

锶元素地球化学在水文地质研究中的应用进展

王增银, 刘娟, 王涛, 汪玉松, 胡进武

(中国地质大学环境学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 国外学者已广泛应用 Sr^{2+} , $c(\text{Sr})/c(\text{Ca})$ 或 $c(\text{Ca})/c(\text{Sr})$, $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 作为示踪元素研究地表河水的来源组成、监测地下水的污染程度、确定含水层的越流补给量和恢复洞穴沉积环境等。国内 90 年代以后开始应用锶和锶同位素研究河流的补给来源, 探讨泉群流动系统, 并取得了较好的效果; 介绍了目前正在开展的应用 $c(\text{Sr})/c(\text{Ca})$, $c(\text{Sr})/c(\text{Mg})$, $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 研究西南岩溶山区地下水组成的思路和方法。展望了锶元素地球化学在水文地质调查和地下水资源评价中的应用前景。

关键词: 锶; $c(\text{Sr})/c(\text{Ca})$; $c(\text{Sr})/c(\text{Mg})$; 岩溶水系统; 地下河

中图分类号: P641.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-7849(2003)04-0091-05

赋存于岩石圈中的地下水在运移过程中不断与围岩发生各种化学反应, 从而导致化学元素的迁移、聚集和分散^[1]。形成于不同条件(温度、压力)下的岩石其元素含量不同, 当地下水流经不同岩层时, 其水化学组分也有差异。水文地质研究中常用这种差异来表征不同的地下水形成环境。如据 $c(\text{Ca})/c(\text{Mg})$ 值可以区分岩溶水形成的岩石类型和径流条件^[2,3]。 $c(\text{Cl})/c(\text{Br})$ 值可用于判断深层水(卤水、盐水)的成因及海水入侵淡水含水层的范围和程度^[4]。

由于锶特殊的地球化学性质, 近年来锶元素作为示踪元素在水文地质研究中得到了一定的应用。其实锶是地球化学研究中应用较早的元素之一。O-dum^[5]发现流经不同地区的水体中 $c(\text{Sr})/c(\text{Ca})$ 值不同, 流经灰岩地区的河水中的 $c(\text{Sr})/c(\text{Ca})$ 值低, 而 Sr 、 Ca 浓度高; 流经潮湿地区的河水中的 $c(\text{Sr})/c(\text{Ca})$ 值低; 流经干旱地区的河水中的 $c(\text{Sr})/c(\text{Ca})$ 值高; 由于 CaCO_3 的沉淀, 封闭盆地的 $c(\text{Sr})/c(\text{Ca})$ 值比其补给河流河水中的 $c(\text{Sr})/c(\text{Ca})$ 值高; $c(\text{Sr})/c(\text{Ca})$ 值的大小是由显生宙灰岩的全等风化决定的。这为 $c(\text{Sr})/c(\text{Ca})$ 值在水文地质研究中的应用奠定了理论基础。60~70 年代, 国外学者对锶研究较多的有两个方面: 海水和文石中 Sr^{2+} 浓度和 $c(\text{Sr})/c(\text{Ca})$ 值的变化及其在碳酸盐岩成岩作用中的应用^[6~10]; 锶的分配系数及其影响因素^[11~13]。近 20 年来, 随着测试技术的提高和锶元素地球化学模式的完善, 锶元素作为示踪元素在地球化学研究中得

到了进一步的广泛应用。de Paolo 等^[14]和 Hess 等^[15]将锶同位素作为地层划分的依据。由于锶和钙具有相似的地球化学性质, 因此锶常用于确定含钙矿物的风化速率及示踪地下水中钙的来源^[16~20]。90 年代以来, 锶元素被广泛应用于古环境研究中, 用珊瑚中的 Sr 、 $c(\text{Sr})/c(\text{Ca})$ 值确定海洋的表面温度^[21~29]; 根据保存完好的碳酸盐岩化石贝壳中的 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 、 $c(\text{Sr})/c(\text{Ca})$ 确定河口三角洲地带古地下水的盐度^[30~33]; 成岩沉积物中的 $c(\text{Sr})/c(\text{Mg})$ 值可示踪古海水的元素组成及化学性质^[34~36]; 黄土中碳酸盐的锶元素组成变化可指示其风化程度和古气候的变化^[37]。

1 国外锶元素地球化学在水文地质研究中的应用

锶的基本地球化学性质决定了锶元素作为示踪元素的 2 个优点: 不同岩石中锶含量有明显差异, 因此地下水中锶浓度的变化可以反映不同的环境特征; 锶元素化学性质稳定, 锶同位素不受质量分馏的影响。因此水中的 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 特征能反映地下水流经的土壤和不同含水层的 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 特征。在水文地质研究中常用 $c(\text{Sr})/c(\text{Ca})$ 、 $c(\text{Ca})/c(\text{Sr})$ 、 $c(\text{Sr})/c(\text{Ba})$ 、 $c(\text{Ba})/c(\text{Sr})$ 和同位素的比值 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 作为研究指标。

国外关于锶元素地球化学在水文地质研究中的

应用主要有以下几个方面: 河水来源; 现代环境监测; 地下水水化学组分的控制因素及含水层之间的越流补给量的确定; 古沉积环境。

1.1 河水来源

河水通常接受不同类型的地下水和降水的补给, 不同补给源的贡献大小可以确定河水的水化学组分。根据质量守恒定律, 河水中某一化学组分 a 浓度可用如下方程表示:

$$c_m = c_i \frac{V_i}{V_m} + c_j \frac{V_j}{V_m} + \dots + c_n \frac{V_n}{V_m} \quad (1)$$

式中: c_m 为混合溶液中 a 组分浓度 (mol/L); c_i 为 i 补给来源中 a 组分浓度 (mol/L); c_j 为 j 补给来源中 a 组分浓度 (mol/L); c_n 为 n 补给来源中 a 组分浓度 (mol/L); V_m 为混合溶液的总容积; V_i 为 i 补给来源水的体积; V_j 为 j 补给来源水的体积; V_n 为 n 补给来源水的体积。

若已知河水及各补给源中某几种组分的浓度, 则可根据公式 (1) 反求河水中不同补给源的贡献比例。

Land 等^[38]用 $c(\text{Ca})/c(\text{Sr})$ 、 $c(\text{Ba})/c(\text{Sr})$ 值研究了瑞典北部 Kalix 河流的河水来源。Land 等认为 Kalix 河流的河水主要有三种来源: 土壤水、浅层地下水和深层地下水。由于 Ca 、 Sr 、 Ba 含量不同的矿物的抗风化能力不同, 使进入地下水中 Ca 、 Sr 、 Ba 浓度也不同。因此用 $c(\text{Ca})/c(\text{Sr})$ 、 $c(\text{Ba})/c(\text{Sr})$ 值可计算来自不同类型的水所占比例, 并用 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 验证了该模型的合理性。

1.2 现代环境监测

垃圾填埋是处理城市垃圾最常用的方法, 但也会带来一些环境问题, 常见的就是垃圾渗滤液污染地下水的问题。如何快速而准确地确定地下水是否受污染及其受污染的程度是环境监测中一个很重要的问题。根据锶同位素的地球化学特性, Siegel 等^[39]用 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 值和铅同位素比值作为环境监测的示踪剂, 确定垃圾填埋场附近地下水各来源 (未受污染的地下水、海水和垃圾填埋场渗滤液) 所占的比例。其基本原理与确定河水来源的类似, 也是通过质量守恒方程反求各来源所占的比例, 从而确定该地区地下水的污染程度。

1.3 地下水水化学组分的控制因素及含水层之间的越流补给量的确定

水—岩作用是一个复杂的过程, 不仅有岩石组分的溶解, 而且也有某些组分从水中的析出。地下水化学组分及其浓度的变化可以反映哪种作用在起主导作用。Shaw an 等^[40]研究了澳大利亚东南部半干旱灰岩地区地下水组分的演化, 发现盆地边缘地带

的 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 值为 0.7097, 距离盆地边缘 250 km 的 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 值与碳酸盐岩含水层中的 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 值相近, 为 0.7084。同时, 地下水中的 $c(\text{Sr})/c(\text{Ca})$ 、 $c(\text{Mg})/c(\text{Ca})$ 值也增加。这说明此含水层中的水—岩作用以高镁方解石的非全等溶解为主。由于不同含水层在岩性、径流条件等方面的差异, 不同含水层中的 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 值也不同。Shaw an 等^[40]用 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 值估算得到下伏含水层对上部含水层的越流补给量约占上部含水层水量的 15% ~ 85%。

1.4 古沉积环境

由洞穴沉积物中的元素含量可以推知沉积时的气候条件。Fairchild 等^[41]研究了法国南部的 Clamouse 岩溶洞穴和意大利东北部的 Ernesto 岩溶洞穴的沉积物中 $c(\text{Mg})/c(\text{Ca})$ 和 $c(\text{Sr})/c(\text{Ca})$ 值。他们认为洞穴沉积物中 $c(\text{Mg})/c(\text{Ca})$ 和 $c(\text{Sr})/c(\text{Ca})$ 值的增加反映了较干旱的气候条件。因为干旱的气候不仅延长了平均滞留时间, 促使白云石的溶解, 增大了 $c(\text{Mg})/c(\text{Ca})$ 值, 而且有利于脱气作用和方解石的沉淀, 从而导致 $c(\text{Mg})/c(\text{Ca})$ 和 $c(\text{Sr})/c(\text{Ca})$ 值的增加。

2 国内锶元素地球化学在水文地质研究中的应用

国内锶元素的应用兴起于 90 年代, 其中大多是用锶解决古环境问题^[42~45], 而在水文地质研究中的应用则不多。王焰新等^[46]用娘子关泉域锶浓度的变化推断该地区的水动力环境。他们认为岩溶水的径流时间和径流途径长, 与围岩充分接触, 有利于锶的富集。由此根据泉水中 Sr^{2+} 浓度的不同, 划分了泉群的不同流动系统。周练等^[47]以冀中拗陷的地下水为例研究了锶同位素在水文地质学中的示踪意义。韩贵琳等^[48]研究了贵州喀斯特地区两条主要水系 (乌江水系和沅江水系) Sr^{2+} 浓度及 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 的变化, 发现流经碳酸盐岩地层的乌江水系的 Sr^{2+} 浓度高而 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 值低, 流经碎屑岩地区的沅江水系的 Sr^{2+} 浓度低而 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 值高。结合 $c(\text{Na})/c(\text{Ca})$ 、 $c(\text{Mg})/c(\text{Ca})$ 值确定河水溶质来源于三个端元物质的风化 (石灰岩、白云岩和硅酸盐岩), 且主要受灰岩风化作用的控制。赵继昌等^[49]研究了长江源区河水中的锶同位素比值及主要离子浓度, 并根据物质运移均衡方程计算了河水中各类主要元素及锶所占的比例, 分析了长江源区主要河流的补给来源。

王增银等^[50]根据对延河泉岩溶水系统 $c(\text{Sr})/$

$c(\text{Mg})$ 、 $c(\text{Sr})/c(\text{Ca})$ 值分布和形成条件的研究得出, 随着地下水径流途径的增长, 水—岩相互作用时间的增加, Sr^{2+} 浓度逐渐增高。从补给区到径流区、排泄区, $c(\text{Sr})/c(\text{Mg})$ 、 $c(\text{Sr})/c(\text{Ca})$ 值总体上是增加的。地下水滞缓区的水—岩作用时间最长, 故 $c(\text{Sr})/c(\text{Mg})$ 、 $c(\text{Sr})/c(\text{Ca})$ 值最高。在同一流动系统中, $c(\text{Sr})/c(\text{Mg})$ 、 $c(\text{Sr})/c(\text{Ca})$ 值因地下水径流强弱而不同。水—岩接触时间不同, $c(\text{Sr})/c(\text{Mg})$ 、 $c(\text{Sr})/c(\text{Ca})$ 值也不同, 且 $c(\text{Sr})/c(\text{Mg})$ 、 $c(\text{Sr})/c(\text{Ca})$ 值受人为活动的影响较小。因此, 它们能较好地反映岩溶水的天然径流条件, 可作为岩溶水系统研究的天然示踪剂。据此划分了延河泉岩溶水子系统, 取得了较理想的效果。

3 西南岩溶山区地下河水组成的变化及植被效应

我国西南岩溶山区广泛分布着古生界和中生界厚层灰岩, 构成特殊的含水层结构。地下水主要赋存于深部地下河中, 造成地表水(河流)极不发育, 地表严重干旱缺水, 人们生活相当贫困。最新统计资料显示, 该地区还有 2 000 多万人连生活用水都很困难。

已有的研究资料表明^[51], 我国西南岩溶山区的表层岩溶带发育。大气降水首先补给表层岩溶带, 其中一部分通过裂隙渗流补给深部饱水层, 然后再渗流补给地下河系统; 另一部分在适当位置溢出流入落水洞, 补给地下河。只有降水超过表层岩溶带的调蓄能力时, 才形成地表坡流汇入落水洞补给地下河。因此, 地下河水主要由地表坡流水、表层岩溶带水和饱水层裂隙水三部分组成。岩溶水中普遍含有 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Sr^{2+} , 根据我们在延河泉岩溶水系统的研究经验, 选择 $c(\text{Sr})/c(\text{Ca})$ 、 $c(\text{Sr})/c(\text{Mg})$ 作为示踪剂可以求得地表坡流水、表层岩溶带水和饱水层裂隙水在地下河水中所占的比例, 评价表层岩溶带的富水程度。据此可以定量研究岩溶水的变化规律, 评价表层岩溶带的富水程度及开发利用价值。该研究主要探讨不同植被条件下地下河水的组成及变化规律, 为岩溶山区植被恢复及重建提供理论支撑。因此拟在广西桂林地区选择三个植被条件不同的地下河作为研究对象, 分别采集大气降水(代表地表坡流水)、表层岩溶带水、饱水带裂隙水和地下河水水样, 在离子色谱仪(DX-120)、等离子体质谱仪(ICP-MS)和同位素质谱仪(MAT-261)上分别测定水中的常量组分、微量组分和 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 值; 然后代入按照质量守恒定律建立的三个端元水化学混合数学模型(2)、(3)、(4)式中, 计算出各类型水在地下河

水中所占的比例; 最后用 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 作为计算合理性检验的指标。据此定量研究不同植被条件下岩溶水的转化过程, 评价不同植被条件下表层岩溶带的富水程度, 为岩溶水资源评价和合理开发利用, 特别是为解决该区人畜饮水困难提供科学依据。

$$x_i = \frac{1}{1 - \frac{(C_a/C_b)_m C_{ib} - C_{ia}}{(C_a/C_b)_m C_{jb} - C_{ja}}} \quad (2)$$

$$\frac{x_i}{x_k} = \frac{(C_a/C_b)_m \left[C_{jb} \left(1 - \frac{1}{x_k} \right) - C_{kb} \right] + C_{ja} \left(\frac{1}{x_k} - 1 \right) + C_{ka}}{(C_a/C_b)_m (C_{ib} - C_{jb}) + C_{ja} - C_{ia}} \quad (3)$$

$$x_j = 1 - x_i - x_k \quad (4)$$

式中: x_i 、 x_j 、 x_k 分别为 i 、 j 、 k 端元水在地下河水中所占的比例; C_a 、 C_b 分别为水中 a 、 b 组分的浓度(mol/L); C_{ia} 、 C_{ja} 、 C_{ka} 分别为 a 组分 i 、 j 、 k 端元水的浓度(mol/L); C_{ib} 、 C_{jb} 、 C_{kb} 分别为 b 组分 i 、 j 、 k 端元水的浓度(mol/L); $(C_a/C_b)_m$ 为混合水中 a 、 b 组分的比值; a 为 Sr , b 为 Ca 和 Mg 。

4 展 望

不同岩石所含锶元素含量不同, 大气降水降落在地面后流经不同岩石, 致使地表水体中锶元素浓度和同位素比值不同。由于锶同位素不受质量分馏的影响, 因此目前广泛利用锶同位素来研究地表水组成的来源和流域的侵蚀速率。实际上, 地下水在与围岩接触的过程中, 岩石中的锶元素以 Sr^{2+} 形式进入地下水, 成为地下水的组分之一。由于径流条件不同, 水—岩接触时间不同, 使得地下水中的 Sr^{2+} 浓度和 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 值也不同, 而且地下水中普遍含有 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} , 因此用 $c(\text{Sr})/c(\text{Ca})$ 、 $c(\text{Sr})/c(\text{Mg})$ 可以反映地下水的形成和径流条件。同时, 锶是稳定元素, 地下水中 Sr^{2+} 浓度一般不受人为作用的影响, $c(\text{Sr})/c(\text{Ca})$ 、 $c(\text{Sr})/c(\text{Mg})$ 能较好地反映天然形成条件, 所以 $c(\text{Sr})/c(\text{Ca})$ 、 $c(\text{Sr})/c(\text{Mg})$ 是较理想的天然示踪剂, 在水文地质勘察和地下水资源评价中将有广泛的应用前景。同时, 现代医学研究表明, 锶与人体健康有密切的关系, 是人体生理功能所必需的微量元素, 能起到加强骨骼和牙齿强度的作用, 并有利于维持正常的心血管功能以及神经和肌肉的兴奋性, 降低心血管病的死亡率。但是, 若水中锶浓度过高, 长期饮用会在体内产生锶积聚, 也会引起某些病理变化, 对人体健康不利^[52]。饮用水中含有适量锶对人体健康是有益的。因此锶矿泉水是

目前市场销量较好的饮用天然矿泉水之一。加强地下水中锶富集规律的研究对寻找锶矿泉水也具有重要指导作用。通过水文地质界同行的共同努力和不断探索,必将会使锶元素地球化学在水文地质研究应用中取得更多的研究成果和经济效益。

参考文献:

- [1] 王大纯, 张人权, 史毅虹, 等. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1995
- [2] 宋林华, 房金福. 黔北高原喀斯特水的硬度特征[J]. 中国岩溶, 1985, 4(2): 75- 83
- [3] 俞锦标, 杨立铮, 张海生, 等. 中国喀斯特发育规律典型研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990
- [4] 沈照理, 朱宛华, 钟佐梁, 等. 水文地球化学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1993
- [5] Odum H T. Strontium in natural waters[J]. *Inst Mar Sci*, 1957, 4: 22- 37.
- [6] Harris W H, Matthews R K. Subaerial diagenesis of carbonate sediments: Efficiency of the solution-precipitation process[J]. *Science*, 1968, 160: 77- 79.
- [7] Kinsman D J J. Interpretation of Sr^{2+} concentrations in carbonate minerals and rocks[J]. *J. Sediment Petrol*, 1969, 39: 486- 508
- [8] Kinsman D J J, Holland H D. The coprecipitation of cation with $CaCO_3$ —IV. The coprecipitation of Sr^{2+} with aragonite between 16° and 96° [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1969, 33: 1- 17.
- [9] Sheaman D J, Shimohammadi N H. Distribution of strontium in dedolomites from the French Jura[J]. *Nature*, 1969, 223: 606- 608
- [10] Winland H D. Stability of calcium carbonate polymorphs in warm, shallow seawater[J]. *J. Sediment Petrol*, 1969, 39: 1 579- 1 587.
- [11] Kitano Y, Kanamori N, Oomori T. Measurements of distribution coefficients of strontium and barium between carbonate precipitate and solution; abnormally high values of distribution coefficients measured at early stages of carbonate formation[J]. *Geochim. J.*, 1971, 4: 183- 206
- [12] Katz A. The interaction of magnesium with calcite during crystal growth at 25- 90 $^{\circ}C$ and one atmosphere[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1973, 37: 1 563- 1 586
- [13] Katz A, Sass E, Starinsky A. et al Strontium behavior in the aragonite-calcite transformation: An experimental study at 40- 98 $^{\circ}C$ [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1972, 33: 481- 496
- [14] de Paolo D J, Ingram B L. High-resolution stratigraphy with strontium isotopes[J]. *Science*, 1985, 227: 938- 941.
- [15] Hess J, Bender M L, Schilling J G, et al Evolution of ratio of strontium-87 to strontium-86 in seawater from Cretaceous to present[J]. *Science*, 1986, 231: 979- 984
- [16] Negrel P, Allegre C J, Dupre B, et al Erosion sources determined by inversion of major and trace element ratios and strontium isotopic ratios in river water: The Congo Basin case[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1993, 120: 59- 76
- [17] Blum J D, Erel Y, Brown K. $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratios of Sierra Nevada stream waters: Implications for relative mineral weathering rates[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1994, 57: 5 019- 5 025
- [18] Clow D W, Mast M A, Bullen T D, et al Strontium-87/strontium-86 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): 1 335- 1 351
- [19] Probst A, el Gh'mari A, Aubert D, et al Strontium as a tracer of weathering processes in a silicate catchment polluted by acid atmospheric inputs, Strengbach, France[J]. *Chemical Geology*, 2000, 170: 203- 219
- [20] Andrew D J, Joel D B, Chamberlain C P, et al Ca/Sr and Sr isotope systematics of a Himalayan glacial chronosequence: Carbonate versus silicate weathering rates as a function of landscape surface age[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2002, 66: 13- 27.
- [21] Beck J W, Edwards R L, Ito E, et al Sea-surface temperature from coral skeletal strontium/calcium ratios[J]. *Science*, 1992, 257: 644- 647.
- [22] de Villiers S, Shen G T, Nelson B K. The Sr/Ca temperature relationship in coralline aragonite: Influence of variability in (Sr/Ca) seawater and skeletal growth parameters[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1994, 58: 197- 208
- [23] Paquette J, Reeder R J. Relationship between surface structure, growth mechanism and trace element incorporation in calcite[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995, 59: 735- 749
- [24] Mitsuguchi T, Matsumoto E, Abe O, et al Mg/Ca thermometry in coral skeletons[J]. *Science*, 1996, 274: 961- 963
- [25] Alibert C, McCulloch M T. Strontium/calcium ratios in modern Porites corals from the Great Barrier Reef as a proxy for sea surface temperature: Calibration of the thermometer and monitoring of ENSO[J]. *Paleoceanography*, 1997, 12: 345- 363
- [26] Sinclair D J, Kinsley L P, McCulloch M T. High resolution analysis of trace elements in corals by laser ablation ICP- MS[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1998, 62: 1 899- 1 901
- [27] McCulloch M T, Esat T. The coral record of last interglacial sea levels and sea surface temperatures[J]. *Chemical Geology*, 2000, 169: 107- 129
- [28] Marshall J F, McCulloch M T. An assessment of the Sr/Ca ratio in shallow water hematypic corals as a proxy for sea surface temperature[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2002, 66: 3 263- 3 280
- [29] Min G R, Edwards R L, Taylor F W, et al Annual cycles of U/Ca in coral skeletons and U/Ca thermometry[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995, 59: 2 025- 2 042
- [30] Ingram B L, Sloan D. Strontium isotopic composition of estuarine sediments as paleosalinity-paleoclimate indicator[J]. *Science*, 1992, 255: 68- 72
- [31] Andersson P S, Wasserburg G J, Ingrid J. The sources of strontium and neodymium isotopes in the Baltic Sea[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1992, 113(4): 459- 472
- [32] Ingram B L, Depalo D J. A 4300 y strontium isotope record of estuarine paleosalinity in San Francisco Bay California[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1993, 119: 103- 119
- [33] Holmden C, Creaser R A, Muehlen K. Paleosalinities in ancient brackish water systems determined by $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratios in car-

- bonate fossils: A case study from the Western Canada Sedimentary Basin [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1997, 61: 2 105 - 2 118
- [34] Carpenter S J, Lohmann K C, Holden P, et al $\delta^{18}\text{O}$ values, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and Sr/Mg ratios of late Devonian abiotic marine calcite: Implications for the composition of ancient seawater [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1991, 55: 1 991 - 2 010
- [35] Whittaker S G, James N P, Kyser T K. Geochemistry of syndimentary cements in Early Cambrian reefs [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1994, 58: 5 567- 5 577.
- [36] Cicero A D, Lohmann K C. Sr/Mg variation during rock-water interaction: Implications for secular changes in the elemental chemistry of ancient seawater [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2001, 65: 741- 761.
- [37] 庞奖励, 黄春长, 张占平, 等. 陕西岐山黄土剖面 Rb、Sr 组成与高分辨率气候变化 [J]. *沉积学报*, 2001, 19(4): 637- 640
- [38] Land M, Ingri J, Andersson P S, et al Ba/Sr, Ca/Sr and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios in soil water and groundwater. Implications for relative contributions to stream water discharge [J]. *Applied Geochemistry*, 2000, 15: 311- 325.
- [39] Siegel D I, Bickford M E, Orrell S E. The use of strontium and lead isotopes to identify sources of water beneath the Fresh Kills landfill, Staten Island, New York, USA [J]. *Applied Geochemistry*, 2000, 15: 493- 500.
- [40] Shawan S D, Andrew L H. Strontium and carbon isotope constraints on carbonate-solution interactions and inter-aquifer mixing in groundwaters of the semi-arid Murray Basin, Australia [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 262: 50- 67.
- [41] Fairchild I J, Andrea B, Tooth A F, et al Controls on trace element (Sr/Mg) compositions of carbonate cave waters: Implications for speleothem climatic records [J]. *Chemical Geology*, 2000, 166: 255- 269.
- [42] 孙敏, 李太枫, 邱景星, 等. 西沙珊瑚锶温度计: 便捷高精度海洋古海水温度代用指标 [J]. *地球化学*, 2001, 30(1): 102- 104
- [43] 贾玉鹤, 王世杰. 生物壳体 Sr/Ca 、 Mg/Ca 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值在恢复古气候、古环境中的应用——以小渡口剖面为例 [J]. *地质地球化学*, 2002, 30(2): 54- 58
- [44] 王世杰, 董丽敏, 林文祝, 等. 泥河湾有孔虫化石群的锶同位素研究 [J]. *科学通报*, 1995, 40(22): 2 072- 2 074
- [45] 刘丛强, 张劲, 李春来, 等. 黄土中 CaCO_3 含量及锶同位素组成变化与古气候波动纪录 [J]. *地质学报*, 2001, 75(2): 259- 265
- [46] 王焰新, 孙连发, 罗朝辉, 等. 指示娘子关泉群水力环境的水化学- 同位素信息分析 [J]. *水文地质工程地质*, 1997, 24(3): 1- 5
- [47] 周练, 刘存富, 凌文黎, 等. 锶同位素在水文地质中的示踪意义——以冀中坳陷地下水为例 [J]. *地球学报*, 1997, 118(增刊): 313- 315
- [48] 韩贵琳, 刘丛强. 贵州河流河水的锶同位素与喀斯特地区化学风化作用 [J]. *第四纪研究*, 2000, 20(6): 570
- [49] 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 [J]. *水文地质工程地质*, 2003, 30(2): 89- 93
- [50] 王增银, 刘娟, 崔银祥, 等. 延河泉岩溶水系统 Sr/Ca 、 Sr/Mg 分布特征及应用 [J]. *水文地质工程地质*, 2003, 30(2): 15- 19
- [51] 袁道先, 戴爱德, 蔡五田, 等. 中国西南裸露型岩溶峰丛山区岩溶水系统及其数学模型的研究——以桂林丫吉村为例 [M]. 桂林: 广西师范大学出版社, 1996
- [52] 沈照理, 许绍倬. 中国饮用天然矿泉水 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989

APPLICATION ADVANCES OF STRONTIUM GEOCHEMISTRY IN HYDROGEOLOGY RESEARCH

WANG Zeng-yin, LIU Juan, WANG Tao, WANG Yu-song, HU Jin-wu

(School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: Strontium is the richest trace element in the upper lithosphere. It is inactive to most substances in natural conditions due to its stable chemical characteristics. Moreover, its contents have obvious differences in various geo-hydrogeological settings. Therefore, strontium is widely used as a microelement tracer abroad. Sr^{2+} , $c(\text{Sr})/c(\text{Ca})$ or $c(\text{Ca})/c(\text{Sr})$, $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ are used by foreign scholars in investigation of the contribution of different river sources, groundwater pollution monitoring, estimation of leakage recharge quantity and reconstruction of cave sedimentation environment. Strontium and its isotopes are also employed as tracers in river resources, spring flow system and karst water system research, $c(\text{Sr})/c(\text{Ca})$, $c(\text{Sr})/c(\text{Mg})$ used in China since 1990's. In this paper, we have discussed current work about the application of $c(\text{Sr})/c(\text{Ca})$, $c(\text{Sr})/c(\text{Mg})$, $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ in subterranean stream composition research on karst area in western-southern China, and finally, prospected the future development of element strontium in hydrogeology and underwater resources evaluation.

Key words: strontium; $c(\text{Sr})/c(\text{Ca})$, $c(\text{Sr})/c(\text{Mg})$; karst water system; underground river