

# 锶同位素方法在油气储层成岩作用研究中的应用

胡作维, 黄思静, 王春梅, 邹明亮, 孙 伟

(成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 沉积地质研究院, 成都 610059)

**摘 要:** 锶同位素地球化学方法在储层成岩作用研究中已得到了一定关注, 文章介绍了国内外有关锶同位素地球化学在碳酸盐岩储层和碎屑岩储层成岩作用的应用研究现状, 并对不同来源(海源、陆源和幔源)成岩流体的锶同位素特征进行了简述。

**关键词:** 锶同位素; 储层; 成岩作用; 地球化学; 油气地质学

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-1412.2009.02.014

**中图分类号:** P597; P618.130 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1412(2009)02-0169-06

## 0 引言

近年, 锶同位素研究方法已经成为一种新兴的沉积同位素地球化学研究工具。尽管锶同位素地球化学早在上世纪 50 年代已奠定了基础, 其后得到了快速发展, 被广泛用于测定复杂物质的年龄、探索火成岩和变质岩的成因及其对应的矿床成因、地壳及上地幔演化等问题的科学研究中<sup>[1]</sup>, 并取得了重要的成果, 因而得到了国内外众多专家学者的密切注意, 但是锶同位素地球化学在沉积地质学和油气地质学中一直未能得到广泛应用。虽然早在 1948 年著名的瑞典地球化学家 Wickman 已经认识到锶同位素在沉积地质学研究中有着重要价值<sup>[1]</sup>, 但直到 34 年后, Burke 等<sup>[2]</sup>文章的发表才使人们开始对用于锶同位素地球化学研究的沉积岩样品范围及其成岩蚀变对锶同位素分析的影响有了进一步的理解<sup>[3]</sup>, 并促使其在沉积地质学研究中进入了实用阶段, 得到了深入研究和广泛应用。近 20 多年来, 国内外出版了大量学术论文和著作<sup>[3-8]</sup>, 这方面的研究已经形成了一门新的学科分支——锶同位素地层学(Strontium Isotope Stratigraphy, 简称 SIS)。

近 10 年, 为了满足日益增长的油气消费需求, 各国均加强油气资源的勘探开发工作。锶同位素地球化学方法作为一种新的有效的地球科学研究手

段, 以及其在沉积地质学和地层学中的成功运用(锶同位素地层学), 使得国内外众多专家学者迅速将其运用到油气勘探研究工作中, 特别是在油气储层研究中。锶同位素地球化学的引入, 使得储层成岩作用研究开创了新局面, 并迅速有效地解决了一些长期争论的问题。同时在综合油气地质学、沉积地质学、水文地质学和地球化学等多学科的基础上, 形成了锶同位素储层地球化学(Strontium Isotopic Reservoir Geochemistry, 简称 SIRG)这一新的学科分支。目前, 锶同位素地球化学已广泛用于储层地质学的各个领域, 包括成岩演化、沉积环境、地层划分和定年等诸多方面。

## 1 锶和锶同位素

锶是化学元素周期表第二族(A)的主族元素之一, 与镁、钙等同属碱土金属元素。地壳中锶的丰度为  $480 \times 10^{-6}$ , 远远低于同族的镁( $28\,000 \times 10^{-6}$ )、钙( $52\,000 \times 10^{-6}$ ); 河水中锶的丰度为  $0.07 \times 10^{-6}$ , 海水中锶的丰度平均为  $8.01 \times 10^{-6}$ <sup>[9]</sup>。由于化学性质活泼, 锶属于典型的分散元素, 只有少数的锶能形成自己的独立矿物(如天青石和菱锶矿等)。锶常常以下列方式进入矿物体系中: 作为杂质进入矿物; 占据晶格缺穴; 吸附在晶体表面; 与矿物的主要元素发生固相类质同象替换<sup>[10]</sup>。

收稿日期: 2007-12-17; 改回日期: 2009-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(40672072)和教育部博士点基金(20050616005)联合资助。

作者简介: 胡作维(1981-), 男, 广东佛山人, 博士研究生, 主要从事油气储层地质学研究。通信地址: 四川省成都市成都理工大学沉积地质研究院; 邮政编码: 610059; E-mail: hzw\_cdut@163.com

其中以类质同象替换最为重要。

锶有 4 个稳定同位素, 分别是 $^{84}\text{Sr}$ 、 $^{86}\text{Sr}$ 、 $^{87}\text{Sr}$  和 $^{88}\text{Sr}$ 。自然界中锶同位素成分并不是恒定的, 它取决于含锶样品的  $\text{Rb}/\text{Sr}$  值及与铷伴生的时间长短<sup>[1]</sup>, 这是因为 $^{87}\text{Sr}$  是由 $^{87}\text{Rb}$  经  $\beta$ -衰变而来的, 故随着 $^{87}\text{Rb}$  的衰变,  $^{87}\text{Sr}$  在地质历史过程中是逐渐增多的, 即铷提供的放射性成因的锶逐渐增加。实际工作中, 锶同位素组成一般用 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  来表示。一般认为,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值不因物理、化学和生物过程发生同位素分馏作用<sup>[11]</sup>, 而主要是受到了锶来源的控制。

## 2 基本原理

储层成岩作用研究历来是储层地质学中的研究热点, 但也是难点。虽然不同类型的储层有着不同的成岩演化过程, 但对于主要的油气储层——陆源碎屑岩和碳酸盐岩储层而言, 成岩作用研究的着眼点主要是成岩作用的产物自生矿物。通过对自生矿物成因和形成机制的研究反演储层自埋藏后所经历的一系列成岩作用过程(包括破坏性和建设性)。尽管储层成岩自生矿物种类很多(如粘土、沸石、石英、碳酸盐等矿物), 但碳酸盐矿物(特别是方解石和白云石)由于在储层中分布普遍、能较好记录成岩流体地球化学特征以及其更容易被用于分析和对比, 因而它们是储层锶同位素分析较为理想的对象。

由于锶主要是作为微量元素分散于地球表层的各种物质中, 所以储层碳酸盐矿物中锶同位素的来源途径也是多种多样的。根据来源物质的性质一般可分为陆相、海相、地球深部三大来源。其中陆相主要包括了长石等陆源(铝)硅酸盐矿物和大气淡水等, 海相主要包括了海相近同生水、同期或非同期海相碳酸盐碎屑等; 地球深部主要包括了火山和其他热液流体等侵位物质<sup>[12]</sup>。锶同位素储层地球化学正是将储层碳酸盐矿物的锶同位素组成理解成上述三大来源共同混合的结果, 不同地质背景(成因)的储层碳酸盐矿物, 其锶同位素组成可能有很大差别: 可以是单一来源、也可以是多来源混合。根据储层中不同组构碳酸盐矿物的锶同位素比值与壳源锶、幔源锶和近同期全球海水的锶同位素比值之间的差异, 研究这些碳酸盐矿物的物质来源以及形成的相对时间, 合理推测成岩过程中孔隙流体锶同位素组成的变化趋势, 评估海相、陆相和幔源物质对成岩过程的影响<sup>[12]</sup>, 并获得这些碳酸盐矿物(原生的或自生的)形成的相对时间、被改造的程度, 从而确定孔

隙形成和被封堵的相对时间, 为成岩历史恢复、孔隙演化提供有用的信息, 为油气勘探中储层质量评价和预测工作提供了一个有效工具。

## 3 研究现状

锶同位素储层地球化学研究利用不同来源锶对储层碳酸盐矿物形成的不同影响这一原理, 结合锶同位素地球化学的基本原理和近年研究成果, 在储层地质学等方面的应用研究中取得了可喜的进展。

### 3.1 碳酸盐岩储层

对于锶同位素地球化学在碳酸盐岩储层成岩作用研究中的应用, 国外有关学者早在上世纪 80 年代中后期就已经开始涉足, 90 年代该方面研究获得广泛关注和空前发展。研究内容主要集中于碳酸盐岩储层的成因及其形成机理等, 尤其对加拿大西部沉积盆地泥盆系白云岩储层展开深入研究, 并有大量成果公开发表, 如 Hairuo 等<sup>[13]</sup> 根据加拿大西部 Presqu'île 障壁岛粗晶白云石的锶同位素比值特征, 证实富放射性成因锶的白云石化流体在全盆地范围内迁移的可能性; Machel 等<sup>[14]</sup> 通过对加拿大西部盆地中白云石和方解石锶同位素组成差异研究, 认为这些碳酸盐已经经历了盆地流体构造排出以及碳酸盐胶结和重结晶等作用的影响; Mountjoy 等<sup>[15]</sup> 对比了阿尔伯达中西部 Rimbey-Meadowbrook 礁相和深盆泥盆系基质白云石和深埋碳酸盐胶结物的锶同位素比值特征, 认为埋藏深度的增加对应着锶同位素比值的轻微升高; Lonnee 等<sup>[16]</sup> 根据阿尔伯达 Rainbow 南部油田中泥盆统 Sulphur Point 组鞍状白云石的锶同位素组成, 认为这类白云石是由中泥盆统盐水和富放射性成因锶基底流体大规模混合而成的热流体沉淀的; Coniglio 等<sup>[17]</sup> 通过对加拿大安大略东南部 Michigan 盆地中志留统 Guelph 组生物礁和台地碳酸盐岩中白云石的锶同位素组成对比研究, 认为这些白云石都反映了志留纪海水来源的特征; Green 等<sup>[18]</sup> 通过对阿尔伯达深盆中西部泥盆系埋藏白云岩锶同位素组成研究, 证实了沉淀这些白云岩的孔隙水在白云岩化作用和埋藏过程中由于水-岩相互作用的影响而具有了更多的放射性成因锶。

与此同时, 国外有关学者也利用锶同位素方法对世界其他沉积盆地中碳酸盐岩储层进行了深入研究, 如 Tobin 等<sup>[19]</sup> 利用美国阿拉巴马奥陶系碳酸盐建造中不同碳酸盐胶结物的锶同位素比值, 提出不同的碳酸盐胶结物来源或成因的差异性; Hitzman

等<sup>[20]</sup>根据爱尔兰东南部 Waulsortian 灰岩中区域白云石的锶同位素组成向北降低这一事实,认为大规模的区域白云岩化作用是由热盐水向北流动造成的; Compton 等<sup>[21]</sup>根据纳米比亚陆棚更新统白云石具有较高的锶同位素比值(包括氧同位素)证据,判断这类白云石是来源于蒸发海水和混合水; Azmy 等<sup>[22]</sup>通过对加拿大纽芬兰西部 Port au Port Peninsula 下奥陶统 Aguathuna 组白云石的锶同位素组成研究,认为早期白云石的形成与海源流体有关,而后期白云石的形成则与具有更多放射性成因锶的成岩流体有关。

国内相关研究的开展较国外要滞后了相当长的一段时间,直到 90 年代中期以后部分专家学者才给予了足够的重视,如郑荣才等<sup>[23]</sup>利用川东黄龙组古岩溶储层碳酸盐矿物的锶同位素组成(包括碳、氧同位素组成),说明在溶蚀碳酸盐岩层的过程中大气淡水的流体性质和储层的古水文条件变化特征;黄思静等<sup>[24]</sup>根据塔里木盆地北部奥陶系储层碳酸盐矿物的锶同位素组成特征,系统阐述了不同成岩流体(深部流体或者大气淡水)对不同位置海相碳酸盐岩和非沉积碳酸盐岩的锶同位素组成造成差异的原因和形成机理;林会喜<sup>[25,26]</sup>和秦永霞等<sup>[27]</sup>分别根据济阳坳陷桩西坳岛地区下古生界潜山储层的白云岩及其后期充填物的锶同位素特征和其他证据,论证了白云岩的成因以及后期大气淡水古岩溶作用对储层发育的意义;张涛等<sup>[28]</sup>利用塔里木盆地塔河油田岩溶储层中不同碳酸盐岩的锶同位素组成识别了不同期次的古岩溶;黄思静等<sup>[29]</sup>根据四川盆地东北部三叠系飞仙关组白云岩的锶同位素组成讨论了白云岩化流体的性质及其白云岩的成因;刘存革等<sup>[30]</sup>也根据塔河油田岩溶缝洞中不同期次方解石的锶同位素组成特征,认为加里东中期的方解石与围岩重溶有关,而海西早期的方解石则与大气水的岩溶作用有关。

### 3.2 碎屑岩储层

国外关于锶同位素地球化学在碎屑岩储层成岩作用的应用研究虽然起步不晚(与在碳酸盐岩储层成岩作用中的应用研究基本同步),但文献相对较少。研究内容主要集中于砂岩储层中碳酸盐自生矿物和地层水的成因机制及其有关物质组分的迁移等,如 Mozley 等<sup>[31]</sup>根据阿拉斯加北部斜坡 Sag River 组和 Shublik 组中碳酸盐胶结物的锶同位素组成,恢复了沉淀不同期次碳酸盐胶结物的地层水的演化历史;Schultz 等<sup>[32]</sup>利用加利福利亚 San Joaquin 盆地 Stevens 砂岩中碳酸盐胶结物的锶同位素

组成演化研究钙元素的物质迁移,判断这些地层水的历史演化受到了斜长石的强烈影响;Prosser 等<sup>[33]</sup>根据大西洋 Viking Graben 北部(北海北部)Murchison 油田 Brent 群 Rannoch 组内部层控方解石胶结物的锶同位素特征,认为这些锶同位素组成高于中侏罗世海水值,沉淀方解石胶结物的孔隙水明显受到了富放射性成因锶的大气淡水影响;Miliken 等<sup>[34]</sup>利用德克萨斯南部 Frio 组自生碳酸盐胶结物的锶同位素组成,证实了盆地深部砂岩更多地受到了放射性成因锶的影响;Winter 等<sup>[35]</sup>根据 Michigan 盆地中奥陶统 St. Peter 砂岩中白云石(包括硬石膏)的锶同位素组成,恢复了该盆地古生代流体演化历史,认为前两期流体与已经改变了的奥陶纪海水有关,第三期流体与受热的深盆盐水有关,而硬石膏则来源于那些与志留系石膏有关的稀释流体;Sommer 等<sup>[36]</sup>利用地层水和方解石胶结物的同位素地球化学特征,可以较为有效地判断油藏储层的连通性;Taylor 等<sup>[37]</sup>根据犹他-科罗拉多 Book Cliffs 上白垩统砂岩中碳酸盐胶结物的锶同位素组成,认为其中的铁白云石形成于早期的成岩作用,与海平面相对下降期间的大气淡水有关;Dos 等<sup>[38]</sup>通过对巴西 Potiguar 裂谷盆地下白垩统 Penedencia 砂岩中方解石的锶同位素研究,认为这些方解石的一个主要来源是页岩;Ketzer 等<sup>[39]</sup>根据爱尔兰西北部石炭系 Mullaghmore 组河流、三角洲和浅海砂岩中碳酸盐胶结物的锶同位素特征,区分了不同期次沉淀的碳酸盐胶结物;Abdel Wahab 等<sup>[40]</sup>根据埃及 Faiyum 凹陷始新统 Qasr El Sagha 组 Temple 段巨结核之间方解石胶结物的锶(氧)同位素特征,认为这些方解石胶结物是近地表早期沉淀的结果;Salem 等<sup>[41]</sup>研究了埃及尼罗河三角洲上新统 Abu Madi 气藏下切谷砂岩方解石胶结物的锶同位素组成,认为方解石中的锶元素主要来源于海源孔隙水和其他潜在来源。

国内有关碎屑岩储层的锶同位素地球化学研究成果直到近几年才有见及,但在针对我国特殊的陆相砂岩储层研究中已经取得了一定成效,如黄思静等<sup>[12]</sup>分别选用了近年科研实践中 3 个不同类型储层(南海珠江口盆地第三系海相砂岩、鄂尔多斯盆地三叠系陆相砂岩和渤海湾盆地济阳坳陷第三系陆相砂岩)的实例,详细论述了海相和非海相成岩流体对碎屑岩储层成岩作用的影响及其规律。吴富强等<sup>[42]</sup>从渤海湾盆地济阳坳陷第三系沙四段陆相砂岩中碳酸盐胶结物的锶同位素特征以及其他证据,

论证了早第三纪渤南洼陷普遍存在与亚碱性-碱性岩浆有关的沉积期、成岩期后的热液活动, 由此产生的初始强酸性含矿深部热流体是形成储层次生孔隙的主要因素之一。

## 4 不同成岩流体的锶同位素特征

储层中碳酸盐矿物所记录的成岩流体锶同位素比值信息及演化是与壳源锶、幔源锶和近同期全球海水等锶同位素来源密切相关, 因而我们可以将储层的成岩流体划分为 3 类: 海源成岩流体、陆源成岩流体和幔源成岩流体。

### 4.1 海源成岩流体的锶同位素特征

海源成岩流体最大的潜在来源是海水, 包括开放或者囚禁的近同期海水, 也可能来自于海相生物碎屑和碳酸盐岩屑溶解流体、海相蒸发岩和盐岩溶解和压实排出流体、海相泥页岩早期压实排出流体。这些海源流体在很大程度上记录了各自对应的近同期海水锶同位素组成, 当这些流体进入到沉积岩层中并与沉积物(沉积岩)发生水-岩相互作用(如白云岩化作用、碳酸盐胶结作用等), 那么这些成岩流体的碳酸盐产物(包括了交代产物、沉淀胶结物等)也将在很大程度上体现近同期海水的锶同位素特征, 也就是说, 这些记录成岩流体信息的碳酸盐胶结物的锶同位素比值主要分布在储层对应地质时期的近同期海水锶同位素比值附近, 一般是前者略大于后者, 如加拿大安大略东南部 Michigan 盆地中志留统 Guelph 组生物礁和台地碳酸盐岩中白云石<sup>[17]</sup>、加拿大纽芬兰西部 Port au Port Peninsula 下奥陶统 Aguathuna 组早期白云石<sup>[22]</sup>、四川盆地东北部三叠系飞仙关组结晶白云岩<sup>[29]</sup>、南海珠江口盆地第三系海相砂岩中方解石胶结物<sup>[12]</sup>, 这些白云石(方解石)的锶同位素组成都接近于各自对应的近同期海水锶同位素组成, 因而这些碳酸盐矿物的形成与海源流体有着密切的关系。

### 4.2 陆源成岩流体的锶同位素特征

陆源成岩流体可以是来自于大陆河流或者湖泊的大气淡水, 这些流体溶解了大量地表陆壳风化带来的壳源锶, 也可以是溶解有大量放射性成因锶(壳源锶)的其他成岩流体, 如碎屑岩地层中陆源不稳定铝硅酸盐矿物(如斜长石、钾长石等)溶解形成的地层水。当具有大量放射性成因锶的流体与沉积物或沉积岩发生水-岩相互作用, 那么这些成岩流体碳

酸盐产物的锶同位素比值将远大于各自对应的近同期海水锶同位素比值, 接近于风化或溶解的陆源物质的锶同位素比值(大陆古老岩石风化提供的全球锶同位素平均值为 0.7119<sup>[43]</sup>、甚至可以更高), 如美国阿拉巴马奥陶系碳酸盐建造中不同碳酸盐胶结物<sup>[19]</sup>、纳米比亚陆棚更新统白云石<sup>[21]</sup>、川东黄龙组古岩溶储层碳酸盐矿物<sup>[23]</sup>、塔里木盆地北部奥陶系储层碳酸盐矿物<sup>[24, 28, 30]</sup>、济阳坳陷桩西埕岛地区下古生界潜山储层的白云岩及其后期充填物<sup>[25-27]</sup>、犹他-科罗拉多 Book Cliffs 上白垩统砂岩中碳酸盐胶结物<sup>[37]</sup>都与大陆河流或者湖泊的大气淡水带来的大量地表风化的壳源锶有关。

同时, 当成岩流体在深埋过程中穿越了碎屑岩(如砂岩、泥页岩)地层, 并溶解了其中陆源不稳定铝硅酸盐矿物, 使得这些地层水获取了大量放射性成因锶, 因而这些成岩流体的碳酸盐产物也不可避免地具有很高的锶同位素比值, 如前面提及的加拿大西部沉积盆地泥盆系白云岩储层中白云石和方解石<sup>[14-16]</sup>、加拿大纽芬兰西部 Port au Port Peninsula 下奥陶统 Aguathuna 组后期白云石<sup>[22]</sup>、阿拉斯加北部斜坡 Sag River 组和 Shublik 组中碳酸盐胶结物<sup>[31]</sup>、巴西 Potiguar 裂谷盆地下白垩统 Pendencia 砂岩中方解石<sup>[38]</sup>都与溶解有大量陆源不稳定铝硅酸盐矿物壳源锶的地层流体有关。

### 4.3 幔源成岩流体的锶同位素特征

幔源成岩流体主要与一些贯通沉积盆地基底的深大断裂有关, 这些地球深部的幔源流体(热液流体)溶解了大量贫放射性成因锶(幔源锶), 并可以通过深大断裂直接影响到沉积岩层的整个沉积期后作用; 同时地层中近同期火山物质(如火山碎屑岩等)或者岩浆侵入岩体物质的溶解也可以带来大量贫放射性成因锶, 那么这些受到幔源锶强烈影响的成岩流体则具有低的锶同位素组成特征, 其沉淀碳酸盐产物的锶同位素比值将小于各自对应的近同期海水锶同位素比值, 接近于地球幔源物质的锶同位素比值(如洋中脊热液系统物质的锶同位素平均值为 0.7035<sup>[44]</sup>), 如鄂尔多斯盆地三叠系陆相砂岩中碳酸盐胶结物<sup>[12]</sup>和渤海湾盆地济阳坳陷第三系陆相砂岩中碳酸盐胶结物<sup>[12, 42]</sup>都与地球深部来源的贫放射性成因锶的幔源成岩流体有关。

## 5 结语

储层成岩作用研究是油气勘探开发工作中的重

点。目前锶同位素地球化学方法在储层成岩作用研究中的应用作为一种新的有效的地球科学研究手段,在国内外已得到了很大关注,但相对于成熟的、已有深入研究的碳氧同位素储层地球化学而言,锶同位素地球化学方法在储层成岩作用研究中的应用,在包括样品的挑选、测试分析技术和基础研究等方面依然存在不少研究难点和盲点。同时由于这方面的研究主要是在锶同位素地球化学和锶同位素地层学的基础上发展起来的,那么这两门基础学科的深入研究显得尤为重要,其中能代表不同时期原始海水的锶同位素组成数据库的建立是目前锶同位素地球化学和锶同位素地层学研究领域中的难点,需要综合诸如精细沉积学、地层学、古生物学、测试分析技术等多学科加以进一步深入研究。

### 参考文献:

- [1] 福尔 G, 鲍威尔 J L (中国科学院贵阳地球化学研究所同位素地质研究室译). 锶同位素地质学[M]. 北京: 科学出版社, 1975.
- [2] Burke W H, Denison R E, Hetherington E A, *et al.* Variation of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  throughout Phanerozoic time[J]. *Geology*, 1982, 10: 516-519.
- [3] 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.
- [4] 黄思静, 吴素娟, 孙治雷, 等. 中生代海水锶同位素演化和古海洋事件[J]. *地学前缘*, 2005, 12(2): 133-141.
- [5] 朱如凯, 罗平, 罗忠. 塔里木盆地石炭系碳酸盐岩同位素地球化学特征[J]. *新疆石油地质*, 2002, 23(5): 382-384.
- [6] Howarth R J, McArthur J M. Statistics for strontium isotope stratigraphy: A robust LOWESS fit to marine Sr isotope curve for 0 to 206 Ma, with look up table for derivation of numeric age (look up table version 8/96) [J]. *Journal of Geology*, 1997, 105: 441-456.
- [7] McArthur J M, Howarth R J, Bailey T R. Strontium isotope stratigraphy: LOWESS version 3: Best fit to the marine Sr isotope curve for 0-509 Ma and accompanying look up table for deriving numerical age [J]. *Journal of Geology*, 2001, 109: 155-170.
- [8] Veizer J, Ala D, Azmy K, *et al.*  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $^{13}\text{C}$  and  $^{18}\text{O}$  evolution of Phanerozoic seawater [J]. *Chemical Geology*, 1999, 161: 59-88.
- [9] 徐国兴, 谷秀兰. 中国的锶矿床[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1999.
- [10] 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.
- [11] Aberg G, Wickman T, Mutvei H (黄仲杰译). 用贻贝壳内锶同位素比值作为酸化指标[J]. *人类环境杂志*, 1995, 24(5): 265-267, 309.
- [12] 黄思静, 石和, 张萌, 等. 锶同位素地层学在碎屑岩成岩研究中的应用[J]. *沉积学报*, 2002, 20(3): 359-366.
- [13] Qing Hairuo, Mountjoy E W. Formation of coarsely crystalline, hydrothermal dolomite reservoirs in the Presquile barrier, Western Canada sedimentary basin [J]. *AAPG Bulletin*, 1994, 78: 55-77.
- [14] Machel H G, Cavell P A, Patey K S. Isotopic evidence for carbonate cementation and recrystallization, and for tectonic expulsion of fluids into the Western Canada sedimentary basin [J]. *AAPG Bulletin*, 1996, 108: 1108-1119.
- [15] Mountjoy E W, Green D G, Machel H G, *et al.* Devonian matrix dolomites and deep burial carbonate cements: a comparison between the Rimbey-Meadowbrook reef trend and the deep basin of west-central Alberta [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 1999, 47: 487-509.
- [16] Lonnee J, Al-Aasm I S. Dolomitization and fluid evolution in the Middle Devonian Sulphur Point Formation, Rainbow South Field, Alberta: petrographic and geochemical evidence [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 2000, 48: 262-283.
- [17] Coniglio M, Zheng Qing, Carter T R. Dolomitization and recrystallization of Middle Silurian reefs and platform carbonates of the Guelph Formation, Michigan Basin, southwestern Ontario [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 2003, 51: 177-199.
- [18] Green D G, Mountjoy E W. Fault and conduit controlled burial dolomitization of the Devonian west-central Alberta deep basin [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 2005, 53: 101-129.
- [19] Tobin K J, Walker K R, Goldberg S G. Burial diagenesis of Middle Ordovician carbonate buildups (Alabama, USA): documentation of the dominance of shallow burial conditions [J]. *Sedimentary Geology*, 1997, 114: 223-236.
- [20] Hitzman M W, Allan J R, Beaty D W. Regional dolomitization of the Waulsortian limestone in southeastern Ireland: evidence of large-scale fluid flow driven by the Hercynian Orogeny [J]. *Geology*, 1998, 26: 547-550.
- [21] Compton J, Harris C, Thompson S. Pleistocene dolomite from the Namibian Shelf; high  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  and  $^{18}\text{O}$  values indicate an evaporative, mixed-water origin [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2001, 71: 800-808.
- [22] Azmy K, Lavoie Denis, Knight I, *et al.* Dolomitization of the Lower Ordovician Aguathuna Formation carbonates, Port au Port Peninsula, western Newfoundland, Canada: implications for a hydrocarbon reservoir [J]. *Canadian Journal of Earth Science*, 2008, 45: 795-813.
- [23] 郑荣才, 陈洪德, 张峭楠, 等. 川东黄龙组古岩溶储层的稳定同位素和流体性质[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 1997, 22(4): 424-428.
- [24] 黄思静, 刘树根, 李国蓉, 等. 奥陶系海相碳酸盐锶同位素组成及受成岩流体的影响[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2004, 31(1): 1-7.
- [25] 林会喜. 济阳拗陷桩西埕岛地区下古生界潜山储层岩溶作用

- [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2004, 31(5): 490-497.
- [26] 林会喜. 济阳拗陷桩海地区下古生界白云岩储集空间形成机理[J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(3): 5-7, 11.
- [27] 秦永霞, 黄思静, 武文慧, 等. 济阳拗陷桩海地区下古生界潜山储层成因机制研究[J]. 物探化探计算技术, 2005, 27(2): 141-146.
- [28] 张涛, 云露, 邬兴威, 等. 锶同位素在塔河古岩溶期次划分中应用[J]. 石油实验地质, 2005, 27(3): 299-303.
- [29] 黄思静, Hairuo Qing, 裴昌蓉, 等. 川东三叠系飞仙关组白云岩锶含量、锶同位素组成与白云岩化流体[J]. 岩石学报, 2006, 22(8): 2123-2132.
- [30] 刘存革, 李国蓉, 张一伟, 等. 锶同位素在古岩溶研究中的应用——以塔河油田奥陶系为例[J]. 地质学报, 2007, 81(10): 1398-1406.
- [31] Mozley P S, Hoernle K. Geochemistry of carbonate cements in the Sag River and Shublik formations (Triassic/Jurassic), North Slope, Alaska: implications for the geochemical evolution of formation waters[J]. Sedimentology, 1990, 37: 817-836.
- [32] Schultz J L, Boles J R, Tilton G R. Isotopic evolution of strontium in carbonate cements from the Stevens Sandstone: implications for calcium mass transfer in the San Joaquin Basin, California[J]. AAPG Bulletin, 1991, 75: 379.
- [33] Prosser D J, Daws J A, Fallick A E, *et al.* Geochemistry and diagenesis of stratabound calcite cement layers within the Rannoch Formation of the Brent Group, Murchison Field, North Viking Graben (northern North Sea)[J]. Sedimentary Geology, 1993, 87: 139-164.
- [34] Milliken K L, Mack L E, Land L S. Elemental mobility in sandstones during burial; whole-rock chemical and isotopic data, Frio Formation, South Texas[J]. Journal of Sedimentary Research, 1994, 64: 788-796.
- [35] Winter B L, Johnson C M, Simo J A, *et al.* Paleozoic fluid history of the Michigan Basin: evidence from dolomite geochemistry in the Middle Ordovician St. Peter Sandstone[J]. Journal of Sedimentary Research, 1995, 65: 306-320.
- [36] Sommer F, McBride J J. Reservoir connectivity in the Carina Field, Tierra del Fuego, Argentina appraised using isotope geochemical analyses of formation waters and calcite cements[J]. AAPG Bulletin, 1998, 82: 1969.
- [37] Taylor K G, Gawthorpe R L, Curtis C D, *et al.* Carbonate cementation in a sequence stratigraphic framework: Upper Cretaceous sandstones, Book Cliffs, Utah-Colorado[J]. Journal of Sedimentary Research, 2000, 70: 360-372.
- [38] Dos A, Sylvia M C, De R, *et al.* Depositional and diagenetic controls on the reservoir quality of Lower Cretaceous Pen-dencia sandstones, Potiguar rift basin, Brazil[J]. AAPG Bulletin, 2000, 84: 1719-1742.
- [39] Ketzer J M, Morad S, Evans R, *et al.* Distribution of diagenetic alterations in fluvial, deltaic, and shallow marine sandstones within a sequence stratigraphic framework: evidence from the Mullaghmore Formation (Carboniferous), NW Ireland[J]. Journal of Sedimentary Research, 2002, 72: 760-774.
- [40] Abdel-Wahab A, McBride E F. Origin of giant calcite cemented concretions, Temple Member, Qasr El Sagha Formation (Eocene), Faiyum Depression, Egypt[J]. Journal of Sedimentary Research, 2001, 71: 70-81.
- [41] Salem A M, Ketzer J M, Morad S, *et al.* Diagenesis and reservoir-quality evolution of incised-valley sandstones: evidence from the Abu Madi gas reservoirs (upper Miocene), the Nile Delta basin, Egypt[J]. Journal of Sedimentary Research, 2005, 75: 572-584.
- [42] 吴富强, 鲜学福, 李后蜀, 等. 胜利油区渤南洼陷沙四上亚段深部储层形成机理[J]. 石油学报, 2003, 24(1): 44-48.
- [43] Palmer M R, Edmond J M. The strontium isotopic budget of the modern ocean[J]. Earth and Planetary Science Letter, 1989, 92: 11-26.
- [44] Palmer M R, Elderfield H. Sr isotope composition of sea water over the past 75Ma[J]. Nature, 1985, 314: 526-528.

## APPLICATION OF STRONTIUM ISOTOPE GEOCHEMISTRY TO THE OIL AND GAS RESERVOIR DIAGENESIS RESEARCH

HU Zuo-wei, HUANG Si-jing, WANG Chun-mei, ZOU Ming-liang, SUN Wei

(State Key Laboratory of Oil/Gas Reservoir Geology and Exploitation, Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** A certain attention has been paid to the method of strontium isotope geochemistry in research of diagenesis of oil reservoir. The paper presents the present situation of the applicable research on strontium isotope geochemistry to diagenesis of carbonate and clastic oil reservoir and deals with briefly the strontium isotope characteristics of the differently-sourced rock-forming flows (marine, continent and mantle).

**Key Words:** strontium isotope; reservoir; diagenesis; geochemistry; oil and gas geology