

山东沂水杂岩中变基性岩的岩石地球化学特征 及锆石 SHRIMP U-Pb 定年

赵子然¹⁾, 宋会侠¹⁾, 沈其韩¹⁾, 宋彪^{1,2)}

1) 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037; 2) 北京离子探针中心, 北京, 100037

内容提要:山东沂水杂岩由新太古代岩浆杂岩和中太古代的变质杂岩组成, 其后者中的变基性岩石, 特别是基性麻粒岩, 常与紫苏花岗岩紧密伴生, 而且多呈大小不等的包体或呈层状体产出。本文主要对变基性岩进行岩石地球化学和锆石 SHRIMP U-Pb 定年研究。根据岩石学特征, 可将变基性岩分为三类: 含紫苏辉石斜长角闪岩、含石榴子石角闪二辉斜长麻粒岩和含尖晶石—石榴子石的角闪二辉麻粒岩。它们原岩分别为安山质玄武岩、高铁镁质玄武岩和玄武质科马提岩(?)。三类岩石稀土元素和微量元素配分有一定差别: 第一类含紫苏辉石斜长角闪岩富集轻稀土和大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素; 后二类麻粒岩相变质岩的稀土配分模式为近平坦型或轻稀土略为富集, K、Rb、Ba 等元素也轻微富集, 其他元素与 MORB 的比值接近于 1。变基性岩中锆石定年结果显示有四组年龄值, 其中 2719Ma 和 2560~2607Ma 分别代表早期麻粒岩相变质作用的年龄下限和上限; 2509~2522Ma 代表另一期角闪岩相—麻粒岩相变质作用的时期, 发生在沂水岩浆杂岩侵入之后; 2485Ma 和 2497Ma 代表与流体作用有关的变质作用和新生锆石的形成年龄。

关键词:关键词: 沂水杂岩; 基性麻粒岩; 岩石地球化学; 锆石 SHRIMP U-Pb 定年; 山东

研究区位于华北陆台东南缘汞丹山地块, 也就是鲁西新太古代变质绿岩带东缘的沂水—沐水断裂带内。沂水杂岩分布于 1:5 万地质图沂水幅—高桥幅内(北起北下庄以北, 向南沿胡家庄—罗家庄—石山官庄—林家官庄一线至英灵山(图 1)。区内地质体主要由新太古代一系列的沂水岩浆杂岩(约占 70%~75%)(马山、大山、雪山、蔡峪、林家官庄、牛心官庄、英灵山等岩体)和沂水变质杂岩系(约占 25%~30%)组成。变质杂岩包括: 镁铁质的斜长角闪岩——超镁铁质麻粒岩和石榴夕线钾长片麻岩、少量变粒岩、铁英岩、富铝的变泥砂质岩石。基性麻粒岩与紫苏花岗岩紧密伴生, 多呈透镜状以包裹体形式产出, 局部可见成层分布(宋金礼等^①)。沈其韩等(1997, 2000, 2004, 2007)、苏尚国等(1999)等曾对该杂岩体中的 4 个岩体进行了岩石学、地球化学和定年研究, 赵子然等(2008)对英灵山岩体进行了锆石 SHRIMP U-Pb 定年, 确定了各岩浆杂岩体的形成年龄和与之有关的变质年龄; 沈其韩等(1993)和顾德林等^②还测试了该杂岩体中的变基性岩的 Sm-Nd 同位素年龄, 该结果只给出了变基性岩的原岩模式年龄, 并没有解决变基性岩石的形成及变质

演化年龄。为此, 本文主要对沂水变质杂岩中变基性岩石: 斜长角闪岩—基性麻粒岩进行详细的岩石学、地球化学及锆石 SHRIMP U-Pb 定年研究, 以确定斜长角闪岩—基性麻粒岩的岩石地球化学特征、形成构造环境及变质演化年龄, 并比较其与伴生的紫苏花岗岩的年龄关系, 为反演二者的演化过程提供证据, 同时可与已有的 Sm-Nd 同位素年龄作一比较, 为探讨沂水杂岩的地质演化提供依据。

1 变基性岩石的类型及岩石学特征

变基性岩石作为沂水变质岩石组合的重要组成部分, 主要以残留包体、局部保留层状特征的形式广泛存在于沂水岩浆杂岩中, 南从英灵山—林家官庄, 北至唐家官庄南—北下庄都可见到角闪岩相—麻粒岩相的变基性岩石。

研究样品包括: (含紫苏辉石的)斜长角闪岩(YS06-29、YS06-19/YS06-41)、(含石榴子石)角闪二辉斜长麻粒岩(YS06-40、YS06-45、YS06-49)和含尖晶石—石榴子石的(斜长)角闪二辉麻粒岩(YS06-31)。其产出状态及位置见图 2。

根据岩石的产出状态和组成特征可以大致分

注: 本文为国家自然科学基金资助项目(编号 40572110)和基本科研业务经费资助项目(编号 J0805)的成果。

收稿日期: 2008-12-11; 改回日期: 2008-02-03; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 赵子然, 男, 1963 年生。副研究员。主要从事变质变形及热动力学演化等研究。Email: ziranzhao@cags.net.cn。

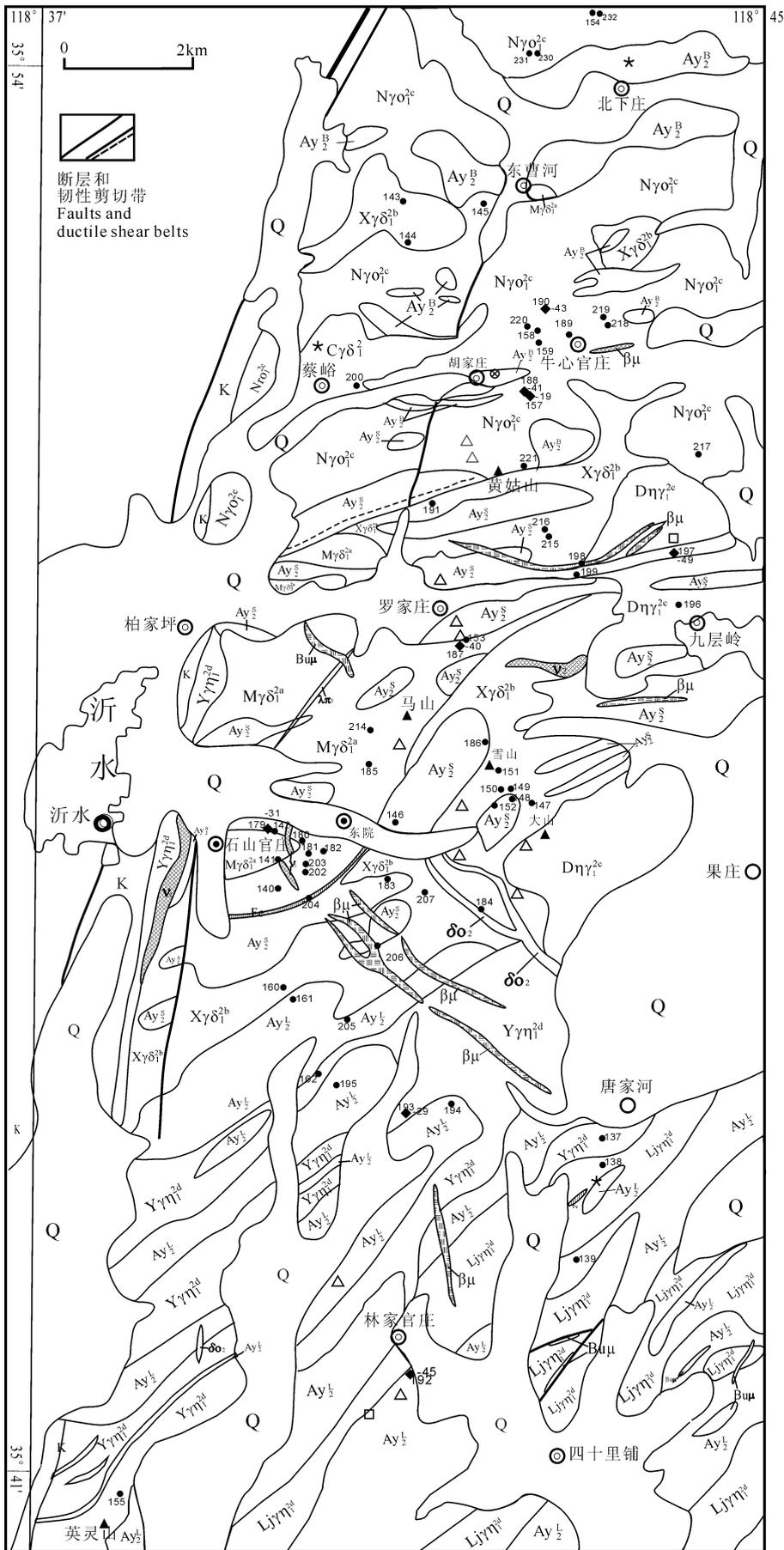


图 1 山东沂水杂岩分布地质略图 (据沈其韩等, 2000, 简化)

Fig. 1 Sketch geological map of the Yishui-Complex, Shandong Province (simplified from Shen Qihan et al., 2000)

Q—第四系: 砂质黄土、含砾亚砂土、粉砂粘土, 砂砾等; K—白垩系: 砂岩、砂砾岩, 泥质粉砂岩, 火山角砾岩等; Fe—条带状贫铁矿; Ay₂—沂水变质杂岩包括北下庄 (Ay₂^B)、林家官庄 (Ay₂^L) 和石山官庄 (Ay₂^S) 变质岩石组合; λπ₅—霏细斑岩脉; βμ—辉绿岩脉; δo₂—石英闪长岩脉; v₂—辉长岩; Dηγ₁^c—大山二长花岗岩; Yγη₁^d—英灵山奥长花岗岩; Ljγη₁^d—林家官庄奥长花岗岩; Nγ0₁^c—牛心官庄奥长花岗岩—二长花岗岩; Xγδ₁^b—雪山紫苏花岗岩闪长岩; Mγδ₁^a—马山二辉花岗岩闪长岩—花岗岩; Cγδ₁²—蔡峪石榴紫苏英云闪长岩—花岗闪长岩; △—以往同位素定年样品取样位置; □—以往流体包裹体样品取样位置; ●—本项目研究 GPS 定点采样位置; ◆—本文取样位置

Q—Quaternary: sandy loess, gravel bearing subsand, silty clay, sand and gravel etc; K—Cretaceous: conglomerate, sandy conglomerate, clay silt, volcanic breccia, etc; Fe—banded poor iron ore (itabirite); Ay₂—the Yishui metamorphic rock assemblages, including the Beixiazhuang rock assemblage (Ay₂^B), the Linjiaguanzhuang rock assemblage (Ay₂^L) and the Shishanguanzhuang rock assemblage (Ay₂^S); λπ₅—felsite porphyry; βμ—diabase vein; δo₂—quartz diorite; v₂—gabbro; Dηγ₁^c—the Dashan adamellite; Yγη₁^d—the Yinglingshan trondjemite; Ljγη₁^d—the Linjiaguanzhuang trondjemite; Nγ0₁^c—the Niuxinguanzhuang trondjemite—adamellite; Xγδ₁^b—the Xueshan hypersthene granodiorite; Mγδ₁^a—the Mashan two-hydroxenes granodiorite—granite; Cγδ₁²—the Caiyu garnet hypersthene tonalite—granodiorite; △—Sample location of iso-chronology in pass paper; □—Sample locations of fluid-inclusion in pass paper; ●—GPS-points in this project; ◆—Sample locations in this paper

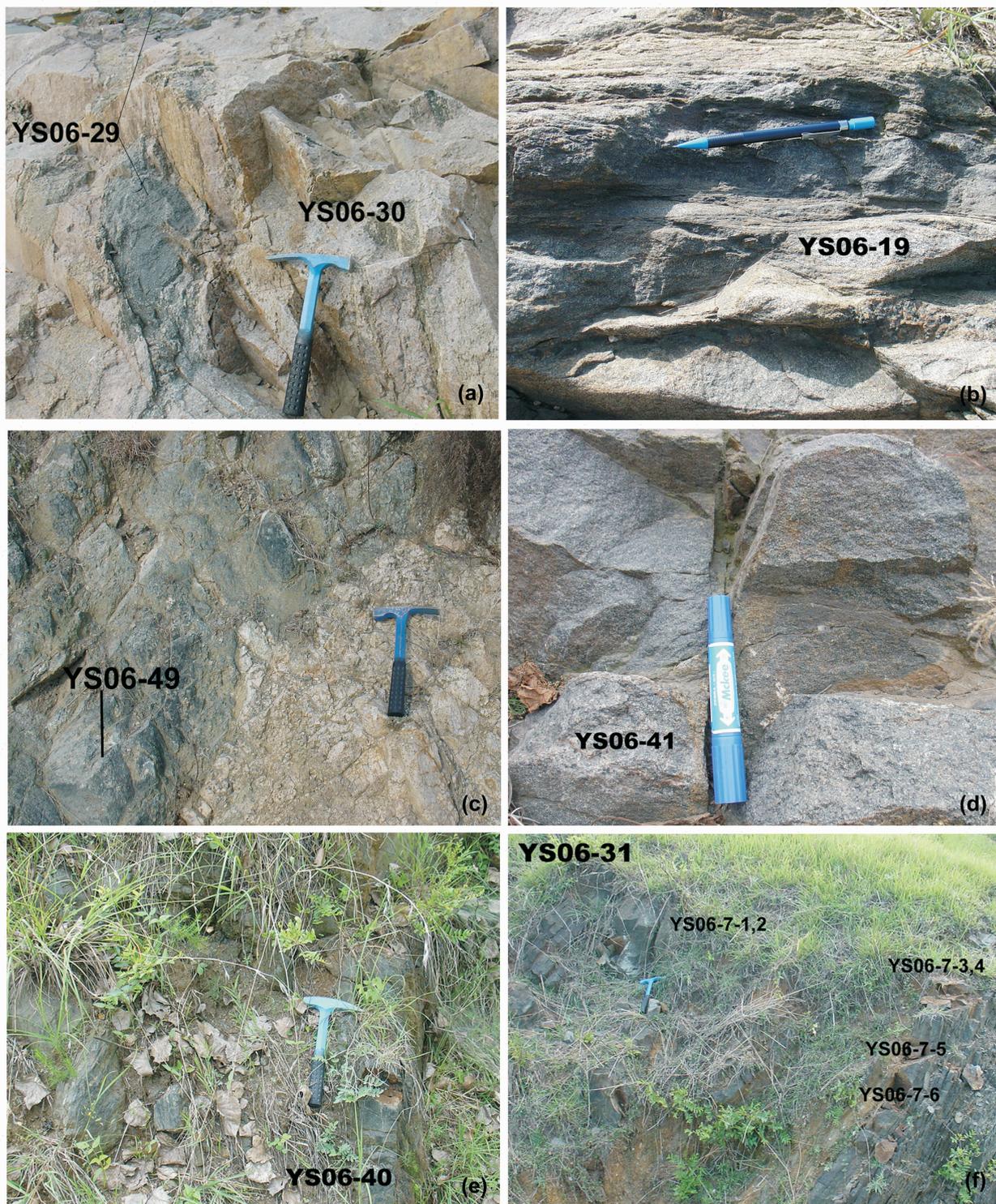


图 2 沂水杂岩中变基性岩石产状及采样点

Fig. 2 Samples' location of meta-mafic rocks in the Yishui complex

(a) YS06-29 采自王家庄北水库; (b) YS06-19 采自胡家庄村东; (c) YS06-49 采自刘家山村东南路边;

(d) YS06-41 采自胡家庄村东; (e) YS06-40 采自罗家庄村南; (f) YS06-31 采自冯家庄东 1km

(a) YS06-29 collected from north of Wangjiazhuang reservoir; (b) YS06-19 collected from east of Hujiazhuang; (c) YS06-49 collected from south-east of Liujiashan; (d) YS06-41 collected from east of Hujiazhuang; (e) YS06-40 collected from south of Luojiashuan; (f) YS06-31 collected from east 1 km of Fengjiazhuang

为如下三种类型:

样品 YS06-29 为斜长角闪岩,呈捕虏体产于英灵山花岗岩中(图 2a),矿物组成主要为角闪石和斜长石(赵子然等,2008);样品 YS06-19 和 YS06-41 为含紫苏辉石和黑云母的斜长角闪岩,采自于胡家庄村东(图 2b、2d),呈透镜状包裹体存在于紫苏花岗岩中,矿物组成以斜长石、角闪石和黑云母为主,其次为透辉石、紫苏辉石。黑云母和普通角闪石多沿紫苏辉石和透辉石边部生长,部分切穿两种辉石,黑云母形成时间晚于普通角闪石,为麻粒岩相变质作用后再次变质生成。副矿物见有磁铁矿、磷灰石和锆石。

样品 YS06-40、YS06-45、YS06-49 为含石榴子石角闪二辉斜长麻粒岩。其中样品 YS06-40 采于罗家庄村南 100m(图 2e),主要由紫苏辉石、透辉石和斜长石组成,其次为颗粒相对较大的角闪石和黑云母。相对较小的斜长石和透辉石呈粒状,与紫苏辉石构成早期矿物组合;相对较大的角闪石呈不规则状,与呈细条状的黑云母构成晚期矿物组合,均切过早期矿物。样品 YS06-45 采于林家官庄村南河沟旁,主要由角闪石、斜长石、紫苏辉石和少量透辉石组成。样品 YS06-49 采于九层岭北刘家山村东南路旁(图 2c),矿物组成为紫苏辉石、透辉石、斜长石、角闪石和少量的石榴子石。

样品 YS06-31-1、2 为含尖晶石-石榴子石的(斜长)角闪二辉麻粒岩。产于冯家庄村东 1km(图 2f),具有很好的片理构造,构成倒转背斜的倒转翼。主要组成矿物:紫苏辉石、单斜辉石、(角闪石、斜长石),少量的尖晶石、石榴子石,副矿物锆石等含量很低。该岩石具有明显的成层分布特点,对于该岩石一系列样品的镜下岩相学及矿物学的研究表明:该类岩石的矿物组成在不同层位上的样品中存在不均一性,有的矿物组合较为单一:斜方辉石+单斜辉石+少量尖晶石及石榴子石;有的较为复杂:斜方辉石+单斜辉石+角闪石+斜长石+尖晶石+石榴子石+云母等;角闪石有更早期的残留相存在于辉石颗粒中,也有后期沿单斜辉石边部分布的新生矿物相,完好晶形内部有单斜辉石残留,有的保留辉石晶形但却具有闪石的解理特征;在辉石、角闪石的边部还发育因流体作用而产生的退变质蚀变边(拉曼检测结果为滑石),并有含铁矿物析出(磁铁矿),由此至少反映有三期(或阶段)变质矿物组合特征。该类岩石与前人研究中提到的二辉石岩(沈其韩等,2000)在岩石化学特征上,存在一定的相似性,在 $(\text{FeO}^* + \text{TiO}_2) - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$

$\text{TiO}_2) - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$ 岩石化学分类图解中(图 3, Jensen, 1976)分布于玄武质科马提岩区,但野外未见有鬣菊结构,与其他变基性岩的关系及其形成和变质演化等正在做进一步的研究。

2 变基性岩石的地球化学特征

沂水杂岩中变基性岩石的常量、稀土及微量分析结果见表 1。对应上述三种类型的变基性岩石:斜长角闪岩—基性麻粒岩,其常量组成特征从表 1 可以看出: SiO_2 、 TFe (全铁)的含量变化不很明显,分别为 46.24%~52.99% 和 8.33%~15.94%;而其他主要氧化物的含量变化具有一定的分区特点: Al_2O_3 含量分别为 15.51%~18.22%、9.68%~14.1%、7.59%~8.01%; MgO 含量分别为 3.52%~6.25%、6.54%~14.84%、24.94%~25.56%; CaO 含量分别为 5.83%~8.01%、7.96%~12.58%、4.80%~5.49%; Na_2O 含量依次为 4.07%~4.63%、2.02%~2.76%、0.43%~0.70%; K_2O 含量依次为 1.70%~3.85%、0.59%~1.01%、0.11%~0.12%。在 $(\text{FeO}^* + \text{TiO}_2) - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$ 岩石化学分类图解上(图 3, Jensen, 1976),上述三类岩石分别位于拉斑玄武岩的安山质玄武岩(YS06-19, 41)、高镁铁质玄武岩(YS06-29, 43, 45; 49)和玄武质科马提岩区(YS06-40, 31-1, 2),表现出明显的化学成分差异。

在稀土元素组成上表现出明显的不同。从表 1 和图 4a 中可以看出,重稀土变化不明显,而轻稀土具有明显的不同:①斜长角闪岩(YS06-29)和含紫苏辉石的斜长角闪岩(YS06-19、YS06-41)轻重稀土具有明显的分异,轻稀土明显富集,重稀土变化不

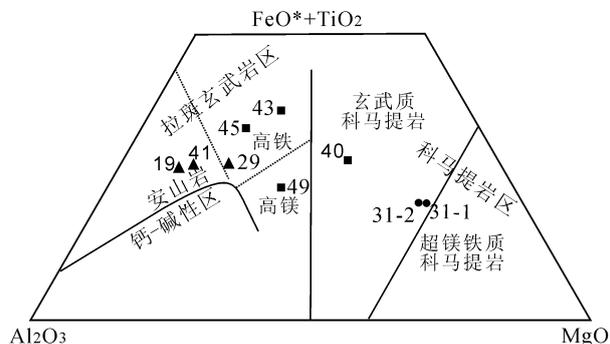


图 3 沂水杂岩中变基性岩 $(\text{FeO}^* + \text{TiO}_2) - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$ 图解(Jensen, 1976)

Fig. 3 $(\text{FeO}^* + \text{TiO}_2) - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$ diagram of metamafic rocks from the Yishui Complex

表1 沂水杂岩中基性麻粒岩的常量(%)、稀土($\times 10^{-6}$)和微量($\times 10^{-6}$)分析结果
 Table 1 Major elements(%), REE($\times 10^{-6}$) and trace elements($\times 10^{-6}$) contents of meta-mafic granulite in the Yishui complex

样品原号	YS06-29	YS06-19	YS06-41	YS06-40	YS06-45	YS06-49	YS06-43	YS06-31-1	YS06-31-2
产地	王家庄	胡家庄		罗家庄	林家官庄	刘家山	牛心官庄	冯家庄村东	
岩石名称	斜长角闪岩	含紫苏辉石 斜长角闪岩		含石榴子石角闪二辉斜长麻粒岩				含尖晶石和石榴子石 斜长角闪二辉麻粒岩	
SiO ₂	52.12	52.99	50.88	50.86	49.65	48.45	46.24	49.02	48.52
TiO ₂	0.71	0.73	0.71	0.57	0.97	0.48	0.86	0.28	0.32
Al ₂ O ₃	15.51	17.76	18.22	9.68	14.10	13.68	13.01	7.59	8.01
Fe ₂ O ₃	3.96	4.57	3.84	1.94	3.09	2.79	4.32	2.85	3.27
FeO	5.87	4.76	6.34	9.63	9.57	5.82	12.05	7.60	7.20
MnO	0.18	0.18	0.17	0.23	0.21	0.18	0.15	0.20	0.20
MgO	6.26	3.50	4.33	14.84	6.54	10.32	9.18	25.56	24.94
CaO	8.01	5.83	6.40	7.96	11.12	12.58	9.38	4.80	5.49
Na ₂ O	4.07	4.47	4.63	2.02	2.76	2.48	2.5	0.43	0.70
K ₂ O	1.70	3.85	2.14	0.62	0.59	1.01	0.82	0.11	0.12
P ₂ O ₅	0.29	0.57	0.52	0.05	0.09	0.07	0.12	0.03	0.03
H ₂ O ⁺	0.84	0.58	0.60	0.68	0.74	1.30	0.8	0.42	0.54
CO ₂	0.16	0.41	0.66	0.54	0.33	0.23	0.54	0.33	0.38
总量	99.68	100.20	99.44	99.62	99.76	99.39	99.97	99.22	99.72
La	40.80	62.30	61.90	10.40	5.10	16.30	8.60	4.90	2.45
Ce	92.80	140.00	141.00	22.60	12.10	28.50	19.40	7.63	4.38
Pr	12.20	17.90	18.00	2.98	1.80	3.81	2.67	1.22	0.76
Nd	45.60	66.20	67.20	11.70	8.27	14.50	11.80	4.79	3.27
Sm	9.55	11.10	10.90	2.84	2.68	2.75	3.20	1.23	0.93
Eu	1.76	3.06	2.75	0.89	1.03	0.87	1.06	0.69	0.28
Gd	7.60	7.47	7.14	3.12	3.88	2.75	4.14	1.56	1.34
Tb	1.10	0.89	0.90	0.53	0.69	0.41	0.73	0.25	0.26
Dy	6.19	4.38	4.39	3.21	4.55	2.58	4.61	1.71	1.64
Ho	1.19	0.78	0.74	0.70	0.96	0.54	1.00	0.36	0.37
Er	3.30	2.18	2.13	1.92	2.83	1.54	2.96	1.06	1.06
Tm	0.47	0.27	0.29	0.30	0.44	0.23	0.45	0.17	0.17
Yb	2.89	1.80	1.95	1.90	2.68	1.42	2.94	1.12	1.02
Lu	0.43	0.29	0.29	0.30	0.43	0.23	0.45	0.16	0.16
Sr	509	923	919	429	192	718	148	38.8	48.8
Rb	52.8	112	75.3	12.8	5.99	23.6	19.6	1.87	1.71
Ba	424	1155	529	121	92	228	140	9.75	10.7
Th	6.23	0.89	5.38	0.82	0.39	0.67	1.04	0.29	0.29
Ta	0.9	0.64	0.64	0.18	0.17	0.28	0.25	0.12	0.13
Nb	12.5	26.8	23.5	2.96	2.67	5.38	3.57	1.21	1.15
Ce	92.8	140	141	22.6	12.1	28.5	19.4	7.63	4.38
Zr	144	197	138	60.4	51.4	59.4	75.6	42.1	28
Hf	3.81	4.42	3.33	1.97	1.62	1.64	2.28	1.36	0.82
Sm	9.55	11.1	10.9	2.84	2.68	2.75	3.2	1.23	0.93
Y	31.4	20.7	19.9	17.3	24.8	14	25.9	9.43	8.98
Yb	2.89	1.8	1.95	1.9	2.68	1.42	2.94	1.12	1.02
Sc	29.7	14.4	16.5	36.2	53.1	34.5	43.6	29.9	33
Cr	121	11.9	9.52	354	116	256	116	1218	1569

注:样品由国家地质实验测试中心测试。常量元素由X荧光光谱仪(3080E)测定,微量元素由等离子质谱测定。

大,样品 YS06-29 具有一定的负 Eu 异常,样品 YS06-19、41 没有明显的 Eu 异常;②含石榴子石角闪二辉斜长麻粒岩(YS06-40、YS06-43、YS06-45、YS06-49)轻重稀土具有一定的分异,但不明显,没

有 Eu 异常,与富集型太古宙拉斑玄武岩(TH2)类似;③含尖晶石和石榴子石的斜长角闪二辉麻粒岩(YS06-31-1 和 YS06-31-2),稀土总量较低,轻重稀土分异不明显,呈近平坦型,含斜长石的样品具有

Eu 正异常(YS06-31-1), 反之显示负 Eu 异常, 与亏损型太古宙拉斑玄武岩类似, 而与典型玄武质科马提岩稍有差别。在微量元素配分图解(图 4b)上显示 Rb、Ba、Th 等元素的选择性富集, 并伴有 Ce、Sm 的富集, 其间 Ta、Nb、Zr、Hf 和 Ti 明显亏损, 这种“三隆起”型表明其属于火山弧钙碱性玄武岩。

根据玄武岩成因环境的其他判别图解(图 5)可知: 在 $Ti/100-Zr-Y \times 3$ 图解(Pearce and Cann, 1973)中, 所有样品投点主要位于钙碱性玄武岩区(CAB 区, 即 B、C 区), 属钙碱性玄武岩—洋底玄武岩; 在 $Ti/100-Zr-Sr/2$ 和 $Ti-Zr$ 图解(Pearce and Cann, 1973)中, 主要分布于钙碱性玄武岩(CAB)区, 部分位于岛弧低钾拉斑玄武岩(LKT)区; 在 $MnO \times 10-TiO_2-P_2O_5 \times 10$ 图解(Mullen, 1983)上, 样品主要落入钙碱性玄武岩(CAB)区, 两个样品位于岛弧拉斑玄武岩区(IAT); 在 $Hf/3-Th-Ta$ 图解(Wood, 1980)中, 样品主要落入钙碱性玄武岩(CAB)区, 一部分为火山弧玄武岩(VAB), 另一部分为岛弧拉斑玄武岩区(IAT); 在 $Nb \times 2-Zr-Y$ 图解(Meschede, 1986)中, 主要位于火山弧玄武岩(VAB; C D)、板内碱性玄武岩(WPA; AI AII)和板内拉斑玄武岩(WPT; AII C)区。

综上所述, 沂水杂岩中的变基性岩在产出状态、矿物组成、岩石地球化学组成特征及变质作用等方面都存在一定的差异, 但总体表明变基性岩石应属于火山(岛)弧低钾钙碱性拉斑玄武岩(部分可能相

当于洋底玄武岩?), 形成于岛弧环境。对于上述岩石样品中出现的 YS06-31 样品有待进一步深入的研究探讨, 可能反映一种特殊的形成机理。

3 锆石特征及 SHRIMP U-Pb 定年

为确定沂水杂岩中变基性岩的原岩及变质年龄, 从上述三个岩石样品中分别挑选出锆石以备 SHRIMP U-Pb 年龄测试。U-Pb 年龄测试工作在北京离子探针中心 SHRIMP II 上完成, 锆石样品靶制作、测试流程和数据处理参考宋彪等(2002, 2006)。数据处理及 U-Pb 谐和图绘制采用 K. Ludwig 编写的 SQUID1.03d 版本和 ISOPLOT 2.49h 版本程序进行。测试使用的标准锆石为 SL13 (铀含量 238×10^{-6} , 年龄 572 Ma) 和 TEM (年龄为 417 Ma), 前者用于标定 U 的含量, 后者用于校正年龄。

由于样品采用 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄, 而此年龄和标准的测定无关, 故 TEM 测得较少, TEM 和未知样品的分析按照 1:5 进行。采用的 ^{238}U 和 ^{235}U 的衰变常数分别为 1.55125×10^{-10} 和 9.9485×10^{-10} , $n(^{238}U)/n(^{235}U) = 137.88$ 。TEM 普通铅校正采用的普通铅组成为 $n(^{208}Pb)/n(^{206}Pb) = 2.097$, $n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb) = 0.864$, $n(^{206}Pb)/n(^{204}Pb) = 18.052$ 。

样品 YS06-19 是含紫苏辉石的斜长角闪岩, 其锆石形状不规则, 部分近圆形, 长轴 $20 \sim 140 \mu m$, 长宽比 1~2, 阴极发光图像无环带结构, 有呈片状的

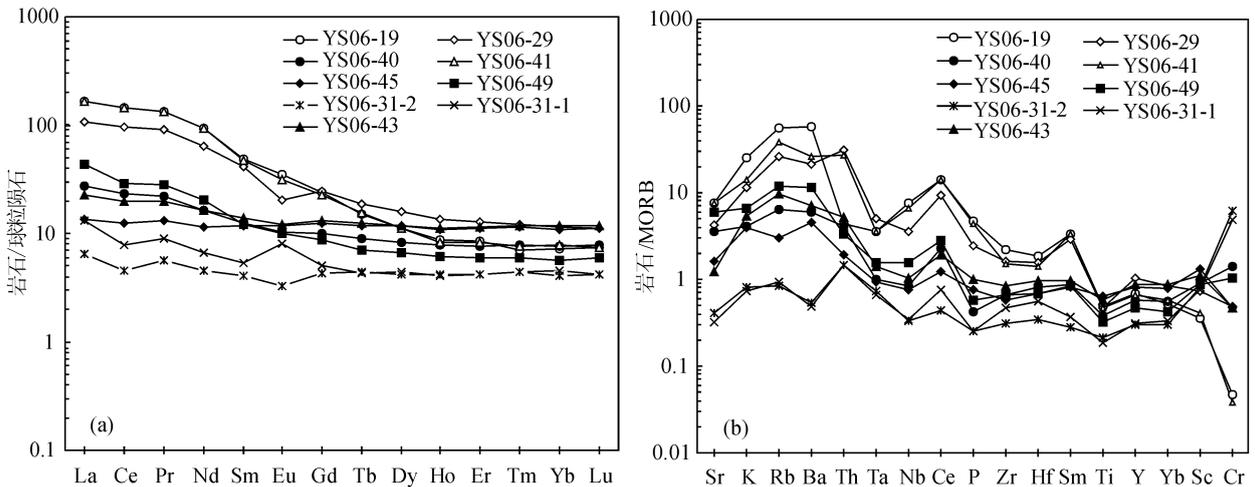


图 4 沂水杂岩中变基性岩的稀土微量配分图解

Fig. 4 REE and trace element spider diagram of meta-mafic rocks in the Yishui complex

(a) 稀土配分图解; (b) 微量配分图解

(a) REE spider diagram; (b) Trace element spider diagram

明暗分区,少数颗粒可见弱的岩浆环带,为变质重结晶锆石(图 6a)。测试了该样品中 10 个锆石颗粒,其 Th/U 比值变化在 0.37~1.08, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄变化在 2501~2535Ma, 10 组年龄的加权平均值为 $2522 \pm 5\text{Ma}$, 应代表原有锆石经受变质改造的年龄

(图 7a)。样品 YS06~41 是含紫苏辉石的斜长角闪岩,其锆石呈椭圆形和不规则形状,长轴 $100 \sim 200\mu\text{m}$,长宽比 $1 \sim 1.5$,阴极发光图像中多见港湾状溶蚀结构和增生边,少量可见弱的岩浆环带,是经过强烈改造的变质增生锆石(图 6b)。测试了该样

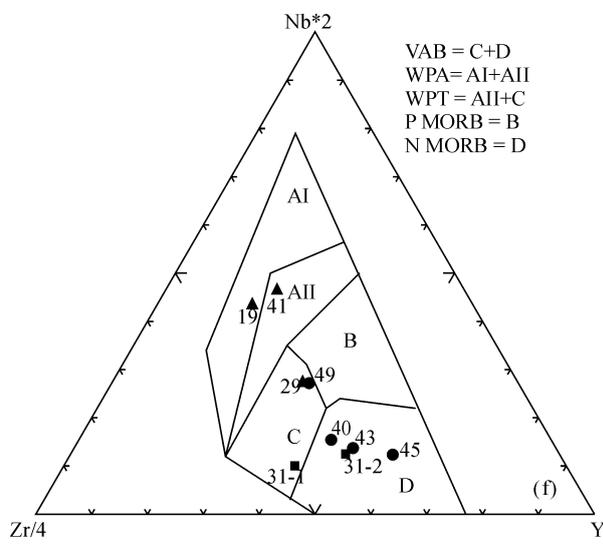
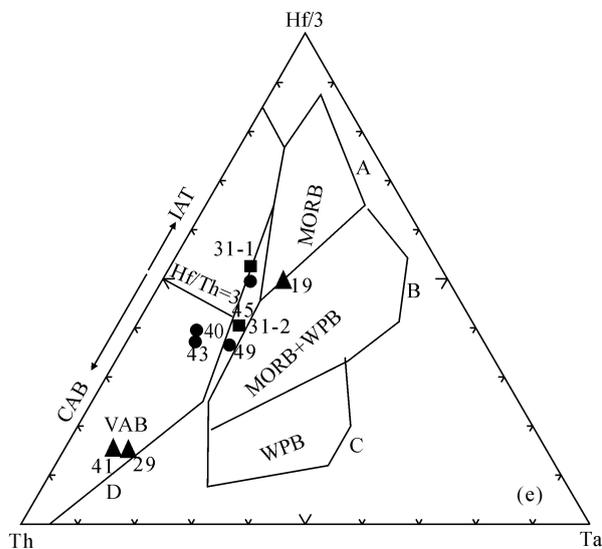
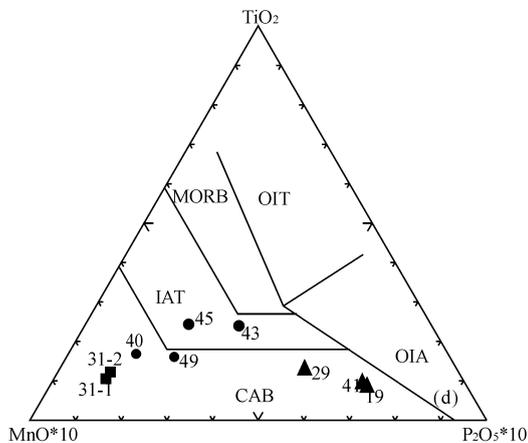
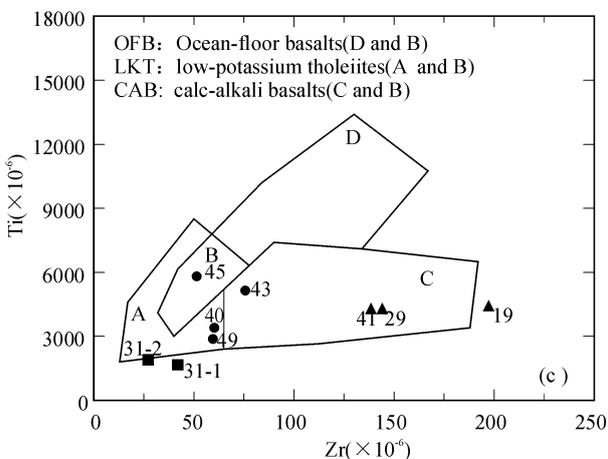
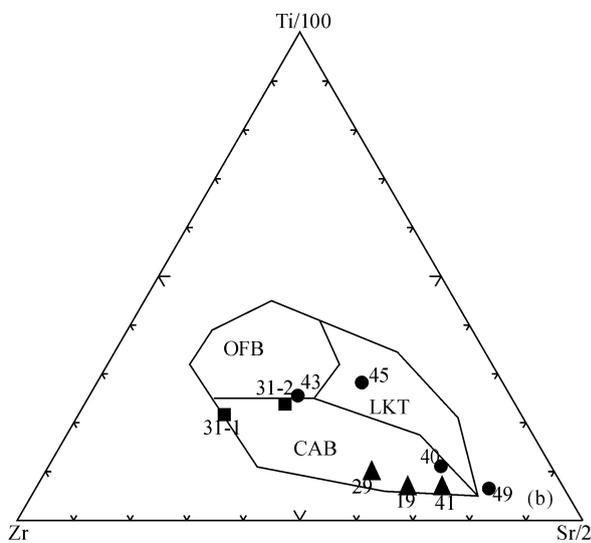
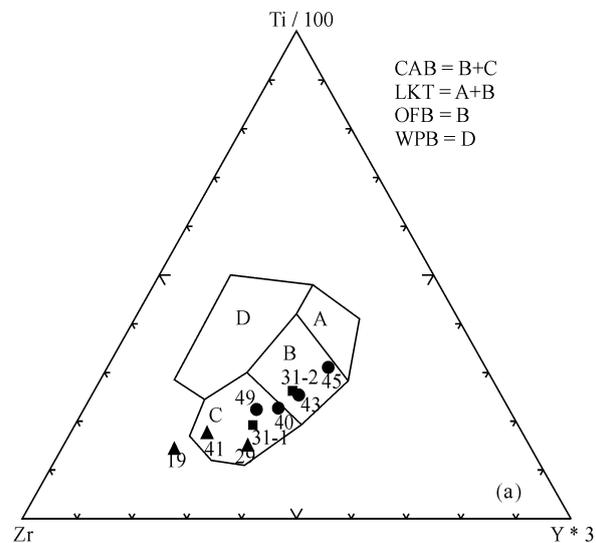


图 5 沂水杂岩中变基性岩石的地球化学图解

Fig. 5 Geochemical diagrams of meta-mafic rock in the Yishui complex

(a) Ti/100—Zr—Y $\times 3$ 图解(底图据 Pearce and Cann, 1973); (b) Ti/100—Zr—Sr/2 图解(底图据 Pearce and Cann, 1973); (c) Ti—Zr 图解(底图据 Pearce and Cann, 1973); (d) MnO $\times 10$ —TiO₂—P₂O₅ $\times 10$ 图解(底图据 Mullen, 1983); (e) Hf/3—Th—Ta 图解(底图据 Wood, 1980), A—N-型 MORB, B—E-型 MORB 和拉斑质 WPB 及分异, C—碱性 WPB 及分异, D—消减板块边缘玄武岩及分异; (f) Nb—Zr—Y 图解(底图据 Meschede, 1986)

CAB—钙碱性玄武岩; IAT—岛弧拉斑玄武岩; LKT—岛弧低钾拉斑玄武岩; MORB—洋中脊玄武岩; N MORB—N-型洋中脊玄武岩; OFB—洋底玄武岩; OIA—洋岛玄武质安山岩; OIT—洋岛拉斑玄武岩; P MORB—P-型洋中脊玄武岩; VAB—火山弧玄武岩; WPA—板内碱性玄武岩; WPB—板内(洋岛—大陆)玄武岩; WPT—板内拉斑玄武岩

(a) Ti/100—Zr—Y $\times 3$ diagram (base map from Pearce and Cann, 1973); (b) Ti/100—Zr—Sr/2 diagram (base map from Pearce and Cann, 1973); (c) Ti—Zr diagram (base map from Pearce and Cann, 1973); (d) MnO $\times 10$ —TiO₂—P₂O₅ $\times 10$ diagram (base map from Mullen, 1983); (e) Hf/3—Th—Ta diagram (base map from Wood, 1980), A—N-type MORB, B—E-type MORB and tholeiitic WPB and differentiates; C—alkaline WPB and differentiates; D—destructive plate-margin basalts and differentiates; (f) Nb $\times 2$ —Zr/4—Y diagram (base map from Meschede, 1986)

CAB—calc-alkaline basalts; IAT— island arc tholeiites; LKT—low-potassium tholeiites; MORB—mid-ocean ridge and marginal basin basalts; N MORB—N-mid-ocean ridge basalts; OFB—ocean-floor basalts; OIA—ocean island andesites; OIT—ocean island tholeiites; P MORB—P-mid-ocean ridge basalts; VAB—volcanic arc basalts; WPA—within-plate alkaline basalts; WPB—within-plate basalts i. e. ocean island or continental basalts; WPT—within-plate tholeiites

品中 16 个锆石颗粒,其 Th/U 值变化在 0.27~1.14, ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄变化在 2476~2507Ma, 16 组年龄的加权平均值为 2497 ± 4 Ma(图 7b), 应代表变质流体作用形成新生锆石的年龄。

样品 YS06-40 是含石榴子石的角闪二辉麻粒岩,其锆石呈椭圆形和圆形,长轴 30~100 μm ,长宽比接近 1,无环带结构,阴极发光弱,属变质重结晶锆石(图 6c, 吴元保等, 2004), Th/U 比值变化在 0.43~0.85, ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄变化在 2508~2520Ma, 7 个点的 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄加权平均值为 2514 ± 5 Ma, 应代表锆石经受变质改造的年龄(图 7c)。测试中见几颗具有弱的岩浆环带,晶形保持完好的锆石,其 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄在 188~205Ma(表 2), 这类锆石很可能是由选矿过程中混入的。样品 YS06-45 是含石榴子石的角闪二辉麻粒岩,其锆石呈宽板状或近圆形,长轴 80~250 μm ,长宽比 1~1.5,阴极发光较强,无环带结构或呈片状分区,多数是在变质流体作用下新生的锆石,少数具有暗色核,是变质增生锆石(图 6d)。对该样品测试了 20 个锆石颗粒的 20 组数据,其 Th/U 比值变化在 0.09~0.61, ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄变化可分出 2447~2504Ma 和 2540~2569Ma 两组,其中年龄值 2540~2569Ma 代表了三颗锆石残留核的年龄,去除这一年龄和最小年龄,剩余 16 组数据的 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄加权平均值为 2485 ± 10 Ma(图 7d), 该年龄应代表变质流体中新生锆石的形成年龄。样品 YS06-49 是含石榴子石的角闪二辉麻粒岩,其锆石形状不规则,长轴 30~200 μm ,长宽比 1~2,阴极发光弱,无环带结

构,部分见发光稍强的亮边,是经变质作用改造的变质增生锆石(图 6f)。测试了 12 个锆石颗粒的 13 组数据,其 Th/U 比值变化在 0.01~1.23, ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄变化在 2160~2607Ma(图 7f),其中三个颗粒 4.1、5.1 和 11.1 阴极发光强,具震荡环带(图 6f),其年龄在 2583~2607Ma(图 7f),可能代表了残余岩浆锆石的年龄。测点 1.2 位于锆石发光较强的边部,其年龄为 2493 ± 12 Ma,与 YS06-41 和 YS06-45 中新生锆石的年龄一致,代表了变质流体作用下新生锆石的年龄。去除这 4 个点及其他年龄不谐和的点,剩余 6 组数据的 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄加权平均值为 2509 ± 5 Ma,代表了锆石经受另一期变质改造的年龄(图 7,表 2)。

样品 YS06-31 是含尖晶石和石榴子石(斜长)角闪二辉麻粒岩,属玄武质科马提岩,其锆石含量极少,仅挑选出十几个颗粒,呈椭圆形,长轴 30~100 μm ,长宽比 1~1.5,锆石类型较复杂,从锆石阴极发光特征可分出三类,分别是具有振荡环带的锆石、无分带结构的锆石和具冷杉结构的锆石(图 6e, 吴元保等, 2004)。该样品测点较少,且数据变化较大,未取得谐和年龄。除点 6.1 年龄为 2484Ma 外,其他测点的年龄数据可分为四组:①年龄在 1848~1929Ma 之间, Th/U 比值较低,在 0.16~0.47 之间,该锆石年龄可能与局部古元古代脉体的侵入有关;②年龄在 2532~2541Ma 之间,这一年龄与该地区的岩浆杂岩体的形成年龄(沈其韩等, 2007)接近;③年龄在 2560~2602Ma 之间,可能代表了早期麻粒岩相区域变质作用的上限年龄;④ 2719Ma 可能

表 2 沂水杂岩中变基性岩锆石 SHRIMP U-Pb 分析数据

Table 2 Analysis data of U-Pb by SHRIMP II from meta-mafic rocks in the Yishui complex

样品号	测点号	U ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	Th U	$^{206}\text{Pb}^*$ ($\times 10^{-6}$)	$^{206}\text{Pb}_c$ (%)	$\frac{n(^{206}\text{Pb})^*}{n(^{238}\text{U})}$		$\frac{n(^{207}\text{Pb})^*}{n(^{235}\text{U})}$		$\frac{n(^{207}\text{Pb})^*}{n(^{206}\text{Pb})^*}$		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ 年龄		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ 年龄	
							测值	相对误差 (%)	测值	相对误差 (%)	测值	相对误差 (%)	(Ma)		(Ma)	
		测值	相对误差 (%)	测值	相对误差 (%)	测值	相对误差 (%)	测值	误差 (±)	测值	误差 (±)					
YS06-31	1.1	2085	2346	1.16	864	0.06	0.4822	1.3	11.13	1.3	0.1674	0.2	2537	27	2532	3
	2.1	672	261	0.40	171	0.21	0.2949	1.3	4.59	1.5	0.1130	0.7	1666	19	1848	13
	1.2	579	282	0.50	238	0.10	0.4786	1.3	11.08	1.4	0.1680	0.4	2521	28	2537	7
	3.1	298	177	0.61	116	0.19	0.4517	1.4	10.87	1.7	0.1746	1.0	2403	28	2602	16
	4.1	299	140	0.48	121	0.27	0.4668	1.4	10.84	1.6	0.1684	0.7	2469	28	2541	12
	5.1	328	52	0.16	96	0.25	0.3394	1.4	5.53	1.8	0.1182	1.2	1884	22	1929	22
	6.1	150	102	0.71	47	0.32	0.3639	2.1	8.16	2.4	0.1627	1.2	2001	36	2484	21
	7.1	353	159	0.47	101	0.18	0.3325	1.4	5.34	1.7	0.1164	1.0	1851	22	1901	17
	8.1	161	129	0.83	66	0.34	0.4761	1.5	11.17	1.9	0.1702	1.1	2510	31	2560	19
	9.1	111	95	0.88	44	0.21	0.4584	1.6	10.87	1.9	0.1720	1.0	2432	32	2577	17
10.1	173	425	2.54	80	0.13	0.5389	1.5	13.92	2.1	0.1873	1.5	2779	34	2719	24	
YS06-40	1.1	529	285	0.56	14	1.33	0.0296	1.6	0.30	9.5	0.0723	9.4	188	3	995	190
	2.1	606	334	0.57	17	1.32	0.0323	1.7	0.29	9.6	0.0651	9.5	205	3	779	200
	3.1	265	163	0.64	7	1.54	0.0311	1.8	0.47	11.0	0.1100	11.0	197	4	1798	200
	4.1	1484	832	0.58	38	0.24	0.0298	1.7	0.26	5.9	0.0632	5.7	190	3	714	120
	5.1	532	161	0.31	116	0.08	0.2545	1.3	4.21	1.5	0.1199	0.7	1462	18	1955	13
	6.1	821	388	0.49	335	0.08	0.4745	1.3	10.87	1.4	0.1662	0.4	2503	27	2520	6
	7.1	1136	509	0.46	458	0.07	0.4692	1.3	10.71	1.3	0.1655	0.3	2480	26	2513	5
	8.1	840	381	0.47	345	0.10	0.4782	1.4	10.90	1.4	0.1654	0.4	2519	28	2512	6
	9.1	789	346	0.45	310	0.10	0.4563	1.3	10.38	1.4	0.1651	0.5	2423	26	2508	8
	10.1	929	391	0.43	372	0.08	0.4661	1.3	10.65	1.3	0.1657	0.4	2466	26	2514	6
	11.1	1314	1076	0.85	529	0.12	0.4680	1.3	10.69	1.3	0.1657	0.4	2475	26	2515	6
	12.1	863	407	0.49	349	0.15	0.4703	1.3	10.73	1.4	0.1655	0.4	2485	26	2512	7
YS06-41	1.1	440	331	0.78	164	0.14	0.4342	0.8	9.74	1.3	0.1627	1.0	2325	16	2484	16
	2.1	522	408	0.81	200	0.11	0.4463	0.5	10.09	0.7	0.1640	0.5	2379	10	2498	8
	3.1	575	175	0.31	223	0.09	0.4518	0.5	10.22	1.1	0.1641	1.0	2403	10	2499	16
	4.1	812	897	1.14	330	0.07	0.4721	0.5	10.66	0.6	0.1637	0.4	2493	9	2495	6
	5.1	326	168	0.53	129	0.12	0.4610	0.7	10.44	0.9	0.1642	0.5	2444	14	2499	9
	6.1	227	122	0.56	102	0.11	0.5219	1.8	11.87	1.9	0.1650	0.6	2707	41	2507	10
	7.1	288	101	0.36	117	0.15	0.4717	0.7	10.73	0.9	0.1650	0.6	2491	14	2507	9
	8.1	543	349	0.66	207	0.04	0.4437	0.6	9.95	0.8	0.1627	0.5	2367	11	2484	8
	9.1	546	255	0.48	215	0.05	0.4590	1.3	10.36	1.5	0.1637	0.8	2435	25	2495	13
	10.1	936	790	0.87	383	0.05	0.4765	0.5	10.78	0.6	0.1640	0.3	2512	11	2498	6
	11.1	845	301	0.37	351	0.08	0.4825	0.9	10.95	0.9	0.1646	0.3	2538	19	2504	5
	12.1	296	148	0.52	117	0.19	0.4596	1.1	10.26	1.3	0.1620	0.6	2438	23	2476	9
	13.1	372	184	0.51	147	0.09	0.4608	0.5	10.36	1.7	0.1630	1.6	2443	11	2487	28
	14.1	551	141	0.27	225	0.06	0.4747	0.6	10.62	1.0	0.1623	0.8	2504	13	2480	14
	15.1	1657	1688	1.05	677	0.01	0.4754	0.4	10.67	1.3	0.1627	1.2	2507	9	2484	20
	16.1	322	137	0.44	139	0.13	0.5001	1.1	11.34	1.2	0.1645	0.5	2614	24	2502	9
YS06-19	1.1	644	304	0.49	261	0.08	0.4714	1.3	10.87	1.3	0.1673	0.4	2490	26	2531	7
	2.1	781	623	0.82	314	0.10	0.4672	1.2	10.78	1.2	0.1673	0.4	2471	24	2531	6
	3.1	404	244	0.62	165	0.32	0.4720	1.3	10.83	1.5	0.1663	0.7	2492	27	2521	11
	4.1	849	610	0.74	341	0.14	0.4675	1.2	10.73	1.2	0.1665	0.4	2472	24	2523	6
	5.1	659	690	1.08	264	0.16	0.4653	1.2	10.66	1.3	0.1662	0.6	2463	25	2520	9
	6.1	1704	610	0.37	668	0.07	0.4561	1.2	10.47	1.3	0.1666	0.3	2422	25	2523	5
	7.1	298	223	0.77	119	0.22	0.4631	1.3	10.71	1.5	0.1677	0.7	2453	27	2535	12
	8.1	691	421	0.63	277	0.13	0.4664	1.2	10.59	1.3	0.1647	0.4	2468	25	2501	7
	9.1	628	293	0.48	255	0.17	0.4718	1.2	10.75	1.3	0.1652	0.5	2491	25	2510	9
	10.1	544	323	0.61	223	0.19	0.4755	1.4	10.92	1.8	0.1666	1.1	2508	29	2523	18

续表 2

样品号	测点号	U	Th	Th/U	$^{206}\text{Pb}^*$ ($\times 10^{-6}$)	$^{206}\text{Pb}_c$ (%)	$\frac{n(^{206}\text{Pb})^*}{n(^{238}\text{U})}$		$\frac{n(^{207}\text{Pb})^*}{n(^{235}\text{U})}$		$\frac{n(^{207}\text{Pb})^*}{n(^{206}\text{Pb})^*}$		$^{206}\text{Pb}_{238\text{U}}$ 年龄		$^{207}\text{Pb}_{206\text{Pb}}$ 年龄	
		($\times 10^{-6}$)					测值	相对误差 (%)	测值	相对误差 (%)	测值	相对误差 (%)	(Ma)		(Ma)	
		测值	相对误差 (%)										测值	相对误差 (%)	测值	误差 (\pm)
YS06-45	1.1	69	13	0.19	27	0.10	0.4525	1.4	10.13	1.9	0.1623	1.3	2406	27	2480	23
	2.1	113	54	0.49	47	0.18	0.4866	1.3	11.02	1.8	0.1642	1.3	2556	27	2499	21
	3.1	682	315	0.48	275	0.10	0.4697	0.6	10.56	0.9	0.1631	0.7	2482	13	2488	11
	4.1	99	40	0.42	41	0.09	0.4829	1.1	10.84	1.8	0.1629	1.4	2540	22	2486	24
	5.1	80	25	0.32	34	0.38	0.4845	1.2	10.84	1.7	0.1623	1.2	2547	26	2480	20
	6.1	158	87	0.57	65	0.18	0.4767	0.9	10.58	1.3	0.1610	0.9	2513	19	2467	15
	9.1	177	16	0.09	71	0.37	0.4662	1.8	10.52	2.2	0.1636	1.2	2467	38	2493	20
	10.1	126	24	0.19	50	0.17	0.4660	1.1	10.23	1.6	0.1592	1.2	2466	22	2447	21
	11.1	72	36	0.52	30	0.62	0.4746	1.2	10.76	3.5	0.1645	3.3	2504	24	2502	56
	12.1	114	60	0.54	47	0.38	0.4767	1.4	10.74	1.8	0.1635	1.2	2513	29	2492	20
	13.1	60	30	0.52	25	0.50	0.4852	1.3	10.88	2.0	0.1626	1.5	2550	27	2483	26
	14.1	186	19	0.11	77	0.22	0.4800	0.9	10.71	1.2	0.1618	0.9	2527	18	2475	14
	15.1	37	4	0.11	15	0.42	0.4723	1.6	11.13	2.4	0.1709	1.8	2494	33	2566	29
	8.2	58	9	0.15	24	0.89	0.4810	1.3	10.72	3.5	0.1616	3.3	2532	28	2473	56
	7.2	76	13	0.18	32	0.43	0.4880	2.5	10.99	2.9	0.1631	1.5	2564	52	2489	26
	16.1	87	51	0.61	35	0.73	0.4675	1.1	10.61	2.5	0.1646	2.2	2473	22	2504	37
	17.1	33	8	0.24	14	1.09	0.4900	1.9	11.09	3.6	0.1641	3.1	2571	40	2498	52
	18.1	60	26	0.44	25	0.42	0.4924	1.5	11.42	2.2	0.1682	1.6	2581	33	2540	26
	19.1	72	29	0.41	32	0.57	0.5052	1.6	11.92	3.1	0.1712	2.7	2636	35	2569	45
	20.1	65	8	0.13	27	0.37	0.4711	1.4	10.75	2.1	0.1655	1.5	2488	29	2513	26
YS06-49	1.1	2050	107	0.05	769	0.03	0.4369	1.2	9.96	1.3	0.1654	0.3	2337	24	2512	5
	2.1	1343	16	0.01	529	0.03	0.4589	1.3	10.46	1.3	0.1653	0.4	2435	26	2511	7
	3.1	5516	595	0.11	1360	0.03	0.2872	1.2	5.98	1.9	0.1511	1.5	1628	18	2358	26
	1.2	241	40	0.17	83	0.21	0.3979	1.5	8.97	1.6	0.1636	0.7	2159	27	2493	12
	4.1	160	49	0.32	70	0.49	0.5073	1.6	12.07	2.1	0.1726	1.3	2645	35	2583	22
	5.1	464	120	0.27	195	0.10	0.4875	1.4	11.77	1.5	0.1751	0.5	2560	30	2607	8
	6.1	600	4	0.01	204	0.09	0.3955	1.4	8.38	1.6	0.1536	0.8	2149	25	2386	14
	7.1	2067	22	0.01	809	0.05	0.4554	1.2	10.38	1.3	0.1653	0.2	2419	25	2510	4
	8.1	3714	402	0.11	767	0.05	0.2402	1.2	4.46	4.2	0.1347	4.0	1388	16	2160	69
	9.1	1548	1838	1.23	532	0.06	0.4001	1.3	8.93	1.4	0.1620	0.3	2170	25	2476	5
	10.1	980	43	0.04	386	0.05	0.4577	1.3	10.38	1.4	0.1645	0.4	2430	26	2503	6
	11.1	67	20	0.31	27.2	1.00	0.472	2.6	11.25	5.9	0.1728	5.3	2493	53	2585	89
12.1	123	60	0.50	46.3	0.40	0.4370	1.7	9.82	2.1	0.1630	1.3	2337	33	2487	22	
YS06-29	1.1	2714	2507	0.95	1100	0.04	0.4707	1.1	10.83	1.2	0.1668	0.2	2486	23	2526	3
	2.1	848	532	0.65	331	0.09	0.4541	1.4	10.46	1.4	0.1671	0.3	2413	28	2529	5
	3.1	1159	760	0.68	466	0.09	0.4679	1.2	10.75	1.2	0.1666	0.3	2474	24	2524	5
	4.1	616	127	0.21	251	0.11	0.4748	1.2	10.81	1.5	0.1651	0.9	2505	25	2508	14
	5.1	2021	1583	0.81	818	0.05	0.4709	1.1	10.89	1.2	0.1677	0.2	2488	24	2535	4
	6.1	748	232	0.32	301	0.09	0.4679	1.2	10.78	1.2	0.1672	0.3	2474	24	2530	6
	7.1	3760	4141	1.14	1520	0.03	0.4716	1.1	10.79	1.2	0.1659	0.3	2490	23	2517	6
	8.1	454	182	0.41	181	0.23	0.4631	1.5	10.71	1.6	0.1677	0.5	2453	31	2535	9
	9.1	3841	5108	1.37	1550	0.02	0.469	1.2	10.87	1.2	0.1680	0.2	2479	± 25	2538	± 3
	10.1	1029	662	0.66	414	0.08	0.4683	1.2	10.86	1.2	0.1682	0.3	2476	± 24	2540	± 5

注:普通铅采用实测值与 ^{204}Pb 进行校正;YS06-40 样品中 1.1~5.1 为混入锆石。

代表早期麻粒岩相区域变质作用的峰期年龄(图 7e,表 2)。该岩石可能形成于更为特殊的构造环境,形成时代应更早,具有更重要的地质意义,也有待进一步的详细研究。

样品 YS06-29 是斜长角闪岩,其锆石多呈近椭

圆形,长轴 100~200 μm ,长宽比 1~1.5,多数无环带结构,少数可见扇形分区,认为是经过变质改造的锆石(吴元保等,2004)。测试了 10 个锆石颗粒的 10 个测试点,其 Th/U 在 0.21~1.37 之间,年龄变化在 2508~2540Ma,10 个测点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均

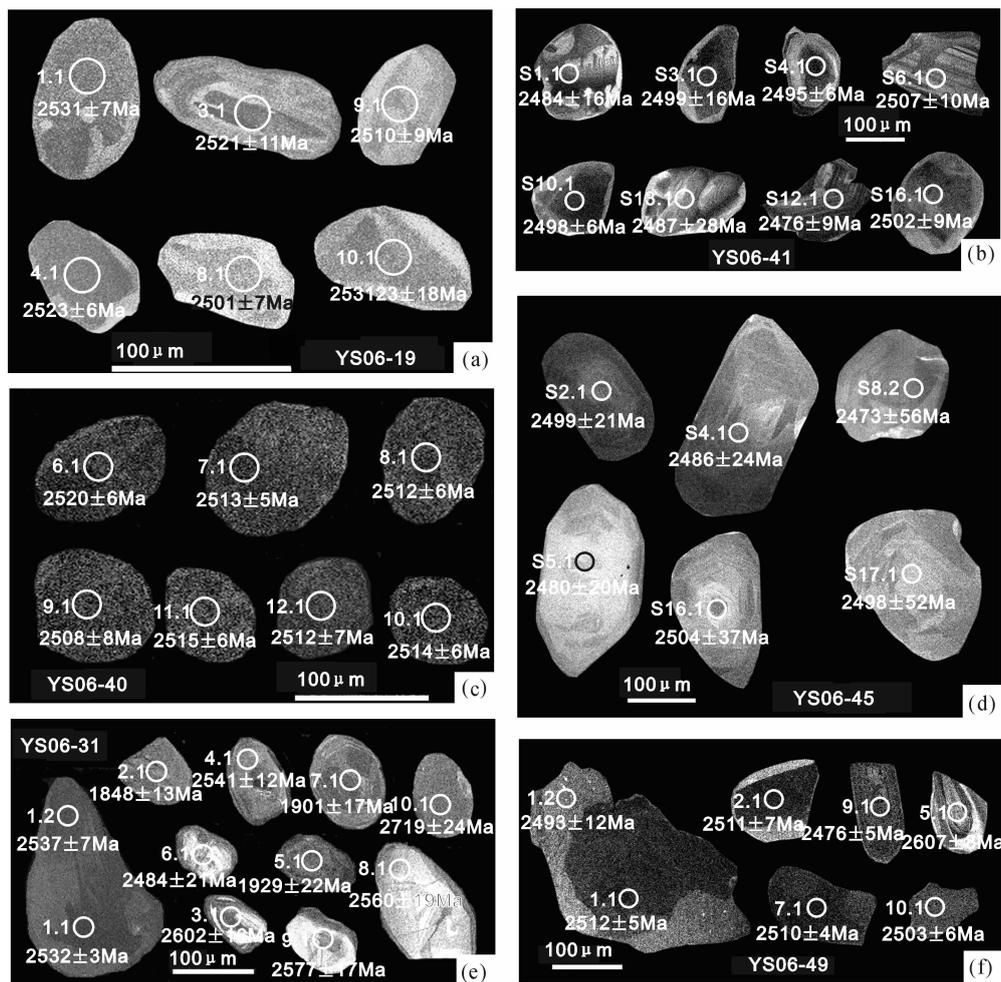


图6 沂水杂岩中变基性岩石的部分锆石阴极发光图像

Fig. 6 CL images of representative zircons from the Yishui Complex

年龄为 2531 ± 6 Ma (赵子然等, 2008), 代表了经受围岩岩浆作用改造的年龄。

除样品 YS06-29 外, 将其他 6 个样品的锆石 Th/U 比值和年龄关系进行统计 (见图 8, 为便于观察, 个别年龄小于 2350 Ma 和大于 2650 Ma 的点未在图上显示), 从图中可以看出, 样品 YS06-45 中锆石 Th/U 比值绝大多数都低于 0.6, 其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2485 ± 10 Ma, 是 7 个麻粒岩样品中年龄最小的一个, 代表角闪岩相—麻粒岩相变质作用后期流体作用而发生退变质作用的年龄。样品 YS06-19 中锆石 Th/U 比值均大于 0.4, 其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 2522 ± 5 Ma, 代表原有锆石经受变质改造的年龄。样品 YS06-49 中锆石 Th/U 比值绝大多数小于 0.4, 部分小于 0.01, 是明显的变质改造的锆石, 6 个这类锆石的加权平均年龄是 2509 ± 5 Ma。样品 YS06-40 中锆石 Th/U 比值位于 0.4

~0.9 之间, 阴极发光显示典型的变质改造锆石的特征 (吴元保等, 2004), 其加权平均年龄是 2513 ± 5 Ma。样品 YS06-31 和 YS06-41 的锆石 Th/U 比值分别大于 0.4 和 0.2, 且这两个样品中锆石阴极发光显示的特征较复杂。由此我们认为, 对于本研究区域来说, 用 Th/U 比值来区分岩浆锆石和变质锆石仅对个别样品可行。

4 讨论和结论

本区所测得的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄, 除样品 YS06-29 (斜长角闪岩) 接近于岩浆杂岩中英灵山岩体的形成年龄外, 其他样品的定年结果均小于侵入其中的沂水岩浆杂岩体的年龄。由于该地区的岩石经受了复杂的变质作用改造, 使得锆石的定年结果也出现了多组年龄, 结合已有资料, 现对各年龄所代表的地质意义做如下推断。

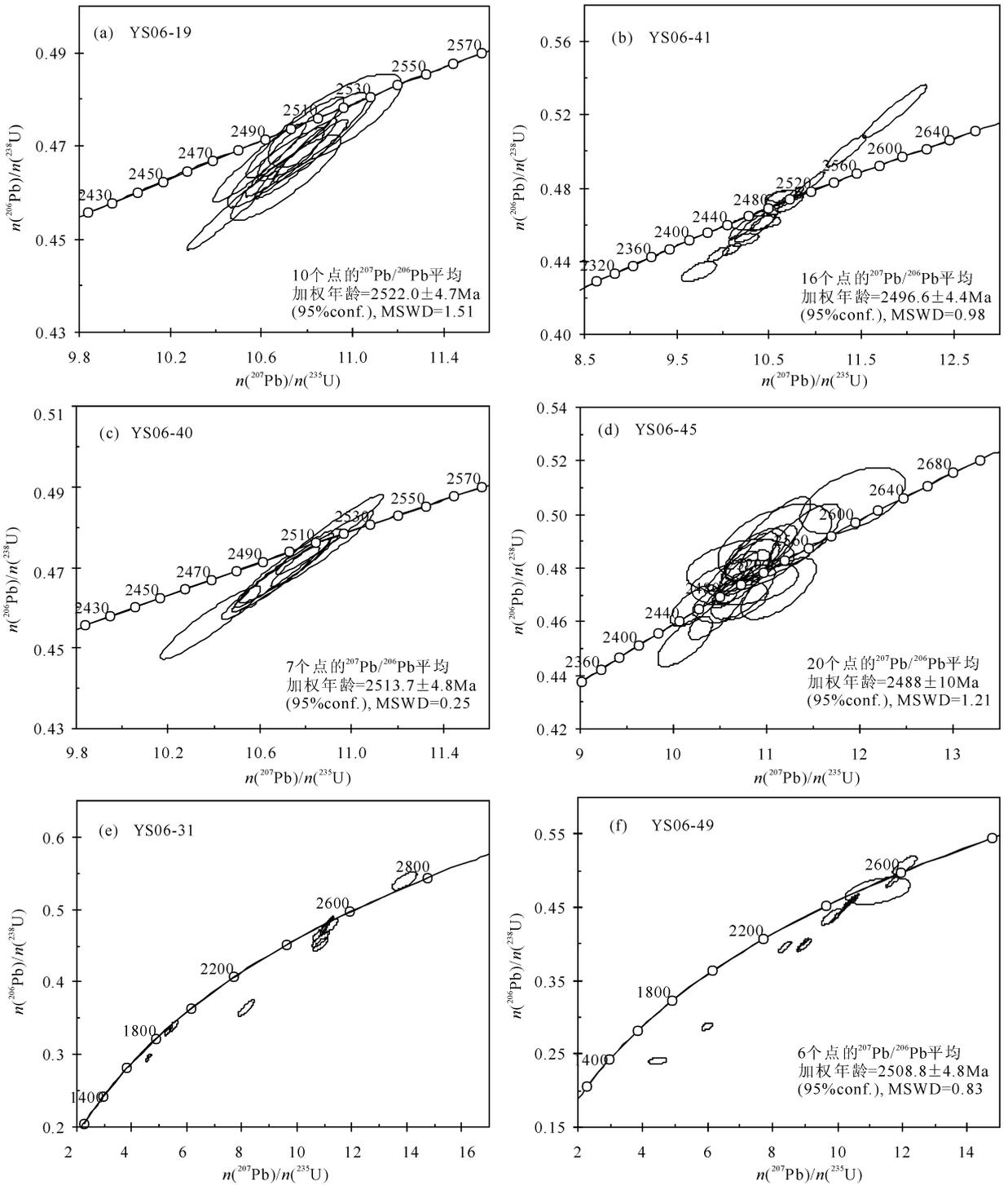


图 7 沂水杂岩中变基性岩石的 U-Pb 年龄谱和图

Fig. 7 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ — $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ concordia diagrams of zircons from meta-mafic granulite rocks of the Yishui Complex

本区基性岩均经受了早期区域麻粒岩相变质作用,其形成时代和变质时代应在沂水最早的岩浆杂岩体蔡峪岩体侵入时代 2556Ma 之前。该年龄信息仅在个别锆石颗粒中有记录。样品 YS06-45 中有

三个锆石颗粒的核部年龄为 2540~2569Ma, YS06-49 中有三个保留了弱振荡环带的锆石年龄为 2583~2607Ma, 样品 YS06-31 中有一组变质锆石的年龄为 2560~2602Ma, 由此推测 2560~2607Ma 可能代

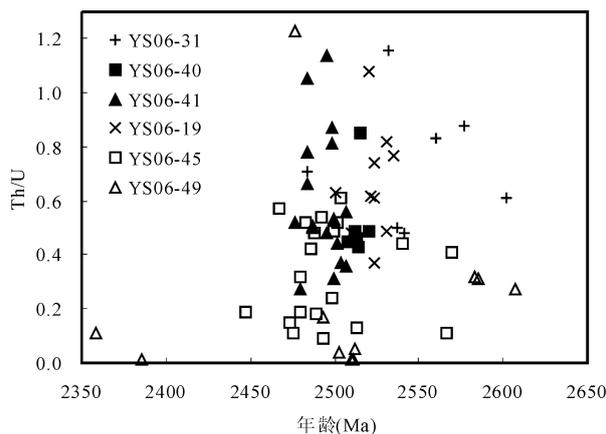


图 8 沂水杂岩中基性麻粒岩中锆石的 Th/U—Age 关系图

Fig. 8 Relationship between Th/U and age of zircon from meta- mafic granulite rocks in Yishui complex

表示了早期区域麻粒岩相变质作用时间的上限。同时在 YS06-31 中测得一个变质锆石的年龄为 2719Ma, 可能代表了早期区域麻粒岩相变质作用的峰期年龄, 该岩石的形成更早。

关于本区变基性岩原岩的年龄, 根据沈其韩等 (1993) 和顾德林等^②测得变基性岩全岩 Sm-Nd 等时线年龄分别是 $2997 \pm 78\text{Ma}$ 和 $2986 \pm 136\text{Ma}$, 本次测年未发现与该年龄相当的锆石 U-Pb 年龄, 而最老的年龄 2719Ma 是由一颗变质锆石测得的, 其原岩年龄应大于该年龄。笔者同时对变基性岩中的锆石进行了 Lu-Hf 模式年龄定年 (数据整理后, 将另文发表), 其最大值为 2760Ma, 可能反映了变基性岩原岩年龄的上限, 确切的原岩年龄尚待进一步研究。

样品 YS06-19 (含紫苏辉石斜长角闪岩)、YS06-40 和 YS06-49 (含石榴子石角闪二辉斜长麻粒岩) 中, 用于计算该年龄的锆石均为经变质改造的锆石, 年龄结果在 2509~2522Ma 之间, 其小于沂水岩浆杂岩的侵入时代 (沈其韩等, 1997, 2004, 2007; 赵子然等, 2008), 而与蔡峪和大山岩体中部分锆石增生边的年龄一致, 反映该时期存在一次较强的角闪岩相—麻粒岩相变质作用, 使得变基性岩中多数锆石的 U-Pb 体系发生重置, 并在岩浆杂岩体中保留了这一事件的记录。

样品 YS06-41 (含紫苏辉石斜长角闪岩) 和 YS06-45 (含石榴子石角闪二辉斜长麻粒岩) 中的锆石为新生锆石——由于受到上述角闪岩相—麻粒岩相变质作用晚期阶段所产生的变质流体影响, 退变

质过程中形成, 其中部分锆石保留有早期锆石的核, 流体作用使得早期锆石有较严重的 Pb 丢失, 获得的年龄分别为 2485Ma 和 2497Ma。该阶段在变基性岩中有大量角闪石和黑云母等含水矿物出现, 并交代和改造了无水矿物透辉石和紫苏辉石。这种变质流体作用的影响在岩浆杂岩中也存在明显响应, 即在部分岩浆锆石的边部形成增生边。

致谢: 对北京离子探针开放实验室和国家地质实验测试中心在本项目研究中给予的大力支持, 在此致以诚挚的谢意。

注释 / Notes

- ① 宋金礼, 程志忠. 1990. 中华人民共和国 1:5 万沂水幅地质图和说明书. 山东省地质矿产局.
- ② 顾德林, 等. 1997. 中华人民共和国 1:5 万高桥、马站、圈里区域地质报告. 中国地质大学 (北京) 和山东省地质矿产局.

参考文献 / References

- 沈昆, 沈其韩, 徐惠芬, 耿元生. 1998. 山东省沂水汞丹山地块与深熔作用有关的变质流体. 岩石矿物学杂志, 17(3):193~205.
- 沈昆, 徐惠芬, 沈其韩. 1995. 山东沂水麻粒岩杂岩中的变质流体及地质意义. 华北地质矿产杂志, 10(2):154~166.
- 沈其韩, 沈昆, 耿元生, 徐惠芬. 2000. 山东沂水杂岩的组成与地质演化. 北京:地质出版社.
- 沈其韩, 宋彪, 徐惠芬, 耿元生, 沈昆. 2004. 山东沂水太古宙蔡峪和大山岩体 SHRIMP 锆石年代学. 地质论评, 50(3):275~284.
- 沈其韩, 徐惠芬, 沈昆, 杨淳, 宋彪. 1997. 山东沂水雪山岩体和林家官庄岩体的同位素年代学. 地质科学, 32(3):291~298.
- 沈其韩, 张宗清, 徐惠芬. 1993. 山东沂水杂岩中变基性岩类的 Sm-Nd 同位素年龄及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 12(4):289~296.
- 沈其韩, 张宗清, 徐惠芬. 1994. 山东沂水太古宙麻粒岩区年代学研究成果简介. 地球学报, 1(2):17~19.
- 沈其韩, 赵子然, 宋彪, 宋会侠. 2007. 山东沂水新太古代马山和雪山岩体的地质、岩石化学特征和 SHRIMP 锆石年代研究. 地质论评, 53(2):180~186.
- 宋彪, 张拴宏, 王彦斌, 赵越. 2006. 锆石 SHRIMP 年龄测定数据处理时系统偏差的避免—标准锆石分段校正的必要性. 岩矿测试, 25(1):9~14.
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 简平. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. 地质论评, 18(增刊):26~30.
- 苏尚国, 邓晋福, 梁凤华等. 2003. 山东沂水紫苏花岗岩中残晶相矿物的发现及紫苏花岗岩的形成过程. 地学前缘, 10(3):257~267.
- 苏尚国, 顾德林, 朱更新. 1999. 山东沂水紫苏花岗岩特征、形成时代及成因探讨. 地球科学, 24(1):57~62.
- 苏尚国. 2003. 山东沂水紫苏花岗岩成因及早前寒武纪地壳演化. 见: 邓晋福, 罗照华, 苏尚国, 等. 著. 岩石成因、构造环境与成矿作用. 北京:地质出版社, 340~365.
- 王仁民, 贺高品, 陈珍珍, 耿元生. 1987. 变质岩原岩图解判别法. 北京:地质出版社.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报, 49(16):1589~1604.

赵子然,宋会侠,沈其韩,宋彪. 2008. 山东沂水英灵山花岗岩及其捕虏体的地质、岩石地球化学特征和锆石 SHRIMP U-Pb 定年. 地质通报, 27(9):1551~1558.

Jensen L S. 1976. A new cation plot for classifying subalkalic volcanic rocks. Ontario Division of Mines, Misc. Paper. No. 66

Meschede M. 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb—Zr—Y diagram. *Chemical Geology*, 56: 207~218.

Mullen E D. 1983. $MnO/TiO_2/P_2O_5$: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications

for petrogenesis. *Earth and Planetary Science Letter*, 62: 53~62.

Pearce J A and Cann J R. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planetary Science Letter*, 19: 290~300.

Wood D A. 1980. The application of Th—Hf—Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province. *Earth and Planetary Science Letter*, 50: 11~30.

The Petro-geochemical Characters and SHRIMP U-Pb Zircon Ages of Meta-mafic Rocks from the Yishui Complex, in Yishui County, Shandong Province

ZHAO Ziran¹⁾, SONG Huixia¹⁾, SHEN Qihan¹⁾, SONG Biao^{1,2)}

1) *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;*

2) *Beijing SHRIMP Center, Beijing, 100037*

Abstract: The Yishui Complex is mainly composed of the Neo-archaeon Yishui Magmatic Complex and the Meso-archaeon Yishui Metamorphic Complex. The meta-mafic rocks especially the mafic granulites in the Yishui complex are companioned with the charnockites closely, and they appear as layers or xenoliths with different size in the charnockites. Petrology, geochemistry and zircon SHRIMP U-Pb dating of the meta-mafic rocks are researched in this paper. According their petrological characters, they can be divided into three kinds that are hypersthene bearing plagioclase-amphibolites, garnet bearing hornblende two-pyroxene plagioclase granulites and spinel and garnet bearing hornblende two-pyroxene granulites. Their original rocks are andesite, ultramafic basalts and basaltic komatiite (?) separately. They have different trace elements and REE distribution diagrams. For the hypersthene bearing plagioclase amphibolites, LREE and large-ion lithophile elements including Sr, K, Rb, Ba and Th are enriched obviously while high field strength elements such as Nb, Ta, Zr and Hf are depleted. Contrastively, the granulite-faces metamorphosed samples have flat REE distribution models with the ratios to MORB of the most elements approximately equal to 1 except slightly enrichment of K, Rb and Ba. Dating researches of these samples indicate that the zircon U-Pb ages can be divided into the following four groups: 2719Ma and 2560~2607Ma may represent the lower and the upper limit of the first granulite faces metamorphic ages respectively. Whereas, 2509~2522Ma indicates the age of another high amphibolite—granulite faces regional metamorphism which occurred after the intrusion of the Yishui Magmatic Complex. The youngest ages are 2485Ma and 2497Ma that may represent the ages of metamorphism and zircons related to fluid activities.

Key words: the Yishui Complex; mafic-granulite; petrochemistry; Zircon SHRIMP U-Pb dating; Shandong