

我国近十年Sm-Nd同位素年代学研究进展

傅旋霓

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2023年7月24日; 录用日期: 2023年8月29日; 发布日期: 2023年9月5日

摘要

同位素年代学是地球科学中非常重要的分支学科, 本世纪见证了非传统稳定同位素地球化学的诞生和快速发展。文章对非传统稳定同位素Sm-Nd法测年的特征以及近十年该方法在我国矿床定年方面的应用展开了探讨。发现该方法在测定矿物成矿年龄以及成矿物质来源方面都取得了巨大的成果, 并能对前人已有研究成果进行补充。

关键词

非传统稳定同位素, Sm-Nd同位素体系, 成矿年龄

The Progress of Sm-Nd Isotope Chronology Studies in China in the Last Decade

Xuanni Fu

School of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: Jul. 24th, 2023; accepted: Aug. 29th, 2023; published: Sep. 5th, 2023

Abstract

Isotope geochronology is a highly important branch of Earth science, and this century has witnessed the birth and rapid development of non-traditional stable isotope geochemistry. This article explores the characteristics of non-traditional stable isotope Sm-Nd dating and its application in ore deposit dating in China over the past decade. It has been found that this method has achieved significant results in determining the age of mineralization and the origin of ore-forming materials, and can complement previous research findings.

Keywords

Unconventional Stable Isotope, Sm-Nd Isotope Systematics, Metallogenic Geochronology

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

同位素地球化学是地质学领域的重要研究手段。它利用放射性同位素衰变和第一性原理等地球科学理论, 提供了定量化的方法。同位素地球化学在地质过程中提供了矿物年代信息, 并可以追踪物质的来源以及演变过程。因此, 在地球科学的许多领域都有广泛的应用。非传统稳定同位素相对于传统稳定同位素地球化学而言是一个新兴的分支学科。传统稳定同位素地球化学是主要研究 H、C、O、S 等元素的同位素体系, 而非传统稳定同位素地球化学则是研究 Fe、Cu、Zn、Li、Se、Hg、Mg 等元素的同位素体系, 涵盖了同位素地球化学作为示踪剂的应用以及同位素地球化学过程的模拟实验等内容[1]。

稀土元素(REE)通常由镧(La)、铈(Ce)、镨(Pr)、钕(Nd)、钷(Pm)、钐(Sm)、铕(Eu)、钆(Gd)、铽(Tb)、镝(Dy)、钬(Ho)、铒(Er)、铥(Tm)、镱(Yb)、镱(Lu)这 15 种镧系元素组成。由于 Sc 元素和 Y 元素与镧系元素的化学性质相似, 因此也被归类为稀土元素之列。近年来, 随着科学技术的飞速发展, 稀土元素在许多领域中得到了越来越广泛的应用。由于稀土元素的关键作用, 它已成为世界公认的战略资源[2] [3]。

稀土元素中的 La、Ce、Nd、Sm、Eu、Gd、Dy、Er、Yb 和 Lu 都有一个及一个以上的天然稳定同位素, 故它们的稳定同位素组成具有非常大的研究潜力和价值。然而, 目前针对这些体系开展的稳定同位素地球化学研究颇为稀少, 主要集中在地质年代学与成矿物质来源等研究领域。这是因为不同元素之间的同质异位数干扰普遍存在, 并且这些元素的化学性质非常相似, 很难彻底分离[4], 这增加了对这些体系进行高精度稳定同位素组成测试的难度。同位素稀释-热表面电离质谱法(ID-TIMS)是分析 Sm-Nd 同位素的常用技术, 随着溶液进样多接收电感耦合等离子体质谱(SN-MC-ICPMS)的发展, 很大程度提高了 Sm-Nd 同位素分析效率。该方法操作简单便捷、分析速度快, 能够实现高精度 Nd 同位素测试, 弥补了经典 TIMS 方法的缺陷[5]。本文探讨了 Sm-Nd 同位素定年的特征以及近十年该方法在我国矿床定年方面的应用。

2. Sm-Nd 同位素定年特征

Sm 与 Nd 元素在自然界中均有 7 个同位素, 并且不同的同位素在各自然体系中保持一定的比例(表 1)。 ^{147}Sm 、 ^{148}Sm 和 ^{149}Sm 具有放射性, 通过 α 衰变转变成 ^{143}Nd 、 ^{144}Nd 和 ^{144}Nd 。由于 ^{148}Sm 衰变半衰期十分长(约 10^7 Ga), 利用现有技术条件无法测得其子体同位素的变化, 故目前在地质应用上尚无价值。因此仅 ^{147}Sm 能用于年龄测定。 ^{144}Nd 也具有放射性, 通过 α 衰变转变成 ^{140}Ce , 但是由于其极长的半衰期(2.1×10^{15} a), 放射性所引起的变化可以忽略, 实际上一般作为稳定同位素来研究。通常所指的 Sm-Nd 测年法实际上是 ^{147}Sm - ^{143}Nd 同位素体系法, 利用的是 ^{147}Sm 变成 $^{143}\text{Nd} + \alpha$ 的核衰变过程。

Sm-Nd 年龄计算方程[6]:

$$\frac{{}^{143}\text{Nd}}{{}^{144}\text{Nd}} = \frac{{}^{143}\text{Nd}}{{}^{144}\text{Nd}} + \frac{{}^{147}\text{Sm}}{{}^{144}\text{Nd}} \times (\ell^{\lambda t} - 1) \quad (1)$$

式中 t 为样品形成年龄, λ 为 ^{147}Sm 的衰变常数。 ^{147}Sm 通过 α 衰变为 ^{143}Nd , 半衰期为 106 Ga, 由于 ^{147}Sm 半衰周期很长, 因此 Nd 同位素组成的变化很小。Sm 和 Nd 都是中间稀土元素, 稀土元素的显著特征就是随着原子序数的增加, 内部电子层被填充, 特别是 4f 层和 5d 层非常容易被填满。通常, 当原子序数增加时, 电子数就会被添加到最外电子层中, 最外电子层的电子数决定了元素的化学性质。由于稀土元素的最外电子层具有相同的构型, 因此它们的化学性质非常相似。

Sm-Nd 系统在岩石年代学中具有重要的应用价值。相比于 Rb-Sr 系统, Sm-Nd 系统能够弥补其在某些方面的不足。在镁铁质和超镁铁质岩石中, Sm/Nd 比值的变化范围通常最大。相比之下, 在酸性岩石中, Sm/Nd 的变化范围最小, 这与 Rb/Sr 比值的情况恰好相反。石榴石具有较高的 Sm/Nd 比值, 因此在石榴石或包含石榴石的样品中可以获得较大的 Sm/Nd 比值范围。如果无法获取石榴石中较高的 Sm/Nd 比值, 斜长石和辉石等岩石中也可以获得理想的 Sm/Nd 比值。与其他同位素年代学方法相比, Sm/Nd 的最大优势就是这些元素缺乏流动性, 使得 Sm-Nd 同位素系统在蚀变和低级变质作用中相对稳定, 并且受变质和蚀变等外界因素的干扰非常小。另外由于 ^{147}Sm 的半衰期很长, Sm-Nd 法适合测定地质年龄比较久远的古老地质体。它已经广泛应用于前寒武纪超基性和基性岩体、蛇绿岩套系列岩体及镁铁质岩体的定年[7] [8]。

Table 1. Isotopic composition of Sm and Nd
表 1. Sm、Nd 同位素组成(据梁培基等[9], 2014)

Sm	丰度/%	Nd	丰度/%
^{144}Sm	3.16	^{142}Nd	27.09
^{147}Sm	15.07	^{143}Nd	12.14
^{148}Sm	11.27	^{144}Nd	23.83
^{149}Sm	13.84	^{145}Nd	8.29
^{150}Sm	7.47	^{146}Nd	17.26
^{152}Sm	26.63	^{148}Nd	5.74
^{154}Sm	22.56	^{150}Nd	5.65
Sum	100	Sum	100

3. 我国近十年 Sm-Nd 同位素法测年研究进展

不少学者已经成功地利用 Sm-Nd 同位素测定了含 Ca 矿物, 例如萤石, 白钨矿, 电气石的等时线年龄。方解石和萤石为常见的脉石矿物, 研究表明稀土元素进入方解石或者萤石晶体后, 除晶体溶解外, 极少有其他过程会破坏稀土元素配分模式[10]。因此, 方解石和萤石具备进行 Sm-Nd 等时线定年的潜力。为探讨东莫扎抓矿床和莫海拉亨矿床的成矿时代问题, 田世洪等(2009)采用共生矿物组合闪锌矿与黄铁矿 Sm-Nd 等时线方法对东莫扎抓矿床进行成矿时代测定(图 1), 采用单矿物萤石和共生矿物组合方解石与萤石 Sm-Nd 等时线方法对莫海拉亨矿床进行成矿时代测定(图 2), 认为这两个矿床的成矿时代大体一致。由此可见, 这两个矿床可能为同时期同源的成矿作用的产物[11]。王晓地等(2010)对后长川白钨矿进行了 Sm-Nd 等时线定年分析, 结果显示其成矿时代为加里东末期, 这与祁连加里东晚期构造热事件相关[12]。王永磊等(2012)通过对湘西渣滓溪矿区的白钨矿进行 Sm-Nd 同位素测定, 将其主成矿年龄定为晚三叠纪[13]。同样地, 彭建堂等(2021)人利用 Sm-Nd 同位素分析包金山金钨矿床金钨矿的定年结果表明, 矿床是晚三叠世形成的。Sr-Nd 同位素示踪表明, 包金山矿区白钨矿的 Sr-Nd 同位素组成与新元古界板溪群和

紫云山岩体的主体存在显著差异, 且与紫云山补体花岗岩较为接近, 表明本区金钨成矿可能参与了紫云山晚期岩浆活动[14]。

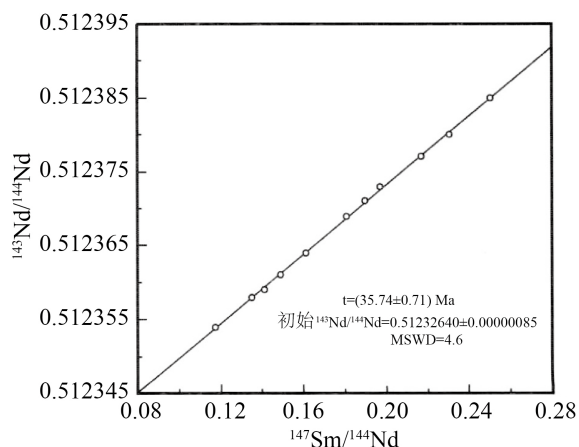


Figure 1. Sm-Nd isochron of the intergrowth mineral associations sphalerite and pyrite from the Dongmozhazhua Pb-Zn deposit

图 1. 东莫扎抓铅锌矿床共生矿物组合闪锌矿与黄铁矿 Sm-Nd 等时线图解(据田世洪等[11], 2009)

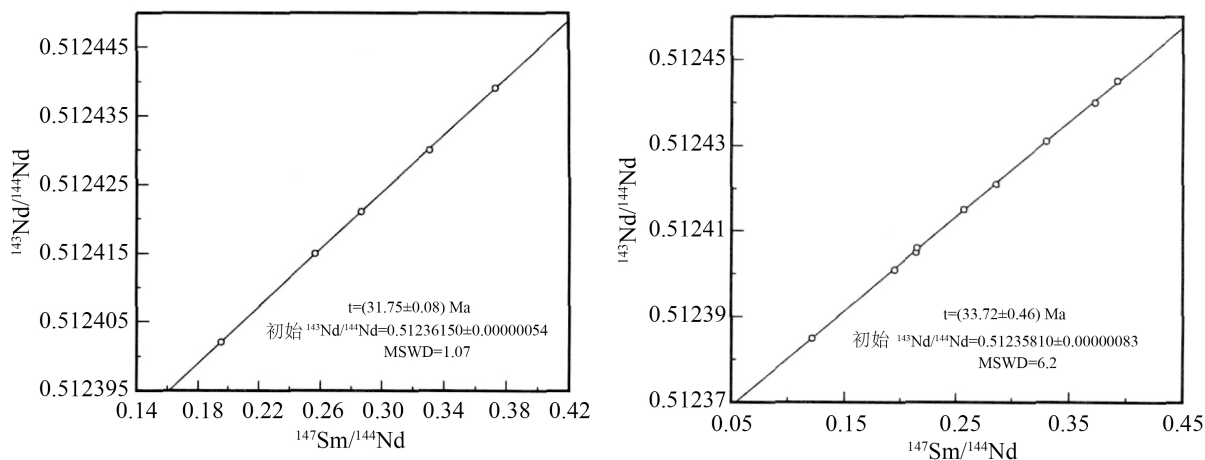


Figure 2. Sm-Nd isochron of fluorite (left) and the intergrowth mineral associations fluorite and calcite (right) from the Mo-hailaheng Pb-Zn deposit

图 2. 莫海拉亨铅锌矿床萤石(左)与共生矿物组合萤石与方解石(右) Sm-Nd 等时线图解

石榴子石的 Sm-Nd 等时线年龄测定也被广泛应用于成矿研究。祝向平等(2010)人通过测定晚期石榴子石的 Sm-Nd 年龄, 确定了黑牛洞矿床最后一期中高级变质作用的年代, 并与形成富矿体的脆韧性变形作用同时期[15]。洪为等(2012)人利用石榴子石的 Sm-Nd 等时线年龄信息, 确定了新疆西天山查岗诺尔铁矿床的成矿时代, 并指示了高温热液蚀变的时间。研究表明, 主要磁铁矿体的形成时代为早石炭世晚期, 与火山活动几乎同期或稍晚。这表明成矿作用和高温热液蚀变可能与大哈拉军山组火山岩喷发后的岩浆期后热液与下伏大理岩的接触交代反应密切相关[16]。

Sm-Nd 同位素还能用于本身含稀土副矿物的定年。李超等(2022)人利用飞秒激光-多接收等离子体

联用的方法,对河北兴隆麻地稀有金属矿床中磷灰石、榍石、独居石等含稀土副矿物进行了 Sm-Nd 微区原位同位素分析。通过这种方法,不仅能够获得成矿时代信息,还能够从微观尺度揭示成矿物质来源信息,以及岩浆和热液的起源及演化过程[17]。

此外,Sm-Nd 同位素还能用于月球样品的定年分析,例如徐玉明等(2022)人使用 Sm-Nd 同位素体系研究了月壳岩石样品的形成时间。他们发现月海玄武岩源区、FAN (岩浆洋冷凝的直接产物)、urKREEP (岩浆洋分离结晶最后阶段的残余熔体)镁质岩套以及碱质岩套可能形成于约 4.35 亿年前,具有相似的年龄。然而,研究人员指出,对于这个时代的岩浆事件所代表的动力学过程仍需要进一步探究[18]。

Sm-Nd 同位素定年法作为一种新兴的测年方法,能够在成矿研究中弥补过去实验的不足。例如,沈能平(2009)人通过对徐家山铈矿床与辉铈矿共生的成矿期方解石进行 Sm-Nd 同位素研究,发现该矿床的铈成矿作用发生于加里东期,这对之前认为该矿床形成于中生代燕山期的观点提出了质疑[19]。侯广顺等(2010)人统计秦岭-大别造山地区的 Sm/Nd 组成参数及其特征,获得了该地区陆壳基底和区域花岗岩类的 Sm/Nd 平均值,并讨论了与 T_{2DM} 二阶段模式年龄的差异,提出了一种检验地壳丰度的新方法[20]。胡文洁等(2012)人利用碳酸岩中的方解石进行 Sm-Nd 等时线年龄测定,并结合已有研究成果重新确定了牦牛坪稀土矿床碳酸岩的成岩年龄和矿床的成矿年龄[21]。

4. 结语

本文以 Sm-Nd 同位素定年为例总结了过去十年来我国非传统稳定同位素定年的特征以及研究取得的相关成果,不仅能对萤石、白钨矿、电气石与石榴子石等含 Ca 岩石的形成年龄进行较为准确的分析,还能弥补已有实验的不足,对于方解石的成岩年龄与成矿年龄分析提供了新的方法和角度,并且成为了研究月球如何形成与演变过程的关键工具之一。但是目前由于测试技术的限制,我国对于 Sm-Nd 等时线定年的研究方法并不普及,未来还需在测定方法上有所提高。同位素地球化学的研究并不只是实验室内年龄数据的获得,还必须以地质学背景为基础,与地质相关资料相结合才能获得有地质意义的年龄数据,进而对所获得年龄数据的地质意义给予科学的解释。

参考文献

- [1] 朱祥坤,王跃,闫斌,等. 非传统稳定同位素地球化学的创建与发展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2013, 32(6): 651-688.
- [2] Li, Y.H.M., Zhao, W.W. and Zhou, M.F. (2017) Nature of Parent Rocks, Mineralization Styles and Ore Genesis of Regolith-Hosted REE Deposits in South China: An Integrated Genetic Model. *Journal of Asian Earth Sciences*, **148**, 65-95. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.08.004>
- [3] 王登红,赵芝,于扬,等. 离子吸附型稀土资源研究进展、存在问题及今后研究方向[J]. 岩矿测试, 2013, 32(5): 796-802.
- [4] 韦刚健,黄方,马金龙,等. 近十年我国非传统稳定同位素地球化学研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2022, 41(1): 1-44, 223.
- [5] 丛宝华,曹征,潘佩芬. 浅析同位素测年方法及其应用[J]. 中国西部科技, 2011, 10(11): 54-55.
- [6] 谈生祥,杨延兴,李善平,等. 托莱牧场中-新元古代火山岩 Sm-Nd 等时线定年及地质意义[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2011, 29(4): 80-85.
- [7] 周家云,郑荣才,朱志敏,等. 四川会理拉拉铜矿辉长岩群地球化学与 Sm-Nd 同位素定年[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2009, 28(2): 111-122.
- [8] 李随民,魏明辉,李森文,等. 张家口梁家沟铅锌银矿床 Rb-Sr 和 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义[J]. 中国地质, 2014, 41(2): 529-539.
- [9] 梁培基,王广,武兴龙,等. Sm-Nd 同位素法地质年龄的测定[J]. 科学与财富, 2014(11): 240.
- [10] 彭建堂,符亚洲,袁顺达,等. 热液矿床中含钙矿物的 Sm-Nd 同位素定年[J]. 地质论评, 2006, 52(5): 662-667.

- [11] 田世洪, 杨竹森, 侯增谦, 等. 玉树地区东莫扎抓和莫海拉亨铅锌矿床 Rb-Sr 和 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 2009, 28(6): 747-758.
- [12] 王晓地, 汪雄武, 孙传敏. 甘肃后长川钨矿白钨矿 Sm-Nd 定年及稀土元素地球化学[J]. 矿物岩石, 2010, 30(1): 64-68.
- [13] 王永磊, 陈毓川, 王登红, 等. 湖南渣滓溪 W-Sb 矿床白钨矿 Sm-Nd 测年及其地质意义[J]. 中国地质, 2012, 39(5): 1339-1344.
- [14] 彭建堂, 张东亮, 胡瑞忠, 等. 湘西渣滓溪钨铋矿床白钨矿的 Sm-Nd 和 Sr 同位素地球化学[J]. 地质学报, 2008, 82(11): 1514-1521.
- [15] 祝向平, 冯孝良, 姚鹏, 等. 四川里伍黑牛洞矿床中石榴石的 Sm-Nd 同位素年龄及其意义[J]. 沉积与特提斯地质, 2010, 30(1): 85-88.
- [16] 洪为, 张作衡, 李华芹, 等. 新疆西天山查岗诺尔铁矿床成矿时代——来自石榴子石 Sm-Nd 等时线年龄的信息[J]. 矿床地质, 2012, 31(5): 1067-1074.
- [17] 李超, 孙鹏程, 孟会明, 等. 一种新的稀有金属矿床定年技术: 微区原位 Sm-Nd 定年[J]. 岩石学报, 2022, 38(2): 445-454.
- [18] 徐玉明, 王桂琴, 杨振, 等. Sm-Nd 同位素体系在月球早期演化中的研究进展[J]. 地球化学, 2022, 51(6): 716-727.
- [19] 沈能平, 彭建堂, 袁顺达, 等. 湖北徐家山铋矿床方解石 Sm-Nd 同位素体系——兼论其加里东期成矿的可能性[C]//中国科学院地球化学研究所. 中国矿物岩石地球化学学会第 12 届学术年会论文集. 《矿物岩石地球化学通报》编辑委员会, 2009: 240.
- [20] 侯广顺, 曹树凯, 杨贺杰. 秦岭-大别造山带区域地壳 Sm-Nd 同位素组成及其意义[J]. 甘肃地质, 2010, 19(1): 15-20.
- [21] 胡文洁, 田世洪, 王素平, 等. 四川牦牛坪稀土矿床碳酸岩 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义[J]. 矿产与地质, 2012, 26(3): 237-241.