

第一章 南秦岭区域地质概况

秦岭横亘我国中部，是我国南、北自然地理分界线，也是亚洲东部两个最大构造单元——中朝克拉通华北陆块和扬子克拉通陆块结合区域（图 1-1），在中国大地构造格局中占着十分重要地位。

以陕西商州)-丹凤断裂带为界 秦岭造山带被划分为两部分 北部 为北秦岭造山带 南部 为南秦岭造山带。一般认为 北秦岭造山带具有中朝克拉通华北陆块基底 而南秦岭造山带具有扬子克拉通陆块基底。

南秦岭造山带地质略图如图 1-2。

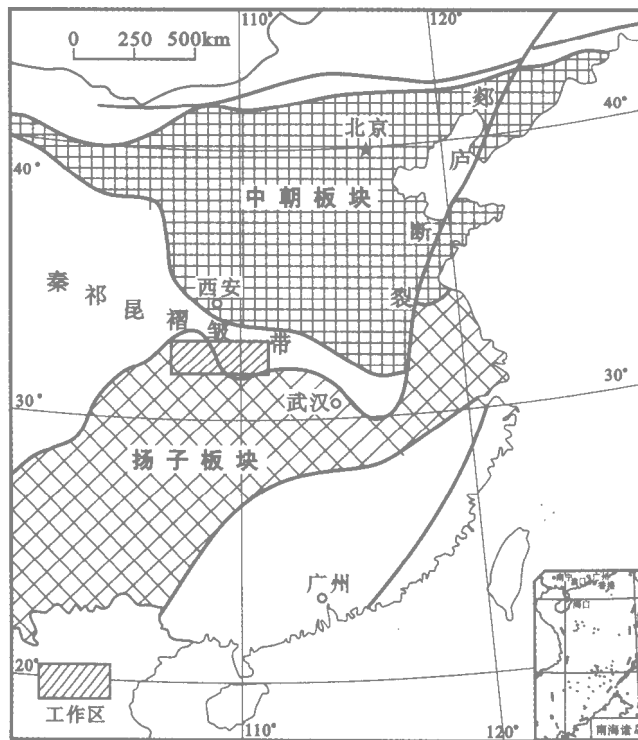


图 1-1 秦岭造山带大地构造位置和工作区范围示意图

第一节 区域地层

工作区包括南秦岭造山带和造山带相邻的扬子克拉通陆块北缘。

南秦岭古生代地层分布广泛，寒武系至二叠系地层均有出露。其中志留系和泥盆系地层十分发育 出露面积大 主要由砂岩、片岩和灰岩组成。中生代地层分布局限 仅在佛平以

西凤州盆地有出露。前寒武纪变质地层呈块状零星出露在南秦岭和扬子克拉通北缘,由西向东分别命名为鱼洞子群、碧口群、后河群、火地垭群、刘家坪组、子午群、三花石群、西乡群、耀岭河群和郧西群、武当群、陡岭群、毛堂群(图 1-2),主要由变质火山岩系和变质火山-沉积岩系组成。变质地层时代长期争论,是本书探讨课题。

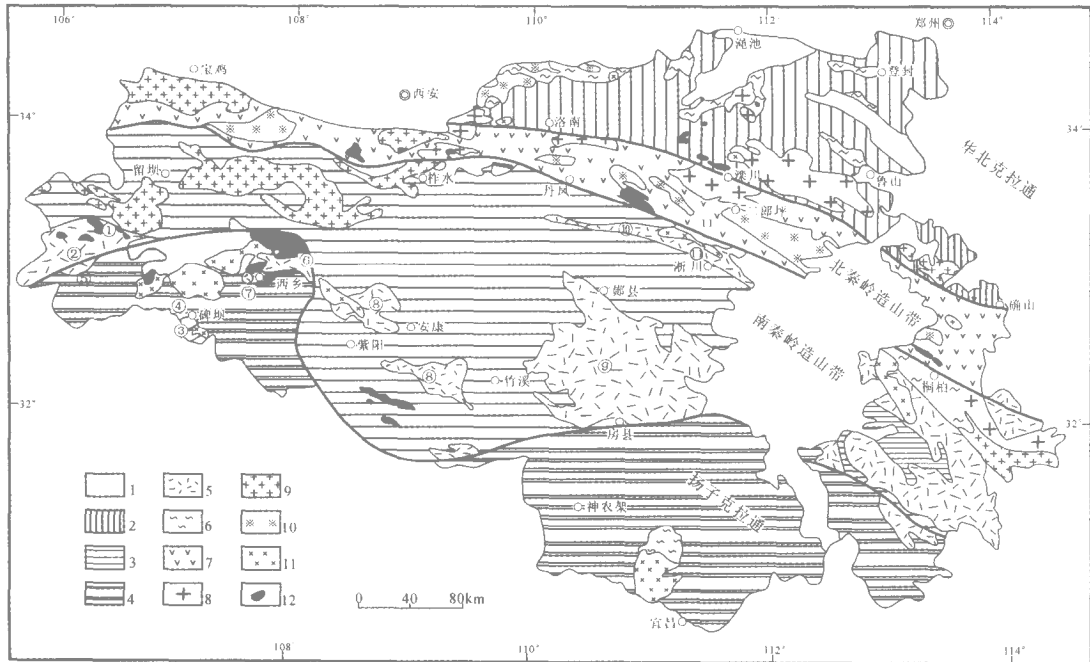


图 1-2 南秦岭造山带地质略图

(据张本仁等,1994 修改)

1—第四系;2—中朝克拉通华北沉积盖层;3—南秦岭造山带沉积盖层;4—扬子克拉通陆块沉积岩地层;5—南秦岭造山带变质地层;6—太华群;7—北秦岭变质地层;8—晚中生代花岗岩;9—晚古生代—早中生代花岗岩;10—早古生代花岗岩;11—中—新元古代花岗岩;12—镁铁质—超镁铁质侵入体
南秦岭造山带变质地层:①—鱼洞子群;②—碧口群;③—后河群;④—火地垭群;⑤—刘家坪组;⑥—子午群、三花石群;⑦—西乡群;⑧—耀岭河群、郧西群;⑨—武当群;⑩—陡岭群;⑪—毛堂群

第二节 岩浆活动

南秦岭和扬子克拉通北缘岩浆活动强烈,超镁铁质岩、镁铁质岩直到中酸岩均有广泛分布。超镁铁质岩主要分布在陕西省勉县—略阳,留坝楼房沟及河南淅川毛堂至陡岭一带。分布在南秦岭和扬子北缘的变质地层的主要组成岩石为变质镁铁质火山岩。中酸性侵入岩主要分布在南秦岭佛平南北一线,佛平以西及扬子北缘,由闪长岩和不同类型花岗岩组成。佛平以东中酸性侵入岩出露少。出露在南秦岭的花岗岩的形成时代主要为晚华力西—印支期。出露扬子北缘的花岗质岩石多形成于~800Ma左右的晋宁期(严阵,1985;尚瑞钧、严阵,1988;李先梓等,1993;张宗清等,1999;及作者未发表数据)。

第三节 变质作用

工作区遭受过多期强烈变质作用，变质程度由绿片岩相 - 麻粒岩相。麻粒岩相变质岩石出露范围有限，目前仅在南秦岭佛平和勉县安子山一带有麻粒岩发现。大多数位于工作区的变质地层岩石只受到绿片岩相 - 低角闪岩相变作用改造。岩石强烈变形。变质时期过去了解不多，是本书讨论的课题。

第二章 采样原则、样品加工、实验方法

工作区处在不同大地构造单元结合处，地质作用复杂，再加上后期多期强烈火山作用，岩浆侵入作用和变质作用破坏和改造，变质地层原貌已被改造，出露残缺不全，新老地质体界限混淆不清。岩石中同位素系统也遭受不同程度改造或完全被再置。根据这种复杂地质背景，在同位素年代学研究中，我们在加强野外地质工作基础上，采用野外地质研究与实验室研究密切结合、实验室中不同稳定性的不同同位素年代学方法密切结合，年代学研究和同位素地球化学研究和元素地球化学研究密切结合技术路线，采集有代表性样品，多种同位素年代学方法分析，通过地质、年代学和地球化学资料综合分析研究，区分不同地质作用同位素印记，获得可信同位素年代学和元素、同位素地球化学数据。

第一节 采样原则

同位素年代学样品必须满足两个要求：

- (1) 样品在地质上有代表性；
- (2) 样品对年代学方法适用。

关于常用同位素年代学方法的应用和限制，Sm-Nd 年代学样品采集和加工，江博明(1989) 张宗清(1988;1997a) 有专文论述。秦岭造山带经过长期构造演变，地质背景十分复杂。为了得到有代表性的样品，我们采样坚持以下原则。

(1) 采样在做好野外地质调查工作基础上进行。野外地质工作是同位素年代学工作的基础。为了获得有代表性样品，我们把采样点选择在地质研究程度高的地区。由于地质研究程度高，争论问题突出、集中，我们可用少量样品解决较多地质问题。同时，由于这些地区地质工作者熟悉，由这些地区所获得的结果，也最容易为广地质工作者理解和利用，达到解决地质问题的目的。在每一个采样地区，除对前人的工作进行充分了解外，我们还进行相当大量的地质工作。在对野外地质情况，存在的问题经充分了解后，根据地质、地球化学背景、需要解决的问题和年代学方法特点制定采样方案，采集适合有代表性样品。

(2) 南秦岭和扬子北缘变质地层分布与北秦岭不同，呈块体出露。北秦岭变质地层呈东西走向带状分布。在采样时，充分考虑变质地层分布特点和出露范围，对均一、出露面积小的地层单元，重点解剖一个点，对于不均一、出露面积大的重要地层单元，一般选择 2~3 个点重点解剖。前者如刘家坪组，出露范围小，岩性为变质火山岩，选择一个点重点解剖，后者如碧口群、耀岭河群、郧西群、武当群、陡岭群、西乡群等出露范围大组成复杂重点解剖点都在一个以上。

(3) 造山带地质背景复杂，变化大，采样范围严格控制。工作区出露变质地层多为变质火山岩系，或变质火山—沉积岩系，采样距离，除个别变质岩群外，一般都在数十米范围内。

(4) 南秦岭地区，变质地层岩石遭受过多期强烈变质作用，岩浆侵入和火山喷发作用。

在这些作用中，同位素系统遭受过不同程度破坏或扰动。不同同位素系统在变质作用中的稳定性不同，所获得结果反映的地质作用是不同的（江博明，1989 张宗清等，1994 张宗清，1997a）。单一方法年龄结果具有多解性。对于地质十分复杂的南秦岭地区，为了克服变质地层遭受多期变质作用的影响，采用多种稳定性不同的独立同位素年代学方法密切配合，取长补短，互为补充，以确定所获得年龄的地质意义。为了避免由于样品不同引起的年龄对比的困难，采样地点尽量选择有兼有多种同位素年代学方法适用的地区。争取同一样品，多种方法测试，避免因地质样品不同，在年龄对比中带来的不确定性。

(5) 采样点选择在岩石新鲜，风化蚀变、混合岩化弱，后期脉体影响小的地区。为了保证样品新鲜，采样点尽量选择在采石场，新开公路断面，水渠开凿面。采样位置尽量远离混合岩化强烈地点和脉体发育区。如果细小脉体，风化面不能除去，将样品砸碎，挑除脉体和风化面部分。样品经镜下鉴定，新鲜无蚀变，无后期脉体影响者，方可作为同位素年龄样品。

(6) 鉴于同位素年代学方法限制，采集样品，除特殊情况外，一般均为变质火山岩。

第二节 样品加工

一、全岩样品加工

全岩样品加工同岩石化学分析样品加工方法。经镜下鉴定，新鲜、无蚀变，无后期脉体影响的样品，洗净，经粗碎、中碎、缩分后，将少量样品（20~30g）用刚玉震动磨粉碎至 200 目。粉末样品置于干净新塑料瓶内保存。

二、单矿物分选

1. 锆英石分选

锆英石分选采用摇床、重液和电磁分选办法，将锆英石富集，然后在双目镜下分离并除去其他残留矿物。

2. Rb-Sr、Sm-Nd、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄矿物样品分选

Rb-Sr、Sm-Nd、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄矿物样品，一般为造岩矿物如黑云母、长石、辉石、角闪石、石榴石等。用电磁选，再通过双目镜下手选获得纯净单矿物。

在样品加工过程中，严格避免其他样品和加工器皿污染。

第三节 实验方法

一、颗粒锆石化学法 U-Pb 年龄测定实验方法

锆英石经 HNO_3 加热清洗、在 Teflon 高压坩埚中用 HF 加几滴 HNO_3 溶解。加入 $^{205}\text{Pb} - ^{235}\text{U}$ 混合稀释剂。蒸干用 HCl 溶解。阴离子交换柱分离。MAT-261 或 MAT-262 固体同位素质谱计测定。U、Pb 流程空白近似 10^{-11}g 。

质量分馏用 NBS982 标准校正。不一致线上，下交点年龄用 Ludwing(2000)软件计算。年龄误差以 2σ 表示（95% 置信度）。衰变常数 $\lambda(^{238}\text{U}) = 1.55125 \times 10^{-10} \text{年}^{-1}$ ， $\lambda(^{235}\text{U}) =$

9. 8485×10^{-10} 年⁻¹。

天津地矿所锆英石 U-Pb 年龄测定实验方法见文献 (李惠民等, 1997)。

二、单锆石逐层蒸发法 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄测定实验方法

单锆石逐层蒸发法由 Kober(1986 提出 实验方法刘敦一、赵敦敏 1988b) 宋彪 1995) 有专文论述。将被测锆石颗粒包在 Re 蒸发带的中心部位, 装于离子源并与相对的电离带呈平行状。分析开始时, 在蒸发带和电离带上加高温数秒钟, 除去锆石表面普通 Pb 而后开始逐层蒸发、沉淀、测定。每次蒸发的温度较前一阶段略略提高, 以获得不同阶段或不同蒸发温度的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值年龄。

单锆石逐层蒸发法分析在 MAT-261 质谱计上完成 微弱 Pb 离子流用电子倍增器收集并测定。质量分馏对 Pb 每个质量单位约为 0.3% 普通 Pb 按测定的 ^{204}Pb 的丰度扣除。一般来说 锆英石普通 Pb 含量都很低, 可以忽略不计。

年龄误差以 95% 置信度表示。

三、Sm-Nd 年龄测定实验方法

Sm-Nd 同位素年龄测定实验方法张宗清和叶笑江已有报道 (张宗清、叶笑江, 1987 叶笑江、张宗清, 1990; 张宗清, 1998a)。Sm, Nd 含量用同位素稀释法分析。称取粉碎至 200 目以下的粉末样品 置于 Teflon 低压密封溶样罐中, 加入 HF + HNO₃ 溶解。待样品完全溶解后 蒸干 用 HCl 溶解 将样品分为两部分, 一份用于 Nd 同位素比值测定, 另一份用于 Sm, Nd 含量测定。

含量分析: 样品加入 Sm, Nd 混合稀释剂 (如同时测定 Rb-Sr 年龄, 还加入 Rb, Sr 稀释剂) 混匀、蒸干转为过氯酸盐 用阳离子交换柱 (20cm × φ1cm, AG 50w × 8(H⁺), 200-400 目) 分离主元素, Rb, Sr, 并把稀土分成若干部分。收集 Rb, Sr, LREE 部分 蒸干 转为硝酸盐。质谱分析。

Nd 同位素分析: 样品蒸干, 转为过氯酸盐, 用阳离子交换柱 (柱条件同含量分析) 分离。REE 被作为一组解吸下来。如果同一流程要分析 Sr 同位素组成 将含 Sr 解吸液收集 蒸干, 送质谱分析。含 REE 溶液蒸干 再经 HDEHP 交换柱分离 收集含 Nd 解吸液 蒸干 质谱分析。

质谱测定用 MAT-261 固体同位素质谱计 双 Re 带, M⁺ 离子型式, 可调多法拉第筒接收器接收。质量分馏用 ($^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) = 0.7219 校正。标准测定结果: J. M. Nd₂O₃ $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ = 0.511125 ± 8(2σ), BCR-1 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ = 0.512643 ± 12(2σ), GBS04419 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ = 0.512731 ± 8(2σ)。Sm/Nd 比值测定精度优于 0.1%。Sm, Nd 流程空白近似 5×10^{-11} g。

年龄用 Lodwing(2000) 软件计算。衰变常数 λ(^{147}Sm) = 6.54×10^{-12} 年⁻¹。

四、Rb-Sr 年龄测定实验方法

Rb-Sr 年龄测定由两个流程完成。

(1) Rb-Sr 年龄测定和 Sm-Nd 年龄测定同一流程完成。其实验方法前面已叙述, 不再重复。

(2) 称取一定量粉碎至 200 目以下的粉末样品于 Teflon 烧杯中 加入 Rb, Sr 稀释剂 用

HF + HClO₄ 混合酸溶解。待样品完全溶解后 蒸干 用 HCl 溶解样品 溶液载入 Dowex50w × 8(H⁺)(200 - 400 目 离子交换柱 分离 Rb, Sr 及其他元素。收集 Rb, Sr 解吸液 蒸干。送质谱分析。

Rb, Sr 同位素分析用 MAT - 260 固体同位素质谱计进行。双 Re) 带, M⁺ 离子型式 法拉第筒接收器接收。Sr 同位素质量分馏用 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \equiv 8.37521$ 校正。标准测定结果: NBS987SrCO₃ $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.71025 \pm 2(2\sigma)$, Rb/Sr 比值测定精度优于 0.1%。Rb, Sr 流程空白 $10^{-9} \sim 10^{-10}\text{g}$ 。

年龄计算用 Ludwig(2000 软件计算。 $\lambda(^{87}\text{Rb}) = 1.42 \times 10^{-11} \text{年}^{-1}$ 。

五 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄测定实验方法

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄测定实验方法已有专文论述(富云莲等, 1987)。样品在中国原子能科学研究院照射。将样品用铝箔包成小包, 并装入铝筒中, 再将数支铝箔筒竖直排列在一密封玻璃瓶中, 瓶外再包一层厚 0.5mm 的锡皮后, 送入反应堆照射。照射快中子积累通量约为 $1 \times 10^{18}\text{n}/\text{cm}^2$ 。干扰元素校正因子用优级纯 K₂SO₄ 和光谱纯 CaF₂ 测定。

阶段升温实验在 MM - 1200 质谱计超高真空析 Ar 系统中进行。电子轰击炉自动控温溶样 每个阶段温度保持 45 - 60 分钟。析 Ar 系统与质谱计相连, 经净化气体进入质谱计, 由计算机控制自动峰跳测量。年龄用 Ludwig(2000 软件计算。衰变常数: $\lambda_{\alpha}(^{40}\text{K}) = 5.81 \times 10^{-11} \text{年}^{-1}$, $\lambda_{\beta}(^{40}\text{K}) = 4.962 \times 10^{-10} \text{年}^{-1}$ 。

六、稀土 REE 分析实验方法

稀土分析由中国地质科学院地质研究所 Sm-Nd 同位素年代学实验室用同位素稀释法完成。稀土分析和 Sm-Nd 年龄测定流程相同。实验方法张宗清和叶笑江(1987) 已专文论述。质谱测定用 MAT - 261 固体同位素质谱计, 双 Re 带, M⁺ 离子型式, 单或多法拉第筒接收器接收。分析精度一般优于 0.1%。

稀土分布模式用 Laedey/1.2 球粒陨石值标准化(Masuda *et al.*, 1973)。微量元素/原始地幔分布模式用 Sun and McDonough(1989 数据标准化。

七、主元素和微量元素(稀土元素除外)分析方法

主元素用 XRF 法, 微量元素用 ICP - MS 方法分析。由中国地质科学院岩矿测试所完成。

第四节 Nd 模式年龄和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值计算

本文用下面公式计算 Nd 模式年龄(DePaolo and Wasserburg, 1976; McCulloch and Wasserburg, 1978):

$$t_{\text{CHUR}} = 1/\lambda \ln \{ 1 + [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_s - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}] / [(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_s - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}] \}$$

$$t_{\text{DM}} = 1/\lambda \ln \{ 1 + [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_s - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}] / [(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_s - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}] \}$$

t_{CHUR} 相对球粒陨石地幔 Nd 模式年龄。 t_{DM} 相对亏损地幔 Nd 模式年龄。下角标 _s 代表样品值, CHUR 和 DM 分别代表球粒陨石地幔和亏损地幔值, λ 为 ^{147}Sm 衰变常数 6.54×10^{-12}

年⁻¹)假设亏损地幔 $\epsilon_{Nd}(0) = +10$, $(^{143}Nd/^{144}Nd)_{DM} = 0.51315$, $(^{147}Sm/^{144}Nd)_{DM} = 0.2137$ (Jahn *et al.*, 1988 ; 江博明等 ,1988a ; 江博明 ,1989)。

$\epsilon_{Nd}(t)$ 值计算公式 :

$$\epsilon_{Nd}(t) = [(^{143}Nd/^{144}Nd)_s(t) / (^{143}Nd/^{144}Nd)_{CHUR}(t) - 1] \times 10^4$$

式中 带下角标 _s 者代表样品值 ; CHUR 代表球粒陨石值。

第三章 鱼洞子群变质岩年龄

第一节 鱼洞子群地质概况

鱼洞子群呈断块形式出露于陕西省略阳县阎老岭—鱼洞子地区，罗素河地区和宁强县二里坝地区，是原划碧口群的一部分，即：原划碧口群下部位——鱼洞子组。1988 年秦克令将其解体出来并命名。时代归属太古宙（秦克令等，1990）。该群主要由斜长角闪岩、浅粒岩组成，夹磁铁石英岩，是一套变质火山—沉积岩系。按秦克令划分，该群自下而上可划分为四个岩组：第一岩组为斜长角闪岩，角闪混合岩，第二岩组为浅粒岩和少量斜长角闪岩，第三岩组为斜长角闪岩夹浅粒岩，角闪磁铁石英岩，第四岩组为浅粒岩夹绢云片岩，绿泥片岩与磁铁石英岩。岩石遭角闪岩相变质作用改造。

鱼洞子群变质岩年代学工作程度较低，仅有一个锆英石 U-Pb 年龄发表（秦克令等，1990）。锆英石由该群第三岩组混合岩化碎裂斜长角闪岩中分选。锆石为浅紫玫瑰色，浑圆状，普遍具有熔蚀痕迹，并且颗粒大小悬殊，由 0.2~0.01mm。不一致线上交点年龄为 $2655 \pm 27\text{Ma}$ ，下交点年龄为 $441 \pm 51\text{Ma}$ （ISOPLOT 程序重新计算结果，图 3-1）。

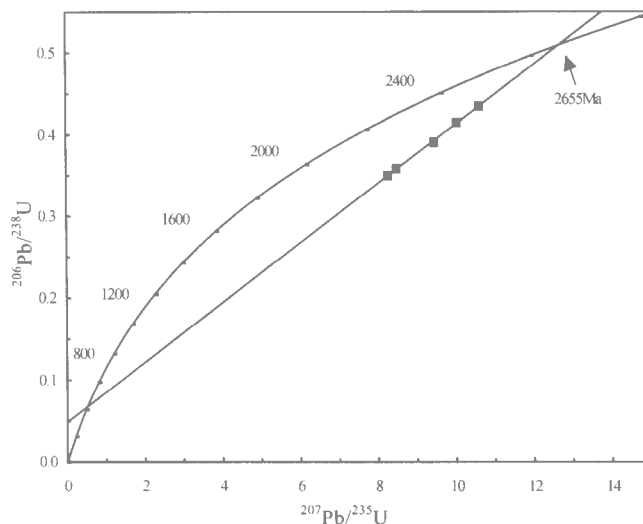


图 3-1 陕西省略阳县鱼洞子群斜长角闪岩锆英石 U-Pb 年龄

（引自秦克令等，1990）

因为该年龄是鱼洞子群建群重要依据，受到重视，其地质含义曾有较多的争议（秦克令等，1990；赵祥生等，1990）。为了检查上述年龄的可信性，对鱼洞子群变质岩进行了 Sm-Nd、Rb-Sr 年代学工作。对侵入其中的花岗岩也进行了锆石 U-Pb 年代学工作。部分结果已公布

过张宗清等,2001)。

第二节 采样点地质概况和样品地球化学特征

样品采自鱼洞子群出露最大断块——略阳鱼洞子-阁老岭块体北部马家沟铁矿区。区域地质情况如图 3-2 所示。采样点出露岩石按秦克令划分应属鱼洞子群第三岩组。由南至北依次是：磁铁石英岩，变质基性火山岩，变质酸性火山岩。岩石遭角闪岩相变质作用和不

表 3-1 陕西省略阳县马家沟鱼洞子群变质岩样品主、微量元素组成

样 品	Q92199-1	Q92199-7	Q92199-12	Q92199-15
SiO ₂	79.00	55.97	50.50	58.57
TiO ₂	0.09	0.44	0.69	0.38
Al ₂ O ₃	4.78	14.03	15.71	18.00
Fe ₂ O ₃	0.66	6.43	3.82	2.55
FeO	3.16	8.20	6.16	3.19
MnO	0.32	0.08	0.12	0.07
MgO	1.56	3.09	6.06	3.67
CaO	5.04	2.15	7.06	2.14
Na ₂ O	0.45	1.63	4.85	6.00
K ₂ O	0.97	3.13	1.38	2.08
P ₂ O ₅	0.05	0.10	0.14	0.19
LOI	4.20	3.32	2.58	2.29
Σ	100.28	98.57	99.07	99.13
La	2.86	—	24.85	12.46
Ce	6.10	27.30	47.66	26.93
Nd	2.78	11.00	19.82	14.82
Sm	0.54	2.16	3.95	3.01
Eu	0.19	0.57	1.10	0.93
Gd	0.38	1.64	3.45	2.66
Dy	0.41	1.18	3.60	2.32
Er	0.26	0.59	2.17	1.27
Yb	0.27	0.60	2.00	1.06
Lu	0.04	0.10	0.29	0.16
Rb	23	83	22	31
Sr	96	54	392	529
Ba	210	560	716	704
Zr	51.8	66.7	73.4	99.9
Hf	1.2	2.1	2.1	2.7
Nb	—	5.5	7.0	1.4
Ta	—	0.6	0.4	—
Th	<3	12	8	<3
Y	2	11	14	5
Cr	12	160	132	15
Ni	5	103	88	7
Co	2	21	27	8
V	8	111	225	74

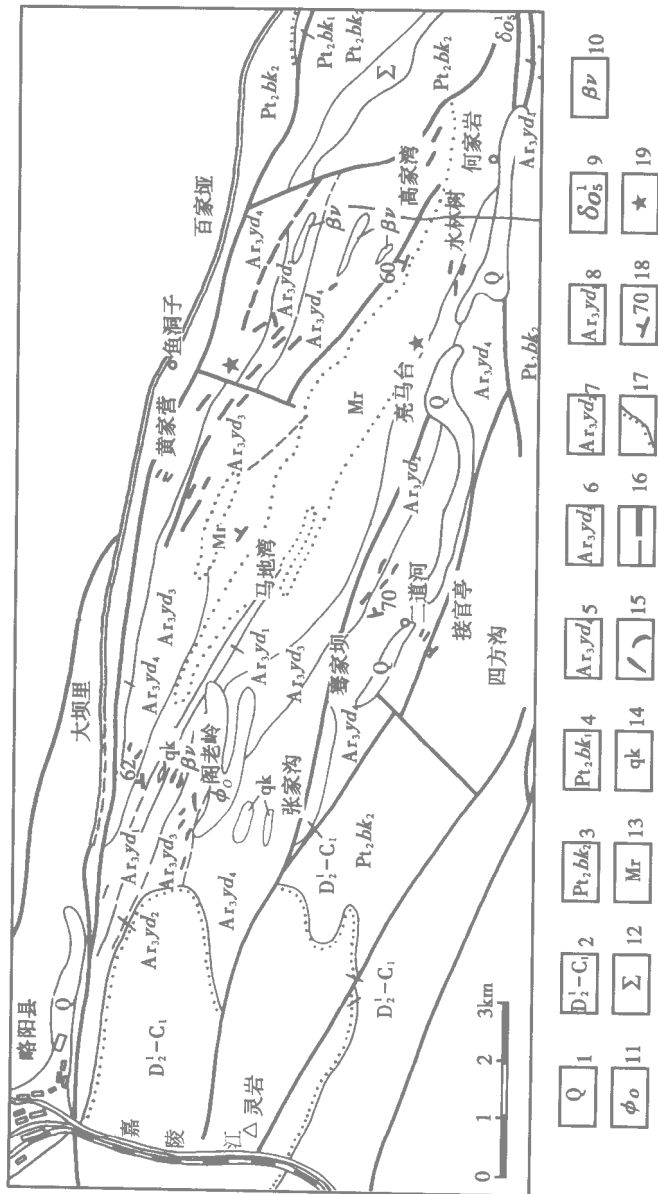


图 3-2 陕西省略阳县鱼洞子地区地质略图

(引自秦克令等, 1990)

1—第四系:现代河流冲积层、砂砾、粘土;2—略阳组,结晶灰岩、板岩,底部有一层砾岩;3—碧口群上亚群,白云质灰岩、硅质白云岩、炭质千枚岩;4—碧口群下亚群上岩组,石英角斑质凝灰岩、凝灰质板岩夹石英角斑岩透镜体;鱼洞子群(5~8):5—第四岩组,浅粒岩夹绢云片岩、绿泥片岩与磁铁矿石英岩;6—第三岩组,浅粒岩、斜长角闪岩夹阳起磁铁矿石英岩;7—第二岩组,浅粒岩夹少量斜长角闪岩;8—第一岩组,斜长角闪岩、角闪混合岩;9—石英闪长岩;10—变质辉绿岩;11—角闪橄辉岩;12—超基性岩;13—混合花岗岩;14—长英质脉岩;15—铁矿体;16—断层;17—地层不整合界线;18—地层产状;19—采样位置

同程度混合岩化已变质成斜长角闪岩,角闪斜长片麻岩和斜长片麻岩。斜长片麻岩一般为浅灰色、块状,弱片麻状构造。但在风化表面片麻理十分清晰。

地层中有大量花岗岩和少量基性岩脉侵入。

部分样品主、微量元素分析结果列入表 3-1。稀土分布模式见图 3-3。可以看出 样品原岩可能是基性—中酸性火山岩。Q92199-1 为近矿围岩,主元素在后期地质作用中已遭受较大改造,但稀土分布模式仍然保持不变,所有样品仍保持类似稀土分布模式(图 3-2)。高价大离子不相容微量元素和亲铁元素显示,样品 Q92199-1 与其它样品具有相同成因关系(图 3-4)。镜下观察,Q92199-1 中有少量细粒干净钠长石残存。这表明,所研究的鱼洞子群变质岩原岩可能是同一源区部分熔融,并经结晶分异形成的不同类型火山岩。

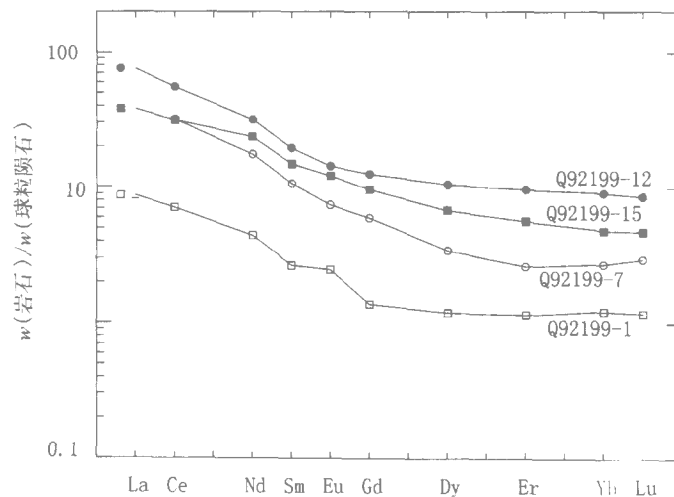


图 3-3 陕西省略阳县马家沟鱼洞子群变质岩样品稀土分布模式

第三节 同位素年龄测定结果

一、Sm-Nd 同位素年龄数据

对 13 个斜长角闪岩和片麻岩样品进行了 Sm-Nd 同位素分析 结果列在表 3-2。在 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ - $^{147}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 图上所有样品均呈良好线性分布(图 3-5)。等时年龄 $t = 2688 \pm 100(2\sigma)$ Ma, $I_{\text{Nd}} = 0.50913 \pm 7(2\sigma)$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -0.4$, MSWD = 3.62。Nd 模式年龄 t_{CHUR} 为 $2724 \pm 44(\sigma)$ Ma, t_{DM} 为 $3017 \pm 69(\sigma)$ Ma

二、Rb-Sr 同位素年龄数据

同 Sm-Nd 年龄测定样品,9 个变质岩样品被分析,结果列在表 3-3 中。样品 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值很小,除样品 Q92199-11 为 3.015 外,其余样品比值在 0.004798 ~ 0.4625 之间。样品

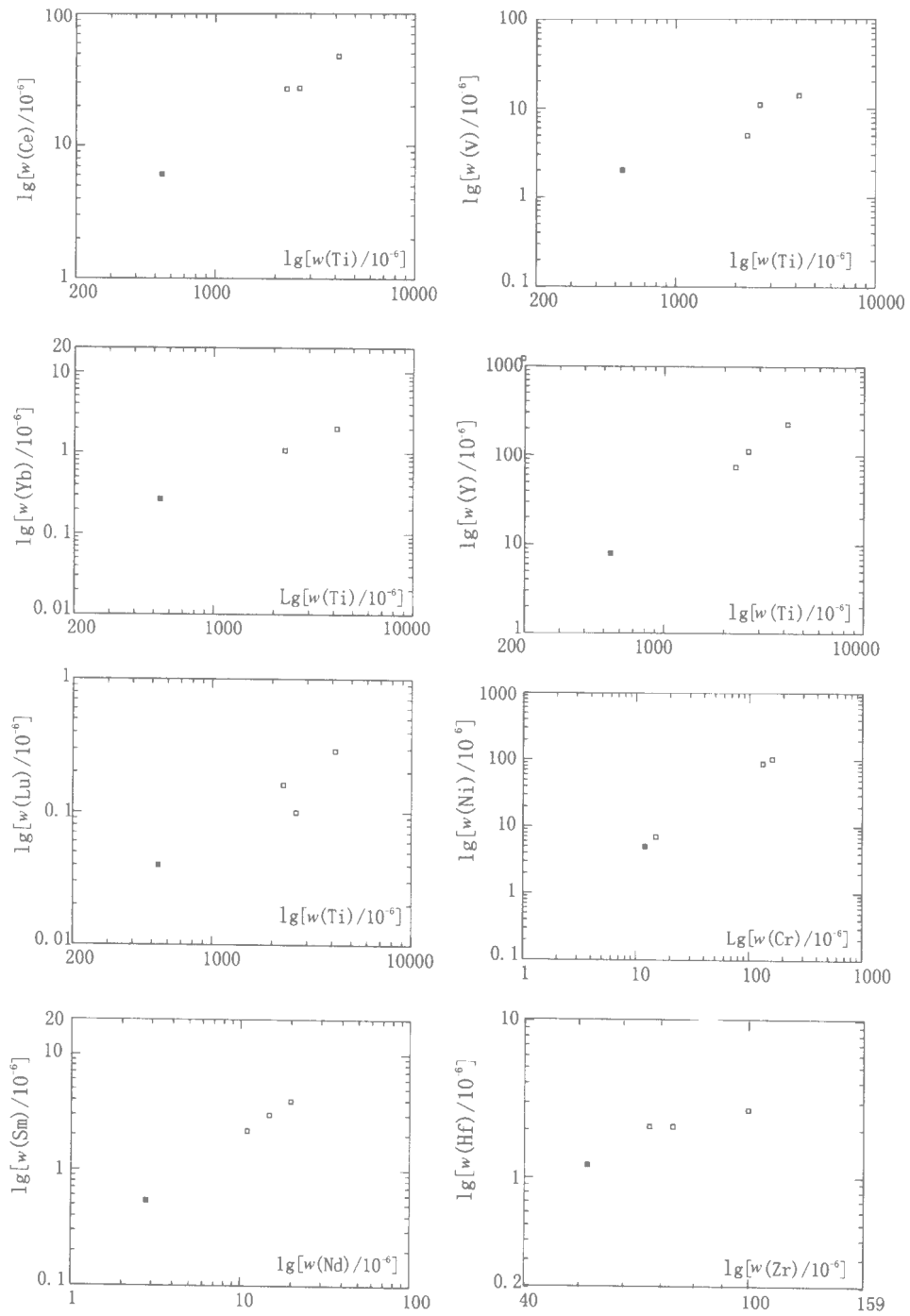


图 3-4 陕西省略阳县马家沟鱼洞子群变质岩样品 Ce(Yb、Lu、Y、V) - Ti, Sm-Nd, Ni - Cr, Zr - Hf 图
(据表 3-1 数据绘制)

■ Q92199 - 1; □ Q92199 - 7, 12, 15

表 3-2 陕西省略阳县马家沟鱼洞子群变质岩样品 Sm-Nd 年龄同位素分析结果

样品号	$w(\text{Sm})/10^{-6}$	$w(\text{Nd})/10^{-6}$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 2\sigma$	$t_{\text{CHUR}}/\text{Ma}$	t_{DM}/Ma
Q92199-1	5.382×10^{-1}	2.780	0.1171	0.511224 7	2692	3019
Q92199-7	2.159	10.998	0.1187	0.511176 8	2839	3145
Q92199-8	5.196	24.092	0.1305	0.511456 11	2706	3082
Q92199-9	5.460	40.209	0.8214×10^{-1}	0.510579 6	2724	2959
Q92199-11	2.531	14.670	0.1044	0.510954 9	2764	3042
Q92199-12	3.954	19.819	0.1207	0.511284 9	2700	3038
Q92199-13	5.644×10^{-1}	3.452	0.9890×10^{-1}	0.510889 5	2710	2982
Q92199-15	3.009	14.822	0.1228	0.511348 7	2646	3002
Q92199-16	9.424×10^{-1}	7.913	0.7204×10^{-1}	0.510398 5	2723	2942
Q92199-17	1.261	9.528	0.8006×10^{-1}	0.510535 8	2732	2963
Q92199-18	3.027	14.296	0.1281	0.511396 6	2744	3101
Q92200	5.210×10^{-1}	2.706	0.1165	0.511184 6	2747	3062
Q92201	1.520	17.171	0.5355×10^{-1}	0.510102 7	2685	2883

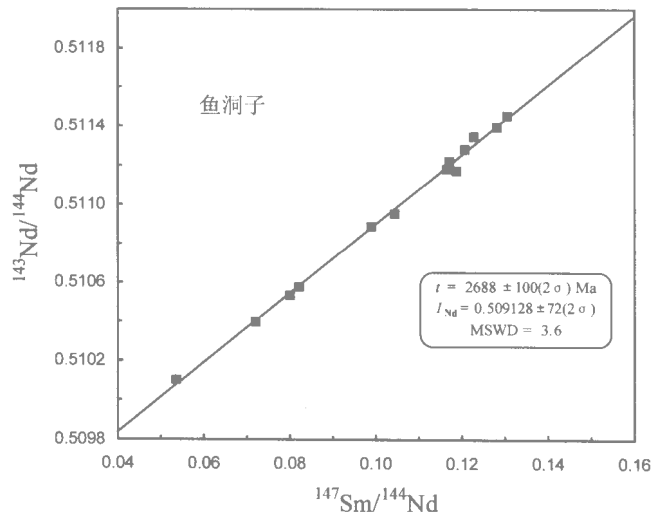


图 3-5 陕西省略阳县马家沟鱼洞子群变质岩样品 Sm-Nd 等时年龄

表 3-3 陕西省略阳县马家沟鱼洞子群变质岩样品 Rb-Sr 年龄同位素分析结果

样品号	$w(\text{Rb})/10^{-6}$	$w(\text{Sr})/10^{-6}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \pm 2\sigma$
Q92199-3	1.47	1.511×10^1	0.2823	0.73349 6
Q92199-8	3.607×10^1	3.125×10^2	0.3342	0.71284 8
Q92199-11	1.111×10^2	1.069×10^2	0.3015×10^1	0.74067 8
Q92199-14	6.300×10^{-1}	3.802×10^2	0.4798×10^{-2}	0.70701 3
Q92199-16	1.214×10^1	4.872×10^2	0.7215×10^{-1}	0.70518 4
Q92199-17	1.977×10^1	4.025×10^2	0.1421	0.70673 1
Q92199-18	3.979×10^1	6.207×10^2	0.1854	0.70630 6
Q92200	8.000×10^{-1}	7.920	0.2918	0.72453 7
Q92201	1.796×10^1	1.118×10^2	0.4625	0.71949 6

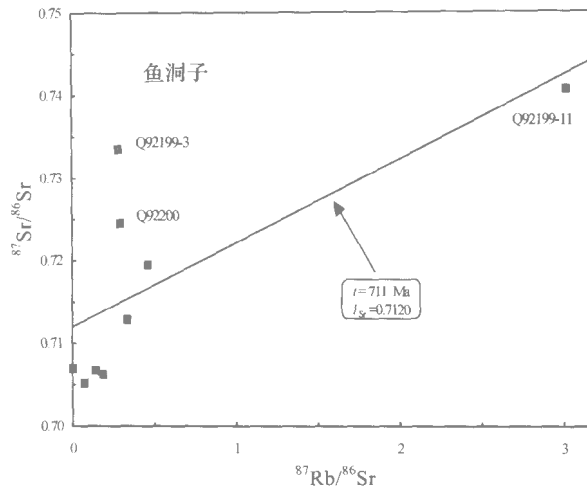


图 3-6 陕西省略阳县马家沟鱼洞子群变质岩样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 图

Rb-Sr 同位素数据在 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 图上十分分散, 不构成等时线图 (图 3-6)。岩石形成后可能遭受过多次变质作用或热事件影响。

三、鱼洞子群中花岗岩锆英石 U-Pb 年龄

在略阳鱼洞子 - 阁老岭块体南部何家岩一带可见浅红色细粒花岗岩侵入鱼洞子群地层中。样品采自何家岩西部公路剖面原划混合花岗岩中 (图 3-2)。岩石为浅红色、灰白色、中粒, 主要由斜长石、少量钾长石和石英组成。暗色矿物由于强烈变质作用和蚀变难以估计。局部可见变质气成热液形成的毛发状电气石集合体。岩石化学成分: SiO_2 67.76%, TiO_2 0.34%, Al_2O_3 15.68%, FeO 1.69%, Fe_2O_3 1.63%, MnO 0.08%, CaO 1.90%, MgO 0.97%, K_2O 2.13%, Na_2O 5.35%。从矿物组成和化学成分看, 岩石属奥长花岗岩。选自上述花岗岩样品 Q98197 的 5 颗锆英石被用于 U-Pb 年龄同位素分析。锆英石为玫瑰色, 四方或六方双锥短柱状, 半透明 - 透明, 长宽比 1:1.5 ~ 1:2, 晶棱圆化。分析结果见表 3-4。除 No. 5 外, 其余锆英石样品分析结果在谐合图上形成一条直线, 与谐合线上交点年龄为 $2693 \pm 9(2\sigma)\text{Ma}$, 下交点年龄为 $702 \pm 58(2\sigma)\text{Ma}$ (图 3-7)。

表 3-4 陕西省略阳县何家岩西侵入鱼洞子群花岗岩锆英石 U-Pb 年龄同位素分析结果

No.	$\frac{w(\text{U})}{10^{-6}}$	$\frac{w(\text{Pb})}{10^{-6}}$	普通铅含量 $\frac{w(\text{Pb})}{10^{-9}}$	同位素原子比率				表面年龄 / Ma		
				$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$
1	187	98	0.042	1113	0.4478 ± 40	11.05 ± 10	0.1790 ± 3	2385	2528	2643
2	177	87	0.005	8409	0.4372 ± 42	10.72 ± 11	0.1778 ± 35	2338	2499	2633
3	141	69	0.047	674	0.4023 ± 58	9.639 ± 144	0.1738 ± 28	2179	2401	2594
4	173	75	0.007	5414	0.3907 ± 38	9.331 ± 94	0.1732 ± 3	2126	2371	2588
5	41	23	0.019	272	0.4255 ± 84	9.082 ± 188	0.1548 ± 7	2285	2346	2400

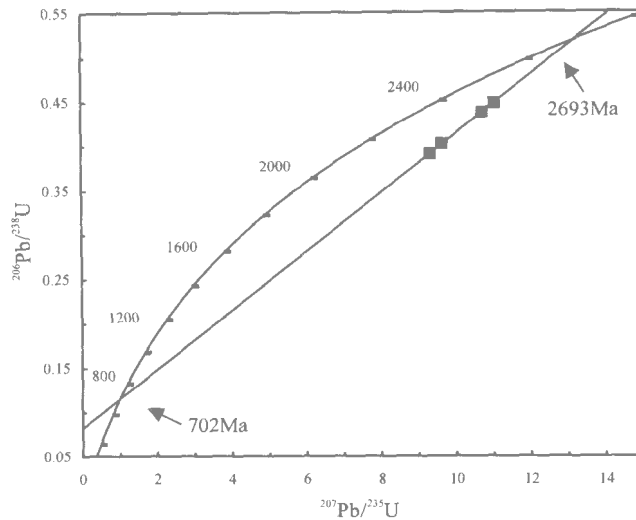


图 3-7 陕西省略阳县何家岩西侵入鱼洞子群花岗岩锆英石 U-Pb 年龄

表 3-4 中的 No. 5 在图中未表示

第四节 讨 论

一、鱼洞子群变质岩原岩的形成年龄

新获得的变质岩的 Sm-Nd 等时年龄为 $2688 \pm 100(2\sigma)$ Ma，与以前获得的锆石 U-Pb 年龄 $2655 \pm 27(2\sigma)$ Ma 在误差范围内完全一致。这表明，鱼洞子群变质岩的形成年龄不会小于 2655 Ma。但是这些年龄值的地质意义值得进一步讨论。它很可能是岩石形成后遭受强烈地质作用，变质和部分重熔时间。理由如下。

(1) 变质岩锆英石 U-Pb 年龄。所分析的锆英石由采自鱼洞子群第三岩组混合岩化斜长角闪岩中分选。其斜长角闪岩为基性火山岩变质而成（秦克令等，1990）。在基性火山岩中，Zr 含量很低，不大可能形成大量锆英石。鱼洞子群变质基性火山岩中 Zr 含量小于 $100 \mu\text{g/g}$ （表 3-1），其值和大洋中脊拉斑玄武岩平均值类似（Hofman, 1988）。因此在其形成时生成大量锆英石是不可能的。所分析的锆英石大小不一，可能是后期变质作用中形成。其年龄值可能代表火山岩遭受后期变质作用时间。

(2) 鱼洞子群变质岩原岩主体是火山岩，前面已经说明。从所获得的 Sm-Nd 年龄看 等时年龄为 $2688 \pm 100(2\sigma)$ Ma, $I_{\text{Nd}} = 0.50913 \pm 7(2\sigma)$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -0.4$ 。相应模式年龄 t_{DM} 为 $3017 \pm 69(\sigma)$ Ma。变质火山岩具有小于 0 的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 并且等时年龄和模式年龄 t_{DM} 相差很大，这和已获得的我国和世界其他地区大量太古宙岩石的 Sm-Nd 同位素资料不大相符。一般来说，对于太古宙的岩石，除非岩石源区或岩石形成过程中有较多老地壳物质加入，或受强烈变质重熔 Nd 同位素系统完全再置年龄代表变质时间例外外，岩石的模式年龄 t_{DM} 和等时年龄差不多相同， $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值一般都大于 0。

(3) 侵入鱼洞子群变质岩中的花岗岩的锆英石 U-Pb 年龄为 $2693 \pm 9(2\sigma)$ Ma 和已获得的变质岩的 Sm-Nd 等时年龄 锆石 U-Pb 年龄在误差范围内一致。

上述事实表明, 鱼洞子群变质岩原岩形成年龄可能大于 2693Ma。从 Nd 模式年龄看。变质岩原岩可能形成于中太古代。

二、鱼洞子群变质岩原岩与扬子克拉通和华北克拉通基底关系

鱼洞子群变质岩中产出铁英岩矿, 可与华北克拉通对比(沈其韩, 1998)但是它的产出围岩不是变质沉积岩, 而是变质火山岩。

近几十年研究表明, 同位素地球化学, 特别是 Nd 同位素地球化学, 对阐明岩石物质源区、成因类型、彼此关系具有重要价值。表 3-5 列出了近十多年来获得的我国主要太古宙岩石的 Sm-Nd 年龄和 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值。图 3-8 表示出了这些岩石的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值随年龄 t 的分布。可以看出其 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值明显存在两个区域。一个区域由东北辽吉 冀东 曹庄斜长角闪岩(例外)冀西北、阜平、山东泰山、新泰、沂水和河南登封变质岩组成 另一个由三峡黄陵崆岭群 陕西略阳鱼洞子和河南洛宁熊耳山北侧太华群变质岩组成。在同一时间, 前者 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值比后者高。按大地构造分区, 前者岩石均产出于中朝克拉通华北块体, 后者空间上位于秦岭及其边缘。一般认为, 崆岭群是扬子克拉通基底。这表明, 鱼洞子群变质岩原岩可能是扬子克拉通基底的一部分。冀东曹庄斜长角闪岩处于崆岭群区域的延长范围内, 在古、中太古代它们形成时,

表 3-5 中国主要太古宙变质岩 Sm-Nd 年龄和相应 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值

No.	地区	岩石	Sm - Nd 等时年龄 / Ma	$\epsilon_{Nd}(t)$	资料来源
1	冀东迁安曹庄	斜长角闪岩	3500 ± 80 ^①	+ 3.3	Jahn et al., 1987; 江博明等, 1988b; Jahn, 1990a; Huang et al., 1986; 乔广生等, 1987
2	冀东迁西地区	麻粒岩	2530 ± 108	+ 4.4	Jahn, 1990a, Jahn and Zhang, 1984a, b; 江博明、张宗清, 1985
3	冀东迁安地区	麻粒岩	2790 ± 65	+ 3.5	Jahn, 1990a
4	冀东青龙	麻粒岩	2686 ± 166	+ 1.6	张桂存、李杰元 1989 ^②
5	冀西北蔓菁沟	麻粒岩	2647 ± 115	+ 3.6	郭敬辉等, 1994
6	冀西北大东沟	麻粒岩	2402 ± 13	+ 1.6	沈其韩等, 1994
7	冀西北上新营	麻粒岩	2667 ± 90	+ 2.4	张宗清等, 1996c
8	冀西北伙房村	斜长角闪岩	2513 ± 55	+ 1.2	张宗清等, 1996c
9	冀西北怀安	麻粒岩	2426 ± 94	+ 0.53	刘宇光, 1989 ^③
10	阜平地区	麻粒岩	2790 ± 171	+ 2.9	张宗清等, 1991b
11	山东沂水	麻粒岩	2997 ± 76	+ 3.8	沈其韩等, 1993
12	山东新泰	斜长角闪岩	2684 ± 164	+ 3.3	张宗清等, 1996 ^④
13	山东泰山	斜长角闪岩	2700 ± 35	+ 3.3	Jahn et al., 1988; 江博明等, 1988a
14	辽吉地区	斜长角闪岩	2660 ± 75	+ 4.4	Jahn, 1990a
15	河南登封	斜长角闪岩	2509 ± 16	+ 2.2	李曙光等, 1987
16	河南洛宁太华群	片麻岩、斜长角闪岩	2359 ± 130	- 2.1	张宗清、黎世美, 1998c
17	略阳鱼洞子	片麻岩、斜长角闪岩	2688 ± 100	- 0.4	本书
18	黄陵崆岭群	斜长角闪岩、片麻岩	3150 ± 79	+ 2.3	马大铨等, 1997

注: ① 95%置信度水平; 张桂存、李杰元, Sm-Nd 同位素年代学实验和测试条件的改进及冀东、泰山、冀北 Sm-Nd 年代学研究, 第四届全国同位素年代学、同位素地球化学讨论会论文集汇编, 1989。②刘宇光博士论文“中国冀西北及邻区早前寒武纪变质杂岩的成因和地壳演化、年代学、地球化学、同位素地质年代学研究”, 1989。③张宗清未发表数据。