

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2024.01.013

地质样品 Sr 同位素比值测定计量比对结果评价

卢山松, 杨红梅, 梅玉萍, 张春红, 段桂玲, 张利国*

LU Shan-Song, YANG Hong-Mei, MEI Yu-Ping, ZHANG Chun-Hong,
DUAN Gui-Ling, ZHANG Li-Guo*

中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 湖北 武汉 430205

Wuhan Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Central South China), Wuhan 430205, Hubei, China

摘要: Sr 同位素比值 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 测试技术作为一项成熟方法和常规示踪技术手段被广泛应用于地球科学、环境科学、考古学等研究中, 但该测试技术至今并未开展相应的计量比对工作。为评价各实验室 Sr 同位素比值检测水平和能力, 本文组织开展了地质样品 Sr 同位素比值测定专项计量比对活动。通过对参加实验室检测结果进行统计分析, 评价各实验室的检测能力。结果表明: 参比实验室检测结果的满意率为 85.7%, 仅一个实验室的检测结果为不满意, 参比实验室整体检测能力和技术水平良好, 但仍然需要重视高 Rb/Sr 比值样品分离有效性的问题。

关键词: Sr 同位素比值; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$; 计量比对

中图分类号: P597+.1

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2024)01-0171-08

Lu S S, Yang H M, Mei Y P, Zhang C H, Duan G L and Zhang L G. 2024. Evaluation of the Inter-laboratory Comparison Results for Sr Isotope Ratio Determination of Geological Samples. *South China Geology*, 40(1): 171–178.

Abstract: As a mature method and conventional tracer technology, strontium isotope ratio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) testing technology is widely used in geology, environment, archaeology and other research, but there has not been a countrywide intra-lab comparison work for this analysis method for a rather long time. To evaluate the strontium isotope ratio testing ability of laboratories in various laboratory, a comparison activity for geological samples has been organized aiming for the strontium isotope ratio determination by statistically analyzing the test results of the participating laboratories. The results show that, among all the data of the yielded Sr isotopes value given from 7 laboratories, 85.7% of them have met the requirement except only one laboratory with unsatisfactory results, indicating that the overall testing capacity and technical level of the participating laboratories are good, but more attention should be paid to the issue of the validity of the separation of samples with high Rb/Sr ratio.

Key words: strontium isotope ratio; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$; measurement comparison

收稿日期: 2023-9-18; 修回日期: 2023-10-30

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(42003017); 湖北省市场监督管理局 2022 年专项计量比对计划

第一作者: 卢山松(1986—), 男, 高级工程师, 主要从事同位素分析测试和示踪研究, E-mail: lushansong@mail.cgs.gov.cn

通讯作者: 张利国(1979—), 男, 高级工程师, 主要从事同位素分析测试和示踪研究, E-mail: zhangliguo@mail.cgs.gov.cn

上世纪 50 年代以来, Sr 同位素比值被广泛应用于地球科学、环境科学、考古学研究中, 并在 Rb-Sr 同位素地质年代学(刘宝山等, 2022; 夏杰等, 2022; Wang C Y et al., 2022; 刘明军等, 2023; Wang M Z et al., 2023)、成岩成矿物质来源示踪(刘军港等, 2019; Liu S J et al., 2023)、古环境重建(Li T G et al., 2015; 钟巍等, 2018; Zou J J et al., 2023)、特色农产品溯源(Yin H M et al., 2020; Sun Y Y et al., 2023)、水资源调查与评价(苏春利等, 2019; 袁利娟等, 2021; 高胜强等, 2022)、污染物来源示踪(Lin C Q et al., 2016; He X D et al., 2022)、古人类溯源(Cucina and Ortega-Muñoz, 2022; Zhou L G et al., 2023)等众多领域中取得很好的应用成果。尤其是岩石样品 Sr 同位素比值法已作为常规示踪手段广泛应用于地质行业。

岩石样品 Sr 同位素比值($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)测试技术目前有两项标准方法, 分别是地质矿产行业标准 DZ/T 0184.4-1997(中华人民共和国地质矿产部, 1997)和国家推荐标准 GB/T 17672-1999(国家质量技术监督局, 1999)。两项标准发布实施虽然已超过二十年, 但由于受三级净化的超高实验环境要求和价格高昂的高精度进口设备制约, 我国能开展同位素比值分析的实验室数量一直有限。

近年来, 随着社会经济的快速发展, 高等院校、科研院所等相继建成了高水准同位素分析实验室, 尤其是第三方检测公司的迅速崛起, 极大推动了 Sr 同位素比值的测定及应用。但各实验室独立检测, 实验室间比对工作开展甚少, 多家实验室间计量比对工作开展情况尚处于空白, 各实验室出具的 Sr 同位素分析结果是否准确可靠, 还有待验证。

为验证各地质实验室 Sr 同位素比值的检测能力, 2022 年 3 月到 2022 年 12 月中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心)(以下简称武汉地质调查中心)作为主导实验室组织实施了“地质样品 Sr 同位素比值测定”计量比对活动, 全国共有 7 家实验室参与了此次比对。本文将比对结果进行汇总分析, 对样品的均匀性、稳定性及测试结果准确度进行了评述, 结果反馈到各参与实验室, 敦促各检测实验室优化其检测流程, 共同提高 Sr 同位素比值分析水平。

1 比对样品

1.1 比对样品的来源

本次比对所用到的岩石样品来源于武汉地质调查中心已完成的地质调查项目《La-Ce 法标准物质研制》并按照 JJF 1006-1994《一级标准物质技术规范》(国家技术监督局, 1994)的要求进行采集和制备。该样品为微晶玄武岩, 主体部分具间隐结构, 无蚀变、相对均一, 共采集约 34 kg 样品。详细的样品制备过程可参见杨红梅等(2009)。

1.2 比对样品均匀性和稳定性

比对样品按照 CNAS-GL003: 2018《能力验证样品均匀性和稳定性评价指南》(中国合格评定国家认可委员会, 2018)的相关要求, 从分装完成的小瓶中随机抽取 10 瓶, 瓶内检测 2 次(表 1), 采用单因素方差分析法(F 检验法)进行均匀性检验(表 2)。在 5 个月内分 3 个时间点对随机抽取的 8~10 件样品进行测试(表 3), 并采用 t 检验法对样品进行稳定性检验(表 4)。检测方法均为 DZ/T 0184.4-1997(中华人民共和国地质矿产部, 1997)。统计结果表明, 样品的均匀性($F < F_{0.05(9,10)}$, $S_s < 0.3\sigma_{pt}$, 表 2)良好。样品在 5 个月的测试周期内是稳定的($t < t_{0.05(n-1)}$, $|\bar{x} - \bar{y}| < 0.3\sigma_{pt}$, 表 4), 说明样品的均匀性和稳定性均符合要求。

表 1 比对样品均匀性测试结果

Table 1 Homogeneity test results of comparison sample

序号	样品编号	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	
		第一次测试结果	第二次测试结果
1	EM-088	0.706483±0.000007	0.706452±0.000011
2	EM-219	0.706498±0.000009	0.706462±0.000012
3	EM-361	0.706477±0.000006	0.706476±0.000014
4	EM-428	0.706495±0.000011	0.706470±0.000011
5	EM-543	0.706466±0.000006	0.706439±0.000005
6	EM-697	0.706468±0.000007	0.706400±0.000009
7	EM-776	0.706490±0.000012	0.706468±0.000011
8	EM-752	0.706454±0.000009	0.706445±0.000008
9	EM-886	0.706494±0.000010	0.706474±0.000006
10	EM-892	0.706469±0.000005	0.706478±0.000004
总平均值		0.706468	

表 2 比对样品均匀性检验分析结果

Table 2 Homogeneity test analysis results of comparison sample

方差来源	自由度	平方和	均方	<i>F</i>	<i>F</i> _{0.05(9,10)}
样品间	9	5.145×10 ⁻⁹	5.71667×10 ⁻¹⁰	1.23	3.02
样品内	10	4.641×10 ⁻⁹	4.641×10 ⁻¹⁰		

注:均匀性标准偏差 $S_s=0.0000073$,能力评定标准差 $\sigma=NIQR=0.000050$,检验值 $0.3\sigma_{pr}=0.000015$.

表 3 比对样品稳定性测试结果

Table 3 Stability test results of comparison sample

测试日期:2022 年 6 月		测试日期:2022 年 9 月		测试日期:2022 年 10 月	
样品编号	测试结果	样品编号	测试结果	样品编号	测试结果
EM-088	0.706533±0.000007	EM-088	0.706452±0.000011	EM-361	0.706477±0.000006
EM-219	0.706492±0.000016	EM-219	0.706462±0.000012	EM-428	0.706495±0.000011
EM-361	0.706439±0.000017	EM-361	0.706476±0.000014	EM-543	0.706466±0.000006
EM-428	0.706455±0.000009	EM-428	0.706470±0.000011	EM-697	0.706468±0.000007
EM-543	0.706413±0.000012	EM-543	0.706439±0.000005	EM-776	0.706490±0.000012
EM-697	0.706507±0.000006	EM-697	0.706400±0.000009	EM-752	0.706454±0.000009
EM-776	0.706497±0.000009	EM-776	0.706468±0.000011	EM-886	0.706494±0.000010
EM-892	0.706476±0.000013	EM-752	0.706445±0.000008	EM-892	0.706469±0.000005
		EM-886	0.706474±0.000006		
		EM-892	0.706478±0.000004		
稳定性检验总平均值			0.706469		

表 4 比对样品稳定性检验分析结果

Table 4 Stability test analysis results of comparison sample

测试日期	平均值	标准偏差 <i>S</i>	测试次数 <i>n</i>	<i>t</i>	<i>t</i> _{0.05, <i>n</i>-1}
2022 年 6 月	0.706477	0.000039	8	0.689	2.365
2022 年 9 月	0.706456	0.000024	10	1.397	2.262
2022 年 10 月	0.706477	0.000015	8	1.815	2.365
参考值	0.706467				
均匀性检验平均值 $\bar{x}=0.706468$;稳定性检验平均值 $\bar{y}=0.706469$					
$ \bar{x}-\bar{y} =0.000001$; $0.3\sigma_{pr}=0.000015$					

2 比对样品的参考值

本次比对采用多个参比实验室的量值得到参考值。由于参加比对的实验室较少,其参考值的准确度需要进一步确认。

比对项目实施前,比对样品已在本单位和其它 5 家实验室共获得了 41 个数据,数据及统计结果见表 5。采用偏态系数和峰态系数法(国家市场监督管理总局, 2022)对其进行正态分布检验,结果

(表 6)显示所有数据的偏态数据 *A* 小于 95%置信概率下的 *A*₁ 值,峰态系数 *B* 介于 95%置信概率下的 *B*₁-*B*₁' 区间内,表明测试结果呈正态分布,算术平均值为其最佳估计值。

根据表 5,武汉地质调查中心测试结果的平均值为 0.706477(标准偏差:0.000024),其它 5 家实验室测试结果的平均值为 0.706452(标准偏差:0.000027),所有测试结果的平均值为 0.706467(标准偏差:0.000028)。本单位测试结果、其它 5 家实验室测试结果及所有数据的平均值与稳

健统计法获得的中位值在误差范围内一致,表明通过人员比对、仪器比对、方法比对、实验室间比对等多种措施,确认比对样品的参考值准确、可靠。

表 5 外检实验室及本实验室比对样品测试结果
Table 5 Test results of comparison samples from external and our laboratory

测试单位或人员	仪器	方法	样品编号	结果
核工业北京地质研究院分析测试研究中心	TIMS	GB/T17672-1999	EM-088	0.706428±0.000018
			EM-428	0.706473±0.000018
			EM-892	0.706500±0.000016
中国地质调查局天津地质调查中心 (华北地质科技创新中心)	TIMS	DZ/T0184.4-1997	EM-088	0.706433±0.000005
			EM-428	0.706459±0.000009
			EM-892	0.706471±0.000004
南京聚谱检测科技有限公司	MC-ICP-MS	非标方法	EM-088	0.706441±0.000004
			EM-428	0.706433±0.000004
			EM-892	0.706439±0.000003
武汉上谱分析科技有限责任公司	MC-ICP-MS	非标方法	EM-088	0.706426±0.000009
			EM-428	0.706444±0.000013
			EM-776	0.706411±0.000010
			EM-892	0.706422±0.000009
中国科学院地球化学研究所	MC-ICP-MS	非标方法	EM-088	0.706456±0.000004
			EM-428	0.706487±0.000004
			EM-776	0.706487±0.000005
			EM-892	0.706481±0.000005
武汉地质调查中心测试人员 1	TIMS	DZ/T0184.4-1997	EM-088	0.706533±0.000007
			EM-219	0.706492±0.000016
			EM-361	0.706439±0.000017
			EM-428	0.706455±0.000009
			EM-543	0.706413±0.000012
			EM-697	0.706507±0.000006
			EM-776	0.706497±0.000009
			EM-892	0.706476±0.000013
武汉地质调查中心测试人员 2	TIMS	DZ/T0184.4-1997	EM-088	0.706488±0.000007
			EM-219	0.706478±0.000007
			EM-361	0.706480±0.000006
			EM-428	0.706496±0.000006
			EM-543	0.706469±0.000010
			EM-697	0.706477±0.000006
			EM-776	0.706498±0.000007
			EM-892	0.706485±0.000006
武汉地质调查中心测试人员 3	TIMS	DZ/T0184.4-1997	EM-088	0.706459±0.000009
			EM-219	0.706486±0.000007
			EM-361	0.706466±0.000025
			EM-428	0.706471±0.000008
			EM-543	0.706495±0.000007
			EM-697	0.706454±0.000013
			EM-776	0.706464±0.000007
			EM-892	0.706463±0.000008

注:MC-ICP-MS 为多接收电感耦合等离子体质谱仪;TIMS 为表面热电离子质谱仪.

表 6 比对样品 Sr 同位素比值多家实验室数据的偏态和峰态系数检验结果

Table 6 Deflection-state and Kurtosis coefficients testingresults of multiple laboratory data for Sr isotope ratios of comparison samples

检验参数	m ₂	m ₃	m ₄	A	B	置信概率P	A ₁	B ₁ -B' ₁
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	7.51×10 ⁻¹⁰	-3.87×10 ⁻¹⁵	1.45×10 ⁻¹⁸	0.188	2.568	0.95	0.59	2.07~4.06

3 检测方法的选定

Sr 同位素比值测试过程中,⁸⁷Rb 会对 ⁸⁷Sr 的测试产生同质异位数干扰,因而是否能将 Rb 和 Sr 完全分离是影响 Sr 同位素比值测试数据质量的重要因素。

表面热电离质谱仪(TIMS)具有高稳定性和高精度,表面热电离的过程中可将 Rb 和 Sr 于不同的温度(分别约为 700℃和 1400℃)电离,从而达到再次分离纯化的效果,是 Sr 同位素比值测试最为可靠和准确的仪器。DZ/T0184.4-1997(中华人民共和国地质矿产部, 1997)和 GB/T17672-1999(国家质量技术监督局, 1999)均使用表面热电离质谱仪作为 Sr 同位素比值测试的仪器,也是目前应用最成熟的方法。

近年来,多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)得到快速普及,其超越 TIMS 成为同位素比值测试中的重要仪器。与 TIMS 不同的是,MC-ICP-MS 为溶液进样,样品溶液形成的气溶胶在等离子体火焰中被完全电离。因此使用 MC-ICP-MS 进行 Sr 同位素比值测试需要将 Rb 和 Sr 完全分离,否则即使是微量的 Rb 也会严重干扰 Sr 同位素比值测试,该仪器对化学分离过程提出了更高的要求。除此之外,等离子体火焰电离的方式与表面热电离的方式相比,其稳定性也存在较大的差距。目前,有相当数量的实验室使用 MC-ICP-MS 进行 Sr 同位素比值测试,但尚未发布岩石样品 Sr 同位素比值的 MC-ICP-MS 测定标准方法。

考虑到目前有相当数量的实验室使用的测试仪器是多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS),只能使用非标方法进行测试。在比

对项目实施前,我们对方法的一致性进行了评估。通过查阅文献,对多接收电感耦合等离子体质谱仪报道的标准物质测试结果进行了统计,结果显示报道的测试结果与推荐值在误差范围内均一致。同时,项目组在 5 家实验室(3 家实验室使用的仪器是 MC-ICP-MS,2 家实验室使用的仪器是 TIMS)完成了比对样品的测试(表 5),其中使用 TIMS 仪器测试的结果为 0.706474±0.000025(1σ),使用 MC-ICP-MS 仪器测试的结果为 0.706448±0.000027(1σ)。对比 TIMS 和 MC-ICP-MS 的测试数据,测试精度及实验室再现性均符合行业标准(表 7)的要求。综合以上结果,使用不同仪器及方法得到的 Sr 同位素比值无显著性差异,非标方法适用于计量比对。

4 比对结果及讨论

本次比对采用标准化四分位距法对参比实验室检测结果进行统计分析,以中位值(med)作为指定值,标准化四分位距(NIQR)作为能力评定标准差。通过 Z 比分数值对各实验室的检测结果进行能力评价,Z 比分数值的计算公式如下:

$$Z=(X-med)/NIQR$$

其中 X 为各实验室的检测结果。Z 比分数值评价原则为:当|Z|≤2 时,表明结果“满意”,无需采取进一步措施;当 2<|Z|<3 时,表明为有问题结果,产生警戒信号;当|Z|≥3 时,表明结果“不满意”,产生措施信号。

本次计量比对,共有 7 家参比实验室返回了比对样品的测试结果(表 8)。参与统计的 7 家实验室中,有 6 家实验室的 Z 比分数结果满意,比对满意率为 85.7%。编号为 08 的实验室,使用的全流程监控样 BCR-2 不是有证的标准物质,无法进行量值溯

表 7 比对样品和标准物质的结果及地矿行业标准方法技术参数要求

Table 7 The results of comparison samples and standards samples and the requirements of the technical parameters of geology and minerals industry standard methods				
名称	平均值	标准偏差	标准方法的再现性标准偏差	推荐值
比对样品	—	0.000024	0.00017	—
GBW04411	0.759944	0.000022		0.75999±0.00020
标准方法中正确度的要求				
水平值	δ	δ-A*S _R		δ+A*S _R
0.75999	-0.18×10 ⁻⁴	-1.42×10 ⁻⁴		1.07×10 ⁻⁴

源,同时干扰样(GBW04411)的测试结果与推荐值直接判定为 $|Z|\geq 3.0$ (不满意)。各实验室比对结果在误差范围内不一致,因而其比对样品的测试结果分类统计见表9。

表 8 Sr 同位素测试结果和统计处理
Table 8 Sr isotope test results and statistical processing

实验室代码	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Z 比分数	测试仪器	分析方法	资质认定情况
02	0.706443	0	TIMS	DZ/T0184.4-1997	是
03	0.706398	-0.9	MC-ICP-MS	非标方法	否
05	0.706466	0.46	TIMS	GB/T17672-1999	是
06	0.706443	0	MC-ICP-MS	非标方法	否
07	0.706433	-0.2	MC-ICP-MS	非标方法	否
08	0.706457	0.28	MC-ICP-MS	非标方法	是
09	0.706456	0.26	MC-ICP-MS	非标方法	否
中位值	0.706443				
稳健标准差	0.000050				

注:代码为08的实验室干扰样测试结果与推荐值不一致,且全流程监控样BCR-2不是有证标准物质

表 9 各实验室比对结果分类统计
Table 9 Categorized statistics on the results of the comparison of laboratories

结果	实验室代码	共计	比例(%)
$ Z \leq 2.0$	02、03、05、06、07、09	6	85.7
$2.0< Z <3.0$	/	0	0.0
$ Z \geq 3.0$	08	1	14.3

由于参加比对的实验室较少,除了使用稳健统计法进行数据评价,本次比对还将考虑地质矿产行业标准方法的要求和干扰样(标准物质GBW04411)的测试结果综合进行评价,以对数据结果做出更为准确的判断。

新修订的地质矿产行业标准(暂未发布)对Sr

同位素比值测试的方法精密度和正确度做了明确的要求,据此对测试数据进行评价,具体情况见表7。6家参比实验室比对样品测试结果的标准偏差符合再现性标准差的要求。由此可见,使用不同的仪器(TIMS 和 MC-ICP-MS)及不同的方法(标准方法和非标方法)均可达到标准方法数据质量的要求。

本次比对选用国家一级标准物质 GBW04411 (钾长石)作为干扰样,利用该样品辅助判断实验室对高 Rb/Sr 比值样品的测试效果。钾长石是富含 Rb 的矿物,其 Rb/Sr 比值通常远高于自然界岩石(通常小于 1,本次比对样品为 0.08)。本次比对使用的 GBW04411 其 Rb/Sr 比值为 1.57,因而其测试结果能用来判断 Rb、Sr 分离效果。本次比对过程中,多

数参比实验室能获得高质量数据,其测试结果符合标准方法再现性及正确度的要求,说明大多数实验室在化学流程中能将Rb、Sr完全分离,并获得满意的测试结果。但编号为08的实验室GBW04411的测试结果与推荐值在误差范围内不一致,说明其化学流程中Rb、Sr分离还存在较大的问题,致使仪器测试时 ^{87}Rb 对 ^{87}Sr 产生了无法忽略的影响,需要对分离流程进行优化和改进。

综上,比对结果表明参比实验室整体分析能力良好,合格率为85.7%。标准方法精密度、正确度及标准物质GBW04411的结果表明稳健统计法的结果准确、可靠。编号为08的实验室应从方法流程、人员操作及仪器设备状态等方面认真查找原因并加以改进,尤其是高Rb/Sr比值样品的分离效果需要进一步验证,同时加强检测环节的质量控制,提高检测技术水平。

5 结论

本次计量比对共有7家实验室参与,通过对报送结果的分析,参比实验室多数具备较好的Sr同位素比值检测能力,检测结果满意度为85.7%。编号为08的实验室由于干扰样(标准物质)的检测结果与推荐值在误差范围内不一致,且使用的全流程监控样BCR-2不是有证的标准物质,致使其判定结果为 $|Z| \geq 3.0$ (不满意)。该实验室应进一步优化Rb、Sr分离的化学流程,尤其对高Rb/Sr比值样品的分离效果需再次确认。综上,此次比对活动取得了满意的结果,为参比实验室进一步提升Sr同位素比值测试能力提供了技术依据。

审稿专家对本文及后续工作提出的中肯意见及建议,在此致以诚挚的感谢!

参考文献:

高胜强,刘凯,孙文洁,郭朝斌.2022.花岗岩带状热储水化学与锶同位素地球化学特征[J].人民长江,53(3):36-42.
国家技术监督局.1994. JJF 1006-1994 一级标准物质技术规范[S].北京:中国质检出版社.
国家市场监督管理总局.2022. JJF 1343-2022 标准物质的定值及均匀性、稳定性评估[S].北京:中国标准出版社.

国家质量技术监督局.1999. GB/T 17672-1999 岩石中铅、铋、钨同位素测定方法[S].北京:中国标准出版社.
刘宝山,张春鹏,寇琳琳,韩仁萍,李成禄.2022.黑龙江争光金矿床方铅矿黄铁矿Rb-Sr年龄及地质意义[J].大地构造与成矿学,46(1):102-111.
刘军港,李子颖,聂江涛,张万良,王勇剑,田明明.2019.相山铀矿田西部地区深部多金属矿化成矿年代与成矿流体演化:Rb-Sr同位素体系的制约[J].岩石学报,35(9):2787-2800.
刘明军,杨光树,陈爱兵,温汉捷,燕永锋,杜胜江,李建宽,杨昕宇.2023.滇东南马卡铅锌钨矿床成因:闪锌矿Rb-Sr、锡石U-Pb定年和硫化物原位硫、铅同位素制约[J].岩石学报,39(6):1861-1879.
苏春利,张雅,马燕华,刘文波.2019.贵阳市岩溶地下水水化学演化机制:水化学和锶同位素证据[J].地球科学,44(9):2829-2839.
夏杰,程顺波,薛喜林,李剑锋,付建明,卢友月,杨齐智,李雄飞,马丽艳.2022.湖南清水塘铅锌矿床成因——来自流体包裹体和石英Rb-Sr定年证据[J].中国地质,49(6):1862-1874.
杨红梅,段桂玲,凌文黎.2009. La-Ce法岩石标准物质和Ce同位素标准溶液研制[J].地球化学,38(2):179-186.
袁利娟,张进平,何云成,孔祥军,高剑.2021.北京市通州区地热流体水化学和同位素特征及其地热学意义[J].地质论评,67(5):1545-1556.
中国合格评定国家认可委员会.2018. CNAS-GL003: 2018 能力验证样品均匀性和稳定性评价指南[S].
中华人民共和国地质矿产部.1997. DZ/T 0184.4-1997 同位素地质样品分析方法第4部分:岩石、矿物铷锶同位素地质年龄及锶同位素比值测定[S].
钟巍,陈援翰,魏志强,叶素素,商圣潭,薛积彬,欧阳军,曹家元.2018.近50 ka以来雷州半岛北部泥炭序列 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化的环境意义研究[J].华南师范大学学报(自然科学版),50(5):89-97.
Cucina A, Ortega-Muñoz A. 2022. Strontium and stable oxygen isotope analysis in the Classic and Postclassic northern Maya lowlands of the Yucatan Peninsula: An analysis of social and sex-related reasons for population movement[J]. Journal of Archaeological Science: Reports, 45: 103624.
He X D, Li P Y, Shi H, Xiao Y X, Guo Y N, Zhao H H. 2022. Identifying strontium sources of flowback fluid and groundwater pollution using $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and geochemical model in Suligegasfield, China[J]. Chemosphere, 306:

- 135594.
- Li T G, Xu Z K, Lim D, Chang F G, Wan S M, Jung H S, Choi J Y. 2015. Sr-Nd isotopic constraints on detrital sediment provenance and paleoenvironmental change in the northern Okinawa Trough during the late Quaternary[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 430:74-84.
- Lin C Q, Yu R L, Hu G R, Yang Q L, Wang X M. 2016. Contamination and isotopic composition of Pb and Sr in offshore surface sediments from Jiulong River, Southeast China[J]. *Environmental Pollution*, 218: 644-650.
- Liu S J, Chen B, Zheng J H, Bao C, Zhao G C. 2023. A metamorphic devolatilization model for the granitoid-hosted Wulong lode gold deposit, Liaodong Peninsula, Eastern North China Craton: Evidence from geology, fluid inclusions, and O-Sr-Li isotopes[J]. *Ore Geology Reviews*, 158: 105515.
- Su Y Y, Li Y F, Zhang J C, Wang L S, Remgasamy K RR, Ma W, Zhang A. 2023. Analysis of soils, grapes, and wines for Sr isotope characterisation in Diqing Tibetan Autonomous Prefecture (China) and combining multiple elements for wine geographical traceability purposes[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 122: 105470.
- Wang C Y, Alard O, Lai Y J, Foley S F, Liu Y S, Munnikhuis J, Wang Y. 2022. Advances in in-situ Rb-Sr dating using LA-ICP-MS/MS: applications to igneous rocks of all ages and to the identification of unrecognized metamorphic events[J]. *Chemical Geology*, 610: 121073.
- Wang M Z, Han R S, Zhou W W, Wu S C, Luo D, Song D H. 2023. In situ geochemical and Rb-Sr dating analysis of sphalerite from the Liangyan Pb-Zn deposit in northwestern Guizhou, China: Implication for timing of ore formation[J]. *Ore Geology Reviews*, 154: 105340.
- Yin H M, Huang F, Shen J, Yu H M. 2020. Using Sr isotopes to trace the geographic origins of Chinese mitten crabs[J]. *Acta Geochimica*, 39(3): 326-336.
- Zhou L G, Erdenebaatar D, Mijiddorj E, Galbadrakh B, Lan W L, Liu B. 2023. Strontium isotope analysis of the Xiongnu nobles and their followers in Central Mongolia[J]. *Archaeological Research in Asia*, 34: 10046.
- Zou J J, Shi X F, Zhu A M, He L H, Kandasamy S, Tiedemann R, Lembke-Jene L, Shi F D, Gong X, Liu Y G, Ikehara M, Yu P S. 2023. Paleoenvironmental implications of Sr and Nd isotopes variability over the past 48 ka from the southern Sea of Japan[J]. *Marine Geology*, 432: 106393.

《华南地质》投稿约定

1. 所投稿件在收稿2个月内可得到文章是否被录用的通知,在此期间作者不得再投他刊。

2. 所投稿件如不符合本刊上述要求者,编辑部将退回稿件,作者进行修改后再行评审。本刊录用的稿件将存档保存,未录用稿件不再退还,请作者自留底稿。

3. 本刊为纸质印刷版、光盘版出版、网络出版模式,凡刊用的稿件,将同时编入《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》、《万方数据知识服务平台》及《中文科技期刊数据库》。本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文,该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。本刊为北京万方数据股份有限公司入选期刊,由万方数据电子出版社网络出版,并通过《万方数据知识服务平台》及其相关数据库系统提供信息服务,其作者或相关权利人的

著作权使用费由本刊负责连同稿费一并给付。如有异议,请在来稿时注明,本刊将作适当处理。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我刊上述声明。

4. 稿件文责自负,编辑部对拟定稿件有权作技术性和文字上的修改。实质性内容修改需征得作者同意。

5. 来稿一经发表,赠送2本样刊。

欢迎作者通过采编系统投稿。

通讯地址:湖北省武汉市东湖新技术开发区光谷大道69号武汉地质调查中心《华南地质》编辑部

邮政编码:430205

联系电话:027-59988030;027-59988031

E-mail: whzxhndz@mail.cgs.gov.cn

网址: <http://hndz.whcgs.cn/ch/index.aspx>