

白令海表层沉积物中硅质生物的变化及其环境控制因素

王汝建¹, 陈荣华²

1. 同济大学教育部海洋地质重点实验室, 上海 200092

2. 国家海洋局海底科学重点实验室, 浙江杭州 310012

摘要: 中国首次北极科学考察在白令海采取了 12 个表层沉积物样品, 其中对硅质生物和陆源碎屑的详细研究发现, 它们主要由硅藻、放射虫和海绵骨针组成。其中, 硅藻在样品中的丰度均占绝对优势, 高出放射虫和海绵骨针一个数量级。它们与环境控制因素关系的分析表明, 硅藻、放射虫和海绵骨针丰度的高低及其保存程度与深度、温度、盐度和受大规模季节性气候变化控制的表层海水的高营养和高生产力, 以及陆源物质输入的变化密切相关。这一研究结果对白令海第四纪的古气候与古海洋学研究具有十分重要的意义。

关键词: 表层沉积物; 硅质生物丰度; 环境控制因素; 白令海。

中图分类号: P53

文章编号: 1000—2383(2004)06—0685—06

收稿日期: 2004—04—09

Variations of Siliceous Microorganisms in Surface Sediments of the Bering Sea and Their Environmental Control Factors

WANG Ru-jian¹, CHEN Rong-hua²

1. Laboratory of Marine Geology of MOE, Tongji University, Shanghai 200092, China

2. Key Laboratory of Submarine Geoscience, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China

Abstract: Based on the quantitative studies of siliceous microorganisms and terrestrial detritus in 12 surface sediment samples, which were recovered by the First Chinese National Arctic Expedition team, in the Bering Sea, it goes without saying that diatom abundance is dominant within the microorganisms which consists of diatoms, radiolarians and sponge spicules. The relationship between the microorganisms and environmental control factors, for example, water depth, temperature and salinity are analyzed and discussed. It is evident that their abundance change and preservation are associated closely with these environmental control factors, and high surface nutrient and productivity controlled by the variations of large scale seasonal climate and input of terrestrial detritus. This investigation is very significant for the further studies on paleoclimate and paleoceanography in the Bering Sea.

Key words: surface sediments; siliceous microorganism abundance; environmental control factor; the Bering Sea.

白令海是北太平洋最大的边缘海, 属现代高生产力海区, 钙质浮游生物缺乏, 而硅质浮游生物却很丰富。白令海位于太平洋和北冰洋之间, 对太平洋海水输入北冰洋起着重要的调节作用, 因而越来越受到学术界的关注。然而, 白令海表层沉积物的研究只

有少量报道(Gardner *et al.*, 1980, 1982; Naidu *et al.*, 1982), 尤其是硅质生物, 即硅藻和放射虫的研究相当薄弱。硅藻的研究始于 20 世纪 80 年代, SANCETA 及其合作者(1981, 1983a, 1983b, 1985)详细研究了白令海表层沉积物和柱状样中的硅藻, 并探

讨了它们的古环境意义. Bailey(1856)首次报道了浮游生物样品中的 13 个放射虫属种,20 世纪 50 年代前苏联学者分析了浮游生物样品中的放射虫(Dogiel and Reshetnyak, 1952; Reshetnyak, 1966). 而表层沉积物和柱状样中放射虫的研究始于 20 世纪 70 年代(Ling *et al.*, 1970; Ling, 1973; Nigrini, 1970; Robinson, 1975; Blueford, 1981, 1983; 程振波等, 2000). 近年来颗粒通量的研究揭示了白令海在全球碳循环中的重要性(Takahashi *et al.*, 2000, 2002). 本文根据 1999 年中国首次北极科学考察在白令海所采取的 12 个表层样中硅质生物丰度的研究,探讨它们的环境控制因素,为白令海第四纪的古海洋学研究提供依据.

1 材料与方法

本文研究的 12 个表层沉积物样品是 1999 年中国首次北极科学考察船“雪龙”号在白令海采取的(中国首次北极科学考察队, 2000). 它们的位置、水深及温、盐数据见表 1 和图 1. 样品的处理和薄片的制备是在同济大学海洋地质开放实验室完成的,方法见文献 Abelmann *et al.* (1999)和 Wang *et al.* (2003). 根据表层沉积物中硅质生物的溶解作用研究(Johnson, 1976),硅藻较放射虫易溶解,而放射虫较海绵骨针易溶解. 最抗溶的是海绵骨针,放射虫中等,最易溶的是硅藻(Johnson, 1974). 因而本文特提出用硅藻碎壳率(%) $[= \text{破碎壳}/(\text{破碎壳} + \text{完整壳})]$ 、放射虫/硅藻和海绵骨针/放射虫的比值来

表 1 白令海表层沉积物站位位置、水深、温度和盐度
Table 1 Location, water depth, temperature and salinity of surface sediments in the Bering Sea

站位	经度(W)	纬度(N)	水深/m	温度/℃	盐度/ 10^{-3}
B1-9	179°25'44"	60°15'42"	840	3. 19	34. 23
B1-10	179°03'52"	60°24'59"	516		
B1-11	178°44'09"	61°31'40"	235		
B1-12	178°18'34"	60°39'51"	165	1. 14	32. 97
B1-13	177°05'44"	60°55'04"	140		
B2-3	179°21'22"	57°38'01"	3 850	1. 62	34. 65
B2-9	178°41'50"	59°17'32"	2 200	1. 85	34. 60
B2-10	178°27'00"	59°29'00"	420		
B2-11	178°10'50"	59°33'08"	180		
B2-12	177°50'45"	59°42'57"	162	1. 90	33. 08
B5-9	175°58'56"	58°34'13"	139		
B5-10	175°33'29"	58°39'55"	180	2. 34	33. 05

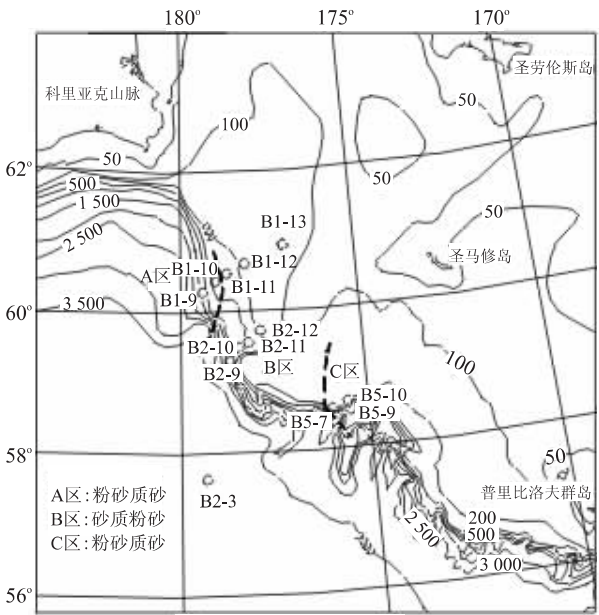


图 1 白令海表层沉积物站位

Fig. 1 Location of surface sediments in the Bering Sea

指示硅质生物在沉降过程中和到达海底后的溶解作用和保存状况. 另外,还统计了样品中的陆源碎屑(石英和岩屑颗粒)、火山灰和碳屑的丰度.

2 硅质生物丰度及其分布特征

白令海表层沉积物中的硅质生物主要由硅藻、放射虫和海绵骨针组成,其中硅藻的丰度占绝对优势,高出放射虫和海绵骨针一个数量级. 放射虫丰度次之,海绵骨针第三. 由图 2 和表 2 可以看出,硅藻在几乎所有的站位都很丰富,而放射虫和海绵骨针只在个别站位有较高的丰度. 三者均在 B2-3、B2-9 和 B5-10 站位有较高的丰度,除 B5-10 站位水深 180 m 外, B2-3 和 B2-9 站位水深都在 2 000 m 以上. 似乎水越深三者的丰度越高,水越浅三者的丰度越低. 除站位 B5-10 外,硅藻碎壳率的变化与硅藻丰度呈相反的趋势,丰度相对高的站位碎壳率较低,而丰度相对低的站位碎壳率较高. B2-3 和 B1-13 站位分别有相对较高的放射虫/硅藻比值和海绵骨针/放射虫比值,充分显示了较好的放射虫和海绵骨针保存程度.

3 硅质生物分布的控制因素

现代大洋中表层水生产力高的海区往往以海底

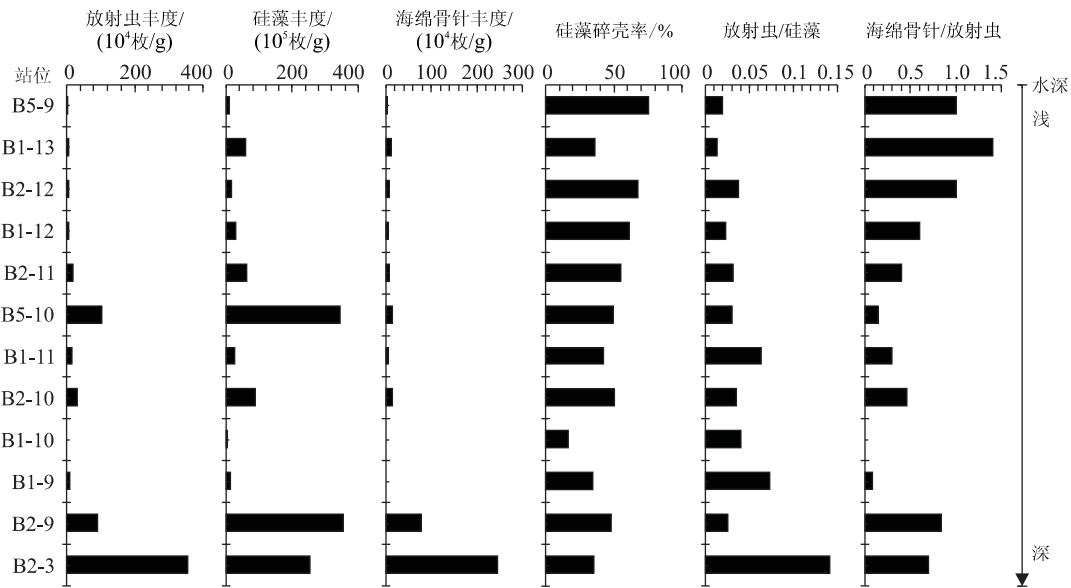


图 2 白令海各站位表层沉积物中硅质生物丰度及其保存状况

Fig. 2 Abundance and preservation of siliceous microorganisms in surface sediments of the Bering Sea

表 2 白令海表层沉积物中硅质生物丰度及其保存状况
Table 2 Abundance and preservation of siliceous microorganisms in surface sediments of the Bering Sea

站位	水深/m	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
B1—9	840	10	136	1	35	0.073	0.08
B1—10	516	1	20	0	17	0.040	0.00
B1—11	235	17	269	5	42	0.063	0.29
B1—12	165	7	286	4	62	0.023	0.60
B1—13	140	8	588	11	36	0.013	1.40
B2—3	3 850	356	2 526	246	35	0.141	0.69
B2—9	2 200	92	3 558	78	48	0.026	0.84
B2—10	420	32	893	14	50	0.035	0.46
B2—11	180	20	606	8	55	0.032	0.40
B2—12	162	6	159	6	67	0.037	1.00
B5—9	139	2	106	2	75	0.019	1.00
B5—10	180	103	3 433	15	50	0.030	0.14

x_1 . 放射虫丰度/(10^4 枚/g); x_2 . 硅藻丰度/(10^4 枚/g); x_3 . 海绵骨针丰度/(10^4 枚/g); x_4 . 硅藻碎壳率/%; x_5 . 放射虫/硅藻; x_6 . 海绵骨针/放射虫.

富生物硅质软泥为特征,而这些富生物硅质软泥的海区主要分布在高纬度的两极、赤道和上升流海区(Lisitzin, 1972). 两极海区以硅藻占优势,赤道海区以放射虫占优势. 但某一特定海区表层沉积物中硅质生物丰度的高低可能会受到多种环境因素的影响. 这里将根据有关的温度和盐度资料探讨白令海表层沉积物中硅质生物的分布与环境因素的关系.

白令海表层沉积物中硅质生物丰度与深度和温度的关系(图 3)显示,放射虫和海绵骨针丰度与深度正相关性较好,相关系数均达到 0.9,而硅藻与深

度的相关系数是 0.6,说明水越深硅质生物丰度越高. 硅藻碎壳率与深度呈负相关,相关系数为-0.3,说明水深硅藻碎壳率低,保存好;水浅硅藻碎壳率高,保存差. 放射虫/硅藻比值与深度呈正相关,相关系数为 0.8,说明水越深放射虫的保存比硅藻越好. 海绵骨针/放射虫比值与深度几乎不相关. 由图 1 和表 1 可以看出,大部分站位在陆坡上,只有个别站位在陆架上和海盆内. 陆架和陆坡受到陆源物质输入的影响,而较高的陆源物质的输入速率相反地会影响海底表层沉积物中生物蛋白石的保存(Calvert, 1974). 这说明水越深硅质生物丰度越高,保存也较好;水越浅硅质生物丰度越低,保存也较差.

硅质生物丰度与温度的关系(图 3)显示,放射虫和海绵骨针与温度呈弱负相关,相关系数分别为-0.2 和-0.3,即温度越低两者的丰度越高,说明温度控制着两者的生产力. 硅藻和放射虫/硅藻比值与温度几乎不相关. 硅藻碎壳率和海绵骨针/放射虫比值均与温度呈负相关,相关系数分别为-0.5 和-0.7,说明温度越低硅藻的保存越差,而海绵骨针却增加了,说明溶解海水中的作用增强.

硅质生物丰度与盐度的关系(图 4)显示,放射虫、硅藻、海绵骨针与盐度呈正相关,相关系数分别为 0.6,0.4 和 0.7,说明越接近正常盐度,三者的丰度越高. 因为盐度的变化与大陆淡水的注入有关,越靠近大陆,盐度越低;远离大陆,盐度逐渐正常. 海绵骨针/放射虫比值与盐度几乎不相关. 硅藻碎壳率与

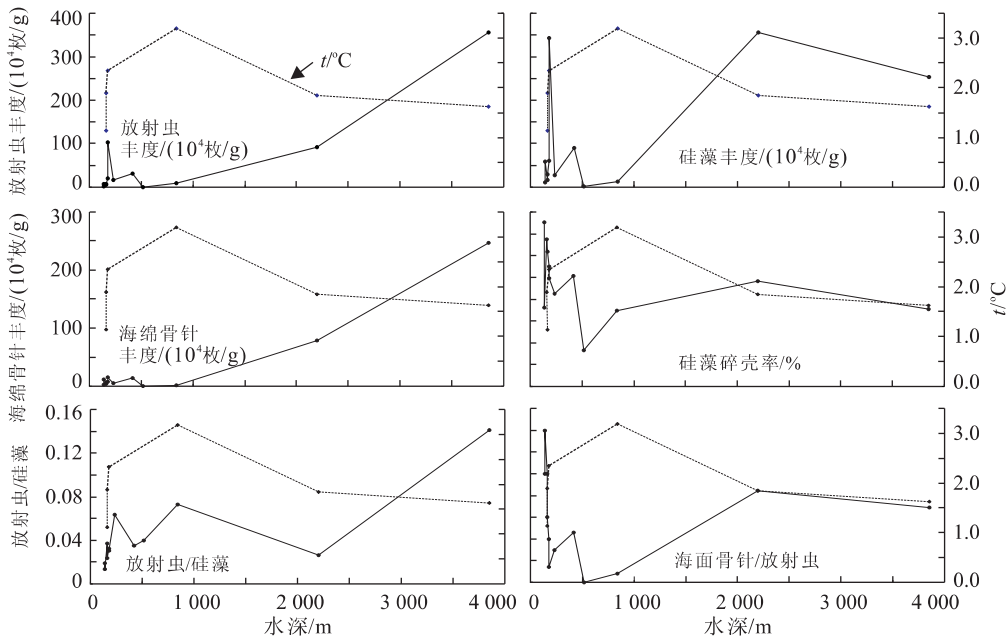


图 3 白令海各站位表层沉积物中硅质生物和深度与温度的关系

Fig. 3 Relationship between siliceous microorganisms and water depth and temperature in surface sediments of the Bering Sea

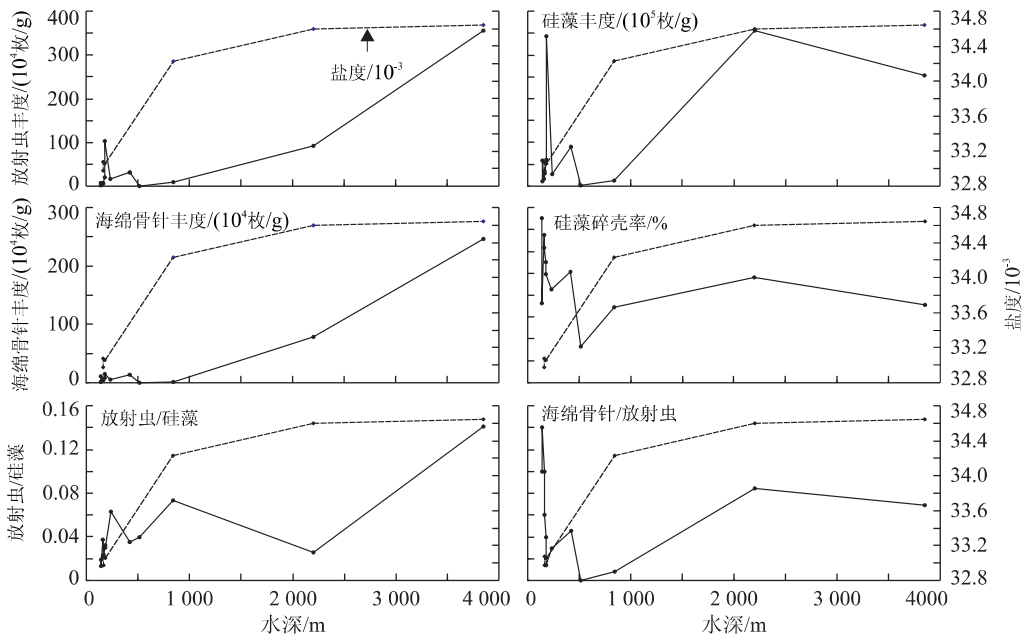


图 4 白令海各站位表层沉积物中硅质生物和深度与盐度的关系

Fig. 4 Relationship between siliceous microorganisms and water depth and salinity in surface sediments of the Bering Sea

盐度呈负相关,相关系数为 -0.8 ,说明盐度越低硅藻保存越差.放射虫/硅藻比值与盐度呈正相关,相关系数为 0.6 ,说明盐度越高放射虫的数量越多.

综合以上分析表明:水越深,硅质生物含量越高,水越浅,硅质生物含量越低;温度越低,硅质生物含量越高,温度越高,硅质生物含量越低;盐度越高,

硅质生物含量越高,盐度越低,硅质生物含量越低.水浅,温度高,盐度低,硅质生物的溶解作用强,保存差;水深,温度低,盐度高,硅质生物的溶解作用弱,保存好.

除以上因素外,影响白令海表层沉积物中硅质生物分布的一个重要因素是表层水的营养和生产

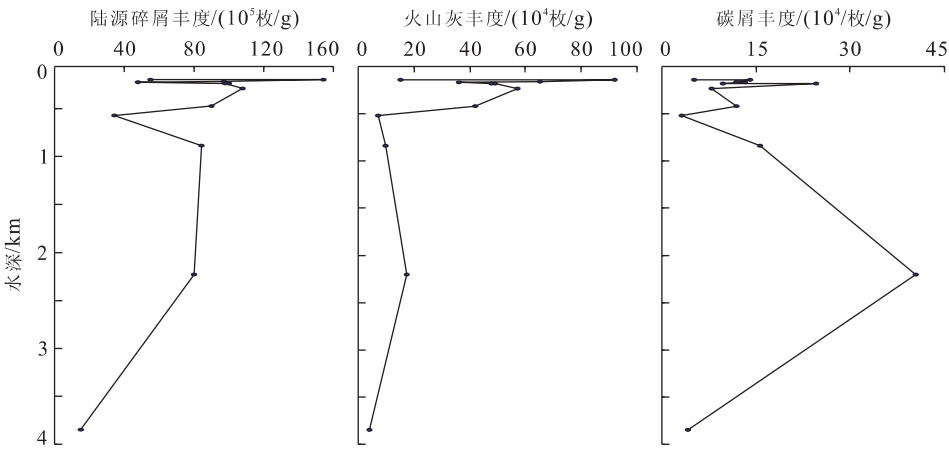


图 5 白令海各站位表层沉积物中陆源碎屑、火山灰和碳屑的丰度变化

Fig. 5 Variations of abundance in terrestrial, volcanic and charcoal detritus in surface sediments of the Bering Sea

力. 现代白令海表层水的高营养和高生产力为海底提供了较高的硅质生物壳体的输入速率(Niebauer *et al.*, 1995),从而提高了表层沉积物中硅质生物的丰度(Springer *et al.*, 1996). 而连续 10 年颗粒通量的研究显示,白令海的颗粒通量在春、夏两季达到最高峰,表层生产力是远洋海区的 2 倍,并且表层生产力的变化受大规模的季节性气候变化的控制(Takahashi *et al.*, 2000, 2002).

另外一个因素是海底沉积物中空隙水对硅质生物壳体的溶解作用,空隙水的溶解作用又与陆源沉积物的输入和颗粒大小密切相关(Calvert, 1974). 陆坡和陆架上的陆源沉积物颗粒较海盆中的沉积物颗粒粗,如图 5 所示,到达海盆的陆源碎屑颗粒较少,而且较细. 因而,陆坡和陆架上的空隙水溶解作用较海盆强. 表层沉积物中的碳屑主要来自于阿拉斯加陆上植被的天然野火(Joly *et al.*, 2002),碳屑被风和河流携带至白令海,并沉积下来. 图 5 中,水深 2 200 m 处的碳屑高峰可能与沿陆坡逆时针洋流的携带有关. 因此,沉积物中的碳屑是陆上气候变化和天然野火历史的标志(Wang *et al.*, 2003),对白令海第四纪的古气候与古海洋学研究具有十分重要的意义.

4 结论

对白令海 12 个站位表层沉积物中硅质生物丰度和陆源碎屑的详细研究发现,硅质生物主要由硅藻、放射虫和海绵骨针组成,其中硅藻在各站位的含量均占绝对优势,高出放射虫和海绵骨针一个数量

级. 硅质生物丰度与环境控制因素关系的分析说明,硅藻、放射虫和海绵骨针丰度的高低及其保存程度与深度、温度、盐度和表层水生产力的变化密切相关. 水越深,温度越低,盐度越高,硅质生物含量越高,保存程度也越好,反之,则硅质生物含量越低,保存程度也越差. 同时,受大规模季节性气候变化控制的表层海水的高营养和高生产力,以及陆源物质的输入也是重要的环境控制因素. 这一研究对白令海第四纪的古海洋学研究具有十分重要的意义.

参加此项工作的单位有中国极地研究中心、国家海洋局第一研究所、国家海洋局第二研究所等. 参加中国首次北极科学考察地质组和物理海洋组的成员包括李秀珠、程振波、高爱国、李亮、郑风武、赵进平、高郭平、矫玉田、吉国、罗宇忠等,在此一并致谢.

References

Abelmann, A., Brathauer, U., Gersode, R., et al., 1999. Radiolarian-based transfer function for the estimation of sea-surface temperatures in the Southern Ocean (Atlantic sector). *Paleoceanography*, 14 (3): 410—421.

Bailey, J. W., 1856. Notice of microscopic forms found in soundings in the Sea of Kamchatka. *American Journal of Science Arts*, 13: 1—6.

Blueford, J. R., 1981. Radiolaria from the Navarin basin. In: Carlson, P., Karl, H., eds., *Sea floor geologic hazards, sedimentology, and bathymetry: Navarin basin province, northwest Bering Sea*. U. S. Geological Survey Open-file Report, 81—1217: 130—137.

Blueford, J. R., 1983. Distribution of Quaternary radiolarian in the Navarin basin geologic province, Bering Sea. *Deep-Sea Research*, 30(7A): 763—781.

- Calvert, S. E., 1974. Deposition and diagenesis of silica in marine sediments. In: Hsü, K. J., Jenkyns, H. C., eds., *Pelagic sediments: On land and under the sea*. Spec. Publs Int. Ass. Sediment. 1: 273—299. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Cheng, Z. B., Shi, X. F., Gao, A. G., et al., 2000. Radiolaria fossils of the surface sediments in the Bering Sea and its sedimentary environment. *Chinese Journal of Polar Research*, 12(1): 24—31 (in Chinese with English abstract).
- Dogiel, V. A., Reshetnyak, V. V., 1952. Material on radiolarians of northwestern part of the Pacific Ocean. *Investigations of the Far East Sea, USSR*, 3: 5—35.
- Gardner, J., Dean, W., Vallier, T., 1980. Sedimentology and geochemistry of surface sediments, outer continental shelf, southern Bering Sea. *Marine Geology*, 34: 299—330.
- Gardner, J., Dean, W., Klise, D., 1982. A climate-related oxidizing event in deep-sea sediment from the Bering Sea. *Quaternary Research*, 18: 91—107.
- Johnson, T. C. Jr., 1974. The dissolution of siliceous microfossils in surface sediments of the eastern tropical Pacific. *Deep-Sea Research*, 21: 851—864.
- Johnson, T. C., 1976. Controls on the preservation of biogenic opal in sediments of the eastern Tropical Pacific. *Science*, 192: 887—890.
- Joly, K., Adams, L., 2002. Evaluating the impacts of wildland fires on Caribou in interior Alaska. *Arctic Research*, 2: 63—67.
- Ling, H. Y., Stadum, C. J., Welch, M. L., 1970. Polycystine Radiolaria from Bering Sea surface sediment. In: *Proceedings of the II planktonic conference*. Edizioni Technoscienza, Roma, 705—729.
- Ling, H. Y., 1973. Radiolaria: Leg 19. Initial reports of the Deep Sea Drilling Project, Vol. 19. U. S. Government Printing Office, Washington, 777—797.
- Lisitzin, A. P., 1972. Sedimentation in the world ocean. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication*, 17: 149—162.
- Naidu, A., Creager, J., Mowatt, T., 1982. Clay mineral dispersal patterns in the north Bering and Chukchi Seas. *Marine Geology*, 47: 1—15.
- Niebauer, H., Alexander, V., Henrichs, S., 1995. A time-series study of the spring bloom at the Bering Sea ice edge I. Physical processes, chlorophyll and nutrient chemistry. *Continental Shelf Research*, 15(15): 1850—1877.
- Nigrini, C., 1970. Radiolarian assemblages in the North Pacific and their applications to a study of Quaternary sediments in core V 20—130. *Geological Society of America Memoir*, 126: 139—183.
- Reshetnyak, V. V., 1966. Deep water Phaeodarian radiolarians in of the northwest Pacific Ocean. *Academy of Science, USSR, Institute of Zoology*, 94: 1—20.
- Robinson, J. H., 1975. Glacial to interglacial oceanographic changes in the northwest Pacific, including a continuous record of the last 400,000 years. Ph. D. Thesis, Columbia University, New York, 326.
- Sancetta, C., 1981. Oceanographic and ecologic significance of diatoms in surface sediments of the Bering and Okhotsk Seas. *Deep-Sea Research*, 28A: 789—817.
- Sancetta, C., 1983a. Effect of Pleistocene glaciation upon oceanographic characteristics of the North Pacific Ocean and Bering Sea. *Deep-Sea Research*, 30: 851—869.
- Sancetta, C., Robinson, S., 1983b. Diatom evidence on Wisconsin and Holocene events in the Bering Sea. *Quaternary Research*, 20: 232—245.
- Sancetta, C., Heusser, L., Labeyrie, L., et al., 1985. Wisconsin-Holocene paleoenvironment of the Bering Sea; Evidence from diatoms, pollen, oxygen isotopes and clay minerals. *Marine Geology*, 62: 55—68.
- Springer, A., McRoy, P., Flint, M., 1996. The Bering Sea green belt: Shelf-edge processes and ecosystem production. *Fisheries Oceanography*, 5(3/4): 205—223.
- Takahashi, K., Fujitani, N., Yanada, M., et al., 2000. Long-term biogenic particle fluxes in the Bering Sea and the central subarctic Pacific Ocean, 1990—1995. *Deep-Sea Research I*, 47: 1723—1759.
- Takahashi, K., Fujitani, N., Yanada, M., 2002. Long term monitoring of particle fluxes in the Bering Sea and the central subarctic Pacific Ocean, 1990—2000. *Progress in Oceanography*, 55: 95—112.
- The First Chinese National Arctic Research Expedition Team, 2000. Report of the first Chinese national arctic research expedition. China Ocean Press, Beijing, 1—191 (in Chinese).
- Wang, R., Clemens, S., Huang, B., et al., 2003. Late Quaternary paleoceanographic changes in the northern South China Sea (ODP Site 1146): Radiolarian evidence. *Journal of Quaternary Science*, 18(8): 745—756.

附中文参考文献

- 程振波, 石学法, 高爱国, 等, 2000. 白令海表层物中的放射虫与海洋环境. *极地研究*, 12(1): 24—31.
- 中国首次北极科学考察队, 2000. 中国首次北极科学考察报告. 北京: 海洋出版社, 1—191.