

长江口沙洲表层沉积物中生物硅分布特征

闫慧敏¹, 刘敏^{1*}, 侯立军², 许世远¹, 林啸¹

(1. 华东师范大学地理学系地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062; 2. 华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 利用生物硅(BSi) 8 h 连续提取法, 分析了长江口南支沙洲表层沉积物中 BSi 的分布特征, 并探讨了 BSi 分布与沉积物理化性质之间的相关关系. 研究发现, 沙洲沉积物中 BSi 含量的变化范围为 0.47% ~ 1.02%, 平均含量为 0.75%. 高潮滩沉积物中 BSi 含量的变化范围在 0.47% ~ 0.91% 之间, 中潮滩在 0.48% ~ 1.02% 之间, 低潮滩则是 0.47% ~ 0.96%. 沉积物理化性质与 BSi 之间的相关分析揭示, 沉积物中 BSi 含量与粘土和粉砂含量呈极显著正相关, 这表明沉积物中 BSi 的赋存对沉积物机械组分具有明显的依赖性; 沉积物中的 BSi 与有机碳、氮(OC、ON) 之间存在极显著的正相关关系, 表明在富含有机质的沉积物中易于 BSi 的累积; OC/BSi 和 ON/BSi 的变化范围分别为 0.28 ~ 2.59 和 0.05 ~ 0.21, 都低于 Redfield 比值, 说明沙洲沉积物中 BSi 的溶解速率要远低于有机质的分解速率. 此外, 还发现沉积物中 BSi 与叶绿素之间存在弱的正相关关系, 反映了硅质藻类等初级生产者对沉积物中 BSi 累积也有一定的贡献.

关键词: 生物硅; 沉积物; 沙洲; 长江口

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)01-0164-06

Distribution of Biogenic Silica in Surface Sediments from the Shoals in the Yangtze Estuary

YAN Hui-min¹, LIU Min¹, HOU Li-jun², XU Shi-yuan¹, LIN Xiao¹

(1. Key Laboratory of Geo-information Science of the Ministry of Education, Department of Geography, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Distributions of biogenic silica (BSi) in surface sediments from the shoals in the Yangtze Estuary were investigated using an 8-hour sequential extraction method, and the relationships of BSi with the sediment physio-chemical characteristics were also discussed. The findings indicated that the BSi contents in the shoal sediments varied from 0.47% to 1.02%, and the average content was 0.75%. The BSi contents range of the high, middle and low intertidal flats was 0.47% ~ 0.91%, 0.48% ~ 1.02% and 0.47% ~ 0.96%, respectively. The significant positive relationships were found between BSi and the clay and silt contents in sediments, which indicated that the accumulation of BSi in sediments closely depended on sediment compositions. There also existed the remarkable positive relationships between BSi and organic carbon (OC) and nitrogen (ON). This implied that BSi was apt to accumulate in sediments enriched in organic matter. Compared with Redfield ratios, the ratios of OC/BSi and ON/BSi in shoal sediments were relatively lower and in the range of 0.28 ~ 2.59 and 0.05 ~ 0.21, respectively. Therefore, it was shown that the dissolution rate of BSi in shoal sediments was lower than the rate of organic matter decomposition. In addition, it was also found that there was the weak positive correlation between BSi and chlorophyll in the sediments, reflecting that primary productivity such as diatoms, to some certain, made contribution to the storage of BSi.

Key words: biogenic silica; sediment; shoal; the Yangtze Estuary

生物硅(BSi)是由海洋透光层硅质浮游生物如硅藻、放射虫等产生,是硅的一种重要存在形式.沉积物中的 BSi 主要来源于硅藻沉积,是海洋初级生产力的一个重要指标^[1].BSi 沉积记录可以反映海洋表层水体的古生产力,常用来指示古生产力的波动,许多研究以沉积物中 BSi 作为重建海洋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^[2~6].此外,BSi 的埋藏和溶解在硅的生物地球化学循环过程中也起着重要作用^[7~9].因而,研究沉积物中 BSi 的分布和累积具有重要的科学意义.

长江作为我国最大、世界第三大的河流,每年携

带大量的泥沙及污染物质入海,使得长江口及近岸水域营养盐过剩,富营养化现象时有发生.因此,在该区物质循环研究中,氮、磷、硅等生源要素的报道一直是其中的重要组成部分^[10~13].但是,目前尚鲜有长江口近岸地区沉积物中 BSi 方面的研究.本实验以长江口新生沙洲作为研究对象,分析了沙洲表

收稿日期: 2007-02-02; 修订日期: 2007-04-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(40671171, 40131020, 49801018); 教育部高等学校骨干教师计划项目

作者简介: 闫慧敏(1982~),女,硕士研究生,主要研究方向为城市与三角洲环境过程, E-mail: 51050801020@student.ecnu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: mliu@geo.ecnu.edu.cn

层沉积物中 BSi 的分布特征及其理化性质,探讨影响 BSi 分布的可能因素,以此作为该区硅生物地球化学循环研究的重要补充.

1 材料与方法

1.1 样品采集

于 2005-04-10~2005-04-18 期间,在长江口南支的白茆沙(BMS)、东风西沙(DFXS)、扁担沙(BDS)、中央沙(ZYS)、青草沙(QCS)和九段沙下沙(JDS)6 个新生沙洲上,分别采集了高(H)、中(M)和低(L)潮滩表层(0~5 cm)沉积物样品(图 1).野外采样期间发现,各沙洲都有高、中和低潮滩发育,其中高潮滩滩面均长有芦苇或米草,且呈带状分布;中潮滩滩面上发育着蕹草、海三棱蕹草,呈片状分布;低潮滩为光滩,基本上没有植被发育.高潮滩沉积物样品最细,以黑色-青灰色粉砂质粘土和粘土质粉砂为主;中潮滩沉积物样品由青灰色的粘土质粉砂和粉砂组成;低潮滩沉积物样品最粗,多为粉砂和细砂质粉砂,局部为细砂.采样期间所有采集的沉积物样品均放入冰柜中冷冻保存,待样品运回实验室后,立即置于冷冻干燥机内冷冻干燥,然后研磨过 100 目筛后进行化学分析与测试.

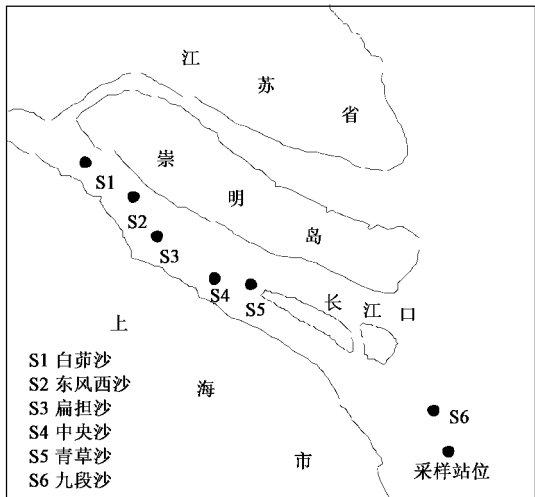


图 1 采样站位示意
Fig.1 Sampling stations in the Yangtze Estuary

1.2 实验分析与测试方法

沉积物中 BSi 含量的测定:称取重量约为 0.15 g 左右的沉积物样品于 50 mL 聚乙烯离心管中,分别加入 10% H₂O₂ 和 1:9 的 HCl 溶液混匀,静置 30 min 后加 20 mL 去离子水,离心,弃去上清液以去除碳酸盐和有机相,后于烘箱中 60℃干燥.干燥后的样品

加 40 mL 2 mol/L Na₂CO₃ 提取液,加盖后超声振荡混匀,随后放置在 85℃水浴中加热提取.每隔 1 h 取出离心,并吸取离心上清液测定可溶硅酸盐浓度^[14],连续提取 8 h^[15].每次取样完毕后混匀,且立即放回水浴.用硅钼蓝比色法测定提取液中的硅,根据提取液中硅含量随时间的变化做曲线,其直线部分的反延线与 y 轴的交点值来确定样品中 BSi 含量^[16].每个样品设定 3 个平行样,分析结果的相对标准偏差均在 10% 以内.

有机碳(OC)和有机氮(ON)的测定:沉积物样品先用 1mol/L HCl 浸泡淋洗 24 h,除去无机碳,再将酸化后沉积物置于干燥箱中干燥.待沉积物干燥后,利用 Elementar 公司 Vairo EL III 型元素分析仪测定沉积物中的有机碳和有机氮含量,标准偏差均小于 0.1%.

叶绿素(Chl)的测定:称取适量处理好的沉积物样品置于离心管中,加入 8 mL 90% 丙酮后在低温干燥避光处静置 24 h,最后用分光光度法测定提取液中叶绿素含量,分析结果的相对标准偏差 < 10%.

沉积物粒度测定:取适量沉积物样品经过超声振荡、分散后,利用激光粒度仪 LS13 320 测定.

2 结果与分析

2.1 沙洲表层沉积物理化性质

沙洲表层沉积物的粒径组成具有较大差异,其粒径分布见表 1,其中粘土为粒径 < 4 μm 的部分,粉砂为粒径在 4~63 μm 之间的部分, > 63 μm 的部分为砂.从沉积物的中值粒径(Md)和各组分的含量可以看出,沉积物中值粒径在 13.1~231.3 μm 之间,平均值为 55.3 μm.低潮滩沉积物的中值粒径普遍高于高、中潮滩;并且各样点沉积物粘土含量均较低,变化范围在 1.8%~27.2%之间,粉砂和砂含量变化范围较大,分别为 5.9%~75.6%和 4.7%~92.3%.除扁担沙中、低潮滩,白茆沙以及青草沙的低潮滩沉积物以砂为主外(56.2%~92.3%),其余各样品组成都是粉砂占主要部分.特殊的地理位置使得该区沉积物的粒径组成受陆源稀释作用影响显著,形成了这种以粉砂和砂为主的沉积环境.

表层沉积物中有机碳的含量为 0.05%~0.85%,平均值为 0.43%;有机氮含量范围在 0.01%~0.08%之间,平均为 0.04%.除了处在陆向发育前期的白茆沙外^[17],自东风西沙向海各沙洲高潮滩表层沉积物中有机碳、有机氮含量呈明显的梯度递减变化.二者有非常相似的空间分布特征,且存在显著

的相关关系,相关系数为 0.96($p < 0.000\ 1$,表 2).有机 C/N 变化范围在 5.62 ~ 18.97 之间,平均值为 11.66,最高值出现在九段沙的低潮滩,青草沙低潮滩拥有最低值.元素间的比值常常用来指示沉积物

的来源,有机 C/N 可以用来指示沉积物中的有机质来源,>5 或 8 常被认为是受海陆 2 种物质来源的影响^[18].研究区 6 个沙洲有机质 C/N 都 > 5,绝大部分 > 8,这说明沉积物中的有机质应属于混合来源.

表 1 长江口沙洲表层沉积物理化性质¹⁾

Table 1 Physio-chemical characteristics of surface sediments from the shoals in the Yangtze Estuary

采样点	粒径分布				OC/%	ON/%	C/N	Chl/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
	粘土/%	粉砂/%	砂/%	Md/ μm				
BMS-H	6.3	16.3	77.4	104.9	0.237	0.030	9.13	0.40
BMS-M	8.4	35.4	56.2	70.8	0.195	0.032	7.01	1.81
BMS-L	3.4	6.9	89.7	231.3	0.076	0.011	7.96	nd
DFXS-H	22.9	70.1	7.0	16.1	0.850	0.080	12.33	3.85
DFXS-M	16.6	71.7	11.7	26.0	0.676	0.059	13.35	3.59
DFXS-L	27.2	50.8	22.0	13.1	0.576	0.055	12.18	4.85
BDS-H	21.4	69.4	9.2	16.9	0.745	0.065	13.47	0.28
BDS-M	5.2	32.8	62.0	73.9	0.128	0.016	9.48	0.35
BDS-L	5.0	15.8	79.2	101.2	0.073	0.011	7.72	nd
ZYS-H	13.9	68.4	17.7	31.7	0.686	0.056	14.27	0.77
ZYS-M	18.9	70.5	10.6	22.0	0.647	0.051	14.66	0.51
ZYS-L	16.1	70.9	13.0	28.6	0.442	0.043	12.00	0.49
QCS-H	14.2	75.6	10.2	27.5	0.481	0.042	13.46	0.41
QCS-M	18.1	69.0	12.9	21.4	0.571	0.046	14.39	0.94
QCS-L	1.8	5.9	92.3	122.0	0.050	0.010	5.62	0.32
JDS-H	12.1	75.2	12.7	31.8	0.427	0.038	13.00	0.66
JDS-M	20.7	74.6	4.7	18.5	0.504	0.054	10.82	1.02
JDS-L	9.9	68.3	21.8	37.5	0.334	0.021	18.97	0.43

1)nd 表示未检出

由于采样期间正值春季,水温较低,潮滩沉积物中底栖藻类数量相对较少,叶绿素的含量变化范围仅为 0 ~ 4.85 $\mu\text{g/g}$,平均值为 1.13 $\mu\text{g/g}$.除东风西沙高中低潮滩沉积物中叶绿素含量相对较高外,大部分沙洲表层沉积物中叶绿素含量均较少,其中扁担

沙低潮滩和白茆沙的低潮滩沉积物中未检测到叶绿素存在.相关分析显示,叶绿素含量与有机氮含量以及粘土含量有显著的相关性,相关系数分别为 0.60 ($p = 0.012$)和 0.62($p = 0.008$),与有机碳含量也存在显著的相关性($R = 0.50, p = 0.04$).

表 2 BSi 与不同理化参数的相关系数¹⁾

Table 2 Correlation coefficients between BSi and physio-chemical characteristics

	粘土/%	粉砂/%	砂/%	Md/ μm	OC/%	ON/%	C/N	Chl/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	BSi/%
粘土/%	1.00								
粉砂/%	0.76**	1.00							
砂/%	-0.85**	-0.99**	1.00						
Md/ μm	-0.78**	-0.87**	0.89**	1.00					
OC/%	0.89**	0.83**	-0.88**	-0.77**	1.00				
ON/%	0.90**	0.75**	-0.82**	-0.74**	0.96**	1.00			
C/N	0.56*	0.81**	-0.79**	-0.66**	0.67**	0.49*	1.00		
Chl/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	0.62**	0.26	-0.35	-0.40	0.50*	0.60**	0.12	1.00	
BSi/%	0.84**	0.88**	-0.91**	-0.77**	0.77**	0.72**	0.72**	0.47*	1.00

1)* 表示显著相关,** 表示极显著相关

2.2 沙洲表层沉积物中生物硅的分布

沙洲表层沉积物中 BSi 含量在高、中、低潮滩的

分布见图 2,其变化范围为 0.47% ~ 1.02%,平均值为 0.75%,其中最高值出现在九段沙中潮滩,最低

值出现在青草沙低潮滩沉积物中.高潮滩沉积物中BSi含量的变化范围在0.47%~0.91%之间,中潮滩在0.48%~1.02%之间,低潮滩则是0.47%~0.96%.除了扁担沙高潮滩BSi含量明显高于中潮滩外,其余各沙洲都是高潮滩含量低于中潮滩,二者相差范围在0.01%~0.11%之间.白茆沙高中低潮滩变化与中央沙一致,但中央沙BSi含量高于白茆沙,2采样站位的平均值分别为0.82%和0.53%.

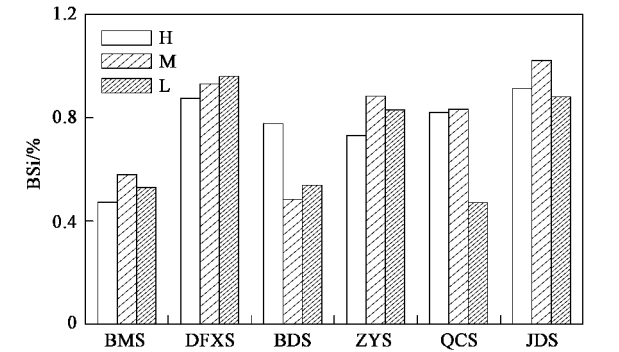


图2 长江口沙洲表层沉积物中生物硅分布
Fig.2 Distribution of biogenic silica in surface sediments from the shoals in the Yangtze Estuary

3 讨论

分析发现,长江口沙洲潮滩表层沉积物中BSi的分布与理化性质关系密切(表2),尤其与粒径分布存在极显著的线性相关关系,其中与沉积物粘土、粉砂和砂含量的相关系数分别为0.84($p < 0.0001$),0.88($p < 0.0001$)和-0.91($p < 0.0001$),与中值粒径的相关系数为-0.77($p = 0.0002$).白茆沙各潮滩粘土和粉砂含量都比较低,BSi含量相比其它沙洲也是比较低的,而东风西沙则是相反.青草沙低潮滩平均粒径最大,BSi的含量最低.这说明在研究区内,沉积环境是影响BSi分布的一个重要因素.已有研究也表明,沉积物颗粒越细,就越有利于BSi的赋存与累积^[19],而且河口地区BSi的供给同时也是沉积物中粘土矿物形成的一个重要的限制因子^[20].

沉积物中的BSi与有机碳、有机氮之间存在极显著的正相关关系,相关系数分别为0.77($p = 0.0002$)和0.72($p = 0.0008$),说明沉积物中BSi与有机质的吸附过程有关,其赋存与累积对有机碳、氮含量有明显的依赖关系.Natori等^[21]研究发现生物可利用有机质含量低会降低细菌活性,而低的细菌

活性就会限制BSi的溶解.通过表2还可以看出,沉积物中有机碳含量与沉积物粒径组成之间存在非常好的相关关系,与沉积物粘土和粉砂含量之间是正的相关关系($p < 0.0001$),与砂含量则是负的相关关系($p < 0.0001$).这与BSi和沉积物组分的相关关系相似,即沉积物颗粒越细则有机碳和生物硅含量也就越高,反之沉积物颗粒越粗两者的含量也就越少.这可能主要缘于若沉积物颗粒较粗,渗透性较好,则能够加速有机质分解作用和BSi的溶解^[22],因而不利有机质和BSi的累积.沉积物中BSi含量与有机氮之间的显著相关性($R = 0.72, p = 0.0008$),也进一步证实了上述观点.

长江口沙洲沉积物中OC/BSi和ON/BSi的沿程分布如图3所示,二者的变化范围分别为0.28~2.59和0.05~0.21,平均值分别为1.52和0.12,最高值都出现在东风西沙的高潮滩.由图3可以看出,自陆向海二者变化都很明显.沙洲OC/BSi值高潮滩与低潮滩分布变化一致,但是高潮滩比值要明显高于低潮滩,除了九段沙和青草沙外,其余沙洲中潮滩都是介于高、中潮滩之间,ON/BSi值与之相似.研究区内OC/BSi和ON/BSi都低于Redfield比值(OC/BSi=6.63,ON/BSi=1)^[22,23],这说明在相同条件下BSi的溶解速率要远低于有机质的分解速率,并且沉降到沉积物中的有机碳、有机氮大部分可以分解后参与再循环,从而相对地引起BSi在沉积物中的累积.

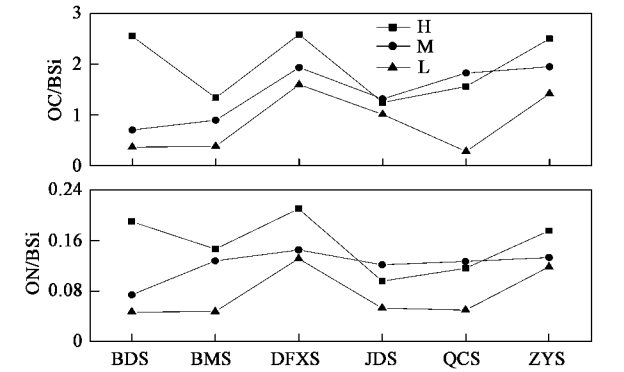


图3 长江口沙洲沉积物中OC/BSi与ON/BSi的分布
Fig.3 Distributions of OC/BSi and ON/BSi in surface sediments from the shoals in the Yangtze Estuary

沉积物中BSi主要来源于硅藻、放射虫、海绵骨针等硅质生物,底栖藻类或浮游藻类沉降到底部又可增加沉积物中的叶绿素含量,二者拥有相似的来源.已有研究指出沉积物中叶绿素含量与小型底栖生物丰度和生物量存在高度的显著相关性^[24].而硅

质浮游植物是沉积物中 BSi 的主要来源,同时也是海洋总初级生产力的主要组成部分,与底栖生物也是息息相关的,二者关系密切.杨东方等研究也指出^[25]:营养盐硅是影响浮游植物的生长及其集群结构变化的主要控制因子.长江口沙洲表层沉积物中 BSi 含量与叶绿素含量总体相关,相关系数为 0.47($p = 0.05$),与此相符.但也有部分站位例外,如东风西沙拥有高的叶绿素含量但是 BSi 含量一般,这可能是由于其拥有的底栖生物中硅质藻类含量较少.

从图 3 中可以看出,自河口向海各沙洲表层沉积物中 BSi 的分布并没有呈现出单纯的递增或递减的规律.白茆沙和中央沙高中低潮滩 BSi 的分布非常接近,但是白茆沙含量相比较低,可能是由于白茆沙更近河口地区,具有很高的沉积速率,不利于生物尤其是底栖生物的生存,另一原因可能就是该处过快的泥沙沉积速率使得硅藻含量被冲淡^[26].BSi 不仅可以由底栖藻类死亡沉降产生,也可由植物体腐烂后形成的植物泥炭形成.而不同植被富集 BSi 的量是不一样的^[27,28],从而造成其生长环境中 BSi 含量的变化,已有研究指出芦苇湿地就可能是 BSi 的一个重要的汇^[28].因此,研究区内不同潮滩表层沉积物中 BSi 的量是不一致的,变化趋势也比较复杂.

4 结论

(1)长江口沙洲表层沉积物中 BSi 含量的变化范围在 0.47% ~ 1.02% 之间,平均值为 0.75%,其中最高值出现在九段沙中潮滩,最低值出现在青草沙低潮滩沉积物中;高潮滩沉积物中 BSi 含量的变化范围在 0.47% ~ 0.91% 之间,中潮滩在 0.48% ~ 1.02% 之间,低潮滩则是 0.47% ~ 0.96%.沉积物中 BSi 的含量在高、中和低潮滩变化趋势比较复杂,没有明显的规律.

(2)长江口沙洲表层沉积物理化性质与 BSi 之间的相关分析揭示,BSi 含量与沉积物机械组成、有机质有密切的关系,一般而言在细颗粒且富含有机质的沉积物中易于 BSi 的累积和赋存.此外,还发现硅质藻类等初级生产者对沉积物中 BSi 的累积也有一定贡献,但存在明显的空间差异性.

(3)长江口沙洲表层沉积物中 OC/BSi 和 ON/BSi 的比值特征显示,沙洲沉积物中 BSi 的溶解速率要远低于有机质的分解速率,并且沉降到沉积物中的有机碳、氮大部分参与了再循环,从而相对地引起

BSi 在沉积物中的累积.

(4)本研究结果只是对长江口新生沙洲春季(4 月份)沉积物中 BSi 的含量进行了分析,有必要进行季节性连续检测,以准确全面揭示其季节性的变化特征及影响因素.

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 Biogeochemistry Cycle*, 1995, **9**: 359-372.
- [2] Charles C D, Froelich P N, Zibello M A, *et al.* Biogenic opal in southern ocean sediments over the last 450 000 years: implications for surface water chemistry and circulation[J]. *Paleoceanography*, 1991, **6**: 697-728.
- [3] 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**: 71-90.
- [4] 黄永健, 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.
- [5] Ryu E, Yi S, Lee S J. Late Pleistocene-Holocene paleoenvironmental changes inferred from the diatom record of the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan)[J]. *Marine Micropaleontology*, 2005, **55**: 157-182.
- [6] 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**: 5-27.
- [7] Bauerfeind E, Bodungen B V. Underestimation of biogenic silicon flux due to dissolution in sediment trap samples[J]. *Marine Geology*, 2006, **226**: 297-306.
- [8] Corvaisier P, Tréguer P, Beucher C, *et al.* Determination of the rate of production and dissolution of biosilica in marine waters by thermal ionisation mass spectrometry[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2005, **534**: 149-155.
- [9] Khalil K, Rabouille C, Gallinari M, *et al.* Constraining biogenic silica dissolution in marine sediments: A comparison between diagenetic models and experimental dissolution rates[J]. *Marine Chemistry*, 2007, **106**(1-2): 223-238.
- [10] 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.
- [11] 高磊, 李道季, 王延明, 等. 长江口最大浑浊带潮滩沉积物间隙水营养盐剖面研究[J]. *环境科学*, 2006, **27**(9): 1744-1752.
- [12] 李政, 刘征涛, 王婉华, 等. 长江河口硅和磷生源要素质量浓度的变化特征[J]. *环境科学研究*, 2006, **19**(1): 80-103.
- [13] 孟伟, 秦延文, 郑丙辉, 等. 长江口水体中氮、磷含量及其化学耗氧量的分析[J]. *环境科学*, 2004, **25**(6): 65-68.
- [14] Mortlock R A, Froelich P N. A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments[J]. *DeepSea Research*, 1989, **36**(9): 1415-1426.

- [15] Demaster D J. The supply and accumulation of silica in the marine environment[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1981, **45**: 1715-1732.
- [16] Lyle M, Murray D W, Finney B P, *et al.* The record of late Pleistocene sedimentation in the eastern tropical Pacific Ocean[J]. *Paleoceanography*, 1988, **3**: 39-59.
- [17] 张修峰, 梅雪英, 童春富, 等. 长江口岛屿沙洲湿地陆向发育过程中表层沉积物氮营养盐的变化[J]. *生态学报*, 2006, **26**(4): 1116-1121.
- [18] 吕晓霞, 翟世奎, 牛丽风. 长江口柱状沉积物中有机质 C/N 比的研究[J]. *环境化学*, 2005, **24**(3): 255-259.
- [19] 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**: 271-281.
- [20] 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.
- [21] Natori Y, Haneda A, Suzuki Y. Vertical and seasonal differences in biogenic silica dissolution in natural seawater in Suruga Bay, Japan: Effects of temperature and organic matter [J]. *Marine Chemistry*, 2006, **102**: 230-241.
- [22] 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]. *海洋与湖泊*, 2005, **36**(6): 572-579.
- [23] Tréguer P, Nelson D M, Van Bennekom A J, *et al.* The silica balance in the world ocean: a reestimate[J]. *Science*, 1995, **268**: 375-379.
- [24] 华尔, 张志南, 张艳. 长江口及邻近海域小型底栖生物丰度和生物量[J]. *生态学报*, 2005, **25**(9): 2234-2242.
- [25] 杨东方, 高振会, 王培刚, 等. 营养盐 Si 和水温影响浮游植物的机制[J]. *海洋环境科学*, 2006, **25**(1): 1-6.
- [26] Ragueneau O, Tréguer P, Leynaert A, *et al.* A review of the Si cycle in the modern ocean: recent progress and missing gaps in the application of biogenic opal as a paleoproductivity proxy[J]. *Global and Planetary Change*, 2000, **26**(4): 317-365.
- [27] Struyf E, Van Damme S, Gribsholt B, *et al.* Freshwater marshes as dissolved silica recyclers in an estuarine environment [J]. *Hydrobiologia*, 2005, **540**: 69-77.
- [28] Struyf E, Van Damme S, Gribsholt B, *et al.* Biogenic silica in tidal freshwater marsh sediments and vegetation (Schelde estuary, Belgium)[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2005, **303**: 51-60.