

沂水杂岩中超镁铁质岩的岩石地球化学特征

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)

摘要: 主要以捕虏体形式存在于沂水岩浆杂岩和变质杂岩中的超镁铁质岩石不发育鬣刺结构, 岩石化学组成以高 MgO 和低 SiO₂、TiO₂、K₂O 含量为主要特征。按岩石中是否含有橄榄石大致可以分为橄榄辉石岩和尖晶石角闪二辉石岩两种, 前者以强烈发育蛇纹石化为特征, 矿物组合以单斜(透)辉石 + 橄榄石为主(偶见斜方辉石), 蚀变矿物组合为蛇纹石 ± 铬铁矿 + 磁铁矿 ± 角闪石 ± 尖晶石等, 后者以局部发育滑石化为特征, 矿物组合以斜方(古铜)辉石 + 单斜(透)辉石 + 尖晶石为主, 其次是角闪石 + 磁铁矿 ± 滑石等。岩石总体以稀土元素总量(∑REE)相对较低, LREE/HREE = 1.64~4.40 为特征, 稀土元素的球粒陨石标准化配分图解显示所有样品均具 Eu 和 Ce 的负异常, 除 3 个橄榄辉石岩样品外, 多数样品无明显的轻稀土元素、轻重稀土元素和重稀土元素分异。岩石的微量元素组成以不相容元素 Rb、Ba、U、Nb、Sr、Zr 等具有明显不同的异常为特征, Ba、Nb 呈现负异常, 而 Rb、U 呈现正异常, Sr 部分呈正异常, Zr 和 Ti 负异常出现在橄榄辉石岩中, 其他样品无 Zr 异常。样品 YS0631 的 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年结果显示其变质锆石年龄值为 2 560~2 605 Ma, 另有一颗结晶锆石的年龄值为 2 719 Ma, ε_{Hf(t)} 值为 8.2, 亏损地幔模式年龄为 2 680 Ma。综上所述, 该超镁铁质岩石源于地幔, 形成于新太古代早期, 随后遭受深熔及岩浆作用影响, 经历了变质作用的改造。

关键词: 沂水杂岩, 超镁铁质岩石, 岩石化学, 科马提岩

中图分类号: P588.12⁺5; P59

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)05-0853-12

Petrology and geochemistry of ultramafic rocks in the Yishui complex, Shandong Province

ZHAO Zi-ran¹, SONG Hui-xia¹, SHEN Qi-han¹ and SONG Biao^{1,2}

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Beijing SHRIMP Center, Beijing 100037, China)

Abstract: Ultramafic rocks occur mainly as inclusions or xenoliths in Yishui magmatic and metamorphic complexes, without typical spinifex texture. Their chemical compositions are characterized by high MgO (22.23%~27.49%, >20%) and low SiO₂ (38.60%~49.40%), TiO₂ (0.11%~0.39%, <0.5%) and K₂O (0.02%~0.39%, <0.5%) content. As for other oxide compositions, total iron (FeO^T) values are in the range of 7.68%~11.14%, CaO content ranges 5.15%~12.86%, and Al₂O₃ content varies remarkably in the range of 1.56%~8.94%. The CaO/Al₂O₃ ratios of most samples are 0.61~1.36 (≈1), with the exception of three samples, whose CaO/Al₂O₃ ratios are 7.70~8.20 (>1) and MgO/FeO^T ratios are 2.00~3.33. MnO (0.13%~0.20%) and Na₂O (0.12%~1.03%) content is low. The rocks can be roughly divided into two types, i.e., olivine-pyroxenite and spinel-hornblende-pyroxenite. The former containing olivine shows strong serpentinization, with a mineral assemblage of calcic clinopyroxene + olivine + minor orthopyroxene, followed by the altered mineral assemblage of serpentine ± chromite + magnetite ± hornblende ± spinel. The latter containing no olivine has

收稿日期: 2011-05-30; 修订日期: 2011-06-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40572110); 基本科研业务经费资助项目(J0805 J0907)

作者简介: 赵子然(1963-), 男, 副研究员, 从事变质变形及热动力学演化等方面研究工作, E-mail: ziranzhao@cags.ac.cn

features of local talcization, and its mineral assemblage consists of (bronze) pyroxene + clinopyroxene (diopside) + spinel, followed by hornblende + magnetite \pm talc \pm serpentine. In general, the ultramafic rocks have fairly low REE content (Σ REE) = $11.45 \times 10^{-6} \sim 22.63 \times 10^{-6}$) with LREE/HREE ratios in the range of 1.64 ~ 4.40. The chondrite-normalized REE patterns of all samples show negative anomalies of Ce and Eu. Most samples show indistinct fractionation of LREE, LREE-HREE and HREE, with the exception of three olivine-containing samples showing relatively high LREE/HREE ratios (3.35 ~ 4.40). The trace elements in the ultramafic rocks show significantly different anomalies of incompatible elements Rb, Ba, U, Nb, Sr and Zr. Ba and Nb assume negative anomalies, and Rb and U as well as part of Sr display positive anomalies; in addition, negative Zr and Ti anomalies appear in olivine-pyroxenite, and there exist no Zr and Ti anomalies. SHRIMP zircon U-Pb dating of the ultramafic rock (YS0631) shows that the metamorphic zircon U-Pb ages are 2 560 ~ 2 605 Ma, with a crystal zircon age of 2 719 Ma. Hf isotopic composition of the sample has Hf(*t*) value of 8.2, indicating the depleted mantle model age of 2 680 Ma. In summary, the ultramafic rocks originated from the mantle, formed in the early Neoproterozoic, and were then subjected to anatexis and magmatic effects, thus experiencing metamorphic transformation.

Key words: Yishui complex; ultramafic rock; petrochemistry; komatiite

太古宙高级变质岩区的超镁铁质岩石对于探讨古老地壳的组成、形成环境、成矿作用及演化具有重要的意义。

根据笔者的最新研究发现,华北地台东南部永丹山地块的沂水杂岩中,含有一些以捕虏体形式出露的含尖晶石的角闪辉石岩、滑石化二辉石岩及强烈蛇纹石化的橄榄辉石岩等。初步研究表明,这些岩石在化学组成上属超镁铁质岩石,但不具有典型科马提岩的鬃刺结构,与世界标准地区绿岩带及邻区鲁西绿岩带中的科马提岩相比,存在一定的相似性和可比性,但也存在一定的差异,最为突出的特点是本区岩石的变质较深(麻粒岩相-高角闪岩相),这一点与我国冀东地区迁西群麻粒岩相深变质地层中以透镜体和残块分布的超镁铁质岩石类似。为进一步鉴定和重新认识沂水深变质杂岩的原岩组成,推断其形成环境和构造及变质演化,本文从岩石地球化学特征角度对沂水杂岩中超镁铁质岩进行了相关对比、分析和研究,为深入探讨我国太古宙麻粒岩相高级变质区的早期演化提供一定的佐证。

1 地质背景及研究现状

研究区位于 1:5 万地质图沂水幅-高桥幅内(图 1)。区内地质体主要由一系列的新太古代沂水岩浆

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)和中太古代的沂水变质岩系(约占 25% ~ 30%)组成,其中沂水变质岩系包括基性麻粒岩、石榴夕线钾长片麻岩、少量变粒岩、铁英岩等。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,1990^①)。前人(沈其韩等,1993,1997,2000;顾德林等,1997^②;沈昆等,1998)曾对该杂岩体中的岩浆杂岩和变质岩做了较为详细的岩石地球化学和定年(Sm-Nd 全岩、U-Pb 单颗粒锆石蒸发法、Rb-Sr 等时年龄等)研究,并讨论了其成因机制及地质演化,其中全岩 Sm-Nd 模式年龄为 $2\,997 \pm 78$ Ma,黑云二辉斜长片麻岩单颗粒锆石 Pb-Pb 蒸发法定年结果为 $2\,761 \pm 9 \sim 2\,572 \pm 4$ Ma。由于方法不统一等诸多因素的影响,难以真正确定沂水杂岩的形成演化时序。

近年来,利用锆石 SHRIMP U-Pb 法对本区的岩浆杂岩(蔡峪、大山、马山、雪山和英灵山岩体;沈其韩等,2004,2007;赵子然等,2008)和变质杂岩中变基性岩石进行了新的定年研究(赵子然等,2009a)结果表明,岩浆杂岩中蔡峪岩体、大山岩体、马山岩体、雪山岩体和英灵山岩体的形成(结晶)年龄分别为 2 562、2 545、2 538、2 532 和 2 530 Ma,变基性岩主要包括含紫苏辉石斜长角闪岩、含石榴角闪

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.

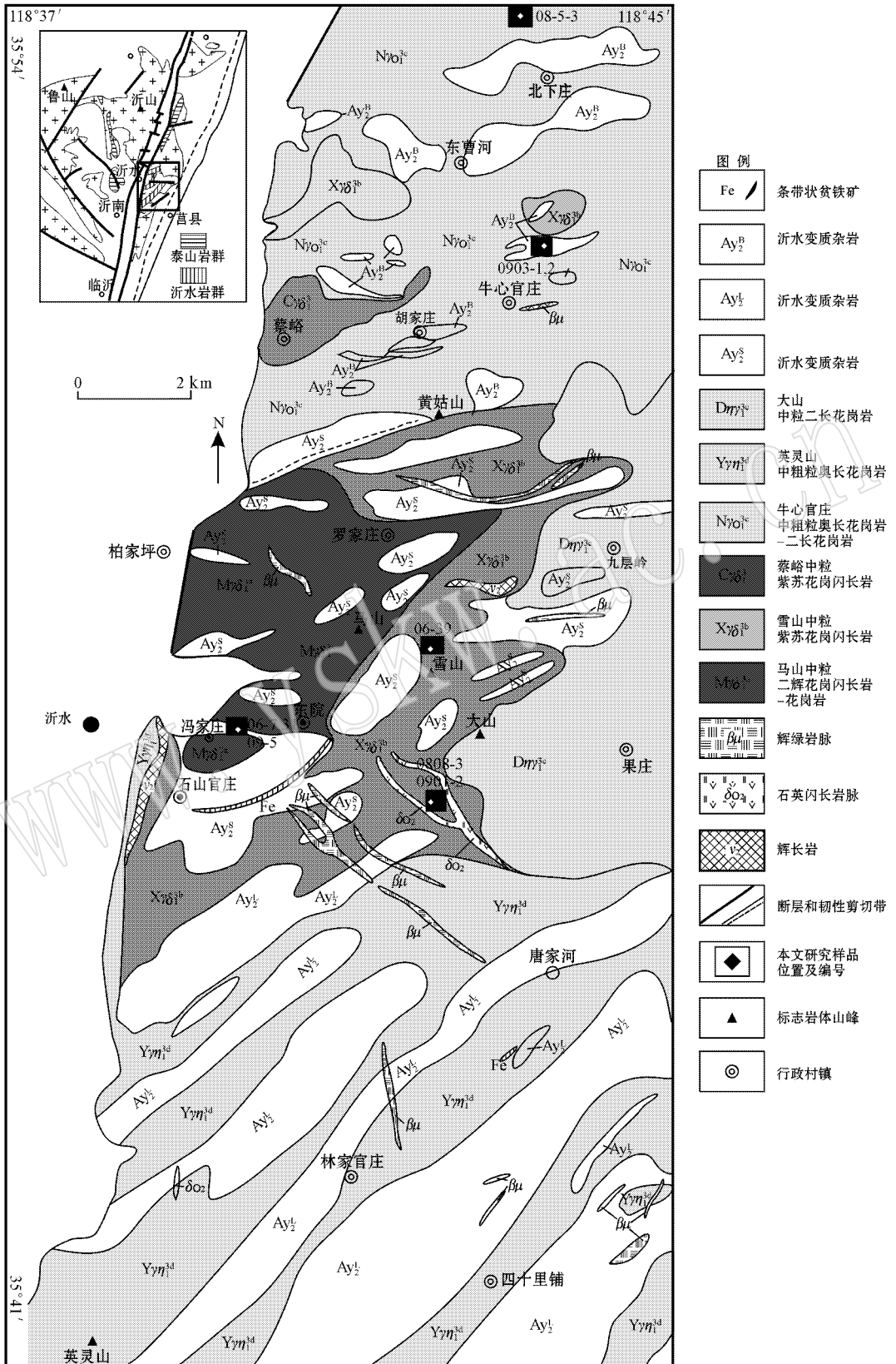


图 1 山东沂水杂岩分布地质略图 [据沈其韩等 (2000) 简化]

Fig. 1 Sketch geological map of the Yishui complex , Shandong Province (simplified after Shen Qihan *et al.* , 2000)

二辉麻粒岩和含尖晶石角闪二辉麻粒岩,形成于火山岛弧环境,早期经历了不同程度的部分熔融,其后又经历了两期变质作用:第一期麻粒岩相变质作用年龄为 2 719~2 607 Ma,第二期与岩浆杂岩侵入有关的角闪岩相-麻粒岩相变质作用年龄为 2 522~2 509 Ma,与变质期后产生的流体相关的变质改造作用年龄为 2 497~2 485 Ma。宋会侠等(2009)还对本区的英灵山花岗岩及变基性岩进行了 Hf 同位素的特征研究,结果显示英灵山二长花岗岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值亦为正值,在 1.9~2.7 之间,指示了这类岩石的源区为亏损地幔而非古老陆壳重熔的产物,其对应的亏损地幔模式年龄为 2 711.8~2 740.5 Ma,大于该样品的锆石年龄 2 530~2 531 Ma;变基性的超镁铁质岩石(YS0631)的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 3.4,亏损地幔模式年龄为 2 680.0 Ma。同时笔者还对本区少见的含夕线石十字石榴二云母斜长片麻岩进行了详细的岩石学、岩相学和矿物学、地球化学及锆石 SHRIMP U-Pb 定年研究(赵子然等,2009b),发现含夕线石十字石榴二云母斜长片麻岩包裹于沂水牛心官庄岩浆杂岩体中,为残留的变质表壳岩透镜体,它经历了两期变质作用的改造:早期高角闪岩相变质与区域麻粒岩相变质有关,峰期矿物共生组合主要为石榴石(中心域)+黑云母±白云母+斜长石+石英,峰期变质温压条件为 $660 \pm 10^\circ\text{C}$ 和 $0.57 \pm 0.03 \text{ GPa}$;晚期角闪岩相变质与埋深和上地壳的部分熔融(岩浆作用-接触变质)有关,矿物共生组合为十字石+石榴石(边部域)+黑云母±白云母+斜长石±夕线石+石英,以形成大量自形-半自形十字石和具有明显的成分环带的石榴石为特征,形成的温压条件分别为峰期(石榴石核部) $650 \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $0.77 \pm 0.05 \text{ GPa}$ (石榴石)边部 $578 \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $0.47 \pm 0.01 \text{ GPa}$ 。锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果表明,该岩石中锆石为岩浆锆石,上交点年龄为 $2 695 \pm 32 \text{ Ma}$,应代表变泥砂质岩石源区岩浆岩的形成年龄,变泥砂质岩石的沉积和变质年龄晚于此年龄,晚期变质作用与牛心官庄奥长花岗岩形成有关,年龄为 $2 537 \pm 5 \text{ Ma}$ 。

2 样品分布及产出状态

超镁铁质岩石在本区出露很少(图 1),而且范围小,北起吴家官庄村东北—牛心官庄北—桌子石村西—马山—雪山北侧之间山梁,南至石山官庄—冯家庄一线(倒转背斜),东至大山—青龙峪南,其他地

方如严家官庄、羊圈及曹河庄地区也有出露(沈其韩等,2000)。但在以往的研究中只涉及紫苏透辉石岩或二辉石岩、角闪辉石岩,本文研究的含橄榄石及蛇纹石化的超镁铁质岩石主要样品野外产出状态及采样位置见图 2。

3 岩石学及地球化学特征

3.1 样品来源及岩石矿物组合特征

样品 YS0607、YS0631 和 YS0905 采于冯家庄村东 1 km(图 2a),该超镁铁质岩石呈层状产出马山紫苏花岗岩中。该岩石呈绿黑色-黑绿色,细粒致密块状,主要矿物组合为角闪石(40%~45%)、紫苏辉石(40%)和透辉石(15%)及少量的尖晶石(Al-铁镁为主),无长石出现,部分具有强烈的滑石化现象。

样品 YS0808-3 和 YS0901-2 采于大山-青龙峪西南(图 2b),呈捕虏体产于英灵山奥长花岗岩中。矿物组合为透辉石、橄榄石、蛇纹石、铬尖晶石(铬铁矿)及少量紫苏辉石和透闪石,具有强烈的蛇纹石化。

样品 YS0639 采于马山-雪山北侧之间的山梁(图 2c),呈捕虏体产于雪山紫苏花岗闪长岩中。其矿物组合为角闪石、辉石、蛇纹石、橄榄石、尖晶石(Al-铁镁为主)等,以具有强烈的蛇纹石化为特征。

样品 YS0805-3 和 YS0903 分别采于吴家官庄村东北 500 m 和桌子石村西 500 m,这两个样品都呈捕虏体产于石榴二辉麻粒岩中。矿物组合为角闪石、辉石、尖晶石等,局部有滑石化。

3.2 岩相学及矿物组成特征

本区出露的超镁铁质岩石依矿物组成大致可以按有无橄榄石分为两种。一种主要由角闪石+斜方(古铜)辉石+少量单斜(透)辉石+Al-尖晶石(少量)+磁铁矿+滑石(少量)组成,局部有强烈的滑石化(保留辉石的粒状结构特征),为含尖晶石的角闪二辉石岩(YS0607、YS0631、YS0905、YS0805-3、YS0903)。另一种主要由橄榄石+单斜(透)辉石+蛇纹石+Al-Cr-尖晶石±角闪石组成,为蛇纹石化的橄榄辉石岩(YS0639、YS0808-3、YS0901-2)。典型样品的结构特征见图 3,矿物成分电子探针分析结果见表 1。

矿物的化学组成显示,斜方辉石属富 Mg 的古铜辉石,顽火辉石($E_n = 85 \pm$);单斜辉石由 Ca 和 Mg 及很低的 Fe 组成,属(次)透辉石,发育滑石化、角闪石化(图 3a、3b);橄榄石属富 Mg 的贵橄榄石;蛇纹石属橄榄石的蚀变产物(图 3d、3e),沿橄榄石的边部

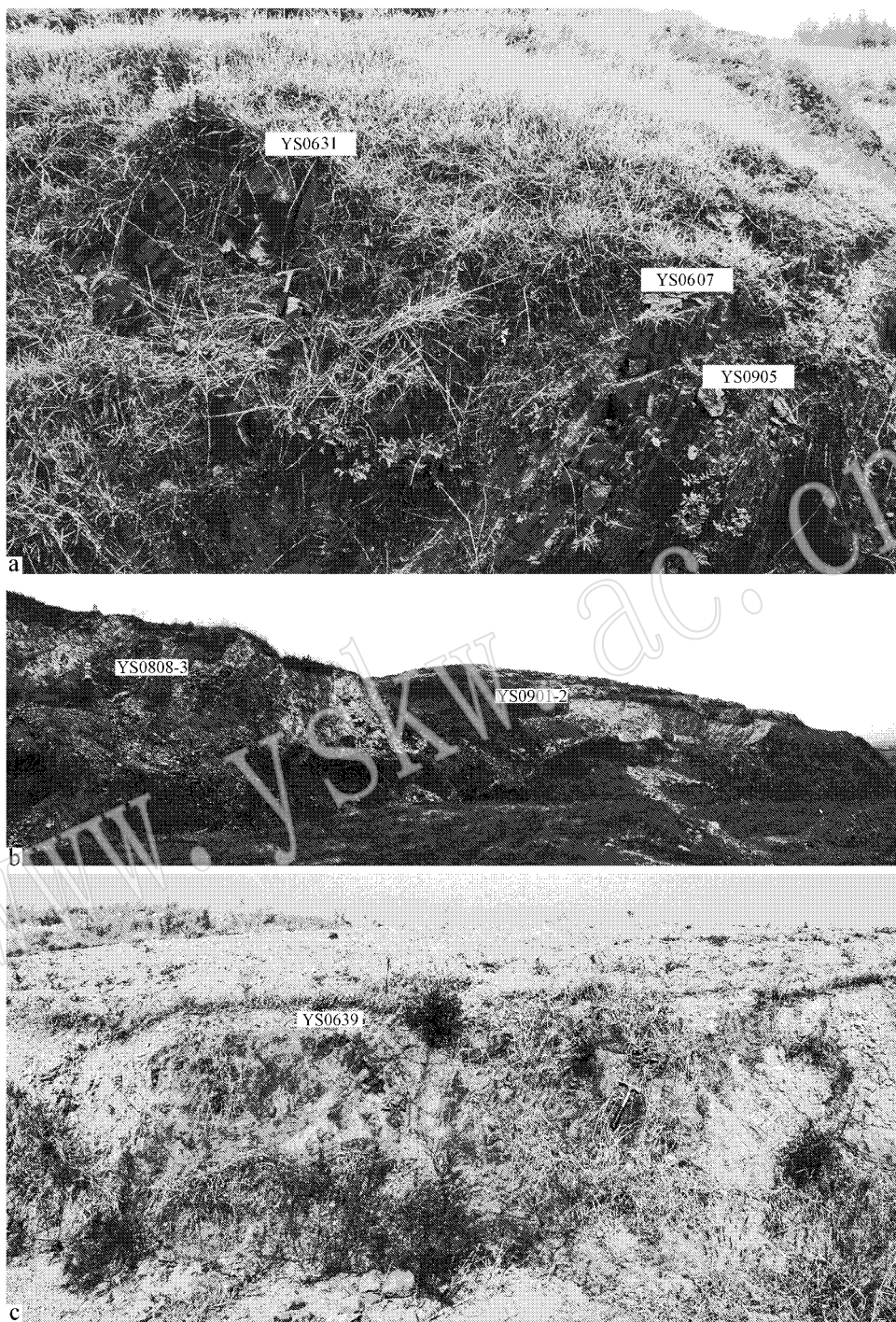


图 2 沂水杂岩中超镁铁质岩石野外产出状态

Fig. 2 Outcrop photographs of ultramafic rocks in Yishui complex

a—出露于石山官庄-冯家庄东 1 km 的含尖晶石的角闪二辉石岩；b—出露于大山-青龙峪西南的蛇纹石化角闪橄榄辉石岩；

c—出露于马山-雪山之间山梁的蛇纹石化角闪橄榄辉石岩

a—spinel-bearing amphibole websterite exposed 1 km east of Shishanguanzhuang-Fengjiazhuang；b—serpentinized amphibole-olivine pyroxenite exposed southwest of Dashan-Qinglongyu；c—serpentinized amphibole-olivine pyroxenite exposed along the topped ridge between Mashan

Mountain and Xueshan Mountain

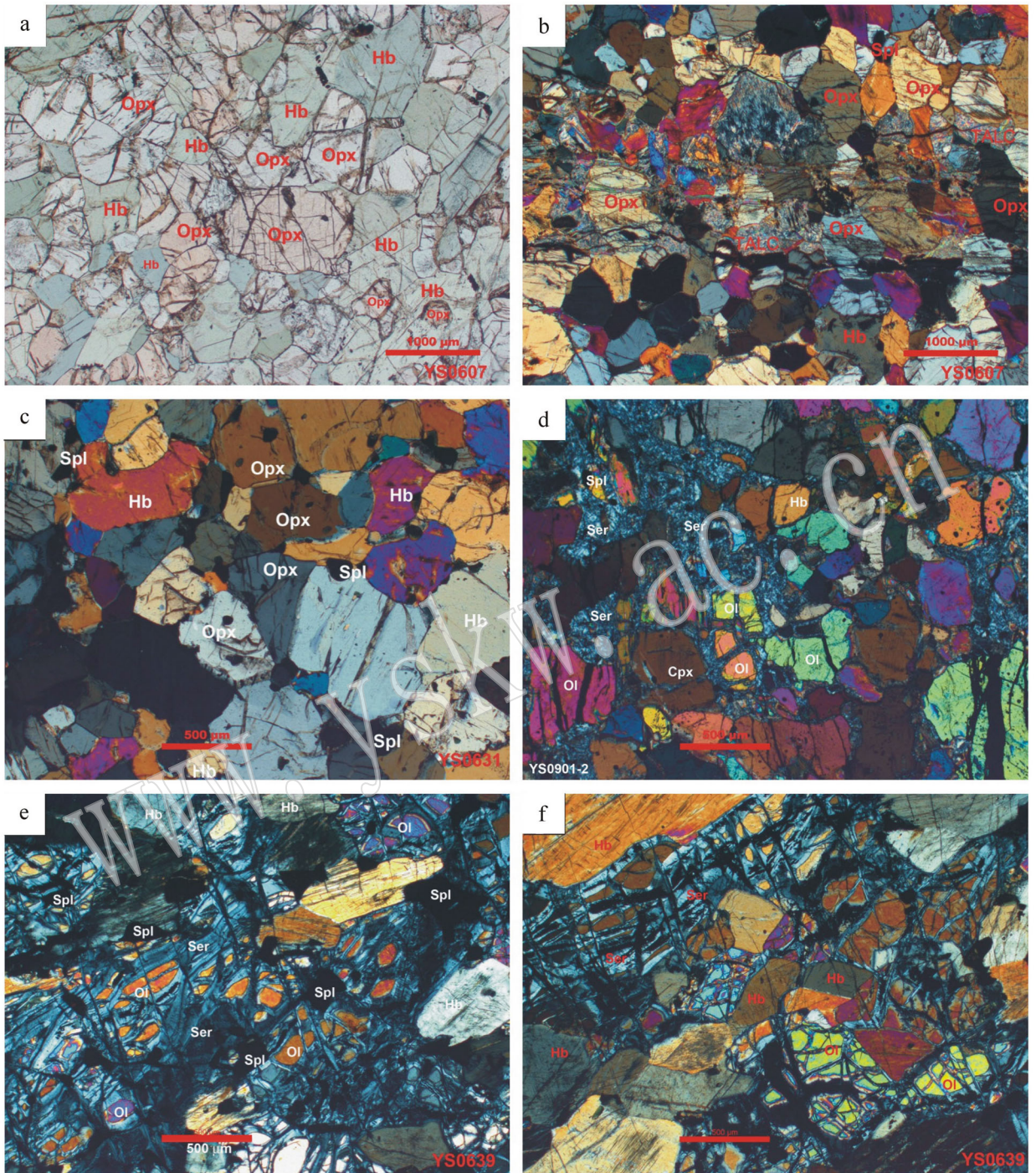


图 3 沂水杂岩中超镁铁质岩石的矿物组成结构特征

Fig. 3 Micro-textures and mineral-assemblages in ultramafic rocks from Yinshui complex

和裂隙生成,从而使橄榄石呈残晶存在。本区的角闪石比较特殊,其形态特征更像单斜辉石的低铁次透辉石,并具有明显的(浅绿色)多色性,但部分却具有角闪石的解理。值得注意的是该角闪石的氧化物组成特征为: Al_2O_3 含量 10.6%~12.78%(其中有 1

个样品中含量仅为 5.54%), FeO 含量为 4.39%~6.85%, MgO 含量为 16.95%~19.87%, CaO 含量为 11.89%~12.91%,从成分上看,应属于辉石-闪石的过渡产物,可能是辉石遭受后期变质作用改造不完全的产物。

表 1 沂水杂岩中超镁铁质岩石矿物电子探针分析结果

 $w_B/\%$

Table 1 Electron microprobe analyses of minerals in ultramafic rocks from Yishui complex

原样品号	YS0607			YS0631			YS0639				YS0808-3				
	Opx	Amph	Spl	Opx	Amph	Spl	Ol	Amph	Ser	Spl	Ol	Cpx	Amph	Spl	Ser
SiO ₂	54.12	46.23	0.01	53.56	45.18	0.02	40.19	45.75	41.36	0.03	39.11	54.17	51.40	0.06	42.73
TiO ₂	0.07	0.65	0.02	0.06	0.71	0.03	0.01	0.58	0.02	0.03	0.00	0.05	0.20	2.10	0.01
Al ₂ O ₃	2.81	11.95	56.44	3.31	12.78	55.72	0.01	10.60	0.74	55.81	0.00	0.48	5.54	6.66	0.85
Cr ₂ O ₃	0.09	0.30	5.80	0.11	0.32	5.93	0.01	0.41	0.02	6.43	0.04	0.11	0.63	23.39	0.07
FeO	10.45	5.86	18.19	11.21	6.57	20.86	13.91	6.85	3.55	19.22	16.85	2.88	4.39	63.83	3.38
MnO	0.26	0.08	0.21	0.24	0.08	0.19	0.26	0.15	0.09	0.21	0.27	0.11	0.09	0.52	0.11
MgO	31.35	17.71	17.28	30.65	16.95	15.34	45.01	17.64	37.58	17.10	42.89	16.92	19.87	2.77	36.59
CaO	0.38	12.91	0.00	0.29	12.54	0.00	0.01	11.89	0.04	0.02	0.02	24.34	12.44	0.20	0.80
Na ₂ O	0.08	1.48	0.03	0.02	1.64	0.02	0.01	1.30	0.02	0.01	0.01	0.11	0.93	0.03	0.02
K ₂ O	0.00	0.29	0.01	0.00	0.30	0.00	0.00	0.15	0.00	0.01	0.00	0.00	0.30	0.00	0.01
Total	99.60	97.46	97.99	99.44	97.07	98.11	99.41	95.32	83.41	98.86	99.18	99.18	95.79	99.56	84.58
氧原子数	6	23	4	6	23	4	4	23	14	4	4	6	23	4	14
Si ⁴⁺	1.905	6.515	0.000	1.893	6.415	0.001	1.009	6.576	4.044	0.001	0.999	1.990	7.296	0.002	4.114
Ti ⁴⁺	0.002	0.069	0.000	0.002	0.076	0.001	0.000	0.063	0.001	0.001	0.000	0.001	0.021	0.055	0.001
Al ³⁺	0.117	1.986	1.777	0.138	2.139	1.777	0.000	1.796	0.085	1.751	0.000	0.021	0.927	0.273	0.096
Cr ³⁺	0.003	0.033	0.122	0.003	0.036	0.127	0.000	0.047	0.001	0.135	0.001	0.003	0.071	0.643	0.006
Fe ³⁺	0.062	0.410	0.102	0.066	0.435	0.095	0.000	0.620		0.112	0.001	0.001	0.175	0.971	
Fe ²⁺	0.246	0.281	0.305	0.265	0.345	0.376	0.292	0.203	0.291	0.316	0.359	0.088	0.346	0.887	0.272
Mn ²⁺	0.008	0.010	0.005	0.007	0.010	0.004	0.006	0.018	0.007	0.005	0.006	0.003	0.011	0.015	0.009
Mg ²⁺	1.645	3.720	0.688	1.615	3.587	0.618	1.684	3.779	5.476	0.678	1.633	0.926	4.203	0.144	5.251
Ca ²⁺	0.014	1.950	0.000	0.011	1.908	0.000	0.000	1.831	0.005	0.001	0.001	0.958	1.892	0.007	0.083
Na ⁺	0.005	0.404	0.002	0.001	0.452	0.001	0.000	0.362	0.003	0.001	0.000	0.008	0.256	0.002	0.004
K ⁺	0.000	0.052	0.000	0.000	0.054	0.000	0.000	0.028	0.001	0.000	0.000	0.000	0.054	0.000	0.001
SUM	4.006	15.568	3.000	4.002	15.604	3.000	2.991	15.534	9.914	3.000	3.000	4.000	15.310	3.000	9.837

Ol—橄榄石；Opx—斜方辉石；Cpx—单斜辉石；Amph—角闪石；Spl—尖晶石；Ser—蛇纹石。

尖晶石存在两种成分组成：一种是富 Al-镁铁为主的尖晶石（表 1，YS0607、YS0631、YS0905、YS0805-3、YS0903），薄片呈绿-深绿色；另一种是富 Cr 低 Al、富 Fe 低 Mg 的铬尖晶石（铬铁矿，表 1），透明度很低，薄片呈黄褐色，晶粒边缘显褐色，只出现在青龙峪样品（YS0808-3、YS0901-2）中。

3.3 主要元素地球化学特征

沂水杂岩中超镁铁质岩石的岩石化学成分（表 2）显示：SiO₂ 的含量为 38.60%~49.40% 之间，MgO 的含量为 22.23%~27.49%（>20%），全铁（FeO^T）的含量为 7.68%~11.14%，CaO 的含量为 5.15%~12.86%；Al₂O₃ 的含量具有明显的差异，变化范围为 1.56%~8.94%；TiO₂ 的含量较低，为 0.11%~0.39%（<1%）；MnO 的含量较低，变化范围较小，为 0.13%~0.20%；Na₂O 的含量为 0.12%~1.03%；K₂O 的含量较低，变化范围为 0.02%~0.39%（<0.5%）；CaO/Al₂O₃ 比值可分为两组，分别为 0.61~1.36（≈1）和 7.70~8.20（≥1），两者呈

一定的负相关关系：随 CaO 的增加 Al₂O₃ 降低；MgO/FeO^T 比值为 2.00~3.33。

从表 2 还可以看出，采自青龙峪南的样品含铬铁矿的蛇纹石化橄榄辉石岩，具有比其他样品更低的 TiO₂、Al₂O₃ 和较高的 CaO 含量，CaO/Al₂O₃ 比值为 7.70~8.20，MgO/FeO^T 比值为 2.95~3.33，矿物组合以钙镁为主的透辉石+橄榄石+蛇纹石+铬铁矿为特征；相对低的 SiO₂ 和较高的 MgO 含量出现在 YS0639-2 中，以强烈的蛇纹石化为特征，矿物组合为橄榄石+单斜辉石+角闪石+蛇纹石+富铁镁的铝尖晶石。

在 Jensen（1976）的（FeO*+TiO₂）-Al₂O₃-MgO 图解中，所有样品皆投入科马提岩区，属超镁铁质岩石（图 4）。

3.4 稀土和微量元素地球化学特征

本区超镁铁质岩石的稀土元素总含量（∑REE）相对较低，含量范围为 11.45×10⁻⁶~22.63×10⁻⁶；轻重稀土元素含量比值（LREE/HREE）范围

表2 沂水杂岩中超镁铁质岩石的常量($w_B/\%$)、稀土和微量元素($w_B/10^{-6}$)分析结果Table 2 Major elements ($w_B/\%$), REE and trace elements ($w_B/10^{-6}$) content of ultramafic rocks in Yishui complex

样品编号	YS06 07	YS06 31	YS09 05	YS06 39-2	YS06 39-3	YS08 05-3	YS08 08-3	YS09 01-2	YS09 01-2s	YS09 03-1	YS09 03-2
SiO ₂	49.40	48.77	46.90	38.71	48.32	47.29	46.96	46.88	47.15	47.28	47.78
TiO ₂	0.33	0.30	0.30	0.34	0.45	0.33	0.14	0.11	0.11	0.39	0.38
Al ₂ O ₃	6.78	7.80	8.44	8.94	5.74	6.70	1.56	1.59	1.67	6.52	6.54
Fe ₂ O ₃	3.14	3.06	3.22	6.59	3.10	5.62	4.40	4.25	3.93	6.18	5.34
FeO	6.35	7.40	6.36	4.79	8.35	4.62	4.54	3.86	4.44	5.44	5.87
MnO	0.16	0.20	0.16	0.18	0.18	0.13	0.17	0.13	0.14	0.18	0.18
MgO	23.08	25.25	23.20	27.49	22.25	23.43	25.03	25.61	25.51	22.23	23.11
CaO	7.70	5.15	.08	5.49	7.78	6.67	12.79	12.59	12.86	7.08	7.41
Na ₂ O	0.92	0.57	0.78	0.52	0.82	0.57	0.25	0.20	0.12	1.03	0.75
K ₂ O	0.13	0.12	0.14	0.07	0.39	0.22	0.05	0.02	0.02	0.12	0.12
P ₂ O ₅	0.08	0.03	0.03	0.02	0.05	0.03	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04
H ₂ O ⁺	0.97	0.48	2.04	6.11	1.22	3.00	3.52	4.12	3.22	1.90	1.68
CO ₂	0.52	0.36	0.50	0.60	0.43	1.48	0.55	0.52	0.09	0.60	0.60
Total	99.58	99.47	99.12	99.82	9.08	100.09	99.97	99.89	99.28	98.98	99.80
FeO ^T	9.17	10.15	9.25	10.71	11.14	9.67	8.50	7.68	7.97	11.00	10.67
MgO/FeO ^T	2.52	2.49	2.51	2.57	2.00	2.42	2.95	3.33	3.20	2.02	2.17
CaO/Al ₂ O ₃	1.14	0.66	0.84	0.61	1.36	0.99	8.20	7.92	7.70	1.09	1.13
Y	8.82	9.205	8.52	8.81	10.40	7.91	3.49	3.58	3.78	11.50	11.10
Zr	36.64	35.05	20.98	17.1	30.00	23.00	10.50	6.17	6.80	24.40	25.30
Hf	1.06	1.09	0.67	0.555	0.98	0.73	0.32	0.29	0.45	0.84	0.85
Sc	26.12	31.45	46.66	35.2	41.70	27.40	51.60	73.30	70.80	13.70	45.10
Cr	1386	1394	2181	3817	1774	2610	3134	2879	2854	2168	2314
Co	74.34	76.05	74.48	123	75.9	89.9	94	75.9	83.1	87.4	87.3
Ni	772	875	859	1660	700	1012	506	387	390	908	932
Rb	2.46	1.79	7.39	2.405	11.5	6.55	4.38	4.11	3.84	14.2	10.8
Sr	49.06	43.8	45.95	89.85	55.6	489	28.9	34.4	37.6	233	261
Nb	1.104	1.18	0.80	0.725	1.07	1.01	0.28	0.25	0.3	1.31	1.35
Ba	51.62	10.225	23.03	20	27.5	780	21.7	16.2	20.1	25.4	25.8
Ta	0.076	0.125	0.05	0.14	0.06	0.12	0.09	0.05	0.05	0.09	0.09
Th	0.612	0.29	0.54	0.25	0.64	0.91	0.44	0.62	0.98	0.62	0.61
U	0.272	0.09	0.10	0.165	0.05	0.24	0.31	0.05	0.05	0.32	0.42
Rb/Sr	0.050	0.041	0.161	0.027	0.207	0.013	0.152	0.119	0.102	0.061	0.041
Sr/Ba	0.950	4.284	1.996	4.493	2.022	0.627	1.332	2.123	1.871	9.173	10.116
Zr/Hf	34.436	32.156	31.541	30.811	30.612	31.507	32.813	21.276	15.111	29.048	29.765
U/Th	0.444	0.310	0.191	0.660	0.078	0.264	0.705	0.081	0.051	0.516	0.689
La	3.32	3.675	2.36	1.965	3.37	4.47	1.62	2.35	2.56	2.73	2.42
Ce	6.04	6.005	4.41	2.995	5.64	5.28	3.22	4.07	4.24	5.09	4.72
Pr	0.92	0.99	0.63	0.525	1.03	1.01	0.53	0.69	0.74	0.83	0.75
Nd	3.90	4.03	2.76	2.38	4.63	4.35	2.59	2.95	3.30	3.84	3.36
Sm	1.11	1.08	0.78	0.72	1.34	1.07	0.71	0.76	0.82	1.14	1.10
Eu	0.38	0.285	0.29	0.22	0.36	0.32	0.19	0.18	0.21	0.35	0.34
Gd	1.45	1.45	1.06	1.165	1.61	1.58	0.75	0.78	0.86	1.67	1.52
Tb	0.24	0.255	0.20	0.205	0.29	0.23	0.13	0.12	0.13	0.30	0.28
Dy	1.51	1.675	1.28	1.4	1.75	1.42	0.71	0.69	0.70	1.88	1.78
Ho	0.34	0.365	0.30	0.32	0.37	0.31	0.14	0.13	0.14	0.41	0.38
Er	0.98	1.06	0.90	0.95	1.06	0.88	0.39	0.37	0.38	1.18	1.12
Tm	0.15	0.17	0.13	0.135	0.14	0.13	0.05	0.05	0.05	0.16	0.15
Yb	0.97	1.07	0.88	0.93	0.90	0.87	0.37	0.29	0.34	1.05	0.99
Lu	0.16	0.16	0.14	0.14	0.14	0.12	0.05	0.05	0.05	0.15	0.14
ΣREE	21.46	22.27	16.11	14.05	22.63	22.04	11.45	13.48	14.52	20.78	19.05
LREE/HREE	2.64	2.54	2.24	1.64	2.56	2.92	3.35	4.36	4.40	2.00	1.94
Eu/Eu*	0.93	0.70	0.98	0.73	0.75	0.75	0.79	0.71	0.76	0.78	0.80
(La/Yb) _N	2.31	2.32	1.81	1.42	2.52	3.46	2.95	5.46	5.08	1.75	1.65
(La/Sm) _N	1.88	2.14	1.92	1.72	1.58	2.63	1.44	1.95	1.96	1.51	1.38
(Tb/Yb) _N	1.11	1.05	0.98	0.97	1.42	1.17	1.55	1.82	1.69	1.26	1.25
(Ce/Yb) _N	1.62	1.45	1.29	0.83	1.62	1.57	2.25	3.63	3.23	1.25	1.23
(Ce/Sm) _N	1.31	1.34	1.37	1.00	1.02	1.19	1.09	1.29	1.25	1.08	1.04
(Eu/Yb) _N	1.13	0.76	0.94	0.67	1.14	1.05	1.46	1.76	1.76	0.95	0.98

所有样品的分析测试均在国家地质实验测试中心进行,常量分析采用X荧光光谱仪(3080E),微量和稀土分析采用等离子质谱(X-series)

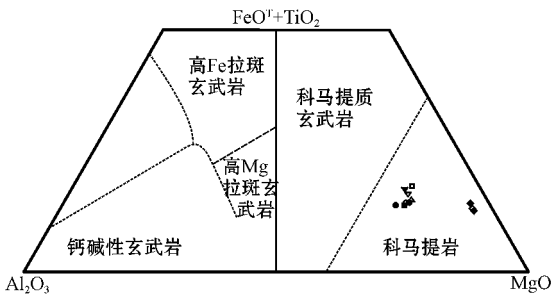


图 4 沂水杂岩中超镁铁质岩石(FeO^T+TiO₂)-Al₂O₃-MgO 图解 (Jensen, 1976)

Fig. 4 (FeO^T+TiO₂)-Al₂O₃-MgO diagram of ultramafic rocks from Yishui complex

显示两组,分别为 1.64~2.92 和 3.35~4.40。较高的 LREE/HREE 比值(3.35~4.40)出现于青龙峪的 3 个橄榄辉石岩样品中,具有明显的分异特点。稀土元素球粒陨石标准化(Boynnton, 1984)配分图解(图 5a)显示,所有样品的轻稀土元素模式特征相同,而且均显示 La 的正异常和 Eu、Ce 的负异常, Eu/Eu* = 0.70~0.93 (La/Yb)_N = 1.42~5.46 (La/Sm)_N = 1.38~2.63 (Ce/Yb)_N = 0.83~3.63 (Ce/Sm)_N = 1.00~1.37 (Eu/Yb)_N = 0.67~1.76。两种稀土元素配分模式出现于本区的超镁铁质岩石中:轻稀土元素无明显或稍显一定的分异,重稀土元素无分异,轻重稀土元素分异不明显—呈近平坦型;采自青龙峪的 3

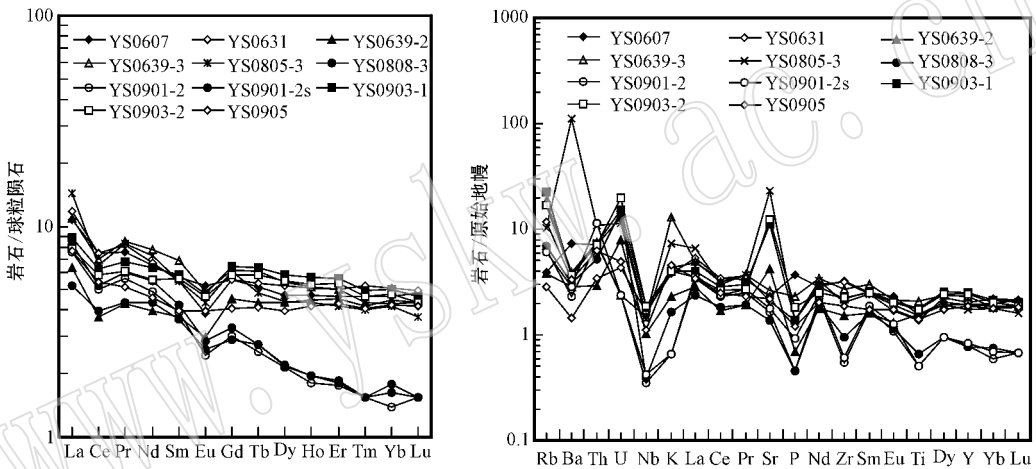


图 5 沂水杂岩超镁铁质岩石的稀土元素配分图解和微量蛛网图

Fig. 5 REE and trace elements spider diagrams of ultramafic rocks in Yishui complex

个样品重稀土元素较其他样品含量低,稀土元素模式显示轻稀土、轻重稀土、重稀土元素分异明显。这种轻稀土元素的分异可能与深熔及岩浆作用(紫苏花岗岩的形成)有关,重稀土元素分异和高的 CaO/Al₂O₃ 通常认为与富 Mg-Al 的石榴石残留相的形成有关,但目前还没有发现更深层次含有石榴石的橄榄(辉石)岩。

微量及稀土元素的原始地幔标准化(Sun & McDonough, 1989)蛛网图(图 5b)显示,该超镁铁质岩石中不相容元素 Rb、Ba、U、Nb、Sr、Zr 等具有明显不同的异常特征:Ba、Nb 呈现负异常,Zr 则大部分无异常和部分呈负异常,而 Rb、U 呈现正异常,Sr 部分无异常和部分呈正异常。其中 1 个样品的 Ba 呈现明显的正异常,可能与后期变质作用过程中的流体加入有关。

在 MgO 的协变图解(图 6)中显示,SiO₂、FeO^T、CaO、Sr、Ni 含量与 MgO 含量线性关系不明显,TiO₂、Na₂O、Zr、Ce、Rb 含量与 MgO 含量存在一定的负相关性,Cr 含量与 MgO 含量存在正相关性。

4 讨论

对于沂水杂岩中是否存在超镁铁质的科马提岩一直没有很好的结论,为此,将本区分布的超镁铁质岩石与蒙阴科马提岩、南非 Barberon 绿岩带中的科马提岩(3.5 Ga)以及加拿大 Alexo 地区科马提岩(2.7 Ga)进行了岩石地球化学特征等方面的对比,结果表明:

(1)在氧化物组成上,与上述地区的科马提岩对比,发现本区超镁铁质岩石同样都具有高的 MgO

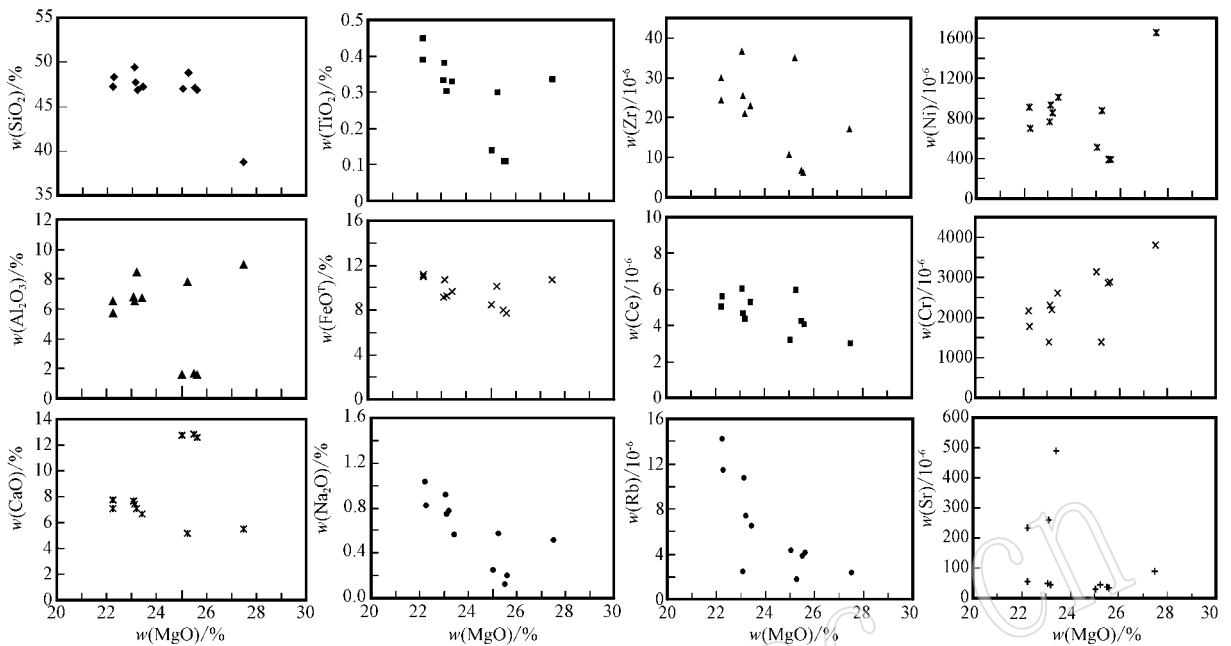


图 6 沂水杂岩超镁铁质岩石的 MgO-氧化物和微量元素协变图解

Fig. 6 MgO-oxide and trace elements covariant diagrams of ultramafic rocks in Yishui complex

含量 (>20%) 和相对低的 SiO_2 、 TiO_2 (<1%)、 K_2O (<0.5%) 含量, 多数样品 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值近于 1, 同时有 3 个橄榄辉石岩样品具有高的 CaO 含量和低的 Al_2O_3 含量, $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值为 7.70~8.20 (>1); 本区所有样品都落入 ($\text{FeO}^{\text{T}} + \text{TiO}_2$) - Al_2O_3 - MgO 图解 (图 4) 中富 Mg 的超基性科马提岩区内。

(2) 在稀土元素组成上, 与南非 Barberon 绿岩带中的科马提岩样品 B12 (3.5 Ga, Lahaye *et al.*, 1995) 加拿大 Alexo 地区科马提岩样品 M66 (2.7 Ga, Arndt, 1986b) 以及蒙阴雁翎关科马提岩 (程素华等, 2006) 的稀土元素含量相比, 本区的超镁铁质岩石稀土元素总含量略高, 所有样品均显示 Ce 和 Eu 的负异常, 而且没有出现太古宙橄榄质科马提岩常有的轻稀土元素相对于重稀土元素亏损的特点, 多数样品的重稀土元素含量与加拿大 Alexo 地区、南非 Barberton 绿岩带的科马提岩重稀土元素含量相当, 高于蒙阴雁翎关科马提岩中的重稀土元素含量, 而且轻稀土元素无明显的分异 (图 7a)。其中 3 个采自青龙峪的橄榄辉石岩样品的重稀土元素含量与蒙阴地区 (苏家沟和雁翎关) 的科马提岩相当, 但重稀土元素有明显的分异而不同于蒙阴雁翎关科马提岩 (程素华等, 2006, 图 7a)。轻稀土、轻重稀土元素的分异特征与蒙阴苏家沟科马提岩 (张荣隋等,

2001) 较为相似。这种重稀土元素的分异和高的 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值通常被认为与超镁铁质组分的熔融岩浆中石榴石残留有关。Herzbergh & Ohtani (1998) 和 Herzberg (1995) 认为高压下科马提岩的形成深度和压力分别为 180~240 km 和 6~8 GPa, 由此推断这种明显的分异现象可能与本区新太古代的深熔及岩浆作用有关。

(3) 在微量元素组成特征上, 根据 Sun & McDonough (1989) 的初始地幔标准化图解 (图 7b), 本区超镁铁质岩石中的不相容元素 Ba 和 Nb 显示负异常, Nb 较初始地幔明显亏损而不同于上述其他地区的科马提岩; Zr 和 Ti 的负异常及 Nd 和 Sm 的正异常出现在青龙峪的 3 个橄榄辉石岩样品中, 与南非 Barberon 地区的类似, 其他样品无明显异常, Zr 明显亏损特征与蒙阴苏家沟科马提岩类似 (张荣隋等, 2001), 部分样品中 Sr 呈正异常, 多数无异常; Rb 显示正异常与 Alexo、蒙阴雁翎关科马提岩相当; U 和 K (含量虽低) 却显示正异常而与 Alexo 科马提岩相似, 蒙阴雁翎关科马提岩显示 Rb、Ba、Sr、U 的正异常, 没有 Nb、Ta 亏损和 Zr、Hf 异常 (程素华等, 2006)。

(4) SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素的研究显示, 本区超镁铁质岩石中尖晶石角闪二辉石岩 (YS0631) 变质锆石定年结果为 2560~2605 Ma, 其中

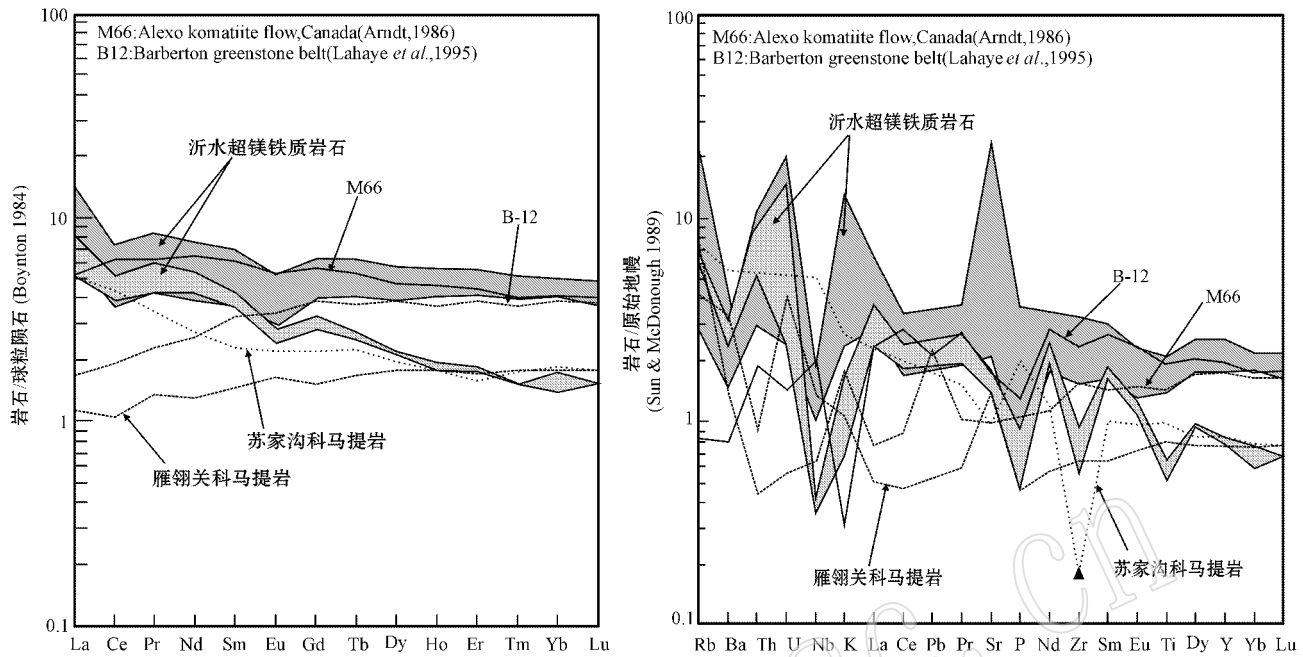


图 7 山东蒙阴科马提岩的稀土元素配分图解和微量蛛网图

Fig. 7 REE and trace elements spider diagrams of komatiites in Mengyin, Shandong Province

一颗结晶锆石的年龄为 2 719 Ma, 该样品的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 8.2, 亏损地幔模式年龄为 2 680 Ma (赵子然等, 2009a; 宋会侠等, 2009), 最新的 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年 (YS0901-2) 结果 (数据正在整理中) 显示结晶锆石年龄值为 2 701 ~ 2 611 Ma, 表明该超镁铁质岩石的形成时代应与 Alexo 科马提岩 (2.7 Ga) 的时代相当。

5 认识

综上所述, 该区沂水杂岩中的超镁铁质岩石主要具有以下几方面特征:

(1) 以捕虏体的形式与紫苏花岗岩和基性麻粒岩伴生, 有橄榄辉石岩和尖晶石(角闪)二辉石岩两种, 按组成特征尖晶石可分为(富 Al)铁镁尖晶石和(富 Cr)的铬铁矿两种;

(2) 在化学成分上具有超镁铁质科马提岩的组成特征, 但不具有鬃刺结构;

(3) 在稀土元素组成上不具有典型的轻稀土元素较重稀土元素亏损的科马提岩型配分模式, 而是其中一种无明显的轻重稀土元素分异, 另一种具有较低的重稀土元素含量, 明显的轻重稀土元素分异出现在强烈蛇纹石化的橄榄辉石岩中;

(4) 在地球化学组成特征上与上述科马提岩分布区存在一定的差异;

(5) 该超镁铁质岩石经历了后期深熔及岩浆和麻粒岩相变质作用的改造, 其成因及构造环境有待进一步的深入研究。

致谢 首先感谢国家地质实验测试中心在本文样品测试过程中给予的大力支持。笔者谨以此文献给沈其韩院士从事地质事业 70 年暨 90 华诞, 感谢他多年来对笔者的关怀、启迪与教诲, 祝他老人家幸福快乐, 身体健康!

References

Arndt N T. 1986. Komatiites: A dirty window to the Archean mantle [J]. *Terra Cognita*, 6: 59~66.

Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [A]. Hengderson P. *Rare Earth Element Geochemistry* [C]. Elsevier, 63~114.

Cheng Suhua, Li Jianghai, Chen Zheng, et al. 2006. Geochemical characteristics of the komatiites in Mengyin, Shandong Province, and their implication [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(2): 119~126 (in Chinese with English abstract).

Herzberg C. 1995. Generation of plume magmas through time: an experimental perspective [J]. *Chemical Geology*, 126: 1~17.

- Herzberg C and Ohtani E. 1998. Origin of komatiite at high pressure [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 88 : 321~329.
- Jensen L S. 1976. A New Cation Plot for Classifying Subalkalic Volcanic Rocks [M]. Ontario DIV. Mines Misc. , 66.
- Lahaye Y , Arndt N T , Byerly G , *et al.* 1995. The influence of alteration on the trace-element and Nd isotope composition of komatiites [J]. *Chemical Geology* , 126 : 43~64.
- Shen Kun , Shen Qihan , Xu Huifen , *et al.* 1998. Metamorphic fluids related to anatexis in Gongdanshan block , Yishui County , Shandong Province [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica* , 17(3) : 193~205 (in Chinese with English abstract).
- Shen Qihan , Shen Kun , Geng Yuansheng , *et al.* 2000. Geological Evolution and Composition of Yishui Complex , Shandong [M]. Beijing : Geological Publishing House (in Chinese).
- Shen Qihan , Song Biao , Xu Huifen , *et al.* 2004. Emplacement and metamorphism ages of the Caiyu and Dashan igneous bodies , Yishui County , Shandong Province : zircon SHRIMP chronology [J]. *Geological Review* , 50(3) : 275~284 (in Chinese).
- Shen Qihan , Xu huifen , Shen Kun , *et al.* 1997. Study on chronology for Xueshan and Linjiaguangzhuang bodies in Yishui , Shandong Province [J]. *Geology Sciences* , 32(3) : 291~298 (in Chinese).
- Shen Qihan , Zhang Zongqing and Xu Huifen. 1993. The Sm-Nd isochron age of metabasites in the Yishui Complex , Shandong Province , and its geological significance [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica* , 12(4) : 289~296 (in Chinese).
- Shen Qihan , Zhao Ziran , Song Biao , *et al.* 2007. Geology , Petrochemistry and SHRIMP Zircon U-Pb Dating of the Mashan and Xueshan Granitoids in Yishui County , Shandong Province [J]. *Geological Review* , 53(2) : 180~186 (in Chinese).
- Simonen A. 1953. Stratigraphy and sedimentation of the Svecofennidic , early Archean supracrustal rocks in southwestern Finland [J]. *Bull. Comm. Geol. Finland* , 160 : 1~64.
- Song Huixia , Zhao Ziran , Shen Qihan , *et al.* 2009. Researchment of petrochemistry and hafnium isotope in Yishui Complex , Shandong Province [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 8 : 1 872~1 882 (in Chinese).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts : implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Norry M Y. *Magmatism in Ocean Basins* [C]. *Geol. Soc. London Spec. Publ.* , 42 : 313~345.
- Zhang Rongsui , Tang Haosheng , Kong Lingguang , *et al.* 2001. Characteristics and significance of the Sujiagou komatiite at Mengyin , Shandong [J]. *Regional Geology of China* , 20(3) : 236~244 (in Chinese).
- Zhao Ziran , Song Huixia , Shen Qihan , *et al.* 2008. Geological and geochemical characteristics and SHRIMP U-Pb zircon dating of the Yinglingshan granite and its xenoliths in Yishui County , Shandong , China [J]. *Geological Bulletin of China* , 27(9) : 1 551~1 558 (in Chinese).
- Zhao Ziran , Song Huixia , Shen Qihan , *et al.* 2009a. The petro-geochemical characters and SHRIMP U-Pb zircon ages of meta- mafic rocks from the Yishui Complex , in Yishui County , Shandong Province [J]. *Geological Review* , 55(2) : 286~299 (in Chinese).
- Zhao Ziran , Song Huixia , Shen Qihan , *et al.* 2009b. Geochemistry and age of a metapelite rock in the Yishui complex , Shandong Province [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 8 : 1 863~1 871 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 程素华 李江海 陈 征 等. 2006. 山东蒙阴科马提岩地球化学特征及其意义 [J]. *岩石矿物学杂志* , 25(2) : 119~126.
- 沈 昆 沈其韩 徐惠芬 等. 1998. 山东省沂水汞丹山地块与深熔作用有关的变质流体 [J]. *岩石矿物学杂志* , 17(3) : 193~205.
- 沈其韩 沈 昆 耿元生 等. 2000. 山东沂水杂岩的组成与地质演化 [M]. 北京 : 地质出版社.
- 沈其韩 宋 彪 徐惠芬 等. 2004. 山东沂水太古宙蔡峪和大山岩体 SHRIMP 锆石年代学 [J]. *地质论评* , 50(3) : 275~284.
- 沈其韩 徐惠芬 沈 昆 等. 1997. 山东沂水雪山岩体和林家官庄岩体的同位素年代学 [J]. *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 [J]. *岩石矿物学杂志* , 12(4) : 289~296.
- 沈其韩 赵子然 宋 彪 等. 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 [J]. *地质论评* , 53(2) : 180~186.
- 宋会侠 赵子然 沈其韩 等. 2009. 山东沂水杂岩岩石化学及 Hf 同位素研究 [J]. *岩石学报* , 8 : 1 872~1 882.
- 张荣隋 唐好生 孔令广 等. 2001. 山东蒙阴蒙阴县苏家沟科马提岩的特征及其意义 [J]. *中国区域地质* , 20(3) : 236~244.
- 赵子然 宋会侠 沈其韩 等. 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 [J]. *地质通报* , 27(9) : 1 551~1 558.
- 赵子然 宋会侠 沈其韩 等. 2009a. 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 [J]. *地质论评* , 55(2) : 286~299.
- 赵子然 宋会侠 沈其韩 等. 2009b. 沂水杂岩中变泥沙质岩石的岩石化学特征及年代 [J]. *岩石学报* , 8 : 1 863~1 871.