

渤海表层沉积物中的生物硅

代振飞^{1,2}, 薛勇¹, 章海波^{1,2}, 涂晨¹, 骆永明^{1,2}

(1. 中国科学院 海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 采用 0.1 mol/L HCl 和 1% Na₂CO₃ 两步连续提取法, 对 103 个渤海表层沉积物样品的生物硅含量进行了分析, 结果表明, 渤海表层沉积物中生物硅含量范围为 7.3~54.7 g/kg, 均值 31.5 g/kg, 高于其他相关调查, 原因可能是由于采用 0.1 mol/L HCl 提取过程中, 破坏了生物硅表面的金属氧化膜。对沉积物生物硅含量的空间分布表征显示, 莱州湾是沉积物生物硅的低值区, 而渤海湾与辽东湾之间的河北沿岸海域是相对高值区, 初步认为是陆源营养物质的输入与黄河泥沙长期不断输入干扰沉积环境的稳定性, 造成了该海域表层沉积物生物硅分布差异。主成分分析显示, 生物硅含量与沉积物黏粒含量、细粉砂、有机氮、有机碳的含量均呈极显著正相关($P < 0.01$), 进一步证实沉积物粒度特征和营养环境对生物硅积累的影响。

关键词: 生物硅; 分步提取; 表层沉积物; 渤海

中图分类号: P736.4 文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2017)05-0042-08

DOI: 10.11759/hyxx20160917002

海洋中的硅藻、硅鞭藻、放射虫等硅质浮游生物能够利用海水中的可溶性硅形成硅质介壳, 并埋藏于海洋沉积物中形成生物硅(Biogenic silica), 主要呈无定形态或弱结晶态^[1-4]。形成生物硅的硅藻是海洋初级生产力的主要贡献者, 因此生物硅中携带的表面海洋初级生产力信息, 可以提供宝贵的古海洋学记录, 为古气候环境的重建提供可能^[5-7]。生物硅向铝硅酸盐矿物转变的早期阶段, 表面能够快速形成富含铁、铝的膜。这些形成的膜包覆在生物硅表面, 对生物硅在沉积物中的积累与溶解的动态转换产生了明显影响^[8-9]。20 世纪 90 年代以来, 国内外学者开展了大量海洋表层沉积物生物硅参与全球硅循环的研究^[1, 5-7, 10], 并关注海洋沉积物性质与生物硅之间的关系^[11-13], 包括海水和沉积物体系中硅循环与碳、氮循环之间的联系^[14-16], 以及人为活动对硅循环的影响等^[17-18]。

渤海三面环陆, 主要包括渤海湾、莱州湾、辽东湾、中央海区和渤海海峡等部分^[19]。与中国其他海域相比, 渤海受到人类活动的影响更为严重^[20]。同时, 硅藻与甲藻是渤海海域浮游植物中的优势群落^[21]。有关渤海海域沉积物中生物硅的研究, Liu 等^[9]曾于 1999 年春季进行过调查, 但渤海的采样点主要布设在莱州湾海域, 缺乏对渤海海域沉积物生物硅的整体分布情况的认识。本研究的目的是通过对覆盖

整个渤海海域沉积物的采样调查, 分析沉积物中的生物硅含量与基本理化性质, 探讨渤海地区生物硅分布特征及影响因素, 为渤海海域硅的生物地球化学循环研究提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 沉积物样品采集

2014 年夏季, 在中国科学院烟台海岸带研究所的“渤海专项”航次支持下, 通过在渤海布设采样站位 103 个, 由于有 8 个样点的 GPS 坐标丢失, 图 1 的样点分布图为其中的 95 个站位分布情况。沉积物不锈钢沉积物采样器, 选取表层的 0~5 cm 样品进行保存分析。采样区域包括渤海湾、莱州湾、辽东湾、中央海区、渤海海峡。采集后的样品存放于棕色广口瓶中, 保存于-20℃冷库, 分析前采用冷冻干燥机干燥。

收稿日期: 2016-09-17; 修回日期: 2017-05-08

基金项目: 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-14); 中国科学院战略先导专项(XDA11020402)

[Foundation: Key Project of the Chinese Academy of Sciences, No.KZZD-EW-14; Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No. XDA11020402]

作者简介: 代振飞(1993-), 女, 河南兰考人, 硕士研究生, 主要研究方向为海岸带环境, E-mail: daizhenfei@126.com; 章海波, 通信作者, 电话: 0535-2109080, E-mail: hbzhang@yic.ac.cn

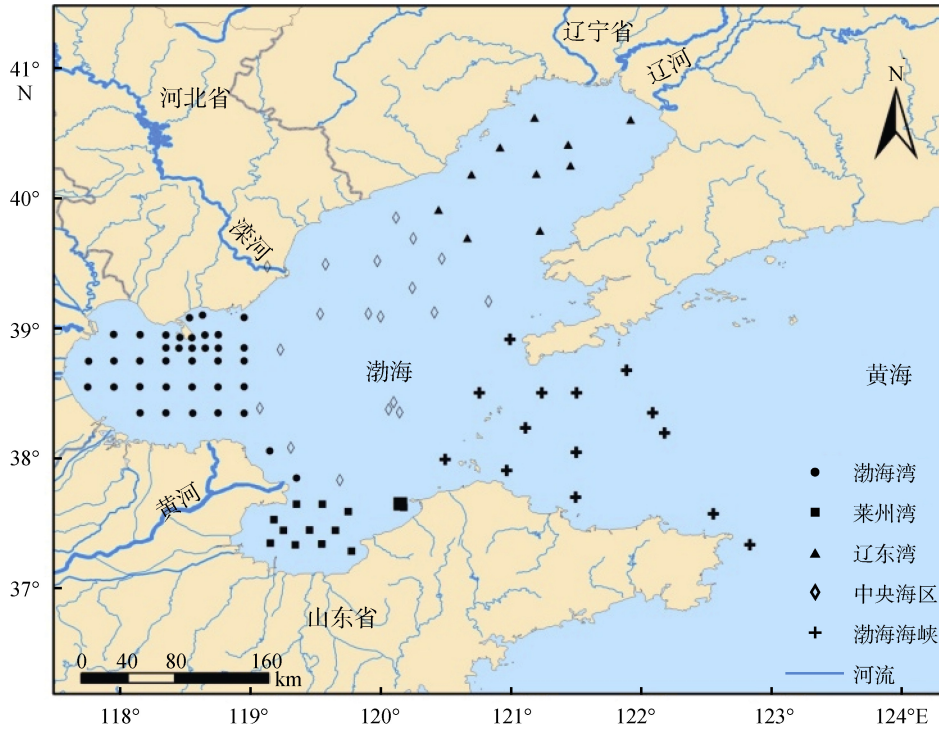


图 1 渤海沉积物采样点分布

Fig. 1 Spatial distribution of the sampling stations in the Bohai Sea

1.2 沉积物生物硅及基本性质分析

1.2.1 沉积物中生物硅的提取与测定

有研究表明,采用 Na_2CO_3 等弱碱性溶液对沉积物中的生物硅提取时,生物硅表面金属氧化和铝硅酸盐等物质形成膜会抑制部分生物硅的溶解,可能使分析结果偏低^[22]。因此,本研究在参考过去的提取方法基础上,采用 0.1 mol/LHCl 和 1% Na_2CO_3 溶液的两步提取法对沉积物生物硅进行提取。过去研究表明采用该方法提取硅的释放量具有规律性和可重复性^[4]。具体步骤如下:称取 0.05 g 沉积物样品于聚乙烯离心管中,加入 40 mL 0.1 mol/LHCl 后,于 25°C 振荡(120 r/min)18 h,离心、过滤得到上层清液,用硅钼蓝比色法测定提取液中溶解硅含量,该部分为与外层氧化壳(如铁锰氧化物等)结合的生物硅,用 Si-HCl 表示;提取后的沉积物样品用去离子水清洗 2~3 次,去除上清液后再加入 40 mL 1% Na_2CO_3 ,于 85°C 下水浴加热 6 h,离心、过滤得到上清液,用硅钼蓝比色法测定上清液中的硅含量,该部分为沉积物颗粒中的稳定态生物硅,用 Si-Alk 表示, Si-HCl 与 Si-Alk 之和即为沉积物生物硅(BSi)总量^[22]。

1.2.2 总有机碳(TOC)和总有机氮(TON)的测定

采用 1 mol/L 盐酸去除沉积物中的无机碳后,用

碳氮分析仪(Vario MACRO cube, Elmentar Co. Ltd.)测定沉积物中的有机碳和有机氮含量^[23]。

1.2.3 沉积物粒度测定

沉积物样品经超声、振荡、分散后,使用激光粒度仪(MarlvemMastersizer 2000F)进行粒度分析。根据沉积物中颗粒组成的分级方法,粒径<4 μm 的部分为黏粒、4~24 μm 部分为细粉砂、24~63 μm 部分为粗粉砂、>63 μm 部分为砂粒^[24]。

1.2.4 数据处理

用 SPSS 20 软件处理数据,对各个变量进行主成分分析,数据统计基于全部的 103 个样品进行分析。空间分布图基于有坐标信息的 95 个样品采用 ArcGIS 10.0 软件下的克里金插值法制作。

2 结果与讨论

2.1 渤海表层沉积物中生物硅含量特征

渤海表层沉积物中,生物硅(BSi)总量范围为 7.3~54.7 g/kg,平均值 31.5 g/kg。盐酸提取态硅(Si-HCl)约占生物硅总量的 3%,含量为 0.5~1.5 g/kg,平均值 1.1 g/kg;碳酸钠提取态硅(Si-Alk)含量为 6.8~53.6 g/kg,平均值 30.4 g/kg,是沉积物中生物硅的主要组成部分(表 1)。与珠江口沉积物中铁、铝氧

化物结合态硅的含量占沉积物总反应性硅的 30%明显不同^[4], 渤海海域沉积物中的生物硅主要以颗粒

中的稳定态硅为主, 这可能与渤海区沉积环境以弱氧化态为主, 铁铝氧化物含量较低有关^[25-26]。

表 1 渤海表层沉积物生物硅含量及样品理化性质

Tab. 1 The content of organic carbon, organic nitrogen, and biogenic silica in the surface sediments of the Bohai Sea

项目	样品数量	平均值	中位数	变化范围	变异系数*
Si-HCl(g/kg)	103	1.09	1.09	0.50~1.50	0.17
Si-Alk(g/kg)	103	30.40	31.60	6.80~53.60	0.22
BSi(g/kg)	103	31.49	32.59	7.34~54.66	0.22
TON(g/kg)	99	0.59	0.54	0.10~1.32	0.49
TOC(g/kg)	99	4.00	3.63	0.62~8.76	0.46
TOC/TON	99	7.04	6.84	4.71~10.52	0.18
黏土(%)	85	18.52	18.29	2.83~31.32	0.41
细粉砂(%)	85	34.98	34.01	3.89~60.2	0.47
粗粉砂(%)	85	20.34	16.54	1.56~47.57	0.59
砂(%)	85	26.16	17.56	0.47~91.29	0.89

注: 变异系数为无量纲参数

渤海地区表层沉积物中的生物硅含量与我国其他研究区表层沉积物中生物硅含量相比(表 2), 渤海地区要高于长江口沙洲和黄海的含量^[9, 11], 但低于南海南部的含量^[27]。这一方面与不同的提取方法有关, 本研究采用酸碱两步连续提取法, 首先用 0.1mol/L HCl 破坏生物硅表面包被的氧化膜, 使内部生物硅易于释放^[22]。与文献报道中使用较多的 2 mol/L Na₂CO₃ 提取沉积物中的生物硅不同, 本研究中在盐酸提取后采用 1% (~0.1 mol/L) Na₂CO₃ 进行提取, 但有研究表明, 两者的 pH 分别为 11.6 和 11.2, 对提取生物硅的影响不大^[28]。另一方面, 不同海域的沉积环境和初级生产力差异也可能影响沉积物生物硅的分布。由于硅质浮游生物是海洋初级生产力的重要组成部分^[29], 因此, 沉积物中生物硅的积累在一

定程度上也反映了不同海域在初级生产力上的整体差异。

本研究报道的结果与过去报道结果相比, 生物硅含量要明显高于 Liu 等^[6]在渤海 8 个站位的表层沉积物中生物硅含量(表 2)。除了上面分析的提取方法差异外, 采样季节对生物硅在海水与沉积物之间分布的影响也很大^[4]。Liu 等^[9]、Ragueneau 等^[30]的调查采样则在春季(1999 年 4-5 月), 春季沉积物-水界面的硅酸盐循环使沉积物中的生物硅大量溶解。本研究的调查季节为夏季, 河流入海通量较大, 可能带入大量的生物硅。此外, Liu 等^[9]布置的采样点多位于莱州湾地区; 而根据我们调查的渤海沉积物生物硅空间分布来看, 这一区域恰好是渤海海域沉积物中生物硅含量的低值区(图 2a)。

表 2 不同区域表层沉积物中生物硅的含量

Tab. 2 The content of biogenic silica in the surface sediments of the different study areas

研究区域	BSi 范围(%)	BSi 平均值(%)	提取液	提取条件	资料来源
长江口沙洲	0.47~1.02	0.75	2 mol/L Na ₂ CO ₃	85°C, 8 h 提取	[11]
亚马逊河口	0.2~1.8	—	0.1 mol/L HCl, 1% Na ₂ CO ₃	分步提取	[22]
罗斯海	0.7~21	6.5	1% Na ₂ CO ₃	85°C, 5 h 提取	[31]
南海南部	0.79~9.06	4.22	2 mol/L Na ₂ CO ₃	85°C, 8 h 提取	[27]
黄海	0.21~0.46	0.37	2 mol/L Na ₂ CO ₃	85°C, 8 h 提取	[9]
渤海	0.25~0.58	0.43	2 mol/L Na ₂ CO ₃	85°C, 8 h 提取	[9]
渤海	0.73~5.46	3.25	0.1 mol/L HCl, 1% Na ₂ CO ₃	分步提取	本研究

2.2 渤海表层沉积物中生物硅的空间分布

渤海表层沉积物中不同结合形态的生物硅(Si-HCl、

Si-Alk)以及生物硅总量(BSi)都具有明显的空间分异性。如图 2~图 4 所示, BSi 的高值区出现在河北附近的

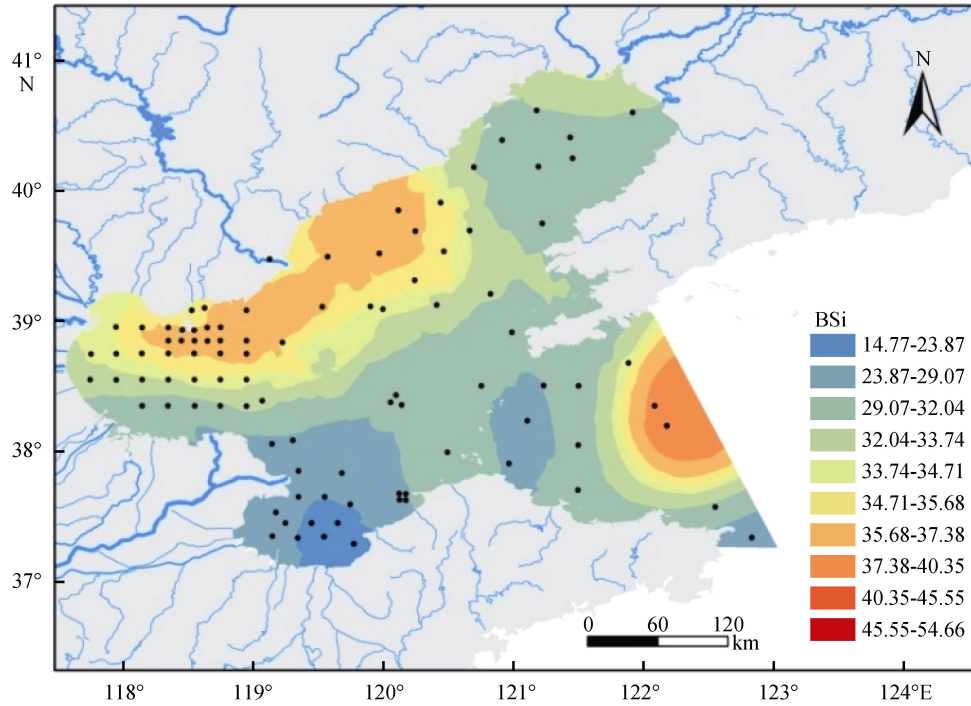


图 2 渤海表层沉积物中 BSi 的空间分布(g/kg)

Fig. 2 The distribution of BSi in the surface sediments of the Bohai Sea.

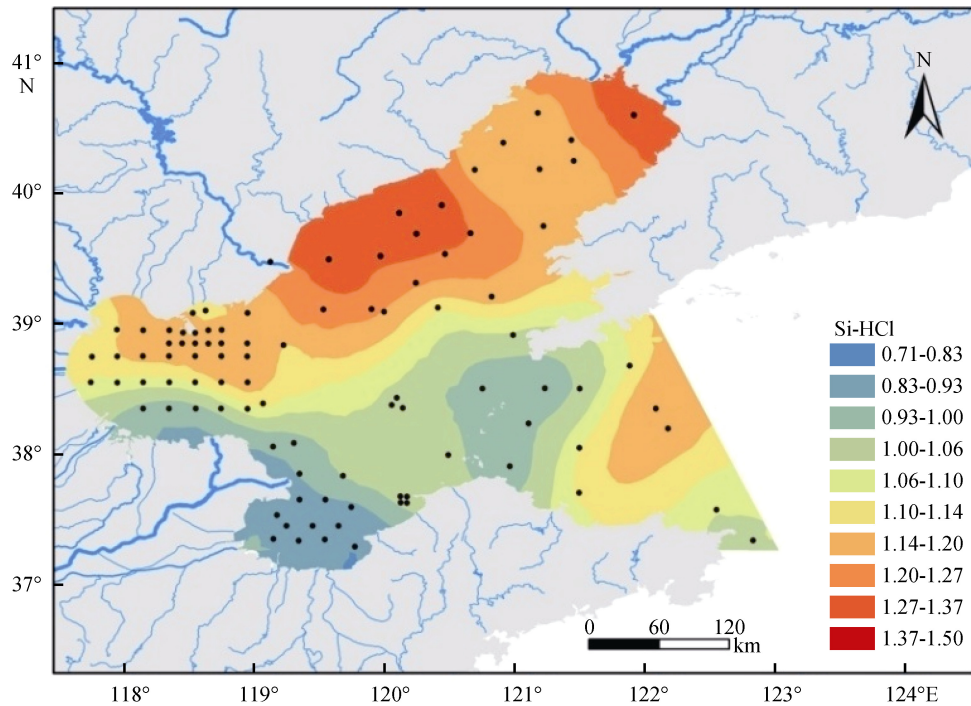


图 3 渤海表层沉积物中 Si-HCl 的空间分布(g/kg)

Fig. 3 The distribution of Si-HCl in the surface sediments of the Bohai Sea.

渤海海域和渤海海峡中东部, 其中, 在前者区域具有明显地沿海岸带由陆向渤海中央降低的趋势, 呈现陆源影响的空间分布特征。Si-HCl 的空间分布与生物硅

总量的分布略有不同, 其高值区除了出现在河北附近的渤海海域外, 也同时出现在辽东湾, 并呈现陆源影响的特征。Si-Alk 含量的空间分布与 BSi 的含量非常相似。

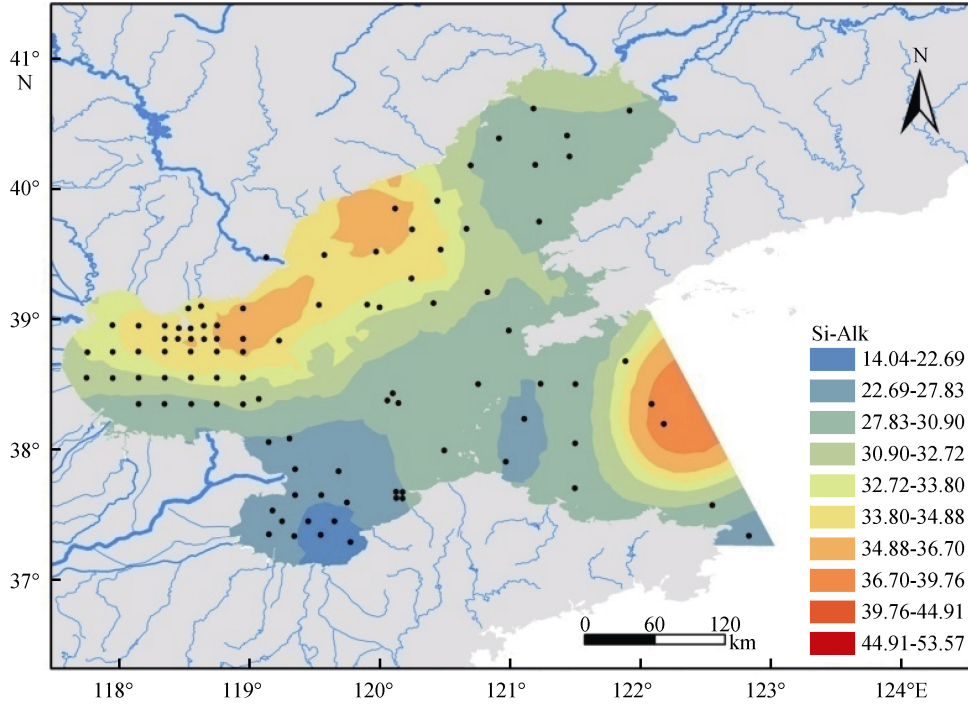


图 4 渤海表层沉积物中 Si-Alk 的空间分布(g/kg)

Fig. 4 The distribution of Si-Alk in the surface sediments of the Bohai Sea.

莱州湾成为渤海海域生物硅的低值区可能与黄河泥沙输送有关。形成生物硅的硅藻絮凝对生物硅的保存具有重要作用^[5]。在莱州湾, 由于受到黄河携带的大量泥沙的影响, 沉积环境不够稳定, 破坏了硅藻的絮凝作用, 不利于生物硅的积累。河北附近的海域, 由于京津唐地区大量污水输入, 使近岸海域形成富营养环境^[20, 32-33], 促进了硅藻的生长; 同时, 该海域沉积环境相对稳定, 有利于生物硅的积累, 从而呈现出受陆源影响的分布特征。北黄海域的部分样点也呈现较高的生物硅含量, 这一方面可能与样点表层沉积物的理化性质相关, 另外, 目前在该海域的采样点还非常有限, 难以代表该海域生物硅的整体含量与分布情况, 需要进行更为精细和更大范围的调查。

2.3 渤海沉积物生物硅含量与沉积物理化性质之间的关系

海洋沉积物中生物硅的积累受到沉积物理化性质的影响。通过主成分分析显示(图 5), 沉积物生物硅含量、黏粒含量、总有机碳等 9 个参数可分为 2 个主成分, 累积贡献率达到 84.19%。

第一主成分包括黏粒、细粉砂、TON、TOC、Si-Alk 和 BSi, 贡献率为 67.17%。该主成分具有较高

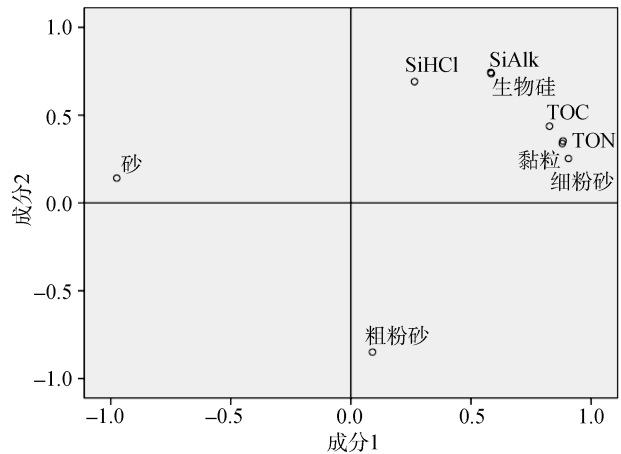


图 5 主成分分析的因子载荷图

Fig. 5 Loading plots of the principle component analysis.

的正载荷, 是沉积物中生物硅含量与分布的主要沉积环境影响因素。生物硅含量与沉积物中的黏粒含量、细粉砂含量均存在极显著正相关($P < 0.01$), 而与砂粒含量存在极显著负相关($P < 0.01$)。这是因为沉积物颗粒越细, 比表面更大, 有利于生物硅的固定与积累^[34], 而粗颗粒渗透性较好, 可能加速生物硅的溶解^[35]。沉积物中有机碳、氮含量高也与生物硅含量具有极显著正相关($P < 0.01$), 指示出海洋环境中的丰富的生源要素对沉积物中生物硅的积累具有积极

贡献^[4]。Si-HCl 含量与 Si-Alk 含量也存在极显著 ($P < 0.01$) 正相关, 这表明渤海沉积物中这两种不同形态的生物硅具有同源性。

第二主成分由粗粉砂含量组成, 贡献率为 17.02%。该主成分均为负载荷, 主要体现了沉积物中粗颗粒组成对生物硅积累的影响。

3 结论

(1) 渤海表层沉积物中, 生物硅总量的变化范围为 7.3~54.7 g/kg, 平均值为 31.5 g/kg; 生物硅含量的空间分布具有明显的陆源影响特征, 靠近河北沿岸海域中沉积物生物硅含量相对较高, 而莱州湾地区表层沉积物中生物硅含量较低, 空间分布上的差异可能与陆源营养物质的输入及黄河泥沙输入对沉积环境稳定性的影响有关。

(2) 沉积物中生物硅的含量与提取方法有关, 采用 0.1mol/LHCl 对沉积物处理后, 可增加生物硅的提取量, 而采用单一的 Na_2CO_3 提取法可能存在对沉积物中生物硅低估的现象。

(3) 渤海沉积物的基本理化性质对生物硅的含量及分布都有一定的影响, 细颗粒组分比例高的沉积物可以增加对生物硅的固定、减少释放; 同时, 沉积物中碳、氮等生源要素含量高, 表明海域环境中长期以来形成了丰富的营养条件, 有利于沉积物中生物硅的积累。

参考文献:

- [1] Tréguer P, Nelson D M, Van Bennekom A J, et al. The silica balance in the World Ocean: A Reestimate [J]. *Science*, 1995, 268 (5209): 375-379.
- [2] 张经. 近海生物地球化学的基本原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 195.
Zhang Jing. Introduction to Biogeochemistry of Coastal Environment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2009: 195.
- [3] 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.
Huang Yongjian, Wang Chengshan, Wang Yunliang. Progress in the study of proxies of paleocean productivity [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(2): 163-170.
- [4] 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 Yachao. Study on the biogeochemistry of sedimentary silica in the Pearl river estuary [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [5] 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.
- [6] Rickert D, Schluter M, Wallmann K, et al. Dissolution kinetics of biogenic silica from the water column to the sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(3): 439-455.
- [7] 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: 317-365.
- [8] Lewin J C. The dissolution of silica from diatom walls [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1961, 21: 182-198.
- [9] Liu S M, Ye X W, Zhang J, et al. Problems with biogenic silica measurement in marginal seas [J]. *Marine Geology*, 2002, 199(2): 383-392.
- [10] DeMaster D J. The accumulation and cycling of biogenic silica in the Southern Ocean: revisiting the marine silica budget [J]. *Deep-Sea Research II*, 2002, 49: 3155-3167.
- [11] 吕伟香. 东、黄海沉积物中生物硅的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
Lü Weixiang. Biogenic silica in sediments of the Yellow sea, East China Sea [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2007.
- [12] 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.
Yan Huimin, Liu Min, Hou Lijun, et al. Distribution of biogenic silica in surface sediments from the shoals in the Yangtze estuary [J]. *Environmental Science*, 2008, 29(1): 164-169.
- [13] 张晋, 李安春, 万世明, 等. 生物硅对南海南部表层沉积物粒度分析结果的影响[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(3): 35-46.
Zhang Jin, Li Anchun, Wan Shiming, et al. The influence of biogenic opal on the results of grain size analysis of surface sediments in the southern South China sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(3): 35-46.
- [14] Tréguer P J, De La Rocha C L. The world ocean silica cycle [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2013, 5: 477-501.
- [15] Wu B, Lu C, Liu S M. Dynamics of biogenic silica dissolution in Jiaozhou Bay, western Yellow Sea [J]. *Marine Chemistry*, 2015, 174: 58-66.
- [16] Isla E. Organic carbon and biogenic silica in marine sediments in the vicinities of the Antarctic Peninsula:

- spatial patterns across a climatic gradient [J]. *Polar Biol* 2016, 39(5): 819-828.
- [17] Puppe D, Höhn A, Kaczorek D, et al. As time goes by—Spatiotemporal changes of biogenic Si pools in initial soils of an artificial catchment in NE Germany [J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 105: 9-16.
- [18] Wang Z H, Lu X X, Zhang K. Distribution and contamination of metals and biogenic elements in sediments from Zhifu Bay of the Yellow Sea, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 41: 6-15.
- [19] 赵一阳, 鄢明才. 中国浅海沉积物生物地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 1.
Zhao Yiyang, Yan Mingcai. *Geochemistry of Sediments in China Shallow Seas* [M]. Beijing: Science Press, 1994: 1.
- [20] 冯士筌, 张经, 魏皓, 等. 渤海环境动力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 78, 185.
Feng Shizuo, Zhang Jing, Wei Hao, et al. *Introduction of the Environmental Dynamics of the Bohai Sea* [M]. Beijing: Science Press, 2007: 78, 185.
- [21] 郭术津, 李彦翘, 张翠霞, 等. 渤海浮游植物群落结构及与环境因子的相关性分析[J]. *海洋通报*, 2014, 33(1): 95-105.
Guo Shujin, Li Yanqiao, Zhang Cuixia, et al. Phytoplankton community in the Bohai Sea and its relationship with environmental factors [J]. *Marine Science Bulletin*, 2014, 33(1): 95-105.
- [22] Michalopoulos P, Aller R. 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.
- [23] 张华, 李艳芳, 唐诚, 等. 渤海底层低氧区的空间特征与形成机制[J]. *科学通报*, 2016, 61(14): 1612-1620.
Zhang Hua, Li Yanfang, Tang Cheng, et al. Spatial characteristics and formation mechanisms of bottom hypoxia zone in the Bohai Sea during summer [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(14): 1612-1620.
- [24] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediment [J]. *Journal of Geology*, 1992: 30: 377-392.
- [25] Tallberg P, Lukkari K, Råike A et al. Applicability of a sequential P fractionation procedure to Si in sediment [J]. *J Soils Sediments*, 2009, 9: 594-603.
- [26] 李学刚, 吕晓霞, 孙云明, 等. 渤海沉积物中的“活性铁”与其氧化还原环境的关系[J]. *海洋环境科学*, 2003, 22(1): 20-24.
Li Xuegang, Lv Xiaoxia, Sun Yunming, et al. Relation of active iron and redox environments in the sediments of Bohai Sea [J]. *Marine Environmental Science*, 2003, 22(1): 20-24.
- [27] 周鹏, 李冬梅, 刘广山, 等. 南海东北部和南部海域表层沉积物生物硅研究[J]. *热带海洋学报*, 2010, 29(4): 40-47.
Zhou Peng, Li Dongmei, Liu Guangshan, et al. Biogenic silica in surface sediments of the northeastern and southern South China Sea [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2010, 29(4): 40-47.
- [28] Demaster D J. The supply and accumulation of silica in the marine environment [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1981, 45: 1715-1732.
- [29] 宋金明, 徐亚岩, 张英, 等. 中国海洋生物地球化学过程研究的最新进展[J]. *海洋科学*, 2006, 30(2): 69-77.
Song Jinming, Xu Yayan, Zhang Ying, et al. Progress of marine biogeochemical processes in China [J]. *Marine Sciences*, 2006, 30(2): 69-77.
- [30] Ragueneau O, Varela E D, Tréguer P, et al. Phytoplankton dynamics in relation to the biogeochemical cycle of silicon in a coastal ecosystem of western Europe [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1994, 106: 157-172.
- [31] DeMaster D J, Ragueneau O. Preservation efficiencies and accumulation rates for biogenic silica and organic C, N, and P in high-latitude sediments: The Ross Sea [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101: 18501-18518.
- [32] 乔淑卿, 石学法, 白亚之, 等. 黄河口及邻近渤海海域悬浮体和沉积物中有机碳、氮的分布特征及其影响因素[J]. *沉积学报*, 2011, 29(2): 354-362.
Qiao Shuqing, Shi Xuefa, Bai Yazhi, et al. Distribution of Organic Carbon, Nitrogen in Suspended and Surface Sediments and Their Controlling Factors off the Huanghe(Yellow River) Mouth and the Nearby Bohai Sea [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(2): 354-362.
- [33] 孙军, 刘东艳, 柴新玉, 等. 莱州湾及潍河口夏季浮游植物生物量和初级生产力的分布[J]. *海洋学报*, 2006, 24(5): 81-90.
Sun Jun, Liu Dongyan, Chai Xinyu, et al. The distribution of phytoplankton biomass and primary productivity in the Laizhou Bay and estuary of the Weihe River in summer [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 24(5): 81-90.
- [34] Zhang L L, Wang R J, Chen M, et al. Biogenic silica in surface sediments of the South China Sea: Controlling factors and paleoenvironmental implications [J]. *Deep-Sea Research II*, 2015, 122: 142-152.
- [35] 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.
Li Xuegang, Song Jinming, Yuan Huamao, et al. High contents of biogenic silicate in Jiaozhou Bay sediments—evidence of Si-limitation to phytoplankton primary production [J]. *Oceanologica et Limnologia Sinica*, 2005, 36(6): 572-579.

Biogenic silica in the surface sediment of the Bohai Sea

DAI Zhen-fei^{1, 2}, XUE Yong¹, ZHANG Hai-bo^{1, 2}, TU Chen¹, LUO Yong-ming^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Received: sep. 17, 2016

Key words: Biogenic silica; Sequential extraction; Surface Sediment; Bohai sea

Abstract: The 103-surface sediment samples collected from the Bohai Sea were extracted by 0.1 mol/LHCl and 1%Na₂CO₃ sequentially for the analysis of biogenic silica. The results showed that biogenic silica contents were in the range of 7.3~54.7 g/kg, with an average of 31.5 g/kg. The measured contents of the biogenic silica were higher than other reported values in the same study area. This might be the result of different extraction methods that were employed in the studies, the extraction by 0.1 mol/L HCl may dissolve the oxides plaque coated on the biogenic silica in the sediment and therefore increase the release of the biogenic silica. Spatial distributions of the biogenic silica were characterized using geographic information system (GIS) and the spatial heterogeneity of the biogenic silica was observed in the surface sediments of the Bohai Sea. The highest content located along the coastal marine of Hebei province, in contrast to the lowest content located in the Laizhou Bay. This suggested long-term terrestrial input of nutrient substances and frequent disturbance by the input of the Yellow River sediments may govern the abundance and distribution of biogenic silica in this area. Principal component analysis indicated the contents of biogenic silica had a significantly ($P < 0.01$) positive correlation with the contents of clay, fine sand, total organic nitrogen, and organic carbon in the sediment of the Bohai Sea, which further confirmed the effects of grain size and nutrient substance on the accumulation of biogenic silica in the sediment.

(本文编辑: 康亦兼)