

贾伍慧, 刘凯, 余成华, 等. 锶同位素在地质学领域的分析技术与应用研究进展[J]. 岩矿测试, 2025, 44(2): 149-160. DOI: 10.15898/j.ykcs.202404050077.

JIA Wuhui, LIU Kai, YU Chenghua, et al. Research Progress on the Application of Strontium Isotope Analysis Techniques in Geology: A Review[J]. Rock and Mineral Analysis, 2025, 44(2): 149-160. DOI: 10.15898/j.ykcs.202404050077.

## 锶同位素在地质学领域的分析技术与应用研究进展

贾伍慧<sup>1</sup>, 刘凯<sup>1\*</sup>, 余成华<sup>2</sup>, 朱伟<sup>3</sup>, 邓岳飞<sup>4</sup>

1. 中国地质科学院, 北京 100037;
2. 深圳市勘察研究院有限公司, 广东 深圳 518035;
3. 山东省地质矿产勘查开发局第八地质大队, 山东 日照 276800;
4. 建设综合勘察研究设计院有限公司, 北京 100007)

**摘要:** 锶同位素具有时间相关性和环境敏感性等独特的地球化学性质。随着测试技术的不断成熟与理论体系的逐渐完善, 锶同位素已成为地学研究的关键技术手段。然而, 由于外界复杂环境对锶同位素比值的异常干扰, 基于热电离质谱法 (TIMS) 或多接收电感耦合等离子体质谱仪 (MC-ICP-MS) 的常规测试结果可能难以准确解释某些地质演化过程。由此, 本文基于锶同位素的固有性质和演化特征, 总结了锶同位素分析过程中的样品制备和测试方法, 并阐明锶同位素在地层学、岩石学、矿床学和水文地质学等方向的最新进展与认识。锶同位素地层学已形成了包含 509 百万年至今海水锶同位素变迁的时间序列图, 但锶同位素组成受岩浆活动和风化作用等多种因素干扰, 作为地层学指标时需要结合特定地质背景仔细校正和解释。岩石学领域通常结合锶同位素区分不同类型岩石的成因、沉积岩石的成岩历程、古环境变迁以及地壳构造活动, 然而由于风化、变质作用的影响, 锶同位素信息可能无法准确解释岩石成因。锶同位素在矿床学领域用于确定矿床成矿物质来源、流体演化过程和矿床成因类型, 但铷-锶同位素体系在高温下可能会因扩散作用和矿物重组等因素导致重置, 影响矿物年龄的确定。水文地质学领域利用锶同位素分析地下水的来源和水-岩相互作用过程, 而复杂的地下水系统可能使得锶同位素的解释较为困难。据此, 本文认为未来需要在重建古海洋锶同位素比值的精确历史、揭示不同温度条件下锶同位素分馏机制、开发精细的锶同位素示踪技术等方面开展深入研究, 为锶同位素理论发展及应用提供支撑。

**关键词:** 锶同位素; 分析技术; 地层学; 岩石学; 矿床学; 水文地质学

**要点:**

- (1) 锶同位素的应用涵盖地壳演化与造山带研究、矿床成因与资源勘探、水文学与污染溯源等地质前沿领域。
- (2) 风化、变质和流体混合作用可能造成锶同位素原始丰度改变, 增加了锶同位素物源分析的难度。
- (3) 锶同位素精细分析技术的开发与多元混合模型的校正, 是理解锶同位素在地质领域中复杂行为的关键。

**中图分类号:** P595

**文献标识码:** A

锶 (Sr) 元素主要存在 4 个稳定的同位素形态, 即<sup>84</sup>Sr、<sup>86</sup>Sr、<sup>87</sup>Sr 和<sup>88</sup>Sr, 其在自然界中的相对丰度依次为 0.56%、9.86%、7.02% 和 82.56%。其中<sup>87</sup>Sr 是

一种通过铷同位素 (<sup>87</sup>Rb) 的  $\beta$  粒子衰变而生成的放射性成因物质, 半衰期长达 488 亿年。在地质学领域中, 锶同位素主要关注<sup>87</sup>Sr 和<sup>86</sup>Sr 的比值 (即

收稿日期: 2024-04-05; 修回日期: 2024-08-27; 接受日期: 2024-09-07; 网络出版日期: 2024-10-10

基金项目: 中国地质科学院基本科研业务费专项 (JKY202404); 中国地质调查局地质调查项目 (DD20221677-2)

第一作者: 贾伍慧, 博士, 助理研究员, 主要从事水文地质方向的研究。E-mail: [jiawh@cags.ac.cn](mailto:jiawh@cags.ac.cn)。

通信作者: 刘凯, 博士, 正高级工程师, 主要从事水文地质方向的研究。E-mail: [acancer@163.com](mailto:acancer@163.com)。

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ), 涉及地质年代学、岩石学、矿床学和水文地质学等学科的研究, 包括海相沉积地层年代、岩石起源与演化、矿床成因与资源评估等<sup>[1-2]</sup>。锶同位素在地质学领域的研究不仅可以深化对地球历史和过程的理解, 还可为资源勘查、环境保护和灾害预警提供科学依据<sup>[3-5]</sup>。

锶同位素在地质学领域的应用, 起源于1948年瑞典地质学家 Wickman 提出的锶同位素地层学<sup>[6]</sup>, 该理论奠定了锶同位素在沉积学研究中的基础。此后, 学者们逐渐认识到锶同位素在地质历史中随时间的变化特性, 使其成为研究古海洋环境、海平面变化、地层年代学等的重要手段<sup>[7-9]</sup>。随后, 碳酸盐岩与古海水之间锶同位素平衡及相关应用研究相继展开, 主要集中在地层划分、成岩作用识别、海相地层定年等方面<sup>[10-11]</sup>。随着科学技术的发展, 高精度质谱仪, 如热电离质谱 (TIMS) 和多接收电感耦合等离子体质谱 (MC-ICP-MS) 的应用提升了锶同位素的测试效率和精度, 促进了全球性的锶同位素比值数据库建立, 形成了地质历史时期海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值随时间演化的关系曲线, 推动锶同位素在地层划分对比与年代学研究中的应用。这一时期的锶同位素研究从岩浆、热液领域进一步转向沉积学, 开始广泛应用于成岩作用类型、成岩流体和储层评价等研究<sup>[5, 12]</sup>。锶同位素与其他元素 (铅、钆和钪等) 同位素体系的联合应用, 如铷-锶测年技术等, 增强了对复杂地质过程和成矿作用的理解。此外, 锶同位素在地下水物源分析等领域的应用也得以广泛开展<sup>[4, 11, 13-14]</sup>。

本文系统梳理了近年来锶同位素在地质学领域的研究成果, 总结了锶同位素测试技术的最新进展, 阐明了锶同位素在地层学、岩石学、矿床学和水文地质学中的应用实例与认识, 并提出了锶同位素在地质学领域研究存在的问题, 为锶同位素理论发展及其在地质学领域的拓展应用提供支撑。

## 1 锶同位素分析测试方法

锶同位素测试是地球化学中常用的技术方法, 用于确定岩石和流体等样品的来源或演化历程。该方法主要依赖于锶同位素比值, 尤其是 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值的变化。锶同位素全岩测试分析是从岩石样品中提取分析锶同位素比值的过程, 涉及岩石的全岩成分分析。全岩分析是整个岩石样品的化学成分分析<sup>[15]</sup>, 测试方法包括样品制备和同位素比值测量。其中, 样品制备是从复杂的自然样品中提取纯净的锶, 以便精确地分析同位素比值<sup>[14, 16]</sup>。微区测试

分析是一种较为先进的地球化学分析技术, 可在小尺度上 (微米, 甚至纳米级别) 测量锶同位素比值, 能够提供关于样品局部环境、成因和历史的精细信息<sup>[17]</sup>。测试技术的选择取决于研究的具体需求, 如是否需要极高的空间分辨率、同位素比值的精度要求, 以及分析速度和样品可用性等。

### 1.1 样品制备方法

锶同位素测试的样品制备直接影响着测试结果的精确度和准确性。样品制备通常结合离子交换树脂等技术进行样品消解、化学分离纯化和样品富集与浓缩<sup>[18-19]</sup>。锶同位素测试中铷的干扰优先是用树脂去除。例如, 徐卓等 (2019)<sup>[20]</sup> 利用 Eichrom 锶特效树脂和其他分离技术, 对铀矿浓缩物中的铅和锶进行高效分离和富集, 验证了这种分离流程的普适性和可靠性, 有利于后续锶同位素的精确测定。随后, 魏雨秋等 (2023)<sup>[16]</sup> 通过优化化学前处理流程, 采用 AG50W-X8 树脂 (200~400目, 美国 Bio-Rad 公司) 和锶特效树脂两柱法 (50~100 $\mu\text{m}$ , 美国 Eichrom 公司) 进行样品分离纯化, 实现了多种岩石标准物质的锶同位素高精度测定。

另外, 利用 MC-ICP-MS 测定锶同位素组成时,  $^{87}\text{Rb}$  对  $^{87}\text{Sr}$  干扰严重, 样品经元素化学分离后,  $^{87}\text{Rb}$  与  $^{87}\text{Sr}$  的光谱干扰也无法完全消除, 直接影响测试精度。在处理高 Rb/Sr 比值的岩石样品时, 研究者通过测量  $^{87}\text{Rb}$  与  $^{86}\text{Sr}$  的强度比值, 建立了  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值与 Rb/Sr 比值之间的关系曲线, 在 MC-ICP-MS 测量中校正  $^{87}\text{Rb}$  对  $^{87}\text{Sr}$  分析的精度干扰, 尤其是在 Rb/Sr 比值较高 (Rb/Sr > 0.2) 的情况下, 校正后的相对误差由 6.53% 降低至 0.09%<sup>[21]</sup>。同时, 在碳酸盐岩样品处理中, 潘旭等 (2023)<sup>[19]</sup> 对比和优化了多步浸提法在碳酸盐岩锶同位素分析中的应用, 提出了一种原生碳酸盐组分的多步浸提法, 分别适用于碳酸盐纯度  $\geq 85\%$  和纯度  $\geq 65\%$  的灰岩和白云岩的分析。同时, 该研究分析指出过量的 5%~10% 乙酸会造成灰岩中非碳酸盐组分浸出, 为减少干扰元素的影响、提高锶同位素测试可靠性提供了依据。

### 1.2 全岩分析测试技术

全岩分析测试技术, 主要包括 TIMS 法和 MC-ICP-MS 法<sup>[22]</sup>。其中, TIMS 是较为精确的锶同位素比值测定方法, 该方法主要优点是低温电离和高真空, 因而多原子干扰少, 同时能够控温电离烧除 Rb。但基于该方法的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  测试偏差与杯系数偏差呈 1:1.2 的正相关关系, 该影响不可忽视<sup>[16]</sup>。魏雨秋等 (2023)<sup>[16]</sup> 采用了动态多接收校正方法 (MC-

TIMS)来解决法拉第杯系数衰减导致的测量精度下降问题,消除了约99.6%的杯系数影响,相比传统方法的测试精度提高了2~3倍,达到了优于8ppm的长期测试精度。但TIMS分析速度相对较慢,不适合大量样品的快速分析,仪器维护成本也相对较高。MC-ICP-MS成为非传统稳定同位素的主流分析仪器,相较于电感耦合等离子体质谱,MC-ICP-MS增加了法拉第杯离子检测器和双聚焦质量分析器等核心部件,在离子化效率和质量分辨率等方面的性能得到较大提升<sup>[23]</sup>;但MC-ICP-MS分析样品时需要液体进样,容易受到基质效应的影响。同时,样品前处理也较为复杂,一般需要经过常规酸消解和离子交换树脂纯化过程,以完成样品溶解和去除基质效应<sup>[23]</sup>。在使用氢氟酸消解时,要确保所有氟化物被完全去除,以免导致锶的吸附损失。消解也需要使用超纯水和高纯度的酸,并确保无环境污染<sup>[16]</sup>。

### 1.3 微区分析测试技术

锶同位素微区分析测试技术,主要包括激光剥蚀电感耦合等离子体质谱法(LA-ICP-MS)和二次离子质谱法(SIMS)。LA-ICP-MS适用于微区分析,可以在不破坏样品的情况下分析特定区域<sup>[24-25]</sup>。该方法也适合大规模样品的初步筛选,不需要复杂的样品制备过程,可以分析固态样品。由于成本和时间效率的提高,LA-ICP-MS可从多种颗粒和矿物中收集大量 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 数据集,这使其广泛应用于地质年代学研究<sup>[14,26-28]</sup>。但LA-ICP-MS测试的同位素比值精度通常不如TIMS和MC-ICP-MS,且样品和标样基体差异可能导致测试结果偏移。因此,微区锶同位素分析还主要受制于缺乏基体匹配的标样。SIMS具有极高的空间分辨率,适合微米级别的微区分析,可以分析非常小的样品量,甚至分析单个矿物颗粒。但该方法的样品制备要求高,通常需要制备离子探针薄片。此外,SIMS分析成本高,操作复杂,受到仪器工作条件限制,可能会影响同位素比值测试的准确性和精度<sup>[29]</sup>。

## 2 锶同位素在地层学的应用

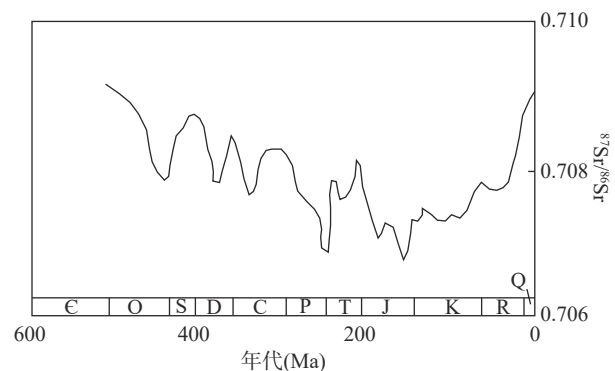
### 2.1 锶同位素地层学原理

Wickman(1948)<sup>[6]</sup>首先提出了锶同位素地层学的研究思想,认为锶在海水中的滞留时间(大约以数百万年计)明显长于海水的混合周期(大约在千年量级),因此地球各处全球的海水在同一时期的锶同位素比值呈现出普遍的一致性。基于此现象推断,在不同地质时期中海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值随时间呈现出

波动趋势,并体现了与历史年代的对应关系。在海相共生矿物组分(生物作用下产生的碳酸盐、海水直接沉积的非生物起源碳酸盐黏固物,或其他矿物如磷灰石、重晶石等)形成时,吸纳了当时海洋中的锶同位素,记录了当时海水中锶同位素组成信息<sup>[2]</sup>。

### 2.2 锶同位素地层学的应用

基于 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值数据,Burke等(1982)<sup>[30]</sup>构建了一条描绘显生宙期锶同位素含量随地质年代演变的曲线,促成了锶同位素研究范畴由岩浆与热液系统向沉积地质学领域的转变。Howarth等(1997)<sup>[31]</sup>运用局部加权回归散点平滑技术(LOWESS),结合锶同位素分析数据绘制出206百万年前至今海洋碳酸盐 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 变化的时间序列图。在此基础上,学者们继续拓展研究更早年代的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 演化特征,形成了包含509百万年至今海水锶同位素变迁的时间序列图(图1)<sup>[32-33]</sup>。



C—寒武纪; O—奥陶纪; S—志留纪; D—泥盆纪; C—石炭纪; P—二叠纪; T—三叠纪—侏罗纪; K—白垩纪; R—第三纪; Q—第四纪。

图1  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 演化的时间序列图(修改自 Veizer 等, 1999<sup>[33]</sup>)

Fig. 1 Time series diagram of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  evolution. Modified from Veizer, et al (1999)<sup>[33]</sup>. C—Cambrian period; O—Ordovician period; S—Silurian period; D—Devonian period; C—Carboniferous period; P—Permian period; T—Triassic—Jurassic period; K—Cretaceous period; R—Tertiary period; Q—Quaternary period.

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 特征和全球锶同位素演化曲线广泛应用于追溯沉积物形成的具体地质时期。例如,蒋苏扬等(2019)<sup>[8]</sup>通过鄂尔多斯盆地马家沟组五段(马五段)和桌子山地区三道坎组—桌子山组的锶同位素分析,将该时期的地层与全球锶同位素演化曲线进行对比,确定了马五段属于中奥陶世达瑞威尔

中—晚期,而三道坎组—桌子山组的年代为中奥陶世达瑞威尔早期至中期,早于马家沟组。此外, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值与海平面升降呈负相关<sup>[34]</sup>。海平面升高时,陆地风化速率降低,壳源锶输入减少,导致海水中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值降低;反之,海平面下降时,壳源锶供应增多,海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值增高。这种变化规律有助于研究古海平面变化及相应时代的古地理环境。例如,研究者发现马五段的锶同位素含量随深度呈现反复震荡变化,这与蒸发岩的韵律变化相符,反映出沉积期间海平面的升降变动。桌子山地区的锶同位素波动较小,整体上呈现出单调递减的趋势,表明该时期海平面持续上升<sup>[8]</sup>。

由于不同地质背景下的锶同位素特征可能存在显著差异,不同地区的锶同位素特征的对比研究也较为普遍。镇钾1井马五段的锶同位素因其沉积环境的特点与全球锶同位素演化特征存在差异<sup>[8]</sup>,锶同位素呈现出与蒸发岩韵律相吻合的反复震荡,反映了在局限台地-蒸发台地环境下的沉积过程,这种变化不能直接与全球锶同位素演化曲线进行对比,却能体现该地区古环境的敏感变化。而在开阔水体环境中,碳酸盐岩中的锶同位素更能真实地反映当时的全球海水锶同位素组成。近年来,学者们已经构建了多个地质时期的全球锶同位素演化曲线,通过对比不同地区(如鄂尔多斯盆地<sup>[8]</sup>、白云石山脉地区<sup>[35-36]</sup>、阿尔卑斯—喀尔巴阡前渊<sup>[9]</sup>、南极德罗宁·莫德地<sup>[4]</sup>等地)的锶同位素数据,揭示了全球尺度上的地壳演化过程以及不同地区对全球变化的独特响应。例如,Nehyba等(2022)<sup>[9]</sup>利用二维地震资料和测井数据,结合锶同位素地层学分析了大型

中新世峡谷的演化历程,并通过与全球海水锶同位素演化曲线对比,建立了地层年代框架。以上研究显示,地质历史演变和局部地质作用等因素对锶同位素比值均存在一定影响。作为地层学的重要指标,锶同位素比值需要经过仔细地校正和解释,进一步分析与重建古海洋锶同位素比值的精确历史。

### 3 锶同位素在岩石学的应用

锶也是典型的亲石元素,在地壳内广泛分布,其富集趋势明显偏向含有硅酸盐的岩石。在岩浆形成的环境中,锶的分布及其在岩石中的占比大多受制于长石类矿物。在沉积物的形成阶段,影响锶分布的因素不仅包含黏土矿物对锶的吸附作用强度,Sr和Ca在碳酸盐矿物间发生的同质异相替换作用,也与含有长石的碎屑物含量有关<sup>[37]</sup>。岩石中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值由岩石形成初期的同位素比值、成岩时间以及 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 值决定。总体来看(图2),陆地地壳中,岩石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值一般在0.702~0.750区间内<sup>[37]</sup>,而年代较久远的花岗岩类,这一比值往往在0.710~0.740范围内<sup>[38]</sup>;对于碳酸盐岩如灰岩和白云岩, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值则是在0.707~0.709区间内<sup>[39]</sup>。一般观点认为, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值不会因化学反应或生物进程而产生显著同位素分馏,而主要受到锶来源的制约<sup>[2]</sup>。

锶同位素在岩石学领域已经成为一种有力的地球化学工具,不仅可用于区分不同类型岩石的成因,还能深入剖析沉积岩石的成岩历程、古环境变迁以及地壳构造活动<sup>[40-42]</sup>。锶同位素特征可以区分不同类型的白云岩(如原生白云岩与次生白云岩)及其成因模式。例如,杨朝屹等(2024)<sup>[11]</sup>通过分析川西

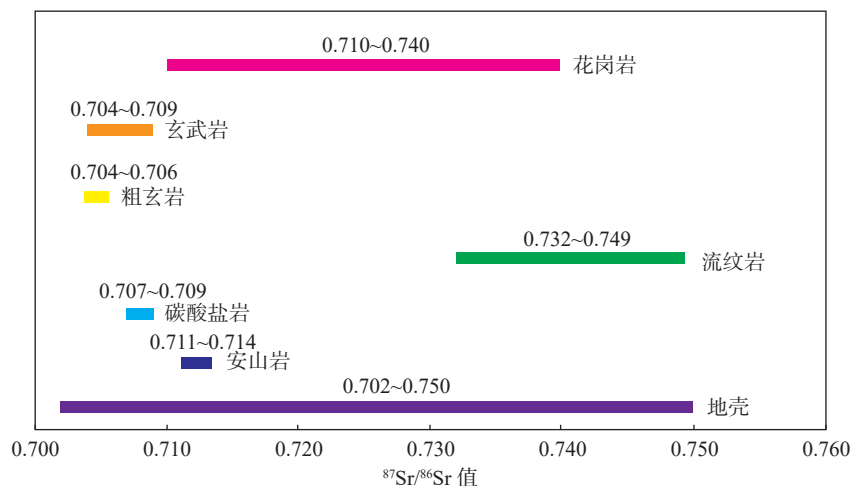


图2 不同类型岩石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值

Fig. 2  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  values for different types of rocks.

—川北地区中二叠统白云岩的锶同位素特征,揭示了川西—川北地区均质白云岩成岩流体主要为同时期海水,后期接受热液改造,形成填充物热液鞍状白云石,成岩环境主要有海相成岩环境等。利用 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值与其他元素(如Mn、Fe)比值的相关性,可以识别出海相沉积、陆源输入、热液活动等多种成岩作用的贡献。朱光有等(2023)<sup>[13]</sup>通过分析白云岩成因的不同研究方法,提出将激光原位U-Pb定年技术和锶同位素结合,能够更加精确地获取白云岩形成和演化的年代信息。同时,白云石晶体结构分析也可以揭示其形成时的环境条件、成岩动力学过程<sup>[43]</sup>。

此外,锶同位素还用于记录沉积岩成岩过程中的流体性质变化。如四川盆地东部早中三叠世蒸发岩和川西—川北地区中二叠统白云岩的研究表明,成岩过程中流体与岩石的交互作用会影响锶同位素组成,通过锶同位素与其他地球化学指标(如Mg同位素、流体包裹体、阴极发光、碳氧同位素等)的联合应用,能够较好地还原沉积岩的成岩历史和成岩过程的流体特征<sup>[11,44]</sup>。然而,由于不同类型岩石的形成历史中可能会经历风化、变质作用等地质作用的后期改造,同时 $^{86}\text{Sr}$ 、 $^{87}\text{Sr}$ 和 $^{88}\text{Sr}$ 之间在温度、压力以及流体成分作用下可能存在分馏现象,岩石成因研究中还需利用多阶段模型和混合模型等新方法,细致地解析复杂岩石系统中的锶同位素来源。

#### 4 锶同位素在矿床学的应用

锶同位素在矿床学领域的研究中扮演着关键角色,可用于确定矿床成矿物质来源、流体演化过程和矿床成因类型<sup>[45-47]</sup>。近年来,学者们结合锶同位素揭示了铅锌矿床(如滇西董家河铅锌矿床、湘西北金顶铅锌矿床)<sup>[48-49]</sup>,油页岩<sup>[50]</sup>,石油天然气<sup>[51]</sup>,锂矿床<sup>[3,52]</sup>,萤石矿床<sup>[53]</sup>等多种矿床的成矿物质主要来源于地壳,也可能是壳幔相互作用的产物或地壳内部的深部流体携带。基于锶同位素特征,研究者还明确了阿尔金山地区、川西坳陷新场气田须二气藏等地的流体来源与演化过程,与地壳深部流体活动、地表水与地下水混合,甚至是海水的间接影响密切相关<sup>[54-55]</sup>。在塔里木盆地顺托果勒地区,研究者通过对比奥陶系方解石岩脉的锶同位素特征与同时期海水信息,揭示了断裂带内不同性质成脉流体活动时序和不同断裂带间流体活动差异,及其对油气成藏的控制作用<sup>[51]</sup>,表明锶同位素不仅限于固体矿产研究,也能在油气地质学中发挥重要作用。

随着锶同位素在矿床学领域的广泛应用,与其他同位素相结合的锶同位素研究逐渐成为趋势。例如,铷-锶同位素测年技术广泛应用于测定地质体的绝对年龄,特别是含有一定铷和锶的岩石矿物样品。肖晓牛等(2022)<sup>[56]</sup>利用铷-锶同位素获得了闽中梅仙矿集区丁家山铅锌矿床的精确成矿年龄,综合分析认为丁家山矿床是形成于古太平洋板块向欧亚大陆板块俯冲-消减后的伸展引张环境下,是晚侏罗世到早白垩世期间的花岗岩体与中—新元古界的大理岩经接触交代后的矽卡岩型矿床。但铷-锶同位素体系在高温下可能会因扩散作用和矿物重组等因素导致重置,从而影响矿物年龄的确定。

此外,结合流体包裹体和碳、氧、锶同位素组合分析,学者们发现了川东南平桥地区、滇西兰坪盆地膏盐矿物和阿尔金西段萤石矿床的成矿流体在不同阶段可能存在多源性,并反映出成矿过程中的温度、压力变化及有机质参与情况<sup>[49,57]</sup>。在广西大化县透闪石矿床中,锶同位素与其他地球化学指标(岩石主微量元素)相结合,有效地鉴别了成矿流体的来源和成矿物质的迁移路径,得到了透闪石矿床成矿的5个阶段:石灰岩沉积、基性岩浆侵入、石灰岩变质为大理岩、海相流体淋滤辉绿岩和成矿热液交代大理岩<sup>[12,58]</sup>。但针对复杂类型的矿床,还应进一步开发精细的锶同位素示踪技术,精确辨析原生和次生信号。

#### 5 锶同位素在水文地质学的应用

地下水中的锶同位素主要来源于周围岩石和沉积物, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素特征是含水层不同物源中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素混合后的结果<sup>[59]</sup>。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 在地下水中的贮存时间远远低于 $^{87}\text{Rb}$ 的半衰期,改变地下水中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的地质过程主要是岩石矿物成分溶解和各类水源混合,且此类同位素的分配不因矿物沉积或水分蒸发而受到干扰<sup>[60]</sup>。因此, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素常用于分析地下水的来源和水岩相互作用过程。张卓等(2023)<sup>[61]</sup>通过综述分析发现高氟地下水中的锶同位素与氟离子的来源密切相关,可通过 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值鉴别含氟矿物的类型和风化程度。此外,学者们还将锶同位素用于识别地下水中的矿物风化过程,如碳酸盐、硅酸盐和火成岩风化对锶同位素的影响<sup>[7]</sup>。张松涛等(2023)<sup>[62]</sup>研究得到了锶同位素特征随循环深度与路径规律性变化的同时,受补给源和中生代侵入碳酸盐岩的岩浆岩水岩作用影响出现局部异常区,揭示了山西古堆—南梁泉域

水体与不同岩性的相互作用。

研究者还利用锶同位素揭示了干旱-半干旱地区蒸发浓缩和水岩作用对地下水化学组成的影响,特别是锶同位素与氟、钙离子浓度的关系<sup>[61,63]</sup>,对于理解和控制高氟地下水的形成与演化至关重要<sup>[61,64-65]</sup>。近年来,地下水污染研究中常用锶同位素来追踪污染源,如工业废水、农业返回灌溉水等对地下水的影响<sup>[66-67]</sup>。同时,利用锶同位素可区分自然地质来源和人为污染来源,指导污染防控策略的制定。例如,在某矿产开采地区,研究者通过锶同位素与其他离子特征的联合分析(图3),识别了碳酸盐溶蚀作用是当地回灌区地下水水化学特征形成的主要因素<sup>[68]</sup>。然而,在多重补给源和复杂的流体混合等情况的研究中,还需结合水化学和氢氧等稳定同位素,进一步阐明地下水的流动和交换过程。

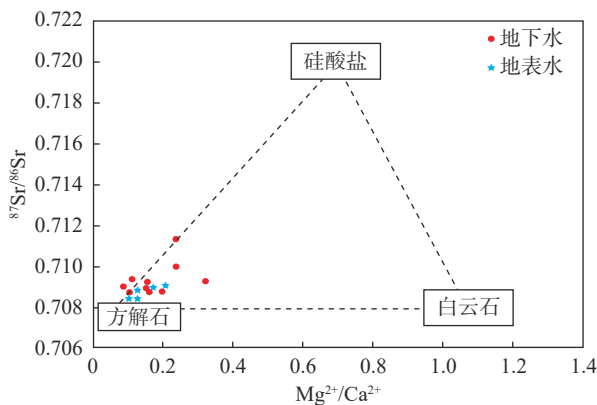


图3  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  和  $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$  的关系图 (修改自 Mei 等, 2024<sup>[68]</sup>)

Fig. 3 Relationship between  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  and  $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ . Modified from Mei, et al (2024)<sup>[68]</sup>.

## 6 存在问题与研究展望

锶同位素特征分析在揭示地球历史中的地层定年、物源示踪、矿床成因、地下水循环以及地球化学

过程等诸多科学问题中应用广泛。然而,尽管锶同位素提供了丰富的地质历史演化信息,但也存在一些局限性和未解决的问题。

(1) 地层学研究中,锶同位素比值的变化可能受到多种因素的影响,包括海水锶同位素组成随时间的演变、岩浆活动的干扰、风化作用等,这使得锶同位素比值作为地层学指标时需要进行仔细校正和解释,提高地层对比的精度。

(2) 岩石学研究中,不同类型岩石的形成可能会经历风化、变质作用等地质作用的后期改造,同时锶的多类同位素之间在温度、压力以及流体成分作用下可能存在分馏现象,使得岩石的锶同位素来源分析存在挑战。未来需发展新的方法,如利用多阶段模型和混合模型,解析复杂岩石系统中的锶同位素组成。

(3) 矿床学研究中,铷-锶同位素体系在高温下可能会因扩散作用和矿物重组等因素导致重置,从而影响矿物年龄的确定。此外,对于某些复杂类型的矿床,锶同位素的来源和演化路径仍然存在争议。未来研究应重点揭示不同温度条件下锶同位素分馏机制,提高铷-锶定年的可靠性;针对特定矿床类型,应进一步开发精细的锶同位素示踪技术,辨析原生和次生信号。

(4) 水文地质学研究方面,对于复杂的地下水系统,如多重补给源和复杂的流体混合等情况,可能使得锶同位素的解释较为困难。对于某些区域,锶同位素的背景水平和变异范围尚不清楚。可进一步广泛收集锶同位素数据,建立全面的基线 and 变化模式;结合水化学和稳定同位素,阐明地下水的流动和交换过程。

总体而言,未来的研究应侧重于开发更精细的分析技术,建立更全面的数据集,并结合多学科方法,以克服现有锶同位素研究中测试精度不足和结果多解性的限制。

## Research Progress on the Application of Strontium Isotope Analysis Techniques in Geology: A Review

JIA Wuhui<sup>1</sup>, LIU Kai<sup>1\*</sup>, YU Chenghua<sup>2</sup>, ZHU Wei<sup>3</sup>, DENG Yuefei<sup>4</sup>

(1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. Shenzhen Investigation and Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518035, China;

3. No.8 Institute of Geology and Mineral Resources Exploration of Shandong Province, Rizhao 276800, China;

4. Construction Comprehensive Survey Research and Design Institute Co., Ltd., Beijing 100007, China)

### HIGHLIGHTS

- (1) The utilization of Sr isotope spans a number of frontier geological domains, including groundwater pollution, deposit genesis, and crustal development.
- (2) The initial abundance of strontium isotopes may alter due to weathering, metamorphism, and fluid mixing, which makes source analysis of strontium isotopes more challenging.
- (3) Understanding the intricate behavior of strontium isotopes in the geosciences requires the development of fine analysis techniques for these materials and the correction of multivariate mixed models.

**ABSTRACT:** Strontium (Sr) isotopes have unique geochemical properties such as time dependence and environmental sensitivity. With the development of testing technology and theoretical system, Sr isotope has become a key technique in geoscience research. However, due to the abnormal interference of the Sr isotope ratio in the complex environment, it may be challenging to appropriately interpret some geological evolution processes using conventional test results based on thermoelectric ionization mass spectrometers (TIMS) or multicollector inductively coupled plasma-mass spectrometers (MC-ICP-MS). Based on the inherent properties and evolutionary characteristics of Sr isotope, this paper summarizes the sample preparation and testing methods in the process of Sr isotope analysis, and expounds the latest progress and understanding of Sr isotope in stratigraphy, petrology, ore deposit science and hydrogeology. It is pointed out that Sr isotope stratigraphy has formed a time series map containing the changes of Sr isotope in seawater from 509 million years to the present. When strontium isotope is employed as a stratigraphic index, it must be properly corrected and interpreted in accordance with a particular geological context because it is influenced by a variety of processes, including weathering and magmatic interference. In the field of petrology, the diagenetic processes of sedimentary rocks, the genesis of various rock types, changes in the paleoenvironment, and crustal tectonic activity are all typically distinguished using strontium isotopes. But the information provided by strontium isotopes is insufficient to precisely describe the creation of rocks because of the impact of weathering and metamorphism. Sr isotope is used in the field of ore deposit science to determine the source of ore-forming materials, the process of fluid evolution and the genetic type of ore deposit. However, at high temperatures, diffusion and mineral recombination can cause the rubidium-strontium isotope system to reset, which can interfere with determining the age of the material. The complicated groundwater system may make it challenging to interpret Sr isotope, which is used in hydrogeology to examine the origin of groundwater and the interaction between water and rock. Therefore, this paper makes the following recommendations for future research: to uncover the mechanism of strontium isotope fractionation at varying temperatures, to develop fine strontium isotope tracer technology to get around the limitations of current strontium isotope research, and to reconstruct the accurate history of the paleomarine strontium isotope ratio. It may offer backing for the advancement and utilization of strontium isotope theory.

**KEY WORDS:** strontium isotope; analytical technology; stratigraphy; petrology; mineralogy; hydrogeology

## 参考文献

- [1] 杨斌, 倪师军, 罗杨, 等. Sr 同位素研究进展及其在地质学中的应用[C]//资源环境与地质空间信息技术新进展学术讨论会. 成都: 成都理工大学, 2016.  
Yang B, Ni S J, Luo Y, et al. Research Progress of Sr Isotope and Its Application In Geoscience[C]//Symposium on Resources, Environment and Geospatial Information Technology. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [2] 胡作维, 李云, 李北康, 等. 显生宙以来海水锶同位素组成研究的回顾与进展[J]. *地球科学进展*, 2015, 30(1): 37-49.  
Hu Z W, Li Y, Li B K, et al. An Overview of the Strontium Isotopic Composition of Phanerozoic Seawater[J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(1): 37-49.
- [3] Yu X, Wang C, Huang H, et al. Origin of Lithium in Oilfield Brines in Continental Petroliferous Basin: Insights from Li and Sr Isotopes in the Jianghan Basin, Central China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2024, 160: 106576.
- [4] Wang C C, Hemming S, O'connell S, et al. Sedimentary Stratigraphy and Provenance off Dronning Maud Land (East Antarctica) During the Mid-Pleistocene Transition: Implications for Paleoclimate and Ice Dynamics[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2024, 325: 108483.
- [5] Jia W, Liu K, Yan J, et al. Characteristics of Geothermal Waters in Eastern Wugongshan Based on Hydrogen, Oxygen, and Strontium Isotopes[J]. *Applied Geochemistry*, 2024, 161: 105874.
- [6] Wickman F E. Isotope ratios: A Clue to the Age of Certain Marine Sediments[J]. *The Journal of Geology*, 1948, 56(1): 61-66.
- [7] 柯伟杰, 魏广祎, 殷一盛, 等. 扬子地块南缘中-晚寒武世浅海多次短暂增氧及其诱因: 来自碳酸盐岩铈异常及碳-锶同位素证据[J]. *地质学报*, 2023, 97(3): 789-809.  
Ke W J, Wei G Y, Yin Y S, et al. Shallow Marine Oxidation Pulses During the Middle-Late Cambrian in South China and Their Potential Triggers: Evidences from Carbonate Ce Anomaly and C-Sr Isotopes[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(3): 789-809.
- [8] 蒋苏扬, 张永生, 黄文辉, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系锶同位素地球化学特征[J]. *地质学报*, 2019, 93(11): 2889-2903.  
Jiang S Y, Zhang Y S, Huang W H, et al. Geochemical Characteristics of Ordovician Strontium Isotope in the Ordos Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(11): 2889-2903.
- [9] Nehyba S, Opletal V, Holcová K, et al. The Return of the Iván Canyon, a Large Neogene Canyon in the Alpine—Carpathian Foredeep[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 144: 105808.
- [10] 许康康, 孙凯, 吴兴源. 赞比亚索卢韦齐地区新元古代石英二长岩的成因: 年代学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素约束[J]. *西北地质*, 2023, 56(5): 20-34.  
Xu K K, Sun K, Wu X Y. Petrogenesis of Neoproterozoic Quartz Monzonite in Solwezi Region, Zambia: Constraint from Geochronology, Geochemistry and Sr-Nd-Hf Isotopes[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(5): 20-34.
- [11] 杨朝屹, 夏青松, 杨鹏, 等. 川西—川北地区中二叠统白云岩成岩流体特征分析及复合成岩环境重建[J/OL]. *沉积学报*(2024-03-08). <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2024.021>.  
Yang C Q, Xia Q S, Yang P, et al. Analysis of Diagenetic Fluid Characteristics and Reconstruction of Composite Diagenetic Environments in the Middle Permian Dolomites of the Western-Northern Sichuan Basin[J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica* (2024-03-08). <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2024.021>.
- [12] 王美云, 李杰, 宋明春, 等. 胶东大邓格金多金属矿床成矿机制: 来自黄铁矿 Rb-Sr 定年、原位硫同位素及微量元素的制约[J]. *岩石学报*, 2023, 39(5): 1501-1515.  
Wang M Y, Li J, Song M C, et al. The Metallogenic Mechanism of the Dadengge Gold Polymetallic Deposit in the Jiaodong Peninsula: Constraints from Pyrite Rb-Sr Dating, *in situ* S Isotope and Trace Elements[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2023, 39(5): 1501-1515.
- [13] 朱光有, 李茜. 白云岩成因类型与研究方法进展[J]. *石油学报*, 2023, 44(7): 1167-1190.  
Zhu G Y, Li X. Progress in Genetic Types and Research Methods of Dolomite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2023, 44(7): 1167-1190.
- [14] 黄超, 王浩, 师文贝, 等. 云母 Rb-Sr 等时线年龄原位微区 LA-ICP-MS/MS 测定[J]. *中国科学: 地球科学*, 2023, 53(11): 2648-2668.  
Huang C, Wang H, Shi W B, et al. *In situ* Rb-Sr Dating of Mica by LA-ICP-MS/MS[J]. *Science China Earth Sciences*, 2023, 53(11): 2648-2668.
- [15] 戴梦宁, 宗春蕾. 全岩 Lu-Hf 同位素研究综述[J]. *地下*



- 水, 2016, 38(6): 35–38.
- Dai M N, Zong C L. A Review of Whole Rock Lu-Hf Isotopes[J]. *Ground Water*, 2016, 38(6): 35–38.
- [16] 魏雨秋, 胡雅婷, 周炼, 等. 动态多接收 TIMS 方法高精度测定岩石标准物质的锶同位素组成[J]. *岩矿测试*, 2023, 42(5): 944–956.
- Wei Y Q, Hu Y T, Zhou L, et al. High Precision Strontium Isotope Measurement of Rock Standard Materials by Multidynamic TIMS[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2023, 42(5): 944–956.
- [17] 宋彪. 同位素和微区分析测试技术应用研究[C]//“十五”重要地质科技成果暨重大找矿成果交流会. 北京: 中国地质学会, 2006.
- Song B. Research on the Application of Isotope and Microregion Analysis and Testing Techniques[C]//The Tenth Five-Year Plan Important Geological Scientific and Technological Achievements and Major Prospecting Achievements Exchange Meeting. Beijing: Geological Society of China, 2006.
- [18] 白江昊, 刘芳, 张兆峰, 等. 非传统稳定同位素分析技术要点[J]. *地学前缘*, 2020, 27(3): 1–13.
- Bai J H, Liu F, Zhang Z F, et al. Key Aspects of Non-Traditional Isotope Analysis[J]. *Earth Science Frontiers*, 2020, 27(3): 1–13.
- [19] 潘旭, 孙子威, 高继苇, 等. 多步浸提法在碳酸盐岩 Sr 同位素分析中的对比及优化[J]. *岩矿测试*, 2023, 42(4): 691–706.
- Pan X, Sun Z W, Gao J W, et al. Comparison and Optimization of Sr Isotope Analysis in Carbonate Rocks by Multiple-Step Leaching Method[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2023, 42(4): 691–706.
- [20] 徐卓, 李力力, 朱留超, 等. Eichrom Sr 树脂用于铀矿浓缩物中铅锶的分离富集研究[J]. *岩矿测试*, 2019, 38(1): 55–61.
- Xu Z, Li L L, Zhu L C, et al. Application of Eichrom Sr Resin to the Separation and Enrichment of Lead and Strontium in Uranium Ore Concentrates[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2019, 38(1): 55–61.
- [21] 戴梦宁, 宗春蕾, 袁洪林. 高 Rb/Sr 岩石样品中 Sr 同位素多接收等离子体质谱分析校正方法研究[J]. *岩矿测试*, 2012, 31(1): 95–102.
- Dai M N, Zong C L, Yuan H L. A Calibration Strategy of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio for Rocks with High Rb/Sr Measured by Multiple Collector-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2012, 31(1): 95–102.
- [22] 陈栩琦, 曾振, 于慧敏, 等. 高精度稳定锶同位素分析方法综述[J]. *高校地质学报*, 2021, 27(3): 264–274.
- Chen X Q, Zeng Z, Yu H M, et al. High Precision Analytical Method for Stable Strontium Isotopes[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2021, 27(3): 264–274.
- [23] 张璐瑶, 陈子谷, 杨学志, 等. 多接收器电感耦合等离子体质谱方法的开发和应用进展[J]. *色谱*, 2021, 39(1): 4–9.
- Zhang L Y, Chen Z G, Yang X Z, et al. Recent Advances in Method Development and Application of Multi-Collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry[J]. *Chinese Journal of Chromatography*, 2021, 39(1): 4–9.
- [24] Zack T, Högmark K J. Laser Ablation Rb/Sr Dating by Online Chemical Separation of Rb and Sr in an Oxygen-Filled Reaction Cell[J]. *Chemical Geology*, 2016, 437: 120–133.
- [25] Xie L, Yang J, Yin Q, et al. High Spatial Resolution *in situ* U-Pb Dating Using Laser Ablation Multiple Ion Counting Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-MIC-ICP-MS)[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2017, 32(5): 975–986.
- [26] Subarkah D, Blades M L, Collins A S, et al. Unraveling the Histories of Proterozoic Shales Through *in situ* Rb-Sr Dating and Trace Element Laser Ablation Analysis[J]. *Geology*, 2022, 50(1): 66–70.
- [27] Laureijs C T, Coogan L A, Spence J. Regionally Variable Timing and Duration of Celadonite Formation in the Troodos Lavas (Cyprus) from Rb-Sr Age Distributions[J]. *Chemical Geology*, 2021, 560: 119995.
- [28] Gorjovsky L, Alard O. Optimisation of Laser and Mass Spectrometer Parameters for the *in situ* Analysis of Rb/Sr Ratios by LA-ICP-MS/MS[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2020, 35(10): 2322–2336.
- [29] 周强, 李金英, 梁汉东, 等. 二次离子质谱 (SIMS) 分析技术及应用进展[J]. *质谱学报*, 2004, 25(2): 113–120.
- Zhou Q, Li J Y, Liang H D, et al. Recent Developments on Secondary Ion Mass Spectrometry[J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2004, 25(2): 113–120.
- [30] Burke W H, Denison R E, Hetherington E A, et al. Variation of Seawater  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  Throughout Phanerozoic time[J]. *Geology*, 1982(10): 516–519.
- [31] Howarth R J, McArthur J M. Statistics for Strontium Isotope Stratigraphy: A Robust LOWESS Fit to the Marine Sr-Isotope Curve for 0 to 206Ma, with Look-up Table for Derivation of Numeric Age[J]. *The Journal of Geology*, 1997, 105(4): 441–456.

- [32] McArthur J M, Howarth R J, Bailey T R. Strontium Isotope Stratigraphy: LOWESS Version 3: Best Fit to the Marine Sr-Isotope Curve for 0-509Ma and Accompanying Look-up Table for Deriving Numerical Age[J]. *The Journal of Geology*, 2001, 109(2): 155-170.
- [33] Veizer J, Ala D, Azmy K, et al.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  Evolution of Phanerozoic Seawater[J]. *Chemical Geology*, 1999, 161(1): 59-88.
- [34] Montañez I P, Banner J L, Osleger D A, et al. Integrated Sr Isotope Variations and Sea-Level History of Middle to Upper Cambrian Platform Carbonates: Implications for the Evolution of Cambrian Seawater  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ [J]. *Geology*, 1996, 24(10): 917-920.
- [35] Li Y, Li C, Guo J. Re-Evaluation and Optimisation of Dissolution Methods for Strontium Isotope Stratigraphy Based on Chemical Leaching of Carbonate Certificated Reference Materials[J]. *Microchemical Journal*, 2020, 154: 104607.
- [36] Claudio G, Anna C, Uwe B, et al. Strontium Isotope Stratigraphic Insights on the End-Permian Mass Extinction and the Permian-Triassic Boundary in the Dolomites (Italy)[J]. *Chemical Geology*, 2022, 605.
- [37] Pathak P, Gupta D K. Strontium Contamination in the Environment[M]. Springer International Publishing, 2020.
- [38] Kong H, Wu J, Li H, et al. Early Paleozoic Tectonic Evolution of the South China Block: Constraints from Geochemistry and Geochronology of Granitoids in Hunan Province[J]. *Lithos*, 2021, 380-381: 105891.
- [39] 黄思静, 黄喻, 兰叶芳, 等. 四川盆地东北部晚二叠世—早三叠世白云岩与同期海水锶同位素组成的对比研究[J]. *岩石学报*, 2011, 27(12): 3831-3842.
- Huang S J, Huang Y, Lan Y F, et al. A Comparative Study on Strontium Isotope Composition of Dolomites and Their Coeval Seawater in the Late Permian-Early Triassic, NE Sichuan Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(12): 3831-3842.
- [40] Chang C, Beckford H O, Ji H. Indication of Sr Isotopes on Weathering Process of Carbonate Rocks in Karst Area of Southwest China[J]. *Sustainability*, 2022, 14(8): 4822.
- [41] 李向东, 魏泽映, 何幼斌, 等. 宁夏香山群徐家圈组顶部薄层石灰岩锶同位素与局限海盆地分析[J]. *地质学报*, 2024, 98(4): 1229-1243.
- Li X D, Wei Z Y, He Y B, et al. Strontium Isotope and Restricted Marine Basin Analysis from Thin-Bedded Limestone at the Top of Xujiajuan Formation, Xiangshan Group in Ningxia, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2024, 98(4): 1229-1243.
- [42] Mehrabi H. Deposition, Diagenesis, and Geochemistry of Upper Cretaceous Carbonates (Sarvak Formation) in the Zagros Basin and The Persian Gulf, Iran[J]. *Minerals*, 2023, 13(8): 1078.
- [43] Chen Z, Yang Y, Dong C, et al. Genesis of Cambrian Dolomites in the Bachu Area, Tarim Basin, NW China: Constraints from Petrology, Geochemistry, and Fluid Inclusions[J]. *Minerals*, 2022, 12(9): 1157.
- [44] 杨明磊, 刘晨虎, 杨伟强, 等. 川东地区寒武系洗象池群下段厚层白云岩特征及成因[J]. *断块油气田*, 2024, 31(4): 599-610.
- Yang M L, Liu C H, Yang W Q, et al. Characteristics and Genesis of Massive Dolostones in the Lower Cambrian Xixiangchi Group, Eastern Sichuan Basin[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2024, 31(4): 599-610.
- [45] Mu J, Zhao S, Brzozowski M, et al. Geology, Geochemistry and Genesis of the World-Class Shizhushan Wollastonite Deposit, Mengshan Area, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2023, 158: 105469.
- [46] Wang Q, Dai S, French D, et al. Hydrothermally-Altered Coal from the Daqingshan Coalfield, Inner Mongolia, Northern China: Evidence from Stable Isotopes of C Within Organic Matter and C-O-Sr in Associated Carbonates[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2023, 276: 104330.
- [47] Kang F, Liu B, Li H, et al. Multistage W-Sn Metallogenic Processes in the Xitian Ore Field, South China: Evolution from Skarn-Type to Vein-Type Mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 2023, 158: 105495.
- [48] 杨柳, 尹萍, 徐耀鉴, 等. 湘西董家河铅锌矿床成矿流体和成矿物质来源: 来自流体包裹体和 C-O-Sr 同位素的制约[J]. *矿物学报*, 2022, 42(5): 557-569.
- Yang L, Yin P, Xu Y J, et al. Sources of Ore-forming Fluids and Materials of the Dongjiahe Lead-Zinc Deposit in the Western Hunan, China: Constraints from Data of Fluid Inclusions and C-O-Sr Isotopes[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2022, 42(5): 557-569.
- [49] 杨志娟, 朱志军, 丁婷, 等. 滇西兰坪盆地膏盐微量元素、同位素地球化学特征及意义[J]. *盐湖研究*, 2024, 32(1): 76-87.
- Yang Z J, Zhu Z J, Ding T, et al. The Trace Elemental and Isotopic Characteristics of Gypsum and Its Significance in the Lanping Basin, Western Yunnan[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2024, 32(1): 76-87.
- [50] 张洁, 贾连奇, 范立勇, 等. 乌审旗地区盐下奥陶系流

- 体来源及其油气意义[J/OL]. 沉积学报 (2024-01-14). <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2023.136>
- Zhang J, Jia L Q, Fan L Y, et al. The Source of the Pre-Salt Ordovician Fluid and Its Significance for Hydrocarbon in Wushenqi Area[J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica (2024-01-14). <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2023.136>
- [51] 李慧莉, 高键, 曹自成, 等. 塔里木盆地顺托果勒低隆起走滑断裂带流体时空分布及油气成藏意义[J]. 地学前缘, 2023, 30(6): 316–328.
- Li H L, Gao J, Cao Z C, et al. Spatial-temporal Distribution of Fluid Activities and Its Significance for Hydrocarbon Accumulation in the Strike-Slip Fault Zones, Shuntuoguole Low-Uplift, Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(6): 316–328.
- [52] Gao Y, Sun Y, Wang D, et al. Geological and Geochemical Constraints on the Origin of the Sr Mineralization in Huayingshan Ore District, Chongqing, South China[J]. Minerals, 2023, 13(2): 279.
- [53] 山俊杰, 毕有益, 邓美洲, 等. 川西坳陷新场气田须二气藏地层水成因研究——水化学和锶同位素证据[J]. 岩石矿物学杂志, 2023, 42(5): 735–744.
- Shan J J, Bi Y Y, Deng M Z, et al. Hydrochemistry and Sr Isotope Constraints on the Genesis of Formation Water in the 2nd Member of Xujiahe Formation Gas Reservoir in Xinchang Gas Field, Western Sichuan Depression[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2023, 42(5): 735–744.
- [54] 陈康, 宋文磊, 高永宝, 等. 阿尔金西段小白河沟地区萤石矿床成因: 来自年代学、稀土元素、Sr-Nd 同位素和流体包裹体的约束[J]. 新疆地质, 2023, 41(S1): 28.
- Chen K, Song W L, Gao Y B, et al. Genesis of the Fluorite Deposit in Xiaobaihegou Area of the Western Altyn Formation: Constraints from Chronology, Rare Earth Elements, Sr-Nd Isotopes and Fluid Inclusions[J]. Xinjiang Geology, 2023, 41(S1): 28.
- [55] 赵辛敏, 高永宝, 燕洲泉, 等. 阿尔金卡尔恰尔超大型萤石矿床成因: 来自年代学、稀土元素和 Sr-Nd 同位素的约束[J]. 西北地质, 2023, 56(1): 31–47.
- Zhao X M, Gao Y B, Yan Z Q, et al. Genesis of Kalqiaer Super-Large Fluorite Zone in Altyn Tagh Area: Chronology, Rare Earth Elements and Sr-Nd Isotopes Constraints[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(1): 31–47.
- [56] 肖晓牛, 邢波, 余新明, 等. 闽中梅仙矿集区丁家山铅锌矿床成矿时代厘定及成矿物质来源: 来自闪锌矿 Rb-Sr 同位素的证据[J]. 地质通报, 2022, 41(11): 2026–2034.
- Xiao X N, Xing B, Yu X M, et al. Determination of Mineralization Age and Ore-forming Materials of the Dingjiashan Pb-Zn Deposit in the Meixian Ore Concentration Area, the Central Fujian Province: Evidence from the Sphalerite Rb-Sr Isotope[J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(11): 2026–2034.
- [57] 高键, 李慧莉, 何治亮, 等. 川东南平桥地区寒武系洗象池群多元复合成藏过程及其勘探启示[J]. 地学前缘, 2023, 30(6): 263–276.
- Gao J, Li H L, He Z L, et al. Multi-Stage Hydrocarbon Accumulation in Cambrian Xixiangchi Group, Pingqiao Area, Southeastern Sichuan and Its Implications for Hydrocarbon Exploration[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(6): 263–276.
- [58] 陆俐合, 于海燕, 蓝叶, 等. 广西大化县层控型透闪石玉成矿带不同岩体地球化学及锶同位素特征对比研究[J/OL]. 桂林理工大学学报 (2023-12-13). <https://link.cnki.net/urlid/45.1375.n.20231213.1157.002>
- Lu L H, Yu H Y, Lan Y, et al. Comparative Study on Geochemistry and Strontium Isotope Characteristics of Different Rock Bodies in Stratified Tremolite Jade Metallogenic Belt in Dahua, Guangxi [J/OL]. Journal of Guilin University of Technology (2023-12-13). <https://link.cnki.net/urlid/45.1375.n.20231213.1157.002>
- [59] 唐春雷, 申豪勇, 赵春红, 等. 古堆泉域岩溶地下水水化学特征及成因[J]. 环境科学, 2023, 44(9): 4874–4883.
- Tang C L, Shen H Y, Zhao C H, et al. Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in Gudui Spring Catchment[J]. Environmental Science, 2023, 44(9): 4874–4883.
- [60] Shand P, Darbyshire D P F, Love A J, et al. Sr Isotopes in Natural Waters: Applications to Source Characterisation and Water-Rock Interaction in Contrasting Landscapes[J]. Applied Geochemistry, 2009, 24: 574–586.
- [61] 张卓, 柳富田, 陈社明. 氢氧、锶钙和锂硼同位素在高氟地下水研究中的应用[J]. 华北地质, 2023, 46(3): 49–56.
- Zhang Z, Liu F T, Chen S M. Review on the Application of H, O, Sr, Ca, Li and B Isotopes in the Research of High-Fluoride Groundwater[J]. North China Geology, 2023, 46(3): 49–56.
- [62] 张松涛, 谢浩, 梁永平, 等. 同位素技术在古堆泉岩溶水保护中的应用[J]. 地质科技通报, 2023, 42(4): 147–153.
- Zhang S T, Xie H, Liang Y P, et al. Application of Isotope Technology to Protecting Karstic Water in the

- Gudui Spring Area[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42(4): 147–153.
- [63] Herrera C, Godfrey L, Urrutia J, et al. Origin of Old Saline Groundwater in the Deep Coastal Formations of the Atacama Desert Region: Consideration of Lithium, Boron, Strontium and Uranium Isotopes Contents[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 624: 129919.
- [64] 李小倩, 周爱国, 刘存富, 等. 河北平原深层地下水中氟含量与锶同位素组成的关系研究[J]. *水文*, 2008, 28(4): 38–42.
- Li X Q, Zhou A G, Liu C F, et al. Relation Between F<sup>-</sup> Content and Strontium Isotopes Composition in Deep Groundwater of Hebei Plain[J]. *Journal of China Hydrology*, 2008, 28(4): 38–42.
- [65] 顾慰祖. 同位素水文学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- Gu W Z. Isotope Hydrology[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [66] Miyajima Y, Jakubowicz M, Dopieralska J, et al. Discharge Timing and Origin of Fluids at Methane Seeps in the Late Cretaceous Subduction Zone of Hokkaido, Japan: Coupling U-Pb Calcite Dating with Sr-Nd Isotope Analysis[J]. *Chemical Geology*, 2023, 632: 121553.
- [67] Herrera C, Urrutia J, Gamboa C, et al. Evaluation of the Impact of the Intensive Exploitation of Groundwater and the Mega-Drought Based on the Hydrochemical and Isotopic Composition of the Waters of the Chacabuco—Polpaico Basin in Central Chile[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 895: 165055.
- [68] Mei A, Wu X, Zeng Y, et al. Formation Processes of Groundwater in a Non-Ferrous Metal Mining City of China: Insights from Hydrochemical and Strontium Isotope Analyses[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, 31(10): 15716–15732.