四川石棉蛇绿岩套的 Sm-Nd 年龄及 Nd-Sr 同位素特征

沈渭洲^① 徐士进^① 高剑峰^① 杨铸生^② 杨七文^②

(^①南京大学地球科学系, 南京大学内生金属矿床成矿作用研究国家重点实验室, 南京 210093;
^②四川省地质矿产厅攀西地质大队地质调查所, 西昌 615000)

摘要 对石棉蛇绿岩套 Sm-Nd 和 Rb-Sr 同位素组成的测定结果为: 由方辉橄榄岩和辉长岩确定的全岩 Sm-Nd 等时线年龄为 938 ± 30 Ma (2σ), ϵ_{Nd} 值为 7.6 ± 0.8 (2σ), 表明该蛇绿岩套形成于新元古代早期. 蛇绿岩的 I_{Sr} 值变化明显($0.70209 \sim 0.70708$), 是由雨水热液蚀变作用引起. 高的 ϵ_{Nd} 值反映原始岩浆来源于强烈亏损的地幔源区, 推测在新元古代早期该区可能处于弧后盆地环境.

关键词 Sm-Nd 定年 Nd-Sr 同位素 蛇绿岩套 弧后盆地 四川石棉

四川石棉镁铁质-超镁铁质岩体以盛产纤蛇纹石石棉而闻名国内外. 早期的研究多偏重矿床本身, 而对岩石成因注意不够. 但自曾宪教等人^[1]提出石棉镁铁质-超镁铁质岩体是一个被肢解了的古老蛇绿岩套以来, 人们对石棉蛇绿岩套研究的兴趣日趋增强^[2~5]. 因为蛇绿岩套代表古大洋岩石圈碎块, 它原为古大洋壳的组成部分, 由于海底扩张而缓慢地向大陆边缘迁移, 并由于发生仰冲而被保存在大陆壳中. 因此, 蛇绿岩套代表过去的洋壳和陆壳之间相互作用带的位置或板块碰撞带的标志, 具有很重要的研究意义. 过去虽然对石棉蛇绿岩套进行过一些常规的岩石学和岩石地球化学研究, 但报道很少. 同位素地球化学研究, 尤其是同位素定年成果迄今未见报道. 本文报道石棉蛇绿岩套的 Sm-Nd 和 Rb-Sr 同位素资料, 以期能对该蛇绿岩套的形成时代及其岩浆源区特征提供某种制约.

1 地质背景

石棉蛇绿岩套位于石棉县城东南约 6 km 处. 它由下部变质橄榄岩(蛇纹岩)和上部辉长岩组成, 两者呈构造接触(图 1). 变质橄榄岩体被早震旦统苏雄组火山-沉积岩系(其中流纹岩单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 803 ± 12 Ma^[7])沉积不整合覆盖, 在苏雄组中见有蛇纹岩砾石^[3]. 蛇绿岩套上部的辉长岩为晋宁期黄草山花岗岩体(亦称石棉岩体)侵入, 后者的单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 786 ± 36 Ma^[8]. 这些特征表明, 石棉蛇绿岩套的就位时间应在 800 Ma 以前.

石棉变质橄榄岩(原岩主要为方辉橄榄岩)有两

个明显的特征: 一是蚀变非常强烈, 原生矿物组成和结构构造已被改造殆尽, 蚀变矿物主要为纤蛇纹石、利蛇纹石、叶蛇纹石和水镁石, 占 90% ~ 95% 以上^[9]; 二是构造变形与构造裂隙相当发育, 反映受到多期构造作用叠加改造, 明显呈现构造岩的组构特征.

图 1 石棉蛇绿岩套地质略图(a)和地质剖面图(b)
据文献[1,6]. 1. 变质橄榄岩; 2. 辉长岩; 3. 震旦系下统苏雄组火山-沉积岩; 4. 晋宁期花岗岩; 5. 震旦系下统苏雄组绿片岩; 6. 长英岩脉; 7. 辉绿岩脉; 8. 断裂破碎带; 9. 地质界线; 10. 断层; 11. 取样位置

在变质橄榄岩中还发现有呈团块状和脉状分布的石榴透辉岩,它具有典型的构造岩组构特征.曾宪教等人^[1]认为,石榴透辉岩是地幔橄榄岩中的一种同生含长石辉石岩包体经强烈构造变形并伴有重结晶变质作用的产物,尤其是其中高压低温变质作用标型矿物硬柱石的出现,说明岩体侵位时曾受到很强的应力作用.

辉长岩的主要组成矿物为辉石(单斜辉石与顽火辉石)与斜长石(拉-中长石).岩石蚀变强烈,但仍保留清晰的变余辉长结构或辉绿辉长结构.辉长岩体上部有玄武岩零星出露,它具有 MORB 的地球化学特征:大离子元素略富集,高场强元素与 MORB 值接近一致,Nb 显示轻微亏损;LREE 略亏损,(La/Yb)_N = 0.56 ~ 0.64,基本无 Eu 异常;在 Zr-TiO₂, Zr-Zr/Y, Zr/4-Y-Nb×2 和 Th-Ta-Hf/3 等构造环境判别图上,均投影于 MORB 区域内¹⁾,与 IAT 和 OIB 区别明显.此外,值得注意的是,蛇绿岩套中还见有呈岩席状产出并与辉长岩呈侵入接触的辉绿岩.

2 样品和分析方法

同位素测试用的全岩样品是在对野外采集的标本进行薄片鉴定的基础上选取的.单矿物样品是从辉长岩(样号 9910)中分选出来的,在重液选和磁选基础上,再在双目显微镜下挑纯.虽然单矿物纯度达 98% 以上,但由于蚀变强烈,分析用的单矿物仍难免有不同程度的蚀变作用.Sm, Nd, Rb, Sr 同位素测试由中国地质科学院地质研究所同位素实验室完成,详细分析流程见文献[10].同位素比值测定采用 MAT-261 固体同位素质谱计.Nd 同位素比值测定采用 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219 进行标准化,对 BCR-1 标准样测定的 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.512643 ± 8(2σ),对 GBW04419 标准样测定的 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.512728 ± 9(2σ).Sm, Nd 的流程空白约为 5 × 10⁻¹¹ g.对 NBS987

标准样测定的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.710290 ± 12(2σ),Rb, Sr 的流程空白为 10⁻¹⁰ ~ 10⁻⁹ g.分析结果列于表 1.样品的初始 Nd, Sr 同位素组成以 ε_{Nd} 和 I_{Sr} 值表示.

3 结果和讨论

3.1 蛇绿岩套的形成时代

由图 2 可见,所有全岩数据点构成较好的线性相关,说明橄榄岩、辉长岩和玄武岩之间在成因上是有联系的,它们可能属于同一岩浆结晶分异作用产物或来自同一岩浆源.但从辉长岩(样号 9910)中分离出的角闪石和斜长石数据点却明显偏离相关线.这说明在蚀变和变质作用过程中,Sm-Nd 同位素体系已在矿物规模上发生了明显的扰动,而且在这一过程中,同位素体系没有达到再平衡,因而单矿物数据点未能落在全岩等时线上.

等时线计算采用 Ludwig 提出的 ISOPLOT 程序,输入参数: ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd 的误差为 0.5%, ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 的绝对误差为 0.00002, ¹⁴⁷Sm 的衰变常数为 6.54 × 10⁻¹² a⁻¹.对所有 6 个全岩样品计算的等时线年龄为 980 ± 71 Ma(2σ), I_{Nd} = 0.511776 ± 98(2σ), ε_{Nd} = 7.9 ± 1.9(2σ), MSWD 值为 5.9.对线性关系更好的两个方辉橄榄岩(样号 9802 和 9905)和两个辉长岩(样号 9908 和 9910)样品计算的等时线年龄为 938 ± 30 Ma(2σ), I_{Nd} = 0.511813 ± 36(2σ), ε_{Nd} = 7.6 ± 0.8(2σ), MSWD 值为 1.05.虽然上述两条等时线的年龄和 ε_{Nd} 值在误差范围内是一致的,MSWD 值都较小(<6.0),但考虑到玄武岩是火山岩,它并不是直接由形成橄榄岩和辉长岩的原始岩浆演化形成,石榴透辉岩是在橄榄岩经受强烈构造变形和重结晶的基础上形成,Sm-Nd 同位素体系可能经受了更为明显的扰动,加之最后一等时线的年龄与初始值的误差更小,MSWD 值更低,因此,本文采用 938 ± 30 Ma 代表石棉蛇绿岩套的形成时间,它和前述依据地质特征推测的该蛇绿岩套

表 1 石棉蛇绿岩套的 Sm-Nd 和 Rb-Sr 同位素组成^{a)}

样号	岩性	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	ε _{Nd}	I _{Sr}	计算结果
9802	方辉橄榄岩	0.1526	0.707739 ± 13	0.1405	0.512666 ± 15	7.3	0.70569	<i>t</i> = 938 ± 30 Ma
9905	方辉橄榄岩	0.2849	0.710901 ± 18	0.1115	0.512508 ± 13	7.7	0.70708	ε _{Nd} = 7.6 ± 0.8
9908	辉长岩	0.6622	0.710963 ± 12	0.2360	0.513267 ± 6	7.6	0.70209	MSWD = 1.05
9910	辉长岩	0.6921	0.713534 ± 14	0.2191	0.513163 ± 9	7.6	0.70426	
9906	石榴透辉岩	0.1940	0.705460 ± 13	0.3003	0.513721 ± 8	8.7	0.70286	
9909	玄武岩	0.3283	0.708983 ± 14	0.2203	0.513222 ± 8	8.6	0.70459	
9910-a	角闪石	0.1790	0.707882 ± 12	0.2482	0.513422 ± 7			
9910-b	斜长石	0.9068	0.710424 ± 11	0.1842	0.513099 ± 16			

a) 样品的 ε_{Nd} 和 I_{Sr} 值按 *t* = 938 Ma 计算

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2002-47-20-1592>

1) 沈渭洲, 高剑峰, 徐士进, 等. 四川石棉蛇绿岩的地球化学特征及其构造意义

图 2 石棉蛇绿岩套的 Sm-Nd 全岩等时线

的就位时间应在 800 Ma 以前是一致的. 这表明在晋宁运动时期, 扬子板块西缘存在大洋板块俯冲作用.

现有的研究表明, 在扬子板块东南缘, 皖南歙县伏川蛇绿岩套的 Sm-Nd 等时线年龄为 935 ~ 1024 Ma^[11,12]; 赣东北蛇绿岩的 Sm-Nd 等时线年龄为 929 ~ 1160 Ma^[12~14], SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 968 Ma^[15]. 在扬子板块北缘, 商南松树沟蛇绿岩的 Sm-Nd 等时线年龄为 983 ~ 1030 Ma^[16,17]; 商州宽坪蛇绿岩的 Sm-Nd 等时线年龄为 986 Ma^[10]. 因此, 扬子板块西缘新元古代早期石棉蛇绿岩套的厘定清楚表明, 在晋宁运动时期, 整个扬子板块周边均存在大洋板块俯冲作用.

3.2 蛇绿岩套的源区特征

由表 1 可见, 石棉蛇绿岩套的 ϵ_{Nd} 值变化小(7.3 ~ 8.7)而 I_{Sr} 值变化明显(0.70209 ~ 0.70708), 这种变化特征反映已受到海水热液蚀变的影响^[18~20]. 但由于石棉蛇绿岩套具有异常低的 $\delta^{18}O$ (-1.2‰~-3.5‰)和 δD 值(-81‰ ~ -100‰), 反映受到的是雨水热液蚀变而不是海水热液蚀变¹⁾. 因为在后一种情况下, 无论水-岩比值和蚀变温度如何变化, 都不可能使幔源岩石的 $\delta^{18}O$ 值变为负值^[21]. 雨水在地壳岩石中循环时可浸取其中的放射成因 Sr 而具有高的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值^[22], 由这种富放射成因 Sr 的雨水热液引起的蚀变作用可以使蛇绿岩套的 I_{Sr} 值不同程度升高. 前已述及石棉蛇绿岩套经历了强烈的雨水热液蚀变作用, 因此 I_{Sr} 值的明显变化应主要是由该蛇绿岩套在仰冲进入大陆壳过程中或随后发生的雨水热液蚀变作用造成的, 而不是蛇绿岩套形成过程中发生的海水热液蚀变或地壳混染作用所致.

与 Sr 同位素组成的明显变化相反, 石棉蛇绿岩套具有高而相对稳定的 ϵ_{Nd} 值(7.3 ~ 8.7, 平均为 7.9), 反映原始岩浆来自强烈亏损的地幔源区没有受到地壳物质混染. 若假定现代 MORB 型亏损地幔的 ϵ_{Nd} 值(10 ± 2)是在地球形成初期由未分异的球粒陨石地幔演化形成, 那么在 938 Ma 前的 MORB 型亏损地幔的 ϵ_{Nd} 值约为 8.0 ± 1.5 . 石棉蛇绿岩套的 ϵ_{Nd} 值(7.3 ~ 8.7)恰好位于同时期 MORB 型亏损地幔值范围内(图 3), 加之样品的 ϵ_{Nd} -t 之间并不存在正相关关系, 因而石棉蛇绿岩套在形成过程中没有受到地壳物质混染. 在 ϵ_{Nd} -t 图上, 石棉蛇绿岩套位于亏损地幔演化区域内(图 3), 其 ϵ_{Nd} 值与典型的 MORB 环境中形成的蛇绿岩套如 Toba 蛇绿岩($\epsilon_{Nd} = 7.2 \sim 9.2$)^[25]、Smail 蛇绿岩($\epsilon_{Nd} = 7.6 \sim 8.6$)^[19]、Bay of Island 蛇绿岩($\epsilon_{Nd} = 6.5 \sim 8.1$)^[18]和 Chamrousse 蛇绿岩($\epsilon_{Nd} = 7.2 \sim 9.2$)^[28]等以及陆内裂谷环境中形成的蛇绿岩如 Urals 蛇绿岩($\epsilon_{Nd} = 7.3 \sim 8.8$)^[26]相似, 而与受到地壳组分影响明显的岛弧环境中形成的蛇绿岩如 Troodos 蛇绿岩($\epsilon_{Nd} = 0.8 \sim 8.9$)^[24]和伏川蛇绿岩套($\epsilon_{Nd} = 0.7 \sim 3.8$)^[11,20]等区别明显. 同时, 蛇绿岩套中玄武岩具有 MORB 的地球化学特征²⁾, 该区还存在同期岛弧火山岩, 如石棉大水沟斜长角闪岩(锆石 U-Pb 年龄为 936 Ma)^[33]和天宝山组英安-流纹质钙碱性火山岩(全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 907 Ma)^[2,5]. 这些特征与成熟的弧后盆地环境中形成的蛇绿岩^[34]十分相似, 因此我们认为,

图 3 石棉蛇绿岩套的 ϵ_{Nd} -t 图

ET: 台湾东部蛇绿岩^[23]; TRD: Troodos 蛇绿岩^[24]; SA: Smail 蛇绿岩^[19]; TB: Toba 蛇绿岩^[25]; U: Urals 蛇绿岩^[26]; KR: Kings River 蛇绿岩^[27]; CHA: Chamrousse 蛇绿岩^[28]; BOI: Bay of Island 蛇绿岩^[18]; JAW: Jabal al Wask 蛇绿岩^[29]; FC: 伏川蛇绿岩^[11,20]; GDB: 赣东北蛇绿岩^[12~14]; SSG: 松树沟蛇绿岩^[17]; KP: 宽坪蛇绿岩^[30]; SM: 石棉蛇绿岩(本文); 亏损地幔(DM)演化域据文献[31, 32]资料绘制; CHUR 为球粒陨石均一储率

1) 沈渭洲, 徐士进, 杨铸生, 等: 四川石棉蛇绿岩的氢氧同位素研究. 地质论评(待发表)47-20-1592

2) 见 1593 页脚注

1594

www.scichina.com

石棉蛇绿岩套最可能形成于成熟的弧后盆地环境。

4 结论

(i) 石棉蛇绿岩套的 Sm-Nd 全岩等时线年龄为 938 ± 30 Ma, 反映扬子板块西缘在新元古代早期存在大洋板块俯冲作用, 为环扬子周边在晋宁期造山运动时期均存在大洋板块俯冲作用提供了重要的依据。

(ii) 石棉蛇绿岩套高的 ϵ_{Nd} 值(7.6 ± 0.8)反映其原始岩浆来源于强烈亏损的地幔源区。结合蛇绿岩套中玄武岩具 MORB 地球化学特征及存在同期岛弧火山岩, 推测该蛇绿岩套最可能形成于成熟的弧后盆地环境。

致谢 Sm-Nd 和 Rb-Sr 同位素分析由中国地质科学院地质研究所唐索寒和王进辉高级工程师完成; 周新民教授和凌洪飞教授审阅全文并提出宝贵修改意见, 谨致谢忱。本工作受国家自然科学基金(批准号: 49972024)资助。

参 考 文 献

1 曾宪教, 徐先哲, 杨七文, 等. 四川石棉镁铁质-超镁铁质岩体是一个被肢解了的古老蛇绿岩. 攀西地质, 1982, (1): 24 ~ 37

2 骆耀南. 康滇构造带的古板块历史. 地球科学, 1983, 8(3): 93 ~ 102

3 潘杏南, 赵济湘, 张选阳, 等. 康滇构造与裂谷作用. 重庆: 重庆出版社, 1987

4 李建林, 董榕生, 刘鸿允. 扬子地区晋宁期板块构造的探讨. 地质科学, 1990, 25(3): 215 ~ 223

5 孙传敏. 川西元古代蛇绿岩与扬子板块西缘元古代造山带. 成都理工学院学报, 1994, 21(4): 11 ~ 16

6 刘朝基, 曾绪伟, 金久堂, 等. 康滇地区基性-超基性岩. 北京: 地质出版社, 1988

7 李献华, 周汉文, 李正祥, 等. 扬子块体西缘新元古代双峰式火山岩的锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征. 地球化学, 2001, 30(4): 315 ~ 322

8 沈渭洲, 凌洪飞, 徐士进, 等. 扬子板块西缘北段新元古代花岗岩类的地球化学特征和成因. 地质论评, 2000, 46(5): 512 ~ 519

9 黄伯钧, 闵育顺. 四川石棉蛇纹石矿物学研究. 矿物学报, 1989, 9(3): 202 ~ 210

10 张宗清, 刘敦一, 付国民. 北秦岭变质地层同位素年代研究. 北京: 地质出版社, 1994

11 周新民, 邹海波, 杨杰东, 等. 安徽歙县伏川蛇绿岩套的 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义. 科学通报, 1989, 34: 1243 ~ 1245

12 Chen J, Foland K A, Xing F, et al. Magmatism along the southeast margin of the Yangtze block: Precambrian collision of the Yangtze and Cathaysia blocks of China. Geology, 1991, 19: 815 ~ 818

13 徐备, 乔广生. 赣东北晚元古代蛇绿岩套的 Sm-Nd 同位素年龄及原始构造环境. 南京大学学报(地球科学), 1989, (3): 108 ~ 114

14 周国庆, 赵建新. 华南扬子克拉通东南缘赣东北蛇绿岩的 Sm-Nd 同位素研究. 科学通报, 1991, 36(2): 129 ~ 132

15 李献华, 周国庆, 赵建新, 等. 赣东北蛇绿岩的离子探针锆石

U-Pb 年龄及其构造意义. 地球化学, 1994, 23: 125 ~ 131

16 李曙光, 陈移之, 张国伟, 等. 一个距今 10 亿年侵位的阿尔卑斯型橄榄岩体: 北秦岭晚元古代构造体制的证据. 地质论评, 1991, 37: 235 ~ 242

17 周鼎武, 董云鹏, 刘良, 等. 松树沟元古宙蛇绿岩的 Nd, Sr, Pb 同位素地球化学特征. 地质科学, 1998, 33: 31 ~ 38

18 Jacobsen S B, Wasserburg G J. Nd and Sr isotopic study of the Bay of Island ophiolite complex and the evolution of the source of mid-ocean ridge basalts. J Geophys Res, 1979, 84: 7429 ~ 7445

19 McCulloch M T, Gregory R T, Wasserburg G J, et al. Sm-Nd, Rb-Sr and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ isotopic systematics in an oceanic crustal section: Evidence from the Samail ophiolite. J Geophys Res, 1981, 86: 2721 ~ 2735

20 沈渭洲, 邹海波, 楚雪君, 等. 安徽伏川蛇绿岩的 Nd-Sr-O 同位素研究. 地质科学, 1992, (4): 333 ~ 341

21 张理刚. 稳定同位素在地质科学中的应用 —— 金属活化热液成矿作用及找矿. 西安: 陕西科学技术出版社, 1985

22 Faure G. Principles of Isotope Geology. New York: John Wiley and Sons, 1986

23 Jahn B M. Mid-ocean ridge or marginal basin origin of the East Taiwan ophiolite: Chemical and isotopic evidence. Contrib Mineral Petrol, 1986, 92: 194 ~ 206

24 McCulloch M T, Cameron W E. Nd-Sr isotopic study of primitive lavas from the Troodos ophiolite, Cyprus: Evidence for a subduction-related setting. Geology, 1983, 11: 727 ~ 731

25 Richard P, Allegre C J. Nd and Sr isotopic study of ophiolite and orogenic lherzolite petrogenesis. Earth Planet Sci Lett, 1980, 47: 65 ~ 74

26 Edwards R L, Wasserburg G J. The age and emplacement of obducted oceanic crust in the Urals from Sm-Nd and Rb-Sr systematics. Earth Planet Sci Lett, 1985, 72: 389 ~ 404

27 Shaw H F, Chen J H, Saleeby J B, et al. Nd-Sr-Pb systematics and age of the Kings River ophiolite, California: Implications for depleted mantle evolution. Contrib Mineral Petrol, 1987, 96: 280 ~ 290

28 Pin C, Carme F. A Sm-Nd isotopic study of 500 Ma old oceanic crust in the Variscan belt of western Europe: The Chamrousse ophiolite complex, Western Alps (France). Contrib Mineral Petrol, 1987, 96: 406 ~ 413

29 Claesson S, Pallister J S, Tatsumoto M. Sm-Nd data on two late Proterozoic ophiolites of Saudi Arabia and implications for crustal and mantle evolution. Contrib Mineral Petrol, 1984, 85: 244 ~ 252

30 张宗清, 张旗. 北秦岭晚元古代宽坪蛇绿岩中变质基性火山岩的地球化学特征. 岩石学报, 1995, 11(增刊): 165 ~ 177

31 Chen J F, Foland K A, Zhou T X. Mesozoic granitoids of the Yangtze fold belt, China: Isotopic constraints on the magma sources. In: Wu L R, ed. The Crust —— the Significance of Granites in Lithosphere. Theophrastus: Athens, 1985. 217 ~ 237

32 Jahn B M, Auvray B, Cornichet J, et al. 3.5Ga old amphibolites from eastern Hebei Province, China: Field occurrence, petrography, Sm-Nd isochron age and REE geochemistry. Precamb Res, 1987, 34: 311 ~ 346

33 徐士进, 沈渭洲, 王汝成, 等. 大水沟碲矿含矿斜长角闪岩的锆石 U-Pb 定年. 科学通报, 1998, 43(8): 883~885

34 张旗, 周国庆. 中国蛇绿岩. 北京: 科学出版社, 2001