

# 海洋 Nd 同位素演化及古洋流循环示踪研究

赵葵东<sup>1,2</sup>, 蒋少涌<sup>1,2,\*</sup>, 郑新源<sup>1,2</sup>, 陈天宇<sup>1,2</sup>, 凌洪飞<sup>1,2</sup>

1. 内生金属成矿机制研究国家重点实验室; 南京大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093

2. 南京大学 海洋地球化学研究中心, 江苏 南京 210093

Zhao Kuidong<sup>1,2</sup>, Jiang Shaoyong<sup>1,2,\*</sup>, Zheng Xinyuan<sup>1,2</sup>, Chen Tianyu<sup>1,2</sup>, Ling Hongfei<sup>1,2</sup>

1. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research; School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2. Center for Marine Geochemistry Research, Nanjing University, Nanjing 210093, China

**Zhao Kuidong, Jiang Shaoyong, Zheng Xinyuan, et al. Nd isotope evolution of ocean waters and implications for paleo-ocean circulation. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(5):160-171**

**Abstract:** Nd isotope of ocean waters has become an important tracer for continental weathering and oceanic circulation. Dissolved oceanic Nd is controlled by input from continental weathering, while hydrothermal input can be ignored. The Nd isotope composition of seawater is not uniform in the present-day oceans because the oceanic residence time (500–1000 a) of Nd is shorter than the mixing time (~1500 a) of the ocean and the relative contributions of Nd from ancient continental versus young volcanogenic materials differ in various basins. Therefore, the Nd isotope system has been used as a tracer for water exchange and paleo-ocean circulation. There are four major marine materials which can preserve Nd isotope compositions of paleo-ocean waters: hydrogenetic ferromanganese crusts, planktonic or benthic foraminifera, fossil fish teeth or bones, authigenic Fe-Mn oxide fraction in marine sediments. Each material has its own advantages and disadvantages. Cenozoic Nd isotopic evolutions of major oceans on timescales of millions have been acquired by analyzing Fe-Mn crusts. High resolution Nd isotopic evolution can be acquired through studying foraminifera, fossil fish debris and Fe-Mn oxides. According to Nd isotopic evolution we may reconstitute the water exchange to trace open and closure of paleo-seaways, which can be used to study the relationship between tectonic activities and climate changes. The combination of Nd isotope and the proxies for climate change can be used to study the relationship between ocean circulation and climate shifts. Nd isotope of surface water can provide information about continental weathering input.

**Key words:** Nd isotope; ocean circulation; weathering; paleoclimate

**摘要:** 海洋 Nd 同位素演化已经成为示踪陆源风化输入和洋流循环改变的最重要的手段之一, 得到了越来越多的应用, 并取得了许多重要的成果。海水的 Nd 同位素组成主要受陆源输入物质控制, 热液输入几乎可以忽略。由于 Nd 在海洋中的停留时间(约 500~1 000 a)略小于海水的平均混合时间(约 1 500 a), 且各洋盆有不同的 Nd 同位素风化输入, 因此现代各大洋海水具有不同的 Nd 同位素组成。在陆源输入稳定的情况下, 可以利用海水的 Nd 同位素组成和演化来示踪水体的混合或洋流循环的改变。目前主要依靠对海洋中水成

收稿日期: 2009-04-24; 修回日期: 2009-06-14

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2006CB701402)

作者简介: 赵葵东(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事同位素地球化学方面的研究。E-mail: zhaokd@nju.edu.cn

\* 通讯作者: 蒋少涌。E-mail: shyjiang@nju.edu.cn

铁锰结壳、海洋钙质有孔虫壳体、磷酸质鱼骨头或鱼牙齿化石以及沉积物中铁锰氧化物组分等的研究来恢复和反演古海水的 Nd 同位素组成和演化。4 种分析材料各有其优缺点。其中,通过对水成铁锰结壳的 Nd 同位素分析,基本建立了各大洋新生代以来的主要洋流的 Nd 同位素组成的长尺度演化。通过有孔虫壳体、鱼化石碎片和沉积物中 Fe-Mn 氧化物组分可以进行高时间分辨率的古海水 Nd 同位素演化示踪。利用海水 Nd 同位素演化可以示踪古洋流通道的开启或闭合,以及获得水体交换的直接信息,为研究构造运动与气候变化之间的关系提供指示。同时,将海水 Nd 同位素演化与气候变化的指标结合起来,可以用于示踪各种气候条件下洋流循环的改变,将洋流循环的改变与气候变化联系起来,研究两者之间的成因关系。对表层水体的 Nd 同位素组成的研究则可以示踪不同气候条件下大陆陆源风化输入的改变。

**关键词:** Nd 同位素;洋流循环;风化输入;古气候

**中图分类号:** P59 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2321(2009)05-0160-12

洋流循环在气候系统中占有十分重要的地位,热盐环流模式的改变可能导致热量和水汽分配发生改变,从而引起局部甚至全球的气候和环境变化。越来越多的地质记录和数值模拟结果表明,洋流变化与地质历史时期中一些气候变化事件,特别是与一些气候突变事件的发生有密切的关系,如: Dansgaard-Oeschger (D/O) 事件, Henrich 事件, 新仙女木事件 (Younger Dryas) 等<sup>[1-4]</sup>。洋流循环和气候之间的相互关系是目前古海洋学研究方面的一个重要前沿科学问题。对现代洋流循环的示踪可以通过直接测量海水的盐度、温度等参数来进行推测。然而对于恢复地质历史时期古洋流状况的研究,只能借助于各种保存在海洋记录中的“示踪剂”来获得。传统使用的指示洋流循环的“示踪剂”包括:有孔虫中的碳同位素组成<sup>[5-6]</sup>,以及有孔虫的 Cd/Ca、Ba/Ca 等元素比值<sup>[7-9]</sup>等。由于这些指标容易受到全球碳库改变、温度效应、生物效应等因素的改造,导致不一定能提供直接与洋流变化相关的信息。因此,几种记录有时在一些海域会显示出不一致,比如南大西洋的记录显示  $\delta^{13}\text{C}$  值在冰期时变低,指示流入南大西洋的北大西洋深水流在冰期时可能减弱甚至关闭<sup>[5]</sup>,但是 Cd/Ca、Ba/Ca、 $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$  等比值在冰期和间冰期却变化不大<sup>[9-10]</sup>。

近年来,利用海洋中放射成因同位素体系来示踪和恢复古洋流循环的变化成为一个受人关注的领域<sup>[11-13]</sup>。如利用海洋中的 Nd 同位素<sup>[14-15]</sup>、Pb 同位素<sup>[16-17]</sup>、Hf 同位素<sup>[18]</sup>、 $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$  比值<sup>[12, 19-20]</sup>等示踪指标在恢复古洋流分布或流速方面取得了很大的进展。其中,利用海洋 Nd 同位素组成的演化来示踪古洋流循环的改变是目前研究程度最高的,并且已经取得了许多重要成果,极大地推动了古洋流循环方面的研究。结合我们正在开展的部分研究成果,本文对古海水 Nd 同位素的组成演化以及在示

踪古洋流循环方面的研究进展进行了综述。希望本文能够起到抛砖引玉的作用,促进我国在这一领域的研究。

## 1 海水 Nd 同位素组成的性质及示踪洋流循环的基本原理

Nd 是稀土元素之一,有 7 个天然存在的同位素,分别为: $^{142}\text{Nd}$ 、 $^{143}\text{Nd}$ 、 $^{144}\text{Nd}$ 、 $^{145}\text{Nd}$ 、 $^{146}\text{Nd}$ 、 $^{148}\text{Nd}$ 、 $^{150}\text{Nd}$ 。其中, $^{143}\text{Nd}$  是另一个稀土元素  $^{147}\text{Sm}$  通过  $\alpha$ -衰变的产物。Nd 同位素组成一般用  $\epsilon_{\text{Nd}}$  来表示 ( $\epsilon_{\text{Nd}} = [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{样品}} / (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{球粒陨石}} - 1] \times 10\,000$ )。其中现代球粒陨石的  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  值为 0.512 638<sup>[21]</sup>。

Sm-Nd 同位素体系最初并没有被应用于古海洋学研究,而是作为岩石地球化学的示踪体系来指示各种壳-幔演化过程<sup>[22]</sup>。最早研究海洋中的 Nd 同位素是在 20 世纪 70 年代, O'Nions 等<sup>[23]</sup>首次报道了海洋铁锰结核以及热液沉积物的 Nd 同位素组成。经过 20 余年的研究,研究者们对海洋中 Nd 的来源以及 Nd 同位素组成的性质有了较为清晰的认识。

首先,海水中的 Nd 同位素组成主要受大陆输入物质控制。被搬运到海洋中的陆源物质被海水部分溶解,其携带的一部分 Nd 进入海水,从而使海水获得了相应的 Nd 同位素组成信息。绝大多数大陆物质通过河流搬运作用输入海洋,每年由河流输入海洋的 Nd 大概约为  $7.2 \times 10^8 \text{ g}$ ; 少部分陆源物质通过风的搬运输入海洋,每年由风沙输入海洋的溶解 Nd 大约为  $2.5 \times 10^8 \text{ g}$ <sup>[24]</sup>。也有研究显示有部分 Nd 通过地下水进入海洋中<sup>[25]</sup>。与海洋的 Sr 同位素体系不同,高温热液体系对海洋溶解 Nd 储库的贡献基本可以忽略。尽管高温热液流体的 REE 含

量是普通海水的几十甚至上万倍,但是 REE 很快就会随热液颗粒沉淀在热液喷口附近<sup>[26]</sup>。Halliday 等<sup>[27]</sup>发现,从东太平洋洋中脊 10 km 之内到 1 000 km 之外的含金属沉积物的 Nd 同位素组成几乎一致,并且并不显示热液的特征。这进一步确认了 Nd 在热液喷口附近存留时间很短( $<1\text{ a}$ ),很快就被热液颗粒吸附并沉淀到喷口附近。总体而言,热液来源的 Nd 在海洋中所占比例很小,对海水 Nd 同位素分布和演化的影响可以忽略。

其次, Nd 在海水中的停留时间约为 500 ~ 1 000 a<sup>[28-29]</sup>。这个停留时间略小于海水平均混合时间(约 1 500 a),因此海水 Nd 同位素组成既不会在全球尺度上被混合均匀,也可以随洋流长距离迁移并被区分出来。

最后,海水的 Nd 同位素组成不受温度、生物等作用影响。研究发现:海水 Nd 同位素组成在绝大多数海域与海水的盐度和  $\text{SiO}_2$  含量有很好的相关关系<sup>[13]</sup>。由于海水盐度和  $\text{SiO}_2$  含量是海洋学中常用的两种保守指标,这表明大部分海域中的海水 Nd 同位素都具有保守性质。即在外来输入保持稳定的条件下,海水 Nd 同位素的变化主要是由于具有不同 Nd 同位素组成的洋流间混合而导致的。

通过直接测量海水或者海洋 Fe-Mn 沉积物的

Nd 同位素组成发现,现代全球不同洋盆(或同一洋盆中不同洋流)的海水 Nd 同位素组成有明显差异(图 1)。例如:北大西洋深水  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值较低,在  $-13 \sim -10$ ;南大洋和印度洋海水  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值居中,为  $-7 \sim -9$  左右;北太平洋海水的  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值最高,在  $-4 \sim -2$ <sup>[30]</sup>。现代各大洋海水的 Nd 同位素组成是洋流循环与当地陆源输入共同作用的结果(图 1)。不同洋盆周边的陆源输入物质 Nd 同位素组成存在明显差异<sup>[31]</sup>,如:太平洋周边广泛分布着活跃的火山带,陆源物质多为年轻的火山岩,其  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值相对较高;而北大西洋周边多为前寒武系的古老陆块,其  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值很低。陆源输入的差异导致各大洋 Nd 同位素组成的这种变化<sup>[32]</sup>。正是不同洋流间海水 Nd 同位素组成的显著差异性使得利用 Nd 同位素来区分水体来源成为可能。

综上所述,由于进入海洋的陆源物质的 Nd 同位素组成不同,导致不同洋流获得了不同的 Nd 同位素信号,个体洋流在流动过程中基本保持各自的 Nd 同位素组成不变。在外界大陆风化输入稳定的条件下,海水 Nd 同位素组成的变化主要是由于不同来源的水体按不同比例混合而发生变化。因此,在已知大洋各主要洋流 Nd 同位素组成的前提下,研究某具体海域海水 Nd 同位素的演化就有可能反演出流经本区域洋流的变化情况。

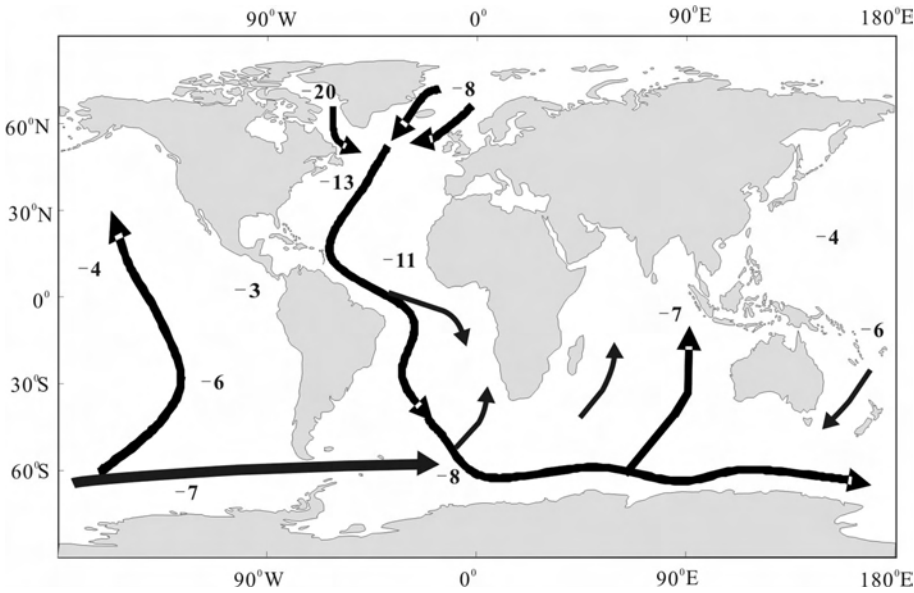


图 1 现代大洋底层水洋流循环和  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值分布图  
Fig. 1 Modern ocean circulation and  $\epsilon_{\text{Nd}}$  distribution of deep water



## 2 现代和古代海水 Nd 同位素组成的获得

海水中 Nd 含量很低, 通常只有几个  $10^{-12}$ 。直接测量海水的 Nd 同位素组成比较困难, 通常需要经过处理 10~20 L 海水样品, 并经过过滤、酸化、加 Fe 共沉淀等步骤, 最终才能进入 Nd 同位素分离提纯和仪器测试流程<sup>[33]</sup>。因此, 已经发表的直接测量海水 Nd 同位素组成的文章不多<sup>[33-43]</sup>。但是, 直接测量海水 Nd 同位素组成提供了现代大洋海水 Nd 同位素组成的分布特征, 为使用 Nd 同位素示踪洋流循环奠定了基础。Blanckenburg<sup>[44]</sup>将前人测量的西大西洋海水 Nd 同位素组成投到相应的海水盐度分布剖面图上, 发现海水 Nd 同位素组成与洋流的分布有很好的吻合。

为了得到古海水的 Nd 同位素组成, 研究者们寻找并测量了多种被认为能够记录海水 Nd 同位素组成的海洋沉积记录。这些被认为能够保存海水 Nd 同位素组成信息的海洋沉积记录主要包括以下四类: (1) 海洋水成 Fe-Mn 结壳; (2) 海洋沉积物中钙质有孔虫壳体; (3) 海洋沉积物中磷酸质鱼骨、鱼牙齿化石; (4) 海洋沉积物中的 Fe-Mn 氧化物组分等。每类材料各有其优缺点, 对其分述如下。

(1) 海洋中水成 Fe-Mn 结壳是最常使用的海水 Nd 同位素载体。Fe-Mn 结壳, 在缓慢生长的过程中不断吸收周围海水的 REE 和一些其他金属离子, 因此能够记录其形成时周围海水的 Nd 同位素信息以及其他一些金属元素同位素信息 (如 Pb 同位素和 Hf 同位素等)。Fe-Mn 结壳中 Nd 元素含量通常为  $(n \times 10 \sim n \times 100) \times 10^{-6}$ , 远高于海水 Nd 元素含量, 因此便于进行同位素分析。Fe-Mn 结壳的分析测试流程相对简单: 首先用微钻取样, 然后用 2.5 N HCl 溶解后离心, 取上层溶液分离提纯 Nd, 供同位素分析。前人对全球主要大洋 Fe-Mn 结壳的 Nd 同位素组成和演化进行了深入的研究, 这些研究对全球各主要洋流的 Nd 同位素组成得到了很好的限定, 并揭示了最老约 80 Ma 以来的海水 Nd 同位素的演化趋势<sup>[11, 13, 45]</sup>。

但是, 生长速率慢 (通常每 Ma 仅长几 mm) 的缺点极大地限制了 Fe-Mn 结壳在高时间分辨率工作上的应用。尽管近年来有一些利用 LA-ICPMS 方法激光烧蚀结壳, 从而获得万年尺度上 Nd 同位

素组成变化的尝试<sup>[46-47]</sup>, 但是结壳天生的慢生长速率无疑会对今后这些高时间分辨率的工作带来很多困难和不确定性。此外, 目前常规的结壳定年方法主要依靠结壳中  $^{10}\text{Be}/^{9}\text{Be}$  比值变化和 Co 含量变化, 对于老于 10 Ma 的结壳来说主要是基于 Co 含量外推, 这种定年的方法很难发现结壳生长过程中的一些生长间断阶段<sup>[11]</sup>。因此, 无法精确确定年龄也极大地限制了这种方法的应用。

(2) 另一种被认为能够保存海水 Nd 同位素组成的海洋记录是钙质有孔虫。早期 Palmer 和 Elderfield<sup>[48]</sup>就研究过有孔虫中的 Nd 同位素, 他们从大西洋 20 余处的沉积物表层挑选出有孔虫化石, 并测量了其 Nd 同位素组成, 发现与对应的海水 Nd 同位素组成相似。但是由于没有采用特别的清洗流程, 他们所测量的 Nd 同位素可能主要受有孔虫外部的 Fe-Mn 氧化物包层控制, 因为约 90% 的 REE 赋存于 Fe-Mn 包层中, 而非碳酸盐晶格中<sup>[49]</sup>。后来, Vance 和 Burton<sup>[50]</sup>首次采用一系列氧化-还原溶液清洗浮游有孔虫, 并报道了“清洁”浮游有孔虫的 Nd 同位素组成, 认为可以代表表层海水的 Nd 同位素组成。最近, Klevenz 等<sup>[51]</sup>用相同的清洗方法, 报道了南大西洋底栖有孔虫的 Nd 同位素组成, 认为其可以代表底层海水的 Nd 同位素组成。对有孔虫进行清洗和 Nd 同位素测试的具体流程可见参考文献<sup>[50]</sup>。

利用有孔虫来恢复海水 Nd 同位素的最大缺点是: 由于有孔虫中的 Nd 含量很低 ( $< 10^{-6}$ ), 要挑选出足够量的有孔虫供 Nd 同位素分析将是一件耗时耗力的工作, 同时对实验流程中 Nd 的本底控制也较重要。

(3) 沉积物中磷酸质鱼牙齿化石在与海水接触或者非常早期的成岩阶段吸附了大量的海水来源的 Nd, 能够保存沉积时周围海水的 Nd 同位素组成; 同时, 由于孔隙水中的 Nd 含量极低, 因此晚期成岩作用对鱼牙齿中的 Nd 同位素影响很小<sup>[52-53]</sup>。测量的鱼牙齿化石 Nd 同位素组成与同时代周围海水的 Nd 同位素基本一致证明了这种记录的可靠性<sup>[52-55]</sup>。通常, 鱼牙齿化石中的 Nd 含量为  $(n \times 100 \sim n \times 1\,000) \times 10^{-6}$ , 同位素分析比较方便。挑选到足量的鱼牙齿化石后, 用去离子水超声清洗, 并用 2 N 醋酸溶解约 20 min (或者样品重量减少约 15%) 洗去附着于鱼牙齿化石表面的粘土或成岩变质部分。清洗好的化石用 1.8 N HCl 溶解, 进入 Nd 同

位素的常规分离、测试流程<sup>[14, 52-53]</sup>。

沉积物中的鱼牙齿化石可以用来恢复高时间分辨率的海水 Nd 同位素演化趋势, 从而反演出高精度的洋流变化情况。而用鱼牙齿来研究海水 Nd 同位素的最大问题是: 需要的沉积物量大; 另外, 沉积物中不是所有地点和所有层位都能挑出足够量的鱼牙齿化石供同位素分析。

(4) 另一种目前受到关注的海水 Nd 同位素载体是沉积物中的自生 Fe-Mn 氧化物组分。自生 Fe-Mn 氧化物组分在沉积物中通常覆盖在有孔虫化石外表, 或无定形的存在于沉积物的胶合组分之中。Fe-Mn 氧化物在水环境中的吸附性很强, 海洋环境中 Fe-Mn 氧化物从海水中获得 REE 并进入沉积物是一个重要的地球化学过程, 多年来一直是研究者感兴趣的课题<sup>[56-57]</sup>。尽管目前海水 Nd 进入 Fe-Mn 氧化物的细节还不完全清楚, 但无疑 Fe-Mn 氧化物从周围海水中获得了大量的 Nd。通过 Nd 同位素对比发现: Fe-Mn 氧化物组分与周围海水的 Nd 同位素组成基本一致, 这进一步证明了 Fe-Mn 氧化物中的 Nd 主要来源于海水<sup>[58-60]</sup>。因此, 海洋沉积物中 Fe-Mn 组分的 Nd 同位素组成可以反映沉积时底层海水的 Nd 同位素组成信息。利用醋酸浸泡去掉沉积物中碳酸盐组分, 再用醋酸与盐酸羟胺的混合溶液的还原剂浸泡就可以还原提取沉积物中的 Fe-Mn 氧化物组分, 进而进行 Nd 同位素测试。该方法已经被成功应用于大西洋、北冰洋等多个海域的海水 Nd 同位素演化以及相关的洋流、环境变化研究之中<sup>[15, 61-66]</sup>。

尽管目前对于还原条件下 Fe-Mn 氧化物保存的海水 Nd 同位素是否会发生变化这一问题还有一定的疑问, 但这种载体的优点无疑让它成为研究海水 Nd 同位素演化非常具有应用前景的材料之一。首先, Fe-Mn 氧化物在沉积物中普遍存在, 使得它可以被广泛地运用于全球海洋的大部分区域而不受空间分布的限制; 其次, 由于沉积物的沉积速率远远大于 Fe-Mn 结壳, 且沉积物的定年相对 Fe-Mn 结壳来说更加准确, 因此它可以很方便的被用来开展高时间分辨率(千年尺度甚至更高)的洋流研究工作。

因此, 针对具体的地质问题, 选择合适的材料来进行 Nd 同位素分析, 可以获得表层或者底层海水长尺度或高时间分辨率的 Nd 同位素演化信息, 进而示踪陆源风化输入或洋流循环的改变。

### 3 主要底层洋流 Nd 同位素的长尺度演化

在 20 世纪 90 年代中期以前对世界各大洋古海水 Nd 同位素组成和演化的研究主要来自对沉积物中碳酸盐和磷酸盐物质的分析<sup>[67-69]</sup>, 但对这些材料能否保存古海水的 Nd 同位素组成信息目前还存在诸多争议。近 15 a 来, 主要通过对大洋中水成 Fe-Mn 结壳的分析基本获得了世界各大洋底层水的 Nd 同位素长尺度演化信息。但由于 Fe-Mn 结壳的形成和保存问题, 目前最多只能获得约 80 Ma 以来的海水 Nd 同位素演化信息。对时代更久时期的海水 Nd 同位素的组成和演化目前只有零星的资料发表, 主要依靠对大洋钻孔沉积物中鱼化石碎片或对碳酸盐的分析<sup>[70-73]</sup>。

对太平洋的研究主要来自对采自中—北太平洋地区的几块水成 Fe-Mn 结壳的 Nd 同位素分析。分析表明, 从约 80 Ma 以来至约 3 Ma, 海水的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值从  $-5 \sim -4.5$  缓慢增加到约  $-3.5$ 。之后, 海水  $\epsilon_{Nd}$  值发生轻微的降低(图 2)<sup>[16, 45]</sup>。80~3 Ma 间太平洋海水  $\epsilon_{Nd}(t)$  值的轻微升高可能反映了太平洋周边火山弧岩浆活动增强, 同时火山岩的风化作用也增强<sup>[45]</sup>, 也可能与这些结壳随洋壳扩张朝北逐渐迁移相关<sup>[74]</sup>。

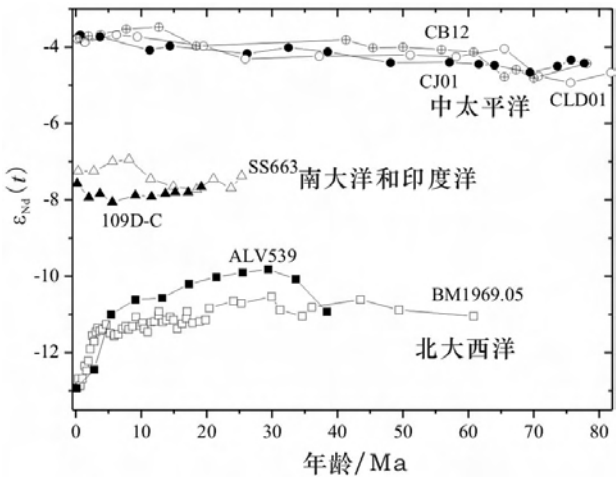


图 2 主要大洋典型 Fe-Mn 结壳  $\epsilon_{Nd}$  值演化  
(数据来源: 太平洋<sup>[45]</sup>; 南大洋和印度洋<sup>[17, 76]</sup>; 北大西洋<sup>[17, 75]</sup>)  
Fig. 2 Evolution of  $\epsilon_{Nd}$  values of ferromanganese crusts from major oceans

北大西洋海水具有比太平洋海水更低的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值, 对两块采自北大西洋的水成 Fe-Mn 结壳样品

(BM 1969.05 和 ALV 539) 的研究揭示了北大西洋深水 (North Atlantic Deep Water, 简称 NADW) 约 60 Ma 以来的 Nd 同位素演化信息<sup>[17, 75]</sup>。从 60~3 Ma, 北大西洋深水的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值较为恒定, 变化在 -11.5~-10.5, 但从 3 Ma 开始,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值明显下降, 从 -11 逐渐下降到约 -13 (图 2)。近 3 Ma 以来的北大西洋深水的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值的下降可能跟 Labrador 海海水的输入加强有关<sup>[11, 75]</sup>。同时, 巴拿马海道的关闭和 NADW 的增强也抑制了从南大西洋流入北大西洋的水量<sup>[11, 75]</sup>。另外, 约 2.7 Ma 开始的北半球大冰期会使陆源风化输入增强, 从而会导致北大西洋深水  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值的下降<sup>[76-77]</sup>。其中, 北半球大冰期引起的陆源风化输入的增强可能是控制北大西洋深水约 3 Ma 以来  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值下降的主要因素<sup>[11]</sup>。

南大西洋和印度洋海水的 Nd 同位素组成自 14 Ma 以来变化不多,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值维持在 -9~-7 (图 2)<sup>[78]</sup>。约 3 Ma 以来北大西洋深水的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值发生明显降低, 但在南大西洋和印度洋并没有发现这样的下降。因此可能表明从北半球大冰期开始, 从北大西洋流入南大洋的水量减少。虽然流入南大洋的 NADW 的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值下降了, 但流入的水量减少了, 因此并未导致南大洋和印度洋海水的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值降低。通过 Nd 同位素计算表明, 从北大西洋流入的水量可能减少了 14%~37%<sup>[78]</sup>。

对古特提斯洋海水的 Nd 同位素组成的研究还比较少。Pucéat 等<sup>[70]</sup>通过对碳酸盐台地相沉积物中鱼牙齿化石的 Nd 同位素组成研究, 反演了特提斯表层水在白垩纪期间的 Nd 同位素变化。Soudry 等<sup>[71-72]</sup>测试了白垩纪到始新世特提斯沉积物中磷酸盐的 Nd 同位素组成, 建立了 Nd 同位素演化线。但由于样品来自特提斯洋的不同地方, 并且时间连续性并不好, 因此这些曲线的意义还有待更多工作来验证。相信以后对特提斯海水 Nd 同位素组成演化的研究将会对特提斯环流以及特提斯关闭等问题提供更好的证据。

## 4 高时间分辨率古海水 Nd 同位素演化及其应用

### 4.1 示踪古洋流通道的打开或关闭

构造运动引起的大型洋流通道的关闭和开启可以引起一系列海洋和气候变化<sup>[14, 79-80]</sup>。传统的一些间接研究手段对于海道开启和关闭的确切时间,

以及水体交换情况难以进行精确的限定, 从而也阻碍了对海道关闭和开启与气候变化之间联系的研究。由于海水 Nd 同位素组成可以很好地指示水体交换情况, 因此可以用于指示海道开启和关闭时水体的交换和停止情况, 明确地将洋流改变与气候变化的关系联系起来。因此, Nd 同位素在示踪古洋流通道打开或关闭的研究方面正发挥越来越大的作用。

例如位于中美洲地区的巴拿马海道 (Panama Seaway) 15 Ma 前是连通赤道东太平洋和大西洋的开放洋流通道, 当时深度超过 2 000 m, 赤道太平洋和大西洋海水可以通过巴拿马海道自由交流<sup>[81]</sup>。但后来受构造运动影响, 海道自中新世开始逐渐变浅, 最终出露水面成为连接南北美洲的大陆桥——巴拿马地峡。巴拿马海道的逐渐关闭是中新世以来全球海陆格局最重大的变化之一, 被认为对北半球海洋状态和气候产生了深远影响。有研究认为, 由于巴拿马海道的关闭加强了大西洋西边界流以及热盐环流体系, 从而增加了水汽向北半球高纬度地区的输送, 有利于北极冰盖的形成。因此有研究者认为海道关闭直接导致了北半球大冰期的开始<sup>[82]</sup>。围绕巴拿马海道关闭还有很多没有解决的问题, 比如海道关闭前海水的流向问题以及海道关闭导致洋流交换停止的确切时间等<sup>[82]</sup>。对位于巴拿马海道两边的东赤道太平洋和大西洋布莱克海台地区的 Fe-Mn 结壳的 Nd 同位素演化研究表明<sup>[77]</sup>, 8~5 Ma 间大西洋一侧的结壳的 Nd 同位素有明显下降, 可能跟巴拿马海道逐渐关闭、通过巴拿马海道流入的太平洋海水逐渐减少有关。而东赤道太平洋一侧的 Fe-Mn 结壳的 Nd 同位素组成在同时期并没有发生明显改变。Newkirk 和 Martin<sup>[83]</sup>通过对加勒比海 ODP 998 和 999 孔沉积物中鱼化石碎片的 Nd 同位素测试, 也得到了相似的结论。郑新源<sup>[84]</sup>最近对巴拿马海道两边太平洋和加勒比海的两个钻孔沉积物中 Fe-Mn 氧化物的高精度 Nd 同位素分析也表明, 当巴拿马海道开启时, 底层水主要是由太平洋流入大西洋。但从约 10 Ma 开始, 海道逐渐关闭, 从太平洋流入大西洋的水体逐渐减少, 至约 4 Ma 时, 两边的水体交换停止。由于巴拿马海道在约 4 Ma 时已完全关闭, 因此可能并不是造成约 2.7 Ma 时北半球大冰期开始的直接原因。

位于南美洲和南极洲之间的 Drake 海道的开启促进了南极环流的形成, 一般被认为启动了新生代



的变冷<sup>[85]</sup>。但对 Drake 海道开启的时间存在着从中始新世到早中新世等不同的认识<sup>[80, 85]</sup>, 极大地阻碍了对南极环流与南极冰盖形成之间关系的研究。通过对南大洋 Agulhas 海脊的钻孔沉积物中高时间分辨率的鱼化石碎片的 Nd 同位素研究表明<sup>[14]</sup>, 从约 41 Ma 开始有浅层太平洋水通过 Drake 海道流入大西洋。随后, 海道逐渐加深, 环流增强, 生物生产率增加。至始新世晚期, 完全的南极环流形成。环流的形成和生物生产率的提高共同作用导致大气 CO<sub>2</sub> 含量降低, 促使温室气候向冰室气候的转变<sup>[14]</sup>。

#### 4.2 示踪洋流循环改变与气候变化的关系

气候与洋流之间的关系一直是海洋学家关注的问题。由于 Nd 同位素可以很好的示踪洋流循环的变化, 因此将海水 Nd 同位素组成演化与其他气候变化的指标结合起来研究, 可以为气候与洋流之间的关系提供很好的限制。

Rutberg 等<sup>[61]</sup>通过对南大西洋两个钻孔沉积物中 Fe-Mn 氧化物的 Nd 同位素测试, 结合底栖有孔虫碳同位素数据表明, 海水 Nd 同位素变化与有孔虫碳同位素变化有很好的相关性, 表明在冰期时流入南大西洋的北大西洋深水减弱甚至关闭。后来, Piotrowski 等<sup>[63]</sup>对这两个钻孔更高精度的 Nd 同位素变化研究表明, 冰期开始时, 底栖有孔虫的氧同位素先开始增加, 意味着冰盖增多, 底层水变冷; 随后有孔虫的碳同位素组成正漂, 意味着碳循环发生扰动; 延迟约 2 ka 后底层水 Nd 同位素组成发生下降, 意味着洋流循环发生了改变(图 3)。因此, 这一工作很好的将气候与洋流联系起来, 建立了两者变化的时间序列, 为将来气候变化的研究提供指示。

#### 4.3 示踪特殊气候环境条件下洋流循环的改变

现代对古气候古环境的研究更加关注对突变性或特殊性气候和环境的研究。因此研究特殊气候环境条件下海水的 Nd 同位素组成逐渐受人关注。

古新世—始新世热极大时期(Paleocene-Eocene Thermal Maximum, 简称 PETM)是大约 55 Ma 前的一个全球变暖时期。全球变暖时期洋流循环是否发生变化, 对于当前对温室气候的研究具有借鉴意义。Thomas<sup>[86]</sup>对中北太平洋地区两个钻孔中 70~35 Ma 间的鱼骨头化石碎片进行了 Nd 同位素分析测试, 两个钻孔都显示海水的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值在 PETM 事件时期明显增加, 达到 -3 左右。传统的大洋循环模式表明, 深层水的生成主要是在北大西洋和南大

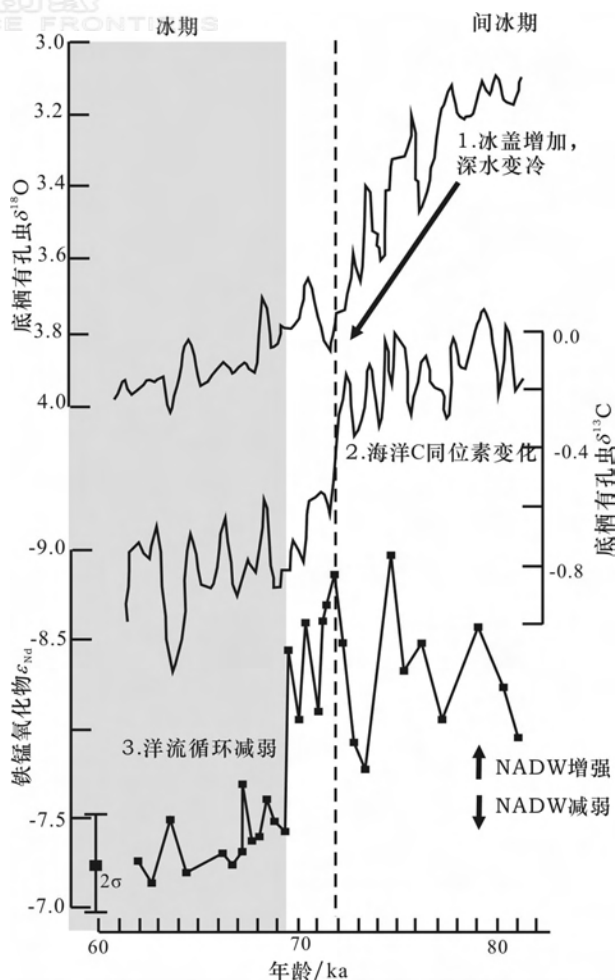


图3 南大西洋冰期-间冰期高时间分辨率海水 Nd 同位素演化与主要气候指标的关系

(据 Piotrowski 等, 2005)

Fig. 3 High resolution Nd isotope and C-O isotope evolution in the southern Atlantic Ocean at glacial-interglacial boundaries

洋完成, 北太平洋的深层水主要来自南部大洋。而 PETM 时期中北太平洋深层水增高的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值表明其可能直接来自北太平洋表层水的下沉<sup>[86]</sup>。因此证实, 气候温暖时期的大洋循环模式可能不同于传统的模式。进一步的研究表明温室气候下中北地区太平洋的洋流循环的改变可能有个局限的范围<sup>[87]</sup>。

白垩纪大洋缺氧事件(ocean anoxic events, 简称 OAEs)也是目前广受关注的海洋重大地质事件之一。缺氧事件的发生与洋流的改变是否有关系, 也一直存在争议。最近, MacLeod 等<sup>[73]</sup>首次研究了白垩纪大洋缺氧事件时期海水 Nd 同位素组成的演化。通过对位于 Demerara Rise 地区的 ODP 1258 孔沉积物中鱼化石碎片的 Nd 同位素测试表明, 在大洋缺氧事件 OAE2 时期, 该区底层海水的 Nd 同

位素组成类似于碳同位素组成, 也发生了明显的正漂, 漂幅达到  $8 \epsilon_{\text{Nd}}$  单位(图 4)。因此认为引起缺氧事件时期海水 Nd 同位素组成漂移的原因可能是跟

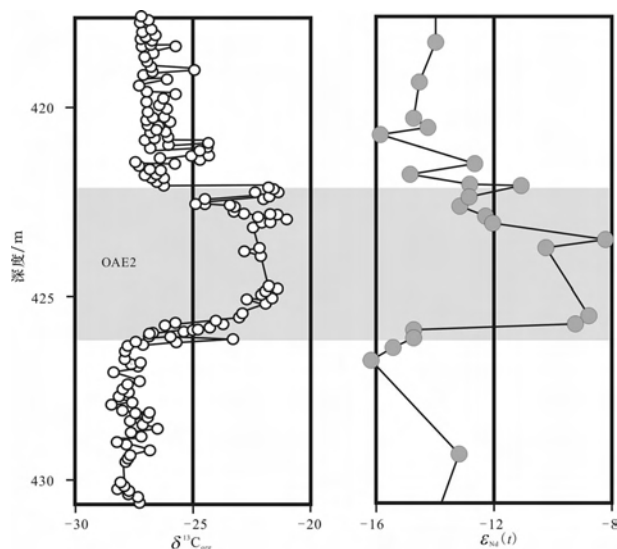


图 4 北大西洋 ODP 1258 孔大洋缺氧事件 OAE2 时期  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  和  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值演化 (据 MacLeod 等, 2008)

Fig. 4  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  evolution at ODP 1258 in the northern Atlantic Ocean across the Ocean Anoxic Event 2 interval

大火成岩省的喷发或者水体交换增强有关。虽然海水在氧化状态时, 热液流体的 Nd 会很快在喷口附近沉淀, 但如果在还原状态下, 热液中的 Nd 能被带走远离喷口, 因此在缺氧环境下, Nd 同位素记录是可能反映出大火成岩省喷发的。但该孔的 Nd 同位素正漂是否反映的是大火成岩省的喷发事件, 目前还不能确定。缺氧事件的发生是否跟大火成岩省的喷发有关, 也一直是存在争议的问题。该孔缺氧事件时期海水 Nd 同位素组成的正漂如果是记录大火成岩省喷发的话, 这将极大的推动对缺氧事件成因的研究。但我们最近对位于 Black Nose 地区的 ODP 1049C 孔大洋缺氧事件 OAE1b 期间的海水 Nd 同位素研究, 在该缺氧事件期间, 海水 Nd 同位素组成并没有发生明显改变。因此, 目前急需其他地方大洋缺氧事件的海水 Nd 同位素组成的记录, 以便验证 Nd 同位素的正漂是否是一全球性事件。同时需要对缺氧事件前后更高精度的 Nd 同位素演化的记录, 来判断缺氧事件的发生与洋流改变之间的因果关系。

#### 4.4 表层水 Nd 同位素演化示踪陆源风化输入的改变

由于 Nd 同位素组成在海洋中随时间的变化既

可能是海洋循环模式发生改变而引起, 同样也可能是大陆物源输入的通量或同位素组成发生变化而产生, 因此在解释海洋 Nd 同位素组成随时间发生变化时需要谨慎考虑<sup>[29]</sup>。利用 Nd 同位素示踪在陆源风化输入方面的应用, Stoll 等<sup>[88]</sup>对孟加拉湾南北向排列的几个钻孔中海洋浮游有孔虫 Nd 同位素变化的研究是一个很好的范例。以往对这一地区的海洋表层 Nd 同位素在冰期间冰期的变化研究因为局限于一个钻孔中<sup>[89]</sup>, 无法进一步区分这种变化是反应河流输入通量的变化, 还是印度洋温盐上升流的变化, 或者是河流物源区发生了变化。而 Stoll 等<sup>[88]</sup>研究了全新世和末次盛冰期孟加拉湾沉积物的南北剖面表层海水的  $\epsilon_{\text{Nd}}$  演化, 发现靠近北部河流的钻孔  $\epsilon_{\text{Nd}}$  幅度变化更大, 很好的指示了  $\epsilon_{\text{Nd}}$  的变化主要是河流输入的变化引起的。而孟加拉湾表层水  $\epsilon_{\text{Nd}}$  的 100 ka 变化周期以及冰盛期时其值变正, 有力的说明了热带辐合带 (Intertropical Convergence Zone, 简称 ITCZ) 在冰期的向南移动, 导致雨带向南的迁移, 从而主要剥蚀区也从更北的喜马拉雅地块向更南的缅甸弧移动。

## 5 结论和展望

当前地球系统科学的研究更多地强调对各圈层相互作用的研究, 海洋 Nd 同位素可以很好的用于示踪洋流循环, 因此可以将洋流循环的改变与气候变化联系起来, 探讨它们之间的成因联系。目前这一研究手段已经在一些重大地质事件的研究中取得了许多重要的研究成果, 成为国际上古海洋学研究中的热点, 在将来的研究中也有着诱人的发展前景。当前对古海洋和古气候的研究更加强调“深时”(deep time)研究, 目前正在使用的 4 种保存海水 Nd 同位素信息的材料还只适合于新生代以来, 个别能达到白垩纪晚期。因此, 如何从时代更久远的沉积岩中寻找可靠的古海水 Nd 同位素记录材料, 成为能否恢复白垩纪或之前时代的古海水 Nd 同位素演化的关键问题。今后如果在这一方面取得突破, 将极大地推动这一领域的研究。地质历史上由于古地理格局的不同, 会导致洋流循环的较大差异, 如果能通过 Nd 同位素记录恢复不同时期的洋流循环情况, 必将可以极大地推动古海洋和古气候的研究。



## References:

- [1] Clark P U, Pisias N G, Stocker T F, et al. The role of the thermohaline circulation in abrupt climate change[J]. *Nature*, 2002, 415: 863-869.
- [2] Rahmstorf S. Ocean circulation and climate during the past 120000 years[J]. *Nature*, 2002, 419: 207-214.
- [3] Broecker W S. Does the trigger for abrupt climate change reside in the ocean or in the atmosphere[J]? *Science*, 2003, 300: 1519-1522.
- [4] Schmittner A, Galbraith E D. Glacial greenhouse-gas fluctuations controlled by ocean circulation changes[J]. *Nature*, 2008, 456: 373-376.
- [5] Curry W B, Lohmann G P. Carbon isotopic changes in benthic foraminifera from the western South Atlantic: Reconstruction of glacial abyssal circulation patterns[J]. *Quaternary Research*, 1982, 18: 218-235.
- [6] Ninnemann U S, Charles C D. Changes in the mode of Southern Ocean circulation over the last glacial cycle revealed by foraminiferal stable isotopic variability[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 201: 383-396.
- [7] Boyle E A, Keigwin L D. Deep circulation of the North Atlantic over the last 200000 years: Geochemical evidence[J]. *Science*, 1982, 218: 784-787.
- [8] Boyle E A, Keigwin L. North Atlantic thermohaline circulation during the past 20000 years linked to high-latitude surface temperature[J]. *Nature*, 1987, 330: 35-40.
- [9] Boyle E A. Cadmium and delta  $^{13}\text{C}$  paleochemical ocean distributions during the stage 2 glacial maximum[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1992, 20: 245-287.
- [10] Yu E F, Francois R, Bacon M P. Similar rates of modern and last-glacial ocean thermohaline circulation inferred from radiochemical data[J]. *Nature*, 1996, 379: 689-694.
- [11] Frank M. Radiogenic isotopes: Tracers of past ocean circulation and erosional input[J]. *Reviews of Geophysics*, 2002, 40: 1-38.
- [12] Henderson G M. New oceanic proxies for paleoclimate[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 203: 1-13.
- [13] Goldstein S J, Hemming S R, Heinrich D H, et al. Long-lived isotopic tracers in oceanography, paleoceanography, and ice-sheet dynamics[J]. *Treatise on Geochemistry*, 2003, 6: 453-489.
- [14] Scher H D, Martin E E. Timing and climatic consequences of the opening of drake passage[J]. *Science*, 2006, 312: 428-430.
- [15] Piotrowski A M, Goldstein S L, Hemming S R, et al. Oscillating glacial northern and southern deep water formation from combined neodymium and carbon isotopes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 272(1-2): 394-405.
- [16] Ling H F, Burton K W, O'Nions R K, et al. Evolution of Nd and Pb isotopes in Central Pacific seawater from ferromanganese crusts[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 146: 1-12.
- [17] O'Nions R K, Frank M, von Blanckenburg F, et al. Secular variation of Nd and Pb isotopes in ferromanganese crusts from the Atlantic, Indian and Pacific Oceans[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 155: 15-28.
- [18] Lee D C, Halliday A N, Hein J R, et al. Hafnium isotope stratigraphy of ferromanganese crusts[J]. *Science*, 1999, 285: 1052-1054.
- [19] Marchal O, Francois R, Stocker T F, et al. Ocean thermohaline circulation and sedimentary  $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$  ratio[J]. *Paleoceanography*, 2000, 15: 625-641.
- [20] Thomas A L, Henderson G M, Robinson L F. Interpretation of the  $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$  paleocirculation proxy: New water-column measurements from the southwest Indian Ocean[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 241: 493-504.
- [21] Jacobsen S B, Wasserburg G J. Sm-Nd isotopic evolution of chondrites[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1980, 50: 139-155.
- [22] DePaolo D, Wasserburg G. Nd isotopic variations and petrogenetic models[J]. *Geophysical Research Letters*, 1976, 3: 743-746.
- [23] O'Nions R K, Carter S R, Cohen R S, et al. Pb, Nd and Sr isotopes in oceanic ferromanganese deposits and ocean floor basalts[J]. *Nature*, 1978, 273: 435-438.
- [24] Goldstein S J, Jacobsen S B. The Nd and Sr isotopic systematics of river-water dissolved material: Implications for the sources of Nd and Sr in seawater[J]. *Chemical Geology*, 1987, 66: 245-272.
- [25] Johannesson K H, Burdige D J. Balancing the global oceanic neodymium budget: Evaluating the role of groundwater[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 253: 129-142.
- [26] German C R, Klinkhammer G P, Edmond J M, et al. Hydrothermal scavenging of rare-earth elements in the ocean[J]. *Nature*, 1990, 345: 516-518.
- [27] Halliday A N, Davidson J P, Holden P, et al. Metalliferous sediments and the scavenging residence time of Nd near hydrothermal vents[J]. *Geophys Res Lett*, 1992, 19: 761-764.
- [28] Tachikawa K, Jeandel C, Roy-Barman M. A new approach to the Nd residence time in the ocean: The role of atmospheric inputs[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 170: 433-446.
- [29] Tachikawa K, Athias V, Jeandel C. Neodymium budget in

- the modern ocean and paleo-oceanographic implications[J]. *J. Geophys Res.*, 2003, 108: 3254.
- [30] Albarede F, Goldstein S L. World map of Nd isotopes in sea-floor ferromanganese deposits[J]. *Geology*, 1992, 20: 761-763.
- [31] Jeandel C, Arsouze T, Lacan F, et al. Isotopic Nd compositions and concentrations of the lithogenic inputs into the ocean: A compilation, with an emphasis on the margins[J]. *Chemical Geology*, 2007, 239: 156-164.
- [32] Arsouze T, Dutay J C, Lacan F, et al. Modeling the neodymium isotopic composition with a global ocean circulation model[J]. *Chemical Geology*, 2007, 239: 165-177.
- [33] Andersson P S, Porcelli D, Frank M, et al. Neodymium isotopes in seawater from the Barents Sea and Fram Strait Arctic-Atlantic gateways[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72: 2854-2867.
- [34] Piepgras D J, Wasserburg G J, Dasch E J. The isotopic composition of Nd in different ocean masses[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1979, 45: 223-236.
- [35] Piepgras D J, Wasserburg G J. Neodymium isotopic variations in seawater[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1980, 50: 128-138.
- [36] Piepgras D J, Wasserburg G J. Isotopic composition of neodymium in waters from the Drake Passage [J]. *Science*, 1982, 217: 207-214.
- [37] Piepgras D J, Jacobsen S B. The isotopic composition of neodymium in the North Pacific[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1988, 52: 1373-1381.
- [38] Spivack A J, Wasserburg G J. Neodymium isotopic composition of the Mediterranean outflow and the eastern North Atlantic[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1988, 52: 2767-2773.
- [39] Jeandel C. Concentration and isotopic composition of Nd in the South Atlantic Ocean[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, 117: 581-591.
- [40] Jeandel C, Thouron D, Fieux M. Concentrations and isotopic compositions of neodymium in the eastern Indian Ocean and Indonesian straits [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62: 2597-2607.
- [41] Amakawa H, Nozaki Y, Alibo D S, et al. Neodymium isotopic variations in Northwest Pacific waters[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68: 715-727.
- [42] Tachikawa K, Roy-Barman M, Michard A, et al. Neodymium isotopes in the Mediterranean Sea: Comparison between seawater and sediment signals[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68: 3095-3106.
- [43] Porcelli D, Andersson P S, Baskaran M, et al. The distribution of neodymium isotopes in Arctic Ocean basins [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73: 2645-2659.
- [44] Blum M B, Fanning K M. Paleocirculation: Tracing past ocean circulation[J]. *Science*, 1999, 286: 1862-1863.
- [45] Ling H F, Jiang S Y, Frank M, et al. Differing controls over the Cenozoic Pb and Nd isotope evolution of deepwater in the central North Pacific Ocean[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 232: 345-361.
- [46] Foster G L, Vance D. *In situ* Nd isotopic analysis of geological materials by laser ablation MC-ICP-MS[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2006, 21: 288-296.
- [47] Foster G L, Vance D, Prytulak J. No change in the neodymium isotope composition of deep water exported from the North Atlantic on glacial-interglacial time scales[J]. *Geology*, 2007, 35: 37-40.
- [48] Palmer M R, Elderfield H. Variations in the Nd isotopic composition of foraminifera from Atlantic Ocean sediments [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1985, 73: 299-305.
- [49] Palmer M R. Rare earth elements in foraminifera tests[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1985, 73: 285-298.
- [50] Vance D, Burton K. Neodymium isotopes in planktonic foraminifera: A record of the response of continental weathering and ocean circulation rates to climate change[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 173: 365-379.
- [51] Klevenz V, Vance D, Schmidt D N, et al. Neodymium isotopes in benthic foraminifera: Core-top systematics and a down-core record from the Neogene south Atlantic[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 265: 571-587.
- [52] Martin E E, Haley B A. Fossil fish teeth as proxies for seawater Sr and Nd isotopes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64: 835-847.
- [53] Martin E E, Scher H D. Preservation of seawater Sr and Nd isotopes in fossil fish teeth: Bad news and good news[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 220: 25-39.
- [54] Staudigel H, Doyle P, Zindler A. Sr and Nd isotope systematics in fish teeth[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1985, 76: 45-56.
- [55] Grandjean P, Cappetta H, Michard A, et al. The assessment of REE patterns and  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  ratios in fish remains[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1987, 84: 181-196.
- [56] Bau M. Scavenging of dissolved yttrium and rare earths by precipitating iron oxyhydroxide: Experimental evidence for Ce oxidation, Y-Ho fractionation, and lanthanide tetrad effect [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63: 67-77.
- [57] Ohta A, Kawabe I. REE(III) adsorption onto Mn dioxide ( $[\delta]-\text{MnO}_2$ ) and Fe oxyhydroxide: Ce(III) oxidation by  $[\delta]-\text{MnO}_2$  [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65: 695-703.

- [58] Palmer M R, Elderfield H. Rare earth elements and neodymium isotopes in ferromanganese oxide coatings of Cenozoic foraminifera from the Atlantic Ocean[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1986, 50: 409-417.
- [59] Bayon G, German C R, Boella R M, et al. An improved method for extracting marine sediment fractions and its application to Sr and Nd isotopic analysis[J]. *Chemical Geology*, 2002, 187: 179-199.
- [60] Gutjahr M, Frank M, Stirling C H, et al. Reliable extraction of a deep water trace metal isotope signal from Fe-Mn oxyhydroxide coatings of marine sediments[J]. *Chemical Geology*, 2007, 242: 351-370.
- [61] Rutberg R L, Hemming S R, Goldstein S L. Reduced North Atlantic deep water flux to the glacial Southern Ocean inferred from neodymium isotope ratios[J]. *Nature*, 2000, 405: 935-938.
- [62] Piotrowski A M, Goldstein S L, Hemming S R, et al. Intensification and variability of ocean thermohaline circulation through the last deglaciation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 225: 205-220.
- [63] Piotrowski A M, Goldstein S L, Hemming S R, et al. Temporal relationships of carbon cycling and ocean circulation at glacial boundaries[J]. *Science*, 2005, 307: 1933-1938.
- [64] Gutjahr M, Frank M, Stirling C H, et al. Tracing the Nd isotope evolution of North Atlantic deep and intermediate waters in the western North Atlantic since the Last Glacial Maximum from Blake Ridge sediments[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 266: 61-77.
- [65] Haley B A, Frank M, Spielhagen R F, et al. Influence of brine formation on Arctic Ocean circulation over the past 15 million years[J]. *Nature Geosci*, 2008, 1: 68-72.
- [66] Pahnke K, Goldstein S L, Hemming S R. Abrupt changes in Antarctic intermediate water circulation over the past 25000 years[J]. *Nature Geosci*, 2008, 1: 870-874.
- [67] Shaw H F, Wasserburg G J. Sm-Nd in marine carbonates and phosphates: Implications for Nd isotopes in seawater and crustal ages[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1985, 49: 503-518.
- [68] Stille P. Nd-Sr isotope evidence for dramatic changes of paleocurrents in the Atlantic Ocean during the past 80 My[J]. *Geology*, 1992, 20: 387-390.
- [69] Stille P, Steinmann M, Riggs S R. Nd isotope evidence for the evolution of the paleocurrents in the Atlantic and Tethys Oceans during the past 180 Ma[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 144: 9-19.
- [70] Puc  at E, L  cuyer C, Reisberg L. Neodymium isotope evolution of NW Tethyan upper ocean waters throughout the Cretaceous[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 236: 705-720.
- [71] Soudry D, Segal I, Nathan Y, et al.  $^{44}\text{Ca}/^{42}\text{Ca}$  and  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  isotope variations in Cretaceous-Eocene Tethyan francolites and their bearing on phosphogenesis in the southern Tethys[J]. *Geology*, 2004, 32: 389-392.
- [72] Soudry D, Glenn C R, Nathan Y, et al. Evolution of Tethyan phosphogenesis along the northern edges of the Arabian-African shield during the Cretaceous-Eocene as deduced from temporal variations of Ca and Nd isotopes and rates of P accumulation[J]. *Earth-Science Reviews*, 2006, 78: 27-57.
- [73] MacLeod K G, Martin E E, Blair S W. Nd isotopic excursion across Cretaceous Ocean Anoxic Event 2 (Cenomanian-Turonian) in the tropical North Atlantic[J]. *Geology*, 2008, 36: 811-814.
- [74] Meynadier L, Allegre C, O'Nions R K. Plate tectonics, radiogenic isotopic tracers and paleoceanography: The case of the manganese crusts in the Pacific[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 272: 513-522.
- [75] Burton K W, Ling H F, O'Nions K. Closure of the central American isthmus and its effect on deep-water formation[J]. *Nature*, 1997, 386: 382-385.
- [76] Frank M, O'Nions R K. Sources of Pb for Indian Ocean ferromanganese crusts: A record of Himalayan erosion[J]? *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 158: 121-130.
- [77] Frank M, Reynolds B C, Keith O'Nions R. Nd and Pb isotopes in Atlantic and Pacific water masses before and after closure of the Panama gateway[J]. *Geology*, 1999, 27: 1147-1150.
- [78] Frank M, Whiteley N, Kasten S, et al. North atlantic deep water export to the southern ocean over the past 14 Myr: Evidence from Nd and Pb isotopes in ferromanganese crusts[J]. *Paleoceanography*, 2002, 17: 12-19.
- [79] Sijp W P, England M H. Effect of the Drake passage throughflow on global climate[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2004, 34: 1254-1266.
- [80] Livermore R, Nankivell A, Eagles G, et al. Paleogene opening of Drake Passage[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 236: 459-470.
- [81] Duque-Caro H. Neogene stratigraphy, paleoceanography and paleobiogeography in northwest South America and the evolution of the Panama seaway[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1990, 77: 203-234.
- [82] Zheng X Y, Ling H F. Closure of the Panama seaway and its paleoceanographic and paleoclimatic effects[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 28: 125-134(in Chinese).
- [83] Newkirk D R, Martin E E. Circulation through the Central American Seaway during the Miocene carbonate crash[J]. *Geology*, 2009, 37: 87-90.



- [84] Zheng X Y. Evolution of Nd Isotopes in Central American Seawater from ~15 Ma to Present; Implications to the Closure of Panama Seaway[D]. Nanjing: Nanjing University, 2009(in Chinese).
- [85] Barker P F. Scotia Sea regional tectonic evolution; Implications for mantle flow and palaeocirculation[J]. Earth-Science Reviews, 2001, 55: 1-39.
- [86] Thomas D J. Evidence for deep-water production in the North Pacific Ocean during the early Cenozoic warm interval[J]. Nature, 2004, 430: 65-68.
- [87] Thomas D J, Lyle M, Moore T C Jr, et al. Paleogene deep-water mass composition of the tropical Pacific and implications for thermohaline circulation in a greenhouse world[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2008, 9: 1-13.
- [88] Stoll H M, Vance D, Arevalos A. Records of the Nd isotope composition of seawater from the Bay of Bengal; Implications for the impact of Northern Hemisphere cooling on ITCZ movement[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 255: 213-228.
- [89] Burton K W, Vance D. Glacial-interglacial variations in the neodymium isotope composition of seawater in the Bay of Bengal recorded by planktonic foraminifera[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2000, 176: 425-441.

### 参考文献:

- [82] 郑新源,凌洪飞. 巴拿马海道关闭及其古海洋和古气候影响[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 28: 125-134.
- [84] 郑新源. 约 15 Ma 来中美洲海水 Nd 同位素演化: 对巴拿马海道关闭的启示[D]. 南京: 南京大学, 2009.

## 《地学前缘》网上查询和浏览方法

### 方法一:

(1)登录中国地质大学(北京)网站,网址为:<http://www.cugb.edu.cn>

(2)点击首页右侧“特色网站”栏目下方的“地大(北京)期刊中心”选项

(3)在【刊物】选项选择《地学前缘》,通过篇名、作者、作者单位、关键词、中文摘要、全文、期号 7 个字段输入检索词,最后指定查询年限后点击【检索】按钮

### 方法二:

(1)登录中国地质大学(北京)网站,网址为:<http://www.cugb.edu.cn>

(2)点击首页上部【机构设置】按钮

(3)在“机构设置”中的“辅助单位”中点击“期刊中心”进入期刊中心简介页面

(4)点击【期刊查询】按钮,即可查阅摘要和全文

(5)检索同方法一的(3)步骤

### 方法三:

(1)登录中国地质大学(北京)网站,网址为:<http://www.cugb.edu.cn>

(2)点击首页上侧的【数字图书】按钮

(3)在“数字资源”栏目下方的友情链接中点击“地大(北京)期刊中心”进入地大(北京)期刊中心页面

(4)检索同方法一的(3)步骤

### 方法四:

(1)登录中国地质图书馆网站,网址为:<http://www.cgl.org.cn>

(2)点击首页右侧“资源导航”中的《地学前缘》

(3)在期刊浏览页面,当鼠标放在各期次上时出现该期主题名称,点击各期次可浏览 2006—1999 年各期目录,在目录中选择文章的 PDF 全文浏览文章全文

(4)需要检索服务,向下滚动期刊浏览页面点击 [http://dept.cugb.edu.cn/Science web/qkzhx/display. asp](http://dept.cugb.edu.cn/Science%20web/qkzhx/display.asp) 超链接查看详细信息

### 方法五:

(1)登录世界数据中心中国地质科学数据中心网站,网址为:<http://www.wdcgeo.net/>

(2)点击首页右侧“常用链接”中的《地学前缘》期刊

以下两步骤同方法四的(3)、(4)步骤

### 方法六:

(1)登录中国地质科学数据网的“国土资源科学数据共享地质科学数据节点”网站,网址为:<http://www.geoscience.cn/>

(2)点击首页下部“友情链接”中的《地学前缘》期刊

以下两步骤同方法四的(3)、(4)步骤

阅读全文需要安装 Acrobat Reader(PDF)软件