

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

科技述评

新生代古海洋 Nd 同位素演化及其古环境意义

凌洪飞¹⁾ 蒋少涌¹⁾ 倪培¹⁾ 张志远¹⁾ 周怀阳²⁾

1) 南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学地球科学系, 210093

2) 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州, 310012

内容提要 本文对当前在新生代古海洋 Nd 同位素演化及其古环境意义研究方面的最新成果进行了简明的阐述, 说明在巴拿马海峡于 5~3 Ma 关闭前后, 太平洋和大西洋洋流的变化与其海水 Nd 同位素的变化相对应。但同期的印度洋 Nd 同位素没有明显变化, 其原因需要进一步研究。

关键词 演化 Nd 同位素 古海洋 新生代

地球的内部活动(岩浆活动、板块运动、地幔柱活动、大陆的聚散)和地球的外部状态(地理、气候、风化)影响和控制着海洋的环流、海水的成分以及沉积作用。海洋沉积特别是化学沉积可以保存古海洋状态的某些重要信息。因此, 通过研究这些沉积物的同位素成分, 有可能恢复古海洋环境、了解古气候变迁及与此相关联的地球内部活动信息。这一研究领域是当前国际地学研究中的前沿领域之一, 具有十分重要的科学意义。

已有研究发现, 地质历史上海洋的多种同位素成分起伏变化, 反映了地球系统演变的一些侧面。例如对显生宙海洋锶、氧同位素已有很多研究(Veizer et al., 1974, 1999; Burke et al., 1982; DePaolo et al., 1985; Hess et al., 1986; Hodell et al., 1990, 1994; Henderson et al., 1994)。众所周知, 第四纪海洋氧同位素的振荡变化与冰期间冰期气候交替有关(Shackleton et al., 1973); 而新生代海洋⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 的快速增长被认为与喜马拉雅隆升有关(Raymo et al., 1988; Edmond, 1992)。要了解海洋 Nd 同位素演化历史, 必须首先对现代海洋 Nd 同位素演化组成及其影响因素有所了解。

1 现代海洋 Nd 同位素组成及其控制因素

1.1 现代海洋 Nd 同位素组成

现代海洋 Nd 同位素组成主要通过 3 种方法获

得:

(1) 测定海洋 Fe-Mn 沉积物的 Nd 同位素组成(O'Nions et al., 1978, 1998; Piepgras et al., 1979; Goldstein et al., 1981; Futa et al., 1988; Amakawa et al., 1991; Albarede et al., 1992; Jones et al., 1994; Burton et al., 1994, 1999; Ling et al., 1995, 1996, 1997; Albarede et al., 1998; Reynolds et al., 1999; Frank et al., 1999a, 1999b); 海洋 Fe-Mn 沉积物, 特别是生长在水下玄武岩海山上的 Fe-Mn 结壳, 被认为是从海水中直接沉淀出来的, 其 Nd 同位素组成代表了该处海水的 Nd 同位素组成。Fe-Mn 沉积物与所处海水具有一致的 Nd 同位素组成(Albarede et al., 1992; Jones et al., 1994; Ling et al., 1997), 而与该处碎屑沉积物的 Nd 同位素组成无关(Jones et al., 1994), 证明了 Fe-Mn 沉积物中的 Nd 同位素来自海水而非来自碎屑沉积物。这一方法比直接测定海水 Nd 同位素简单易行。此外, 还通过测定有孔虫和有孔虫外 Fe-Mn 包层的 Nd 同位素组成推断海水的 Nd 同位素组成(Palmer et al., 1986; Vance et al., 1999)。Albarede 等(1992)根据 Fe-Mn 沉积物绘出了全球大洋 Nd 同位素组成分布图。

(2) 海水 Nd 同位素直接测定: Piepgras 等(1980, 1982, 1987, 1988, 1992)、Stordal 等(1986)首先开展这一研究, 随后又有一些研究者进行了这方面的研究(Bertram et al., 1993; Jeandel, 1993;

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号 49873003)的研究成果。

收稿日期: 2000-09-19; 改回日期: 2001-01-05; 责任编辑: 刘淑春。

作者简介: 凌洪飞, 男, 1960 年生。博士。现为南京大学地球科学系、南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室教授, 从事同位素地球化学方面的研究。通讯地址: 210093, 南京大学地球科学系。

Jeandel et al., 1995; Shimizu et al., 1994)。这些研究结果验证了其他方法的正确性,并为进一步研究奠定了基础。他们对海水垂直剖面 Nd 同位素组成的测定,发现表层海水 Nd 同位素组成变化很大,1000 m 以下海水 Nd 同位素组成趋向稳定(Piepgras et al., 1988; 图 1)。表层海水 Nd 同位素组成主要受风尘和个别河流的影响;深部海水 Nd 同位素组成才代表大洋本身的 Nd 同位素组成。

(3) 根据河流 Nd 含量和 Nd 同位素组成以及河流流量,估算各大洋 Nd 同位素平均组成(Goldstein et al., 1984, 1987):太平洋 $\epsilon_{Nd} = -2.9$,大西洋 $\epsilon_{Nd} = -12.6$,印度洋 $\epsilon_{Nd} = -8.7$ 。

上述各种方法获得的结果一致表明,太平洋深部海水具有最高的放射成因 Nd 同位素($\epsilon_{Nd} = -4 \pm$),大西洋深部海水具有最低的放射成因 Nd 同位素($\epsilon_{Nd} = -13 \pm$),印度洋深部海水的 Nd 同位素组成介于太平洋和大西洋之间($\epsilon_{Nd} = -9 \pm$)。这种区域性的差异恰与大洋周围剥蚀区的 Nd 同位素组成一致。太平洋周围多年轻火山岩,富含放射成因 Nd 同位素;大西洋特别是北大西洋周围多古老地块,贫放射成因 Nd 同位素。

1.2 海洋 Nd 同位素组成的控制因素

控制海洋 Nd 同位素组成的因素包括:Nd 的来源及其同位素组成;Nd 在海洋中的存留时间;Nd 在随洋流的扩散迁移。

1.2.1 现代海洋中 Nd 的来源及其同位素组成

(1) 河流或陆源 Nd:根据世界主要河流的流量和 Nd 的含量估算,每年从河流进入海洋的溶解 Nd 为 1.7×10^9 g/a (Korzun, 1978),在河口海湾,一部分溶解 Nd 随碎屑颗粒而沉淀,因此每年实际进入大洋的溶解 Nd 为 5.1×10^8 g/a (Goldstein et al., 1987)。由于海水所含电解质等作用,碎屑颗粒在进入海洋后,所含的一部分 Nd 会被浸取出来而进入海水,根据 Goldstein 等(1987)估算,每年由河流所携带的颗粒浸取出来进入海水的 Nd 为 7.2×10^8 g/a,由风携带进入海洋的颗粒浸取出来的 Nd 为 2.5×10^8 g/a。流入太平洋之河流的 $\epsilon_{Nd} = -10.1 \sim +1.9$,平均 -2.9 ;流入大西洋之河流的 $\epsilon_{Nd} = -10.0 \sim -17.9$,平均 -12.6 ;流入印度洋之河流的 $\epsilon_{Nd} = -3.0 \sim -10.0$,平均 -8.7 。

(2) 洋脊蚀变热液来源的 Nd:根据对洋脊蚀变热液的直接研究(Piepgras et al., 1985)以及河流、海洋 Nd 同位素的模拟计算,每年热液来源的 Nd 为 $0.2 \times 10^8 \sim 0.4 \times 10^8$ g/a,不足河流或陆源 Nd 的

4%。热液(21° N 东太平洋洋中脊)来源的 Nd 的 $\epsilon_{Nd} = +2 \sim +8$,平均 $+5.2$ 。

由此可见,河流或陆源 Nd 在海洋中占绝对主导地位,Goldstein 等(1987)根据世界主要河流的流量、Nd 的含量和 Nd 同位素组成估算海洋 Nd 同位素组成(太平洋 $\epsilon_{Nd} = -2.9$,大西洋 $\epsilon_{Nd} = -12.6$,印度洋 $\epsilon_{Nd} = -8.7$),与海洋实测 Nd 同位素组成之平均(太平洋 $\epsilon_{Nd} = -2.86$,大西洋 $\epsilon_{Nd} = -11.8$,印度洋 $\epsilon_{Nd} = -8.63$)相吻合。

1.2.2 Nd 在海洋中的存留时间

某一元素在海洋中的存留时间,即是该元素进入海洋起直到从海洋中沉淀出来所经历的时间。对于在海洋中达到稳态的元素来说,其存留时间(τ)为海洋中该元素总量(A)与进入海洋(或从海洋中沉淀出来)的流速(dA/dt)的商。

$$\tau = A / (dA/dt)$$

现代海洋中 Nd 的存留时间约为 1500~1800 a (Jeandel, 1993; Jeandel et al., 1995),比 Sr 的存留时间(2 Ma, Broecker et al., 1982)短得多,而与现代海水环流一周的时间(10^3 a, Broecker, 1991)相近。Nd 的存留时间不可能使 Nd 在全球海洋中达到均匀混合,但可使 Nd 在同一个海盆中相对混合均匀,这就是全球各大洋 Nd 同位素组成保持与各自周围蚀源区一致的原因。而 Sr 的存留时间远远超过海水环流一周的时间,所以 Sr 在全球海洋中达到完全的均匀混合,因而现代全球海洋具有非常均一的 Sr 同位素组成($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70915 \pm 5$)。

1.2.3 Nd 随洋流的迁移

由于 Nd 在海洋中的存留时间比较短,不同的洋流水体可具有不同的 Nd 同位素组成。这反过来可利用 Nd 同位素组成示踪洋流的流动情况。例如,太平洋深海水的 ϵ_{Nd} 值一般为 $-3 \sim -4$,而根据海底 Fe-Mn 沉积物的研究发现,由南至北,太平洋底部存在一条 ϵ_{Nd} 值由 $-8 \sim -5$ 的海水带,表明沿太平洋底部,有南极底流(AABW, $\epsilon_{Nd} \approx -8.5$)流入。

总之,对现代海洋 Fe-Mn 沉积物和海水进行 Nd 同位素研究早在 70 年代末、80 年代初就已经开始,(O' Nions et al., 1978; Piepgras et al., 1979, 1980; Goldstein et al., 1981)。目前对现代海洋 Nd 同位素组成已有比较明确的认识。

2 海洋 Nd 同位素演化

2.1 海洋 Nd 同位素演化研究的历史和现状

对海洋 Nd 同位素演化的研究远比海洋 Sr 同

位素研究要少(Keto et al., 1988; Martin et al., 1995; Yang et al., 1997),这是由于未找到能很好反映海洋 Nd 同位素演化的样品,海洋的主要化学沉积物——碳酸盐的 Nd 含量太低,不太适合作 Nd 同位素测定。因此曾经用磷质化石、鱼骨、牙形刺等(Staudigel, 1985, 1986; Whittaker et al., 1993; Martin et al., 2000)、锰矿(Hooker et al., 1981; Stille et al., 1989)、有孔虫及其锰质包壳(Palmer et al., 1986; Vance et al., 1999)等来估测地质历史上海水的 Nd 同位素组成。但迄今对整个显生宙海水 Nd 同位素的演化的了解还很有限。

所幸的是,现代海洋中仍然在生长的 Fe-Mn 结壳的生长历史可达数十百万年,并且含有很高的 Nd 含量,其 Nd 来自当时周围海水,因此利用 Fe-Mn 结壳有可能恢复新生代海洋 Nd 同位素演化历史。Burton 等(1994), Ling 等(1995, 1996, 1997)首先对中太平洋 Fe-Mn 结壳进行了 Nd 同位素演化研究,继而又对北大西洋、西南印度洋 Fe-Mn 结壳进行了研究(Burton et al., 1997; O' Nions et al., 1998; Albarede et al., 1998; Abouchami et al., 1999; Reynolds et al., 1999; Frank et al., 1999a, 1999b),因而对新生代海洋 Nd 同位素演化的了解已经有了长足的进展。此外,最近二、三年来,对 Fe-Mn 结壳开展了多种同位素研究(Pb、Be、U-Th、Hf、Os, Christensen et al., 1997; Peucker-Ehrenbrink et al., 1998; von Blanckenburg, 1999; Henderson et al., 1999; Lee et al., 1999; Burton et al., 1999),揭示了许多古海洋和其他方面的信息,这超出了本文的范围,这里从略。

2.2 新生代海洋 Nd 同位素演化及其意义

如前所述,海水的 Nd 同位素组成受海洋周围蚀源区和随洋流迁移所控制,因此,海水 Nd 同位素演化对于研究海洋环流模式演变、周围蚀源区演变具有十分重要的意义。因此,获得某些海域 Nd 同位素演化,就有可能揭示海洋环流模式演变和周围蚀源区演变的历史。

Ingram 等(1990)、VonderHaar 等(1995)曾试图用 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 对 Fe-Mn 结壳进行定年,但没有成功。Ling 等(1997)、Burton 等(1997)和 O' Nions 等(1998)对取自中太平洋、北大西洋和西南印度洋的 Fe-Mn 结壳样品进行了剖面 Nd、Pb 同位素分析,并结合 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 定年(Belshaw et al., 1995),获得了这些洋区至少 20 Ma 以来 Nd、Pb 同位素演化历史。

(1) Fe-Mn 结壳现代生长表层的 Nd 同位素组

成与现今海水的组成一致(图 1),证实 Fe-Mn 结壳 Nd 同位素来自海水的沉淀。

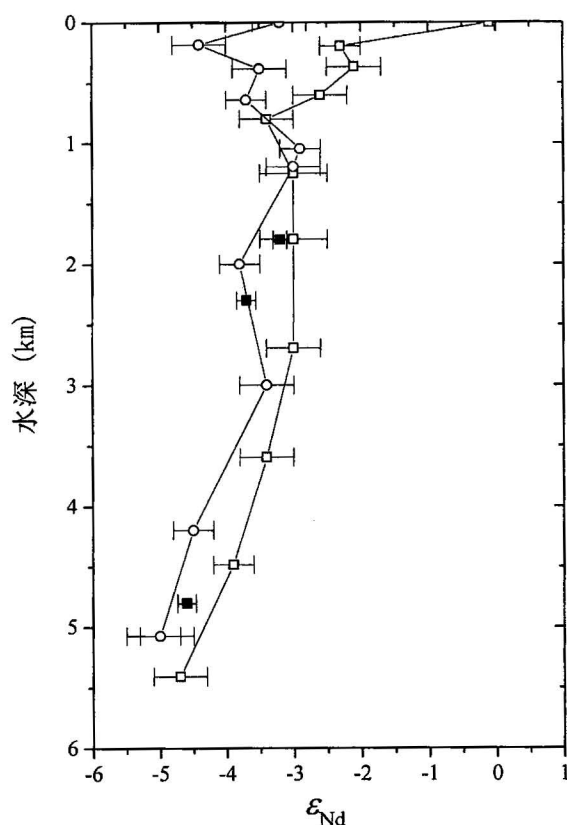


图 1 北太平洋不同水深 Fe-Mn 结壳表层的 Nd 同位素组成与同一区域海水 Nd 同位素组成剖面的比较

Fig. 1 Comparison between Nd isotope compositions of growing surfaces of ferromanganese crusts dredged from different water depths in the north Pacific and Nd isotope compositions of water profiles in the same area

■—据 Ling et al., 1997; □, ○—据 Piepgras et al., 1988
 ■—After Ling et al., 1997; □ and ○—after Piepgras et al., 1988

(2) 现今三大洋的 Nd 同位素区域性差异结构(即太平洋 ϵ_{Nd} 值最高,大西洋 ϵ_{Nd} 值最低,印度洋 ϵ_{Nd} 值介于太平洋和大西洋之间)、以及太平洋 Nd 同位素组成随水深变化的分层性结构(深层水 ϵ_{Nd} 值较中层水 ϵ_{Nd} 值低)已保持了 20 Ma 以上(图 2a)。说明 20 Ma 以来,地球上虽然发生了喜马拉雅隆升等重大地质事件,但从三大洋周围蚀源区进入三大洋的 Nd 同位素成分及各种源区的比例关系没有发生根本性的改变。

(3) 20 Ma 以来中太平洋 Pb 同位素组成比较稳定(图 2b)。由于 Pb 在海洋中的存留时间很短(<

100 a, Schaule et al., 1981), 海洋环流和海底热液对海水 Pb 同位素的影响不大 (Chen et al., 1986; Abouchami et al., 1995), 海水 Pb 同位素反映了其邻近蚀源区的特征 (Chow et al., 1959, 1962; Schaule et al., 1981; Frank et al., 1998)。中太平洋稳定的 Pb 同位素组成说明其周围蚀源区 20 Ma 以来没有发生明显的变化。因此, 中太平洋 Nd 同位素组成的明显变化: 即从 12 Ma 开始 ϵ_{Nd} 值明显升高,

至 3 Ma 时 ϵ_{Nd} 值升至最高, 是海洋环流模式变化的结果, 即由于加勒比板块运动, 巴拿马海峡从 12 Ma 前开始变浅、变窄, 至 3 Ma 完全关闭 (van Andel et al., 1975), 逐渐限制和最后切断了大西洋和太平洋之间海水的直接交流, 因此经巴拿马海峡流入太平洋的低 ϵ_{Nd} 值的大西洋海水逐渐减少和终止, 导致了上述太平洋海水 ϵ_{Nd} 值升高的显著变化。

(4) 在 3~5 Ma 以前, 北大西洋的 Nd 同位素组

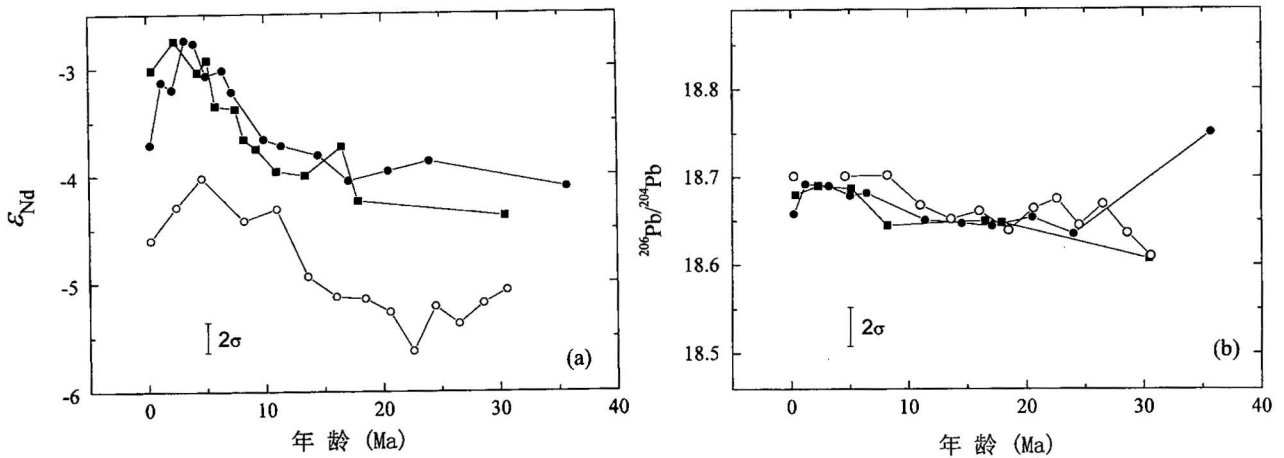


图 2 北太平洋不同水深 Fe-Mn 结壳的 Nd 同位素组成随时间的演化(a)和北太平洋不同水深 Fe-Mn 结壳的 Pb 同位素组成随时间的演化(b)

Fig. 2 Evolution of Nd isotope compositions of ferromanganese crusts from different water depths in the North Pacific (a) and evolution of Pb isotope compositions of ferromanganese crusts from different water depths in the North Pacific (b)

Fe-Mn 结壳样号及水深: ■—D11-1, 1.8 km; ●—CD29-2, 2.3 km; ○—VA13/2, 4.8 km; 2σ 为分析误差 (据 Ling et al., 1997)

Sample numbers and water depths: ■—D11-1, 1.8 km; ●—CD29-2, 2.3 km; ○—VA13/2, 4.8 km; analysis error in 2σ (after Ling et al., 1997)

成较为稳定 ($\epsilon_{Nd} = -1$), 从 3~5 Ma 开始至今, 北大西洋和中太平洋的 ϵ_{Nd} 值都明显降低 (图 3a), 这被认为是来自北大西洋深海流 Nd 同位素成分比例从 3 Ma 以来逐渐增强, 并且通过洋流进入绕南极环流并部分到达太平洋的结果。北大西洋深海流的同位素信号的增强与来自 Labrador 海 ($\epsilon_{Nd} = -26$, Stordal et al., 1986) 的贡献有关, 或由于来自该海域周围陆地的剥蚀量增加, 或由于该海域深海水产率增加。这一演变的开始也与巴拿马海峡关闭相关。在巴拿马海峡关闭以前, 低盐度的太平洋海水经巴拿马海峡直接流入大西洋, 阻止了北大西洋表层海水下沉以形成北大西洋深海流。因此现代海洋温盐环流是在巴拿马海峡关闭以后才开始建立的。而海洋环流模式对气候具有重要影响, 巴拿马海峡关闭切断了赤道纬向的洋流, 大西洋经向洋流增强, 来自

赤道附近的温暖表层洋流增加了北极地区的蒸发量, 从而开始在北极形成冰盖。同时, 蒸发和散热导致海水盐度增加而下沉, 从而北大西洋深海流得以增强。

(5) 目前大多数研究者认为新生代海洋 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 的快速生长主要是喜马拉雅隆升剥蚀的结果。但 20 Ma 以来, 喜马拉雅隆升剥蚀物质的直接堆积地——印度洋, 其 Nd 同位素组成没有明显的变化 (图 3b)。换句话说, 喜马拉雅的隆升剥蚀对印度洋 Nd 同位素组成没有明显的影响。这表明或者海洋 Nd 同位素与 Sr 同位素之间不存在直接的简单关系, 或者前人关于新生代海洋 Sr 同位素的结论有待修正。这种海洋 Nd、Sr 同位素组成变化不耦合、以及喜马拉雅的隆升剥蚀对印度洋 Nd 同位素组成没有明显影响的原因还需要进一步研究。

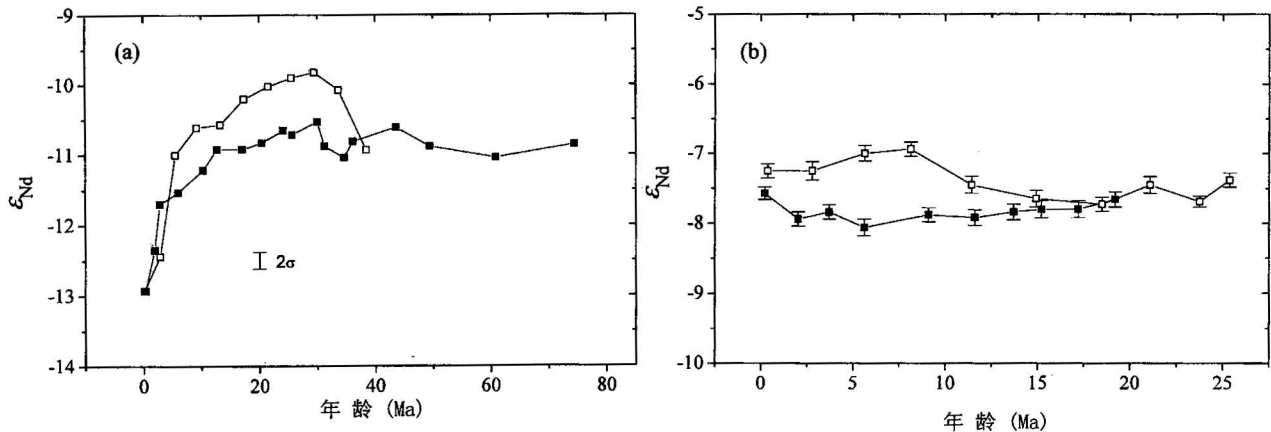


图 3 北大西洋 Fe-Mn 结壳的 Nd 同位素组成随时间的演化(a)和西南印度洋 Fe-Mn 结壳的 Nd 同位素组成随时间的演化(b)

Fig. 3 Evolution of Nd isotope compositions of ferromanganese crusts from the North Atlantic (a) and evolution of Nd isotope compositions of ferromanganese crusts from the Southwest India (b)

(a): □—ALV539; ■—BM1969.05; 2σ 为分析误差; (b): □—SS-663; ■—109D-C (据 Burton et al., 1997; O' Nions et al., 1998)
 (a): □—ALV539; ■—BM1969.05; analysis error in 2σ; (b): □—SS-663; ■—109D-C (after Burton et al., 1997; O' Nions et al., 1998)

References

- Abouchami W, Goldstein S L. 1995. A lead isotopic study of circum Antarctic manganese nodules. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59: 1809~1820.
- Abouchami W, Galer S J G, Koschinsky A. 1999. Pb and Nd isotopes in NE Atlantic Fe-Mn crusts: Proxies for trace metal paleosources and paleocean circulation. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 63: 1489~1505.
- Albarede F, Goldstein S L. 1992. World map of Nd isotope in sea floor ferromanganese deposits. *Geology*, 20: 761~763.
- Albarede F, Simonetti A, Vervoort J D, et al. 1998. A Hf-Nd isotopic correlation in ferromanganese nodules. *GEOPHYS RES LETT*, 25: 3895~3898.
- Amakawa H, Ingrid J, Masuda A, Shimizu H. 1991. Isotopic compositions of Ce, Nd and Sr in ferromanganese nodules from the Pacific and Atlantic Oceans, the Baltic and Barents Seas, and the Gulf of Bothnia. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 105: 554~565.
- Belshaw N S, O' Nions R K, von Blanckenburg F. 1995. A SIMS technique for ¹⁰Be/⁹Be ratio measurement in environmental materials. *Int. J. Mass Spectr. Ion Physics*, 142: 55~67.
- Bertram C J, Elderfield H. 1993. The geochemical balance of the rare earth elements and neodymium isotopes in the oceans. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57: 1957~1986.
- Broecker W S, Peng T H. 1982. *Tracers in the Sea*. Palisades: Eldigio Press, 690.
- Broecker W S. 1991. The great ocean conveyor. *Oceanography*, 4: 79~89.
- Burke W H, et al. 1982. Variation of seawater ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr through Phanerozoic time. *Geology*, 10: 516~519.
- Burton K W, O' Nions R K, Martel D J, Hein J R. 1994. The influence of erosion and palaeogeography on seawater neodymium during the past 20 million years. *Mineralogical Magazine (VM Goldschmidt Conference)*, 58A: 136~137.
- Burton K W, Ling H-F, O' Nions R K. 1997. Closure of the central American isthmus and its impact on North Atlantic Deep Water circulation. *Nature*, 386: 382~385.
- Burton K W, Bourdon B, Birck J L, et al. 1999. Osmium isotope variations in the oceans recorded by Fe-Mn crusts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 171: 185~197.
- Chen J H, Wasserburg G J, von Damm K L, Edmond J M. 1986. The U-Th-Pb systematics in hot spring on the East Pacific Rise at 21 and Guaymas Basin. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 50: 2467~2479.
- Chow T J, Patterson C C. 1959. Lead isotopes in manganese nodules. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 17: 21~31.
- Chow T J, Patterson C C. 1962. The occurrence and significance of lead isotopes in pelagic sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 26: 263~308.
- Christensen J N, Halliday A N, Godfrey L V, et al. 1997. Climate and ocean dynamics and the lead isotopic records in Pacific ferromanganese crusts. *Science*, 277 (5328): 913~918.
- DePaolo D J, Ingram B L. 1985. High-resolution stratigraphy with strontium isotopes. *Science*, 227: 938~941.
- Edmond J M. 1992. Himalayan tectonics, weathering processes, and the strontium isotope record in marine limestones. *Science*, 258: 1594~1597.
- Frank M, O' Nions R K. 1998. Sources of Pb for Indian ocean ferromanganese crusts; a record of Himalayan erosion? *Earth Planet. Sci. Lett.*, 158: 121~130.
- Frank M, Reynolds B C, O' Nions R K. 1999a. Nd and Pb isotopes in Atlantic and Pacific water masses before and after closure of the Panama gateway. *Geology*, 27: 1147~1150.
- Frank M, O' Nions R K, Hein J R, et al. 1999b. 60 Myr records of major elements and Pb-Nd isotopes from hydrogenous ferromanganese crusts; Reconstruction of seawater paleochemistry. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 63: 1689~1708.

- Futa K, Peterman Z, Hein J R. 1988. Sr and Nd isotopic variations in ferromanganese crust from the Central Pacific; implications for age and source provenance. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52: 2229~2233.
- Goldstein S L, O' Nions R K. 1981. Nd and Sr isotopic relationships in pelagic clays and ferromanganese deposits. *Nature*, 292: 324~327.
- Goldstein S L, O' Nions R K, Hamilton P J. 1984. A Sm-Nd isotopic study of atmospheric dusts and particulates from major river systems. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 70: 221~236.
- Goldstein S L, Jacobsen S B. 1987. The Nd and Sr isotopic systematics of river-water dissolved material; implications for the sources of Nd and Sr in the seawater. *Chem. Geol.*, 66: 245~272.
- Henderson G M, Martel D J, O' Nions R K, Shackleton N J. 1994. Evolution of seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ over the last 400 ka; the absence of glacial/interglacial cycles. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 128: 643~651.
- Henderson G M, Burton K W. 1999. Using ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) to assess diffusion rates of isotope tracers in ferromanganese crusts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 170: 169~179.
- Hess J, Bender M L, Schilling J-G. 1986. Evolution of the ratio of strontium-87 to strontium-86 in seawater from Cretaceous to present. *Science*, 231: 979~984.
- Hodell D A, Mead G A, Mueller P A. 1990. Variation in the strontium isotopic composition of seawater (8 Ma to present); implications for chemical weathering rates and dissolved fluxes to the oceans. *Chem. Geol. (Isot. Geos. Sect.)*, 80: 291~307.
- Hodell D A, Woodruff F. 1994. Variations in the strontium isotopic ratio of seawater during the Miocene; Stratigraphic and geochemical implications. *Paleoceanography*, 9: 405~426.
- Hooker P J, Hamilton P J, O' Nions R K. 1981. An estimate of the Nd isotopic composition of Iapetus seawater from ca. 490 Ma metalliferous sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 56: 180~188.
- Ingram B L, Hein J R, Farmer G L. 1990. Age determinations and growth rate of Pacific ferromanganese deposits using strontium isotopes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 54: 1709~1721.
- Jeandel C. 1993. Concentration and isotopic composition of Nd in the South Atlantic Ocean. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 117: 581~591.
- Jeandel C, Bishop J K, Zindler A. 1995. Exchange of neodymium and its isotopes between seawater and small and large particles in the Sargasso Sea. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59: 535~547.
- Jones C E, Halliday A N, Rea D K, Owen R M. 1994. Neodymium isotopic variations in North Pacific modern silicate sediment and the insignificance of detrital REE contributions to seawater. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 127: 55~66.
- Keto L S, Jacobsen S B. 1988. Nd isotopic variation of Phanerozoic paleoceans. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 90: 395~410.
- Korzun V I. 1978. World water balance and water resources of the earth. *Studies and Reports in Hydrology No. 25*. UNESCO (U.N. Educ. Sci. Coop. Org.), Rome, 663.
- Lee D C, Halliday A N, Hein J R, et al. 1999. Hafnium isotope stratigraphy of ferromanganese crusts. *Science*, 285 (5430): 1052~1054.
- Ling H-F, Burton K W, O' Nions R K, Hein J R. 1995. Evolution of Nd and Pb isotopes in Pacific seawater from ferromanganese crust. *TERRA Abstracts*, supplement No. 1 to Terra nova, 7: 25.
- Ling H-F, O' Nions R K, Burton K W, Kamber B, Belshaw N S, Gibb A. 1996. Nd and Pb isotope history of central Pacific seawater. *Journal of Conference*, 1: 361.
- Ling H-F, Burton K W, O' Nions R K, Kamber B S, Von Blanckenburg F, Gibb A J, Hein J R. 1997. Evolution of Nd and Pb isotopes in Pacific seawater from ferromanganese crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 146: 1~12.
- Martin E E, Macdougall J D. 1995. Sr and Nd isotopes at the Permian/Triassic boundary: A record of climate change. *Chem. Geol.*, 125: 73~99.
- Martin E E, Haley B A. 2000. Fossil fish teeth as proxies for seawater Sr and Nd isotopes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64: 835~847.
- O' Nions R K, Carter S R, Cohen R S, Evensen N M, Hamilton P J. 1978. Pb, Nd and Sr isotopes in oceanic ferromanganese deposits and ocean floor basalts. *Nature*, 273: 435~438.
- O' Nions R K, Frank M, von Blanckenburg F, Ling H-F. 1998. Secular variation of Nd and Pb isotopes in ferromanganese crusts from the Atlantic, Indian and Pacific Oceans. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 155: 15~28.
- Palmer M R, Elderfield H. 1986. Rare earth elements and neodymium isotopes in ferromanganese oxide coating of Cenozoic foraminifera from the Atlantic ocean. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 50: 409~417.
- Peucker-Ehrenbrink B, Blum J D. 1998. Re-Os isotope systematics and weathering of Precambrian crustal rocks; Implications for the marine osmium isotope record. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 62: 3193~3203.
- Piegras D J, Wasserburg G J, Dasch E J. 1979. The isotopic composition of Nd in different ocean masses. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 45: 223~236.
- Piegras D J, Wasserburg G J. 1980. Neodymium isotopic variation in seawater. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 50: 128~138.
- Piegras D J, Wasserburg G J. 1982. Isotopic composition of neodymium in seawaters from the Drake Passage. *Science*, 217: 207~214.
- Piegras D J, Wasserburg G J. 1985. Strontium and neodymium isotopes in hot springs on the East Pacific Rise and Guaymas Basin. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 72: 341~356.
- Piegras D J, Wasserburg G J. 1987. Rare earth element transport in the western North Atlantic inferred from Nd isotopic observations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 51: 1257~1271.
- Piegras D J, Jacobsen S B. 1988. The isotopic composition of neodymium in the North Pacific. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52: 1373~1381.
- Piegras D J, Jacobsen S B. 1992. The behavior of rare earth elements in seawater; Precise determination of variations in the North Pacific water column. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56: 1851~1862.
- Raymo M E, et al. 1988. Influence of late Cenozoic mountain building in ocean geochemical cycles. *Geology*, 16: 649~653.
- Reynolds B C, Frank M, O' Nions R K. 1999. Nd- and Pb-isotope time series from Atlantic ferromanganese crusts; implications for changes in provenance and paleocirculation over the last 8 Myr. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 173: 381~396.
- Shackleton N J, Opdyke N D. 1973. Oxygen isotope and palaeomagnetic stratigraphy of equatorial Pacific Core V28-238; Oxygen

- isotope temperatures and ice volumes on a 105 year and 106 year scale. *Quaternary Research*, 3: 39~55.
- Schaule B K, Patterson C C. 1981. Lead concentrations in the north Pacific: evidence for global anthropogenic perturbations. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 54: 97~116.
- Shimizu H, Tachikawa K, Masuda A, Nocchi Y. 1994. Cerium and neodymium isotope ratios and REE patterns in seawater from the North Pacific Ocean. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58: 323~333.
- Staudigel H, Doyle P, Zindler A. 1985/86. Sr and Nd isotope systematics in fish teeth. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 76: 45~56.
- Stille P, Clauer N, Abrecht J. 1989. Nd isotopic composition of Jurassic Tethys seawater and the genesis of Apline Mn-deposits: Evidence from Sr-Nd isotope data. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53: 1095~1099.
- Stordal M C, Wasserburg G J. 1986. Neodymium isotopic study of Baffin Bay water: source of REE from very old terranes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 77: 259~272.
- Vance D, Burton K. 1999. Neodymium isotopes in planktonic foraminifera: a record of the response of continental weathering and ocean circulation rates to climate change. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 173: 365~379.
- van Andel T H, Heath R G, Moore T C. 1975. Cenozoic history and paleoceanography of the Central Equatorial Pacific Ocean. *Mem. Geol. Soc. Amer.*, 143:134.
- Veizer J, Compston W. 1974. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ composition of seawater during the Phanerozoic. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 38: 1461~1484.
- Veizer J, Ala D, Azmy K, et al. 1999. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic. *Chem. Geol.*, 161: 59~88.
- Von Blanckenburg F, O'Nions R K. 1999. Response of beryllium and radiogenic isotope ratios in Northern Atlantic deep water to the onset of northern hemisphere glaciation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 167(3~4): 175~182.
- VonderHaar D L, Mahoney J J, McMurtry G M. 1995. An evaluation of strontium isotopic dating of ferromanganese oxides in a marine hydrogenous ferromanganese crust. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59: 4267~4277.
- Whittaker S G, Kyser T K. 1993. Variation in the neodymium and strontium isotopic composition and REE content of molluscan shells from the Cretaceous western interior seaway. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57: 4003~4014.
- Yang J-D, Tao X-C, Xue Y-S. 1997. Nd isotopic variations of Chinese seawater during Neoproterozoic through Cambrian. *Chem. Geol.*, 135: 127~137.

Evolution of Oceanic Nd Isotopic Composition in the Cenozoic and Its Environmental Significance

LING Hongfei¹⁾, JIANG Shaoyong¹⁾, Ni Pei¹⁾, ZHANG ZhiYuan¹⁾, ZHOU Huaiyang²⁾

1) *State Key Laboratory for Mineral Deposits Research and Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210093*

2) *Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou, 310012*

Abstract

Recent achievements in obtaining information of the evolution of oceanic Nd isotopic composition in the Cenozoic and its environmental significance are summarized. Variations in the circulation between the Pacific and Atlantic and in Nd isotopic composition corresponded to the closing of the Panama seaway 5~3 Ma ago. However, the cause for the little variation in Nd isotopic composition in the Indian Ocean in the same period is not clear and needs further work to reveal.

Key words: evolution; Nd isotopic composition; paleoceanography; Cenozoic