

呼伦湖沉积物生物硅的分布特征

麻涛¹, 何江^{1,2*}, 高际政³, 吕昌伟^{1,2}, 王维^{1,2}, 樊明德^{1,2}, 宋文杰¹, 孙园园¹, 任丽敏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; 3.内蒙古环境监测中心站, 呼和浩特 010011)

摘要:以 Si 的生物地球化学特征为基础, 结合本小组前期研究成果, 探讨了我国纬度最高湖泊呼伦湖沉积物中生物硅(BSi)的分布特征以及有机质与 BSi 的相关性。研究表明, 呼伦湖表层沉积物中 BSi 的含量介于 4.04 ~18.30 mg·g⁻¹ 之间, 平均 11.81 mg·g⁻¹; 受陆源输入和沉积物粒度分异的影响, 呼伦湖表层沉积物中 BSi 的空间分布由北西向南东呈现明显递减趋势, BSi 的高值区出现在北西部湖区。3 个柱芯沉积物中 BSi 的含量均在 10 cm 处达到峰值, 这可能与 20 世纪 60 年代出现的大规模厄尔尼诺现象对湖泊水体中营养盐及藻类繁殖带来的影响有关。沉积物中有机碳与生物硅呈显著正相关关系, OC/BSi 值介于 0.89~7.22 之间, 平均 2.74, 远远小于 Redfield 比值(106/16), 揭示相同条件下, 有机质的分解速率远远大于生物硅的溶解速率, 颗粒物表层有机质对 BSi 起到了很好的保护作用, 使沉积物中 BSi 的大部分不参与再循环。

关键词:生物硅; 沉积物; 有机碳; 分布特征; 呼伦湖

中图分类号:X524 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)04-0832-06

Characteristics of Biogenic Silica Distribution in the Sediment of Hulun Lake

MA Tao¹, HE Jiang^{1,2*}, GAO Ji-mei³, LÜ Chang-wei^{1,2}, WANG Wei^{1,2}, FAN Ming-de^{1,2}, SONG Wen-jie¹, SUN Yuan-yuan¹, REN Li-min¹

(1.College of Environment and Resources, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China; 2.Institute of Environmental Geology, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China; 3.Inner Mongolia Environment Monitoring Center Station, Huhhot 010011, China)

Abstract: On the basis of Biogenic silica(BSi) geochemistry characteristics, the spatial distribution of BSi and the correlation between BSi and TOC in sediments from Hulun Lake were studied in this work. The results showed that BSi concentrations in the surface sediments from Hulun Lake were ranged from 4.04 to 18.30 mg·g⁻¹ with a mean value of 11.81 mg·g⁻¹. In terms of spatial distribution, the concentration of BSi was decreased from northwest to southeast in spatial distribution, and the high-concentration areas were found in the northwest of the lake which might result from terrestrial inputs and particle size fractionation. The maximum concentration values of BSi in sediment cores were observed at 10 cm reflecting the nutrients accumulation and alga bloom in the aquatic environments at this stage, which may be related to the large scale EI Nino in 1960s. Furthermore, the concentration of BSi showed a positive correlation with organic carbon in sediment cores, and the ratios of OC to BSi were in the range of 0.89~7.22 with a mean value of 2.74 which was far less than the Redfield ratio(106/16). All of the mentioned above indicated that the decomposition rate of organic matter was far greater than the dissolution rate of biogenic silica under the same conditions. Accordingly, BSi tended to accumulate in sediments which limited its bio-geochemistry cycle.

Keywords: biogenic silica; sediments; organic carbon; distribution; the Hulun Lake

硅(Si)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^[1]。硅质

浮游植物是水体初级生产力的主要组成部分, 是沉积物生物硅(BSi)的主要来源。沉积物中 BSi 的累积与水体初级生产力有密切关系, 是水生生态系统初级生产力的一个重要指标^[2-3]。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^[4]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

收稿日期: 2011-10-07

基金项目: 国家自然科学基金(40863003); 内蒙古自然科学基金; 内蒙古大学“科技创新团队”基金

作者简介: 麻涛(1986—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 硕士, 主要研究方向为环境地球化学。

* 通讯作者: 何江 E-mail: ndjhe@imu.edu.cn

性指标以及追踪古气候环境变化的有效手段^[4-6]。本文以我国纬度最高的湖泊呼伦湖为研究对象,以 Si 的生物地球化学特征为基础,结合本小组前期研究成果,探讨了呼伦湖沉积物中 BSi 的空间分布特征以及有机质和 BSi 的相关性,以期为高纬度湖泊生源要素的生物地球化学循环研究积累基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

呼伦湖(达赉湖)是亚洲中部干旱区最大的淡水湖,也是我国纬度最高的湖泊^[7],已列入国际重点湿地名录并被联合国教科文组织接纳为世界生物圈保护区。呼伦湖是我国东北部重要的淡水渔业水域,也是我国东北部以保护草原生态、湿地系统和珍稀濒危鸟类为主的综合自然保护区,与大兴安岭共同构成了我国北方的生态屏障。湖区位于呼伦贝尔草原西部新巴尔虎左旗、新巴尔虎右旗和满洲里市之间(N48°33′~49°20′,E116°58′~117°48′)。呼伦湖水系由呼伦湖、哈拉哈河、贝尔湖、乌尔逊河、克鲁伦河及连通于呼伦湖与额尔古纳河的新开河(达兰鄂罗木河)等组成,主要补给水源为源于蒙古国东部的克鲁伦河、连接贝尔湖和呼伦湖的乌尔逊河以及海拉尔河,排泄河流为中俄界河-额尔古纳河,并经额尔古纳河

外流入鄂毕湾^[8]。呼伦湖共有浮游植物 142 种,隶属 8 门、22 目、40 科,其中绿藻门 69 种,硅藻门 29 种,蓝藻门 27 种,裸藻门 5 种,甲藻门 3 种,隐藻门 2 种,黄藻门 4 种,金藻门 3 种,以绿藻、蓝藻和硅藻为优势种。浮游植物平均生物量为 $6.995 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[9]。呼伦湖历史最大蓄水量 138.5 亿 m^3 ,最大面积超过 2 300 km^2 ^[10]。近 40 余年来,由于气候变化和人类活动的影响,呼伦湖水位逐年下降,水域面积不断减小,湿地萎缩,致使周边生态环境和湖水水质严重恶化,湖水总含盐量和 pH 值逐年升高,湖周大面积芦苇消失,渔业资源濒临枯竭,大量珍稀鸟类迁移^[11]。

1.2 样品采集

依据《湖泊生态系统观测方法》,于 2008 年 8 月对呼伦湖进行了系统的现场监测和样品采集(图 1)。沉积物样品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。沉积物样品装入封口聚乙烯塑料袋冷藏保存,带回实验室于 -24°C 冷冻保存。采样站位用 GPS 定位。

1.3 分析方法及数据处理

BSi 采用改进的 DeMaster 连续提取法^[12-16]测定,每个样品设 3 个平行样,相对标准偏差均小于 10%。有机质总量(TOC)采用重铬酸钾氧化外加热法测定,

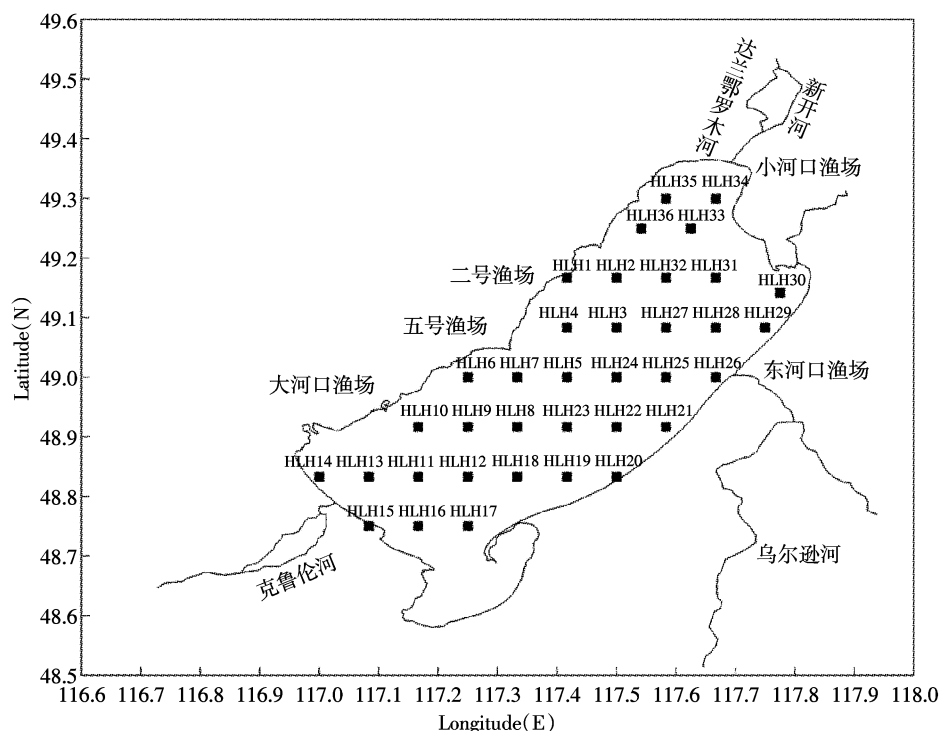


图 1 呼伦湖采样站位分布图

Figure 1 Locations of sampling points in the Hulun Lake

为本小组前期研究成果。沉积物中各指标的空间分布图均用 Surfer 7.0 完成,相关性分析用 SPSS 16 完成,其他数据处理均用 Excel 2003 完成。

2 结果与讨论

2.1 表层沉积物中生物硅的含量与分布

表层沉积物中 BSi 的含量介于 $4.04 \sim 18.30 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间,平均 $11.81 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (图 2)。空间分布上,表层沉积物中 BSi 的含量由北西向南东呈现明显的递减趋势,BSi 的高值区出现在北西部湖区。已有研究表明,呼伦湖上覆水中硅藻类浮游植物的分布同样表现为北西比南东繁盛^[9],与表层沉积物中 BSi 的空间分布呈现一定的同步性。

硅质浮游植物是水体初级生产力的重要组成部分,是沉积物中 BSi 的主要来源。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 $\text{Si}(\text{OH})_4$ 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。外源 Si 输入可极大地促进硅藻类浮游植物的初级生产力,浮游植物对 Si 的同化作用可使上层水体中 Si 的含量降低并转移至沉积物中。通常认为,河流湖泊中的溶解性硅(DSi)主要源于流域岩石土壤的风化作用^[7]。影响流域岩石土壤风化作用的主要因素包括河流径流量、地形地貌、气候、岩性和植被等,高降水量下风化作用明显加剧^[8]。克鲁伦河和乌尔逊河是呼伦湖的最大补给水源。乌尔逊河全长 223 km,流域面积 $5\,980.70 \text{ km}^2$,占呼伦湖流域总面积的 2.96%,流域地形平缓;克鲁伦河发源于蒙古国

肯特山南麓,全长 1 264 km,流域面积 $99\,786.31 \text{ km}^2$,占呼伦湖流域总面积的 49.39%,流域地形较陡^[10]。此外,乌尔逊河 6—9 月多年平均降水量小于克鲁伦河^[9]。2000 年至今,两条河流的水量均出现了有历史记载以来的最小值,平均径流量均不足 $2 \times 10^9 \text{ m}^3$,2008 年乌尔逊河全线断流^[10]。河流全长、流域面积、流域地形地貌及降水量等的较大差异,导致克鲁伦河与乌尔逊河流域岩石土壤风化侵蚀作用和地表淋溶作用强度不同,由此导致两条河流携带的营养盐入湖量不同,进而导致硅藻类浮游植物及表层沉积物中 BSi 空间分布的差异性。

此外,湖区常年盛行西北风,北部以半干旱草原为主,风力作用下大量干草入湖,从而提高了湖区北部的营养水平。已有研究表明,沉积物颗粒越细越有利于 BSi 的赋存与累积^[14]。呼伦湖北西部湖区的沉积物主要由粉砂质粘土组成,南部和东部主要为砂质沉积^[20],沉积物粒度的空间分异性是导致呼伦湖表层沉积物中 BSi 含量空间分异的又一原因。

2.2 柱芯沉积物中生物硅的分布特征

柱芯沉积物中 BSi 的含量变化可能与湖泊自然特征、沉积环境及人类活动等有关。研究表明,采自南部湖心区(HLH8)、中部湖心区(HLH3)和北部湖区(HLH36,见图 1)等不同湖区 3 个柱芯沉积物中 BSi 的含量随深度的变化具有阶段同步性,均在 10 cm 处达到峰值(图 3)。已有研究表明^[20],10 cm 以上深度范围内,呼伦湖的沉积速率为 $0.25 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。据此估算,10 cm 深度处代表的生物硅埋藏年代为 20 世纪 60 年代。

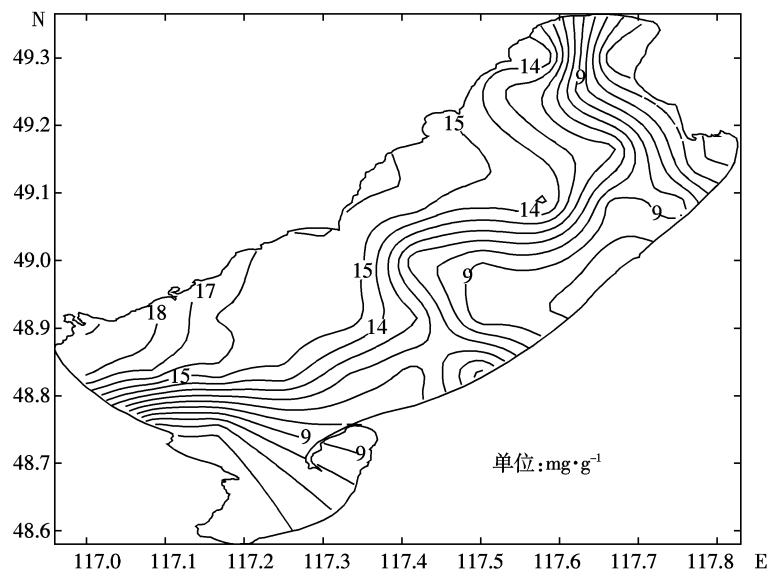


图 2 呼伦湖表层沉积物生物硅水平分布格局

Figure 2 Patter of horizontal distribution of BSi in the Hulun Lake surface sediment

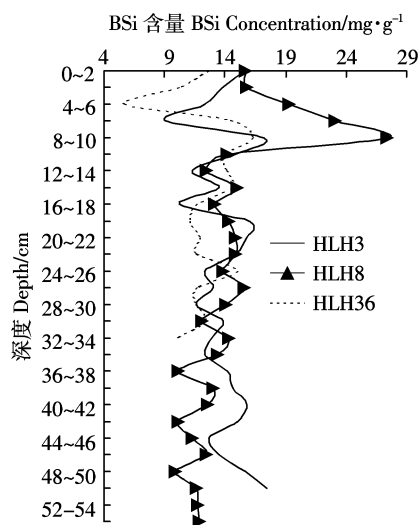


图 3 呼伦湖柱芯沉积物中生物硅的含量

Figure 3 Concentration of biogenic silica in the Hulun Lake sediment cores

已有研究揭示,厄尔尼诺现象对水体中营养盐及藻类繁殖均有一定影响^[21-22]。呼伦湖硅藻优势种为舟形藻^[9],适宜温度为 5~35 ℃。气象资料表明,呼伦湖地区多年平均气温为-0.24 ℃^[10],而 1968 年年均温度接近 2 ℃,是 60 年代同期的最高温度^[23]。适宜温度范围内,温度升高,硅藻细胞内的化学和酶促反应均以较快速度进行,温度又通过影响水体中各类营养物质的溶解度、离解度或分解率等理化过程而间接影响藻类的生长^[24]。10 cm 深度处代表的生物硅埋藏年代为 1968 年,与近百年来呼伦湖最高水位相对应。大规模的厄尔尼诺现象可能是导致呼伦湖柱芯沉积物在 10 cm 处出现峰值的主要原因之一。

2.3 生物硅和有机碳的相关性分析

硅是控制海洋碳循环的重要因素之一,它通过控制海洋中硅藻等浮游植物的生长而控制生物泵对碳的吸收和释放。沉积物 BSi 的来源和保存均与有机质存在密切关系^[25]。沉积物 BSi 的溶解主要依赖于沉积物间隙水和上覆水中 $\text{Si}(\text{OH})_4$ 的饱和度、pH、温度、有机质含量以及颗粒物表层有机质的保护等条件。

研究表明,呼伦湖沉积柱芯中 BSi 与 TOC 存在显著正相关关系(图 4),相关性分别达 $R^2=0.54$ 和 $R^2=0.51$,表明沉积物中 BSi 与 TOC 有明显依赖关系,BSi 较好地反映了湖泊硅藻类浮游植物的初级生产力。此外,沉积物中 OC/BSi 比值介于 0.89~7.22 之间,平均 2.74(表 1),小于 Redfield 比值(106/16)^[26],表明呼伦湖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

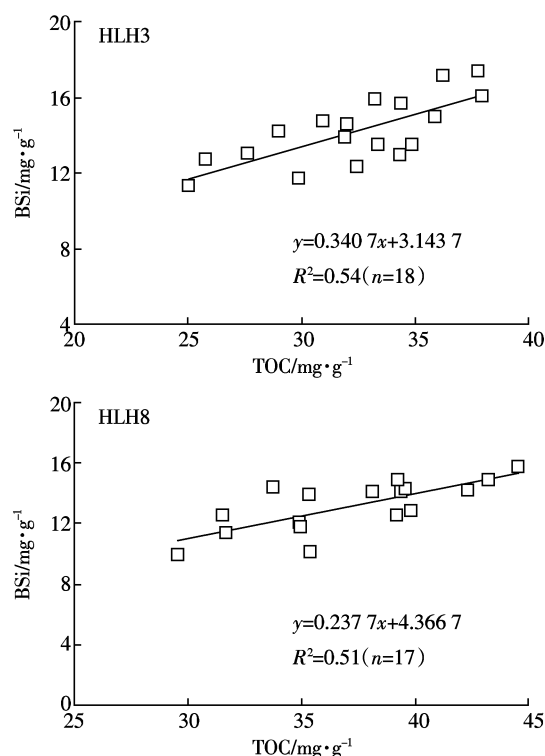


图 4 呼伦湖柱芯沉积物中生物硅和有机碳的相关性

Figure 4 Correlation between BSi and TOC in the sediment cores

表 1 呼伦湖沉积物中 OC:BSi

Table 1 Ratios of OC:BSi in the sediments from the Hulun Lake

样点	统计项	OC:BSi
表层沉积物	最大值	7.22
	最小值	0.89
	平均值	3.09
HLH3 柱芯	最大值	2.65
	最小值	2.03
	平均值	2.29
HLH8 柱芯	最大值	3.50
	最小值	2.35
	平均值	2.85

率较 BSi 快,使 BSi 在沉积物中累积而不再参与 Si 的生物地球化学循环。

3 结论

(1)呼伦湖表层沉积物中 BSi 的含量介于 4.04~18.30 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间,平均 11.81 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$,表层沉积物中 BSi 的分布表现明显的空间分异性,西北部湖区为高值区。这可能与主要入湖河流克鲁伦河和乌尔逊河流域岩石土壤风化侵蚀和地表淋溶作用强度的差异及沉积物粒度分异的影响有关。

(2)10 cm 深度处代表的生物硅埋藏年代为 20 世纪 60 年代,与近百年来呼伦湖最高水位相对应,推测与 20 世纪 60 年代发生的厄尔尼诺现象有关。大规模的厄尔尼诺现象对湖泊水位、温度、营养盐及藻类繁殖等均有一定影响。

(3)呼伦湖沉积物中有机碳与生物硅呈显著正相关关系,OC/BSi 值介于 0.89~7.22 之间,远小于 Red-field 比值(106/16),表明相同条件下有机质的分解速率远远大于生物硅的溶解速率,颗粒物表层有机质对 BSi 起到了很好的保护作用,使沉积物中 BSi 的大部分不参与再循环。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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 relation ship to biogenic sedimentation[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(3): 359-372.
- [3] 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.
- [4] Romero O, Hebbeln D. Biogenic silica and diatom thanatocoenosis in surface sediments below the Peru-Chile Current controlling mechanisms and relation ship with productivity of surface waters[J]. *Marine Micropaleontology*, 2003, 48(1-2): 71-90.
- [5] 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.
HUANG Yong-jian, WANG Cheng-shan, WANG Yun-liang. Progress in the study of proxies of paleocean productivity[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(2): 163-170.
- [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(1-4): 5-27.
- [7] 徐占江. 呼伦湖志[M]. 长春: 长春吉林文史出版社, 1989.
XU Zhan-jiang. Record of Hulun Lake[M]. Changchun: Changchun Literature and History Press, 1989.
- [8] 赵慧颖, 乌力吉, 郝文俊. 气候变化对呼伦湖湿地及其周边地区生态环境演变的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(3): 1064-1071.
ZHAO Hui-ying, WU Li-ji, HAO Wen-jun. Influences of climate change to ecological and environmental evolvement in the Hulun Lake wetland and its surrounding areas [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 1064-1071.
- [9] 姜忠峰, 李畅游, 张 生, 等. 呼伦湖浮游植物调查与营养状况评价[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(4): 726-732.
JIANG Zhong-feng, LI Chang-you, ZHANG Sheng, et al. Phytoplankton and nutrition evaluation in Hulun Lake[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(4): 726-732.
- [10] 孙 标. 基于空间信息技术的呼伦湖水量动态演化研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010.
SUN Biao. The dynamic change of water based on spatial information technology for Hulun Lake in Inner Mongolia[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2010.
- [11] 韩向红, 杨 持. 呼伦湖自净功能及其在区域环境保护中的作用分析[J]. *自然资源学报*, 2002, 17(6): 684-690.
HAN Xiang-hong, YANG Chi. An analysis of the self-purification function of Hulun Lake and its effect on regional environmental conservation[J]. *Journal of Natural Resource*, 2002, 17(6): 684-690.
- [12] 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.
YE Xi-wen, LIU Su-mei, ZHAO Ying-fei, et al. The distribution of biogenic silica in the sediments of the East China Sea and the Yellow Sea and its environmental[J]. *China Environmental Science*, 2004, 24(3): 265-269.
- [13] 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.
LIU Min, HOU Li-jun, XU Shi-yuan, et al. Simulation study on the transfer and transformation processes of nutrient under the exposure-immersion pattern of intertidal flat sediments[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(1): 169-175.
- [14] 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.
- [15] 韩舞鹰. 海水化学要素调查手册[M]. 北京: 海洋出版社, 1986.
HAN Wu-ying. Handbook of chemical elements of water survey [M]. Beijing: Ocean Press, 1986.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 李晶莹, 张 晶. 流域盆地的风化作用与全球气候变化[J]. *地球科学进展*, 2002, 17(3): 411-418.
LI Jing-ying, ZHANG Jing. Weathering of watershed basins and global climatic change[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17(3): 411-418.
- [19] 王文华, 朱 添. 呼伦贝尔草原地区水文特性分析[J]. *东北水利水电*, 2011, 7: 41-43.
WANG Wen-hua, ZHU Tian. Analysis of hydrological characteristics for Hulunbeier grassland area[J]. *Water Resources & Hydropower of Northeast*, 2011, 7: 41-43.
- [20] 吉 磊, 夏威夷, 项 亮, 等. 内蒙古呼伦湖表层沉积物的矿物组成和沉积速率[J]. *湖泊科学*, 1994, 6(3): 228-231.
JIE Lei, XIA Wei-lan, XIANG Liang, et al. Mineral composition and sedimentation rate of surficial sediments in Hulun Lake, Inner Mongolia[J]. *Journal of Lake Sciences*, 1994, 6(3): 228-231.
- [21] 赵颖翡, 刘素美, 叶曦雯, 等. 黄、东海柱状沉积物中生物硅含量的分析[J]. *中国海洋大学学报*, 2005, 35(3): 423-428.
ZHAO Ying-fei, LIU Su-mei, YE Xi-wen, et al. The analysis of biogenic silica in the sediments of the East China Sea and the Yellow Sea

- [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2005, 35(3):423–428.
- [22] 郑玉龙, 王汝建, 郑连福, 等. 南海北部 1987—1988 年颗粒物质和硅藻通量的季节性变化: 季风气候与 El Nino 的响应[J]. 第四纪研究, 2001, 21(4):359–365.
- ZHENG Yu-long, WANG Ru-jian, ZHENG Lian-fu, et al. Seasonal variations of particulate matter and diatom fluxes in the northern South China Sea during 1987—1988: Monsoon climate and El Nino responses [J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(4):359–365.
- [23] 黄晓慧, 赵慧颖, 刘 丽, 等. 满洲里地区城市变化对气候资料准确性影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(25):13868–13870.
- HUANG Xiao-hui, ZHAO Hui-ying, LIU Li, et al. Influence of city change on the accuracy of climatic data in Manzhouli [J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2010, 38(25):13868–13870.
- [24] 刘杨平, 黄迎春, 王鹤立. 浅谈环境因子对硅藻生长的影响[J]. 科技信息, 2009, 33:725–726.
- LIU Yang-ping, HUANG Ying-chun, WANG He-li. The impact of environmental factors on the growth of diatoms [J]. *Science & Technology Information*, 2009, 33:725–726.
- [25] 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.
- [26] 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):573–577.
- LI Xue-gang, SONG Jin-ming, YUAN Hua-mao, et al. High contents of biogenic silicate in Jiaozhou Bay sediments: Evidence of Si-limitation to phytoplankton primary production [J]. *Oceanologiae Limnologia Sinica*, 2005, 36(6):573–577.