

文章编号: 1001-8166 (2006) 03-0262-07

喜马拉雅河流 Sr 同位素异常源岩 研究现状及研究进展*

秦建华^{1,2}, 冉敬¹, 沈敢富¹, 杜谷¹

(1. 成都地质矿产研究所 四川 成都 610082 2. 成都理工大学 四川 成都 610059)

摘 要 海洋 Sr 同位素的变化主要是由陆地河流注入的 Sr 同位素的变化所引起。在全球河流中, 流经喜马拉雅山地河流(恒河—布拉马普特拉河)表现出与世界上其它河流明显不同的特点, 具有高⁸⁷Sr/⁸⁶Sr、高[Sr]的特征。恒河—布拉马普特拉河是世界上第四大河流, 是当今世界海洋 Sr 的重要来源。国际上, 目前人们对造成喜马拉雅河流 Sr 异常的原因(来源)的认识, 仍存较大分歧。归纳起来, 主要有 3 种认识: 一是认为来源于硅酸盐岩; 二是认为来源于碳酸盐岩的风化; 三是认为来源于碳酸盐岩和硅酸盐岩的风化。近年来, 作者对高喜马拉雅中央结晶岩系河流 Sr 同位素异常及其源岩进行的研究表明, 高喜马拉雅河流 Sr 同位素受流域地质作用的强烈影响, 呈现出高⁸⁷Sr/⁸⁶Sr、低[Sr]的特点。对岩石和单矿物的研究表明, 中央结晶岩系变质岩(片岩、片麻岩)和花岗岩黑云母中的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr与[Rb]成正比并具有高⁸⁷Sr/⁸⁶Sr、低[Sr]的特征。黑云母矿物具有的易风化性, 为高喜马拉雅河流放射性⁸⁷Sr提供了主要来源。恒河—布拉马普特拉河的 Sr 异常(高⁸⁷Sr/⁸⁶Sr和高[Sr])则可能是反映了流经整个喜马拉雅造山带河流 Sr 混合平衡后的特征。

关键词 海洋 Sr 同位素 喜马拉雅 河流 Sr 异常 源岩

中图分类号: P595 文献标识码: A

20 世纪 80 年代末至 90 年代初, Raymo 等^[1]将新生代全球构造抬升与地表化学风化、全球气候变化相联系, 提出了目前国际上较为流行的“抬升—侵蚀(气候)”理论以来, 喜马拉雅山脉就在大型山脉的形成对于全球气候周期性变冷所产生的影响的争论中起着核心作用。一些学者认为自早新生代喜马拉雅山脉开始逐渐形成, 伴随着这一过程全球硅酸盐岩风化得以加强, 从而引起了全球气候变冷, 同时还伴随着自晚始新世以来海洋 Sr 同位素比率剧烈增高的现象^[2-4]。

人们对过去 500 Ma 以来地质历史中海相灰岩同位素进行的测定表明^[5], 海洋 Sr 同位素并不像 Wickman^[6]所言的那样, 随时间呈单调增高, 而是表

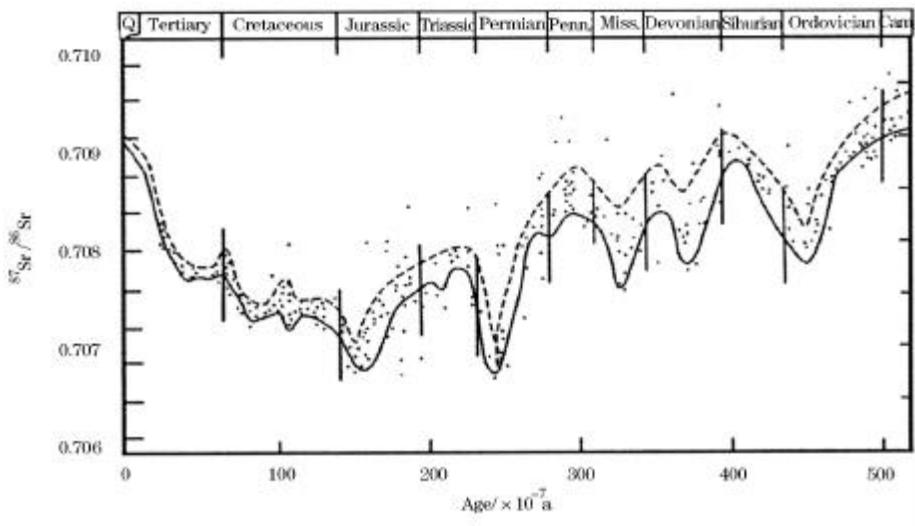
现为时间的函数并在不同时间尺度上呈现出周期性的摆动, 特别是自新生代约 40 Ma 以来, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 就出现了连续的大幅度增高(现代海水 Sr 同位素比率约为 0.7091 与寒武纪时的相近, 图 1)。

一些学者将海洋 Sr 同位素在新生代的变化与新生代全球构造抬升, 特别是喜马拉雅山地—西藏高原(我国统称为青藏高原)的抬升, 陆地风化和全球新生代气候变化相联系^[2, 7-11]。Raymo 等^[2, 3]认为海水 Sr 同位素可作为全球地表化学风化的替代性标志, 将寒武纪和现今海水 Sr 同位素达到最高值归因于大陆碰撞构造隆升引起的陆地铝硅酸盐岩的加速风化, Richer 等^[8]将新生代 40 Ma 以来海水 Sr 同位素呈现的单调快速增高归因于喜马拉雅山地—

* 收稿日期 2005-03-10; 修回日期 2005-09-29.

* 基金项目: 国家自然科学基金项目“恒河—布拉马普特拉河 Sr 同位素异常源岩追踪”(编号: 40273003), 中国科学院广州地球化学研究所元素同位素地球化学实验室资助.

作者简介: 秦建华(1964-), 男, 四川成都人, 研究员, 主要从事沉积学和河流地球化学研究. E-mail: cdqjianhua@cgs.gov.cn

图1 海洋 Sr 同位素曲线^[5]Fig.1 The curve of the marine Sr isotopic composition^[5]

西藏高原的隆升,认为在 20 ~15 Ma BP 期间 Sr 同位素发生的最迅速增高,就是喜马拉雅山地—西藏高原发生快速侵蚀的结果。已有的研究表明,由构造作用引起的山脉和高原隆升所引起的陆地硅酸盐岩风化所造成的大气 CO₂ 消耗是造成新生代气候变冷的重要原因^[9,10]。如果按照 Raymo 等^[2,21] 的理论,若海水 Sr 同位素比率高就意味着全球陆地硅酸盐岩风化速率高,进而就可以指示全球气候的变冷。而从目前的研究来看,有关海水 Sr 同位素与硅酸盐岩风化的关系尚存较大争议^[12-15]。

海洋 Sr 同位素在全球是均一的,并由两种来源的 Sr 同位素组成。一种是来自地幔由具有放射性成因的深海热液的注入(其 Sr 同位素比率约为 0.7035);另一种来源是来自于陆地风化具有更多的放射性成因的河流的注入(其 Sr 同位素比率约为 0.712)。由于现代全球洋中脊热液系统同位素具有均一性并在过去 500 Ma 的地质历史中几乎保持不变^[4],因此海水 Sr 同位素的变化就主要是由陆地河流带入的 Sr 同位素的变化所引起。

研究表明,在全球河流中,流经喜马拉雅山地的河流(恒河—布拉马普特拉河,布拉马普特拉河在我国境内称为雅鲁藏布江)表现出了与世界上其它河流明显不同的特点,世界河流平均 [Sr] 为 0.89 μm, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 为 0.7119,而恒河—布拉马普特拉河的 [Sr] 浓度和 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比率均较高,[Sr] 达 1.58

μm 和 0.93 μm, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 达 0.7257 和 0.7210^[14,15]。另外,在 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 与 1/[Sr] 对应关系图上,喜马拉雅山地河流也呈现出高 [Sr] 和高 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 的特点,即不具有其它河流所遵循的 Wickman 趋向^[16,18,19](图 2)。因此,喜马拉雅山地的河流具有高 [Sr]、高 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 的特点,喜马拉雅山脉成为世界海洋 Sr 的重要来源,并对全球海洋 Sr 同位素产生了重要的影响^[20]。Trivedi 等^[21] 指出,研究清楚恒河中放射性 Sr 的来源将有助于了解喜马拉雅构造、风化和气候变化的耦合关系。但目前人们对造成喜马拉雅河流 Sr 异常(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比率和 [Sr]) 的原因(来源) 仍存较大分歧,需要进一步研究。

1 河流 Sr 同位素的来源

已有研究表明,河水 Sr 同位素主要有 2 个来源,一是灰岩和蒸发岩,一是硅酸盐岩。通常情况下,典型的灰岩和蒸发岩易风化,Sr 含量高(可达 1 000 ×10⁻⁶)、Sr 同位素比率 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 变化范围窄,为 0.706 ~0.709,岩石中各个部分 Sr 同位素比值基本均一。相比之下,硅酸盐岩中 Sr 含量较低,不易风化,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 变化范围较大,虽然其下限值可由玄武质地体(basaltic terrains)所代表的地壳硅酸盐岩中的 Sr 同位素约为 0.705 来设定,但其上限值却并未得到很好的约束(其 Sr 同位素比率可 >1.0),而且在含有多种矿物的硅酸盐岩石中(polyminerals rocks)其 Sr 同位素成分常常是不均一的。由此说

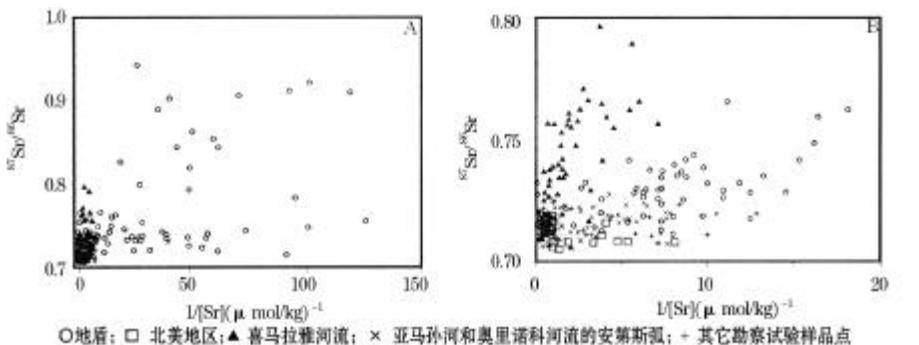


图 2 世界主要河流 $N^{87}\text{Sr}/N^{86}\text{Sr}$ 与 $1/[\text{Sr}]$ 关系图^[4]

Fig. 2 Summary plot of $N^{87}\text{Sr}/N^{86}\text{Sr}$ versus $1/[\text{Sr}]$ in river water^[4]

明来自于硅酸盐岩风化的河流 Sr 同位素比率 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 将取决于接受风化的硅酸盐岩石类型和岩石中接受最广泛风化的矿物^[17, 21]。

2 喜马拉雅河流 Sr 同位素异常源岩研究现状

2.1 河流 Sr 同位素异常源岩的几种认识

目前,人们对喜马拉雅河流 Sr 同位素异常源岩的研究,主要是集中在对印度、巴基斯坦、尼泊尔境内恒河、布拉马普特拉河和印度河源头地区的研究,而对中国境内河流的研究较少。

关于喜马拉雅河流 Sr 同位素异常(即放射性 ^{87}Sr)源岩的研究,目前,主要有 3 种认识,一是认为放射性 ^{87}Sr 主要来源于硅酸盐岩的风化^[17, 19, 22, 23];二是认为变质成因的蚀变碳酸盐岩(altered carbonate rocks)是放射性 ^{87}Sr 的重要源岩^[16, 24, 26];第三种观点认为流经喜马拉雅河流 Sr 同位素(Sr isotopic budget)的平衡主要是受到了硅酸盐岩和碳酸盐岩溶解的影响^[13, 20]。

2.2 关于异常源岩来源于硅酸盐岩的研究

如前所述,在 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与 $1/[\text{Sr}]$ 的关系上(图 2)从全球尺度上来讲,几乎所有河流 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比率表现为从具有较高的 Sr 浓度(主要是灰岩,部分是硅酸盐岩的风化)变化到具有较低 Sr 浓度(由于较不易风化的铝硅酸盐岩开始逐渐风化)但却具有较多放射性 ^{87}Sr 的过程是逐渐发生的,而唯有流经喜马拉雅的恒河—布拉马普特拉河在该图上表现出了异常,其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与 $1/[\text{Sr}]$ 关系的斜率更大,变化更快。Palmer 等^[17]认为这是由喜马拉雅山链的迅速抬升和强烈的冰川活动引起的异常迅速的侵蚀所造成的(exceptionally rapid erosion rates),并认为由抬

升了的陆屑沉积物和造山带中的花岗岩风化所提供的 Sr 同位素足以超过由河流下游广泛分布的台地碳酸盐岩风化所产生的影响。

Krishnaswami 等^[19]通过对喜马拉雅山源头支流(主要在印度部分)广泛取样分析后认为,恒河源区河水(Ganga source waters)中较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 是来自于富含放射性 ^{87}Sr 的前寒武纪花岗岩和片麻岩的强烈风化,并认为硅酸盐岩风化对恒河河水 Sr 同位素分馏系列起到了控制作用,而碳酸盐的风化对河水主要离子化学则是起到了重要作用。Edmond^[4]认为由核杂岩提供的高放射性 ^{87}Sr 通量(high radiogenic yields)在于 Rb-Sr 分馏系列受到了扰动。在第三纪印度与欧亚碰撞期间伴随发生的高级变质作用和岩石的部分熔融(如脱水反应和矿物熔融反应)足以将放射性 Sr 从较不易风化的富 K 矿物中(如云母)活化出来进入到更易风化的富 Na 富 Ca 硅酸盐矿物中(如长石)^[23]。Singh 等^[13]在对小喜马拉雅前寒武纪碳酸盐岩(主要是白云岩)样品进行了分析后认为,在恒河的主要源头水中,硅酸盐岩提供的 Sr 对河水 Sr 浓度和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 起到了主要的控制作用。Blum 等^[27]在强调构造作用对全球海水 Sr 同位素起长期控制作用的基础上提出,至少在过去 10 Ma 它还受到了冰川作用叠加的影响,认为冰期后迅速发生的黑云母风化是其形成机制。

2.3 关于异常源岩来源于碳酸盐岩的研究

然而,与上述的认识相反,一些研究者则对喜马拉雅山河流 Sr 异常的源岩提出了另外一种解释。Le Fort^[28]认为碰撞后在喜马拉雅地区发生的变质作用和岩浆作用会造成广泛的流体搬运和 Rb-Sr 等时线的重置(resetting)。由此,Palmer 等^[16]提出由这种变质成因流体的重新分配会由于放射性成因的

Sr 从局部具有高 Rb-Sr 含量的花岗岩和片麻岩中以及从灰岩中由粘土矿物的蚀变中流出,引起碳酸盐矿物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的提高,并推测可能正是由这些变质灰岩(metamorphosed limestones)的风化造成了恒河 Sr 同位素的异常。

Quade 等^[2]在对恒河支流塞蒂(Seti)河和阿润(Arun)河(在我国境内称为朋曲)流经高喜马拉雅和小喜马拉雅硅酸盐岩和碳酸盐岩的风化特征进行对比研究后认为变质碳酸盐岩应是喜马拉雅河流放射性 ^{87}Sr 的主要来源并可能对自早中新世以来海洋 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的变化起到关键的影响。

Blum 等^[26]和 Jacobson 等^[29]对巴基斯坦北部印度河源头 Raikhot 流域盆地高喜马拉雅中央结晶岩系中碳酸盐岩和硅酸盐岩的风化进行研究后认为,虽然在片麻岩和花岗岩中碳酸盐岩约占 1%,但河水中 82% 的 HCO_3^- 却来自于这些碳酸盐矿物的风化,同时由于这些呈浸染状分布的方解石具有较高的 Ca/Sr 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(浸染状方解石在硅酸盐岩中约占 0.1%),因此认为喜马拉雅河流中 Sr 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 可能主要是由中央结晶岩系中这些痕量方解石的风化所提供。

2.4 关于异常源岩来源于碳酸盐岩和硅酸盐岩的研究

Bickle 等^[30]研究了恒河源头 Garhwal 河流域高喜马拉雅中央结晶岩系和小喜马拉雅中碳酸盐岩的 Sr 同位素成分后认为,碳酸盐岩中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的提高是由于在喜马拉雅和前喜马拉雅变质事件期间在硅酸盐矿物和碳酸盐矿物之间发生了 Sr 同位素的交换,并认为即使这些碳酸盐岩中 Sr 含量相对来说是比较低的,但它们的溶解仍对喜马拉雅主要河流 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比率产生了重要的影响。同时, Bickle 等也承认虽然这些具有极高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的变质碳酸盐岩对抬高的河水 Sr 同位素产生了影响,但也仅仅对提高了的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素通量具有部分的贡献,其余的来源还包括了硅酸盐岩石或硅酸盐岩中呈浸染状分布的微细碳酸盐岩。因此,需要对喜马拉雅河流 ^{87}Sr 通量的各种来源进行合理的确定。

Harris 等^[23]在对波代(Bhote Kosi)河(我国称为波曲)从上游北喜马拉雅经中央结晶岩系直到下游小喜马拉雅主河流进行了取样分析后认为,喜马拉雅河流中高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比率中仅有小部分(< 10%)来自于具有异常高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比率(0.75 ~ 1.0)的硅酸盐岩,大部分(>90%)是来自于具有高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比率(可达 0.8)的碳酸盐岩。而无论是具

有高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比率的碳酸盐岩或硅酸盐岩均可造成喜马拉雅河流高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比率,但都不能为河流同时提供高的[Sr]浓度。

Galy 等^[20]在对尼泊尔境内的恒河源头河流纳拉亚尼(Narayani)和格尔拉利(Karnali)河 Sr 同位素平衡(budget)研究后认为,喜马拉雅河流在流经北喜马拉雅沉积岩带(TSS)、中央结晶岩系(HHC)和小喜马拉雅(Ls)后河流中的 Sr 主要有 2 个来源,一是北喜马拉雅沉积岩带的碳酸盐岩,一是小喜马拉雅中具高放射性 Sr 的硅酸盐岩。同时认为由于高放射性碳酸盐岩中的低 Sr 含量,说明了它不应是河流放射性 Sr 的主要来源。

3 喜马拉雅河流 Sr 同位素异常源岩的研究进展

国家自然科学基金项目“恒河—布拉马普特拉河 Sr 同位素异常源岩追踪”通过对中国境内恒河源头支流波曲和布拉马普特拉河源头支流康布马曲以及与其它流经喜马拉雅山地—西藏高原河流的研究,在喜马拉雅河流 Sr 同位素异常源岩研究方面取得了一些新的认识和进展。

(1) 通过与流经北喜马拉雅沉积岩带、西藏高原拉萨地块和可可西里造山带、巴彦喀拉和祁连山造山带河流的对比研究后发现,流经高喜马拉雅中央结晶岩系的河流具有高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、低[Sr]的特点(图 3)。在我们对流经中央结晶岩系河流所分析的 15 件样品中,其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 均高于世界河流平均值 0.7119,其中,除 1 件样品为 0.7168 (YW02,该样品流过了北喜马拉雅沉积岩带)外,其余 14 件样品均高于 0.72。与此对照,在所分析的 15 件样品中,除 1 件样品(YW02) [Sr] 为 3.25 $\mu\text{mol/L}$ 外,其余 14 件样品均低于世界河流平均值 0.89 $\mu\text{mol/L}$ 。在 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与 1/[Sr] 关系图上(图 3),中央结晶岩系河流样品点均落在了世界河流平均值的右上方(除 YW02 样品外),与此对照,其它河流样品点主要是落在了世界河流平均值周围(图 3)。另外,与其它的喜马拉雅河流相比(图 2),流经中央结晶岩系的河流显示出了高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、低[Sr]的特点,表明硅酸盐岩的风化对河水 Sr 起到了重要影响^[14]。

(2) 黑云母的风化是中央结晶岩系河流放射性 ^{87}Sr 的主要来源。

首先,我们对中央结晶岩系中的各类主要岩石进行了 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、[Sr]和[Rb]的分析。分析表明,片麻岩、片岩和花岗岩中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 较高,为 0.720077

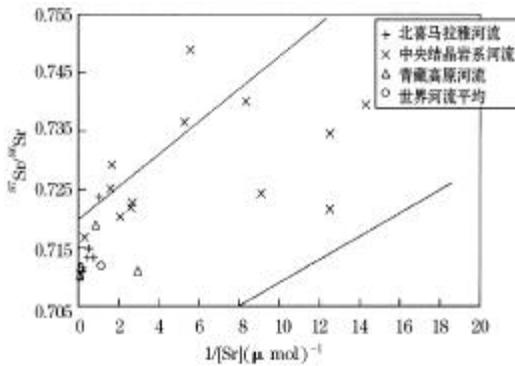


图 3 喜马拉雅山地—青藏高原河流 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与 $1/[\text{Sr}]$ 图

Fig 3 Isotopic composition of riverine dissolved Sr vs $1/[\text{Sr}]$ in Him alayan m ountain-Tibet plateau

图中两条直线的范围是世界其它主要河流 Sr 的落点区域^[4]

In figure , the two lines bracket the riverine composition of dissolved Sr in other major world rivers^[4]

~ 0.762831 , $[\text{Sr}]$ 为 $42.04 \times 10^{-6} \sim 1.0354 \times 10^{-6}$, $[\text{Rb}]$ 为 $130.3 \times 10^{-6} \sim 562.1 \times 10^{-6}$, 而大理岩中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 较低,为 $0.713171 \sim 0.713403$,但 $[\text{Sr}]$ 较高为 $974.2 \times 10^{-6} \sim 1.4048 \times 10^{-6}$ $[\text{Rb}]$ 为 $31.9 \times 10^{-6} \sim 154.4 \times 10^{-6}$,与北喜马拉雅沉积岩带灰岩($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 0.708889 , $[\text{Sr}]$ 为 281.1×10^{-6} , $[\text{Rb}]$ 为 1.5×10^{-6})相比 其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $[\text{Sr}]$ 和 $[\text{Rb}]$ 均有所提高 表明在喜马拉雅变质作用中变质流体在大理岩中可能注入了一定的 Rb 和 Sr。同时,我们还对部分样品通过光学显微镜和电子探针片麻岩和花岗岩中是否存在碳酸盐矿物进行了分析,结果未发现碳酸盐矿物存在。因此,可以认为片麻岩、片岩和花岗岩应是中央结晶岩系河流中放射性 ^{87}Sr 的主要源岩,是造成河流高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和低 $[\text{Sr}]$ 特征的主要原因。

研究中,我们又进一步对片麻岩、片岩和花岗岩中的单矿物长石和云母进行了 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $[\text{Sr}]$ 和 $[\text{Rb}]$ 的分析。分析表明,黑云母中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比长石高,黑云母为 $0.759366 \sim 0.950127$,长石为 $0.721017 \sim 0.757204$,与之相对应,黑云母中的 $[\text{Rb}]$ 也比长石高,黑云母 $[\text{Rb}]$ $990 \times 10^{-6} \sim 26.063.6 \times 10^{-6}$,长石为 $15.26 \times 10^{-6} \sim 380.8 \times 10^{-6}$,但黑云母中的 $[\text{Sr}]$ 却比长石低,长石为 $96.3 \times 10^{-6} \sim 921.4 \times 10^{-6}$,黑云母为 $14.0 \times 10^{-6} \sim 56.13 \times 10^{-6}$ 。黑云母中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与 $[\text{Rb}]$ 成正比关系(图 4)表明放射性 ^{87}Sr 的来源可能是由放射性 Rb 的衰变形成。

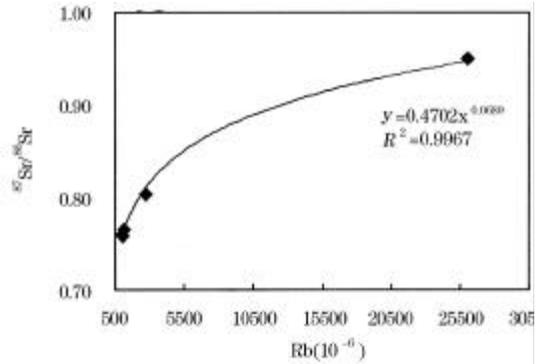


图 4 喜马拉雅中央结晶岩系变质硅酸盐岩和花岗岩黑云母中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与 $[\text{Rb}]$ 的关系

Fig.4 The relationship between $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and $[\text{Rb}]$ in the biotite in the high Him alayan crystalline series the m etasedim entary silicate and granite

由此可看出,黑云母的 Sr 与中央结晶岩系河流 Sr 的特点相似,即,高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$,低 $[\text{Sr}]$ 。而我们对片麻岩风化剖面 and 河流沙质矿物成分的研究(另文介绍)也支持黑云母的风化为河流放射性 ^{87}Sr 提供了主要来源的认识。

高喜马拉雅河流 Sr 主要是受结晶岩系中黑云母具有高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比率和低 $[\text{Sr}]$ 特征所影响,黑云母风化是高喜马拉雅河流放射性 ^{87}Sr 的主要来源,说明高喜马拉雅河流 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与流域地表硅酸盐岩的风化速率之间并无直接的内在关系,换句话说,高喜马拉雅河流 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 并不能指代流域内硅酸盐岩的化学风化速率。我们的数据不支持有关海洋 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比率可作为陆地硅酸盐岩风化指代物的观点。

3) 高喜马拉雅中央结晶岩系河流与恒河具有不同 Sr 特征的原因分析。

喜马拉雅造山带包括北喜马拉雅沉积岩带、高喜马拉雅中央结晶岩系和小喜马拉雅。在喜马拉雅造山带内不同流域中,碳酸盐和硅酸盐岩的风化对河流 Sr 的贡献不同,河水化学成分受到地质作用的强烈影响^[13, 31]。高喜马拉雅中央结晶岩系河流表现出的高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$,低 $[\text{Sr}]$ 的特征,正是由正在接受广泛风化的黑云母具有高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$,低 $[\text{Sr}]$ 的特点所决定的。与中央结晶岩系河流相比,北喜马拉雅河流又表现出不同的特点。在我们对北喜马拉雅所分析的 6 件河水样品中,除 DW11 样品(该样是起源于中央结晶岩系)外,其它样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比率均低于 0.72(恒河的平均值为 0.7257),而样品的 $[\text{Sr}]$ 除

2 件流过了变质核杂岩的样品(DW02 和 DW11) 外, 其它样品均高于恒河的平均值 $1.58 \mu\text{mol/L}$ 。

而中央结晶岩系河流在与北喜马拉雅河流混合平衡后, 河流的[Sr] 均得以增高(可达 $3.25 \mu\text{mol/L}$)。

因此, 恒河所具有的与世界上其它河流不同的 Sr 特征, 即具有高⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 和高[Sr], 是反映了恒河在流经整个喜马拉雅造山带河流 Sr 混合平衡后的特征。English 等^[31] 在对流经北喜马拉雅沉积岩带、高喜马拉雅中央结晶岩系和小喜马拉雅 Seti 河的研究就表明, 小喜马拉雅对河水[Sr] 的贡献为 40% ~53%。与此不同, 高喜马拉雅中央结晶岩系河流表现出的高⁸⁷Sr/⁸⁶Sr、低[Sr] 特征则是仅代表了河流流经中央结晶岩系的特点, 反映了中央结晶岩系特殊的地质作用。

参考文献(References):

- [1] Raymo M E, Ruddiman W F, Froelich P N. Influence of the late Cenozoic mountain building on ocean geochemical cycles[J]. *Geology*, 1988, 16 : 649-653.
- [2] Quade J, English N, Decelles P G. Silicate versus carbonate weathering in the Himalaya: A comparison of the Anun and Seti River watershed[J]. *Chemical Geology*, 2003, 202 : 275-296.
- [3] Raymo M E, Ruddiman W F. Tectonic forcing of the Cenozoic climate[J]. *Nature*, 1992, 359 : 117-124.
- [4] Edmond J M. Himalayan tectonics, weathering processes, and the strontium isotope record in marine limestone[J]. *Science*, 1992, 258 : 1594-1597.
- [5] Burke W H, Denison R E, Heatherington E A, et al. Variation of seawater ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr throughout Phanerozoic time[J]. *Geology*, 1982, 10 : 516-519.
- [6] W ickman F E. Isotope ratios, a clue to the age of certain marine sediments[J]. *The Journal of Geology*, 1948, 56 : 61-66.
- [7] Ruddiman W F, Kutzbach J E. Forcing of the late Cenozoic Northern hemisphere climate by plateau uplift in Southern Asia and the American West[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 94 : 8407-8427.
- [8] Richerter F M, Rowley D B, Depolo D J. Sr isotope evolution of seawater: The role of tectonics[J]. *Earth Planetary Science of Letters*, 1992, 109 : 11-23.
- [9] Qin Jianhua, Pan Guitang, Du Gu, et al. The progress for study on the change of Cenozoic global climate, continental silicate rock weathering and marine strontium isotope[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2002, 22(3) : 31-35. [秦建华, 潘桂棠, 杜谷, 等. 新生代气候变化与陆地硅酸盐岩和海洋 Sr 同位素研究[J]. *矿物岩石*, 2002, 22(3) : 31-35.]
- [10] Qin Jianhua, Pan Guitang, Du Gu. The effects of Cenozoic tectonic uplift on earth surface chemical weathering and global climate change[J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(2) : 517-525. [秦建华, 潘桂棠, 杜谷. 新生代构造抬升对地表化学风化 and 全球气候变化的影响[J]. *地学前缘*, 2000, 7(2) : 517-525.]
- [11] Ruddiman W F, Prelw L. Introduction to the uplift-climate connection[C]. *Tectonic Uplift and Climate Change*. Plenum, 1997 : 3-14.
- [12] McCauley S E, DePaolo J D. The marine ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr and ¹⁸O records, Himalayan alkalinity fluxes and Cenozoic climate models[C]. Ruddiman W F, ed. *Tectonic Uplift and Climate Change*. Plenum, 1997 : 428-465.
- [13] Singh S K, Trivedi J R, Pande K, et al. Chemical and strontium, oxygen, and carbon isotopic compositions of carbonates from Lesser Himalaya: Implications to the strontium isotope composition of the source waters of the Ganga, Ghaghara, and the Indus rivers[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62 : 743-755.
- [14] Edmond J M, Huh Y. Chemical weathering yields from basement and orogenic terrains in hot and cold climates[C]. Ruddiman W F, ed. *Tectonic Uplift and Climate Change*. Plenum, 1997 : 329-351.
- [15] Chen Jun, Yang Jiedong, Li Chunlei. The continental weathering and the global climatic change[J]. *Advances in Earth Science*, 2001, 16(3) : 399-405. [陈骏, 杨杰东, 李春雷. 大陆风化与全球气候变化[J]. *地球科学进展*, 2001, 16(3) : 399-405.]
- [16] Palmer M R, Edmond J M. Controls over the strontium isotope composition of river water[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56 : 2099-2111.
- [17] Palmer M R, Edmond J M. The strontium isotope budget of the modern ocean[J]. *Earth Planetary Science of Letters*, 1989, 92 : 11-26.
- [18] Huh Edmond. On the interpretation of the oceanic variations in ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr as recorded in the marine limestone Proceeding[J]. *Earth Planetary Science of Letters (Indian Academic Science)*, 1998, 107(4) : 293-305.
- [19] Krishnaswami S, Trivedi J R, Sarin M M, et al. Strontium isotopes and rubidium in Ganga-Brahmaputra river system: Weathering in Himalaya, fluxes to the bay of Bengal and contributions to the evolution of oceanic ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr[J]. *Earth Planetary Science of Letters*, 1992, 109 : 243-253.
- [20] Galy A, France-Lanord C, Derry L A. The strontium isotopic budget of Himalayan rivers in Nepal and Bangladesh[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63 : 905-925.
- [21] Trivedi J R, Pande K, Krishnaswami S, et al. Sr isotope in rivers of India and Pakistan: A reconnaissance study[J]. *Current Science*, 1995, 69(2) : 171-178.
- [22] Pande K, Sarin M M, Trivedi J R, et al. The Indus River system (India-Pakistan): Major-ion chemistry, Uranium and strontium isotopes[J]. *Chemical Geology*, 1994, 116 : 245-259.
- [23] Harris N B W. Significance of weathering Himalayan metasedimentary rocks and leucogranites for the Sr isotope evolution of seawater during the early Miocene[J]. *Geology*, 1995, 23 : 795-798.

- [24] Quade J, Roe L, Decelles P G, et al. The late Neogene $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ record of lowland Himalayan rivers[J]. *Science* 1997, 276: 1828-1831.
- [25] Harris N, Bickle M, Chapman H, et al. The significance of Himalayan rivers for silicate weathering rates: Evidence from the Bhote Kosi tributary[J]. *Chemical Geology* 1998, 144: 205-220.
- [26] Blum J D, Gazis C A, Jacobson A D, et al. Carbonate versus silicate weathering in the Raikhot watershed within the High Himalayan crystalline series[J]. *Geology* 1998, 26: 11-14.
- [27] Blum J D. The effect of Late Cenozoic glaciation and tectonic uplift on silicate weathering rates and the marine $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ record [C]. Ruddiman W F, ed. *Tectonic Uplift and Climate Change*. Plenum 1997, 260-286.
- [28] Le Fort P. Metamorphism and magmatism during the Himalayan collision [C]. *Collision Tectonics*. Geological Society of Special Publication 1986, 19: 159-172.
- [29] Jacobson A D, Blum J D. Ca/Sr and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ geochemistry of disseminated calcite in Himalayan silicate rocks from Nanga Parbat: Influence on river-water chemistry[J]. *Geology* 2000, 28: 463-466.
- [30] Bickle M J, Harris N, Bunbury N B, et al. Controls on the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio of carbonates in the Garhwal Himalaya, Headwaters of the Ganges[J]. *The Journal of Geology* 2001, 109: 737-753.
- [31] English N B, Quade J, Decelles P G, et al. Geologic control of Sr and major element chemistry in Himalayan Rivers, Nepal[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 2000, 64(13): 2549-2567.

The Current Situation and Advance of Research on the Source Rock for the Strontium Isotope in the Himalayan Rivers

QIN Jian-hua^{1,2}, RAN Jing¹, SHEN Gan-fu¹, DU Gu¹

(1. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610082, China;

2. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The variation of the marine Sr isotope is largely caused with the input of the river Sr isotope. In the global rivers, the rivers draining through the Himalayan (Ganga-Brahmaputra rivers) possess the typical Sr isotope character, i.e. high $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio and high [Sr] concentration, which obviously differentiates from other rivers. The Ganga-Brahmaputra, the fourth largest river in the world, is important source for the marine Sr. Currently, it is still controversial for the source rock resulting in the Sr isotope anomaly in the Ganga-Brahmaputra rivers. Basically, there appear three opinions for the source rock, the first opinion advocates that the source rock is the silicate rock, the second the carbonate, and the third both the silicate and carbonate. In the recent years, our research has disclosed that the Sr in the High Himalayan rivers possesses the feature of the high $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio and low [Sr] concentration, which is intensely affected by the specific geology in the drainage. The study on the metamorphic rocks (schist, gneiss) and the granites and the minerals indicates that in the biotite in the Central Crystal Series, the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ has the positive relationship with [Rb], and that the biotite also has the high $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio and low [Sr] concentration. The biotite is readily weathered and should be the primary source to the radioactive ^{87}Sr of the High Himalayan rivers. The Sr anomaly (high $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio and high [Sr]) in the Ganga-Brahmaputra is possibly attributed to the mixing balance of the rivers draining through the whole Himalayan.

Key words: Marine Sr isotope; Himalayan; River Sr anomaly; Source rock tracing.