

# 楚克奇海陆架区沉积物中核素的分布 及其对沉积环境的示踪\*

杨伟锋 陈敏\*\* 刘广山 蔡平河 黄奕普

厦门大学海洋系, 厦门, 361005

**摘要** 对中国首次北极科学考察期间于楚克奇海采集的一个沉积物岩芯进行了 $\gamma$ 谱分析, 获得了 $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{U}$ 和 $^{40}\text{K}$ 的垂直分布特征, 其中最独特的现象为 $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{U}$ 次表层极大值的存在, 其产生原因与沉积物高的有机质含量、元素的扩散作用及有机质的降解作用有关. 根据 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 测年法和 $^{137}\text{Cs}$ 测年法得到的沉积速率分别为0.7和0.8 mm/a, 沉积物的质量累积速率为1.00 kg/(m<sup>2</sup>·a). 结合实测的沉积物中有机质百分含量, 计算得有机物质的埋藏速率为75.4 g/(m<sup>2</sup>·a), 与水柱初级生产力比较可发现, 楚克奇陆架区是一个高效的有机碳埋藏区.

**关键词** 楚克奇陆架 核素分布 沉积速率 有机质埋藏速率

楚克奇海为北冰洋的外缘海域, 陆架区水深较浅(平均为50 m). 由于气候寒冷, 每年有8~9个月被冰雪覆盖, 独特的理化性质导致生态系统具有显著的季节变化特征, 冬季冰封期间生物生产力较低, 而夏季冰融时期则具有很高的生物生产力<sup>[1,2]</sup>. 最近的研究表明, 北冰洋陆架区是全球CO<sub>2</sub>的一个重要“汇”区<sup>[3~5]</sup>, 因此, 定量评估北冰洋生物圈的运转速率(即生物学过程导致的碳吸收及随后的碳埋藏速率)就显得尤为重要. 为此, 本研究利用中国首次北极考察采集的沉积物岩芯样品对楚克奇海陆架沉积物中核素的垂直分布特征进行了分析, 由 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ 法计算出沉积物的沉积速率和质量累积速率, 结合实测的有机物含量进一步获得研究区域有机碳的埋藏速率.

## 1 样品的采集与分析

### 1.1 样品的采集

本文所用沉积物样品是1999年7月14日“雪龙”号科考船进行首次北极科学考察期间采集. 采样站位位于楚克奇海陆架区西部(70°00.7'N, 174°59.5'W), 水深60 m. 样品用QNC-2-2型不锈钢箱

式采样器采集, 上船后用内径为4 cm的塑料管采集岩芯, 并立即将两端密封, 冷冻带回实验室.

### 1.2 样品的分析

在实验室将沉积物岩芯分成厚度为3 cm的子样. 取约10 g湿沉积物在100℃烘干至恒重, 并称量烘干前后的质量以确定其含水量. 然后在500℃下灼烧6 h, 测定灼烧前后的质量以确定总有机物(TOM)含量. 把烘干后磨细、混匀且称量过的样品用塑料袋密封, 装入70 mm×50 mm的聚乙烯塑料盒, 并测量样品的高度. 将装好的样品放置14d, 让 $^{226}\text{Ra}$ 与其子体达到放射性久期平衡, 然后直接放置在HPGe探测器的 $\gamma$ 谱仪(美国Canberra公司)测定, 具体见文献[6]. 所报道的放射性核素数据均已换算为单位干重沉积物中放射性活度, 并校正至采样时间.

## 2 结果与讨论

### 2.1 核素垂直分布

表1给出了研究站位岩芯的 $\gamma$ 谱测量结果, 核素与有机质含量的垂直分布见图1.

2001-09-12 收稿, 2001-11-09 收修改稿

\* 中国首次北极科学考察资助项目和国家自然科学基金资助项目(批准号: 40076024)

\*\* 联系人, E-mail: mchen@jingxian.xmu.edu.cn

表1 核素、含水量与有机质百分含量的测定结果

层位/cm	项目/Bq·kg <sup>-1</sup> 干重						H <sub>2</sub> O/%	TOM/%
	<sup>40</sup> K	<sup>137</sup> Cs	<sup>238</sup> U	<sup>226</sup> Ra	<sup>210</sup> Pb	<sup>210</sup> Pb <sub>ex</sub>		
0~3	388±61	2.8±0.8	32.4±5.6	11.8±1.5	58.1±13	46.3±13	52.4	7.5
3~6	393±66	BD <sup>a)</sup>	27.6±6.4	12.5±2.1	35.9±10	23.4±10	50.1	7.7
6~9	413±70	BD	45.5±7.6	12.3±2.4	22.0±10	9.7±10	50.6	7.1
9~12	403±68	BD	50.4±8.1	11.4±2.8	11.7±9.5	0.3±9.9	49.7	7.1
12~15	397±64	BD	46.2±7.2	14.9±2.3	15.1±7.5	0.2±7.8	48.8	7.0
15~18	414±66	BD	45.7±7.0	18.9±2.7	20.0±7.3	1.1±7.8	50.8	7.0
18~21	379±61	BD	35.5±6.4	14.3±2.0	16.4±8.8	2.1±9.0	49.3	6.7
21~24	393±62	BD	38.4±6.3	10.4±1.9	9.9±6.3	-0.5±6.6	49.2	6.8

a) BD表示低于检测限, 下文同

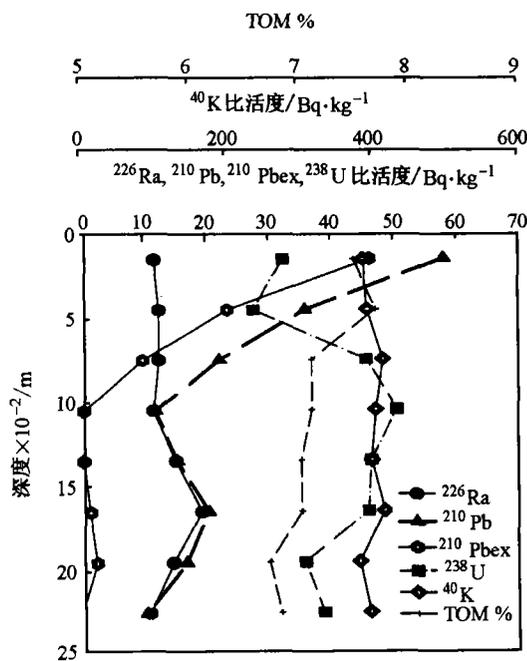


图1 岩芯中核素及 TOM 的垂直分布

岩芯中<sup>40</sup>K的比活度几乎保持不变, 此为沉积物岩芯中<sup>40</sup>K典型的垂直分布特征。<sup>210</sup>Pb的垂直分布显示, 在上部10 cm内, 其比活度随深度增加逐渐递减, 至10 cm以下变化较小, 其中16.5 cm处似有一极大值出现。而该深度正好是<sup>226</sup>Ra极大值所处深度, 鉴于两者之间的母子体关系, 这种分布是可以理解的。过剩<sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub>则呈现典型的分布特征, 即上层<sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub>随深度增加成指数式衰减, 至10 cm以下, <sup>210</sup>Pb和<sup>226</sup>Ra达到了放射性久期平衡, 即<sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub>为0。

岩芯中有机质含量较高(表1), 平均为7.1%。如果假定有机质与有机碳的重量比为2<sup>[7]</sup>, 则柱样有机碳含量平均为3.6%, 此数值高于深海、大洋区

的相应值<sup>[8,9]</sup>, 但与已报道的近岸海域的数值相当<sup>[9]</sup>。事实上, 考虑到夏季楚克奇陆架是全球最高生产力的区域之一<sup>[1]</sup>, 此结果显然是合理的。从其垂直分布看, 有机质含量随深度增加逐渐减少, 体现了有机物不断降解的过程。

<sup>226</sup>Ra和<sup>238</sup>U在岩芯中的分布具有相似之处。其特征为表层低, 随深度增加核素含量逐渐增加并达到一个极大值, 然后随深度增加, 比活度又逐渐减小。此种分布模式的形成与<sup>226</sup>Ra, <sup>238</sup>U的地球化学行为及有机物质的降解有关。一方面, <sup>226</sup>Ra, <sup>238</sup>U为水溶性核素, 沉积物中的<sup>226</sup>Ra, <sup>238</sup>U可经由间隙水向上覆水体扩散, 另一方面, 随着有机物质的降解, 沉积颗粒物中<sup>226</sup>Ra, <sup>238</sup>U的含量会逐渐降低。上述两个过程的协同作用即可造成次表层<sup>226</sup>Ra, <sup>238</sup>U极大值的出现。对于极大值层位以浅的岩芯柱, 扩散作用起主导作用, 而极大值以深层位则为有机物质的降解过程占主导地位, 尽管有机物质的降解速率随深度增加而降低(表1), 但对于一定深度的样品, 扩散过程则几乎不起作用。事实上, Swan等<sup>[10]</sup>在克莱德海湾、Baskaran等<sup>[11]</sup>在东楚克奇海域也观察到沉积柱样中<sup>226</sup>Ra, <sup>238</sup>U次表层极大值的现象, 但均未给出合理、明确的解释。根据本研究柱样中TOM含量较高的特征, 可推测这种现象可能在高有机物含量的沉积物中出现。需要指出的是, <sup>226</sup>Ra出现极大值的深度大于<sup>238</sup>U的相应深度, 表明<sup>226</sup>Ra向上覆水体扩散的能力强于<sup>238</sup>U, 这与<sup>226</sup>Ra活动性强于<sup>238</sup>U的论述相吻合<sup>[2]</sup>。

## 2.2 沉积速率

利用测定的<sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub>数据, 可以用<sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub>法计算沉积速率。如下式<sup>[3]</sup>

1) 陈敏, 等. 北冰洋: 生物生产力的沙漠? 待发表

2) 林永革. 中国沿岸海区沉积物中铀系不平衡的研究. 厦门大学硕士学位论文, 1989

3) 陈绍勇. 湄洲湾沉积过程及放射性同位素地球化学行为的研究. 厦门大学硕士论文, 1986

$$\ln^{210}\text{Pb}_{\text{ex}} = \ln^{210}\text{Pb}_{\text{ex},0} - \lambda_{210}h/s, \quad (1)$$

其中

$$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}} = ^{210}\text{Pb} - ^{226}\text{Ra}. \quad (2)$$

(2)式中核素符号代表该核素的放射性比活度,  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 指过剩的 $^{210}\text{Pb}$ 比活度,  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex},0}$ 是表层沉积物中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度,  $h$ 是校正了压实效应后的深度(cm),  $s$ 代表沉积速率(mm/a),  $\lambda_{210}$ 是 $^{210}\text{Pb}$ 的衰变速率常数( $0.031\text{a}^{-1}$ ). 用 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度对校正深度作图( $y = -0.48x + 5.12, r = 0.93$ ), 求得沉积速率 $s$ 为 $0.7\text{ mm/a}$ . Roberts等<sup>[12]</sup>曾报道波利尼亚东北海域沉积物的沉积速率为 $0.7\text{ mm/a}$ . Huh等<sup>[13]</sup>报道楚克奇海的沉积速率为 $0.89\text{ mm/a}$ . 本文的研究结果与之相吻合.

沉积物的沉积过程往往不只是颗粒的简单堆积和压实作用过程, 底栖生物的活动以及其他的物理因素有可能使沉积物发生混合和扰动. 沉积物中放射性核素的混合程度对于建立以 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 为基础的沉积物年代测量将有重要的影响. 从岩芯的测量结果(表1)可以明显地看出, 在岩芯中没有明显的混合作用, 这与 $^{210}\text{Pb}$ 在岩芯最上层存在极大值是一致的. 另一个说明沉积物混合影响较小的事实是 $^{137}\text{Cs}$ 的穿透深度( $^{137}\text{Cs}$ 可检测到的深度).  $^{137}\text{Cs}$ 和 $^{210}\text{Pb}$ 在海水和沉积物中的分配系数分别为 $100 \sim 500$ <sup>[14]</sup>和 $10^4 \sim 10^6$ <sup>[15]</sup>, 这表明间隙水中Cs比Pb有更强的移动性. 从表1可以看出,  $^{137}\text{Cs}$ 只在最上层可检测出, 因此 $^{210}\text{Pb}$ 的向下迁移程度更弱, 可以忽略混合对 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的影响, 显然, 上述由 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 法获得的沉积速率应是可靠的.

由于 $^{137}\text{Cs}$ 主要由1963年的人工核爆试验提供, 根据本研究 $^{137}\text{Cs}$ 的检出深度即可估算沉积速率, 结果为 $0.8\text{ mm/a}$ , 与 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 法的结果非常吻合, 进一步证实上述沉积速率的可靠性.

### 2.3 表观沉积物质量累积速率与有机碳埋藏速率的估算

欲获得沉积物的表观质量累积速率, 首先必须获得沉积物的孔隙度及累积质量深度. 根据含水量可以用下式计算沉积物的孔隙度

$$\phi = (W - D) / \{ W / \rho_{\text{H}_2\text{O}} + [1 / \rho_{\text{D}} - 1] D \}, \quad (3)$$

式中 $\phi$ 是孔隙度,  $W$ 是湿重(g),  $D$ 为干重(g),  $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ 为海水的密度,  $\rho_{\text{D}}$ 为干沉积物密度. 假定干沉

积物密度为 $2.5\text{ g/cm}^3$ <sup>[16]</sup>, 海水的密度近似为 $1\text{ g/cm}^3$ , 方程(3)就可以简化为

$$\phi = 1 / [1 / (\rho_{\text{D}} \times \text{H}_2\text{O}\%) + 0.6], \quad (4)$$

其中 $\text{H}_2\text{O}\%$ 为沉积物的含水量.

累积质量深度( $m$ )可由下式获得

$$m = \sum (1 - \Phi_i) \rho_{\text{D}} \times \Delta x \quad (5)$$

式中 $\Phi_i$ 代表深度 $i$ 处的孔隙度,  $\Delta x$ 为岩芯子样的厚度(cm), 孔隙度与累积质量深度的计算结果见表2.

表2 岩芯孔隙度、累积质量深度

层位/cm	$\Phi$	$m/\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$
0-3	0.755	20.0
3-6	0.715	41.4
6-9	0.719	62.5
9-12	0.712	84.1
12-15	0.704	106.3
15-18	0.721	127.2
18-21	0.708	149.1
21-24	0.708	171.0

假设表观质量累积速率恒定, 则 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的比活度满足下式

$$\ln^{210}\text{Pb}_{\text{ex}} - \ln^{210}\text{Pb}_{\text{ex},0} = (-\lambda_{210}/r)m \quad (6)$$

在(6)式中,  $m$ 是由(5)式得出的累积质量深度( $\text{kg/m}^2$ ),  $r$ 是沉积物质量通量( $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ).

把 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的活度对累积质量作图, 可得沉积物质量累积速率为 $1.00\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ . Baskaran等<sup>[11]</sup>获得东楚克奇海陆架区沉积物质量累积速率介于 $0.31 \sim 3.24\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 之间, 平均为 $1.33\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ . Huh等<sup>[13]</sup>计算得出楚克奇海陆坡的相应值为 $0.55\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ , 显然, 本文的研究结果与Baskaran等<sup>[11]</sup>的结果相吻合, 高于Huh等<sup>[13]</sup>的结果.

基于所获得的沉积物质量累积速率及实测的表层沉积物有机质含量, 可计算出研究站位有机物质的埋藏速率为 $75.4\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ . 假定有机质与有机碳的重量比为 $2$ <sup>[7]</sup>, 则该站位有机碳的埋藏速率为 $37.7\text{ gC}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ . 由于楚克奇海位于寒冷的高纬区域, 每年有 $8 \sim 9$ 个月海水均结冰形成冰柱, 此时有机碳的埋藏速率可忽略, 由此可进一步估算出夏季冰融期间( $3 \sim 4$ 个月)沉积物有机碳的埋藏速率为 $25 \sim 33\text{ mmolC}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ . 中国首次北极科学考察航次期间, 陈敏等<sup>[17]</sup>利用 $^{14}\text{C}$ 吸收法测得夏季楚克奇

海陆架区初级生产力平均值为  $40.1 \text{ mmolC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , 因此, 浮游植物光合作用合成的有机碳有高达 62% ~ 82% 被输送、埋藏于沉积物中, 证实楚克奇海陆架是一个高效的有机碳“汇”区。

### 3 结论

(1) 楚克奇海陆架区沉积物岩芯中  $^{40}\text{K}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  的垂直分布与其他近岸海域相近, 即  $^{40}\text{K}$  呈均匀分布特征,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  则随深度增加逐渐降低, 至一定深度基本恒定。  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{U}$  的垂直分布表现出次表层极大值的独特现象, 可能与本海域沉积物高有机质含量相关, 且由扩散过程与降解过程的协同作用形成。

(2) 由  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  法和  $^{137}\text{Cs}$  法获得楚克奇海陆架区沉积物的沉积速率分别为  $0.7$  和  $0.8 \text{ mm/a}$ , 沉积物质量累积速率为  $1.00 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。结合实测的沉积物有机质含量, 可计算出有机物质的埋藏速率为  $75.4 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。与水柱初级生产力比较可发现, 楚克奇海陆架区是一个高效的有机碳埋藏区。

**致谢** 本研究样品的采集得到国家海洋局第一海洋研究所高爱国博士、程振波副研究员, 国家海洋局第二海洋研究所陈荣华、李秀珠研究员以及“雪龙”号考察船全体船员的协助, 在此一并表示衷心感谢。

### 参 考 文 献

- Walsh J, et al. Carbon and nitrogen cycling within Bering/Chukchi Seas; Source regions for organic matter affect AOU demands of the Arctic Ocean. *Progress Oceanography*, 1989, 22: 359
- Feder H M, et al. The northeastern Chukchi Sea; Benthos-environmental interactions. *Mar Ecol Prog Ser*, 1994, 111: 171
- Walsh J. Arctic carbon sink: Present and future. *Global Biogeochem Cycles*, 1989, 3: 393
- Smith W O. Primary productivity and new production in the Northeast Water Polynya (Greenland) during summer 1992. *J Geophys Res*, 1995, 100: 4357
- Luchetta A, et al. Temporal evolution of primary production in the central Barents Sea. *J Marine Systems*, 2000, 27: 177
- 刘广山, 等. 海洋沉积物岩芯放射性核素的  $\gamma$  谱测定. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2001, 40(3): 669
- Buffle J. Complexation Reactions in Aquatic Systems. An Analytical Approach. New York: Ellis Horwood, 1990. 1
- Stein R, et al. Organic carbon, carbonate, and clay mineral distributions in eastern central Arctic Ocean surface sediments. *Marine Geology*, 1994, 119: 269
- Cranston R E. Organic carbon burial rates across the Arctic Ocean from the 1994 Arctic Ocean Section expedition. *Deep-Sea Research II*, 1997, 44: 1705
- Swan D S, et al. Radiocaesium and  $^{210}\text{Pb}$  in Clyde Sea Loch Sediments. *Estuarine Coastal Shelf Science*, 1981, 15: 515
- Baskaran M, et al.  $^{210}\text{Pb}$ -derived chronology and the fluxes of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  isotopes into continental shelf sediments, East Chukchi Sea, Alaskan Arctic. *Geochim Cosmochim Acta*, 1995, 59: 4435
- Roberts K A, et al.  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{239,240}\text{Pu}$  in the Northeast Water Polynya, Greenland: Particle dynamics and sediment mixing rates. *J Mar Res*, 1996, 10: 401
- Huh Chih-an, et al. Natural radionuclides and plutonium in sediments from the western Arctic Ocean: Sedimentation rates and pathways of radionuclides. *Deep-Sea Res*, 1997, 44: 1725
- Li Y-H, et al. Partition of radiotracers between suspended particles and seawater. *Geochim Cosmochim Acta*, 1984, 48: 2011
- Baskaran M, et al. The role of particles and colloids in the transport of radionuclides in coastal environments of Texas. *Mar Chem*, 1993, 43: 346
- Hermanson M H.  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  chronology of sediments from small shallow Arctic lakes. *Geochim Cosmochim Acta*, 1990, 54: 1443
- 陈 敏, 等. 北冰洋、白令海初级生产力、细菌生产力与颗粒有机碳输出通量的同位素示踪研究. 见: 中国首次北极科学考察研究进展. 北京: 海洋出版社, 2002