

华北地块东南缘中生代侵入杂岩中所含榴辉岩类包体矿物微量元素地球化学特征及其意义*

王清海¹ 许文良² 杨德彬² 裴福萍²

WANG QingHai¹, XU WenLiang², YANG DeBin² and PEI FuPing²

1. 吉林大学 东北亚国际地质研究与教学中心, 长春 130026

2. 吉林大学 地球科学学院, 长春 130061

1. International Centre for Geoscience Research and Education in Northeast Asia, Jilin University, Changchun 130026, China

2. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

2009-07-25 收稿, 2011-01-06 改回.

Wang QH, Xu WL, Yang DB and Pei FP. 2011. Geochemical characteristics for trace element of mineral in eclogite inclusions separated out of Mesozoic intrusive complex from southeastern margin of North China Block and its significances. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4):1131–1150

Abstract The test results of minerals in eclogite inclusions separated out of Mesozoic intrusive complex from southeastern margin of North China indicate that the distribution of element between minerals in eclogite inclusions got up to chemical equilibrium at eclogite facies metamorphic stage. The major element components, such as Al, Fe and Mn in garnet; Na, Mg and Ca in clinopyroxenes; Na, Mg and Fe in amphiboles, appear strong positive correlation with its total rock and restricted by the composition of its total rock. Garnets are markedly enriched with HREE, and depleted LREE, whereas clinopyroxene are relatively enriched with LREE and MREE, and depleted HREE. The content of LREE and HREE in garnets and clinopyroxenes emerge complementary relation with mutual growth and decline. Garnets enriched with Y, while clinopyroxenes enriched with Sr, both have higher Ga and transition group element (Sc, Ti, V, Cr, Co, etc.), respectively, and controlled by the composition of its total rock. Rutiles have anything of REE and lowest Rb, Sr and Ba, while have higher Fe, Al, Mg, Ca, Mn, Nb, Ta, Cr and Zr, and the components of some trace elements (e.g. Nb, Cr, Fe, V, W, etc.) inherited the original matter which dominant are mafic rock. Some protogene amphiboles are similar clinopyroxenes and retrogressive amphiboles are similar garnets on chondrite-normalized REE patterns. Transition group element content in amphiboles are interdependency with garnets, clinopyroxenes and total rock. The amphiboles have better capability for admission with Na, K, Sr, Rb, Ba, etc, and its content influence by garnets, clinopyroxenes and total rock. Some high electrovalency element or/and high field strength element and HREE emerge the decrease and increase between eclogite inclusions and its host Mesozoic intrusive complex. The eclogite could be resulted from the subduction-collision action between the Yangtze Block and the North China Block.

Key words Mineral; Trace element; Geochemical; Eclogite inclusions; Xuzhou-Huaibei area; North China Block

摘要 华北地块东南缘中生代侵入杂岩中所含榴辉岩类包体中矿物的分析结果表明, 组成榴辉岩类包体的各矿物之间元素的分配在榴辉岩相变质阶段已经达到了化学平衡; 石榴石中 Al、Fe、Mn, 单斜辉石中 Na、Mg、Ca, 角闪石中 Na、Mg、Fe 等主量元素含量与其全岩之间均呈良好的正相关, 受全岩成分制约; 石榴石明显富集 HREE、贫 LREE, 单斜辉石相对富集 LREE、MREE、贫 HREE, 两者轻、重稀土含量呈相互消长的互补关系, 石榴石和单斜辉石中分别富集 Y、Sr, Ga 和过渡族元素 Sc、Ti、V、Cr、Co 等含量较高, 其含量受全岩成分控制; 金红石中稀土元素的含量很少, Fe、Al、Mg、Ca、Mn、Nb、Ta、Cr 和 Zr 含量相对较高, Rb、Sr、Ba 含量极低, 部分微量元素(如 Nb、Cr、Fe、V、W 等)含量与其原岩有继承和对应关系; 部分原生或/和退变角闪石的 REE 配分模式分别与单斜辉石和石榴石相似, 过渡族金属元素等的含量与石榴石、单斜辉石和全岩具有一定的相关性, 角闪石容纳 Na、K、Sr、Rb、Ba 等元素的能力较强, 其成分除受全岩成分的制约外, 石榴石、单斜辉石对其形成也有影

* 本文受国家自然科学基金项目(40772037, 90814003)资助。

第一作者简介: 王清海, 男, 1962 年生, 博士, 副教授, 从事火成岩成因和岩石圈动力学研究, E-mail: wqh@jlu.edu.cn

响。榴辉岩类包体与其寄主中生代侵入杂岩中部分高价态/高场强元素(HFSE)和重稀土元素(HREE)呈相互消长的关系。榴辉岩的形成与扬子地块和华北地块之间的俯冲-碰撞作用有关。

关键词 矿物;微量元素;地球化学;榴辉岩类包体;徐淮地区;华北地块

中图法分类号 P588.348;P595

1 引言

华北地块因其独特的地质构造和自古生代至更新世强烈的岩浆活动、广泛出露的火成岩及其所含丰富的深源岩石包体,已成为研究大陆岩石圈形成与演化及其深部作用过程的一个重要的天然实验室(路凤香等,1996;路凤香和郑建平,2000;郑建平,1999;Fan *et al.*, 2000;Fan and Menzies, 1992;Griffin *et al.*, 1998;Menzies *et al.*, 1998;Menzies and Xu, 1993;Xu X *et al.*, 2000;Xu YG *et al.*, 2002;Zhang M *et al.*, 2000;Gao *et al.*, 2004)。火成岩及其所含的深源岩石包体保存了深部岩石圈的物理和化学信息,其所具有的岩石地球化学特征反映了岩石形成过程中所经历的各种地质作用。由于受分析手段的限制,以往对深源包体的宏观岩石学及其整体成分的地球化学特征进行的研究,虽然可以有效地限制深部岩石圈的组成特征(Jochum *et al.*, 1989),但整体成分的平均效应掩盖了其组成矿物中微量元素空间变化的细节(Griffin *et al.*, 1999)。近年来,借助于能够显示矿物内部复杂化学分区的成像技术和高分辨率、高精度的微区原位测试技术的进步以及地质研究程度的提高,越来越多的工作专注于确定组成深源包体的矿物中微量元素的地球化学特征研究(Maruyama and Liou, 1998;Green, 2000;Hermann and Green, 2001;Hermann, 2002;Tsujiomore *et al.*, 2006;石超等, 2007;Zhang ZM *et al.*, 2006a, b;徐珏等, 2004;陈振宇等, 2006;王汝成等, 2005, 2006;余金杰等, 2006a, b;宗克清等, 2006;Norman *et al.*, 1998;Norman, 2001;Gregory and Kamenetsky, 2000;Barth *et al.*, 2002;Zhang RY *et al.*, 2009),这些研究对认识深部岩石圈的岩石学结构、热状态、化学组成、壳-幔交换作用及演化、岩石圈减薄、地幔熔融和交代作用等地球动力学过程具有重要意义。

本文在前人对徐淮地区的构造属性、中生代侵入杂岩及其中的深源包体较深入研究的基础上(王桂梁等,1998;许文良等,2003,2004;Xu WL *et al.*, 2002, 2004a, b, 2006;王清海等,2003,2004,2005;纪伟强等,2005),进一步探讨了研究区侵入杂岩中所含的榴辉岩类深源包体的组成矿物中微量元素的地球化学特征,这为认识大陆板块深俯冲过程中的微量元素化学行为、分布特征,及其所指示的地球动力学机制提供了重要依据。

2 区域地质概况

研究区位于华北地块东南缘,东距郯庐断裂带约

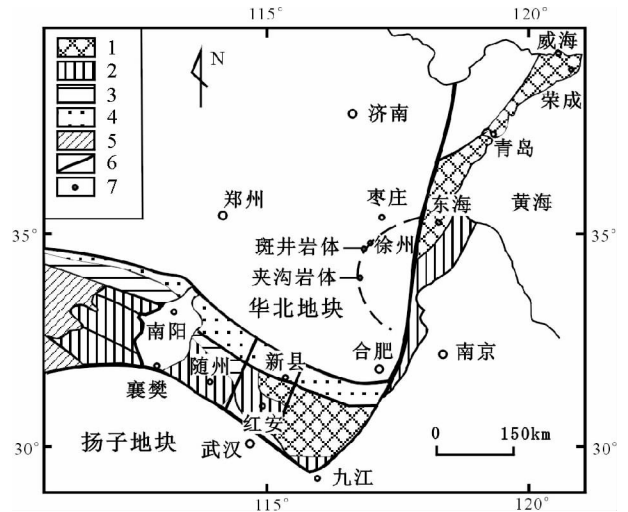


图1 徐淮地区中生代侵入杂岩体分布图

1-高温(超)高压变质带;2-低温高压变质带;3-秦岭-桐柏深变质杂岩;4-北淮阳浅变质杂岩;5-古生界;6-断层;7-中生代侵入杂岩体

Fig. 1 Distribution map of Mesozoic intrusive complex in Xuzhou-Huainan area, China

1-High temperature-(ultra) high pressure metamorphic belt; 2-Low temperature-high pressure metamorphic belt; 3-Qinling-Tongbai hypometamorphic complex; 4-Northern Huaiyang epimetamorphic complex; 5-Paleozoic orogenic belt; 6-Fault; 7-Mesozoic intrusive complex

100km,南距大别造山带约300km。区内存在的晚元古代(震旦纪)和古生代地层均遭受了褶皱变形,它们构成了徐州-宿州弧形构造带(王桂梁等,1998),该构造带夹于北部丰沛-兰陵隆起与南部西阳集隆起之间。区内存在许多中生代侵入杂岩体,岩体侵位于已经褶皱变形的古生代地层中,受徐州-宿州弧形构造带及EW和NW向断裂构造控制(图1)。

侵入杂岩体中斑井岩体位于徐州西南约15km处,出露面积为3.9km²,岩体受NW走向的张性断裂控制,并呈岩株状侵位于徐州-宿州弧形构造带寒武纪地层中。主要由闪长岩和闪长玢岩组成,闪长岩和闪长玢岩中锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年结果均为127Ma(未发表资料)。夹沟岩体位于徐州西南约38km处,出露面积约为1.8km²,岩体受NW走向的张性断裂所控制,呈岩株状侵位于已经褶皱变形的寒武纪和奥陶纪地层中。由二长闪长斑岩组成,其锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果为132±4Ma(Xu WL *et al.*, 2004a)。两岩体中均含有数量较多的榴辉岩类(包括榴辉岩和石榴辉石岩)等深源包体。

3 榴辉岩类包体的岩相学

3.1 样品描述

榴辉岩类包体呈浑圆状产出, 大者可达 $8 \times 10\text{cm}$, 小的仅为 $0.5 \times 1.0\text{cm}$ 。在包体与寄主岩之间的包体一侧形成了一个窄的 ($1 \sim 2\text{mm}$) 蚀变边, 以黄绿-暗绿色角闪石的形成为特征, 且只分布在包体的边缘。这种蚀变边是在榴辉岩类岩石被寄主岩浆捕获时, 因岩浆的热作用造成的烘烤接触变质所致, 暗示深源包体是在其发生角闪岩相退化变质之后被寄主岩浆捕获的。构成榴辉岩类包体的主要岩石类型有榴辉岩和石榴辉石岩。榴辉岩包体的全岩-Sm-Nd 等时线年龄为 219Ma (Xu WL *et al.*, 2002), 锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果为 $206 \pm 15\text{Ma}$ (许文良等, 2004)。

3.2 榴辉岩类包体的矿物组合及赋存状态

榴辉岩 呈中粗粒粒状变晶结构, 块状构造。矿物组合为石榴石 + 单斜辉石 + 石英 + 金红石。部分包体中可见到黄褐色原生角闪石 (图 2a, c)。在单斜辉石和石榴石的边缘或粒间可见到绿色的退变角闪石 (图 2b, c)。石榴石碎裂较严重, 部分石榴石的边部可以见到由退变的角闪石和斜长石组成的后合成晶 (图 2e); 单斜辉石的核部往往有定向石英针的出溶现象 (图 2d); 石英分布于粒间, 个别包裹于石榴石之中 (图 2a, c); 金红石则出现楣石冠状反应边 (图 2b, c)。榴辉岩类岩石在峰期变质作用之后会程度不等地发生退变质作用, 楣石是榴辉岩中金红石的退变质产物, 即金红石退变为楣石, 楣石在金红石颗粒边部呈环状分布。楣石边的宽度受金红石的赋存状态、嵌布特征及遭受退变质作用程度强弱的影响。

石榴辉石岩 是榴辉岩类包体的主体, 与榴辉岩的区别在于单斜辉石中较低的硬玉分子含量。主要矿物组合为石榴石 + 单斜辉石 + 金红石, 三者平衡共生。单斜辉石中或粒间有石榴石、黝帘石和角闪石的出溶 (图 2g, h), 个别单斜辉石包裹于石榴石之中 (图 2f)。包体普遍发育角闪石 + 斜长石 + 石英退化变质矿物组合。楣石主要由金红石退变产生。个别样品中可见到尖晶石和钛铁矿 (Xu WL *et al.*, 2002; 王清海等, 2002, 2003; 王清海, 2003)。

榴辉岩类包体中的金红石大多数呈椭圆状, 部分具拉长现象, 少数为棱角状, 粒径大小不一。根据金红石的赋存状态和嵌布特征可将金红石划分为 2 种类型, 即粒间金红石和包体金红石, 其中粒间金红石分布于石榴石、单斜辉石或黄褐色原生角闪石颗粒之间 (图 2a, b), 少量金红石颗粒呈镶嵌状嵌布于石榴石的边部 (图 2c), 部分金红石周围发育冠状楣石反应边 (图 2b, c), 矿物的共生关系显示金红石与石榴石或单斜辉石等为同时形成; 包体金红石呈包体产于石榴石或单斜辉石晶体中, 多为稀疏分布的单体晶, 少量成群分布 (图 2f), 其生成早于石榴石或单斜辉石。

4 样品和分析方法

本研究的 19 个榴辉岩类包体样品采自于研究区斑岩 (样品编号为 603 或 B) 和夹沟 (样品编号为 J 或 JG) 两侵入杂岩体中。选择包体中的 87 个单矿物颗粒进行微量元素测定, 共测定 132 个点。其中选取石榴石 18 粒, 对 15 粒的核部和边部分别进行了测定, 1 粒的核部和边部分别测定了 2 次, 2 粒只测定了核部, 共 36 个测点; 选取单斜辉石 20 粒, 对 14 粒的核部和边部分别进行了测定, 2 粒的核部测定了 1 次、边部测定了 2 次, 3 粒只测定了核部, 1 粒只测定了边部, 共 38 个测点; 选取金红石 40 粒, 对 4 粒的核部和边部分别进行了测定, 其余 36 粒只测定了核部, 共 44 个测点; 选取角闪石 7 粒, 对 1 粒的核部和边部分别进行了测定 (原生角闪石), 1 粒的幔部测定了 2 次 (原生角闪石), 1 粒的边部测定了 2 次, 1 粒的核部测定了 1 次、幔部测定 1 次、边部测定 1 次 (原生角闪石), 3 粒只测定了核部 (其中 1 粒原生角闪石), 共 12 个测点; 选取石英 2 粒, 只测定了核部, 2 个测点。测试结果分析表明, 石榴石 11 个测点, 单斜辉石 15 测点, 金红石 21 个测点, 角闪石 3 个测点的结果不准确或误差较大, 石英 2 个测点本文暂不讨论, 其余 80 个测点的测试结果均在检测的误差范围内 (表 1、表 2、表 3、表 4)。

单矿物中微量元素分析在中国地质大学 (武汉) 地质过程与矿产资源国家重点实验室完成, 采用激光探针 (LA-ICP-MS), 用标准测定程序条件进行微量元素原位测定。仪器为 Agilent7500a 型 ICPMS, 激光剥蚀系统为德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas2005。等离子体功率: 1350W ; 激光波长: 193nm ; 激光频率: 10Hz ; 激光能量: 90mJ ; 测定过程中激光束斑直径为 $24\mu\text{m}$ 。使用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST610 作为外标进行仪器的最佳化, 使仪器达到最高的灵敏度、最小的氧化物产量、最低的背景值和稳定的信号。石榴石、单斜辉石、角闪石以 Ca 作内标, 金红石以 Ti 作内标, 石英以 Si 作内标; 所测单点的元素含量采用 GLITTER (ver. 4.0 Macquarie University) 程序进行计算。参照美国地调局玄武岩玻璃标准物 BCR-2G 和 BHVO-2G, 其分析误差小于 7% 。

5 矿物中微量元素地球化学特征

5.1 石榴石

研究区榴辉岩类包体中石榴石以铁铝榴石 (Alm)、镁铝榴石 (Pyr) 和钙铝榴石 (Gro) 为主, 其端元分子分别为: $\text{Py}_{\text{r}20-43}\text{Alm}_{34-60}\text{Gro}_{15-23}$, 锰铝榴石 (Spe) 分子一般小于 $2\text{mol}\%$, 成分为 B 类或/和 C 类榴辉岩中石榴石 (Coleman *et al.*, 1965; 王清海, 2003)。

石榴石颗粒内部成分剖面可以反映主量元素 (主要为 Mn、Mg、Ca、Al、Fe 等) 从核部到边部的变化情况, 如形成成

表1 徐淮地区中生代侵入杂岩中榴辉岩类包体所含矿物石榴石成分分析结果($\times 10^{-6}$)Table 1 Result of garnet compositions in eclogite inclusions separated out of Mesozoic intrusive complex from Xuzhou-HuaiBei area ($\times 10^{-6}$)

样品号	603-2-1		603-2-2		B1-10		B1-9		J3-52		J3-65		JG1-26		JG1-46		JG1-8	
	2. 2c	3. 2c	2. 1r	2. 2c	4. 2c	4. 2c	2. 1c	2. 2r	1. 1c	1. 2r	2. 1c	2. 1c	2. 2r					
Na	89.67	124.05	114.07	110.98	134.27	64.65	69.42	77.91	108.95	92.68	74.61	52.78	83.04					
Mg	27013	40344	54564	56523	40779	41481	40010	39193	41959	36573	35641	34873	34735					
Al	88620	90140	96241	96847	100221	93828	95145	95076	89736	87017	90110	95785	95011					
Si	178749	176038	185433	188612	183190	178889	186041	186041	183797	183236	180104	180104	180011					
P	76.78	88.95	71.91	74.13	80.96	63.86	40.5	41.37	104.48	75.9	62.7	26.45	44.87					
K	2.48	2.29	2.06	2.31	2.4	2.07	2.2	2.17	2.58	2.12	2.14	2.25	2.11					
Ca	48929	53838	45655	46416	51826	37142	39581	40713	32043	38575	35068	41834	40058					
Sc	61.81	51.03	39.23	40.68	33.21	51.11	55.31	52.99	40.26	34.8	47.99	60.21	53.33					
Ti	428	218	163	163	886	513	462	399	347	214	387	544	509					
V	231	105.62	71.6	72.11	148.28	155.22	167.03	163.28	129.24	116.51	296.01	215.85	231.52					
Cr	207.62	297.13	332.32	349.97	135.43	114.61	181.21	180.09	126.27	118.46	144.08	40.28	58.34					
Mn	6408	2947	2431	2480	2666	3295	4248	4377	3022	2740	3375	3311	3342					
Fe	173518	142869	120855	125894	151586	158508	164746	168218	174262	153544	172196	164514	165399					
Co	73.76	63.68	70.3	75.88	51.48	61.75	52.04	50.87	49.6	40.95	42.8	64.56	65.78					
Ni	2.29	3.11	10.94	12.76	1.99	1.19	0.78	0.44	0.47	0.41	0.99	1.3	0.74					
Cu	0.20	0.35	0.22	0.29	0.20	0.22	0.15	0.19	0.29	0.40	0.22	0.22	0.18					
Zn	117.27	107.13	65.18	72.74	125.56	90.26	74.57	75.24	122.91	112.44	128.16	83.83	85.74					
Ga	10.90	9.99	7.61	8.28	15.62	9.60	8.67	8.34	15.59	15.77	13.73	10.97	11.05					
Rb	0.07	0.06	0.05	0.06	0.05	0.05	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05					
Sr	0.06	0.19	0.07	0.05	0.05	0.02	0.03	0.05	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03					
Y	51.74	31.65	25.40	27.93	28.06	34.84	38.59	46.68	34.47	26.30	49.03	22.27	21.29					
Zr	9.52	3.31	3.15	3.85	6.15	15.66	16.31	13.40	11.06	1.67	7.87	6.07	7.26					
Nb	0.026	0.015	0.021	0.018	0.459	0.023	0.015	0.013	0.017	0.018	0.019	0.021	0.013					
Mo	0.104	0.112	0.080	0.097	0.083	0.092	0.151	0.105	0.060	0.074	0.132	0.101	0.128					
Sn	0.880	0.934	0.740	0.480	0.440	0.320	0.890	0.550	0.700	0.822	0.737	0.890	0.540					
Cs	0.021	0.027	0.021	0.027	0.027	0.019	0.023	0.027	0.020	0.013	0.020	0.023	0.020					
Ba	0.146	0.104	0.105	0.057	0.062	0.091	0.140	0.061	0.067	0.054	0.092	0.100	0.139					
La	0.006	0.010	0.009	0.011	0.017	0.017	0.013	0.010	0.018	0.007	0.023	0.013	0.081					
Ce	0.034	0.062	0.042	0.042	0.088	0.017	0.015	0.046	0.014	0.017	0.032	0.012	0.163					
Pr	0.061	0.051	0.035	0.033	0.018	0.037	0.021	0.023	0.011	0.012	0.010	0.013	0.017					
Nd	1.217	0.958	0.655	0.811	0.298	1.112	0.675	0.489	0.564	0.123	0.173	0.065	0.101					
Sm	1.920	1.622	1.199	1.360	0.479	1.422	1.414	1.154	2.610	0.652	0.806	0.310	0.274					
Eu	0.953	0.880	0.748	0.699	0.369	0.785	0.721	0.662	0.825	0.310	0.388	0.222	0.156					
Gd	4.350	3.510	2.550	2.760	1.760	3.660	3.810	4.120	4.990	2.270	3.530	1.364	1.354					
Tb	1.058	0.776	0.570	0.615	0.512	0.812	1.012	1.026	0.896	0.638	0.855	0.414	0.342					
Dy	8.580	5.370	4.360	4.300	4.460	6.220	7.430	8.070	6.040	4.720	7.450	3.340	3.060					
Ho	2.010	1.201	0.953	1.077	1.183	1.441	1.479	1.773	1.433	1.100	1.869	0.850	0.820					
Er	5.940	3.190	2.920	3.100	3.480	3.800	3.970	4.980	3.900	2.960	5.830	2.660	2.810					
Tm	0.853	0.536	0.419	0.454	0.487	0.599	0.602	0.736	0.579	0.406	0.872	0.377	0.443					
Yb	6.670	4.100	3.510	3.880	3.680	3.840	3.870	5.170	3.930	3.100	7.030	3.260	3.070					
Lu	1.005	0.561	0.509	0.605	0.523	0.599	0.566	0.700	0.591	0.446	0.972	0.483	0.452					
Hf	0.071	0.055	0.045	0.057	0.082	0.170	0.100	0.167	0.273	0.073	0.174	0.063	0.151					
Ta	0.010	0.006	0.008	0.009	0.008	0.002	0.009	0.005	0.007	0.006	0.006	0.008	0.009					
W	0.046	0.048	0.050	0.049	0.048	0.034	0.040	0.030	0.039	0.039	0.039	0.034	0.030					
Pb	0.045	0.138	0.038	0.044	0.039	0.031	0.035	0.030	0.037	0.033	0.030	0.077	1.660					
Th	0.010	0.011	0.012	0.014	0.010	0.008	0.011	0.010	0.010	0.017	0.022	0.015	0.010					
U	0.010	3.890	0.011	0.008	0.407	0.003	0.023	0.009	0.099	0.032	0.002	0.011	0.059					
ΣREE	34.66	22.83	18.48	19.75	17.35	24.36	25.60	28.96	26.40	16.76	29.84	13.38	13.14					
ΣLREE	4.19	3.58	2.69	2.96	1.27	3.39	2.86	2.38	4.04	1.12	1.43	0.64	0.79					
ΣHREE	30.47	19.24	15.79	16.79	16.09	20.97	22.74	26.58	22.36	15.64	28.41	12.75	12.35					
Mg [#]	26.36	39.36	50.93	50.79	38.21	37.56	35.83	34.88	35.63	35.38	32.24	32.76	32.56					
(La/Yb) _N	0.0006	0.0017	0.0017	0.0019	0.0032	0.0030	0.0023	0.0014	0.0030	0.0015	0.0022	0.0028	0.0177					
Eu/Eu*	0.97	1.09	1.27	1.08	1.09	1.00	0.89	0.83	0.69	0.70	0.59	0.88	0.64					
Y/Yb	7.76	7.72	7.24	7.20	7.63	9.07	9.97	9.03	8.77	8.48	6.97	6.83	6.93					

续表 1

Continued Table 1

样品号	JG2-10		JG2-11		JG2-18			JG2-20	JG2-2	JG5-34	JG5-58	
	3. 1r	3. 2c	1. 1r	1. 2c	1. 1c	1. 3r	2. 1c	3. 2r	3. 1r	3. 1c	3. 2c	4. 2r
Na	106. 93	104. 58	47. 56	47. 14	96. 5	100. 88	49. 13	156. 48	143. 73	69. 3	215. 86	137. 71
Mg	42881	46631	47866	49116	35566	35914	26592	35351	26342	18058	17983	14389
Al	97641	97533	98197	97737	99406	101413	94786	96562	93838	94813	99838	99666
Si	183937	183937	186742	186742	191229	194595	185246	191229	182442	180712	180806	180806
P	147. 77	149. 43	72. 81	74. 59	25. 9	49. 47	14. 01	71. 41	73. 85	8. 76	21. 29	15. 2
K	6. 43	2. 63	2. 52	2. 53	2. 26	2. 17	2. 08	2. 05	2. 43	2. 3	3. 88	3. 47
Ca	41167	37933	37127	39840	88213	94143	101474	36396	46789	116516	92322	112502
Sc	39. 69	44. 3	52. 47	50. 27	20. 2	20. 75	12. 9	35. 87	34. 32	21. 3	25. 48	24. 37
Ti	921. 65	962. 33	133. 98	357. 74	594. 98	641. 3	343. 65	850. 52	783. 08	570. 51	692. 2	531. 18
V	119. 23	115. 65	123. 14	138. 46	39. 66	41. 55	47. 85	138. 52	165	159. 29	161. 71	197. 07
Cr	208. 73	187. 21	289. 84	283. 06	182. 8	182. 68	151. 8	126. 61	123. 84	116. 75	142. 96	209. 2
Mn	3601	3346	2989	2864	4532	4314	2792	3414	3904	3535	4467	3540
Fe	161565	158037	156593	150420	142948	136045	112969	186345	174816	117254	149703	135428
Co	33. 86	37. 73	53. 17	56. 1	22. 97	22. 37	17. 8	65. 75	43. 14	15. 95	27. 65	23. 49
Ni	0. 88	1. 32	0. 43	1. 22	2. 42	2. 41	1. 95	1. 77	0. 9	0. 4	0. 75	1. 49
Cu	0. 38	0. 20	0. 19	0. 24	0. 22	0. 15	0. 16	0. 19	0. 27	0. 22	0. 48	0. 27
Zn	68. 08	83. 82	78. 14	83. 58	66. 70	67. 87	55. 59	97. 76	86. 04	36. 17	53. 12	49. 77
Ga	8. 47	6. 97	9. 33	8. 34	8. 30	8. 63	9. 97	12. 55	11. 00	7. 67	10. 35	11. 30
Rb	0. 07	0. 05	0. 06	0. 06	0. 07	0. 06	0. 04	0. 04	0. 06	0. 06	0. 06	0. 05
Sr	0. 05	0. 04	0. 02	0. 03	0. 03	0. 07	0. 08	0. 03	0. 06	0. 12	0. 15	0. 05
Y	28. 90	31. 90	26. 72	27. 67	152. 24	155. 21	56. 42	49. 52	54. 58	84. 29	45. 76	31. 89
Zr	2. 90	14. 22	1. 81	4. 05	75. 50	71. 14	19. 47	37. 10	28. 36	15. 14	14. 58	10. 87
Nb	0. 292	0. 045	0. 014	0. 023	0. 046	0. 034	0. 025	0. 023	0. 024	0. 021	0. 031	0. 017
Mo	0. 108	0. 090	0. 075	0. 128	0. 125	0. 076	0. 051	0. 143	0. 094	0. 095	0. 085	0. 113
Sn	0. 650	0. 730	0. 540	0. 630	0. 665	0. 830	0. 472	0. 376	0. 531	0. 477	0. 390	0. 668
Cs	0. 031	0. 030	0. 022	0. 033	0. 021	0. 022	0. 024	0. 026	0. 023	0. 023	0. 021	0. 021
Ba	0. 095	0. 115	0. 125	0. 081	0. 055	0. 117	0. 052	0. 064	0. 061	0. 080	0. 107	0. 102
La	0. 034	0. 066	0. 015	0. 011	0. 010	0. 011	0. 010	0. 010	0. 022	0. 011	0. 019	0. 011
Ce	0. 086	0. 146	0. 017	0. 013	0. 032	0. 033	0. 038	0. 218	0. 283	0. 289	0. 025	0. 017
Pr	0. 035	0. 045	0. 014	0. 011	0. 048	0. 045	0. 044	0. 158	0. 171	0. 155	0. 039	0. 027
Nd	0. 536	0. 555	0. 216	0. 183	1. 780	1. 257	0. 992	2. 390	2. 650	2. 050	0. 492	0. 298
Sm	0. 894	0. 619	0. 647	0. 770	3. 710	2. 950	2. 430	2. 730	3. 080	2. 650	1. 067	0. 604
Eu	0. 535	0. 491	0. 409	0. 487	1. 428	1. 382	0. 956	1. 467	1. 588	1. 209	0. 563	0. 361
Gd	2. 540	2. 420	2. 200	2. 090	9. 250	9. 700	6. 330	5. 650	5. 780	7. 460	3. 740	2. 040
Tb	0. 675	0. 625	0. 537	0. 591	2. 600	2. 550	1. 431	1. 220	1. 325	1. 916	1. 039	0. 633
Dy	5. 030	4. 740	4. 290	4. 390	21. 840	22. 520	10. 950	8. 900	9. 580	14. 670	8. 180	4. 930
Ho	1. 157	1. 193	1. 104	1. 030	5. 660	5. 910	2. 121	1. 982	2. 240	3. 530	1. 874	1. 339
Er	2. 900	3. 540	2. 940	2. 960	17. 350	18. 610	4. 950	4. 990	6. 220	9. 480	5. 110	3. 980
Tm	0. 459	0. 502	0. 433	0. 450	2. 560	2. 810	0. 587	0. 779	0. 937	1. 309	0. 801	0. 660
Yb	3. 330	3. 740	3. 240	3. 170	19. 310	20. 270	3. 700	4. 930	6. 380	8. 380	5. 700	4. 960
Lu	0. 461	0. 481	0. 457	0. 474	2. 590	2. 710	0. 387	0. 643	0. 872	0. 984	0. 870	0. 682
Hf	0. 097	0. 202	0. 054	0. 070	0. 770	0. 626	0. 179	0. 372	0. 283	0. 177	0. 160	0. 085
Ta	0. 009	0. 005	0. 006	0. 008	0. 006	0. 007	0. 006	0. 005	0. 005	0. 008	0. 009	0. 006
W	0. 028	0. 059	0. 041	0. 059	0. 032	0. 030	0. 021	0. 017	0. 036	0. 024	0. 051	0. 042
Pb	0. 092	0. 041	0. 041	0. 040	0. 036	0. 033	0. 054	0. 046	0. 030	0. 034	0. 463	0. 138
Th	0. 030	0. 187	0. 015	0. 018	0. 016	0. 026	0. 013	0. 008	0. 021	0. 009	0. 012	0. 008
U	0. 012	0. 029	0. 130	0. 027	0. 007	0. 004	0. 005	0. 022	0. 007	0. 010	0. 014	0. 009
ΣREE	18. 67	19. 16	16. 52	16. 63	88. 17	90. 76	34. 93	36. 07	41. 13	54. 09	29. 52	20. 54
ΣLREE	2. 12	1. 92	1. 32	1. 47	7. 01	5. 68	4. 47	6. 97	7. 79	6. 36	2. 21	1. 32
ΣHREE	16. 55	17. 24	15. 20	15. 16	81. 16	85. 08	30. 46	29. 09	33. 33	47. 73	27. 31	19. 22
Mg [#]	37. 89	40. 42	41. 27	42. 88	36. 39	37. 77	35. 11	30. 37	25. 73	26. 15	21. 64	19. 63
(La/Yb) _N	0. 0069	0. 0118	0. 0031	0. 0023	0. 0004	0. 0003	0. 0017	0. 0014	0. 0023	0. 0009	0. 0022	0. 0014
Eu/Eu [*]	1. 01	1. 07	0. 94	1. 10	0. 71	0. 72	0. 70	1. 11	1. 13	0. 78	0. 77	0. 90
Y/Yb	8. 68	8. 53	8. 25	8. 73	7. 88	7. 66	15. 25	10. 04	8. 55	10. 06	8. 03	6. 43

注:“c”表示测点位于矿物颗粒的核部,“r”表示测点位于矿物颗粒的边部

表2 徐淮地区中生代侵入杂岩中榴辉岩类包体所含矿物单斜辉石成分分析结果($\times 10^{-6}$)Table 2 Result of clinopyroxene compositions in eclogite inclusions separated out of Mesozoic intrusive complex from Xuzhou-HuaiBei area($\times 10^{-6}$)

样品号	603-2-1		B1-10		J3-52		JG1-46		JG2-10			JG2-11	
	3.1r	3.1r	3.2c	5.1c	3.1c	3.1r	3.2r	2.1r	2.2c	2.3r	3.1r	3.2c	
Na	12296	26905	25633	4410	5478	4379	4519	12975	15699	12528	6847	6112	
Mg	64210	70942	69368	40297	38684	38751	38446	79537	93726	79602	51345	44995	
Al	23063	44960	41600	10915	9933	6997	7483	26029	37759	26008	21402	18631	
Si	239376	269291	259772	124243	126030	123366	123643	258968	276188	249857	160638	140671	
P	24.52	17.82	31.65	4.18	8.27	2.11	1.9	31.02	64.87	43.7	26.05	20.94	
K	3.86	12.22	2.58	139.04	151.82	11.2	31.42	442.78	935.51	125.32	61.47	22.72	
Ca	147514	134435	131576	73829	72971	72971	72971	149801	149801	149801	97843	88409	
Sc	69.74	26.22	25.83	20.93	24.34	26.16	25.76	40.5	41.39	40.42	24.94	22.25	
Ti	2849.55	2236.31	2438.37	1939.98	1932.66	803.02	833.87	3963.24	3952.71	7779.62	5959.65	2365.53	
V	593.13	487	490.09	248.04	402.59	379.26	388.03	468.88	536.68	460.29	346.61	301.91	
Cr	154.49	392.63	490.93	85.12	55.53	47.72	50.62	234.89	277.68	226.73	188.74	167.82	
Mn	604.38	216	246	272.48	208.06	187.42	188.2	295.69	361.95	276.91	272.93	233	
Fe	76408	31926	34217	28472	27938	25880	26286	43352	54653	38533	31238	26024	
Co	85.45	37.08	38.69	27.55	20.2	18.78	18.47	24.36	34.31	24.82	29.22	25.35	
Ni	141.18	443.53	435.95	30.09	21.9	19.28	18.43	38.5	59.42	37.08	41.47	34.86	
Cu	1.53	0.218	0.377	0.155	0.181	1.345	0.297	36.88	0.436	0.267	7.8	0.289	
Zn	247.16	87.46	89.29	78	126.69	113.56	114.27	123.99	161.66	121.68	93.94	86.87	
Ga	22.39	24.93	24.76	9.74	12.04	9.55		16.35	20.81	16.52	12.95	11.88	
Rb	0.050	0.051	0.043	0.275	0.107	0.017	0.060	0.891	0.132	0.037	0.092	0.052	
Sr	12.72	80.89	82.76	8.89	19.92	19.40	20.50	39.53	25.48	22.14	10.22	7.88	
Y	2.25	1.64	1.57	1.43	1.45	0.84	0.78	1.56	2.28	1.64	1.82	1.60	
Zr	68.59	32.49	33.87	44.16	37.10	11.47	14.80	20.21	19.05	30.45	26.04	18.74	
Nb	0.017	0.020	0.334	0.068	0.014	0.183	0.205	0.440	0.209	0.791	0.016	0.011	
Mo	0.053	0.088	0.052	0.031	0.026	0.031	0.031	0.193	0.081	0.040	0.069	0.054	
Sn	2.160	1.460	1.410	0.991	0.568	0.511	0.374	1.393	1.260	1.142	0.719	0.786	
Cs	0.020	0.022	0.018	0.068	0.009	0.006	0.008	0.123	0.017	0.017	0.030	0.014	
Ba	0.289	0.196	0.121	3.020	3.130	0.236	0.518	13.380	1.900	0.302	1.642	0.169	
La	1.033	1.201	1.276	0.461	0.780	0.618	0.689	3.100	2.162	1.967	1.563	0.762	
Ce	7.800	7.840	8.450	3.720	2.570	1.751	1.912	8.190	10.300	8.600	5.150	4.820	
Pr	1.936	1.723	1.829	0.874	0.433	0.273	0.286	1.610	1.798	1.402	1.159	0.944	
Nd	12.080	11.850	10.910	5.680	2.630	1.502	1.641	7.870	10.420	7.500	6.750	5.890	
Sm	3.350	2.880	2.430	1.736	0.892	0.493	0.435	2.320	2.750	2.193	1.851	1.766	
Eu	0.941	0.746	0.659	0.434	0.164	0.098	0.082	0.720	0.778	0.636	0.585	0.478	
Gd	2.290	1.557	1.444	1.158	0.764	0.437	0.392	1.401	2.014	1.723	1.475	1.179	
Tb	0.208	0.126	0.097	0.139	0.089	0.052	0.038	0.187	0.250	0.201	0.144	0.132	
Dy	0.940	0.530	0.454	0.501	0.523	0.264	0.225	0.699	1.024	0.612	0.698	0.567	
Ho	0.094	0.069	0.063	0.066	0.056	0.036	0.040	0.087	0.117	0.053	0.084	0.077	
Er	0.156	0.102	0.128	0.102	0.095	0.054	0.063	0.078	0.169	0.123	0.121	0.092	
Tm	0.017	0.006	0.020	0.012	0.011	0.004	0.007	0.004	0.015	0.008	0.011	0.012	
Yb	0.083	0.059	0.068	0.024	0.030	0.021	0.029	0.052	0.061	0.044	0.071	0.082	
Lu	0.009	0.004	0.010	0.003	0.004	0.008	0.003	0.007	0.007	0.005	0.009	0.006	
Hf	2.840	1.530	1.480	1.523	1.432	0.784	0.978	1.238	1.198	1.644	1.003	0.712	
Ta	0.010	0.007	0.009	0.020	0.003	0.001	0.002	0.070	0.043	0.099	0.006	0.005	
W	0.022	0.036	0.028	0.100	0.016	0.032	0.029	0.042	0.029	0.023	0.058	0.019	
Pb	0.126	0.078	0.151	0.130	0.667	0.711	0.774	1.903	0.768	0.635	0.674	0.172	
Th	0.012	0.010	0.007	0.008	0.006	0.006	0.006	0.147	0.080	0.244	0.008	0.007	
U	0.008	0.009	0.010	0.088	0.003	0.270	0.254	0.121	0.033	0.151	0.230	0.038	
ΣREE	30.94	28.69	27.84	14.91	9.04	5.61	5.84	26.33	31.86	25.07	19.67	16.81	
ΣLREE	22.85	22.61	22.47	10.74	6.41	4.14	4.53	20.77	24.68	19.47	14.62	12.42	
ΣMREE	7.82	5.91	5.15	4.03	2.49	1.38	1.21	5.41	6.93	5.42	4.84	4.20	
ΣHREE	0.27	0.17	0.23	0.14	0.14	0.09	0.10	0.14	0.25	0.18	0.21	0.19	
Mg [#]	65.89	83.63	82.33	76.49	76.09	77.49	77.08	80.83	79.77	82.61	79.07	79.90	
Ca [#]	0.112	0.258	0.329	0.098	0.067	0.057	0.061	0.138	0.138	0.133	0.171	0.174	
Eu/Eu [*]	0.98	0.98	0.99	0.88	0.59	0.63	0.60	1.13	0.97	0.97	1.05	0.96	

续表 2

Continued Table 2

样品号	JG2-20		JG2-2		JG5-34				JG5-58		
	1. 1c	1. 2r	4. 1r	4. 2c	1. 1c	1. 2r	2. 1c	2. 2r	1. 1r	2. 1r	2. 2c
Na	9230	6498	15010	15872	12304	9817	12341	10785	14359	12206	13692
Mg	37573	36655	60529	64085	70064	68109	72095	76441	65056	64671	62268
Al	17480	10170	22856	26661	63263	53813	62510	51420	43995	33576	42104
Si	138606	127498	234993	247325	253117	247665	251715	257759	251895	245434	244361
P	19. 93	12. 94	15. 96	33. 32	23. 66	9. 87	16. 03	46. 98	10. 41	7. 94	13. 25
K	178. 02	45. 33	155. 1	488. 25	28. 96	2. 12	15. 85	172. 57	167. 19	14. 66	41. 82
Ca	73829	73829	136079	136079	163881	165239	163881	165239	159092	159092	159092
Sc	20. 77	22. 85	46. 68	47. 72	30. 49	30. 94	33. 5	35. 47	45. 58	44. 69	42. 9
Ti	2253. 89	1456. 89	2248. 94	5337. 38	7508. 07	7541. 62	8474. 63	7208. 27	6377. 17	4330. 35	6551. 29
V	317. 72	307. 66	562. 9	632	304. 94	310. 51	306. 33	320. 98	354. 94	352. 59	371. 61
Cr	92. 89	85. 38	116. 26	127. 32	125. 53	126. 9	134. 33	129. 75	121. 97	112. 72	132. 39
Mn	272. 16	193. 62	314. 66	348. 92	173. 49	181. 71	172. 65	203. 75	202. 35	280. 95	263. 47
Fe	44955	33648	64071	74595	53923	49143	54216	55443	73008	71409	72211
Co	34. 7	28. 48	40. 86	48. 01	27. 98	24. 54	28. 75	28. 64	47. 06	43. 09	44. 45
Ni	47. 97	36. 17	41. 61	51. 53	13. 27	11. 54	14. 96	18. 53	37. 39	32. 47	35. 13
Cu	0. 088	0. 798	0. 589	2. 55	0. 413	0. 249	0. 27	6. 43	1. 47	0. 19	0. 399
Zn	119. 31	99. 25	168. 92	203. 18	114. 9	97. 84	117. 61	118. 82	164. 79	152. 35	156. 83
Ga	16. 95	12. 18	24. 2	26. 87	21. 23	23. 14	23. 55	24. 88	24. 54	20. 12	22. 39
Rb	0. 165	0. 039	0. 217	0. 736	0. 067	0. 063	0. 061	0. 763	0. 179	0. 045	0. 045
Sr	26. 25	28. 16	21. 07	25. 81	47. 64	48. 30	59. 32	50. 81	35. 65	35. 25	34. 54
Y	2. 69	1. 27	1. 16	1. 49	0. 93	0. 98	0. 67	0. 65	0. 41	0. 61	0. 74
Zr	79. 68	42. 15	32. 83	39. 84	107. 32	103. 94	128. 87	112. 09	116. 52	96. 98	117. 51
Nb	0. 057	1. 760	0. 209	1. 016	0. 042	0. 055	0. 083	0. 055	0. 021	0. 017	0. 018
Mo	0. 034	0. 128	0. 042	0. 088	0. 082	0. 017	0. 063	0. 089	0. 083	0. 065	0. 051
Sn	1. 589	1. 050	2. 430	2. 900	3. 200	3. 330	3. 610	3. 810	3. 330	2. 390	3. 170
Cs	0. 008	0. 013	0. 024	0. 047	0. 036	0. 021	0. 023	1. 078	0. 018	0. 022	0. 019
Ba	4. 150	1. 253	1. 950	11. 210	2. 430	0. 096	0. 367	8. 600	2. 670	0. 331	1. 177
La	0. 465	0. 924	0. 119	0. 214	1. 145	1. 472	1. 223	1. 710	0. 197	0. 146	0. 203
Ce	4. 590	5. 060	1. 158	1. 317	5. 940	7. 110	6. 300	5. 300	0. 675	0. 794	0. 779
Pr	1. 425	1. 182	0. 495	0. 518	1. 104	1. 162	1. 102	1. 029	0. 140	0. 164	0. 197
Nd	9. 990	7. 360	4. 670	4. 920	5. 480	5. 440	5. 880	5. 400	0. 856	1. 160	0. 969
Sm	3. 070	2. 084	2. 330	2. 750	1. 610	1. 394	1. 447	1. 292	0. 362	0. 539	0. 427
Eu	0. 847	0. 685	0. 669	0. 714	0. 275	0. 380	0. 335	0. 286	0. 076	0. 142	0. 159
Gd	2. 208	1. 382	1. 539	1. 750	1. 138	0. 988	1. 131	1. 039	0. 307	0. 441	0. 483
Tb	0. 250	0. 138	0. 153	0. 186	0. 128	0. 105	0. 116	0. 078	0. 035	0. 056	0. 059
Dy	0. 935	0. 530	0. 557	0. 628	0. 491	0. 436	0. 490	0. 233	0. 142	0. 198	0. 276
Ho	0. 115	0. 053	0. 047	0. 052	0. 051	0. 058	0. 034	0. 029	0. 015	0. 034	0. 054
Er	0. 153	0. 093	0. 081	0. 059	0. 093	0. 062	0. 035	0. 036	0. 057	0. 026	0. 107
Tm	0. 014	0. 005	0. 009	0. 009	0. 009	0. 007	0. 005	0. 009	0. 006	0. 009	0. 012
Yb	0. 060	0. 027	0. 033	0. 055	0. 044	0. 061	0. 060	0. 058	0. 047	0. 052	0. 085
Lu	0. 010	0. 003	0. 004	0. 009	0. 011	0. 007	0. 008	0. 010	0. 008	0. 008	0. 006
Hf	2. 510	2. 188	3. 160	3. 250	3. 160	3. 240	3. 320	3. 560	3. 520	3. 420	3. 690
Ta	0. 003	0. 076	0. 034	0. 071	0. 132	0. 111	0. 135	0. 068	0. 042	0. 008	0. 060
W	0. 012	0. 110	0. 039	0. 092	0. 035	0. 040	0. 034	0. 082	0. 020	0. 039	0. 019
Pb	0. 171	0. 543	0. 402	0. 595	0. 437	0. 398	0. 515	2. 930	0. 646	0. 526	0. 608
Th	0. 004	0. 002	0. 009	0. 058	0. 029	0. 017	0. 034	0. 018	0. 013	0. 008	0. 009
U	0. 057	0. 021	4. 500	4. 200	0. 011	0. 054	0. 027	0. 008	0. 006	0. 017	0. 019
∑REE	24. 13	19. 53	11. 86	13. 18	17. 52	18. 68	18. 17	16. 51	2. 92	3. 77	3. 82
∑LREE	16. 47	14. 53	6. 44	6. 97	13. 67	15. 18	14. 51	13. 44	1. 87	2. 26	2. 15
∑MREE	7. 42	4. 87	5. 29	6. 08	3. 69	3. 36	3. 55	2. 96	0. 94	1. 41	1. 46
∑HREE	0. 24	0. 13	0. 13	0. 13	0. 16	0. 14	0. 11	0. 11	0. 12	0. 09	0. 21
Mg [#]	65. 77	71. 46	68. 47	66. 39	74. 92	76. 11	75. 35	76. 02	67. 20	67. 55	66. 47
Cr [#]	0. 115	0. 109	0. 090	0. 093	0. 084	0. 087	0. 087	0. 079	0. 087	0. 081	0. 099
Eu/Eu [*]	0. 95	1. 16	1. 02	0. 93	0. 59	0. 94	0. 77	0. 73	0. 68	0. 87	1. 07

注:“c”表示测点位于矿物颗粒的核部,“r”表示测点位于矿物颗粒的边部

表3 徐淮地区中生代侵入杂岩中榴辉岩类包体所含矿物金红石成分分析结果($\times 10^{-6}$)

Table 3 Result of rutile compositions in eclogite inclusions separated out of Mesozoic intrusive complex from Xuzhou-HuaiBei area

($\times 10^{-6}$)

样品号	603-2-1					603-2-2					B1-10			J3-52		J3-65	
	1. 1c	1. 11	2. 13	4. 15	5. 16	1c	2c	5c	1. 1c	2. 1c	1. 1c	3. 1c					
Na	5. 15	4. 29	2. 96	1. 81	4. 74	5. 04	5. 47	4. 6	4. 77	4. 47	6. 94	5. 1					
Mg	497. 37	1407. 74	560. 6	900. 13	732. 23	72. 36	75. 77	71. 71	79. 86	70. 54	60. 26	85. 85					
Al	190. 88	756. 77	336. 23	324. 53	394. 05	218. 87	168. 18	310. 98	875. 21	304. 66	315. 92	227. 58					
Si	320. 94	256. 09	374. 34	271. 89	347. 54	252. 84	365. 47	367. 35	399. 47	390. 87	76. 44	98. 81					
P	20. 51	22. 44	22. 73	23. 09	22. 33	4. 93	6. 59	5. 43	18. 64	15. 88	5. 17	7. 08					
K	2. 37	2. 22	2. 15	2. 42	2. 28	1. 77	1. 48	2. 09	2. 35	2. 22	1. 42	1. 87					
Ca	79. 08	84. 71	78. 96	82. 95	76. 83	56. 85	48. 25	66. 12	84. 65	77. 08	49. 75	62. 59					
Sc	4. 53	2. 91	2. 538	2. 557	2. 627	1. 394	1. 239	1. 948	4. 76	3. 94	2. 232	2. 174					
Ti	593513	593513	593513	593513	593513	593513	593513	593513	593513	593513	593513	593513					
V	2450	2119	2079	1933	1864	1764	1769	1583	1396	1045	3373	2668					
Cr	1119	431	608	543	458	1150	1545	995	100	247	1074	890					
Mn	342. 41	294. 6	82. 4	185. 29	110. 93	0. 45	0. 39	0. 52	1. 02	0. 94	0. 45	36. 13					
Fe	23714	33405	20468	27224	21971	11528	10658	10150	6182	5867	6096	5743					
Co	3. 79	9. 59	4. 64	9. 35	4. 8	0. 139	0. 107	0. 054	0. 111	0. 073	0. 042	0. 242					
Ni	0. 31	7. 2	2. 83	7. 72	3. 75	1. 37	0. 77	0. 28	0. 81	0. 73	0. 27	0. 4					
Cu	3. 26	2. 82	2. 48	2. 1	5. 3	2. 46	3. 49	2. 57	2. 5	2. 88	4. 47	3. 95					
Zn	27. 32	38. 32	13. 61	31. 11	27. 59	3. 62	3. 83	3. 7	6. 16	5. 43	8. 08	10. 87					
Ga	0. 752	1. 214	0. 812	0. 777	0. 951	1. 714	1. 426	1. 305	1. 028	0. 927	0. 403	0. 205					
Rb	0. 064	0. 065	0. 058	0. 059	0. 045	0. 042	0. 036	0. 067	0. 065	0. 051	0. 036	0. 035					
Sr	0. 878	0. 820	0. 886	0. 892	0. 859	0. 960	0. 953	0. 879	1. 253	1. 384	1. 182	1. 056					
Y	0. 060	0. 105	0. 075	0. 053	0. 082	0. 051	0. 081	0. 074	0. 089	0. 133	0. 065	0. 082					
Zr	128. 68	849. 06	1037. 09	1004. 34	965. 10	720. 14	697. 83	878. 34	2914. 75	276. 78	293. 53	229. 80					
Nb	311. 35	231. 71	264. 74	259. 54	333. 68	410. 30	437. 32	433. 98	1059. 99	588. 20	77. 93	290. 13					
Mo	4. 31	25. 53	23. 75	25. 40	24. 90	7. 63	7. 14	7. 60	42. 50	4. 72	2. 92	3. 38					
Sn	12. 10	23. 48	27. 08	24. 30	23. 83	15. 81	15. 02	16. 72	44. 98	14. 43	8. 17	7. 60					
Cs	0. 025	0. 021	0. 025	0. 019	0. 021	0. 014	0. 012	0. 023	0. 022	0. 018	0. 015	0. 019					
Ba	0. 306	0. 059	0. 086	0. 091	0. 083	0. 107	0. 143	0. 062	0. 123	0. 069	0. 044	0. 109					
La	0. 021	0. 009	0. 006	0. 009	0. 015	0. 010	0. 007	0. 012	0. 021	0. 013	0. 009	0. 007					
Ce	0. 013	0. 012	0. 010	0. 014	0. 010	0. 008	0. 004	0. 012	0. 012	0. 008	0. 008	0. 008					
Pr	0. 006	0. 006	0. 010	0. 006	0. 009	0. 009	0. 003	0. 008	0. 011	0. 009	0. 006	0. 005					
Nd	0. 081	0. 045	0. 085	0. 087	0. 063	0. 041	0. 051	0. 059	0. 078	0. 074	0. 040	0. 108					
Sm	0. 053	0. 019	0. 030	0. 039	0. 035	0. 050	0. 033	0. 033	0. 044	0. 042	0. 032	0. 054					
Eu	0. 019	0. 026	0. 020	0. 012	0. 024	0. 015	0. 012	0. 022	0. 013	0. 021	0. 011	0. 013					
Gd	0. 062	0. 047	0. 035	0. 066	0. 058	0. 028	0. 032	0. 064	0. 072	0. 026	0. 055	0. 068					
Tb	0. 005	0. 005	0. 009	0. 008	0. 008	0. 004	0. 003	0. 006	0. 007	0. 006	0. 003	0. 006					
Dy	0. 020	0. 038	0. 028	0. 022	0. 027	0. 023	0. 026	0. 037	0. 024	0. 023	0. 022	0. 025					
Ho	0. 010	0. 005	0. 006	0. 008	0. 005	0. 006	0. 005	0. 009	0. 010	0. 011	0. 006	0. 008					
Er	0. 021	0. 035	0. 020	0. 022	0. 014	0. 011	0. 013	0. 018	0. 017	0. 028	0. 018	0. 025					
Tm	0. 007	0. 008	0. 006	0. 009	0. 006	0. 006	0. 005	0. 009	0. 007	0. 007	0. 006	0. 006					
Yb	0. 074	0. 029	0. 024	0. 046	0. 029	0. 032	0. 044	0. 048	0. 068	0. 046	0. 032	0. 043					
Lu	0. 008	0. 007	0. 006	0. 010	0. 007	0. 004	0. 005	0. 009	0. 008	0. 007	0. 003	0. 008					
Hf	3. 57	24. 31	27. 28	26. 89	28. 05	24. 98	24. 80	30. 17	60. 56	7. 16	4. 76	6. 46					
Ta	12. 89	12. 13	19. 04	13. 51	34. 88	11. 52	12. 69	16. 64	53. 10	24. 98	0. 05	24. 10					
W	43. 20	11. 02	11. 51	10. 24	11. 10	14. 56	16. 12	16. 09	178. 28	13. 14	0. 10	2. 90					
Pb	0. 474	0. 152	0. 035	0. 074	0. 056	0. 217	0. 162	0. 084	0. 171	0. 045	0. 042	0. 043					
Th	0. 006	0. 006	0. 010	0. 007	0. 014	0. 009	0. 010	0. 008	0. 011	0. 006	0. 005	0. 007					
U	0. 007	5. 160	0. 013	0. 512	0. 433	1. 656	1. 640	1. 730	0. 028	0. 010	0. 006	0. 006					
∑REE	0. 40	0. 29	0. 30	0. 36	0. 31	0. 25	0. 24	0. 35	0. 39	0. 32	0. 25	0. 38					
∑LREE	0. 19	0. 12	0. 16	0. 17	0. 16	0. 13	0. 11	0. 15	0. 18	0. 17	0. 11	0. 19					
∑HREE	0. 21	0. 17	0. 13	0. 19	0. 15	0. 11	0. 13	0. 20	0. 21	0. 15	0. 15	0. 19					
Eu/Eu*	1. 03	2. 49	1. 87	0. 73	1. 59	1. 10	1. 12	1. 43	0. 69	1. 81	0. 82	0. 65					
Ce/Ce*	0. 26	0. 39	0. 25	0. 45	0. 20	0. 18	0. 22	0. 29	0. 19	0. 18	0. 25	0. 35					
Nb/Ta	24. 15	19. 10	13. 90	19. 21	9. 57	35. 62	34. 46	26. 08	19. 96	23. 55	1462. 10	12. 04					

续表 3

Continued Table 3

样品号	J3-65		JG1-26		JG1-46				JG1-8	JG2-11	
	4. 1c	2. 1c	4. 1c	6. 1c	1. 2r	4. 1c	5. 1c	7. 1c	1. 1c	2. 1c	4. 1c
Na	4. 75	2. 41	6. 69	6. 09	4. 14	5. 47	4. 29	4. 9	3. 17	3. 51	4. 37
Mg	65. 9	93. 9	63. 93	347. 18	140. 48	171. 14	65. 25	60. 59	68. 91	142. 57	60. 95
Al	552. 1	453. 13	177. 67	203. 12	517. 32	1142. 68	559. 77	470. 68	885. 19	558. 06	278. 08
Si	140. 25	325. 05	344. 73	368. 01	937. 36	142. 25	334. 91	408. 07	119. 15	398. 27	69. 09
P	6. 21	5. 7	6. 28	6. 49	4. 87	5. 23	6. 87	7. 53	7. 55	7. 44	5. 02
K	1. 69	2. 09	2. 15	2. 47	1. 87	11. 1	2. 82	2. 55	2. 26	2. 6	1. 79
Ca	57. 51	65. 74	65. 08	77. 11	55. 18	63. 84	86. 17	75. 57	72. 77	90. 48	57. 73
Sc	0. 591	2. 45	3. 54	3. 64	5	4. 4	4. 49	4. 61	5. 25	4. 74	3. 64
Ti	593513	593513	593513	593513	593513	593513	593513	593513	593513	591726	596308
V	1439	1469	1386	1383	2901	2367	2600	2681	1540	1472	1355
Cr	482	291	307	328	291	224	252	234	60	451	832
Mn	0. 52	16. 26	0. 54	1258. 55	38	87. 35	0. 62	0. 59	0. 71	6. 52	0. 39
Fe	8707	7473	7247	35334	9734	8434	4438	5554	7858	4604	5075
Co	0. 046	0. 61	0. 058	7. 32	0. 998	1. 454	0. 278	0. 077	0. 052	0. 088	0. 038
Ni	0. 34	0. 31	0. 32	0. 52	0. 32	0. 28	0. 41	0. 34	0. 45	0. 29	0. 218
Cu	4. 96	5. 49	3. 65	2. 75	2. 15	3. 58	1. 73	3. 85	2. 05	2. 46	5. 78
Zn	9. 13	16. 49	4. 65	54. 2	16. 18	8. 87	2. 74	2. 15	3. 52	3. 2	5. 05
Ga	0. 728	0. 701	0. 463	0. 579	0. 993	0. 944	0. 239	0. 881	0. 514	0. 551	0. 864
Rb	0. 037	0. 060	0. 061	0. 058	0. 046	0. 051	0. 08	0. 053	0. 052	0. 054	0. 051
Sr	1. 034	0. 935	0. 872	0. 910	0. 840	0. 825	0. 736	0. 807	1. 012	0. 930	0. 954
Y	0. 095	0. 110	0. 071	0. 085	0. 241	0. 061	0. 064	0. 047	0. 066	0. 072	0. 053
Zr	382. 70	1064. 62	571. 60	560. 44	2120. 37	391. 89	643. 12	678. 48	1167. 98	1109. 44	648. 01
Nb	455. 99	1234. 47	915. 98	1451. 47	1595. 34	2356. 29	141. 18	142. 10	880. 78	1097. 68	2304. 38
Mo	6. 35	14. 01	18. 95	16. 17	28. 90	35. 81	15. 25	9. 74	6. 10	7. 39	12. 45
Sn	7. 22	3. 81	3. 99	3. 89	23. 26	20. 28	19. 83	18. 19	26. 70	11. 07	9. 10
Cs	0. 020	0. 037	0. 023	0. 026	0. 025	0. 018	0. 021	0. 026	0. 028	0. 023	0. 013
Ba	0. 085	0. 058	0. 071	0. 226	0. 072	0. 063	0. 069	0. 109	0. 095	0. 165	0. 095
La	0. 008	0. 010	0. 012	0. 008	0. 029	0. 011	0. 011	0. 008	0. 010	0. 011	0. 008
Ce	0. 005	0. 013	0. 013	0. 013	0. 027	0. 011	0. 012	0. 015	0. 009	0. 012	0. 005
Pr	0. 008	0. 003	0. 007	0. 008	0. 008	0. 006	0. 007	0. 006	0. 007	0. 006	0. 007
Nd	0. 065	0. 060	0. 060	0. 096	0. 048	0. 065	0. 055	0. 101	0. 044	0. 067	0. 067
Sm	0. 066	0. 075	0. 045	0. 054	0. 038	0. 052	0. 088	0. 056	0. 073	0. 053	0. 038
Eu	0. 007	0. 009	0. 016	0. 016	0. 013	0. 018	0. 026	0. 017	0. 012	0. 016	0. 012
Gd	0. 037	0. 046	0. 076	0. 037	0. 050	0. 040	0. 073	0. 077	0. 087	0. 051	0. 044
Tb	0. 007	0. 008	0. 006	0. 011	0. 005	0. 008	0. 012	0. 008	0. 008	0. 009	0. 006
Dy	0. 022	0. 019	0. 031	0. 036	0. 029	0. 028	0. 024	0. 038	0. 027	0. 036	0. 039
Ho	0. 004	0. 005	0. 011	0. 008	0. 007	0. 007	0. 006	0. 006	0. 010	0. 011	0. 005
Er	0. 022	0. 013	0. 013	0. 021	0. 015	0. 016	0. 034	0. 035	0. 013	0. 026	0. 021
Tm	0. 006	0. 007	0. 004	0. 007	0. 006	0. 008	0. 009	0. 007	0. 009	0. 008	0. 005
Yb	0. 039	0. 062	0. 037	0. 070	0. 044	0. 035	0. 063	0. 074	0. 056	0. 062	0. 031
Lu	0. 005	0. 005	0. 009	0. 015	0. 006	0. 009	0. 006	0. 009	0. 008	0. 010	0. 004
Hf	9. 30	34. 76	21. 91	22. 36	54. 50	16. 04	20. 48	17. 22	28. 06	25. 97	17. 73
Ta	30. 80	43. 95	42. 73	59. 88	52. 97	55. 23	3. 83	5. 93	11. 98	88. 54	120. 50
W	0. 94	42. 90	35. 13	43. 76	65. 01	82. 41	3. 65	4. 72	73. 31	45. 66	7. 62
Pb	0. 029	0. 061	0. 340	0. 220	0. 891	0. 073	0. 049	0. 096	0. 158	0. 223	1. 595
Th	0. 009	0. 010	0. 009	0. 011	0. 101	0. 010	0. 015	0. 012	0. 013	0. 009	0. 013
U	0. 007	0. 013	0. 017	0. 006	0. 006	0. 007	0. 025	0. 514	0. 545	0. 005	0. 010
∑REE	0. 30	0. 33	0. 34	0. 40	0. 32	0. 31	0. 43	0. 46	0. 37	0. 38	0. 29
∑LREE	0. 16	0. 17	0. 15	0. 19	0. 16	0. 16	0. 20	0. 20	0. 16	0. 16	0. 14
∑HREE	0. 14	0. 16	0. 19	0. 20	0. 16	0. 15	0. 23	0. 25	0. 22	0. 21	0. 15
Eu/Eu*	0. 37	0. 44	0. 85	1. 03	0. 92	1. 14	0. 97	0. 78	0. 45	0. 92	0. 90
Ce/Ce*	0. 14	0. 58	0. 36	0. 37	0. 42	0. 33	0. 33	0. 51	0. 25	0. 37	0. 16
Nb/Ta	14. 80	28. 09	21. 44	24. 24	30. 12	42. 66	36. 86	23. 96	73. 52	12. 40	19. 12

注:“c”表示测点位于矿物颗粒的核部,“r”表示测点位于矿物颗粒的边部

表4 徐淮地区中生代侵入杂岩中榴辉岩类包体所含矿物角闪石成分分析结果($\times 10^{-6}$)Table 4 Result of amphibole compositions in eclogite inclusions separated out of Mesozoic intrusive complex from Xuzhou-HuaiBei area ($\times 10^{-6}$)

样品号	B1-10		J3-52		JG1-46		J3-52		JG1-46	
	1. 1c(y)	1. 2r(y)	3. 1c(y)	9. 1r(y)	9. 2m(y)	9. 3c(y)	6. 1c(t)	10. 1c(t)	10. 2r(t)	
Na	22204	22027	5610	16136	15754	15354	10047	14957	17391	
Mg	81527	82204	70682	58388	84156	85815	48107	64100	57773	
Al	67628	65796	13543	47323	56144	53983	41863	62368	74861	
Si	204505	204505	208805	208899	208899	208899	160000	208899	208899	
P	39. 86	24. 71	11. 5	23. 67	50. 83	45. 67	9. 08	17. 98	24. 29	
K	9807	8040	89	6872	10634	10467	2868	11025	14035	
Ca	66133	67193	131620	68344	74237	73484	53642	72905	75843	
Sc	11. 64	13. 21	39. 38	34. 09	63. 15	61. 64	32. 6	44. 44	35. 2	
Ti	4678	3949	1580	6038	7119	6642	1508	4628	6548	
V	423	413	387	241	485	466	221	775	388	
Cr	444. 16	420. 97	117. 45	119. 93	512. 42	520. 05	128. 75	121. 35	322. 5	
Mn	139. 96	165. 33	321. 77	2376. 56	1023. 71	952. 58	746. 05	1663. 6	1541. 57	
Fe	44928	45080	41044	105643	83669	80148	80334	99580	113441	
Co	84. 43	81. 02	42. 68	40. 83	54. 49	55. 17	53. 59	32. 29	30. 15	
Ni	1161	1081	36. 86	66. 15	25. 99	25. 84	22. 34	41. 97	33. 67	
Cu	0. 42	0. 96	0. 20	19. 37	0. 66	1. 10	0. 14	1. 37	0. 30	
Zn	187. 45	188. 82	148. 12	276. 04	86. 96	74. 56	150. 91	302. 43	327. 11	
Ga	29. 10	28. 54	13. 11	25. 45	14. 36	13. 19	10. 63	29. 09	34. 66	
Rb	1. 93	2. 55	0. 14	2. 34	5. 28	5. 14	2. 24	3. 55	4. 73	
Sr	134. 80	124. 09	15. 71	134. 76	189. 15	161. 52	10. 31	183. 62	267. 47	
Y	2. 19	2. 49	1. 42	30. 82	16. 24	15. 43	3. 55	3. 53	9. 52	
Zr	18. 89	13. 67	72. 14	46. 16	19. 83	16. 77	5. 93	18. 27	29. 67	
Nb	0. 206	0. 152	0. 031	7. 760	1. 135	1. 134	0. 298	3. 150	3. 220	
Mo	0. 051	0. 046	0. 062	0. 086	0. 065	0. 113	0. 070	0. 124	0. 085	
Sn	1. 10	1. 44	1. 39	3. 17	1. 30	1. 51	0. 99	1. 11	2. 07	
Cs	0. 024	0. 031	0. 067	0. 069	0. 022	0. 022	0. 036	1. 962	0. 031	
Ba	68. 03	59. 84	1. 05	113. 97	155. 36	118. 6	23. 29	79. 71	136. 86	
La	1. 62	1. 61	1. 29	11. 78	3. 43	2. 76	0. 17	0. 04	0. 13	
Ce	10. 62	10. 38	6. 22	41. 08	12. 24	10. 03	0. 71	0. 16	0. 53	
Pr	2. 35	2. 37	1. 22	6. 74	2. 10	1. 84	0. 11	0. 02	0. 11	
Nd	14. 08	14. 52	7. 62	31. 68	11. 85	10. 91	0. 62	0. 20	0. 68	
Sm	3. 79	3. 91	2. 47	7. 72	3. 69	3. 37	0. 42	0. 08	0. 32	
Eu	0. 99	1. 01	0. 69	1. 56	1. 04	0. 99	0. 18	0. 04	0. 19	
Gd	1. 78	1. 98	1. 54	5. 74	3. 42	3. 18	0. 56	0. 08	0. 90	
Tb	0. 184	0. 191	0. 176	0. 880	0. 584	0. 531	0. 126	0. 063	0. 181	
Dy	0. 844	0. 823	0. 605	5. 380	3. 290	3. 390	0. 706	0. 484	1. 413	
Ho	0. 107	0. 105	0. 064	1. 062	0. 675	0. 599	0. 154	0. 094	0. 401	
Er	0. 160	0. 192	0. 098	3. 110	1. 707	1. 556	0. 423	0. 502	1. 065	
Tm	0. 023	0. 028	0. 010	0. 390	0. 201	0. 204	0. 044	0. 074	0. 173	
Yb	0. 056	0. 090	0. 048	3. 020	1. 266	1. 195	0. 312	0. 620	1. 192	
Lu	0. 009	0. 009	0. 006	0. 426	0. 165	0. 157	0. 037	0. 082	0. 155	
Hf	0. 923	0. 864	2. 630	2. 000	0. 907	0. 697	0. 310	0. 868	1. 213	
Ta	0. 007	0. 010	0. 006	0. 183	0. 056	0. 057	0. 004	0. 045	0. 060	
W	0. 032	0. 029	0. 017	0. 118	0. 049	0. 035	0. 027	0. 054	0. 026	
Pb	0. 233	0. 335	0. 082	13. 520	1. 970	1. 287	0. 451	4. 870	6. 510	
Th	0. 008	0. 008	0. 008	2. 490	0. 053	0. 034	0. 007	0. 008	0. 007	
U	0. 009	0. 005	0. 007	0. 011	0. 011	0. 018	0. 091	0. 014	0. 011	
∑REE	36. 61	37. 22	22. 06	120. 57	45. 66	40. 71	4. 57	2. 54	7. 44	
∑LREE	28. 67	28. 88	16. 35	91. 28	29. 62	25. 54	1. 61	0. 42	1. 45	
∑MREE	7. 70	8. 02	5. 55	22. 34	12. 70	12. 06	2. 15	0. 84	3. 41	
∑HREE	0. 25	0. 32	0. 16	6. 95	3. 34	3. 11	0. 82	1. 28	2. 59	
Mg [#]	80. 66	80. 74	79. 83	55. 96	69. 81	71. 11	57. 92	59. 67	53. 93	
Eu/Eu*	1. 03	0. 99	1. 01	0. 69	0. 88	0. 91	1. 15	1. 39	1. 03	

注：“c”表示测点位于矿物颗粒的核部，“r”表示测点位于矿物颗粒的边部，“y”为原生角闪石，“t”为退变角闪石

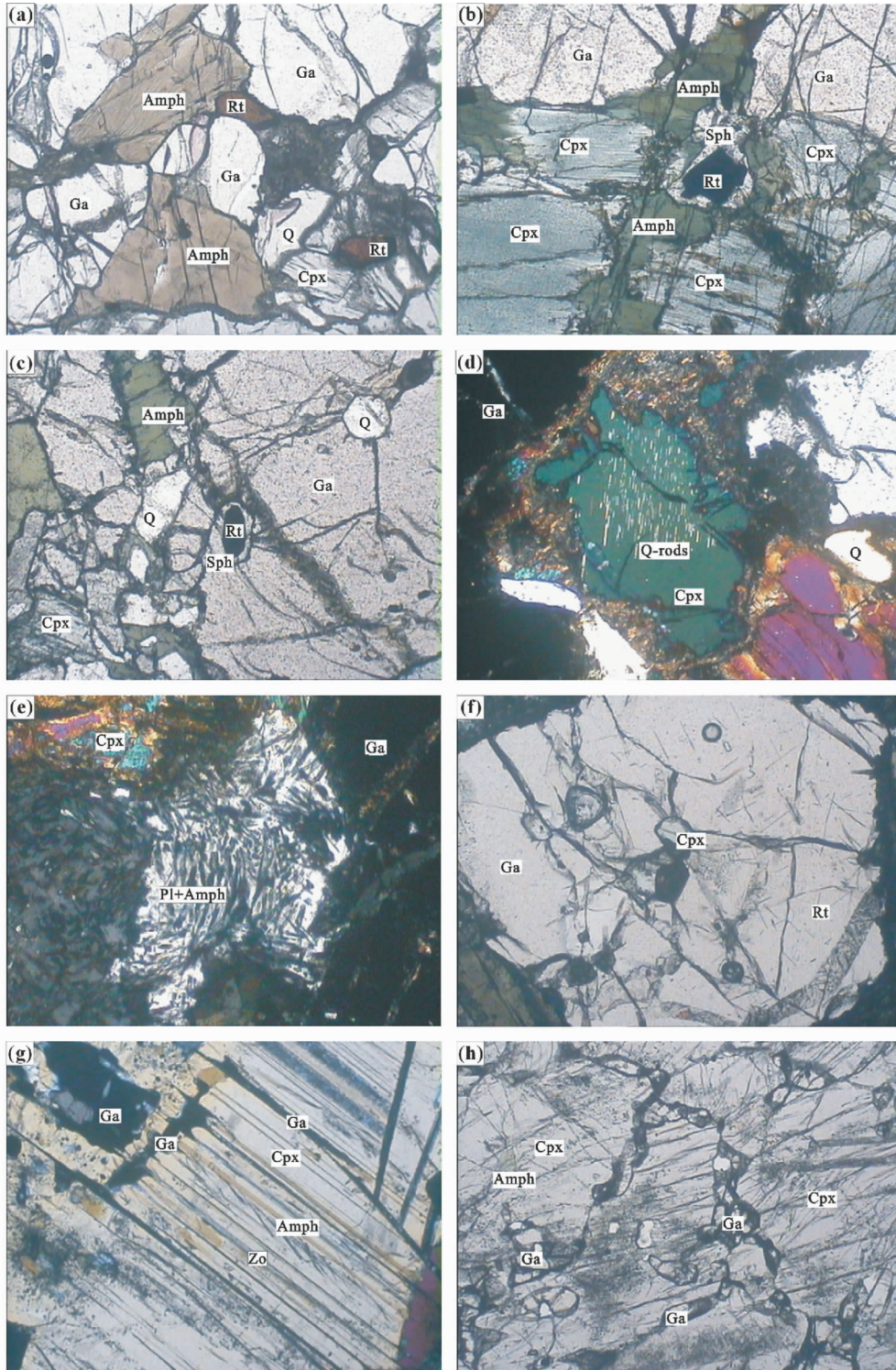


图2 榴辉岩类包体中矿物的赋存状态及矿物结构

(a)-石榴石+绿辉石+石英+金红石+角闪石组合, 视域宽度2.2mm, 正交偏光(样品号:B1-10);(b)-退变角闪石和具冠状榍石反应边的粒间金红石, 视域宽度2.2mm, 单偏光(样品号:603-2);(c)-退变角闪石和呈镶嵌状具冠状榍石反应边的金红石, 视域宽度2.2mm, 单偏光(样品号:603-2);(d)-单斜辉石中定向出溶的石英针, 视域宽度1.5mm, 正交偏光(样品号:B1-10);(e)-退变的角闪石和斜长石组成的后成合晶, 视域宽度1.5mm, 正交偏光(样品号:JG2-11-1);(f)-包裹于石榴石之中的金红石和单斜辉石, 视域宽度0.84mm, 正交偏光(样品号:603-2-2);(g)-单斜辉石中石榴石、黝帘石和角闪石的出溶, 视域宽度0.6mm, 正交偏光(样品号:JG1-2);(h)-单斜辉石中石榴石的出溶, 视域宽度0.84mm, 正交偏光(样品号:JG1-25). Amph-角闪石;Cpx-单斜辉石;Ga-石榴石;Sph-榍石;Q-石英;;Rt-金红石;Zo-黝帘石;Q-rods-出溶石英针;Pl+Amph-斜长石和角闪石组成的后成合晶

Fig. 2 Mineral conserve estate and mineral fabrics of eclogite inclusions

(a)-garnet + omphacite + quartz + rutile + amphibole assemblage, view width = 2.2mm, crossed polarized light (sample number: B1-10); (b)-retrogressive amphibole and crapped sphene reactive margin of intergranular rutile, view width = 2.2mm, plane polarized light (sample number: 603-2); (c)- retrogressive amphibole and crapped sphene reactive margin of cyclopean rutile, view width = 2.2mm, plane polarized light (sample number: 603-2); (d)-exsolved orientation quartz rods in clinopyroxene, view width = 1.5mm, crossed polarized light (sample number: B1-10); (e) -compositive simplectite of retrogressive amphibole and plagioclase, view width = 1.5mm, crossed polarized light (sample number: JG2-11-1); (f) -clinopyroxene and rutile infold in garnet crystal, view width = 0.84mm, plane polarized light (sample number: 603-2-2); (g)-exsolved garnet, zoisite and amphibole in clinopyroxene, view width = 0.6mm, crossed polarized light (sample number: JG1-2); (h)-exsolved garnet in clinopyroxene, view width = 0.84mm, crossed polarized light; Amph-amphibole (sample number: JG1-25). Cpx-clinopyroxene; Ga-garnet; Sph-sphene; Q-quartz; Rt-rutile; Zo- zoisite; Q-rods-exsolved quartz rods; Pl + Amph-compositive simplectite of retrogressive amphibole and plagioclase

分环带或矿物内部成分较均一, 这种成分的变化很可能是其形成温度不同的反映(陈能松等, 2003; 宗克清等, 2006)。表1中列出7粒石榴石同一颗粒内部测定的核部和边部(个别点可能相当于幔部)成分, 仅能反映颗粒内部成分变化的大致特征。测试结果显示石榴石内部成分具有一定的变化, 7粒石榴石中Mg含量有6粒核部高于边部、1粒边部高于核部, Al含量有4粒核部高于边部、3粒边部高于核部, Fe含量有3粒核部高于边部、4粒边部高于核部, Mg[#]指数有5粒核部高于边部、2粒边部高于核部, Mn含量有3粒核部高于边部、4粒边部高于核部, Ca含量有3粒核部高于边部、4粒边部高于核部(表1)。颗粒内部Mg、Al、Fe、Mn、Ca的成分和Mg[#]指数变化主要反映出岩石遭受退化变质的特征, 同时部分颗粒的成分变化暗示变质温度有升高趋势(陈能松等, 2003; 宗克清等, 2006; 张泽明等, 2005; Spear *et al.*, 1984; Spear, 1991; Ghent, 1988; Chen *et al.*, 1998), 这种矛盾的产生可能与热持续时间、矿物粒度大小、裂隙的发育程度和流体的交代强弱等影响成分扩散的因素有关。总体上, 不同颗粒之间成分差别较大, 同一颗粒内部差别较小, 反映石榴石矿物颗粒受后期变化影响较小, 测试结果基本上代表石榴石峰期变质条件下的成分记录。

分析结果表明, 与其它矿物相比石榴石的稀土元素含量相对较高, $\Sigma \text{REE} = 13.14 \times 10^{-6} \sim 90.76 \times 10^{-6}$, 平均 30.31×10^{-6} , 明显富集HREE ($\Sigma \text{HREE} = 12.35 \times 10^{-6} \sim 85.08 \times 10^{-6}$, 平均 27.11×10^{-6}), 亏损LREE ($\Sigma \text{LREE} = 0.64 \times 10^{-6} \sim 7.79 \times 10^{-6}$, 平均 3.20×10^{-6}), REE球粒陨石标准化配分模式呈LREE左倾、HREE相对平坦的平滑型配分分布曲线, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值最大为0.01768、最小为0.0004、平均为0.0031, 表明其轻、重稀土分馏明显。分析样品既有正Eu异常, 又有负Eu异常, 但样品的Eu异常均不明显, 这可能与原岩中斜长石的发育程度有关。个别分析点(JG1-46-2.1c、JG2-2-3.1r、JG5-34-3.1c等)La、Ce、Pr等LREE含量相对较高(图3A1), 可能是测试位置上石榴石中含有较多的细小包裹体或出溶单斜辉石等矿物, 而测试结果中含有辉石的成分所致; 样品JG2-18中一粒石榴石的两个分析点1.1c和1.3r的HREE含量相对较高, 且其边部含量均高于核部(表1), 岩相学研究表明该粒石榴石几乎未受到后期退变质的影响, 仍保持其峰期变质的增温状态, 暗

示在增温条件下HREE类质同像代替石榴石矿物晶体结构中主要阳离子占位的能力增强。

在微量元素上, 石榴石明显富集Y ($21.29 \times 10^{-6} \sim 155.21 \times 10^{-6}$, 平均 47.33×10^{-6}), 含一定量的Ga ($6.97 \times 10^{-6} \sim 15.77 \times 10^{-6}$, 平均 10.36×10^{-6})、Sc ($12.9 \times 10^{-6} \sim 61.81 \times 10^{-6}$, 平均 40.16×10^{-6})、V ($39.66 \times 10^{-6} \sim 296.01 \times 10^{-6}$, 平均 142.02×10^{-6})、Cr ($40.28 \times 10^{-6} \sim 349.97 \times 10^{-6}$, 平均 179.65×10^{-6})、Co ($15.95 \times 10^{-6} \sim 75.88 \times 10^{-6}$, 平均 47.34×10^{-6}), 及少量Zr、Ti和P(表1)。在不相容元素原始地幔标准化蛛网图上(图3A2), 高场强元素(HTSE)Y、Th、U、Zr相对富集, 大离子亲石元素(LILE)Ba、Sr等和高场强元素(HTSE)Nb、Hf等具有明显的负异常。过渡族元素Sc、V、Co等的含量相对较高, 其原始地幔标准化的配分模式图呈“W”形(图略), 相对于原始地幔Cr、Ni明显亏损, 表现出地幔衍生物过渡族元素的分布特点。

5.2 单斜辉石

榴辉岩类包体的榴辉岩中单斜辉石主要为绿辉石, 属Na-Ca辉石族, 其硬玉(Jd)分子含量为21mol% ~ 29mol%, Wo:45mol% ~ 49mol%, En:39mol% ~ 46mol%, Fs:8mol% ~ 14mol%; 石榴辉石岩中单斜辉石为透辉石和普通辉石变种, 少量属Na-Ca辉石族, 大部分属Ca-Mg-Fe辉石族, 其Jd分子含量小于16mol%, Wo:40mol% ~ 51mol%, En:35mol% ~ 46mol%, Fs:8mol% ~ 18mol%。单斜辉石的Mg[#]指数为65.77 ~ 83.63, Cr[#]指数为0.057 ~ 0.329。单斜辉石微量元素含量粒间变化较大, 粒内变化相对较小, 表明表2所测试的单斜辉石矿物颗粒受后期流体活动参与下的退变质作用和元素扩散作用影响较小。

单斜辉石的稀土元素含量相对较低, $\Sigma \text{REE} = 2.92 \times 10^{-6} \sim 31.87 \times 10^{-6}$, 平均 17.07×10^{-6} , 明显富集LREE ($\Sigma \text{LREE} = 1.87 \times 10^{-6} \sim 24.68 \times 10^{-6}$, 平均 12.75×10^{-6})、MREE ($\Sigma \text{MREE} = 0.94 \times 10^{-6} \sim 7.82 \times 10^{-6}$, 平均 4.17×10^{-6}), 亏损HREE ($\Sigma \text{HREE} = 0.08 \times 10^{-6} \sim 0.27 \times 10^{-6}$, 平均 0.16×10^{-6}), 其REE球粒陨石标准化配分模式为LREE左倾富集、MREE右倾富集、HREE右倾亏损型, 其中样品JG1-46的3.1c、3.1r、3.2r三个测点及样品JG5-58的2.2c、2.1r、1.1r三个测点的 ΣREE 明显偏低, 其配分模式分

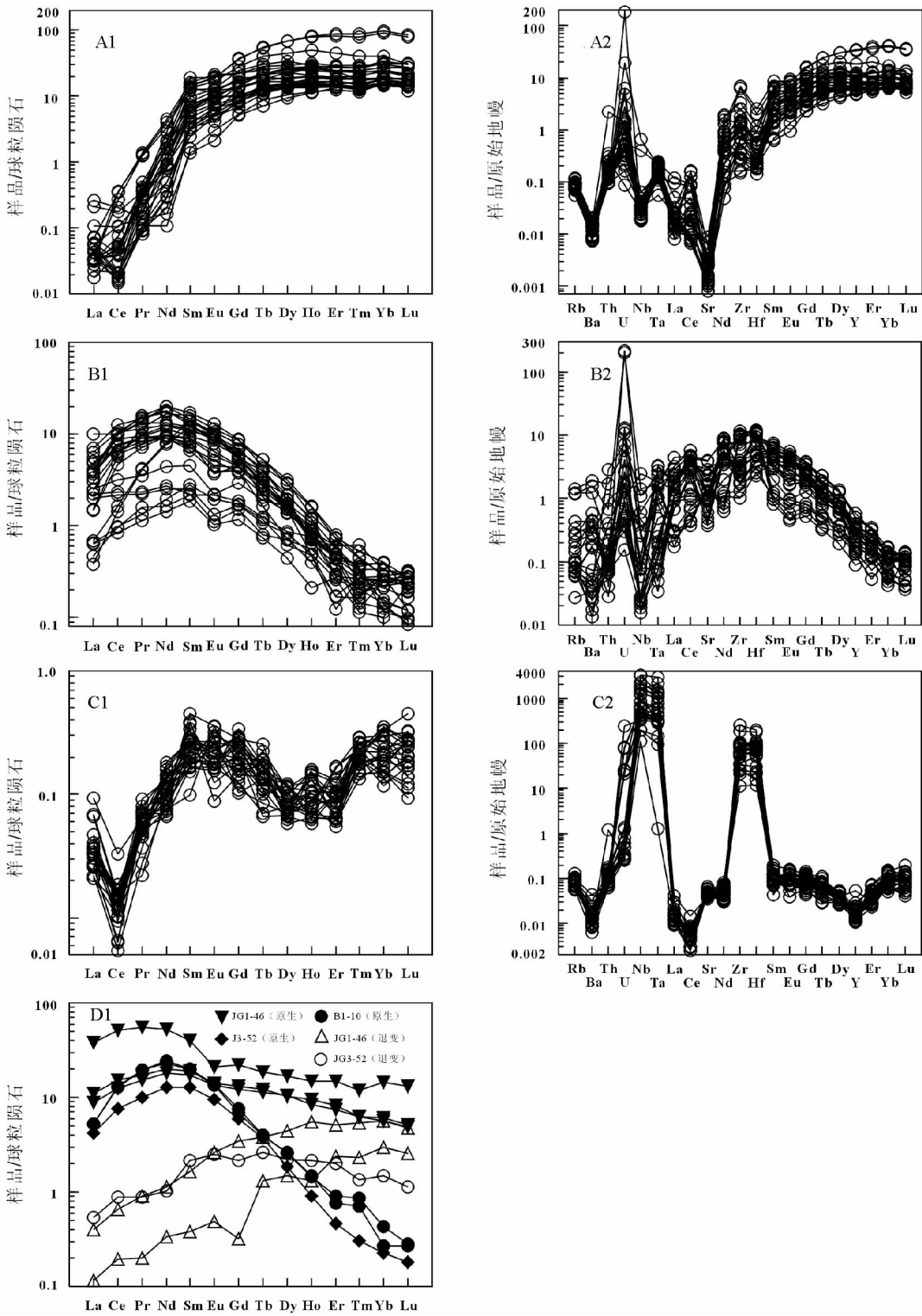


图3 徐淮地区中生代侵入杂岩中榴辉岩类包体所含矿物的球粒陨石标准化稀土元素和原始地幔标准化微量元素变异图
 A-石榴石;B-单斜辉石;C-金红石;D-角闪石
 Fig.3 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams for minerals in eclogite inclusions separated out of Mesozoic intrusive complex from Xuzhou-HuaiBei area
 A-garnet; B-clinopyroxene; C-rutile; D-amphibole

布曲线位于下部, 样品 JG2-2 的 4. 2c、4. 1r 二个测点的 Σ LREE 偏低。除个别测点具弱负 Eu 异常外, 其余测点的 Eu 异常不明显(表 2、图 3B1)。

与其它矿物相比单斜辉石明显富集 Sr($7.88 \times 10^{-6} \sim 82.76 \times 10^{-6}$, 平均 33.18×10^{-6})、Ga($9.55 \times 10^{-6} \sim 26.87 \times 10^{-6}$, 平均 19.18×10^{-6})、Sc($20.77 \times 10^{-6} \sim 69.74 \times 10^{-6}$, 平均 34.35×10^{-6})、Ti($803.02 \times 10^{-6} \sim 8474.63 \times 10^{-6}$, 平均 4188.83×10^{-6})、V($248.04 \times 10^{-6} \sim 632 \times 10^{-6}$, 平均 401.94×10^{-6})、Cr($47.72 \times 10^{-6} \sim 490.93 \times 10^{-6}$, 平均 159.93×10^{-6})、Co($18.47 \times 10^{-6} \sim 85.45 \times 10^{-6}$, 平均 33.95×10^{-6})、Ni($11.54 \times 10^{-6} \sim 443.53 \times 10^{-6}$, 平均 72.27×10^{-6})、Zr($11.47 \times 10^{-6} \sim 128.87 \times 10^{-6}$, 平均 58.03×10^{-6})、Hf($0.71 \times 10^{-6} \sim 3.69 \times 10^{-6}$, 平均 2.23×10^{-6})、Rb($0.02 \times 10^{-6} \sim 0.89 \times 10^{-6}$, 平均 0.18×10^{-6})、Ba($0.096 \times 10^{-6} \sim 13.38 \times 10^{-6}$, 平均 2.57×10^{-6}) 及少量的 Ta($0.0014 \times 10^{-6} \sim 0.14 \times 10^{-6}$, 平均 0.04×10^{-6})。在不相容元素原始地幔标准化蛛网图上(图 3B2), 高场强元素(HFSE) U、Zr、Hf 等相对富集, Ba、Nb、Sr 等具有明显的负异常。过渡族元素 Sc、Ti、V、Cr、Co、Ni 等的含量相对较高, 其原始地幔标准化的配分模式图呈“W”形(图略), 相对于原始地幔 Cr、Ni 明显亏损, 表现出地幔衍生物过渡族元素的分布特点(表 2)。

5.3 金红石

金红石是榴辉岩中常见的副矿物, 其中可以容纳高达百分含量级的一些高价态/高场强元素(HFSE)(Zack *et al.*, 2002, 2004)。金红石中微量元素地球化学特征的研究对于探讨高场强元素在俯冲变质过程中的地球化学行为、变质岩原岩判别、金红石形成温度以及利用 U-Pb 同位素精确定年和 Hf 同位素探讨壳幔演化作用等具有重要意义。

岩相学研究显示, 榴辉岩类包体中部分金红石颗粒晶形较完整, 不具榭石冠状反应边或具有极窄的反应边, 其周围矿物中裂隙不发育(图 2a), 另一部分金红石颗粒已强烈遭受了角闪岩相退变质作用, 其榭石冠状反应边或后成晶较发育, 周围矿物中微裂隙较发育, 各别颗粒已完全被退变质角闪石所包围(图 2b,c)。前者在后期角闪岩相退变质作用过程中, 受流体的影响较小, 扩散和退变相对较慢; 后者遭受了较强的流体参与下的退变质和扩散作用, 而造成金红石中所含的各种微量元素不等量的扩散流失。同一样品不同金红石颗粒或单个金红石颗粒不同位置的微量元素含量具有一定的差别, 但测试结果仍大致可以反应榴辉岩类包体所经历的榴辉岩相变质过程中微量元素在金红石中的分布特征。

金红石中含有少量的稀土元素, Σ REE = $0.24 \times 10^{-6} \sim 0.46 \times 10^{-6}$, 平均 0.34×10^{-6} , LREE(Σ LREE = $0.11 \times 10^{-6} \sim 0.20 \times 10^{-6}$, 平均 0.16×10^{-6}) 和 HREE(Σ HREE = $0.11 \times 10^{-6} \sim 0.25 \times 10^{-6}$, 平均 0.18×10^{-6}) 含量相当, 其

REE 球粒陨石标准化配分模式整体上呈“W”形, 其中 LREE 呈“V”形, 具有明显的 Ce 负异常($Ce/Ce^* = 0.14 \sim 0.58$, 平均 0.31), HREE 呈 Gd~Ho 右倾、Ho~Lu 左倾的“V”形。Eu 既有正异常(其中样品 603-2-2 的 1. 11、2. 13、5. 16 测点比较明显), 又有弱负异常(其中 J3-65-4. 1c、JG1-26-2. 1c、JG1-8-1. 1c 测点比较明显)(图 3C1)。

金红石中富集 V($1045.33 \times 10^{-6} \sim 3373.06 \times 10^{-6}$, 平均 1940.71×10^{-6}), Cr($59.74 \times 10^{-6} \sim 1544.88 \times 10^{-6}$, 平均 561.40×10^{-6}), Fe($4437.95 \times 10^{-6} \sim 35333.94 \times 10^{-6}$, 平均 12498.45×10^{-6}), Zr($128.68 \times 10^{-6} \sim 2914.75 \times 10^{-6}$, 平均 840.61×10^{-6}), Nb($77.93 \times 10^{-6} \sim 2356.29 \times 10^{-6}$, 平均 751.07×10^{-6}), Ta($0.05 \times 10^{-6} \sim 120.5 \times 10^{-6}$, 平均 32.69×10^{-6}), Pb($0.03 \times 10^{-6} \sim 1.60 \times 10^{-6}$, 平均 0.23×10^{-6}), U($0.005 \times 10^{-6} \sim 5.16 \times 10^{-6}$, 平均 0.54×10^{-6}), Hf($3.57 \times 10^{-6} \sim 60.56 \times 10^{-6}$, 平均 23.36×10^{-6}), 含一定量的 Mg($60.26 \times 10^{-6} \sim 1407.74 \times 10^{-6}$, 平均 256.31×10^{-6}), Al($168.18 \times 10^{-6} \sim 1142.68 \times 10^{-6}$, 平均 444.42×10^{-6}), Si($69.06 \times 10^{-6} \sim 937.36 \times 10^{-6}$, 平均 309.10×10^{-6}), Ca($48.25 \times 10^{-6} \sim 90.48 \times 10^{-6}$, 平均 70.22×10^{-6}), Mn($0.39 \times 10^{-6} \sim 1258.55 \times 10^{-6}$, 平均 107.20×10^{-6}), W($0.10 \times 10^{-6} \sim 178.28 \times 10^{-6}$, 平均 31.89×10^{-6}), Sn($3.81 \times 10^{-6} \sim 44.98 \times 10^{-6}$, 平均 16.56×10^{-6}), Co($0.04 \times 10^{-6} \sim 9.59 \times 10^{-6}$, 平均 1.91×10^{-6}), Ga($0.21 \times 10^{-6} \sim 1.71 \times 10^{-6}$, 平均 0.83×10^{-6}), 及少量 Ni、P、Rb、Sr、Mo、Ba、Th 等。在不相容元素原始地幔标准化蛛网图上(图 3C2), 高场强元素(HFSE) Nb、Ta、Zr、Hf、个别测点的 U 强烈富集, 大离子亲石元素(LILE) Rb、Ba、Sr, 高场强元素 Y、Th 等具有明显的负异常。过渡族元素 V、Cr、Co 等的含量相对较高, 其原始地幔标准化的配分模式图呈反“S”形(图略), 相对于原始地幔 Ni 明显亏损(表 3)。

5.4 角闪石

榴辉岩类包体中的角闪石属于钙质角闪石组。可分为原生角闪石和退变角闪石两种, 其中原生角闪石为韭闪石或浅闪石质普通角闪石, 而退变角闪石为铁质韭闪石、浅闪石质普通角闪石、镁质普通角闪石、阳起石质普通角闪石和铁质韭闪石质普通角闪石等。与退变角闪石相比, 部分原生角闪石 Fe、Mn、Al 的含量明显偏低, Mg 的含量相对较高, 其 Mg[#] 指数相对较高。

原生角闪石的稀土元素含量相对较高, Σ REE = $22.06 \times 10^{-6} \sim 120.57 \times 10^{-6}$, 平均 50.47×10^{-6} , 其中 Σ LREE = $16.35 \times 10^{-6} \sim 91.28 \times 10^{-6}$, 平均 36.72×10^{-6} , Σ MREE = $5.55 \times 10^{-6} \sim 22.34 \times 10^{-6}$, 平均 11.40×10^{-6} , Σ HREE = $0.16 \times 10^{-6} \sim 6.95 \times 10^{-6}$, 平均 2.35×10^{-6} 。按其配分模式可分为两类, 样品 JG1-46 中的 1 粒原生角闪石保存了完好的六面体晶形, 其核、幔和边(测点 JG1-46-9. 3c、9. 2m、9. 1r) 的测试结果显示其稀土元素含量相对较高(Σ REE 平均 =

68.98×10^{-6} , 其中 $\sum \text{LREE}$ 平均 = 48.81×10^{-6} , $\sum \text{MREE}$ 平均 = 15.70×10^{-6} , $\sum \text{HREE}$ 平均 = 4.47×10^{-6}), 且从核、幔到边部稀土元素含量逐渐增高。(La/Yb)_N 值最大为 2.63、最小为 1.56、平均为 2.01, 其轻、重稀土分馏不明显。REE 球粒陨石标准化配分模式呈 LREE 左倾富集、MREE、HREE 右倾富集型, 具有弱负 Eu 异常。另一类分布于石榴石和单斜辉石之间的黄褐色原生角闪石(测点 B1-10-1.1c、B1-10-1.2r、J3-52-3.1c) 稀土元素含量低于前一类($\sum \text{REE}$ 平均 = 31.96×10^{-6} , 其中 $\sum \text{LREE}$ 平均 = 24.63×10^{-6} , $\sum \text{MREE}$ 平均 = 7.09×10^{-6}), $\sum \text{HREE}$ 平均 = 0.24×10^{-6}), (La/Yb)_N 值最大为 19.44、最小为 12.08、平均为 16.56, 其轻、重稀土分馏明显。REE 球粒陨石标准化配分模式呈 LREE 左倾富集、MREE 右倾富集、HREE 右倾亏损型, 不具有 Eu 异常。(表 4、图 3D1)。

退变角闪石的稀土元素含量相对较低, $\sum \text{REE} = 2.54 \times 10^{-6} \sim 7.44 \times 10^{-6}$, 平均 4.85×10^{-6} , 其中 $\sum \text{LREE} = 0.42 \times 10^{-6} \sim 1.61 \times 10^{-6}$, 平均 1.16×10^{-6} , $\sum \text{MREE} = 0.84 \times 10^{-6} \sim 3.41 \times 10^{-6}$, 平均 2.13×10^{-6} , $\sum \text{HREE} = 0.82 \times 10^{-6} \sim 2.59 \times 10^{-6}$, 平均 1.56×10^{-6} 。REE 球粒陨石标准化配分模式呈 LREE 亏损、HREE 富集左倾型, 无明显的 Eu 异常(图 3D1)。

原生角闪石与退变角闪石的微量元素含量虽有差别, 但具有一致性, Sc、Ti、V、Cr、Co、Ni、Ga、Rb、Sr、Ba、Pb 等含量较高, 含一定量的 Y、Zr、Hf 等元素(表 4)。

6 讨论与结论

6.1 矿物之间元素的分配及与全岩的关系

分析结果表明, 组成榴辉岩类包体的主要矿物石榴石中 Al、Fe、Mn, 单斜辉石中 Na、Mg、Ca,

角闪石中 Na、Mg、Fe 等主量元素含量与其全岩所含的这些组分之间均呈良好的正相关(表 1、表 2、表 4), 说明其主量元素化学成分变化明显受全岩成分制约(王清海, 2003)。

石榴石中明显富集 HREE 和 Y, 其 HREE 配分型式与全岩基本一致, 石榴石与全岩之间的 REE、Ga、Sc、V、Cr、Co 等呈良好的正相关, 表明石榴石是全岩 HREE 和 Y 的主要寄主矿物, 且其 REE、Ga、Sc、V、Cr、Co 等含量受全岩成分控制。

单斜辉石的稀土元素含量相对较低, 明显富集 LREE、MREE 和 Sr, 含一定量的 Ga、Sc、Ti、V、Cr、Co 和 Ni 等, 这些组分的含量与全岩之间均呈良好的正相关, 表明单斜辉石是全岩 LREE、MREE 和 Sr 等的主要寄主矿物, 且其 LREE、MREE、Sr、Ga、Sc、Ti、V、Cr、Co 和 Ni 等含量受全岩成分控制。

石榴石和单斜辉石中含有全岩大多量的稀土元素。石榴石富重稀土, 贫轻稀土, 单斜辉石相对富轻、中稀土, 贫重稀土, 两者轻、重稀土含量呈相互消长的互补关系。石榴石和单斜辉石中部分测点表现出弱的负 Eu 异常可能与其原

岩经历了更早期基性岩浆的分离结晶有关, 而弱的正 Eu 异常可能表明其原岩为部分熔融残留物质或分离堆积物质的变质产物。石榴石富重稀土, 贫轻稀土, 单斜辉石相对富轻、中稀土, 贫重稀土, Y 和 Sr 分别在石榴石和单斜辉石中相对富集, Ga 和过渡族金属元素 Sc、Ti、V、Cr、Co 和 Ni 等在石榴石和单斜辉石中含量较高的特征, 与对这些元素在榴辉岩中石榴石与单斜辉石之间的微量元素分配系数研究和石榴石、单斜辉石矿物晶体结构中主要阳离子占位可以被这些元素类质同像代替的研究结果相符(石超等, 2007; 赖绍聪等, 2005)。

金红石中 Fe、Al、Mg、Ca 和 Mn 含量相对较高(表 3), 这可能与榴辉岩类包体全岩化学成分中这些主量元素含量较高有关。Nb、Ta、Cr 和 Zr 的含量也较高, 除 Zr 的含量与金红石的形成温度具有相关性外, 金红石作为俯冲带中高场强元素 Nb、Ta 的最重要载体矿物, 其控制了榴辉岩全岩中 >90% 的 Nb、Ta 元素含量, 多个金红石的平均 Nb/Ta 比值与全岩的 Nb/Ta 比值非常接近, 可代表榴辉岩全岩的 Nb/Ta 比值(Rudnick *et al.*, 2000; Kalfoun *et al.*, 2002; Zack *et al.*, 2002)。本研究金红石中 Nb/Ta 比值为 9.57 ~ 73.52(平均 25.43)(剔除测点 J3-65-1.1c 的 Nb/Ta = 1462 比值), 而其寄主岩石榴辉岩中 Ta 含量较低, 大部分低于检测限(王清海, 2003; 王清海等, 2005), 因此, 金红石中 Nb/Ta 比值无法与其主岩榴辉岩相比较, 但该比值高于 Zack *et al.* (2002) 的研究结果, 其原因是否为榴辉岩中 Ta 含量较低而导致金红石中 Nb/Ta 比值相对较高, 尚有待于研究。对于 Cr 元素, 金红石是位于石榴石和绿辉石之后的主要载体矿物, 但金红石中 Cr 的含量与全岩 Cr/TiO₂ 比值之间存在较好的一致性, 说明金红石中 Cr 含量的变化与全岩趋同。金红石中 P、Mo、Sn、Ta、W 等的含量与其主岩榴辉岩中这些元素的含量具有相关性。Rb、Sr、Ba 在金红石中含量极低, 而其主岩榴辉岩中含量也较低。

研究发现, 榴辉岩中金红石的一些微量元素含量如 Nb、Cr、Fe、V、W 等与其原岩有继承和对应关系。榴辉岩所含的金红石具有可变的 Nb、Cr 含量, 而 Nb、Cr 含量变化可以反映全岩中这两个元素的地球化学特征, 指示其原岩性质并可用于判别原岩类型(Zack *et al.*, 2002)。研究区榴辉岩类包体所含金红石中 Nb、Cr 含量变化范围均较大。在 Nb-Cr 图解(图略)中其投点分别落入原岩为镁铁质岩石和变质泥质岩两个区域, 原岩为镁铁质岩石的金红石贫 Nb、Cr 含量较低或中等, 原岩为变质泥质岩的金红石以富 Nb 和贫 Cr 为特点。表明榴辉岩类包体原岩的多样性, 这与张泽明等(2004)认为苏鲁榴辉岩的原岩是多成因的观点是一致的, 但结合以往的研究表明, 该区榴辉岩类包体的原岩应主要为镁铁质岩石(王桂梁等, 1998; 许文良等, 2003, 2004; Xu WL *et al.*, 2002, 2004a, b, 2006; 王清海等, 2003, 2004, 2005; 纪伟强等, 2005)。

金红石中含有适量的 Hf 和少量的 U、Pb 同位素(表 3)。

虽然这些时代较年轻的榴辉岩中金红石的 U、Pb 含量一般都较低,较难获得准确的 U-Pb 年龄,但已有这方面测年结果的报道,可为利用金红石的 U-Pb 年龄限定变质岩的变质或冷却时限提供精确的制约(李秋立等, 2001; Li *et al.*, 2003)。在超高压变质岩中金红石是 Hf 元素的主要赋存载体,可对金红石进行 Hf 同位素分析研究,这将对探讨深俯冲-折返过程中超高压变质岩的演化及壳幔相互作用等地球动力学问题有重要意义(Mathieu *et al.*, 2005)。

原生角闪石的稀土元素含量相对较高,部分测点的 REE 球粒陨石标准化配分模式与单斜辉石相似,但原生角闪石的稀土元素含量高于单斜辉石,表明单斜辉石的退变质分解对角闪石的形成有一定的影响,且原生角闪石容纳稀土元素的能力强于单斜辉石。退变角闪石的稀土元素含量相对较低,其 REE 配分模式与石榴石相似,这可能与其产出于石榴石的边部,继承了被替代矿物石榴石的成分特征有关。原生角闪石与退变角闪石的其他微量元素如 Ga 和过渡族金属元素 Sc、Ti、V、Cr、Co 和 Ni 等的含量虽有差别,但均较高,与石榴石、单斜辉石和全岩具有一定的相关性,说明角闪石中的稀土元素、Ga 和过渡族金属元素除主要受全岩成分的制约外,石榴石、单斜辉石对其形成也有影响。

一般认为基性岩的 Na 和低场强元素(LFSE)或大离子亲石元素(LILE)(如:K、Sr、Rb、Ba 等)在蚀变和变质作用过程中是活泼的,而高场强元素(HTSE)(如:Ti、Zr、Y、Nb、Ta、Th、Hf、U、Pb)、过渡族金属元素和 REE 是不活泼的。因此,在讨论岩石或矿物的地球化学特征及成因时不活泼元素更具代表性。研究区榴辉岩类包体中原生和/或退变角闪石的 Na 和大离子亲石元素(LILE)K、Sr、Rb、Ba 等的含量均高于石榴石、单斜辉石和金红石(表 4),且与全岩具有相关性,表明角闪石的成分虽受石榴石、单斜辉石的影响,但其容纳 Na、K、Sr、Rb、Ba 等元素的能力强于其他矿物,而且暗示相对富集 LILE 的流体对角闪石的形成有不同程度的影响。

6.2 后期退变质作用的影响

榴辉岩是大陆地壳俯到上地幔深度经历超高压变质作用的产物,它记录了极端条件下元素的地球化学行为和物质交换过程。岩相学及以往对研究区榴辉岩类包体的研究表明,组成榴辉岩类包体的主要矿物石榴石、单斜辉石和金红石等平衡共生,在榴辉岩相变质阶段各矿物之间元素的分配已经达到了化学平衡,后期遭受的角闪岩相退变质作用使这种平衡发生了改变(许文良等, 2003, 2004; Xu *et al.*, 2002, 2004a, b, 2006; 王清海等, 2003, 2004, 2005; 纪伟强等, 2005),这与部分学者对大别-苏鲁榴辉岩研究的结果相吻合(石超等, 2007; 张泽明等, 2004; 宗克清等, 2006)。分析结果表明,组成榴辉岩类包体矿物的不同颗粒之间成分差别较大,同一颗粒内部差别较小,基本上代表榴辉岩相峰期变质条件下的成分记录。虽然矿物颗粒受后期变化影响相对较小,但这种变化是明显的(表 1、表 2)。

石榴石颗粒内部成分具有一定的变化,大多数石榴石颗粒的 Mg、Al、Y、Yb、Sc、Ti、V、Zr、Zn 含量核部高于边部,Fe、Ga、Cr 的含量边部高于核部, $Mg^{\#}$ 指数核部高于边部(表 1)。这种颗粒内部的成分变化反映了退化变质的特征(陈能松等, 2003; 宗克清等, 2006; 张泽明等, 2005; Spear *et al.*, 1984; Spear, 1991; Ghent, 1988; Chen *et al.*, 1998),微量元素中 Y、Yb 在石榴石强烈富集,且 Y/Yb 比值(除个别较大外,差别较小)平均为 8.47,与 E-MORB 和板内玄武岩(WPB)的型式相似。说明石榴石中的 Y/Yb 比值稳定,受退变质作用影响较小,并可用于判断其主岩的原岩特征,其他微量元素比值(如 Ti/V、Zr/Y、Y/Sc、Ga/Cr 等)受退变质作用影响变化较大。

以往的研究表明(王清海, 2002),研究区榴辉岩类包体中的单斜辉石具有出溶石榴石、石英针、黝帘石和角闪石的现象(图 2d, g, h),在具有出溶矿物的单斜辉石内部,其化学成分存在系统变化,从靠近出溶矿物的一侧向其核部,Al、Na 和 Ti 含量增加, Mg、Si 和 Ca 含量降低。单斜辉石中矿物的出溶可能与温压条件的降低和流体的涉入有关,与退变作用可能是同时发生的。近年来有关超高压变质岩中单斜辉石出溶矿物的报道也证实其经历了减温减压的过程(Katayama *et al.*, 2000; Sautter and Harte, 1988)。

岩相学研究显示部分金红石颗粒已遭受了强烈的角闪岩相退变质作用,其榍石冠状反应边或后成合晶较发育,主矿物石榴石和单斜辉石的微裂隙也较发育(图 2b, c),榍石是榴辉岩中金红石的退变质产物,即金红石退变为榍石,榍石在金红石颗粒边部呈环状分布。榍石边的宽度受金红石的赋存状态、嵌布特征及遭受退变质作用程度强弱的影响(Xu *et al.*, 2002; 王清海等, 2002, 2003; 王清海, 2003)。较强的退变质作用和后期流体活动,造成金红石中微量元素的扩散流失量较大,同一样品不同金红石颗粒或单个金红石颗粒不同位置的各别微量元素含量具有明显的差别。如金红石中稀土元素一般含量很少,但各别测点(603-2-1-1.2r、JG1-46-8.1c 等,本文表 3 中未列出)稀土元素含量相对较高,富集 LREE 和 MREE,这与榍石中富集一定量的 LREE 和 MREE 相吻合,说明金红石遭受强烈的退变质作用,其成分已趋同于榍石(Sassi *et al.*, 2000; 石超等, 2007)。

研究表明,石榴石、单斜辉石和金红石等“名义上无水矿物”中都可以含有微量/少量水,以 OH^- 或者 H_2O 的形式存在于矿物的结构中,这些矿物在板块俯冲过程中携带较多的水到地球深部,而在板块折返过程中由于压力降低引起水的溶解度减小,其中可能会逃逸出一定数量的结构水,这些水会引起早期的退变质作用(如后成合晶的形成),又可能会给与折返有关的同碰撞岩浆岩的产生提供流体。这些矿物的含水量以及分布的不均一性表明,虽然它们在板块俯冲过程中携带一定量的水参与了深部循环作用,而且是退变质和成脉流体的一个重要来源,但超高压变质过程

中自由流体的活动范围是非常有限的,水-岩交换作用的方式是“隧道式”而非“弥散式”(Zheng *et al.*, 2003; 盛英明等, 2005)。

样品 JG1-46 中的 1 粒原生角闪石(测点 JG1-46-9.3c、9.2m、9.1r)保存了完好的六面体晶形,其核、幔和边的测试结果显示其部分主、微量元素具有明显的成分环带结构。主量元素 Fe、Mn, 微量元素 Ni、Ga、Y、Zr、Nb、Hf、Pb、W 和稀土元素(REE)含量从核部到边部逐渐增高,而 Mg、Cr、Co 则逐渐降低, Mg[#] 指数逐渐降低(分别为 71、70 和 56)(表 3)。这与已往对石榴石成分环带的研究结果具有一致性(陈能松等, 2003; Lanzirotti, 1995; Chernoff *et al.*, 1999; 张泽明等, 2005; Spear *et al.*, 1984; Spear and Komn, 1996; Spear, 1991; Ghent, 1988; Chen *et al.*, 1998), 暗示其曾经历过退变质作用过程。

榴辉岩类包体中部分原生或/和退变角闪石的 REE 配分模式分别与单斜辉石和石榴石相似,其过渡族金属元素等的含量与石榴石、单斜辉石和全岩具有一定的相关性,表明角闪石成分除受全岩成分的制约外,石榴石、单斜辉石对其形成也有影响。而角闪石中的大离子亲石元素等在退变质作用过程中活泼的元素的含量均高于石榴石、单斜辉石等其他矿物,除角闪石容纳这些元素的能力较强外,相对富集 LILE 流体的影响亦不容忽视。

角闪石等含水矿物的出现是超高压变质岩在其抬升过程中经历水化退变质作用的标志。这种水化退变质作用发生在角闪岩相退变质阶段的早期,所需的退变质水来源于石榴石、单斜辉石和金红石等“名义上无水矿物”的分解和其结构水的出溶,以退变角闪石、后合成晶或冠状体产出的角闪石出现为特征。这种角闪石的化学成分明显受到被交代矿物的成分制约,其微量元素含量和稀土元素配分模式与所替代的石榴石或单斜辉石相似,这表明变质流体的活动性很小,只有少量的外来组分参与了退变质反应。

6.3 地球动力学意义

大陆板块深俯冲过程中矿物的微量元素化学行为的研究具有非常重要的意义,这些元素的变化特征是俯冲带物质转换的指示和标志,可以示踪岛弧岩浆作用、岩石圈物质分异和壳-幔相互作用等。

岩相学研究表明,研究区榴辉岩类包体的主要组成矿物石榴石、单斜辉石和金红石等平衡共生。以往对该类包体的温压估算结果显示其经历了榴辉岩相变质,且形成深度应大于 100km(许文良等, 2003, 2004; Xu WL *et al.*, 2002, 2004a, b, 2006; 王清海等, 2003, 2004, 2005; 纪伟强等, 2005)。石榴石与单斜辉石之间 Eu/Eu* 异常具有很好的线性协变关系(图略)。REE、Sr、Nd 和 Y 在这两种矿物之间的分配与 Ca 的分配呈现一定的相关性,部分过渡族元素在石榴石、单斜辉石之间的分配与 Mg 的分配存在明显的相关性,表明在榴辉岩相变质阶段各矿物之间元素的分配已经达到

了化学平衡(表 1、表 2、表 3)。组成榴辉岩类包体矿物的不同颗粒或/和同一颗粒内部之间成分存在较大的差别的原因,与其后期遭受的角闪岩相退变质作用使这种平衡发生了改变有关,近期地幔熔/流体交代作用可能也有影响,其影响程度受交代前矿物的组成、颗粒大小、裂隙发育程度,交代熔/流体的组成、体积及温压条件等制约。榴辉岩类包体同位素地质年代学、温压估算结果及矿物的成分环带研究可以推测研究区榴辉岩经历了榴辉岩相的进变质之后,又受到角闪岩相退变质作用的演化过程。成分环带的保存是变质作用过程中温、压条件变化的结果,可以提供非常重要的变质作用动力学信息,其记录了变质过程中的温、压条件变化,并可用来计算变质岩的抬升速率。暗示本区榴辉岩类包体等超高压变质岩停留在深部所经历的榴辉岩相变质时间应该相对短暂,并快速折返抬升到下地壳或更浅部位,这与已往对大别-苏鲁地区榴辉岩的研究相吻合(石超等, 2007; 张泽明等, 2004, 2005; 宗克清等, 2006; 陈能松等, 2003; Spear *et al.*, 1984; Spear and Komn, 1996; Lanzirotti, 1995; Chernoff *et al.*, 1999; Spear, 1991; Ghent, 1988; Chen *et al.*, 1998; Stachel *et al.*, 1998; Hoal *et al.*, 1994; 程昊等, 2003; Zhang RY *et al.*, 2009)。

已往的研究表明(王清海, 2003; 王清海等, 2004), 本区榴辉岩类包体的寄主岩石为中生代侵入杂岩,具有类似于埃达克岩(Adakite)的特征, Rb、Sr、Ba 相对富集,特别是 Sr、Ba 含量较高,高场强元素 Nb、Ta 和重稀土元素(HREE)等相对亏损的特点。这种榴辉岩类包体与其寄主岩石中部分高价态/高场强元素(HFSE)和重稀土元素(HREE)呈相互消长的关系可以解释为,俯冲-碰撞带中岩浆岩的源区可能有石榴石、金红石残留物的存在,导致与俯冲带有关的岩浆岩亏损高场强元素和重稀土元素,即在俯冲带发生脱水和部分熔融反应时,石榴石、金红石通常保存重稀土元素(HREE)和高场强元素(HFSE)于残留物榴辉岩中,从而引起熔体亏损高场强元素和重稀土元素,这不仅能解释俯冲-碰撞带埃达克岩的地球化学特征和成因,而且能合理解释俯冲-碰撞带中岩浆岩亏损高场强元素(Nb、Ta 等)的特征(Zack *et al.*, 2002; Klemme *et al.*, 2002; 余金杰等, 2006a, b)。而熔体中 Rb、Sr、Ba 等相对富集的趋势,可能与来源于脱挥发分板片中的含水流体将该类微量元素携带至岩浆岩中所致有关。

中生代侵入杂岩所含榴辉岩类包体的组成矿物中微量元素地球化学特征研究,进一步佐证了已往有关本研究区中生代含榴辉岩类等包体的侵入杂岩形成的地球动力学机制。中生代早期扬子地块与华北地块的俯冲-碰撞作用,造成华北地块东部陆壳的加厚和相继出现的榴辉岩相变质(许文良等, 2004)。随着挤压体制的继续,因密度差异而导致俯冲带前端的折沉作用,进而引起软流圈的上涌及岩石圈地幔的部分熔融,并诱发俯冲产生的部分高压-超高压变质岩发生快速的折返,并发生退变角闪岩相变质。中侏罗世

时期, 华北地块东部进入高压-超高压变质期后的构造伸展环境, 华北地块东部岩石圈开始减薄, 该过程中, 高压-超高压变质岩进一步折返到下部地壳和/或中部地壳的深度与古老基性下地壳形成混杂堆积。早白垩世 (Xu WL *et al.*, 2004a) 时期, 由于应力场的转变, 太平洋板块俯冲引起软流圈物质上涌, 并进一步引起深部地壳物质的部分熔融, 在熔体的运移过程中, 捕获了早期折返到中和/或下地壳深度已发生角闪岩相退变的高压-超高压变质岩石而上升就位, 形成本区中生代侵入杂岩。

6.4 结论

(1) 榴辉岩相变质阶段, 组成榴辉岩类包体的各矿物之间元素的分配已经达到了化学平衡。榴辉岩类包体所含的石榴石中 Al、Fe、Mn, 单斜辉石中 Na、Mg、Ca, 角闪石中 Na、Mg、Fe 等主量元素含量与其全岩之间均呈良好的正相关, 受全岩成分制约。石榴石明显富集 HREE、贫 LREE, 单斜辉石相对富集 LREE、MREE、贫 HREE, 两者轻、重稀土含量呈相互消长的互补关系。石榴石和单斜辉石中分别富集 Y、Sr、Ga 和过渡族元素 Sc、Ti、V、Cr、Co 等含量较高, 并受全岩成分控制。

(2) 榴辉岩类包体所含的金红石中稀土元素的含量很少, Fe、Al、Mg、Ca、Mn、Nb、Ta、Cr 和 Zr 含量相对较高, Rb、Sr、Ba 含量极低, 部分微量元素 (如 Nb、Cr、Fe、V、W 等) 含量与其原岩有继承和对应关系, 其原岩主要为镁铁质岩石。部分原生或/和退变角闪石的 REE 配分模式分别与单斜辉石和石榴石相似, 过渡族金属元素等的含量与石榴石、单斜辉石和全岩具有一定的相关性, 角闪石容纳 Na、K、Sr、Rb、Ba 等元素的能力较强, 其成分除受全岩成分的制约外, 石榴石、单斜辉石对其形成也有影响。

(3) 榴辉岩类包体与其寄主中生代侵入杂岩中部分高价态/高场强元素 (HFSE) 和重稀土元素 (HREE) 呈相互消长的关系。榴辉岩的形成与扬子地块和华北地块之间的俯冲-碰撞作用有关。

References

Barth MG, Foley SF and Horn I. 2002. Partial melting in Archean subduction zones: Constraints from experimentally determined trace element partition coefficients between eclogitic minerals and tonalitic melts under upper mantle conditions. *Precambrian Res.*, 113:323 – 340

Chen NS, Sun M, You ZD and Malpas J. 1998. Wellpreserved garnet growth zoning in granulite from the Dabie Mountains, Central China. *J. Metamorph. Geol.*, 16:213 – 222

Chen NS, Sun M, Yang Y, Liu R and Wang QY. 2003. Major-and trace-element zoning in metamorphic garnets and their metamorphic process implications. *Earth Sciences Frontiers*, 10(3):315 – 320 (in Chinese with English abstract)

Chen ZY, Wang DH, Chen YC, Xu J, Yu JJ and Wang PA. 2006. Mineral geochemistry of rutile in eclogite and its implications. *Earth Science*, 31(4):533 – 550 (in Chinese with English abstract)

Cheng H, Chen DG, Cheng WJ and Yang XZ. 2003. Garnet chemical

zoning in low-*T* eclogite: Evidence for fast exhumation. *Geochimica*, 32(1):81 – 85 (in Chinese with English abstract)

Chernoff CB and Carlson WB. 1999. Trace element zoning in garnet as a record of chemical disequilibrium during garnet growth. *Geology*, 27:555 – 558

Coleman RG, Lee DE and Beatty LB. 1965. Eclogites and eclogites: Their differences and similarities. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 76:483 – 508

Fan W and Menzies MA. 1992. Destruction of aged lower lithosphere and accretion of asthenosphere mantle beneath eastern China. *Geotectonica et Metallogenia*, 16:171 – 180

Fan W, Zhang H, Baker J, Jarvis KE, Mason PRD and Menzies MA. 2000. On and off the north China craton: Where is the Archaean keel? *J. Petrol.*, 41(7):933 – 950

Gao S, Rudnick RL, Yuan HL, LIU XM, Liu YS, Xu WL, Ling WL, Ayers J, Wang XC and Wang QH. 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 432(16):892 – 897

Ghent ED. 1988. A review of chemical zoning in eclogite garnet. In: Smith DC (ed.). *Eclogites and Eclogite-Facies Rock*, Developments in Petrology, 12. Amsterdam: Elsevier, 207 – 236

Green TH. 2000. The effect of rutile on high-field strength element behaviour in the crust-mantle system. *J. Conf. Abs.*, 5 – 44

Gregory MY and Kamenetsky V. 1999. In situ origin for glass in mantle xenoliths from southeastern Australia: Insights from trace element compositions of glasses and metasomatic phases. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 172:97 – 109

Griffin WL, Zhang AD, O'Reilly SY and Ryan CG. 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean craton. In: Flower MF, Chung SL, Lo CH and Lee TY (eds.). *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*. American Geophysical Union, *Geodynamics Series*, 27:107 – 126

Griffin WL, Shee SR, Ryan CG, Win TT and Wyatt BA. 1999. Harzburgite to lherzolite and back again: Metasomatic processes in ultramafic xenoliths from the Wesselson kimberlite, Kimberley, South Africa. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 134:232 – 250

Hermann J and Green DH. 2001. Experimental constraints on high pressure melting in subducted crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 188:149 – 186

Hermann J. 2002. Allanite: Thorium and light rare earth element carrier in subducted crust. *Chem. Geol.*, 192:289 – 306

Hoal KEO, Hoal BG and Erlank AJ. 1994. Metasomatism of the mantle lithosphere recorded by rare earth elements in garnets. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 126:303 – 313

Ji WQ, Xu WL, Wang QH, Pei FP and Yang DB. 2005. Amphiboles in eclogite xenoliths from Xuzhou-Suzhou area, Central China: Texture, mineral chemistry and their tectonic implications. *J. Mineral. Petrol.*, 25(4):11 – 16 (in Chinese with English abstract)

Jochum KP, McDonough WF, Palme H and Spettel B. 1989. Compositional constraints on the continental lithospheric mantle from trace elements in spinel peridotite xenoliths. *Nature*, 340:548 – 550

Kalfoun F, Ionov D and Merlet C. 2002. HFSE residence and Nb/Ta ratios in metasomatised, rutile-bearing mantle peridotites. *Earth and Planetary Science Letters*, 199:49 – 65

Katayama I, Parkinson CD and Okamoto K. 2000. Supersilicic clinopyroxenes and silica exsolution in UHPM eclogite and pelitic gneiss from the Kokchetav massif, Kazakhstan. *Am. Mineral.*, 85:1368 – 1374

Klemme S, Blundy JD and Wood BJ. 2002. Experimental constraints on major and trace element partitioning during partial melting of eclogite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66:3109 – 3123

Lai SC, Qin JF and Li YF. 2005. Trace element geochemistry and classification of the clinopyroxene in Cenozoic trachybasalt from North Qiangtang area, Tibetan Plateau. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 35(5):611 – 616 (in Chinese with English abstract)

Lanzitotti A. 1995. Yttrium zoning in metamorphic garnets. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59:4105 – 4110

Li QL, Li SG, Zhou HY, Li HM, Hong JA, Wang QC and Massonne HJ. 2001. U-Pb age of rutile in UHP eclogite: The evidence of rapid cooling. *Chinese Science Bulletin*, 46(19):1655 – 1658 (in

Chinese)

- Li QL, Li SG and Zheng YF. 2003. A high precision U-Pb age of metamorphic rutile in coesite-bearing eclogite from the Dabie Mountains in Central China; A new constraint on the cooling history. *Chemical Geology*, 200;255 - 265
- Lu FX and Zheng JP. 1996. Paleozoic nature and deep processes of lithospheric mantle in North China platform. In: Chi JS and Lu FX (eds.). *Characteristics of Kimberlite and Paleozoic Lithosphere Mantle in North China Platform*. Beijing: Science Press, 215 - 274 (in Chinese)
- Lu FX, Zheng JP, Li WP, Chen MH and Cheng ZM. 2000. The main evolution pattern of Phanerozoic mantle evolution in the eastern China; The "mushroom cloud" model. *Earth Science Frontiers*, 7 (1):97 - 107 (in Chinese with English abstract)
- Maruyama S and Liou JG. 1998. Initiation of UHP metamorphism and its significance on the Proterozoic/Phanerozoic boundary. *The Island Arc*, 7;6 - 35
- Mathieu C, O'Reilly SY and Griffin WL. 2005. Hf isotopes of MARID (mica-amphibole-rutile-ilmenite-diopside) rutile trace metasomatic processes in the lithospheric mantle. *Geology*, 33;45 - 48
- Menzies MA, Fan W and Zhang M. 1993. Paleozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of 120km of Archean lithosphere, Sino-Korean craton, China. *Geological Society of London Special Publication*, 76;71 - 81
- Menzies MA and Xu Y. 1998. Geodynamics of the North China craton. In: Flower MF, Chung SI, Lo CH and Lee TY (eds.). *Mantle Dynamics and Plate Interaction in East Asia*. American Geophysical Union, *Geodynamics Series*, 27;107 - 126
- Norman MD, Griffin WL, Pearson NJ, Garcia MO and O'Reilly SY. 1998. Quantitative analysis of trace element abundances in glasses and minerals: A comparison of laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry, solution inductively coupled plasma mass spectrometry, proton microprobe and electron microprobe data. *J. Anal. At. Spectrom.*, 13;477 - 482
- Norman MD. 2001. Applications of laser ablation ICPMS to the trace element geochemistry of basaltic magmas and mantle evolution. In: Paul Sylvester (ed.). *Laser-ablation-ICPMS in the Earth Sciences*. Mineralogical Association of Canada, *Short Course Series*, 29;163 - 184
- Rudnick RI, Barth M and Horn I. 2000. Rutile-bearing refractory eclogites missing link between continents and depleted mantle. *Science*, 287;278 - 281
- Sassi R, Harte B and Carswell A. 2000. Trace element distribution in central Dabie eclogites. *Contrib. Minerl. Petrol.*, 139; 298 - 315
- Sautter V and Harte B. 1988. Diffusion gradients in an eclogite xenolith from the Roberts Victor kimberlite pipe 1; Mechanism and evolution of garnet exsolution in Al₂O₃-rich clinopyroxenes. *J. petrol.*, 29 (6);1325 - 1352
- Sheng YM, Xia QK, Ding Q, Yang XZ, Yu HM and Hao YT. 2005. Water in garnets from Dabieshan eclogites; FTIR analysis. *Acta Mineralogica Sinica*, 25 (4); 334 - 341 (in Chinese with English abstract)
- Shi C and Zhang ZM. 2007. Element geochemical behavior during the ultrahigh-pressure metamorphism: Mineral compositional study of eclogites from the CCS-D main drill hole. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (12);3180 - 3200 (in Chinese with English abstract)
- Spear FS, Selverstone J, Hickmott D, Crowley P and Hodges KV. 1984. *PT* path from garnet zoning: A new technique for deciphering tectonic processes in crystalline terranes. *Geology*, 12;87 - 90
- Spear FS. 1991. On the interpretation of peak metamorphic temperatures in light of garnet diffusion during cooling. *J. Metamorph. Geol.*, 9; 379 - 388
- Spear FS and Komn MJ. 1996. Trace element zoning in garnet as a monitor of crustal melting. *Geology*, 24;1099 - 1102
- Stachel T, Viljoen K S and Brey G. 1998. Metasomatic processes in lherzolitic and harzburgitic domains of diamondiferous lithospheric mantle: REE in garnets from xenoliths and inclusions in diamonds. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 159;1 - 12
- Tsujimori T, Sisson VB, Liou JG, Harlow GE and Sorensen SS. 2006. Very-low-temperature record of the subduction process: A review of worldwide lawsonite eclogues. *Lithos*, 92;609 - 624
- Wang GL, Jiang B, Cao DY, Zhou H and Jin WJ. 1998. On the Xuzhou-Suzhou arcuate duplex-imbricate fan thrust system. *Acta Geologica Sinica*, 72 (3); 228 - 236 (in Chinese with English abstract)
- Wang QH, Xu WL, Wang DY, Lin JQ and Liu XC. 2002. Garnet and quartz exsolutions in clinopyroxenes of mafic rock xenoliths from Xuzhou-Northern Anhui Province. *Geological Journal of China Universities*, 8(4);407 - 415 (in Chinese with English abstract)
- Wang QH. 2003. Petrology and geochemistry of Mesozoic intrusive complex and its deep-seated xenoliths in Xu-huai region, China: Constraints on evolution of Mesozoic lithosphere in eastern part of the North China Block. Ph. D. Dissertation. Changchun; College of Earth Sciences, Jilin University (in Chinese with English Summary)
- Wang QH, Xu WL, Wang DY, Li JQ and Gao S. 2003. Composition and thermal state of Mesozoic deep crust in Xu-huai area: Evidence from deep-seated xenoliths. *Geotectonica et Metallogenia*, 27(4);362 - 371 (in Chinese with English abstract)
- Wang QH, Xu WL, Wang DY and Lin JQ. 2004. Determination of the magma depth of Mesozoic adakitic rocks in Xuzhou-Suzhou area: Evidence from *P-T* estimation of deep-seated xenoliths. *Geological Review*, 50(4);351 - 359 (in Chinese with English abstract)
- Wang QH, Xu WL, Wang DY, Li JQ and Gao S. 2005. Geochemical characteristics of eclogite xenoliths in Mesozoic intrusive complex from Xu-Huai area and its tectonic significances. *Earth Science*, 30 (4);413 - 420 (in Chinese with English abstract)
- Wang RC, Wang S, Qiu JS and Ni P. 2005. Rutile in the UHP eclogites from the CCS-D main drill hole (Donghai, eastern China): Trace-element geochemistry and metallogenetic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 21 (2); 465 - 474 (in Chinese with English abstract)
- Wang RC, Qiu JS, Ni P, Wang S, Hu J and Zhu X. 2006. Titanium mineralization in Sulu ultrahigh-pressure eclogites; Mineralization at the convergent boundary between north China plate and Yangtze plate. *Acta Geol. Sin.*, 80 (12);1828 - 1835 (in Chinese with English abstract)
- Xu J, Chen YC, Wang DH, Yu JJ, Li CJ, Fu XJ and Chen ZY. 2004. Titanium mineralization in the ultrahigh-pressure metamorphic rocks from Chinese Continental Scientific Drilling 100 ~ 2000m mail hole. *Acta Petrologica Sinica*, 20 (1);119 - 126 (in Chinese with English abstract)
- Xu WL, Wang DY, Liu XC, Wang QH and Lin JQ. 2002. Discovery of eclogite inclusions and its geological significance in Early Jurassic intrusive complex in Xuzhou-northern Anhui, eastern China. *Chinese Science Bulletin*, 47(14);1212 - 1216
- Xu WL, Wang QH, Liu XC, Lin JQ and Wang DY. 2003. Mineral assemblages and their evolution of clinopyroxenite xenolith in Early Jurassic intrusives complex from Xu-Huai region, central China. *Earth Science*, 28(2);173 - 178 (in Chinese with English abstract)
- Xu WL, Wang QH, Liu XC, Wang DY and Guo JH. 2004a. Chronology and sources of Mesozoic intrusive complexes in the Xuzhou-Huainian region, Central China; Constraints from SHRIMP zircon U-Pb dating. *Acta Geologica Sinica*, 78(1);96 - 106
- Xu WL, Liu XC, Wang QH, Lin JQ and Wang DY. 2004b. Garnet exsolution in garnet clinopyroxenite and clinopyroxenite xenoliths in Early Cretaceous intrusions from the Xuzhou region, eastern China. *Mineralogical Magazine*, 68(3);455 - 465
- Xu WL, Wang QH, Wang DY, Pei FP and Gao S. 2004. Processes and mechanism of Mesozoic lithospheric thinning in eastern North China Craton; Evidence from Mesozoic igneous rocks and deep-seated xenoliths. *Earth Science Frontiers*, 11 (3);309 - 317 (in Chinese with English abstract)
- Xu WL, Gao S, Wang QH, Wang DY and Liu YS. 2006. Mesozoic crustal thickening of the eastern North China craton; Evidence from eclogite xenoliths and petrologic implications. *Geology*, 34(9);721 - 724
- Xu X, O'Reilly SY, Griffin WL and Zhou X. 2000. Genesis of young lithospheric mantle in southeastern China: An LAM-ICPMS trace element study. *J. Petrol.*, 41(1);111 - 148
- Xu YG. 2002. Evidence for crustal components in the mantle and constraints on crustal recycling mechanisms: Pyroxenite xenoliths from Hannuoba, North China. *Chem. Geol.*, 182;301 - 322

- Yu JJ, Chen ZY, Wang PA, Li XF, Huang JP and Wang H. 2006a. Trace elements geochemistry of eclogites in the northern Jiangsu province, eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(7):1883 – 1890 (in Chinese with English abstract)
- Yu JJ, Xu J, Chen ZY, Wang DH, Chen YC, Wang PA and Li XF. 2006b. Trace element geochemistry of rutiles in the eclogites from the Chinese Continental Scientific Drilling Project main hole. *Acta Geologica Sinica*, 80(12):1839 – 1845 (in Chinese with English abstract)
- Zack T, Kronz A and Foley S. 2002. Trace element abundances in rutiles from eclogites and associated garnet mica schists. *Chem. Geol.*, 184:97 – 122
- Zack T, von Eynatten H and Kronz A. 2004. Rutile geochemistry and its potential use in quantitative provenance studies. *Sediment. Geol.*, 171:37 – 58
- Zhang M, Suddaby P, O'Reilly SY, Norman M and Qiu J. 2000. Nature of the lithospheric mantle beneath the eastern part of the central Asian fold belt: Mantle xenolith evidence. *Tectonophysics*, 328(1–2):131 – 156
- Zhang RY, Liou JG, Zheng JP, Griffin WL, Yang YH and Jahn BM. 2009. Petrogenesis of eclogites enclosed in mantle-derived peridotites from the Sulu UHP terrane: Constraints from trace elements in minerals and Hf isotopes in zircon. *Lithos*, 109:176 – 192
- Zhang ZM, Xu ZQ, Liu FL, You ZD, Shen K, Yang JS, Li TF and Chen SZ. 2004. Geochemistry of eclogites from the main hole (100 ~ 2050 m) of the Chinese Continental Scientific Drilling Project. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1):27 – 42 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZM, Xiao YL, Shen K and Gao YJ. 2005. Garnet growth compositional zonation and metamorphic *P-T* path of the ultrahigh-pressure eclogites from the Sulu orogenic belt, eastern Central China. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3):809 – 818 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZM, Xiao YL, Hoefs J, Liou JG and Simon K. 2006a. Ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Chinese Continental Scientific Drilling Project: I. Petrology and Geochemistry of the main hole (0 ~ 2050m). *Contrib. Mineral. Petrol.*, 152:421 – 441
- Zhang ZM, Liou JG, Zhao XD and Shi C. 2006b. Petrogenesis of Maobei rutile eclogites from the southern Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt, eastern China. *J. Metamorphic Geol.*, 24:727 – 741
- Zheng JP. 1999. Mesozoic-Cenozoic Mantle Replacement and Lithospheric Thinning, Beneath East China. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1 – 126 (in Chinese)
- Zheng YF, Fu B and Gong B. 2003. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: Implications for geodynamics and fluid regime. *Earth Science Reviews*, 62: 105 – 161
- Zong KQ, Liu YS, Liu XM and Zhang HB. 2006. In situ trace element geochemistry of single minerals in eclogites from the CCSD main hole (100 ~ 1100m). *Acta Petrologica Sinica*, 22(7):1891 – 1904 (in Chinese with English abstract)
- 附中文参考文献**
- 陈能松, 孙敏, 杨勇, 刘嵘, 王勤燕. 2003. 变质石榴石的成分环带与变质过程. *地质前缘*, 10(3):315 – 320
- 陈振宇, 王登红, 陈毓川, 徐珏, 余金杰, 王平安. 2006. 榴辉岩中金红石的矿物地球化学研究及其意义. *地球科学*, 31(4):533 – 550
- 程昊, 陈道公, Cheng WJ, 杨晓志. 2003. 低温榴辉岩中石榴子石的成分分带:快速抬升的证据. *岩石化学*, 32(1):81 – 85
- 纪伟强, 许文良, 王清海, 裴福萍, 杨德彬. 2005. 徐州-宿州地区榴辉岩类捕虏体中角闪石的结构、矿物化学及成因意义. *矿物岩石*, 25(4):11 – 16
- 赖绍聪, 秦江锋, 李永飞. 2005. 青藏北羌塘第三纪玄武岩单斜辉石地球化学. *西北大学学报(自然科学版)*, 35(5):611 – 616
- 李秋立, 李曙光, 周红英, 李惠民, 洪吉安, 王清晨, Massonne HJ. 2001. 超高压榴辉岩中金红石 U-Pb 年龄:快速冷却的证据. *科学通报*, 46(19):1655 – 1658
- 路凤香, 郑建平. 1996. 华北地台古生代岩石圈地幔特征及深部过程. 见:池际尚, 路凤香主编. 华北地台金伯利岩及古生代岩石圈地幔特征. 北京:科学出版社, 215 – 274
- 路凤香, 郑建平, 李伍平, 陈美华, 成中梅. 2000. 中国东部显生宙地幔演化的主要样式:“蘑菇云”模型. *地质前缘*, 7(1):97 – 107
- 盛英明, 夏群科, 丁强, 杨晓志, 于慧敏, 郝艳涛. 2005. 大别山榴辉岩中石榴石的结构水:红外光谱分析. *矿物学报*, 25(4):334 – 341
- 石超, 张泽明. 2007. 超高压变质过程中的元素地球化学行为——CCSD 主孔榴辉岩的矿物化学研究. *岩石学报*, 23(12):3180 – 3200
- 王桂梁, 姜波, 曹代勇, 邹海, 金维浚. 1998. 徐州-宿州弧形双冲-叠瓦扇逆冲断层系统. *地质学报*, 72(3):228 – 236
- 王清海, 许文良, 王冬艳, 林景仟, 刘晓春. 2002. 徐淮地区镁铁质岩石捕虏体单斜辉石中石榴石和石英的出溶. *高校地质学报*, 8(4):407 – 415
- 王清海, 许文良, 王冬艳, 林景仟, 高山. 2003. 徐淮地区中生代深部地壳的物质组成热状态——深源捕虏体证据. *大地构造与成矿学*, 27(4):362 – 371
- 王清海. 2003. 徐淮地区中生代侵入杂岩及深源捕虏体的岩石学和地球化学:对华北地块东部中生代岩石圈演化的制约. 博士学位论文. 长春:吉林大学地球科学学院
- 王清海, 许文良, 王冬艳, 林景仟. 2004. 徐州-宿州地区中生代埃达克质岩石岩浆起源深度的限定——深源捕虏体温度-压力条件证据. *地质论评*, 50(4):351 – 359
- 王清海, 许文良, 王冬艳, 林景仟, 高山. 2005. 榴辉岩类捕虏体的地球化学特征及其构造意义——来自徐淮地区中生代侵入杂岩中的信息. *地球科学*, 30(4):413 – 420
- 王汝成, 王硕, 邱检生, 倪培. 2005. CCSD 主孔揭示的东海超高压榴辉岩中金红石:微量元素地球化学及其成矿意义. *岩石学报*, 21(2):465 – 474
- 王汝成, 邱检生, 倪培, 胡建, 朱霞. 2006. 苏鲁超高压榴辉岩中的钦成矿作用:大陆板块汇聚边界的成矿作用. *地质学报*, 80(12):1828 – 1835
- 徐珏, 陈毓川, 王登红, 余金杰, 李纯杰, 傅旭杰, 陈振宇. 2004. 中国大陆科学钻探主孔 100 ~ 2000m 超高压变质岩中的钛矿化. *岩石学报*, 20:119 – 126
- 许文良, 王清海, 刘晓春, 林景仟, 王冬艳. 2003. 徐-淮地区早侏罗世侵入杂岩体中单斜辉石岩捕虏体的矿物组合及演化. *地球科学*, 28(2):173 – 178
- 许文良, 王清海, 王冬艳, 裴福萍, 高山. 2004. 华北克拉通东部中生代岩石圈减薄过程与机制:中生代火成岩和深源包体证据. *地质前缘*, 11(3):309 – 317
- 余金杰, 陈振宇, 王平安, 李晓峰, 黄建平, 王辉. 2006a. 苏北榴辉岩中金红石的微量元素地球化学特征. *岩石学报*, 22(7):1883 – 1890
- 余金杰, 徐珏, 陈振宇, 王登红, 陈毓川, 王平安, 李晓峰. 2006b. 中国大陆科学钻探过程主孔榴辉岩中金红石微量元素地球化学特征. *地质学报*, 80(12):1839 – 1845
- 张泽明, 肖益林, 沈昆, 高勇军. 2005. 苏鲁超高压榴辉岩的石榴石生长成分环带及变质作用 *P-T* 轨迹. *岩石学报*, 21(3):809 – 818
- 张泽明, 许志琴, 刘福来, 游振东, 沈昆, 杨经绥, 李天福, 陈世忠. 2004. 中国大陆科学钻探工程主孔 (100 ~ 2050 m) 榴辉岩岩石化学研究. *岩石学报*, 20(1):27 – 42
- 郑建平. 1999. 中国东部地幔置换作用与中生代岩石圈减薄. 武汉:中国地质大学出版社, 1 – 126
- 宗克清, 刘勇胜, 柳小明, 张辉斌. 2006. CCSD 主孔 100 ~ 1100 m 榴辉岩中单矿物的原位微区微量元素地球化学研究. *岩石学报*, 22(7):1891 – 1904