐渐升高、降水有所增加. BSi 在该沉积剖面的递增趋势反映了随地表径流入湖外源硅的增加促进了湖内硅藻类浮游植物的初级生产力,增强了生物泵对 BSi 的向下运输作用,使 BSi 在沉积物中大量累积. 综上所述,1765 ~ 1865 年(38 ~ 20 cm)的时段内,岱海水体营养盐水平总体较低,湖泊硅藻类浮游植物初级生产力受控于随地表径流入湖的外源硅,即 Si 为该时段硅藻类浮游植物初级生产力的限制因子;1865 ~ 2007 年(20 ~ 0 cm)的时段内,随地表径流入湖的外源硅虽逐渐增加,但湖水中 Si 在生物泵作用下不断向沉积物迁移,使水体中 Si 的含量维持在较低水平,致使 Si 成为岱海硅藻类浮游植物初级生产力的限制因子.

3　结论

(1)岱海水-沉积物系统中 SiO_3^{2-} 和 BSi 的空间分布特征揭示生源硅主要来源于流域岩石土壤的风化作用,主要受流域地表径流影响. 此外,沉积物粒度及挺水或沉水植物与硅藻类浮游植物间生存空间的竞争也对 BSi 的空间分布具有显著影响.

(2)水-沉积物系统中,Si 与 C、N、P 的比值及 BSi 与古环境古气候的响应关系,揭示流域地表径流输入及受控于生物泵作用的 BSi 在沉积物中的大量累积是 Si 成为岱海硅藻浮游植物初级生产力限制因子的主要原因.

(3)BSi 与流域古环境古气候存在较好的响应关系. 不同历史时段内,Si 成为岱海硅藻浮游植物初级生产力限制因子的主导原因不同. 1765 ~ 1865 年的时段内,湖泊硅藻类浮游植物初级生产力主要受控于随地表径流入湖的外源硅;1865 ~ 2007 年的时段内,受控于生物泵作用的 BSi 在沉积物中的大量累积是 Si 成为岱海硅藻浮游植物初级生产力限制因子的主导原因.

参考文献:

[1] Dugdale R C, Wilkerson F P. Silicate regulation of new production in the equatorial Pacific upwelling [J]. Nature, 1998, **391**(6664): 270-273.

[2] Bidle K D, Azam F. Accelerated dissolution of diatom silica by marine bacterial assemblages [J]. Nature, 1999, **397**(6719): 508-512.

[3] Pondaven P, Ragueneau O, Treguer P, *et al*. Resolving the "opal paradox" in the Southern Ocean [J]. Nature, 2000, **405**(6783): 168-172.

[4] DeMaster D J. The accumulation and cycling of biogenic silica in the Southern Ocean: revisiting the marine silica budget [J]. Deep-Sea Research Part Ⅱ, 2002, **49**(16): 3155-3167.

[5] 李学刚, 宋金明, 袁华茂, 等. 胶州湾沉积物中高生源硅含量的发现——胶州湾浮游植物生长硅限制的证据[J]. 海洋与湖沼, 2005, **36**(6): 572-579.

[6] 高磊, 李道季, 余立华, 等. 长江口崇明东滩沉积物中生源硅的地球化学分布特征[J]. 海洋与湖沼, 2007, **38**(5): 411-419.

[7] 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.

[8] Brzezinski M A. Cell-cycle effects on the kinetics of silicic acid uptake and resource competition among diatoms [J]. Journal of Plankton Research, 1992, **14**(11): 1511-1539.

[9] 杨东方, 张经, 陈豫. 营养盐限制的唯一性因子探究[J]. 海洋科学, 2001, **25**(12): 49-51.

[10] Conley D J, Schelske C L, Stoermer E F. Modification of the biogeochemical cycle of silica with eutrophication [J]. Mar Ecol Prog Ser, 1993, **101**: 179-192.

[11] Romero O, Hebbeln D. Biogenic silica and diatom thanatocoenosis in surface sediments below the Peru-Chile Current: controlling mechanisms and relationship with productivity of surface waters [J]. Marine Micropaleontology, 2003, **48**(1-2): 71-90.

[12] 黄永建, 王成善, 汪云亮. 古海洋生产力指标研究进展[J]. 地学前缘, 2005, **12**(2): 163-170.

[13] Leng M J, Barker P A. A review of the oxygen isotope composition of lacustrine diatom silica for palaeoclimate reconstruction [J]. Earth Science Reviews, 2006, **75**(1-4): 5-27.

[14] 王苏民, 余源盛, 吴瑞金, 等. 岱海-湖泊环境与气候变化[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 1990.

[15] 叶曦雯, 刘素美, 赵颖翡, 等. 东、黄海沉积物中生物硅的分布及其环境意义[J]. 中国环境科学, 2004, **24**(3): 265-269.

[16] 刘敏, 侯立军, 许世远, 等. 潮滩"干湿过程"模式下营养盐的迁移, 转化微观实验模拟[J]. 海洋学报, 2006, **28**(1): 169-175.

[17] Michalopoulos P, Aller R C. Early diagenesis of biogenic silica in the Amazon delta: alteration, authigenic clay formation, and storage [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2004, **68**(5): 1061-1085.

[18] 韩舞鹰. 海水化学要素调查手册[M] 北京:海洋出版社, 1986.

[19] Liu S M, Ye X W, Zhang J, *et al*. Problems with biogenic silica measurement in marginal seas [J]. Marine Geology, 2002, **192**(4): 383-392.

[20] 洪喻, 胡洪营. 水生植物化感抑藻作用研究与应用[J]. 科

学通报，2009，**54**(3)：287-293.

[21] 肖溪，楼莉萍，李华，等. 沉水植物化感作用控藻能力评述[J]. 应用生态学报，2009，**20**(3)：705-712.

[22] 侯立军，刘敏，闫惠敏，等. 长江口潮滩沉积物生物硅的分布及其影响因素[J]. 中国环境科学，2007，**27**(5)：665-669.

[23] 闫慧敏，刘敏，侯立军，等. 长江口沙洲表层沉积物中生物硅分布特征[J]. 环境科学，2008，**29**(1)：164-169.

[24] 王文远，刘嘉麒，彭平安. 湖泊沉积生物硅的测定与应用：以湖光岩玛珥湖为例[J]. 地球化学，2000，**29**(4)：327-330.

[25] Bernárdez P，Francés G，Prego R. Benthic-pelagic coupling and postdepositional processes as revealed by the distribution of opal in sediments：The case of the Ría de Vigo (NW Iberian Peninsula)[J]. Estuarine，Coastal and Shelf Science，2006，**68**(1-2)：271-281.

[26] Justić D，Rabalais N N，Turner R E，*et al*. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters：stoichiometric nutrient balance and its consequences[J]. Estuarine，Coastal and Shelf Science，1995，**40**(3)：339-356.

[27] 王保栋. 黄海和东海营养盐分布及其对浮游植物的限制[J]. 应用生态学报，2003，**14**(7)：1122-1126.

[28] Wollast R，Mackenzie F T. The global cycle of silica[A]. In：Aston S E (ed)，Silicon Geochemistry and Biogeochemistry[C]. London：Academic Press，1983. 39-76.

[29] Lü C W，He J，Sun H M，*et al*. Application of allochthonous organic carbon and phosphorus forms in the interpretation of past environmental conditions[J]. Environmental Geology，2008，**55**(6)：1279-1289.