

太行山早前寒武纪杂岩的同位素年代学和地质事件^{*}

刘树文^① 梁海华^① 赵国春^② 华永刚^① 简安华^①

(^①北京大学地质学系, 北京 100871; ^②School of Applied Geology, Curtin University of Technology, Perth 6001, Australia)

摘要 通过对太行山前寒武纪杂岩地质学 and 同位素地质年代学研究, 确定了太行山的地质事件主要有 5 期. 新太古代早期玄武质岩浆喷发和石英闪长质-英云闪长质岩浆侵位, 形成阜平片麻岩的角闪斜长片麻岩和 TTG 片麻杂岩中变质基性岩包体. 新太古代晚期麻粒岩相变质和黑云斜长片麻岩侵位. 新太古代末期至古元古代早期伸展隆升, 形成城南庄大型变形带, 沿着伸展变形带变质基性岩脉侵位. 古元古代晚期(吕梁期)太行山前寒武纪杂岩重新活化, 构造隆升, 南营片麻岩侵位, 之后形成龙泉关韧性剪切带. 古元古代末期形成区域性花岗质伟晶岩, 代表吕梁运动结束.

关键词 早前寒武纪杂岩 同位素年代学 地质事件 太行山

1 地质概况

近年来研究表明, 太行山前寒武纪变质杂岩由 3 个地质单元组成^[1]. 一是以阜平为核心的阜平片麻杂岩, 主要分布于山麓带, 主体岩性为 TTG 片麻岩, 其中含有规模不等、形态各异的基性麻粒岩、石榴石单斜辉石斜长角闪岩(一些样品含石英)、紫苏辉石磁铁石英岩和石榴黑云斜长片麻岩、石榴石紫苏斜长片麻岩等包体. 其中 TTG 片麻岩主要岩性有角闪斜长片麻岩和黑云斜长片麻岩之分, 前者暗色矿物以角闪石为主, 黑云母相对较少, 暗色矿物总体含量可达 15% 左右, 后者暗色矿物以黑云母为主, 几乎不含角闪石, 暗色矿物含量不超过 10%. 由于工作程度的原因, 两类 TTG 片麻岩在地质图上尚不能分辨出来. 二是分布在阜平片麻杂岩东南和西部的湾子变质层状岩系, 是角闪岩相变质的表壳岩, 岩石组合为各类大理岩、钙硅酸盐岩、富铝片麻岩、变质长石石英砂岩和变质钙质砂岩等. 三是在空间上位于上述二者之间, 主体岩性为广泛含有磁铁矿的花岗闪长质至二长花岗质片麻岩以及一些斜长角闪岩. 它们是沿着湾子岩系和阜平片麻杂岩之间发育的大型韧性伸展变形带侵位的席状侵入体^[2], 称之为南营片麻岩, 主要分布在山峰带. 本文在大量野外地质研究的基础上, 对阜平片麻岩、南营片麻岩进行了全岩 Sm-Nd 同位素测定, 对平山县孟家庄一带的含夕线石石英球二长花岗岩、钾长花岗岩(属于第三地质单元)进行了全岩 Rb-Sr 同位素分析, 结合前人的同位素资料确定了太行山前寒武纪杂岩的地质事件. 3 个地质单元和本文所用样品的地质分布见地质简图(图 1).

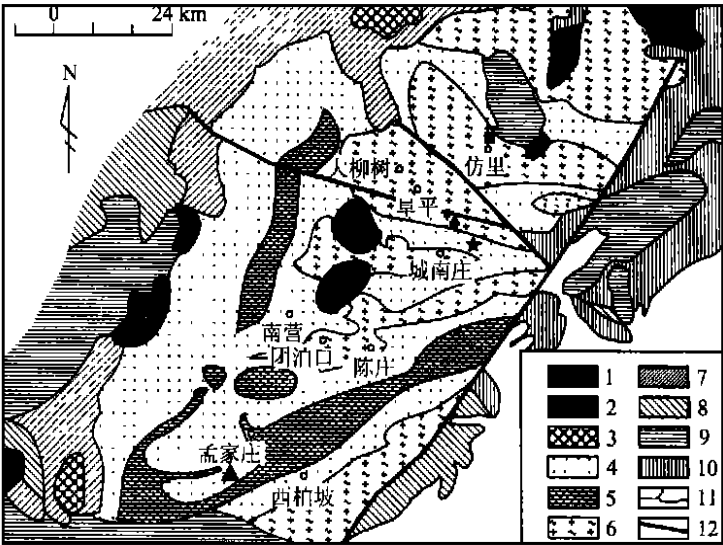


图 1 太行山早前寒武纪变质杂岩地质简图

1 示中生代岩体, 2 示阜平期岩体, 3 示五台期岩体, 4 示南营片麻岩(第三地质单元), 5 示湾子变质层状岩系(第二地质单元), 6 示阜平片麻岩(第一地质单元), 7 示五台群, 8 示漳沱群, 9 示古生代地层, 10 示中上元古代地层, 11 示地质界线, 12 示断层。■为 f103-1~f108-1 等斜长角闪岩样品取样地点; ◆为 19725-1, 9758-1, 9711-1 等样品取样地点; ★为 9737-1, 9711-1-1, 9735-1 等样品取样地点, ▲为 Rb-Sr 等时线样品采样地点

2 阜平片麻杂岩同位素年代学

近年来阜平片麻杂岩的同位素年代学研究取得了许多进展, 使其研究程度大大提高. 前人测定的片麻岩的碎屑锆石一致线 U-Pb 年龄 $2.8^{+0.23}_{-0.13}$ Ga^[3], 麻粒岩和片麻岩 Sm-Nd 等时线年龄 (2.79 ± 0.17) Ga^[4], 角闪斜长片麻岩的单颗粒锆石 LP-ICP-MS 法 ^{207}Pb - ^{206}Pb 年龄峰值为 (2.69 ± 0.06) Ga^[5], 黑云斜长片麻岩单颗粒锆石 SHRIMP 的 U-Pb 年龄 (2.535 ± 0.008) Ga^[6]. 其中前两个同位素年龄的测定是基于对阜平片麻杂岩是地层系统的认识做出的, 所以测定 Sm-Nd 年龄时将片麻岩和变质基性岩构筑同一条等时线^[4]. 近年来的研究表明, 阜平片麻杂岩的主体 TTG 片麻岩是深成侵入体, 而其中的基性麻粒岩和单斜辉石斜长角闪岩包体是变质表壳岩^[1, 7, 8], 应分属不同的同位素体系. 本文利用前人的 Sm-Nd 同位素资料^[4, 8]剔除原等时线中的片麻岩样品、亏损地幔模式年龄异常高的样品(8255-1 和 8266), 对原作者的 6 个单斜辉石斜长角闪岩、麻粒岩样品进行了重新处理和等时线拟合(表 1, 图 2(a)), 得到了 (2.679 ± 0.069) Ga 的等时线年龄, $M.S.W.D = 1.59$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = +3.5$, 平均模式年龄为 2.767 Ga. 该等时线年龄应代表单斜辉石斜长角闪岩的成岩年龄, 与角闪斜长片麻岩的单颗粒锆石 LP-ICP-MS 法 ^{207}Pb - ^{206}Pb 年龄峰值在该等时线的误差范围内一致, 反映了该区在 2.70 Ga 左右存在一期强烈的岩浆活动, 表现为玄武质岩浆的火山活动和角闪石斜长片麻岩的侵位.

阜平片麻杂岩中的黑云母斜长片麻岩的 2 个样品(样品 8252 和 H8506)取自阜平县大柳树附近^[4], 在广安桥东相同地质单元补充采集了 3 个样品(采样地点见图 1, 19725-1, 9758-1 和

9711-1, 3 个样品为黑云母含量不同的黑云斜长片麻岩), 进行了 Sm-Nd 同位素测定(表 1), 结合张宗清的 2 个样品, 5 个黑云斜长片麻岩的等时线年龄为 (2.502 ± 0.050) Ga (图 2(b)), $M.S.W.D=1.40$, 平均亏损地幔模式年龄 2.93 Ga. 大于 2.9 Ga 亏损地幔模式年龄, 暗示了本区可能存在中太古代的老地壳. $\epsilon_{Nd}(t)=-0.7$, 表明有地壳物质加入. SHRIMP 单颗粒锆石 U-Pb 年龄 $(2.535 \text{ Ga})^{[9]}$ 在该等时线年龄的误差范围内. 因此, 将 2.535 Ga 作为黑云斜长片麻岩的成岩年龄是合适的, 反映了该区太古代晚期的大规模花岗质岩浆活动地质事件. 岩石学特征和变质流体研究均表明, 黑云母斜长片麻岩和眼球状片麻岩未经历过麻粒岩相变质作用, 黑云斜长片麻岩的变质流体成分与铁镁质麻粒岩减压隆升退变质阶段的流体成分特征相似, 说明黑云斜长片麻岩的侵位结晶在麻粒岩相峰期变质之后, 是在地壳早期隆升时形成的^[1]. 同时也暗示出麻粒岩相变质作用峰期略早于黑云斜长片麻岩的结晶时间. 但是, 就总体而言, 麻粒岩相变质作用和黑云斜长片麻岩的岩浆活动属于新太古代同一期构造岩浆事件.

表 1 太行山前寒武纪杂岩的 Sm-Nd 同位素特征

岩石	样品号	Sm(10^{-6})	Nd(10^{-6})	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2σ	t_{DM}/Ga	$\epsilon_{Nd}(0)$	$\epsilon_{Nd}(t)$	$f^{Sm/Nd}$
辉石斜长角闪岩	8098-6 ^{a)}	2.757	9.847	0.169 4	0.512 324	0.000 010	2.82	-6.125 2	3.309 9	-0.14
	f4-3 ^{b)}	2.717	10.05	0.163 3	0.512 219	0.000 012	2.80	-8.173 4	3.3653	-0.17
	8055 ^{a)}	3.694	15.782	0.141 6	0.511 858	0.000 008	2.72	-15.215 4	3.808 1	-0.28
	f1-3 ^{b)}	5.558	29.94	0.112 0	0.511 317	0.000 008	2.73	-25.768 7	3.458 2	-0.43
	8256 ^{a)}	2.789	11.956	0.141 1	0.511 815	0.000 039	2.79	-16.054 2	3.445 1	-0.28
	Ag04 ^{a)}	1.940	7.146	0.164 2	0.512 253	0.000 009	2.75	-7.510 2	3.720 6	-0.17
阜平片麻岩	19725-1	4.081	20.505	0.120 4	0.511 349	0.000 009	2.92	-25.144 45	-0.255 6 ^{c)}	-0.39
	9758-1	4.310	18.736	0.139 1	0.511 650	0.000 007	3.04	-19.272 86	-0.498 9 ^{c)}	-0.29
	9711-1	4.083	19.264	0.128 2	0.511 467	0.000 008	2.98	-22.842 63	-0.507 4 ^{c)}	-0.35
	8252 ^{a)}	3.767	21.487	0.106 1	0.511 112	0.000 02	2.87	-29.767 59	-0.224 4 ^{c)}	-0.46
	H8506 ^{a)}	2.894	17.652	0.099 2	0.510 987	0.000 009	2.86	-32.205 96	-0.413 9 ^{c)}	-0.50
	f103-1	2.077	16.179	0.077 7	0.510 940	0.000 020	2.47	-33.122 79	5.471 0	-0.60
斜长角闪岩	f104-2	2.218	8.063	0.166 4	0.512 395	0.000 007	2.43	-4.740 187	5.110 3	-0.15
	f106-1	1.758	6.071	0.175 3	0.512 553	0.000 015	2.37	-1.658 09	5.309 9	-0.11
	f107-1	1.771	6.375	0.168 0	0.512 445	0.000 009	2.35	-3.764 84	5.570 2	-0.15
	f107-2	2.694	9.605	0.169 6	0.512 449	0.000 007	2.42	-3.686 812	5.126 9	-0.14
	f108-1	2.242	8.202	0.165 3	0.512 372	0.000 008	2.45	-5.188 847	5.017 5	-0.16
	f103-2	7.576	39.934	0.114 7	0.511 514	0.000 007	2.51	-21.925 8	4.674 0	-0.42
南营片麻岩	78111-1 ^{a)}	1.517	9.493	0.096 7	0.511 101	0.000 007	2.65	-29.982 17	-2.723 6	-0.51
	78115-1 ^{a)}	1.107	6.174	0.108 5	0.511 260	0.000 015	2.72	-26.880 57	-2.840 9	-0.43
	f06-1 ^{b)}	2.665	27.02	0.059 5	0.510 586	0.000 012	2.52	-40.028 25	-2.623 6	-0.70
	9735-1	3.900	22.795	0.103 5	0.511 181	0.000 007	2.71	-28.421 62	-3.011 0	-0.47
	f06-4 ^{b)}	1.962	18.94	0.062 5	0.510 604	0.000 016	2.55	-39.677 12	-3.093 1	-0.68
	9711-1-1	5.990	38.550	0.093 9	0.511 035	0.000 006	2.68	-31.269 63	-3.250 3	-0.52
	9735-3	6.521	37.585	0.104 9	0.511 165	0.000 007	2.76	-28.733 73	-3.716 9	-0.47

a) 引自文献[4], b) 引自文献[8], 其余样品为本文测定, c) 以年龄值 2.535 Ga 计算, 计算中使用 MORB 亏损地幔参考值为 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_r=0.513\,151$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_r=0.213\,7$. 本文所有样品的同位素测定均在中国科学院地质研究所 VG354 质谱计上进行, 分析者: 乔广生等, 分析流程见文献[9]; 国际标样 BCR-1a 的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512\,635\pm 8$, BCR-1b 的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512\,644\pm 6$; 表中 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})$ 比值均用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.721\,9$ 标准化; ϵ_{Nd} 值是相对于 CHUR 计算的, CHUR 的现今值为 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512\,638$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}=0.196\,7$

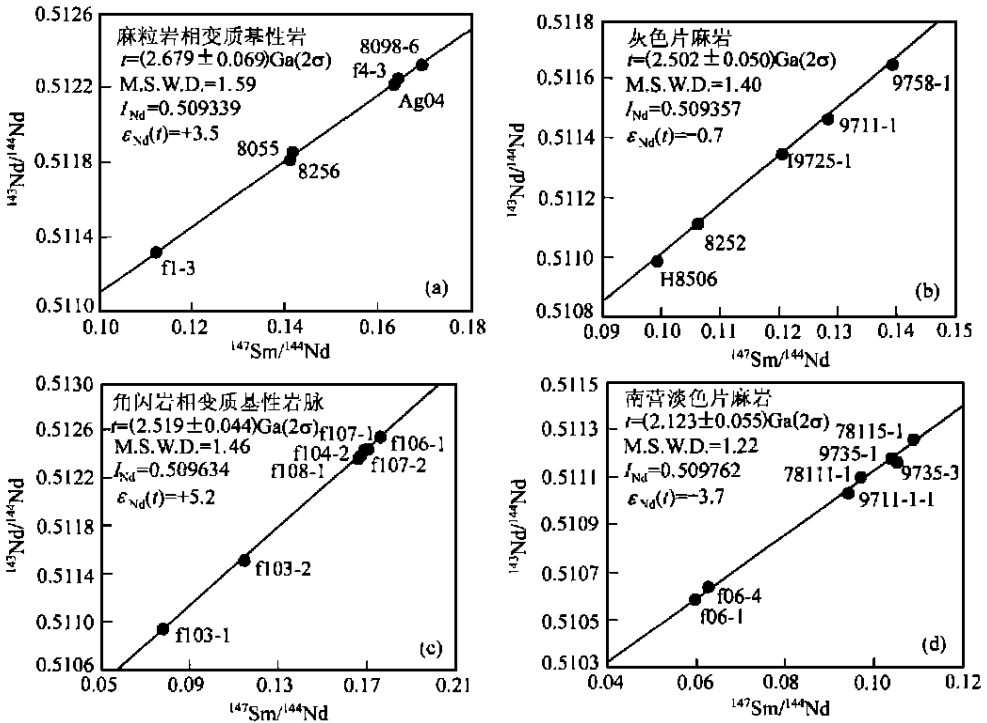


图 2 太行山前寒武纪变质杂岩的 Sm-Nd 等时线图

(a) 阜平片麻岩中单斜辉石斜长角闪岩、麻粒岩包体 Sm-Nd 等时线图, (b) 阜平片麻岩中黑云斜长片麻岩 Sm-Nd 等时线图, (c) 阜平片麻岩中斜长角闪岩脉 Sm-Nd 等时线图 (d) 南营片麻岩中淡色片麻岩的 Sm-Nd 等时线图

3 变质基性岩脉 Sm-Nd 同位素特征

采自阜平-涞源公路两县分界以南的大岭南麓 (f103-1) 到岭下东庄 (f108-1), 直线距离约 1 km 左右, 为城南庄大型低角度伸展变形带出露部位。斜长角闪岩以低角度脉状产出, 脉宽 0.3 ~ 2 m。其边界呈小角度斜切黑云斜长片麻岩的片麻理。7 个样品的同位素分析结果列于表 1, Sm/Nd 等时线年龄 $t = (2.519 \pm 0.044) Ga$ (图 2(c)), M.S.W.D = 1.46, $\epsilon_{Nd}(t) = +5.2$, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值在 Morb 亏损地幔演化线之上。因此, 使用 Morb 亏损地幔参数得到的模式年龄低于等时线年龄, 并且模式年龄范围较大 (2.34 ~ 2.51 Ga), 平均模式年龄为 2.42 Ga (表 1)。对 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值明显高于 Morb 亏损地幔演化线, Morb 亏损地幔模式年龄较分散的情况比较复杂, 可能由以下原因产生: (1) 可能等时线年龄是真实年龄, 岩浆来自于比 Morb 亏损地幔更亏损的地幔; (2) 构筑等时线的样品为非同源; (3) 相对较晚的岩浆在侵位结晶过程中被老地壳混染。太行-五台地区的变质基性火山岩研究表明, 它们经历了地壳混染作用^[10-11], 所以 (2.519 ± 0.044) Ga 等时线年龄的地质意义尚不明确, 需要进一步研究。但是野外地质关系表明, 南营片麻岩侵位并截断了变质基性岩脉, 所以变质基性岩脉形成早于南营片麻岩, 推测变质基性岩脉形成于太古代末到古元古代早期。它们可能代表了伸展事件的时间。

4 南营片麻岩地质年代学

南营片麻岩中淡色花岗质片麻岩的主要岩石类型为含黑云斜长片麻岩、二长片麻岩和钾长片麻岩(花岗岩)等,突出的特征是暗色矿物含量很少,片麻理发育不均匀.它们常常沿着阜平片麻岩中黑云斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩片麻理侵入(石湖)或以很小角度斜切阜平片麻岩的片麻理(广安桥东、栗树园和西槽口).采自阜平大柳树和广安桥东一带 7 个样品的亏损地幔模式年龄为 2.52~2.76 Ga(表 1,平均值为 2.66 Ga),等时线年龄 $t=(2.123\pm0.055)$ Ga(图 2(d)), $\epsilon_{Nd}(t)=-3.7$, M. S. W. D=1.22. 其平均模式年龄与图 2(a)(透辉石斜长角闪岩和麻粒岩)等时线年龄接近. 该 2.123 Ga 等时线年龄可能有以下两种情况:(1)源区岩石可能主体形成于 2.70 Ga 左右,在后期变质岩浆事件中重新深熔活化,但是源区岩石并未达到 Sm-Nd 同位素的均一化,那么等时线年龄仍然代表岩浆结晶年龄,本文倾向于该解释;(2)晚期岩浆作用受到了老地壳成分的混染,则等时线无地质意义.

南营片麻岩中另一套主要岩石类型是夕线石石英球二长花岗岩,地质分布颇为广泛.该类岩石在前人的研究中称为浅粒岩^[1]. 主要岩石为粉红色二长花岗岩、钾长花岗岩,暗色矿物含量极低,主要是黑云母和少量的白云母,含有磁铁矿,局部含有较多的夕线石石英球. 本文进行 Rb-Sr 同位素测定的样品均采自孟家庄南的粉红色二长花岗岩和钾长花岗岩(前人称为浅粒岩),局部发育夕线石石英球. 该类岩石与其他各类表壳岩、片麻岩之间均为低角度侵入接触关系,而不是地层意义上的不整合. 这类岩石的突出特征是暗色矿物含量很低,片麻理不太明显,但是可见到夕线石-石英球有定向排列. 6 个样品的 Rb/Sr 同位素分析数据列入表 2,由此得到 (1.933 ± 0.08) Ga 的等时线年龄(图 3). 根据该类岩石中花岗岩的结构特征依

表 2 南营片麻岩中二长花岗岩的 Rb-Sr 同位素特征^{a)}

样品号	岩石名称	Rb(10^{-6})	Sr(10^{-6})	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2 σ
97165-1	细粒二长花岗岩	155.354 0	33.655 0	13.826 60	1.089 680	0.000 038
97156-3	磁铁矿二长花岗岩	102.783 0	40.650 0	7.455 80	0.924 589	0.000 020
97158-2	粗粒二长花岗岩	186.601 0	75.978 0	7.235 88	0.915 776	0.000 028
97129-1	片麻状细粒二长花岗岩	163.327 0	140.541 0	3.386 68	0.802 414	0.000 016
97156-1	细粒黑云母二长花岗岩	143.798 0	152.954 0	2.736 06	0.788 452	0.000 021
97145-2	二云母二长花岗岩	159.112 0	193.005 0	2.397 26	0.780 115	0.000 023

a) 国际标样 NBS607 的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=1.200\,000\,0\pm30$

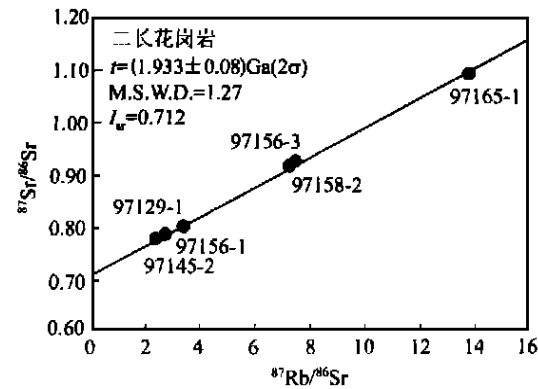


图 3 二长花岗岩的 Rb-Sr 等时线

然存在,片麻理不发育等特征,说明这些岩石受后期热扰动和变质变形不明显,Rb-Sr 等时线的一致性较高,M. S. W. D=1.27,应该代表其成岩年龄. $I_{\text{Sr}}=0.712$,表明了它们的壳源成因,形成于变质变形晚期或期后. 这一结果比南营片麻岩中的淡色花岗质片麻岩的 Sm-Nd 等时线年龄略低,可能是南营片麻岩中的淡色花岗质片麻岩形成早于粉红色二长花岗岩. 在太行山地区,吕梁期的同位素年龄值很多^[4,5,11,13],反映出太行山地区在吕梁运动期间是异常活跃的地区,主

要表现为构造隆升、深熔活化、壳源花岗岩浆活动和龙泉关韧性剪切带的形成。在构造隆升过程中地壳重熔, 形成红色过铝二长花岗岩和钾长花岗岩(成分上相当于S-型花岗岩)和淡色花岗质片麻岩。

5 花岗伟晶岩的形成时代

太行山前寒武纪杂岩中发育一套花岗质伟晶岩, 全区范围内均较发育, 尤其是在阜平县城到坊里一带较为集中, 只要表现为规模不等, 从若干厘米至若干米的脉体, 呈灰白色至粉红色。在阜平片麻岩中表现为斜切片麻理的不规则脉体。本文对阜平片麻岩中的花岗伟晶岩脉(19711-1B)中的11颗锆石进行了单颗粒锆石蒸发法 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 测定, 107个 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 数据得到的年龄值是 $(1.799 \pm 0.007) \text{ Ga}$, 与 SHRIMP 单颗粒锆石的 U-Pb 年龄是 $(1.790 \pm 0.008) \text{ Ga}$ ^[9]的一致性非常好。这两个年龄值表明在 1.8 Ga 左右存在重要的地质流体活动事件, 可能代表太行山前寒武纪杂岩吕梁期的活化事件的结束。

6 结论

综合上述同位素地质年代学特征, 得出本区的地质事件如下:

(1) 2.7 Ga 左右本区发生了玄武质岩浆喷发和石英闪长质、云英闪长质岩浆侵位, 形成本区早期的角闪斜长片麻岩、黑云斜长片麻岩以及其中的基性麻粒岩、单斜辉石斜长角闪岩包体的源岩。

(2) 麻粒岩相变质作用的峰期可能在 2.55 Ga 前后, 2.50 ~ 2.55 Ga 形成本区分布最广的黑云斜长片麻岩, 构成了阜平片麻岩的主体。

(3) 太古代末到古元古代早期是太行山前寒武纪杂岩伸展隆升时期, 沿着伸展变形带形成了变质基性岩脉, 代表了太古代构造热事件的结束。

(4) 在 2.0 Ga 前后(吕梁期)该区重新活化, 形成了以龙泉关韧性剪切带为代表的大规模韧性剪切带, 使本区进一步构造隆升和中下地壳熔融, 形成南营片麻岩中的淡色花岗片麻岩和粉红色钾长花岗岩(局部含夕线石石英球), 构成了南营片麻岩的主体。

(5) 在 1.8 Ga 左右形成了本区大量的花岗质伟晶岩脉, 代表了吕梁期构造热事件的结束。

致谢 本文样品测试过程中得到了乔广生先生大力支持和协作, 成文过程中曾与韩宝福教授进行了多次有益的讨论, 完稿后韩宝福教授审阅了全文, 并提出了宝贵的修改意见, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Liu Shuwen. Study on fluid-rock equilibrium systems of Fuping gneiss complex, Taihang Mountains. Science in China. Ser D. 1997, 40(3): 239 ~ 245
- 2 唐先梅, 刘树文. 太行山北段晚太古宙变质杂岩伸展变形带的初步研究. 北京大学学报(自然科学版), 1997, 33(4): 447 ~ 455
- 3 刘敦一, Page R W. 太行山-五台山前寒武纪变质岩系地质年代学研究. 中国地质科学院院报, 1984, 8: 57 ~ 79
- 4 张宗清, 伍家善, 叶笑江. 阜平群下部太古代变质岩石的 REE、Rb-Sr 和 Sm-Nd 年龄及其意义. 地球化学, 1991, (2):

118 ~ 126

- 5 关 鸿, 孙 敏, 徐 平. 阜平杂岩中几种不同类型片麻岩的锆石激光探针等离子质谱年代学研究. 岩石学报, 1998, 14(4): 460 ~ 470
- 6 王凯怡, 郝 杰. 单颗粒锆石离子探针质谱定年结果对五台造山事件的制约. 科学通报, 1997, 42(12): 1 295 ~ 1 298
- 7 王凯怡, 李继亮, 刘如奇. 阜平片麻岩之成因. 地质科学, 1991, 3: 254 ~ 267
- 8 Sun M, Armstrong R L, Lambert R S J. Petrochemistry and Sr, Pb, and Nd isotopic geochemistry of Early Precambrian rocks, Wutai-shan and Taihangshan areas, China. Precambrian Res, 1992, 56: 1 ~ 31
- 9 Qiao Guangsheng. Normalization of isotopic dilution analysis. Scientia Sinica Ser B 1988 31(10): 1 263 ~ 1 268
- 10 耿元生, 伍家善. 太行-五台山地区早前寒武纪基性火山岩特征及其演化. 见: 前寒武纪地质, No. 2. 北京: 地质出版社, 1990. 167 ~ 174
- 11 伍家善, 耿元生, 徐惠芳, 等. 阜平群变质地质专辑. 中国地质科学院地质研究所所刊, 1989, 19: 1 ~ 150
- 12 谭应佳, 王方正, 赵温霞, 等. 太行山阜平隆起南部早前寒武系划分及其形成环境. 地球科学, 1989, (1): 67 ~ 76
- 13 许荣华, 朱 铭, 陈福坤, 等. 龙泉关韧性剪切带的年代学研究. 第四纪研究, 1995, (4): 332 ~ 341