

长江河流沉积物 Sr-Nd 同位素组成与物源示踪

杨守业^{①*} 蒋少涌^② 凌洪飞^② 夏小平^③ 孙敏^③ 王德杰^④

(① 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092; ② 南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学海洋地球化学研究中心, 南京 210093; ③ 香港大学地球科学系, 香港; ④ 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100083)

摘要 采用多种测试方法分析了长江主要支流和干流的悬浮物和细粒河漫滩沉积物的 Sr-Nd 同位素组成, 进而讨论其对河流沉积物物源的示踪意义. 悬浮物从上游到下游 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 逐渐减小, 上游平均为 -10.8, 中下游为 -12.3; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 逐渐增大, 上游和中下游分别为 0.721899 和 0.725826. 这一变化规律反映了长江水系不同流域的源岩类型、化学组成特征和风化作用强弱等多因素的制约. 雅砻江、涪江、沱江和沅江等河流的 Sr-Nd 同位素组成异常则分别反映了流域特征源岩包括上游峨眉山玄武岩和中下游古老的变质岩及硅质岩的物源制约主导因素. 研究还显示在世界主要河流中, 由于长江流域源岩组成的独特性, 长江沉积物对世界风化陆壳平均组成的示踪性较好. 对长江河流沉积物的 Sr-Nd 同位素组成特征的认识, 有助于深入研究晚新生代长江的演化历史和大陆风化过程, 并对中国东部及边缘海的古环境重建具有重要意义.

关键词 长江 沉积物 Sr 和 Nd 同位素 物源示踪 风化陆壳 大陆风化作用

“从源到汇”(Source to Sink)是目前国际大陆边缘计划(MARGINS Program)的核心科学研究目标之一, 主要是揭示世界陆源入海碎屑物质的通量和在大陆架地区的分布、搬运和扩散模式^[1]. 最近十多年来世界河流地球化学研究的一个主要方向是运用河流的 Sr-Nd 同位素组成来揭示流域风化陆壳的演化、流域化学风化与大气 CO_2 消耗、入海物质的化学通量变化及对全球大洋同位素组成的贡献^[2-5]. 尤其是发源于喜马拉雅-青藏高原地区的几条亚洲主要河流, 由于它们记录了新生代高原隆升和气候演化的丰富信息, 国际上已经开展了大量的 Sr-Nd 同位素地球化学研究^[6-15]. 中国的长江同样发源于青藏高原, 但以往的地球化学工作主要集中在元素地球化学方面, 同位素地球化学的示踪研究非常薄弱. 虽然早在 1984 年 Goldstein 等^[16]便报道了一个长江口表层沉积物的 Nd

同位素组成, 而后孟宪伟等^[17]较系统地研究了长江泛滥平原的细粒沉积物的 Sr 同位素组成, 确立了示踪长江入海端元物质的 Sr 同位素标准. 但是长江水系沉积物的 Sr-Nd 同位素组成的系统研究还没有开展, 对其源汇示踪意义也不清楚. 而相关的研究对于深入认识晚新生代长江的演化历史和流域的风化过程, 以及揭示中国东部及边缘海的晚新生代古环境变迁过程等都具有重要意义. 本文拟通过长江主要支流和干流沉积物的 Sr-Nd 同位素组成分析, 来探讨其物源示踪意义.

1 样品来源与分析

2003 年 4 月与 2004 年 8 月进行了长江流域的野外地质考察, 系统采集了上游金沙江至河口地区长江主要水系的沉积物样品, 包括悬浮物和细粒级河

漫滩样品. 考虑到样品的代表性, 样品采集一般选在主要支流汇入干流的河口地区, 但避开城市和可能的污染源. 悬浮物样尽量选择河道中央采集, 现场用预先处理的 0.45 μm 醋酸纤维滤膜过滤. 详细的样品采集地点见表 1 和图 1.

在超净实验室内将 1 g 左右样品洗盐后, 运用 1 mol 的高纯盐酸 20 mL 淋洗并 60°C 恒温振荡处理 24 h, 然后低温烘干并研磨至 200 目. 称取一定量样品, 经化学处理后过离子交换柱分离 Sr 和 Nd. 针对不同的样品我们在多个实验室采用不同的仪器进行比较分析.

长江的悬浮物样品主要在北京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室采用热电离质谱仪分析. 河漫滩样在中国科学院广州地球化学研究所采用多接收器等离子体质谱 MC ICP-MS 分析, 用标准物质 Shin Etsu JNdi-1 和 Nd-GIG 来监控分析质量, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 的测试值分别为 0.512120 ± 8 和 0.511530 ± 7 . 长江口的部分河漫滩样品在韩国汉城大学采用同位素质谱仪 VG 354 测试, 对美国 La Jolla Nd 同位素标准样和 NBS 987 Sr 标样的测试值分别为 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.511860\pm 8$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.710224\pm 8$. Sr 同位素的标准化值为

表 1 长江水系沉积物的 Sr-Nd 同位素组成

| 采样编号 | 采样点 | 样品性质 | $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ | $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ | $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ | 分析仪器 |
|----------------------|----------|--------|-----------------------------------|---------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| CJ1-1 | 金沙江-丽江 1 | 河漫滩 | 0.512105 ± 11 ^{a)} | -10.4 | 0.716611 ± 13 | MC ICP-MS ^{b)} |
| 04CJ1-1 | 金沙江-丽江 2 | 悬浮物 | 0.512047 ± 11 | -11.5 | 0.718861 ± 3 | TIMS ^{c)} |
| 04CJ2-1 | 雅砻江-攀枝花 | 悬浮物 | 0.512168 ± 5 | -9.1 | 0.721292 ± 4 | TIMS |
| 04CJ3-1 | 金沙江-攀枝花 | 悬浮物 | 0.512141 ± 9 | -9.7 | 0.716856 ± 3 | TIMS |
| 04CJ4-1 | 大渡河-乐山 | 悬浮物 | 0.512050 ± 4 | -11.4 | 0.723588 ± 2 | TIMS |
| 04CJ5-1 | 岷江-乐山 | 悬浮物 | 0.512048 ± 5 | -11.5 | 0.723335 ± 6 | TIMS |
| 04CJ6-1 | 金沙江-宜宾 | 悬浮物 | 0.512110 ± 6 | -10.3 | 0.720467 ± 4 | TIMS |
| CJ9-5 | 长江-宜宾 | 河漫滩 | 0.512116 ± 10 | -10.2 | 0.716495 ± 13 | MC ICP-MS |
| 04CJ7-1 | 岷江-宜宾 | 悬浮物 | 0.512096 ± 7 | -10.5 | 0.719884 ± 2 | TIMS |
| 04CJ9-1 | 长江-泸州 | 悬浮物 | 0.512062 ± 2 | -11.2 | 0.721872 ± 3 | TIMS |
| CJ14-1 | 沱江-泸州 | 河漫滩 | 0.511942 ± 3 | -13.5 | 0.721144 ± 3 | TIMS |
| CJ16-1 | 涪江-合川 | 河漫滩 | 0.511836 ± 1 | -15.6 | 0.727192 ± 4 | TIMS |
| 04CJ11-1 | 长江-重庆 | 悬浮物 | 0.512093 ± 7 | -10.6 | 0.720811 ± 4 | TIMS |
| CJ19-1 | 嘉陵江-重庆 1 | 河漫滩 | 0.512009 ± 11 | -12.2 | 0.722173 ± 14 | MC ICP-MS |
| CJ19-2 | 嘉陵江-重庆 2 | 河漫滩 | 0.511932 ± 5 | -13.7 | 0.720831 ± 4 | TIMS |
| 04CJ12-1 | 长江-万州 1 | 悬浮物 | 0.512085 ± 9 | -10.8 | 0.725840 ± 5 | TIMS |
| CJ21-2 | 长江-万州 2 | 河漫滩 | 0.512084 ± 11 | -10.8 | 0.716518 ± 14 | MC ICP-MS |
| CJ22-6 | 长江-宜昌 1 | 河漫滩 | 0.512095 ± 10 | -10.6 | 0.715234 ± 11 | MC ICP-MS |
| 04CJ13-1 | 长江-宜昌 2 | 悬浮物 | 0.512027 ± 5 | -11.9 | 0.728080 ± 15 | TIMS |
| 04CJ14-1 | 汉江-仙桃 1 | 悬浮物 | 0.512007 ± 8 | -12.3 | 0.721143 ± 3 | TIMS |
| CJ24-1 | 汉江-仙桃 2 | 河漫滩 | 0.512136 ± 9 | -9.8 | 0.713117 ± 13 | MC ICP-MS |
| 04CJ17-1 | 汉江-武汉 | 悬浮物 | 0.511968 ± 29 | -13.0 | 0.729737 ± 4 | TIMS |
| 04CJ18-1 | 长江-武汉 | 悬浮物 | 0.512051 ± 26 | -11.4 | 0.723963 ± 3 | TIMS |
| YJ1-2 | 沅江-常德 | 河漫滩 | 0.511850 ± 11 | -15.3 | 0.744316 ± 5 | TIMS |
| 04CJ20-1 | 长江-湖口 | 悬浮物 | 0.512002 ± 15 | -12.4 | 0.728461 ± 3 | TIMS |
| CJ26-1 | 长江-大通 | 河漫滩 | 0.512080 ± 11 | -10.9 | 0.723491 ± 14 | MC ICP-MS |
| CJ-ZJ-1 | 长江-镇江 1 | 河漫滩 | 0.512133 ± 6 | -9.8 | 0.722170 ± 10 | VG 354 ^{d)} |
| CJ-ZJ-2 | 长江-镇江 2 | 河漫滩 | 0.512072 ± 8 | -11.0 | 0.721058 ± 9 | VG 354 |
| CJ-CJK1 | 长江口-崇明 1 | 河漫滩 | 0.512018 ± 5 | -12.1 | 0.725620 ± 4 | VG 354 |
| CJ-CJK2 | 长江口-崇明 2 | 河漫滩 | 0.512007 ± 8 | -12.3 | 0.723297 ± 3 | VG 354 |
| CJ-CJK3 | 长江口-崇明 3 | 河漫滩 | 0.511968 ± 9 | -13.0 | 0.723383 ± 5 | VG 354 |
| 长江 | 平均值 | $n=31$ | 0.512043 ± 10 | -11.6 | 0.722479 ± 7 | VG 354 |
| 长江口 ^[18] | 平均值 | 水体 | | | 0.7105 | |
| 长江河源 ^[19] | 平均值 | 水体 | | | $0.708954-0.710455$ | |
| 黄河 | 平均值 | $n=5$ | 0.512016 | -12.13 | 0.716288 | VG 354 |
| 世界河流 ^[20] | 平均值 | 悬浮物 | $0.51161-0.51243$ | $-4\sim -20$ | 0.716 | |
| 风化陆壳 ^[16] | 平均值 | | 0.51204 ± 2 | -11.4 ± 4 | $0.711-0.725$ | |

a) ± 标准偏差(2σ); b) 多接收器等离子体质谱, 中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学实验室; c) Finnigan 公司 TRITON TI 型热电离质谱仪, 南京大学成矿机制研究国家重点实验室; d) 英国 VG 公司同位素质谱仪, 韩国汉城大学

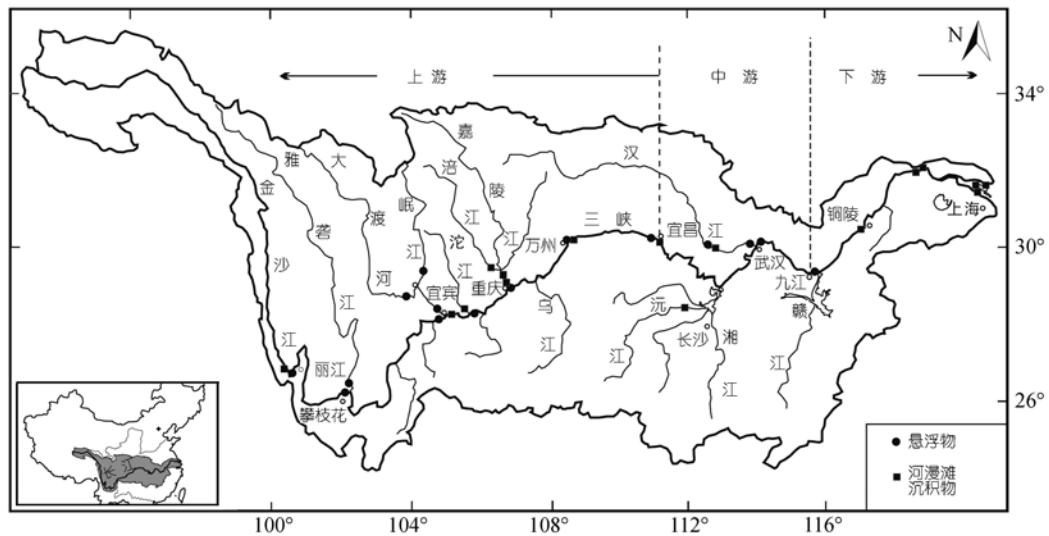


图 1 长江流域水系示意图和沉积物采样点

$^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$, Nd 同位素的标准化值为 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$. 采用 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}=0.512638$ 计算 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 的值.

2 分析结果

31 个长江沉积物样品的 Sr-Nd 同位素组成见表 1. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值在不同地点的样品之间变化较显著, 介于 $0.713117 \sim 0.744316$ 之间, 平均值为 0.722479 ; 而 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 变化较小, 介于 $0.511836 \sim 0.512168$ 之间, 平均值为 0.512043 ; $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 变化范围为 $-9.1 \sim -15.6$, 平均值为 -11.6 . 不同支流和长江干流沉积物的 Sr-Nd 同位素组成变化规律并不明显(图 2). 攀枝花地区的金沙江和雅砻江 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值较高, 而四川—重庆境内的涪江、沱江、嘉陵江以及湖南沅江的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值明显低于其他支流以及长江干流. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 在沅江沉积物中特别高, 达到 0.744316 , 而其他样品多在 $0.715 \sim 0.730$ 之间变化, 其中在长江上游和近河口地区变化较小, 而在中游和三峡地区变化较显著. 从表 1 和图 2 可以看出, 在同一个采样点, 悬浮物和河漫滩样品的 Sr-Nd 同位素组成并不完全一致, 尤其是 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 组成变化较大, 如在宜昌、万州的长江干流、汉江地区, 同一样品点的悬浮物和河漫滩样品之间的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 相差可以达到 0.01 以上. 值得注意的是从上游金沙江到下游湖口地区的长江干流, 悬浮物样品的 Sr-Nd 同位素组成呈现明显的区域性变化规律, 即 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 逐渐减小, 而 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 逐渐增大, 尤其在宜昌向下的中、下游地区变化最显著(图 2).

3 讨论

3.1 Sr-Nd 同位素组成与流域源岩控制

尽管一些学者认为在沉积物形成过程中, Sr 同位素组成基本不受相态分离、化学新物相形成, 蒸发和生物同化等作用影响 [21], 但更多的研究表明沉积物的粒度 [22-24]、流域化学风化和成土作用 [20,25,26]、季节性变化 [10]、和人类活动如农业用肥 [27] 等因素都可以影响沉积物中的 Sr 同位素组成. 不同强度的化学风化下, 由于钾长石、黑云母和斜长石等矿物分解速率的差异, 河流水体和沉积物中的 Sr 含量和同位素组成也呈明显的波动变化 [26,28]. 比较而言, Nd 同位素则在地球表生物质循环过程中基本不受粒度分异、化学风化和搬运、沉积过程等影响 [16,20,25], Sm 只在壳幔分异时和 Nd 分馏, 因此可以更可靠地运用于沉积物的物源研究 [29-31]; 河流沉积物的 Nd 同位素组成可以反映遭受风化的上陆壳(UCC)的平均组成, 相对亏损地幔的 Nd 同位素模式年龄(T_{DM})可以代表其物源区的平均地壳存留年龄 [16,29].

长江水系沉积物的 Sr-Nd 同位素组成的变化规律也可能反映了上述因素的控制. 为比较长江流域主要类型的源岩对河流沉积物的 Sr-Nd 同位素组成控制, 我们比较了这些主要基岩和沉积岩的 Sr-Nd 同位素组成 [29,30,32-53](图 3). 同一采样地点的河漫滩和悬浮物之间 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值变化较小(图 2), 既反映了 Nd 同位素本身分馏较弱, 也可能说明样品性质(粒度

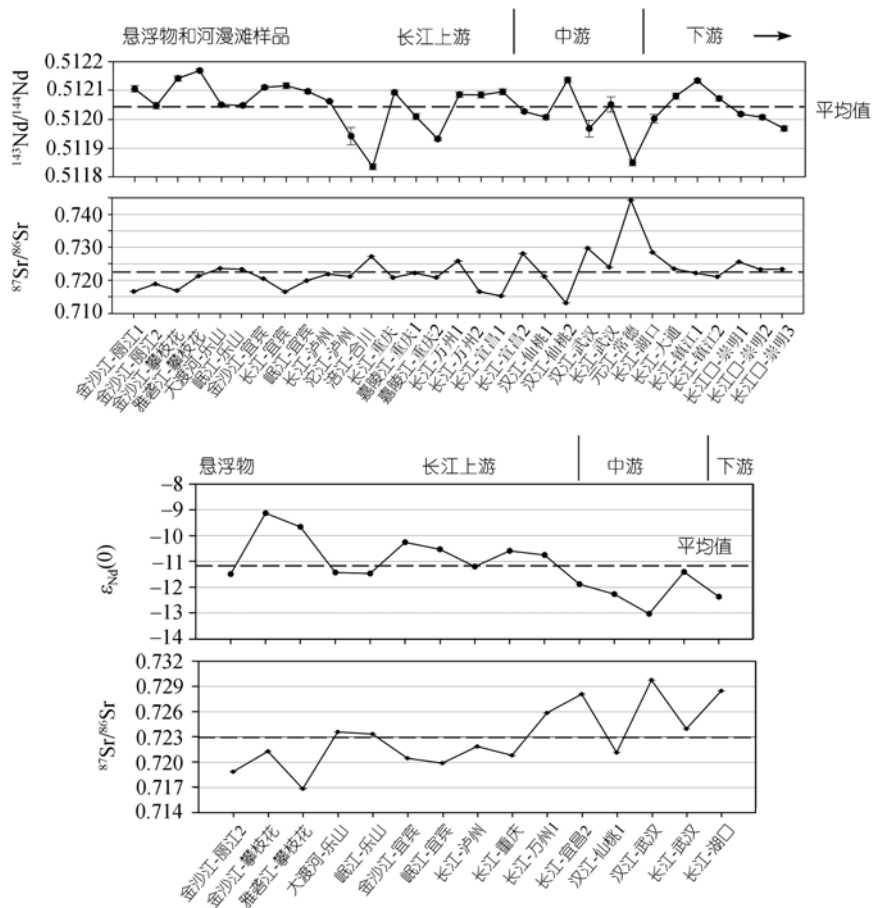


图 2 长江水系沉积物的 Sr-Nd 同位素组成变化图

组成)对Nd同位素组成影响不大。可以看出,长江流域内源岩的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值可从 0.5100 一直变化到 >0.5130 [29,30,32~47], 但大部分集中在 0.5118 ~ 0.5122 之间, 和长江沉积物的Nd同位素组成变化范围基本一致; 扬子东南部的沉积岩 [29,30,32,36] 也同样和长江沉积物的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值非常接近(图 3)。这说明同世界主要河流一样, 长江沉积物的Nd同位素组成显然也主要反映了流域不同地区的源岩风化产物的平均组成, 长江沉积物的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 平均为 0.512043, 和根据世界主要河流沉积物统计而得到的风化陆壳的平均值 0.51204 ± 2 [16] 非常接近, 而高于UCC的平均值 (0.5117) [20]。

虽然长江流域源岩组成相当复杂, 但是长江悬浮物的Nd同位素组成呈现明显的区域变化规律, 即从河流的上游金沙江到下游地区, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值和 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 逐渐减小(图 2)。显然, 这同长江上游和中、下游的源岩组成差异有关。长江流域的地层发育齐全,

自太古界至第四系均有出露。上游玉树以上的青藏高原源区以变质砂页岩、碳酸盐岩和酸—中酸性火成岩为主, 尤其是喜马拉雅期形成的富钾的中酸性岩浆岩是源区的特征源岩 [38,39,46]; 金沙江、乌江、嘉陵江等流域古生代碳酸盐岩、中生代的红色碎屑沉积以及花岗岩和中生代的峨眉山玄武岩均发育; 其中嘉陵江和汉江的上游地区第四纪黄土较发育, 成为长江流域的主要产沙区; 中游和下游第四纪松散沉积物和古生代沉积岩分布较多, 花岗岩和古老变质岩等广泛而零星出露。长江上游沉积物较高的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值(多 >0.5121) 显然同这些地区的源岩中较高的背景值有关。上游代表性的源岩包括青藏高原地区的喜马拉雅期和燕山期花岗岩以及峨眉山玄武岩的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值一般均在 0.5122 之上 [38,39~41,46] (图 3)。尤其是峨眉山玄武岩作为中国最主要的一个火山岩省在长江上游的分布面积非常广, 在云南和四川境内较湿润的气候条件下, 玄武岩的化学风化较为迅速, 其较高的

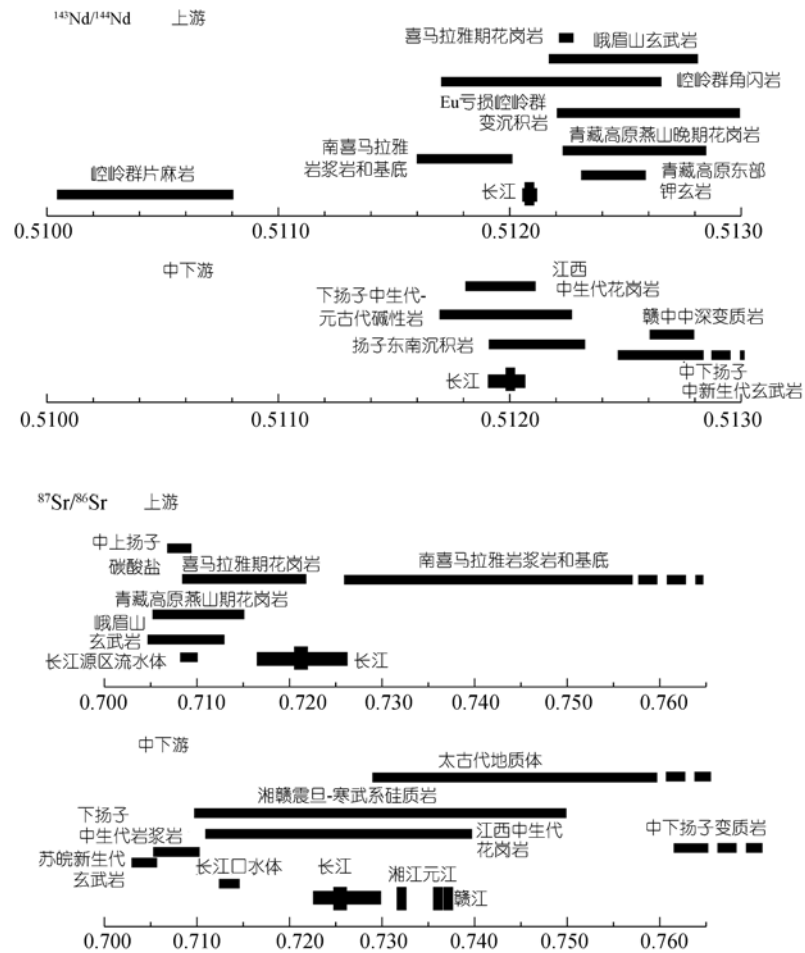


图 3 长江水系悬浮沉积物与流域源岩的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 组成比较
长江流域源岩数据来自文献[29,30,32~53]

$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 背景值显然对长江上游水系沉积物的Nd同位素组成有显著的控制,而长江中、下游水系沉积物的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值较低,则同这些地区源岩以沉积岩、浅变质岩和花岗岩为主, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 背景值较低有关。如江西、湖南境内的中生代花岗岩以及中下游地区出露较多的各类浅变质岩的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值多在0.5121之下^[42~45](图3),而中、下扬子的中生代玄武岩的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值虽然较高^[35,37,47],但这些玄武岩的分布面积有限,不可能象上游的峨眉山玄武岩那样主导河流沉积物的Nd同位素组成。因此,尽管长江流域的源岩类型非常复杂多变,长江不同支流和干流悬浮物的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值基本上可以代表不同流域内风化上陆壳的平均组成。最近,Ding等^[54]对长江悬浮物的Si同位素组成研究揭示,从上游到下游,悬浮物的Si含量逐渐升高而 $\delta^{30}\text{Si}$ 则趋于

降低,反映了黏土矿物逐渐增多而碳酸盐矿物减少的控制作用。

长江沉积物的Sr同位素组成变化较大,且在同一地点采集的河漫滩和悬浮物的组成也不一致,反映出Sr同位素组成的控制因素要明显比Nd同位素复杂。沉积物中的Sr同位素组成不仅决定于源岩的年龄和其中的Rb/Sr比值,而且还受不同矿物的风化速率差异制约^[20,25,26]。考虑到沉积物的Sr同位素组成容易受化学风化自生矿物的影响,本次研究中我们运用1 mol HCl来处理河流沉积物样品,以去除自生的碳酸盐矿物(方解石和白云石为主)、磷酸盐矿物(主要是磷灰石)和较强化学风化下形成的有机或者铁锰质胶膜(主要为Fe-Mn的氧化物和氢氧化物)对长江碎屑沉积物物源识别的干扰。为反映来自源区的碎屑态沉积物的Sr同位素组成,国内外学者曾运用了不同

浓度的盐酸(0.1, 0.25, 1, 2.5 mol)或者醋酸(0.5, 1, 10%)来处理沉积物样品^[10,17,24,25,55]. Asahara等^[55]认为2.5 HCl处理黄土和沙漠样品 30 h, 可能会溶解部分黏土中的Rb, 但对河流沉积物的Sr同位素组成影响不大. 1 mol HCl虽然相对弱一些, 但是也可能溶解一些长石(杨杰东, 私人通讯). 海洋沉积物的试验证实1N HCl处理后, 酸溶相中的Na含量可占沉积物中总量的30%以上, 而K的淋失很少^[56], 反映部分斜长石可能遭受溶解. 长江水系沉积物的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(0.713117~0.744316)显著高于长江河源区以及河口水体(0.710左右), 反映长江水体中的Sr主要来自流域低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的碳酸盐风化^[18,19], 同时也可能反映1N HCl处理去除了低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的碳酸盐矿物和斜长石, 而导致酸不溶沉积物中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值升高(相对富集富Rb的矿物—钾长石和云母)^[23,26,28].

粒度是影响沉积物中Sr同位素组成的另外一个重要因素. Douglas等^[23]研究发现随河流沉积物粒度减小, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值也逐渐减小; 而另外一些研究却证实随酸不溶物的粒度减小, 沉积物中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值逐渐增大, 在黏土粒级中比值最高^[22,24]. 取自同一个地点的长江水系河漫滩沉积物和悬浮物的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值不同, 可能反映了它们粒度(矿物)组成上的差异. 河漫滩沉积物主要是水体混合过程中流速变缓或高水位时候沉积于干、支流汇合处或河道突然变宽处. 尽管我们分析的是细粒级(<0.063 mm)的河漫滩沉积物样品, 但是其中粉砂和黏土相对含量差异仍然会导致沉积物中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值分异. 相对河漫滩沉积物而言, 河流悬浮物的粒级组成更均一, 反映流域源岩平均组成的代表性也更强. 我们对长江下游近河口地区悬浮物的粒度分析表明, 其平均粒径在20~30 μm , 变化较小, 可以认为粒级效应对悬浮物的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值影响很弱.

很多研究证实, 碳酸盐和硅酸盐具有明显不同的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值, 是控制世界主要河流水体和沉积物Sr同位素组成的两个主要端元^[3~5,8~14]. 长江流域的中、上游地区, 尤其是在云、贵境内古生代至中生代的碳酸盐分布非常广, 其特征的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值多在0.706~0.709之间^[48~51]. 长江河源区、乌江和沅江水体中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值也多在0.710左右^[19,52], 主要反映了这些碳酸盐岩的风化. 长江水系沉积物的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值在0.713117~0.744316之间变化, 远高于河水中

的组成(表1, 图2, 3); 变化幅度达到0.03, 显然不是由沉积物的粒级组成差异引起, 而主要反映了流域不同类型源岩组成的差异. 由于我们采用1 mol HCl来处理沉积物样品, 可以排除流域碳酸盐源岩和有机成因矿物薄膜对河流沉积物的Sr同位素组成的影响, 沉积物中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值基本反映了流域不同硅酸盐类的风化贡献. 长江流域的硅酸盐类源岩组成非常复杂, 从基性的玄武岩、酸性花岗岩到不同变质程度的变质岩以及沉积成因的硅质岩类, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化较大(图3). 长江悬浮物的Sr同位素组成具有明显的区域变化规律(图2). 上游水系沉积物具有较低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值, 同其主要物源区青藏高原较为年轻的岩浆岩以及峨眉山玄武岩都具有较低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 背景值直接相关(图3). 中、下游水系沉积物的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值较高, 则同流域分布较多富放射性成因Sr的古老变质岩类以及震旦—寒武系的硅质岩有关. 沅江和汉江等河流沉积物具有很高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值, 分别达到0.744316和0.729737, 可能主要反映了其流域特征的岩石组成. 赣江和湘江等河流沉积物的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 也分别达到0.730685和0.736502^[17]. 这些河流流域主要由中、上元古代的变质岩、古生代浅海相碳酸盐和碎屑岩、中生代的陆相碎屑岩和燕山期花岗岩组成. 其中, 中元古代的变质岩主要由一套沉积变质的碎屑岩夹火山岩、碳酸盐岩组成, 岩性为板岩、千枚岩、片岩、变质凝灰岩和基性火山岩、安山岩等; 上元古代的变质岩为浅变质的砂板岩夹有千枚岩、片岩和变质砂岩等. 这些变质岩具有很高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值, 多在0.755以上(图3)^[45]. 另外, 形成于震旦和寒武纪的一套海相硅质岩和硅质页岩(黑色岩系)在湘、川等地广泛分布, 它们的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 变化范围较大(图3), 从小于0.720到大于0.745^[53]. 显然, 沅江、湘江和赣江等河流沉积物的高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值主要反映了流域这些特征源岩的组成. 而这些河流水体中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值并不高, 多在0.7110左右, 接近长江河口和河源区水体的同位素组成^[18,19,52].

3.2 与世界主要河流 Sr-Nd 同位素组成比较

世界主要河流沉积物的Sr-Nd同位素组成可以反映流域风化陆壳的平均组成, 并被作为入海陆源碎屑物质组成的代表, 用以研究大陆风化对全球海洋Sr-Nd通量演化的贡献^[2~4,8,16,20]. 长江水系悬浮物

的 $\epsilon_{Nd}(0)$ 变化范围为 $-9.1 \sim -13.0$, 落在世界主要河流沉积物的变化范围 $-4 \sim -20$ 内 [20]; $\epsilon_{Nd}(0)$ 的平均值为 -11.2 ± 1 , 高于 UCC 的平均值 -17 [20], 而与风化陆壳的平均值 -11.4 ± 4 非常接近 [16]. 但是比较长江与世界主要河流如 Amazon, Mississippi, Ganges, Mekong, Indus 和 Nile 河等的 Nd 同位素组成, 发现长江的变化范围要大于这些河流, 而平均值也不同, 长江更接近风化陆壳平均值(图 4). 长江 Nd 同位素组成较大的变化范围可能既反映了本次研究分析样品量要比其他河流多出许多, 基本上主要水系都有采样, 而其他相关研究则主要在河流干流采集个别样品进行分析; 另外也同长江水系特别发育, 流域源岩组成非常复杂有关, 长江与世界其他主要河流流域内的岩石类型和形成年龄可能存在明显的差异. 长江支流众多, 流域面积在 $1 \times 10^4 \text{ km}^2$ 以上的河流有 49 条, $8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 以上的有 8 条. 长江流域源岩和地层出露更齐全, 地质构造也明显比它们复杂多变. 以同样起源于喜马拉雅山和青藏高原地区的东南亚-南亚的主要河流为例, 它们的水系和流域盆地都没有长江发育, 源岩类型相对简单, 拉轨岗日、高喜马拉雅和低喜马拉雅酸性岩以及变沉积岩等是河源区和上游的主要岩石类型, 而下游主要以沉积岩为主 [2,6,8-13,15], 因此这些河流沉积物的源汇过程相对长江要简单许多, 比较容易追踪识别. 长江的流域面积巨大, 水系沉积物主要来自各种类型的源岩风化产物的充分混合, 缺乏一种主导的源岩类型, 因此尽管长江主要支流具有不同的地质、构造和气候地带背景, 但长江水系沉积物的 Nd 同位素平均值可以更好地代表世界风化陆壳的 Nd 同位素平均组成, 而具有特别的示踪意义. 页岩被广泛认为代表了 UCC 的平均组成 [57], 而澳洲页岩的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值 [57] 明显低于长江水系沉积物, 与 UCC 和风化陆壳平均组成的差异也比长江显著(图 4), 显然其对陆壳演化的示踪意义要弱于长江水系沉积物. 不同地区沉积物的 Nd 同位素组成差异主要反映了陆壳演化过程不同, 越老的陆壳上河流沉积物的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值越低而 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}$ 则越高 [20]. 澳洲页岩的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值低于长江水系沉积物, 可能反映扬子地块的风化陆壳相对古老的澳洲大陆要年轻许多.

长江水系悬浮物的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(0.716856~0.729737)和世界主要河流(0.711 ~ 0.725)比较接近, 而平均值为 0.722946, 高于世界主要河流的平均值

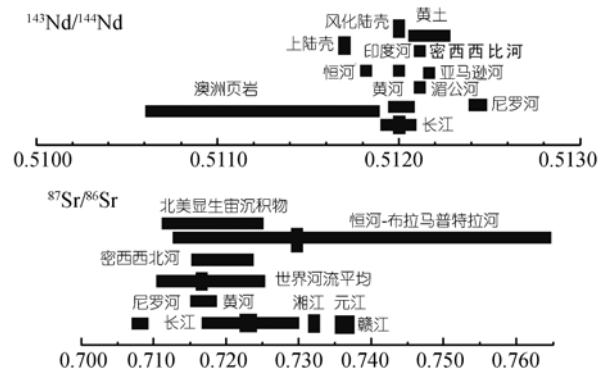


图 4 长江水系悬浮沉积物与世界主要河流的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 组成比较
其他河流数据来自文献[6-13,16,20]

0.716 [16,20](图 4). 恒河-布拉马普特拉河(G/B)的 Sr 同位素组成研究认为, 新生代以来随青藏高原的隆升河流搬运富含放射成因的 Sr 同位素进入海洋而导致全球大洋中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值逐渐升高 [2,6,8-13,15]. 与长江相比, G/B 河流沉积物的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化更大, 相对更富放射性成因的 Sr, 且与南喜马拉雅地区岩浆岩和结晶基底的 Sr 同位素组成类似(图 3, 4). 然而, 目前对于 G/B 河流高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 组成的原因认识并不一致. 一种观点认为可能同变质过程中富 Rb 的云母等矿物发生变化或者同硅酸盐的风化有关 [2,10,13]; 而另一种观点则认为变质成因的碳酸盐和富有机质的页岩是河流高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的主要原因 [4,8,9,11,14]; 而最近的研究揭示 G/B 河流的高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值还可能同喜马拉雅地区的热液活动有关 [58]. 显然, 揭示长江对全球海洋 Sr 同位素组成和通量变化的贡献还有待更深入的工作, 尤其需要结合沉积物与水体同位素组成的系统研究. 长江沉积物的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化范围明显大于黄河沉积物, 显然反映黄河沉积物主要来自流域黄土, 而黄土的同位素组成相当均一 [22,24]. 长江水系沉积物的 Sr 同位素组成与后太古代页岩(PAAS)非常相似(图 4), 而后者被广泛认为是风化上陆壳组成的平均代表 [20]. 因此, Sr-Nd 同位素组成研究揭示, 相比世界其他主要河流, 由于长江水系悬浮沉积物来自各种源岩类型的混合, 它可以更好地代表风化上陆壳的平均组成.

4 结论

(1) 从上游金沙江到河口地区, 长江主要支流和干流悬浮物与河漫滩沉积物的 Sr-Nd 同位素组成呈现

波动变化的特征; 而悬浮物从上游到下游 $\epsilon_{Nd}(0)$ 逐渐减小, $^{87}Sr/^{86}Sr$ 逐渐增大, 在宜昌向下的中、下游地区变化最为显著。

(2) 长江水系沉积物的 Sr-Nd 同位素组成主要受流域的源岩类型和化学组成特征制约。尽管流域源岩类型非常复杂, 但上游青藏高原地区特征的富钾中酸性岩浆岩以及峨眉山玄武岩、中-下游地区的海相硅质岩、硅质页岩和前寒武纪变质岩等具有特征同位素组成的源岩, 是控制长江干流和一些支流悬浮物的 Sr-Nd 同位素组成异常的主要原因。

长江水系和流域源岩类型要比世界其他大河复杂, 水系沉积物也更好地反映了世界风化陆壳的平均组成。相比同样发源于喜马拉雅-青藏高原地区的南亚和东南亚的主要河流, 长江的 Sr-Nd 同位素组成具有不同的地球化学制约机制和源汇示踪意义。

致谢 感谢韩国汉城大学 Lee Chang-Bok 教授和 Na Tae-Kyong 博士在部分河流样品采集与分析中的帮助; 感谢陈江峰及审稿人提出的修改意见和建议。

参 考 文 献

- 高抒. 美国“洋陆边缘科学计划 2004”述评. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(1): 119—123
- Edmond J M. Himalayan tectonics, weathering processes, and the strontium isotope record in marine limestones. *Science*, 1992, 258: 1594—1597[DOI]
- Palmer M R, Edmond J M. The strontium isotope budget of the modern ocean. *Earth Planet Sci Lett*, 1989, 92: 11—26[DOI]
- Palmer M R, Edmond J M. Controls over the strontium isotope composition of river water. *Geochim Cosmochim Acta*, 1992, 56: 2099—2111[DOI]
- Blum J D, Erel Y. A silicate weathering mechanism linking increases in marine $^{87}Sr/^{86}Sr$ with global glaciation. *Nature*, 1995, 373: 415—418[DOI]
- Krishnaswami S, Trivedi J R, Sarin M M, et al. Strontium isotopes and rubidium in the Ganges Bramaputra river system—weathering in the Himalaya, fluxes to the Bay of Bengal and contribution to the evolution of oceanic Sr^{87}/Sr^{86} . *Earth Planet Sci Lett*, 1992, 109: 243—253[DOI]
- Pande K, Sarin M M, Trivedi J R, et al. The Indus river system (Indian-Pakistan): major-ion chemistry, uranium and strontium isotopes. *Chem Geol*, 1994, 116: 245—259[DOI]
- Derry L, France-Lanord C. Neogene Himalayan weathering history and river $^{87}Sr/^{86}Sr$: Impact on the marine Sr record. *Earth Planet Sci Lett*, 1996, 142: 59—74[DOI]
- Quade J, Roe L, DeCelles P G, et al. The late Neogene $^{87}Sr/^{86}Sr$ record of lowland Himalayan Rivers. *Science*, 1997, 276: 1828—1831[DOI]
- Galy A, France-Lanord C, Derry L A. The strontium isotopic budget of Himalayan Rivers in Nepal and Bangladesh. *Geochim Cosmochim Acta*, 1999, 63: 1905—1925[DOI]
- Chesley J T, Quade J, Ruiz J. The Os and Sr isotopic record of Himalayan paleorivers: Himalayan tectonics and influence on ocean chemistry. *Earth Planet Sci Lett*, 2000, 179: 115—124[DOI]
- Singh S K, France-Lanord C. Tracing the distribution of erosion in the Bramaputra watershed from isotopic compositions of stream sediments. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 202: 645—662[DOI]
- Singh S K, Trivedi J R, Pande K, et al. Chemical and strontium, oxygen, and carbon isotopic compositions of carbonates from the Lesser Himalayan: Implications to the strontium isotope composition of the Indus Rives. *Geochim Cosmochim Acta*, 1998, 62: 743—755[DOI]
- Harris N, Bickle M, Chapman H, et al. The significance of Himalayan rivers for silicate weathering rates: evidence from the Bhote Kosi tributary. *Chem Geol*, 1998, 66: 245—272
- English N B, Quade J, DeCelles P G. Geologic control of Sr and major element chemistry in Himalayan rivers, Nepal. *Geochim Cosmochim Acta*, 2000, 64: 2549—2566[DOI]
- Goldstein S L, O’Nions R K, Hamilton P J. A Sm-Nd isotopic study of atmospheric dusts and particulates from major river systems. *Earth Planet Sci Lett*, 1984, 70: 221—236[DOI]
- 孟宏伟, 杜德文, 陈志华, 等. 长江、黄河流域泛滥平原细粒沉积物 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 空间变异的制约因素及其物源示踪意义. 地球化学, 2000, 29(6): 562—569
- 王中良, 刘丛强. 长江河口区水体锶同位素地球化学——对水体与沉积物相互作用过程的反映. 地球与环境, 2004, 32(2): 26—31
- 赵继昌, 耿冬青, 彭建华, 等. 长江河源区的河水主要元素与 Sr 同位素来源. 水文地质工程地质, 2003, 2: 89—98
- Goldstein S J, Jacobsen S B. Nd and Sr isotopic systematics of river water suspended material: implication for crustal evolution. *Earth Planet Sci Lett*, 1988, 87: 249—265[DOI]
- Peterman Z E. Strontium isotope characterization of the Ash Meadows ground-water system, southern Nevada, USA. In: Kharaka K Y, Maest A S, ed. *Water-Rock Interaction*, Balkema, 1992. 825—829
- Asahara Y, Tanaka T, Kamioka H, et al. Asian continental nature of $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratios in north central Pacific sediments. *Earth Planet Sci Lett*, 1995, 133: 105—116[DOI]
- Douglas G B, Gray C M, Hart B T, et al. A strontium isotopic investigation of the origin of suspended particulate matter (SPM) in the Murry-Darling River system, Australia. *Geochim Cosmochim Acta*, 1995, 59: 3799—3815[DOI]
- 杨杰东, 陈骏, 张兆峰, 等. 距今 7 Ma 以来甘肃灵台剖面 Nd 和 Sr 同位素特征. 地球化学, 2005, 34(1): 1—6
- Borg L E, Banner J L. Neodymium and strontium isotopic constraints on soil sources in Barbados, West Indies. *Geochim Cosmochim Acta*, 1996, 60: 4193—4206[DOI]
- Capo R C, Stewart B W, Chadwick O A. Strontium isotopes as tracers of ecosystem processes: theory and methods. *Geoderma*, 1998, 82: 197—225[DOI]
- Martin C E, McCulloch M T. Nd-Sr isotopic and trace element

- geochemistry of river sediments and soils in a fertilized catchment, New South Wales, Australia. *Geochim Cosmochim Acta*, 1999, 63: 287—305[DOI]
- 28 马英军, 刘从强. 花岗岩化学风化过程中的 Sr 同位素演化——矿物相对风化速率的影响. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2001, 31(8): 634—640
- 29 李曙光, 刘德良, 陈移之, 等. 扬子陆块北缘地壳的钕同位素组成及其构造意义. *地球化学*, 1994, 23(增刊): 10—17
- 30 李献华, McCulloch M. T. 扬子南缘沉积岩的 Nd 同位素演化及其大地构造意义. *岩石学报*, 1996, 12(3): 360—369
- 31 Weldeab S, Emeis K-Ch, Hemleben C, et al. Provenance of lithogenic surface sediments and pathways of riverine suspended matter in the Eastern Mediterranean Sea: evidence from $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios. *Chem Geol*, 2002, 186: 139—149[DOI]
- 32 Chen J F, Jahn B M. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence. *Tectonophysics*, 1998, 284: 101—133[DOI]
- 33 Chen J F, Yan J, Xie X, et al. Nd and Sr isotopic compositions of igneous rocks from the Lower Yangtze region in Eastern China: constrains on source. *Phys Chem Earth (A)*, 2001, 26: 719—731[DOI]
- 34 Gao S, Ling W L, Qiu Y M, et al. Contrasting geochemical and Sm-Nd isotopic compositions of Archean metasediments from the Kongling high-grade terrain of the Yangtze craton: evidence for cratonic evolution and redistribution of REE during crustal anatexis. *Geochim Cosmochim Acta*, 1999, 63: 2071—2088[DOI]
- 35 Zhou H B, Zindler A, Xu X S, et al. Major, trace element, and Nd, Sr and Pb isotope studies of Cenozoic basalts in SE China: mantle sources, regional variations, and tectonic significance. *Chem Geol*, 2000, 171: 33—47[DOI]
- 36 周泰禧, 陈江峰, 张巽, 等. 扬子地块东南缘沉积岩的 Nd 同位素研究. *沉积学报*, 1995, 13(3): 39—45
- 37 支霞臣, 陈道公, 张宗清, 等. 皖苏鲁新生代玄武岩的 Sr-Nd 同位素组成及其含义. *地球学报*, 1994, (1-2): 62—67
- 38 朱弟成, 潘桂棠, 莫宣学, 等. 青藏高原及邻区新生代火山岩 Sr-Nd-Pb 同位素特征. *沉积与特提斯地质*, 2003, 23(3): 1—11
- 39 张玉泉, 谢应雯, 李献华, 等. 青藏高原东部钾玄岩系岩浆岩同位素特征: 岩石成因及其构造意义. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2000, 20(5): 493—498
- 40 张招崇, 王福生. 峨眉山玄武岩 Sr、Nd、Pb 同位素特征及其物源探讨. *地球科学——中国地质大学学报*, 2003, 28(4): 432—439
- 41 肖龙, 徐义刚, 何斌. 峨眉地幔柱-岩石圈的相互作用: 来自低钕和高钕玄武岩的 Sr-Nd 和 O 同位素证据. *高校地质学报*, 2003, 9(2): 210—217
- 42 沈渭洲, 凌洪飞, 李武显, 等. 中国东南部花岗岩类的 Nd-Sr 同位素研究. *高校地质学报*, 1999, 5(1): 22—32
- 43 沈渭洲, 凌洪飞, 李武显, 等. 江西省中生代花岗岩类的 Nd-Sr 同位素研究. *科学通报*, 1998, 43(24): 2653—2657
- 44 王德滋, 沈渭洲. 中国东南部花岗岩成因与地壳演化. *地学前缘*, 2003, 10(3): 209—220
- 45 胡恭任, 章邦桐, 于瑞莲. 赣中变质岩带的 Sm-Nd, Rb-Sr 同位素年代研究. *地质论评*, 1999, 45(2): 130—134
- 46 邱瑞照, 邓晋福, 周肃, 等. 青藏高原中新生代花岗岩 Sr、Nd 同位素研究. *地球学报*, 2003, 24(6): 611—617
- 47 刘从强, 解广轰, 增田彰正. 中国东部新生代玄武岩的地球化学(II) Sr、Nd、Ce 同位素组成. *地球化学*, 1995, 24(3): 205—206
- 48 黄思静, 石和, 张萌, 等. 上扬子石炭—二叠纪海相碳酸盐的锶同位素演化与全球海面变化. *沉积学报*, 2001, 19(4): 481—487
- 49 黄思静, 石和, 张萌, 等. 龙門山泥盆纪锶同位素演化曲线的全球对比及海相地层的定年. *自然科学进展*, 2002, 12(9): 945—951
- 50 石和, 黄思静, 沈立成, 等. 川黔上古生界锶同位素演化曲线的地层学意义. *地层学杂志*, 2002, 26(2): 106—110
- 51 张自超. 中国某些元古宙及早寒武纪碳酸盐岩石的锶同位素组成. *地质论评*, 1995, 41(4): 349—354
- 52 韩贵琳, 刘从强. 贵州河流河水的锶同位素与喀斯特地区化学风化作用. *第四纪研究*, 2000, 20(6): 26
- 53 唐世荣, 王东安, 叶连俊. 湘川地区上震旦—下寒武统硅岩的锶同位素特征. *桂林工学院学报*, 1998, 18(1): 16—21
- 54 Ding T, Wan D, Wang C, et al. Silicon isotope compositions of dissolved silicon and suspended matter in the Yangtze River, China. *Geochim Cosmochim Acta*, 2004, 68(2): 205—216[DOI]
- 55 Asahara Y, Tanaka T, Kamioka H, et al. Provenance of the north Pacific sediments and process of source material transport as derived from Rb-Sr isotopic systematics. *Chem Geol*, 1999, 158: 271—291[DOI]
- 56 Yang, S Y, Lim D I, Jung H S, et al. Geochemical composition and provenance discrimination of coastal sediments around Cheju Island in the southeastern Yellow Sea. *Mar Geol*, 2004, 206: 41—53[DOI]
- 57 Allegre C J, Rousseau D. The growth of the continent through geological time studied by Nd isotope analysis of shales. *Earth Planet Sci Lett*, 1984, 67: 19—34[DOI]
- 58 Evans M J, Derry L A, Anderson S P, et al. Hydrothermal source of radiogenic Sr to Himalayan Rivers. *Geology*, 2001, 29(9): 803—806[DOI]