

# 河流锶元素及其同位素地球化学研究现状与问题

王兵<sup>1,2</sup>, 李心清<sup>1\*</sup>, 周会<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 文章系统阐述了近30年来河流锶元素及其同位素地球化学研究方面取得的进展、现状及目前存在的问题, 这些问题主要包括: 河流锶同位素比值对于源岩的解释问题、河流锶元素含量及其同位素组成的全球参比值问题、不同的端元输入对河流锶元素及其同位素组成的影响以及不同制约因素及研究方法对河流锶元素及其同位素组成的影响等问题。根据目前的研究资料, 笔者指出在进行河流锶元素及其同位素地球化学研究过程中应当: (1) 考虑矿物岩石在风化过程中锶元素的释放特征及其同位素演化规律; (2) 结合同位素地球化学及雨水化学方法对大气及人类活动输入对河流锶元素及其同位素组成的贡献进行校正; (3) 开展主要流域的研究工作, 尤其是不同构造、地质及气候背景条件不同流域间的对比研究, 建立河流锶元素及其同位素组成区域参比值; (4) 在研究方法上, 应该对区域内降雨、岩石、土壤、沉积物及地下水中的锶元素及其同位素地球化学特征进行系统分析, 包括不同形态的锶元素及其同位素地球化学特征的研究。

**关键词:** 河流; 锶元素; 化学风化; 气候变化; 地球化学; 水化学

**中图分类号:** P592; P595 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9250(2009)02-0170-08

锶是自然界广泛分布的微量元素, 在岩石、土壤、水体以及生物体中均有分布且其浓度和同位素组成变化范围较大。锶有四个稳定的同位素, 分别为<sup>84</sup>Sr、<sup>86</sup>Sr、<sup>87</sup>Sr和<sup>88</sup>Sr, 其中,<sup>87</sup>Sr为放射源同位素, 由<sup>87</sup>Rb通过一个 $\beta$ 衰变而得, 由于锶同位素不受化学、生物及地质过程(降雨/矿物溶解过程)而发生分馏作用, 其同位素比值的变化只与不同来源的锶混合作用有关, 因此锶同位素一直被认为是有效的地球化学示踪剂<sup>[1-4]</sup>, 广泛应用于研究物质迁移转换过程<sup>[5]</sup>、碳酸盐岩成岩作用<sup>[6]</sup>、同位素地层学<sup>[7]</sup>、海平面变化和全球对比问题<sup>[8]</sup>、示踪污染物来源<sup>[9]</sup>、监测营养元素消耗与损失<sup>[10-13]</sup>以及评估化学风化速率等研究领域<sup>[14]</sup>。河流作为联系陆地和海洋的重要纽带, 是陆地向海洋输送陆源物质的主要方式。河流携带风化剥蚀的大量陆源物质进入边缘海, 对边缘海沉积体系的形成、古环境演化以及全球海洋化学通量变化等均具有显著影响<sup>[15]</sup>。因此, 河流体系中锶元素及其同位素地球化学行为的研究已

成为地球化学研究领域的重要内容之一。通过对河流体系中微量元素及其同位素地球化学行为的分析, 有助于获取流域盆地化学风化特征、区域气候变化、上地壳地球化学组成特征以及陆地—河流—海洋之间元素循环等重要信息。最近几十年, 国内外众多学者对世界上的主要河流开展了大量基础研究工作, 主要集中在水质地球化学特征, 尤其是元素组成特征的分析, 以及对流域岩石地球化学组成、化学风化、人类活动影响、和河口区元素地球化学行为及流域岩石地球化学组成等方面的研究。在我国, 见诸报导的研究流域有长江<sup>[16-18]</sup>、黄河<sup>[19-21]</sup>以及喜马拉雅河流<sup>[22-26]</sup>等; 而国外的主要研究河流有亚马逊河<sup>[27-29]</sup>、密西西比河<sup>[30]</sup>、刚果河<sup>[31, 32]</sup>、奥里诺科河<sup>[33]</sup>等。此外, 对小流域及喀斯特地区水质环境的研究也有较多的报导<sup>[34-38]</sup>。近二十年的研究, 河流锶元素及其同位素地球化学特征的研究取得了很大进展, 主要取得了以下几个方面的成果:

(1) 确立了河流体系中锶同位素的地球化学组

收稿日期: 2008-11-08; 改回日期: 2009-03-15

基金项目: 中国科学院创新团队国际合作伙伴计划资助项目、国家自然科学基金资助项目(基金号: 40403010)、国家重点基础研究发展规划(973)项目(2006CB403205)

第一作者简介: 王兵(1982—), 男, 博士研究生, 研究方向为地表水环境地球化学与营养元素生物地球化学循环。E-mail: wangbing105@mails.gucas.ac.cn

\* 通讯作者: 李心清, 研究员。E-mail: xinqinglee@hotmail.com。Tel: +86-851-5891611

成可以表述成两端元的混合作用,即碳酸盐岩和硅酸盐岩的风化作用。

(2)应用河流锶同位素示踪污染物来源、评估矿物风化速率、示踪生态系统营养元素生物地球化学循环等。

(3)应用水文学、水动力学、水化学以及地球化学等研究方法,对世界上的代表性河流开展了大量的研究工作,积累了大量的数据资料。

随着现代分析测试技术的不断提高和锶元素及其同位素地球化学理论模式的不断完善,研究的深度及广度上都有了很大的提高,同时也暴露出了很多问题,其中有些问题直接影响到现有研究方法和结论的可信度。认识和解决这些问题对于今后河流锶元素及其同位素地球化学特征的研究工作起着关键性的作用。鉴于河流锶元素及其同位素地球化学研究工作对今后研究全球环境气候变化具有现实的应用意义,本文就以下几个问题进行了讨论。

## 1 河流锶同位素比值对于源岩的解释

锶属于碱土金属,与钙化学性质相似,常以类质同象的方式取代含钙矿物斜长石、磷灰石及碳酸盐岩中的钙离子。在岩浆分异结晶过程中,锶主要富集于早期形成的钙斜长石中。河流体系中的锶主要由矿物风化作用、大气输入以及人类活动的输入三部分组成,其锶同位素比值的差异受矿物的风化特征、大气输入以及人类活动输入的波动等因素所控制,而矿物中的锶同位素组成主要受年龄和  $Rb/Sr$  控制<sup>[5, 10, 39]</sup>。所以,对于河流锶同位素的研究来说,如何定义由矿物风化作用所产生的锶同位素组成是当前研究过程中所面临的一个难题<sup>[13]</sup>。在通常情况下,利用河流体系中的锶同位素比值评估风化速率及示踪其来源时,都是基于下面两个假设:(1)锶从溶解矿物中释放出来都是按化学计量数进行的;(2)不同矿物风化所释放的锶同位素比值近似等于全岩的锶同位素比值<sup>[40]</sup>。然而,全岩和土壤溶液并不能给出一个合理代表风化产物的锶同位素比值,因为在风化体系中矿物的风化速率及稳定性并不一样。因此,全岩的同位素比值用来定义风化速率是不恰当的,因为风化速率的强度取决于那些高溶解动力系数的矿物相<sup>[41]</sup>。反之,用河流体系中的锶同位素比值来反映风化速率时,也没有考虑到这一问题,而是笼统地将其定义为全岩的风化速率。

研究表明,流域内水-岩相互作用的程度,尤其

是多矿物岩石体系中各矿物相对风化速率的变化也会影响到河水中锶同位素组成,所以河水中锶同位素比值是流域内岩石和土壤中不同矿物风化所释放锶的加权平均值,并不一定等于全岩锶同位素比值,该值随岩石风化程度和时间的变化而变化。不少学者已经注意到了这一问题<sup>[42-48]</sup>,并开展了一系列的研究工作和实验室模拟实验,得出了一些有意义的结论。Brantley 等<sup>[40]</sup>通过实验研究发现,长石在溶解过程中,从矿物中释放的锶并非按化学计量比进行,且释放出的锶同位素比值不等于母质值。在岩石风化过程中,各矿物的相对风化速率是动态变化的,所释放出的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值随风化作用的进行而变化,这一点对利用锶同位素示踪化学风化及其源区特点尤为重要。

因此,虽然河水有效地综合了流域内各种可能的风化物质所释放的锶同位素特征,具有一定的代表性,但在利用河流水体中的锶同位素评估化学风化速率时,必须考虑到不同矿物在风化过程中,矿物溶解速率的变化将导致河水中的锶同位素比值发生变化,只有在对矿物溶解速率的变化规律有比较清楚的认识基础上,对河流锶同位素比值进一步加以校正,这样得出来的结果才具有可信度和说服力。而国内在这方面的研究报道相当有限,因此,下一步有望开展这方面的研究工作,以加深对河流锶元素及其同位素地球化学行为的理解和认识。

## 2 河流锶含量及其同位素全球参比值

与海水中的元素组成不同,河流体系本身是一个较为复杂的环境体系,其元素浓度受环境影响比较大,锶元素含量和同位素组成在自然界的水体中有很大的变化范围(图1),这种变率和定量的相关性有可能是沉积速率、介质环境、矿物结晶体生长机制和生物聚集或选择吸收作用的函数<sup>[49]</sup>。在河水体系中,对河水化学组分影响较大的环境因素有:(1)流域内的岩石类型;(2)河流与海洋的距离;(3)区域的干旱程度;(4)环境温度等等<sup>[50]</sup>。河水中的锶含量及其同位素比值主要受区域岩性、气候、化学风化速率、水与沉积相之间的相互作用以及人类活动等多种因素的控制。不同的地质背景及其气候条件下,河流中的锶含量及其同位素组成都可能存在很大的差异。因此,并不可能存在所谓的全球河流锶同位素参比值。大气降水降落到地表后,流经不同的岩石,其锶同位素比值并不相同。大量研究表

明<sup>[3, 14, 51, 52]</sup>, 河水体系中锶可以表述成两端元风化作用的结果, 一个端元源于碳酸盐岩的风化作用; 另一个端元源于硅酸盐岩的风化作用, 硅酸盐岩含有较高的铷, 较低的锶, 而碳酸盐岩则具有较高的锶以及较低的铷, 所以流经硅酸盐岩地层上的河水一般具有较高的锶同位素比值, 而流经碳酸盐岩地层上的河水, 其锶同位素比值相对较低。

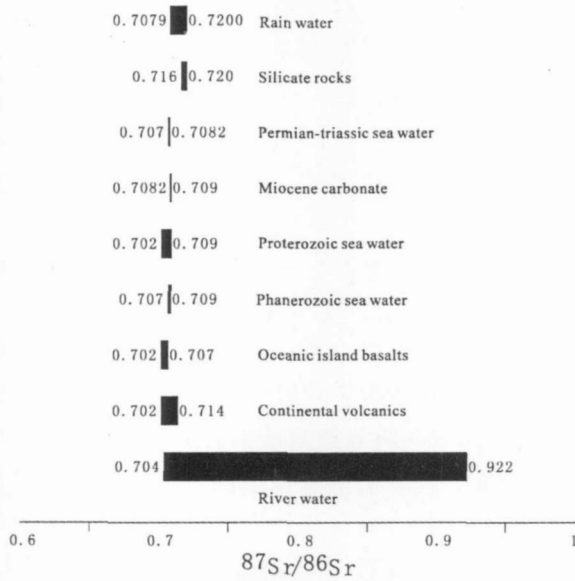


图1 不同岩石或水体中锶同位素组成范围<sup>[11, 39, 54]</sup>

Fig. 1.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios in different rocks and river waters

近几十年来, 尽管国内外很多学者对陆源输入的锶通量进行了比较深入的研究, 但是关于锶同位素比值的全球代表性问题仍存在很多不确定性。很多学者都曾对这一问题进行过研究<sup>[53]</sup>。Moire等<sup>[52]</sup>曾对加拿大主要的39条河流水体中的溶解态锶同位素进行研究, 发现其锶同位素组成加权平均值为0.7111, 与先前研究过的亚马逊河和密西西比河测试结果相近。Palmer和Edmond<sup>[54]</sup>曾对世界上大部分主要河流中的锶含量及其同位素进行了分析研究, 初步得出了全球河流体系中溶解态锶含量及其同位素组成的加权平均值分别为 $0.890\mu\text{mol}/\text{kg}$ 和0.7119(图2)。

尽管较先前的研究者有了更加准确的估算, 但是仍然存在很多问题, 如大量处于干旱地区的河流由于受建坝、大范围的灌溉以及盐化作用等诸多因素的影响, 导致河流体系中的锶含量及同位素组成很难确定。事实上, 对于全球河流锶元素通量的准确估算并不是单纯地受限于分析技术, 而是受河流自身的天然波动性所制约, 以及如何有效获取具有

代表性的长期监测数据资料。此外, 人类活动对于河流锶元素含量及其同位素组成的影响也很难定量评估, 而这些因素对于如何更好的估算全球河流的锶元素通量起着非常重要的作用。因此, 在对全球河流锶元素通量进行研究时, 如果没有充分考虑到上述因素的影响, 那么所得出的全球河流锶含量及其同位素参比值也是值得怀疑的, 而这一结果现在却被越来越多的学者引用作为全球河流锶含量及其同位素参比值加以分析讨论。目前很多文献中所报道的河流体系中锶含量的全球平均值都是按照部分主要入海河流的径流量估算出来的, 并不能作为评价全球河流体系中的锶含量及其同位素组成的参比值。

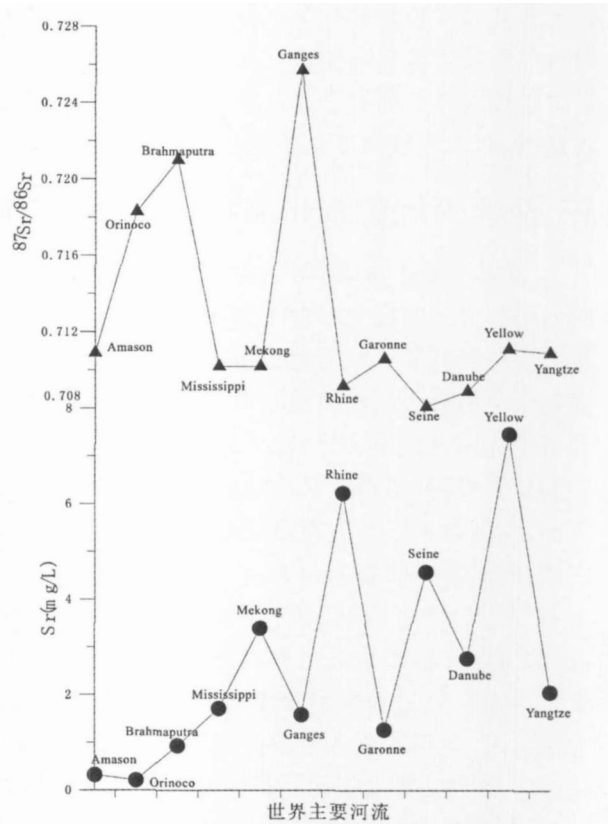


图2 世界主要河流锶含量及其同位素组成<sup>[54]</sup>

Fig. 2. The Sr contents and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios of the major rivers in the world

笔者认为, 比较合理可行的办法应该是根据流域的岩性和区域气候条件等因素来确定河流体系中的锶含量及其同位素组成的区域参比值。如我国的长江、黄河及珠江等几大流域, 在地理位置上跨越不同的气候带, 地质、地貌和环境背景差别显著, 正是研究流域元素地球化学特征及其影响因素的理想场所。因此, 可以根据不同的岩性和气候条件对位于

上述几个流域的代表性河流锶含量及其同位素组成进行研究, 从而确立锶含量及其同位素组成的区域参比值。此外, 对全球河流锶元素含量及其同位素平均组成的估计, 其准确性和可信度在很大程度上主要依赖于参加估计的河流数目及河流体系中锶的迁移量在全球总量中的比例。因此, 随着世界河流体系中锶元素及其同位素组成研究的不断深入、广泛资料的不断积累, 全球河流锶元素含量及其同位素平均组成的估计值会不断更新, 其估算的结果也会越来越可靠。

### 3 不同的端元输入对河流锶元素及其同位素的影响

由于锶同位素在物理、化学及地质过程中不会发生同位素分馏作用, 因此可以根据不同的锶同位素组成来判断其来源。人们在选用处于基本径流状态时河水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值代表风化端元时, 一般认为河水中可溶解态的锶主要来源于区域矿物岩石的风化作用、大气的干湿沉降以及人类活动的输入<sup>[16, 34, 37, 51, 55-58]</sup> (图 3)。

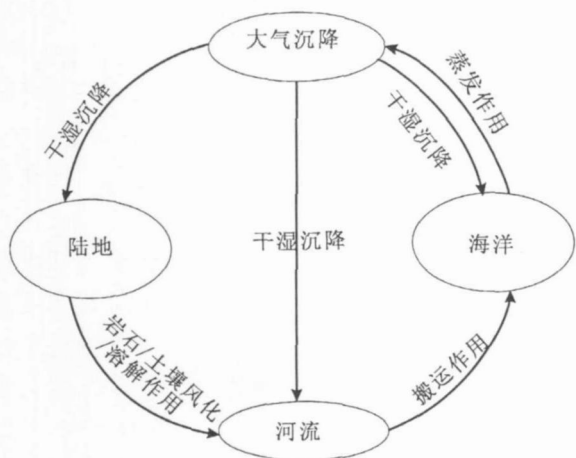


图 3 锶同位素在自然界中的迁移转换

Fig. 3. The transport and exchange of Sr isotopes

弄清不同来源的元素或者同位素组成之间的关系有助于进一步了解不同端元组分对河流体系的贡献率, 尤其是大气沉降以及人类活动输入量的修正对于理解在自然背景条件下河流体系中锶的输入量所占的比例非常重要。然而, 要想获得准确的河水中溶解态锶含量及其同位素组成, 就必须考虑扣除大气沉降及人类活动输入的影响。众所周知, 大气物质一般主要通过干沉降和湿沉降两种方式降到地表。其中, 湿沉降是大气或颗粒污染物以雨、雪、雾、露水等形式沉降到地表表面; 而干沉降受诸多因素

的影响, 其贡献判断目前还比较困难, 无统一的方法, 目前对干沉降研究大多是建立在估算的基础上。研究者通常采用降水或降水与降尘(仅为干沉降的一部分)之和来代表大气端元。研究表明<sup>[10, 12, 59]</sup>, 干沉降过程中颗粒物与障碍物(如森林)的作用(颗粒吸附、碰撞结合、扩散等)是生态系统营养组分的主要来源之一, 因此, 干沉降对于河流水体中的锶输入通量是不可忽略的。对于任一种元素 Z, 都可以根据河水中  $\text{Cl}^-$  的浓度, 降水量与径流量的比值以及流域降水中的  $Z/\text{Cl}^-$  比值去估算该元素的大气输入占河流的份额<sup>60-62</sup>。由于  $\text{Cl}^-$  在岩石矿物中的含量很低, 被很多研究者作为参照值来评估大气对河流的输入通量, 从而可以扣除大气湿沉降对河水锶含量的贡献。想要通过质量平衡方程计算矿物风化反应速率、识别天然水体中溶解质来源, 就必须确定雨水中  $\text{Cl}^-$  的浓度。据此, Ne'grel 和 Deschamps<sup>[61]</sup> 提出了一种判别的方法, 即雨水中  $\text{Cl}^-$  离子的加权平均浓度  $\times$  蒸腾作用因素 F, 这个因素  $F = \text{年平均降雨量 } P / (\text{年平均降雨量 } P - \text{年平均蒸发量 } E)$ , 如果河流体系中的  $\text{Cl}^-$  离子浓度高于该值, 则这种差异就可能来源于人类活动的输入, 人类活动的输入反过来又能影响河流化学组成特征。因此, 在利用河流体系锶同位素组成研究不同水体端元混合时, 必须考虑扣除大气干湿沉降的输入以及人类活动的输入。但是, 目前很多学者在对河流体系中锶的地球化学特征进行研究时, 即在采样分析过程中并没有对研究区大气降水的化学组成及其所占的比例以及人类活动的影响进行系统研究, 而是采用其它的方法来加以估算, 如通过河流离海洋的距离, 或者假设河流水体中的  $\text{Cl}^-$  全部来源于海盐的贡献, 通过海盐校正的方法来评估大气沉降的输入对于河流体系中元素组成的贡献率。人类活动的输入也主要是依赖于河水中的  $\text{PO}_4^{3-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  含量来间接反映。因此, 只有扣除大气输入及人类活动的输入量以后, 河流体系中的锶同位素组成才能满足质量平衡方程和风化模型的条件。

笔者认为, 比较可行的办法应当是在对河水中锶元素及其同位素进行研究时, 应对研究区的雨水化学组成进行系统研究, 从而才能更好地扣除大气降水对于河流水体的贡献值; 而人类活动的输入可以借助于硼、硫和氯等同位素来对污染源进行示踪, 这样才能更好地区分人类活动、工业污染及农业施肥作用等因素对于河水中锶元素及其同位素组成的影响。

## 4 不同制约因素及研究方法对河流锶元素及其同位素的影响

通常对河流体系中的锶含量及其同位素进行研究时,考虑其影响因素主要是气候因素(温度、降雨量、径流量、蒸发量等)和地质因素(地形、地貌、岩性、海拔高度等)<sup>[14, 63]</sup>。而很少考虑到河流本身作为一个复杂的体系,不同的时间、空间尺度都会对河流体系中锶元素含量及其同位素组成产生影响<sup>[30, 64]</sup>。很多学者<sup>[27, 31, 32]</sup>在利用锶元素及其同位素组成评估世界上主要流域风化作用过程时发现了很多困难,除了缺乏季节变化和年季变化的数据外,河流水体中的锶还有可能被颗粒物所吸附或者被碳酸盐、硫酸盐及氧化物所捕获,这一系列的不确定因素进一步增加了河流锶元素及其同位素组成地球化学特征的分析难度<sup>[3]</sup>。河流体系中的锶元素及其同位素组成地球化学特征与不同的气候和地质因素之间存在耦合而又矛盾的关系,不同的地质地理及气候背景条件下,这些因子的相对贡献大小并不相同,因此把河流水体中的锶元素及其同位素组成主要控制作用归因于某一单一因素的解释是不全面的,没有一种简单的模式能够解释所有观察到的地球化学变化,因此不同的时间尺度、多指标的分析相结合是非常必要的<sup>[65]</sup>。

近年来,随着研究的不断深入,很多学者已经从宏观的角度转移到微观的角度对河流体系中的锶元素及其同位素组成地球化学特征变化进行分析研究。大量研究表明<sup>[2, 3, 66]</sup>水体与沉积物之间的相互物质交换可以改变 SPM 粒度和成分,从而影响到溶解态物质的组成,进一步影响水体中的锶含量及其同位素比值。而目前很多学者在进行河流锶元素及其同位素地球化学组成研究时仅仅考虑了溶解态的锶,往往忽略了悬浮颗粒物中的锶以及不同的粒径对于河流锶同位素的影响。

针对上述问题,笔者认为,在研究方法上,除了对河水体系中的锶元素含量及其同位素组成进行分析以外,还应该对区域内降雨、岩石、土壤、沉积物以及地下水中的锶元素及其同位素地球化学特征进行系统分析,这样才能更好地从不同角度、不同的研究对象上对锶元素及其同位素组成的地球化学特征作出客观而准确的评价。此外,也可以结合其它的同位素,如 Nd、S、Pb、B、Cl 等同位素进行综合分析,以加深对河流锶元素及其同位素组成地球化学行为的了解。

## 5 结论

(1)锶元素在矿物溶解释放的过程中具有一定的选择性。化学风化过程 Rb 和 Sr 往往发生分异,而这种分异必然导致锶同位素的变化,因此弄清矿物岩石在风化过程中锶元素的释放特征及其同位素的演化规律是十分必要的,而这方面的研究目前相关报道较少。

(2)虽然我国在沉积地球化学和水文地球化学研究方面开展了一定的工作,但是关于河流锶同位素地球化学示踪的研究工作目前开展较少。特别是在研究区域上,很多研究还集中在小流域范围内。目前需要开展主要流域的系统研究,尤其是不同的构造、地质以及气候背景下不同流域间的对比研究,这样才能深入探讨流域碳酸盐岩和硅酸盐岩的化学风化作用对全球气候变化的影响。

(3)要想对河流体系中锶的地球化学特征进行系统而深入的研究,应该结合水文学、地质学以及水化学等多学科交叉的方法,选择有代表性的研究区域,从河流体系中锶元素的形态、水动力学、水化学以及同位素地球化学方面进行系统分析研究,不断积累大量的监测数据资料及水文地质资料,这样得出来的数据和结论才更有价值,更有说服力。

## 参 考 文 献

- [1] Villiers S. The correct use of Sr isotopes in river-groundwater mixing models: A Breede River case study [J]. Water SA, 2005, 31(3): 397-398.
- [2] Douglas G B, Gray C M, Hart B T. A strontium isotopic investigation of the origin of suspended particulate matter (SPM) in the Murray-Darling River system, Australia [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(18): 3799-3815.
- [3] Semhi K, Clauer N, Probst J L. Strontium isotope compositions of river waters as records of lithology-dependent mass transfers: the Garonne river and its tributaries (SW France) [J]. Chemical Geology, 2000, 168: 173-193.
- [4] Stewart B W, Capo R C, Chadwick O A. Quantitative strontium isotope models for weathering, pedogenesis and biogeo-

- chemical cycling[J]. *Geoderma*, 1998, 82: 173–195.
- [5] Chu H Y, You C F. Dissolved constituents and Sr isotopes in river waters from a mountainous island-The Danshuei drainage system in northern Taiwan[J]. *Applied Geochemistry*, 2007, 22(8): 1701–1714.
- [6] 黄思静. 上扬子地台区晚古生代海相碳酸盐岩的碳、锶同位素研究[J]. *地质学报*, 1997, 71(1): 45–53.
- [7] 黄思静, 石和, 刘洁, 等. 锶同位素地层学研究进展[J]. *地球科学进展*, 2001, 16(2): 194–200.
- [8] 李荣西, 魏家庸, 杨卫东, 等. 用 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 研究海平面变化与全球对比问题[J]. *地球科学进展*, 2000, 15(6): 729–733.
- [9] Takahiro H, Takanori N, Akitake I, *et al.* Impact of fertilizer on a small watershed of Lake Biwa: Use of sulfur and strontium isotopes in environmental diagnosis[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 384: 342–354.
- [10] James R G, Douglas G B, Douglas I M. Using Strontium Isotope Ratios to Estimate Inputs to Ecosystems[J]. *BioScience*, 1983, 33(1): 23–30.
- [11] Rosemary C C, Brian W S, Oliver A C. Strontium isotopes as tracers of ecosystem processes: theory and methods[J]. *Geoderma*, 1998, 82: 197–225.
- [12] 马英军, 刘丛强. 生态系统营养离子循环及水化学演化的锶同位素示踪[J]. *地球科学进展*, 1999, 14(4): 377–383.
- [13] Drouet T, Herbauts J, Gruber W, *et al.* Strontium isotope composition as a tracer of calcium sources in two forest ecosystems in Belgium[J]. *Geoderma*, 2005, 126: 203–223.
- [14] Palmer M R, Edmond J M. Controls over the strontium isotope composition of river water[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56: 2099–2111.
- [15] 杨守业. 亚洲主要河流的沉积地球化学示踪研究进展[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(6): 648–655.
- [16] Wang Z L, Zhang J, Liu C Q. Strontium isotopic compositions of dissolved and suspended loads from the main channel of the Yangtze River[J]. *Chemosphere*, 2007, 69: 1081–1088.
- [17] 陈静生, 王飞越, 夏星辉. 长江水质地球化学[J]. *地学前缘*, 2006, 13(1): 74–85.
- [18] Zhang J, Huang W W, Liu M G, *et al.* Drainage basin weathering and major element transport of two large Chinese rivers (Huanghe and Changjiang) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95(C8): 13277–13288.
- [19] 陈静生, 王飞越, 何大伟. 黄河水质地球化学[J]. *地学前缘*, 2006, 13(1): 58–73.
- [20] Wu L L, Youngsook H, Qin J H, *et al.* Chemical weathering in the Upper Huang He (Yellow River) draining the eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(22): 5279–5294.
- [21] Zhang J, Huang W W, Létoille R, *et al.* Major element chemistry of the Huanghe (Yellow River), China-weathering processes and chemical fluxes[J]. *Journal of Hydrology* 1995, 168(1–4): 173–203.
- [22] 秦建华, 冉敬, 沈致富, 等. 喜马拉雅河流 Sr 同位素异常源岩研究现状及研究进展[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(3): 262–268.
- [23] Sunil K S, Anil K, Christian F L. Sr and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  in waters and sediments of the Brahmaputra river system: Silicate weathering,  $\text{CO}_2$  consumption and Sr flux[J]. *Chemical Geology*, 2006, 234: 308–320.
- [24] Albert G, Christian F L, Louis A D. The strontium isotopic budget of Himalayan rivers in Nepal and Bangladesh[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 63(13–14): 1905–1925.
- [25] Sunil K S, Trivedi J R, Pande K. Chemical and strontium, oxygen, and carbon isotopic compositions of carbonates from the 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(5): 743–755.
- [26] Tarun K D, Krishnaswami S, Anil K. Sr and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  in the Yamuna River System in the Himalaya: Sources, fluxes, and control on Sr isotopes composition[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(16): 2931–2948.
- [27] Gaillardet J, Dupre B, Allegre C J, *et al.* Chemical and physical denudation in the Amazon River Basin[J]. *Chemical Geology*, 1997, 142(3–4): 141–173.
- [28] Gibbs R J. Water chemistry of the Amazon River. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1972, 36(9): 1061–1066.
- [29] Jefferson M, Probst J L. Silicate rock weathering and atmospheric/soil  $\text{CO}_2$  uptake in the Amazon basin estimated from river water geochemistry: seasonal and spatial variations[J]. *Chemical Geology*, 2003, 197: 177–196.
- [30] Xu Y F, Franco M. Strontium isotope variations in the lower Mississippi river and its estuarine mixing zone[J]. *Marine Chemistry*, 2007, 105(1–2): 118–128.
- [31] Gaillardet J, Dupré B, Allegre C J. A global geochemical mass budget applied to the Congo basin rivers: Erosion rates

and continental crust composition[ J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(17): 3469—3485.

- [ 32] Dupré B, Gaillardet J, Rousseau D, *et al.* Major and trace elements of river-borne material: The Congo Basin[ J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(8): 1301—1321.
- [ 33] Lewis W M, Saunders J F. Concentration and transport of dissolved and suspended substances in the Orinoco River[ J]. *Biodegradation*, 1989, 7(3): 203—240.
- [ 34] Wang Y X, Guo Q H, Su C L. Strontium isotope characterization and major ion geochemistry of karst water flow, Shentou, northern China[ J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 328: 592—603.
- [ 35] Han G L, Liu C Q. Hydrogeochemistry of Wujiang River Water in Guizhou Province, China[ J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2001, 20(3): 240—247.
- [ 36] Seulgi M, Youngsook H, Qin J H, *et al.* Chemical weathering in the Hong (Red) River basin: Rates of silicate weathering and their controlling factors[ J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 71(6): 1411—1430.
- [ 37] Xu Z F, Liu C Q. Chemical weathering in the upper reaches of Xijiang River draining the Yunnan-Guizhou Plateau, Southwest China[ J]. *Chemical Geology*, 2007, 239: 83—95.
- [ 38] Qin J H, Youngsook H, Edmond J M. Chemical and physical weathering in the Min Jiang, a headwater tributary of the Yangtze River[ J]. *Chemical Geology*, 2006, 227: 53—69.
- [ 39] 马英军, 刘丛强. 地壳风化系统中的 Sr 同位素地球化学[ J]. *矿物学报*, 1998, 18(3): 350—358.
- [ 40] Brantley S L, Chesley J T, Stillings L L. Isotopic ratios and release rates of strontium measured from weathering feldspars[ J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62(9): 1493—1500.
- [ 41] Paul S, Fiona D P, Daren G, *et al.*  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  as an indicator of flowpaths and weathering rates in the Plynlimon experimental catchments, Wales, U. K[ J]. *Chemical Geology*, 2007, 236(3—4): 247—265.
- [ 42] Edmond J M. Himalayan Tectonics, Weathering Processes, and the Strontium Isotope Record in Marine Limestones [ J]. *Science*, 1992, 258: 1594—1597.
- [ 43] Clow D W, Mast M A, Bullen T D, *et al.* Strontium  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  as a tracer of mineral weathering reactions and calcium sources in an alpine/subalpine watershed, Loch Vale, Colorado[ J]. *Water Resources Research*, 1997, 33(6): 1335—1352.
- [ 44] Schnoor J L. Kinetics of Chemical Weathering: A Comparison of Laboratory and Field Weathering Rates[ A]. IN: *Aquatic Chemical Kinetics: Reaction Rates of Processes in Natural Waters*[ C]. Environmental Science and Technology Series. John Wiley & Sons, New York, 1990. 475—504, 18 fig, 3 tab, 36 ref., 1990.
- [ 45] Sverdrup H, Warfvinge P. Estimating field weathering rates using laboratory kinetics[ J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1995, 31(1): 485—541.
- [ 46] White A F, Brantley S L. The effect of time on the weathering of silicate minerals: why do weathering rates differ in the laboratory and field? [ J]. *Chemical Geology*, 2003, 202(3—4): 479—506.
- [ 47] Aberg G, Jacks G, Hamilton P J. Weathering Rates and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  Ratios: An Isotopic Approach[ J]. *Journal of Hydrology*, 1989, 109(1—2): 65—78.
- [ 48] 马英军, 刘丛强. 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[ J]. *中国科学(D 辑)*, 2001, 31(8): 634—640.
- [ 49] 贺秀斌. 微量元素锶及其同位素的地球化学研究与应用前景[ J]. *地球科学进展*, 1997, 12(1): 15—19.
- [ 50] 陈静生. 河流水质全球变化研究若干问题[ J]. *环境化学*, 1992, 11(2): 43—51.
- [ 51] Han G L, Liu C Q. Water geochemistry controlled by carbonate dissolution: a study of the river waters draining karst dominated terrain, Guizhou Province, China[ J]. *Chemical Geology*, 2004, 204: 1—21.
- [ 52] Moire A W, Jan V, Christopher B. Strontium and its isotopes in Canadian rivers: Fluxes and global implications[ J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1985, 49: 1717—1736.
- [ 53] Meybeck M, Helmer R. The quality of rivers: from pristine stage to global pollution[ J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Paleocology*, 1989, 1(4): 283—309.
- [ 54] Palmer M R, Edmond J M. The strontium isotope budget of the modern ocean[ J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1989, 92(1): 11—26.
- [ 55] Négrel P. Water-granite interaction: Clues from strontium, neodymium and rare earth elements in soil and waters[ J]. *Applied Geochemistry*, 2006, 21: 1432—1454.

- [ 56] Galy A, France L C. Weathering processes in the Ganges – Brahmaputra basin and the riverine alkalinity budget[ J] . Chemical Geology, 1999, 159(1–4): 31–60.
- [ 57] Takanori N, Ichiro T, Eitaro W. Sulfur and strontium isotope geochemistry of tributary rivers of Lake Biwa; implications for human impact on the decadal change of lake water quality[ J] . Science of the Total Environment, 2005, 345: 1–12.
- [ 58] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry[ J] . science, 1970, 170(3962): 1088–1090.
- [ 59] White A F, Blum A E, Bullen T D, *et al.* The effect of temperature on experimental and natural chemical weathering rates of granitoid rocks[ J] . Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(19/20): 3277–3291.
- [ 60] 李晶莹, 张经. 流域盆地的风化作用与全球气候变化[ J] . 地球科学进展, 2002, 17(3): 411–419.
- [ 61] Négrel P, Deschamps P. Natural and anthropogenic budgets of a small watershed in the massif central (France); Chemical and strontium isotopic characterization of water and sediments[ J] . Aquatic Geochemistry, 1996, 2(1): 1–27.
- [ 62] Petelet G E, Negrel P, Casanova J. Variability of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  in water draining granite revealed after a double correction for atmospheric and anthropogenic inputs[ J] . Hydrological Sciences Journal, 2003, 48(5): 729–742.
- [ 63] Anderson S P, Blum A E. Controls on chemical weathering: small- and large-scale perspectives[ J] . Chemical Geology, 2003, 202(3–4): 191–193.
- [ 64] Chen J S, Wang F Y, Meybeck M, *et al.* Spatial and temporal analysis of water chemistry records (1958–2000) in the Huanghe (Yellow River) basin[ J] . Global Biogeochemical Cycles, 2005, 19(3).
- [ 65] 金章东, 李英, 王苏民. 不同构造带硅酸盐化学风化率的制约: 气候还是构造?[ J] . 地质论评, 2005, 51(6): 672–680.
- [ 66] 王中良, 刘丛强. 长江河口区水体的锶同位素地球化学——对水与沉积物相互作用过程的反映[ J] . 地球与环境, 2004, 32(2): 26–30.

## Research on Sr Isotope Geochemistry of Rivers——Status and Problems

WANG Bing<sup>1,2</sup>, LEE Xin-qing<sup>1</sup>, ZHOU Hui<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang 550002, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** This paper deals with the advancements and problems involved in the study of strontium isotope geochemistry of surface waters in recent 30 years. The problems include how to use the isotopic compositions to explain the source of rocks, the global average level of Sr concentration and its isotopic composition in river water, and how to evaluate different sources of Sr in river water and different controlling factors affecting the Sr concentration and its isotopic composition in river water. In view of these problems which play an important role in the study of Sr in the future, the paper gave some suggestions to solve these problems: (1) the characteristics of Sr release and evolution regulation should be taken into consideration; (2) to combine isotope geochemistry method and rain water chemistry to emend the contribution of Sr from atmosphere input and anthropogenic activities input; (3) to carry out research on the main drainage area, especially compared research on different geological and climatic background areas; (4) the research objects should include rain water, rock, soil, sediment and ground water, as well as different forms of Sr in river water.

**Key words:** river; Sr; chemical weathering; climate change; geochemistry; water chemistry