

东天山地区黄山东与香山镁铁质—超镁铁质杂岩体对比

陈继平^{1,2}, 廖群安^{2*}, 张雄华², 罗婷², 郭东宝², 胡兆初³

1. 陕西省地质调查中心, 陕西西安 710016

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 黄山东与香山镁铁质—超镁铁质杂岩体隶属于东天山北部黄山—镜儿泉镁铁质—超镁铁质岩带, 受北东东走向的黄山—镜儿泉韧性剪切带控制, 二者岩石组成差异较大, 黄山东杂岩主要由辉石橄榄岩和辉长岩组成, 主量元素化学组成属钙碱性—拉斑玄武系列, 而香山杂岩主要由辉石橄榄岩、橄榄辉石岩、角闪辉长岩、辉绿岩组成, 属拉斑玄武系列。微量元素地球化学特征显示二者相对富集大离子亲石元素(K、Sr、Ba), 高场强元素(Pb、U), 而相对亏损高场强元素(Nb、P), 适度亏损(Zr、Hf), 但其稀土配分模式不同, 黄山东杂岩显示轻稀土弱富集, 具OIB型的特征, 而香山岩体为平坦型。二者均为尖晶石稳定域不同熔融程度的产物, 侵位过程中主要发生了橄榄石、辉石、斜长石的分离结晶和不同程度的地壳混染。采用LA-ICP-MS法获得黄山东辉长岩与香山角闪辉长岩锆石U-Pb年龄分别为 277 ± 1.1 Ma、 285 ± 1.1 Ma。二者形成于相同的构造背景下, 是岩石圈地幔根部发生拆沉, 软流圈地幔物质底侵并导致岩石圈地幔发生部分熔融的产物, 构造环境为后碰撞向板内阶段转变的岩石圈间歇性伸展期。

关键词: 镁铁质—超镁铁质杂岩体; 黄山东; 香山; 锆石; 岩浆源区; 后碰撞伸展; 地球化学。

中图分类号: P595; P597

文章编号: 1000-2383(2013)06-1183-14

收稿日期: 2012-12-01

Contrast of Huangshandong and Xiangshan Mafic-Ultramafic Complex, East Tianshan

CHEN Ji-ping^{1,2}, LIAO Qun-an^{2*}, ZHANG Xiong-hua², LUO Ting², GUO Dong-bao², HU Zhao-chu³

1. Shaanxi Center of Geological Survey, Xi'an 710016, China

2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. State Key Laboratory Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Controlled by the NEE-trending Huangshan-Jingerquan ductile shear zone, the Huangshandong and Xiangshan mafic-ultramafic complex belongs to the Huangshan-Jingerquan mafic-ultramafic rock belt located in the north of East-Tianshan. Huangshandong is characterized by being of calc-alkalic and tholeiitic series and being composed of pyroxene peridotite and gabbro, whereas Xiangshan mafic-ultramafic rocks are made up of pyroxene peridotite, olivine pyroxenite, hornblende gabbro and diabase, belonging to the tholeiitic series. Both rocks are enriched in large ion lithophile elements (such as K, Sr, Ba) and high field strength elements (such as Pb, U), depleted in high field strength elements (such as Nb, P) and slightly depleted in high field strength elements (such as Zr, Hf). However, they are different in the REE pattern, with Huangshandong showing the enrichment of LREE, similar to OIB features, while the Xiangshan rocks presenting the flat pattern of REE. They are the result of partial melting from the spinel source region and magma experienced olivine, pyroxene, plagioclase and amphibole. But they are subject to crust assimilation contamination to a different extent. Using the LA-ICP-MS method, we obtain the age of Huangshandong and Xiangshan at 277 ± 1.1 Ma and 285 ± 1.1 Ma respectively, which demonstrates they generated from the same tectonic setting, resulted from the lithospheric delamination at the root and the upwelling of asthenosphere in the partial melting of lithospheric mantle, corresponding to post-collision intermittent extension setting.

Key words: mafic-ultramafic complex; Huangshandong; Xiangshan; zircon; magma source; post-collision extension; geochemistry.

基金项目: 中国地质调查局地质调查工作项目(No. 1212011085469)。

作者简介: 陈继平(1987—), 硕士研究生, 主要从事矿物学、岩石学、矿床学研究。E-mail: dddxyjc@163.com

* 通讯作者: 廖群安, E-mail: qanliao@cug.edu.cn

中国西北部由若干地体和构造单元组成,是中亚造山带的一部分(Jahn, 2004),而天山造山带是中亚巨型复合造山系的中国境内部分(夏林圻等, 2004),东天山是中亚地区天山造山系的主要组成部分之一(李锦轶等, 2006). 自 20 世纪 70 年代末以来,在天山—阿尔泰地区发现并探明了喀拉通克、黄山、黄山东、香山等在内的一套与铜镍硫化物矿床有关的超镁铁—镁铁质杂岩体(图 1). 由于其不仅具有巨大的经济价值,而且其形成地质环境特殊,一大批地质学家关注此地,并展开了关于成矿规律、成矿地质背景、成矿动力学演化规律等一系列研究,取得了丰硕的成果(姬金生等, 1998;张连昌, 1999;韩春明等, 2002;秦克章等, 2002, 2003;古学伟和郭全, 2007;李金祥等, 2007;木合塔尔·扎日等, 2010). 但对这套超镁铁—镁铁质杂岩体的构造环境及其成因仍存在许多争议,主要有活动大陆边缘阿拉斯加型岩浆活动(郭继春等, 1992)、古生代洋脊蛇绿岩(白云来, 1993)、弧后盆地引张环境岩浆热侵位(顾连兴等, 1994)、弧间伸展混杂堆积(朱文斌等, 1996)、碰撞后弛张伸展深断裂(秦克章等, 2002)、地幔柱活动(Zhou *et al.*, 2004)、岩石圈地幔拆沉(Han *et al.*, 2004;陈波等, 2011)、俯冲洋壳熔融(王玉往等, 2004)和岩浆内侵(顾连兴等, 2007)等不同的观点.

黄山—镜儿泉铜镍成矿带是我国重要的大型铜镍矿基地,处于区域布伽重力和航磁高值区的边部,其西起兰新铁路,向东延伸至外蒙古,东西伸展约几

百公里,形成了若干与基性—超基性复式杂岩体有关的“东疆型”铜镍硫化物矿床(顾连兴等, 1994). 黄山东与香山作为黄山—镜儿泉最具代表型的 2 个大—中型铜镍硫化物矿床,其含矿杂岩体岩石学特征及其地质构造背景,对于区域成矿地质背景研究与成矿地质要素综合推断有重要意义. 本文通过对二者岩石学、矿物学、岩石地球化学及锆石年代学的对比研究,探索二者的岩浆源区、岩浆演化过程及其岩浆动力学背景的差异,为进一步研究该区积累基础地质资料.

1 区域地质背景

黄山东和香山镁铁质—超镁铁质杂岩位于康古尔—黄山断裂与秋格明塔什—苦水断裂两条深大断裂带之间,平行于康古尔—黄山深大断裂的次级断裂分布,隶属于北东东走向的黄山—镜儿泉韧性剪切带(图 2),区内基性—超基性岩体呈脉状,扁豆状,透镜状,拉长的菱形体产出,岩体走向与构造带的走向一致(王玉往等, 2004). 黄山东超镁铁—镁铁质杂岩侵入于下石炭统梧桐窝子组,该组为一套深灰色—灰绿色海相喷发岩,主要岩性为细碧玢岩、灰绿玢岩、安山玢岩、斜长斑岩、石英钠长斑岩、霏细斑岩及相对应的同质凝灰岩、凝灰质砂岩、凝灰质粉砂岩及少量粉砂岩、细砂岩;香山镁铁质—超镁铁质杂岩侵入于下石炭统干墩组,干墩组为一套深灰色—

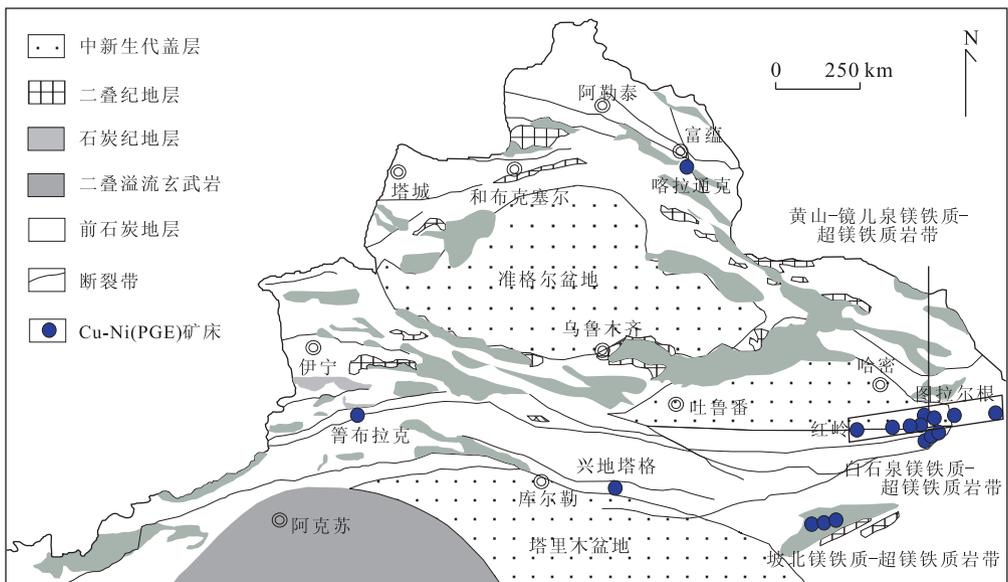


图 1 新疆与岩浆型 Cu-Ni(PGE)硫化物矿床有关的镁铁—超镁铁岩体分布(据王京彬和徐新, 2006)

Fig. 1 Distribution of magmatic Cu-Ni (PGE) sulphide-bearing mafic-ultramafic intrusions in northern Xinjiang

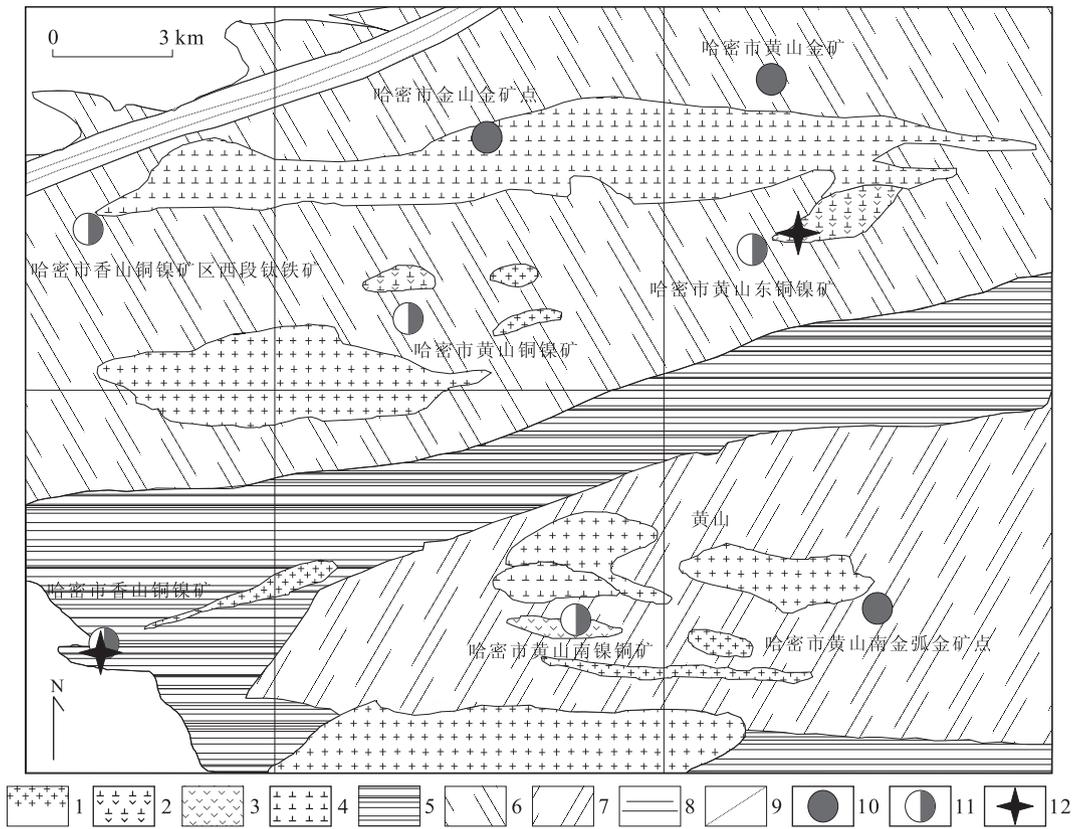


图 2 黄山地区地质略图(据新疆 1:250 000 沁城幅建造构造图改编)

Fig. 2 Geological sketch of Huangshan area

1. 花岗岩体; 2. 辉长岩—闪长岩体; 3. 辉长岩体; 4. 闪长岩体; 5. 下石炭干墩组; 6. 下石炭梧桐窝子组; 7. 长城系星星峡群; 8. 第三系; 9. 断裂; 10. 金矿点; 11. 铜镍矿点; 12. 研究区

灰黑色浅变质的硅质岩、泥质岩、泥质硅质岩、初糜棱细凝灰岩、凝灰质砂岩、石英砂岩、复矿砂岩夹灰岩、泥灰岩、霏细岩、石英钠长斑岩及少量的基性火山岩(蔡士赐, 1999)。

秦克章等(2002)获得香山岩体中含矿辉长岩锆石 SHRIMP 年龄为 285 ± 1.2 Ma, Zhou *et al.* (2004)测得黄山西闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 269 ± 2 Ma, Han *et al.* (2004)用 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年方法确定喀拉通克 1 号岩体和黄山东岩体分别形成于 287 ± 5 Ma 和 274 ± 3 Ma, 顾连兴等(2006)测得黄山西岩体中辉长岩相 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄为 284.5 ± 2.5 Ma, Han *et al.* (2010)测得香山辉长岩 SIMS 锆石 U-Pb 年龄为 279.6 ± 1.1 Ma, 肖庆华等(2010)测定了香山西钛铁辉长岩的 SIMS 锆石 U-Pb 年龄为 278.6 ± 1.8 Ma, Mao *et al.* (2003)对黄山东铜镍硫化物矿石的 Re-Os 同位素测年, 获得等时线年龄数据为 282 ± 20 Ma, Zhang *et al.* (2008b)对喀拉通克 1 号 2 号及黄山东铜镍硫化物矿石的 Re-Os 测年, 获得

等时线年龄数据分别为 282.5 ± 4.8 Ma、 290.2 ± 6.9 Ma、 284 ± 14 Ma。前人研究表明, 黄山—镜儿泉超镁铁—镁铁质杂岩带是在早二叠世(290~270 Ma)形成的。

2 样品测试方法

主微量元素测试由澳实矿物实验室(ALS Chemex)完成, 主量元素采用 ME-ICP85 分析方法, 其首先用硼酸锂熔融, 然后熔融物稀硝酸消解, 再稀释定容, 最后采用等离子体发射光谱定量分析; 多元素采用 ME-MS61 分析方法, 其结果采用四酸消解, 质谱光谱仪综合定量分析得出; 稀土元素采用 ME-MS81 分析方法, LiBO_2 熔融, 质谱仪定量分析; 亚铁分析采用 Fe-VOL05 方法, 酸消解, 重铬酸钾滴定测量。

锆石样品的粉碎加工以及锆石分离挑选由河北省廊坊市诚信地质服务有限公司完成, 制靶及锆石 U-Pb 年龄在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产

资源国家重点实验室进行。采用 LA-ICP-MS 仪器进行分析,激光剥蚀孔径为 32 μm ,脉冲 8 Hz,以 He 作为剥蚀物质载气。样品分析流程为每测定 5 个样品点测定一次锆石标准 91500,在开始测量和测定结束后分别测定 Nist610、91500、GJ-1 标样。锆石年龄以国际标准 91500 锆石作为外标,元素含量采用 NIST SRM610 作外标,以 Si 作为内标测定锆石中的 U/Th 和 Pb 含量,详细的数据处理及方法参见文献(Horn *et al.*, 2000; Kosler *et al.*, 2002)。

3 岩相学特征

根据前人的工作成果,黄山东与香山岩体均为同期多阶段侵入的复式岩体(夏明哲,2009)。不同的学者将其划分为不同的侵入阶段,但主体上划分为 3 个侵入阶段。黄山东岩体主体由第二次侵入阶段辉长岩相构成,而香山第一阶段侵位的辉长岩相构成岩体的主体部分,二者主要造岩矿物为橄榄石、辉石、斜长石及角闪石,香山杂岩出现较多的褐色角闪石。镜下观察表明,黄山和香山杂岩具有包橄结构(图 3a)、变余辉长结构(图 3b)、嵌晶含长结构(图

3c)及辉绿结构(图 3d)等超镁铁—镁铁质岩石的典型结构。橄榄岩中橄榄石半自形—自形粒状结构,粒径 0.8~1.2 mm,表面发育裂理,部分蛇纹石化,仅可见假象(图 3a)。辉石大部分为普通辉石,粒径 0.4~1.0 mm。辉石发生中等纤闪石化,纤闪石呈放射状产出。斜长石呈板状,粒径 1.2~2.0 mm,发育较强高岭土化及钠黝帘石化。香山角闪辉长岩中角闪石多呈不规则粒状产出,中—粗粒结构,粒径 2~5 mm,大晶体中可见针状的斜长石(图 3c)。

4 岩石化学特征

样品的常量元素和微量元素测试数据表明(表 1),除香山 XS2-3 角闪辉长岩样品含有较多钛铁矿导致其 FeO、TiO₂ 含量较高外,其他香山与黄山东超镁铁岩石均表现出高 MgO、FeO,低 TiO₂、AlK、CaO、Al₂O₃ 含量的特征,但黄山东超镁铁岩更富 MgO 而贫 Al₂O₃,MgO(25.9%~31.8%)、Al₂O₃(3.19%~4.83%),香山超镁铁岩 MgO(22.9%~24.22%)、Al₂O₃(8.94%~12.12%),相对超镁铁岩石,黄山东与香山镁铁质岩石均表现出低 MgO、

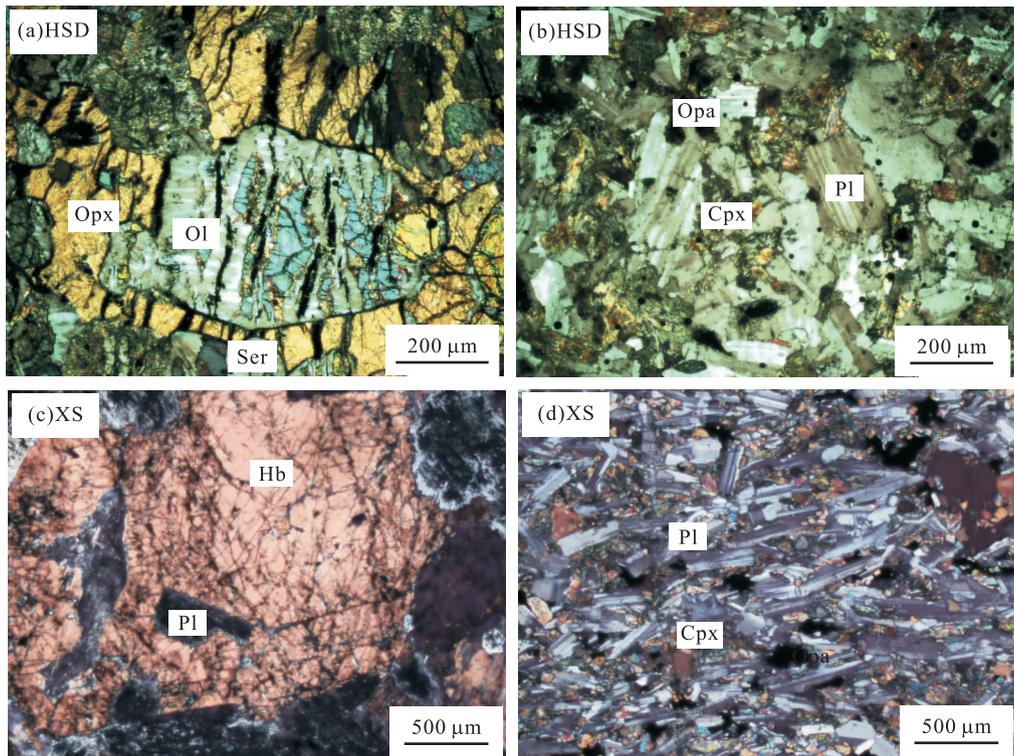


图 3 黄山东—香山超镁铁—镁铁质岩石典型结构显微照片

Fig. 3 The typical textures of ultramafic-mafic rocks from Huangshandong and Xiangshan
Ol. 橄榄石; Cpx. 单斜辉石; Opx. 斜方辉石; Pl. 斜长石; Hb. 角闪石; Opa. 不透明矿物

表 1 黄山东与香山镁铁质—超镁铁质杂岩常量元素(%)和微量元素(10^{-6})分析结果
Table 1 The major elements (%) and trace elements (10^{-6}) of the Huangshan mafic-ultramafic rocks

矿点	黄山东							香山					
样号	D017-3	D001-1	D001-2	D003-1	D010	D017-1	D017-2	XS2-2	XS2-5	XS1-5	XS2-3	XS2-6	XS2-4
岩性	辉石橄榄岩			辉长岩				辉石橄 榄岩	橄榄辉 石岩	角闪辉 长岩			辉绿岩
SiO ₂	39.20	47.80	46.50	50.00	50.50	54.30	46.30	36.82	41.56	46.34	42.32	46.37	47.65
TiO ₂	0.29	0.30	0.32	0.53	2.86	1.08	2.29	0.20	0.35	1.92	4.18	2.25	1.99
Al ₂ O ₃	4.83	3.19	3.35	15.70	14.00	16.80	21.60	12.12	8.94	17.43	14.81	16.87	17.16
Fe ₂ O ₃ ^T	11.25	9.78	9.52	7.35	12.80	7.34	7.05	10.46	10.57	9.91	15.32	7.30	10.43
MnO	0.15	0.17	0.17	0.13	0.20	0.14	0.09	0.15	0.16	0.17	0.28	0.12	0.18
MgO	31.80	25.90	26.10	9.83	4.57	5.97	6.26	24.22	22.90	7.00	7.64	9.90	8.27
CaO	1.96	8.89	7.96	10.30	7.24	8.46	11.60	5.06	6.97	9.30	10.00	8.22	10.57
Na ₂ O	0.28	0.44	0.54	2.49	4.03	3.32	2.69	0.20	0.59	4.12	3.46	4.29	2.60
K ₂ O	0.19	0.15	0.09	0.08	1.74	1.12	0.08	0.03	0.12	0.29	0.23	0.19	0.28
P ₂ O ₅	0.050	0.050	0.020	0.070	0.530	0.160	0.020	0.001	0.022	0.342	0.001	0.051	0.002
LOI	2.87	4.82	9.36	2.74	1.14	1.00	1.71	8.91	6.14	2.09	1.64	3.72	0.84
Total	99.54	99.39	99.36	99.22	99.61	99.69	99.69	98.17	98.32	98.91	99.88	99.28	99.97
FeO	5.51	5.18	7.25	4.50	5.43	5.67	5.60	8.00	8.08	7.58	11.72	5.58	7.98
Mg [#]	86.1	86.5	86.8	75.7	45.4	65.5	67.4	84.4	83.5	62.2	53.8	76.0	64.9
δ	0.07	0.11	-0.06	0.94	4.44	1.74	2.33	-0.01	-0.35	-20.00	1.80	5.80	5.90
La	4.0	7.4	4.2	4.9	22.9	10.8	3.0	0.5	1.8	1.8	1.8	7.6	5.0
Ce	7.3	13.1	6.3	9.9	50.9	23.8	5.0	0.9	4.4	4.8	5.6	22.1	14.1
Pr	1.00	1.31	0.76	1.29	6.98	3.29	0.70	0.14	0.67	0.82	1.07	3.54	2.30
Nd	4.6	5.3	3.8	6.2	30.7	14.6	3.5	0.6	3.2	4.6	6.6	17.9	12.1
Sm	1.13	1.20	1.13	1.75	7.19	3.88	1.13	0.20	0.96	1.75	2.36	5.55	4.25
Eu	0.32	0.40	0.41	0.77	2.32	1.30	0.88	0.10	0.38	1.10	1.08	1.92	2.22
Gd	1.21	1.34	1.41	2.09	6.92	4.19	1.43	0.25	1.18	2.29	3.23	6.81	5.46
Tb	0.19	0.23	0.24	0.35	1.05	0.71	0.23	0.04	0.19	0.36	0.50	1.01	0.91
Dy	1.20	1.46	1.53	2.22	5.89	4.27	1.42	0.25	1.22	2.45	3.34	7.13	6.25
Ho	0.24	0.30	0.31	0.43	1.09	0.82	0.28	0.06	0.25	0.50	0.68	1.34	1.18
Er	0.71	0.85	0.91	1.33	3.06	2.47	0.81	0.17	0.70	1.37	1.87	3.86	3.30
Tm	0.11	0.13	0.14	0.19	0.43	0.35	0.11	0.03	0.11	0.21	0.28	0.54	0.45
Yb	0.65	0.78	0.87	1.20	2.75	2.35	0.66	0.17	0.61	1.23	1.62	3.16	2.67
Lu	0.09	0.11	0.12	0.18	0.40	0.32	0.08	0.03	0.09	0.19	0.24	0.46	0.36
Rb	6.4	2.5	1.7	1.5	26.5	33.7	1.3	0.4	3.3	2.1	1.3	1.3	3.3
Ba	49.9	33.9	26.1	26.8	279.0	209.0	53.8	4.7	17.7	90.4	105.5	182.5	116.5
Th	0.63	0.38	0.40	0.76	1.93	2.21	0.19	0.05	0.37	0.39	0.08	0.33	0.05
U	0.22	0.17	2.16	0.28	1.59	0.83	0.06	200.00	1 000.00	2 200.00	1 900.00	1 500.00	2 500.00
Nb	1.2	0.5	0.8	1.2	14.2	3.4	1.2	0.2	0.7	4.2	3.8	2.6	1.9
Ta	0.1	0.1	0.1	0.3	1.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3	0.2	0.1
Pb	10	21	36	12	8	15	5	5	5	6	5	14	5
Sr	76.9	66.5	82.7	474.0	625.0	393.0	719.0	126.5	119.5	1 045.0	897.0	1 420.0	497.0
Nd	4.6	5.3	3.8	6.2	30.7	14.6	3.5	0.6	3.2	17.9	4.6	12.1	6.6
P	210	110	120	270	2 380	710	80	40	140	1 620	30	270	40
Zr	36	18	22	46	199	117	17	4	23	50	35	45	25
Hf	1.1	0.6	0.8	1.4	5.7	3.4	0.6	0.2	0.7	1.8	1.1	1.7	0.9
Ti	1 690.00	1 760.00	1 870.00	3 030.00	14 900.00	5 850.00	1.13	360.00	1 610.00	11 000.00	23 900.00	12 100.00	11 850.00
Tb	0.19	0.23	0.24	0.35	1.05	0.71	0.88	0.04	0.19	1.01	0.36	0.91	0.50
Y	7.1	8.1	8.6	12.6	30.9	23.8	11 500.0	1.5	7.4	36.7	13.1	31.8	17.7

注:δ=[w(K₂O+Na₂O)²]/[w(SiO₂)-43];Mg[#]=(MgO/40.31)/(MgO/40.31+Fe₂O₃^T×0.899 8/71.85×0.85)×100.

FeO,高 TiO₂、ALK、CaO、Al₂O₃ 含量的特征,且含量相差不大. Mg[#] 常常作为鉴别原生岩浆的重要标志之一, Hess(1993)认为,与地幔橄榄岩平衡的原生岩浆 Mg[#] >68. 黄山东与香山辉石橄榄岩及橄榄

辉石岩样品 Mg[#] 普遍较高(Mg[#] =83.5~86.8),说明其主要为岩浆早期结晶的矿物相堆积而成;而辉长岩的 Mg[#] 相对较低, Mg[#] =45.42~75.70,明显属于演化后的岩浆结晶产物.

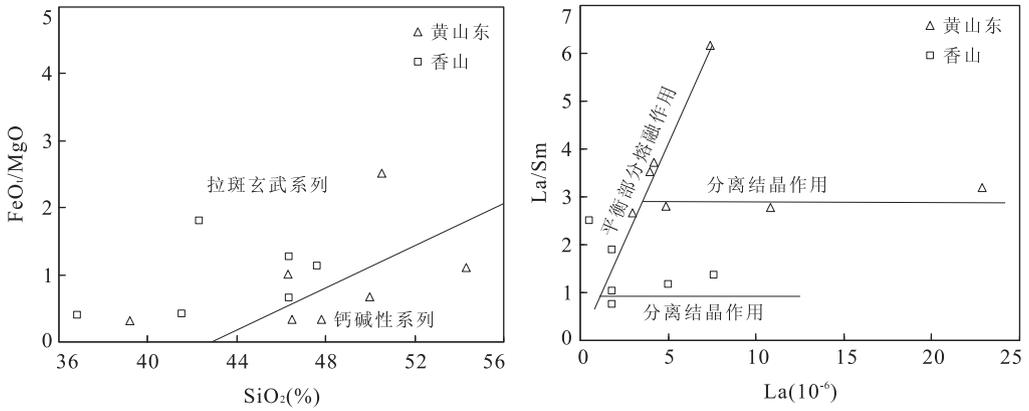


图 4 SiO₂-FeO_i/MgO 与 La-La/Sm 图

Fig. 4 SiO₂-FeO_i/MgO and La-La/Sm diagrams

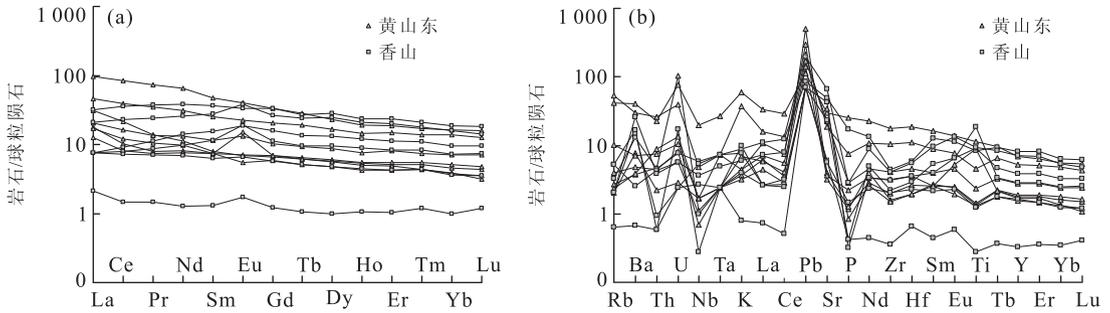


图 5 镁铁质—超镁铁质岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)(标准化数据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized rare earth element patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element patterns (b)

在 FeO_i/MgO-SiO₂ 图解上,香山超镁铁—镁铁质杂岩全部落在拉斑玄武岩系列区域,黄山东部分落入钙碱性区域,部分位于拉斑玄武岩系列范围内. 根据 Allegre and Minster(1978)的研究,岩浆在分离结晶作用中 La/Sm 基本保持为常数,相反,在平衡部分熔融过程中,La 相对 Sm 更容易在熔体中富集,因此 La-La/Sm 图解可以很容易地判别一组相关岩石的成岩作用方式. 图 4 显示平衡部分熔融作用和分离结晶作用是黄山东和香山镁铁质—超镁铁质岩石的两种成岩作用方式,但二者并非同源,La/Sm 比值的不同表明二者岩浆演化的差异.

黄山东与香山超镁铁岩的稀土总量明显较低,分别为 $\sum REE = 22.13 \times 10^{-6} \sim 33.91 \times 10^{-6}$, $\sum REE = 4.94 \times 10^{-6} \sim 23.16 \times 10^{-6}$,仅为球粒陨石的 1.93~13 倍左右,特别是香山 XS2-2 辉石橄榄岩样品稀土总量仅为 4.94×10^{-6} ,其样品镜下橄榄石均已蛇纹石化,仅存橄榄石假象,大多数辉石颗粒已透闪石化. 从超镁铁岩到镁铁质岩 $\sum REE$ 逐渐增大,稀土元素球粒陨石标准化配分曲线为平坦型或轻稀土弱富集型(图 5a). 黄山东杂岩 $(La/Yb)_N =$

2.93~6.81, $(La/Sm)_N = 1.71 \sim 3.98$, $(Gd/Yb)_N = 1.34 \sim 2.08$,香山杂岩 $(La/Yb)_N = 0.8 \sim 2.12$, $(La/Sm)_N = 0.88 \sim 1.21$, $(Gd/Yb)_N = 1.22 \sim 1.78$,说明香山超镁铁—镁铁质杂岩相对于黄山东杂岩轻重稀土分馏与轻重稀土内部分馏较弱,稀土配分曲线为平坦型,暗示其地幔源区均一性程度较高,而黄山东为类似于 OIB 型的轻稀土弱富集模式. 稀土配分曲线中 Eu 变化明显,黄山东辉石橄榄岩均具有弱 $\delta Eu(0.84 \sim 0.99)$ 异常,辉长岩中除 D017-2 外,其他辉长岩 δEu 均在 1.01~2.12,表明岩浆分离结晶过程中,长石在晚期岩相中富集. 香山除 XS1-5 角闪辉长岩具有弱 δEu 异常外,其他样品 δEu 均在 1.09~1.68,表明斜长石的堆晶作用.

在原始地幔标准化的多元素蛛网图上(图 5b),样品总体形态基本一致,相对富集大离子亲石元素(K, Sr, Ba),高场强元素(Pb, U),而相对亏损高场强元素(Nb, P),适度亏损(Zr, Hf),香山 XS2-3 与黄山东 D017-2 辉长岩富集 Ti 元素,可能与其不透明矿物有关.

5 锆石年代学

用常规方法从样品中分离锆石,黄山东样品 D003-1 中的锆石呈半自形—自形,粒径一般为 112~220 μm ,个别大于 300 μm ,短柱状、长柱状居多,少数为不规则的粒状,锆石长短轴比一般为 1.17~1.96,阴极发光图像显示多数锆石具有较宽的结晶环带,为典型的岩浆锆石.香山样品 XS1-1 中的锆石多为半自形,粒径一般为 80.6~193.5 μm ,个别大于 200 μm ,短柱状—粒状为主,个别为长柱状,锆石长短轴比为 1.09~2.95,但震荡生长环带发育较差或不发育(图 6).

辉长岩(D003-1)样品共测定了 20 个锆石颗粒,锆石 $\text{Th}/\text{U}=0.33\sim 0.95$,位于岩浆锆石的范围内(表 2).大多数数据点在 U-Pb 谐和图上落在谐和线上(图 7),其中一个点(虚线圆圈)可能由于 Pb 丢失偏离谐和线较远,其他测点均位于谐和线上,最终获得下交点年龄为 $277\pm 1.1\text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=0.081$), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $276.9\pm 1.3\text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=0.080$).

角闪辉长岩(XS1-1)样品共测定了 21 颗锆石,所测锆石 Th/U 变化范围为 0.38~0.72,均大于 0.3,表现为岩浆锆石的高 Th/U 比特征,锆石多为半自形短柱状晶体,具岩浆锆石特征,但振荡生长环带发育较差或不发育.其中一个测点年龄较大(虚线圆圈),可能为捕获锆石,其余 20 个测点获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄 $285.6\pm 0.89\text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=0.107$),下交点年龄为 $285\pm 1.1\text{ Ma}$

($\text{MSWD}=0.106$)(图 7),应为辉长岩的结晶年龄.

6 讨论

6.1 岩浆源区

镁铝榴石和尖晶石的稀土元素分配系数存在很大的差异,一般认为,低 La/Yb 比值反映相对较高程度的部分熔融,或者源区存在尖晶石的残留相;高 La/Yb 比值表明较小程度的部分熔融,或者源区存在石榴石的残留相(夏明哲等,2008; Zhang *et al.*, 2008a).因此尖晶石和镁铝榴石可以反映源区的深度及幔源的部分熔融程度,图 9 中表明黄山东与香山镁铁质—超镁铁质岩是尖晶石稳定域内部分熔融的产物.前述黄山东杂岩 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=2.93\sim 6.81$,香山杂岩 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=0.8\sim 2.12$,反映二者为尖晶石稳定域不同熔融程度的产物(图 8).

Mckenzie and Bickle(1988)根据地幔动力学熔融模式表明,熔融程度 $<1\%$ 时,熔体是不可能从地幔中分凝出来的,源区为亏损地幔的实验模拟也表明,只有部分熔融程度 $<1\%$,才能产生富集轻稀土元素的配分模式.黄山东镁铁质—超镁铁质杂岩轻稀土明显富集 $((\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}\approx 2.93\sim 6.81)$,因此不可能为亏损地幔源区的产物;但前述镁铁质—超镁铁质岩石样品均具有高 $\text{Mg}^{\#}$ 特征,反映其具有幔源特征(Cox, 1980). Zhou *et al.* (2004)对黄山地区镁铁质岩石进行了详细的同位素研究,结果表明其具有低 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ (0.016~0.161)、 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (0.7025~0.7053),高 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ (0.139~0.190)、

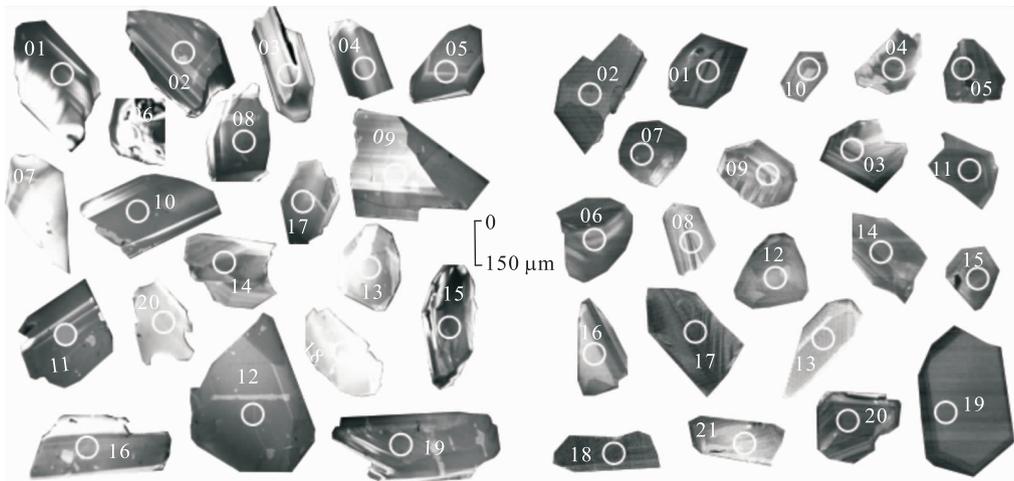


图 6 锆石 CL 图像

Fig. 6 CL images of zircons

表 2 单颗粒锆石 LA-ICP-MS 测年结果

Table 2 LA-ICP-MS dating results for zircon grains

测点	含量(10^{-6})				年龄(Ma)					
	Pb	Th	U	Th/U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	σ
D003-01	24.3	197.4	467.3	0.42	276.9	3.0	267.0	7.2	183.4	77.8
D003-02	72.1	746.9	1316.6	0.57	276.6	2.4	293.3	5.3	416.7	48.1
D003-03	21.3	195.5	393.4	0.50	276.1	2.8	292.3	7.9	433.4	72.2
D003-04	29.3	263.0	552.8	0.48	276.8	2.9	280.4	6.8	305.6	63.0
D003-05	44.9	309.0	862.0	0.36	276.8	3.2	307.2	8.3	1133.0	350.5
D003-06	87.3	1153.3	1542.6	0.75	276.3	3.3	265.3	5.4	164.9	45.4
D003-07	24.7	165.0	493.8	0.33	276.4	3.5	265.8	7.6	172.3	70.4
D003-08	69.9	785.4	1278.0	0.61	276.9	2.5	277.3	5.2	276.0	43.5
D003-09	23.2	171.1	445.7	0.38	279.7	3.8	324.3	10.9	638.9	76.7
D003-10	101.3	1394.8	1756.8	0.79	276.7	3.7	277.2	5.5	361.2	111.1
D003-11	78.3	1256.5	1317.6	0.95	276.8	2.7	262.8	5.4	146.4	55.5
D003-12	66.9	797.2	1210.0	0.66	276.9	2.6	272.2	5.5	233.4	53.7
D003-13	26.2	190.3	507.3	0.38	276.0	3.0	276.0	7.6	261.2	70.4
D003-14	45.8	495.3	869.5	0.57	276.5	3.3	275.9	6.2	255.6	53.7
D003-15	72.9	726.2	1351.0	0.54	276.6	3.0	272.8	5.6	233.4	59.2
D003-16	48.7	512.0	892.8	0.57	276.5	3.0	277.2	6.3	264.9	58.3
D003-17	51.5	560.1	930.7	0.60	276.3	3.7	284.8	8.5	598.2	260.2
D003-18	19.1	138.3	367.8	0.38	277.7	3.3	275.7	7.9	261.2	75.0
D003-19	61.2	701.0	1109.6	0.63	279.1	2.8	271.1	5.3	190.8	19.4
D003-20	30.3	287.1	564.8	0.51	277.1	2.6	272.5	6.5	227.8	67.6
XS1-1-01	35.8	264.8	692.5	0.38	284.7	2.4	282.4	5.2	333.4	44.4
XS1-1-02	13.1	111.0	243.3	0.46	284.2	2.3	280.7	8.6	261.2	77.8
XS1-1-03	26.7	219.8	525.0	0.42	284.4	2.5	265.1	5.7	101.9	49.1
XS1-1-04	39.3	357.2	744.8	0.48	284.1	1.8	263.4	4.9	76.0	44.4
XS1-1-05	67.0	676.9	1268.8	0.53	284.2	1.9	281.1	4.0	253.8	33.3
XS1-1-06	51.7	462.1	1002.5	0.46	284.5	2.0	272.9	3.7	172.3	2.8
XS1-1-07	93.3	1043.2	1743.4	0.60	284.9	2.0	276.9	3.6	211.2	27.8
XS1-1-08	26.0	286.2	499.5	0.57	284.6	2.1	282.6	4.7	257.5	40.7
XS1-1-09	51.3	523.8	960.5	0.55	284.8	1.6	305.0	4.3	461.2	34.3
XS1-1-10	34.4	272.0	685.7	0.40	284.7	1.8	266.0	4.3	98.2	42.6
XS1-1-11	69.0	794.7	1290.9	0.62	284.8	2.4	269.8	3.7	200.1	31.5
XS1-1-12	21.7	177.2	427.9	0.41	284.3	2.4	282.7	6.2	264.9	55.5
XS1-1-13	17.1	161.2	329.9	0.49	284.9	2.2	273.2	7.0	183.4	67.6
XS1-1-14	76.1	1028.1	1357.3	0.76	284.4	1.7	291.4	6.1	346.4	33.3
XS1-1-15	32.1	255.4	632.3	0.40	284.9	1.8	265.9	7.2	109.4	36.1
XS1-1-16	20.7	207.5	393.7	0.53	284.2	2.1	268.1	9.4	146.4	62.0
XS1-1-17	35.2	340.4	670.9	0.51	284.3	1.8	263.7	8.1	101.9	50.0
XS1-1-18	69.8	516.0	1398.4	0.37	284.3	2.1	268.0	6.5	200.1	31.5
XS1-1-19	19.7	134.6	397.6	0.34	284.6	2.4	267.7	7.5	124.2	55.6
XS1-1-20	44.8	450.2	784.0	0.57	305.1	1.7	290.9	5.3	183.4	37.0
XS1-1-21	80.2	1030.5	1424.0	0.72	287.5	2.2	289.4	4.2	322.3	35.2

$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ (0.5129~0.5131), $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 在 +6.7~+9.3, 结果表明岩浆的确来源于亏损地幔或 EMII 区. 因此黄山东镁铁质—超镁铁质杂岩轻稀土富集可能是由于幔源岩浆受到了早期俯冲洋壳交代的影响, 或幔源岩浆在上升侵位过程中受到了地壳的混染. 图 7 显示黄山东约 55% 的样品来源于受俯冲物质改造的地幔源区.

6.2 岩浆演化

6.2.1 分离结晶

Co 是橄榄石的相容元素, 主要呈类质同象替换橄榄石中的 Mg, 其次可以进入斜方辉石中, 在 $\text{Mg}^\#$ -Co 关系图中, 黄山东及香山镁铁质岩与 Co 几乎没有相关性, 而超镁铁岩 Co 垂直变化较明显, 说明有橄榄石的堆晶作用; Spath *et al.* (2001) 证明如果有相当数量的单斜辉石的分离结晶, 则会造成 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值随 $\text{Mg}^\#$ 的增加, 在

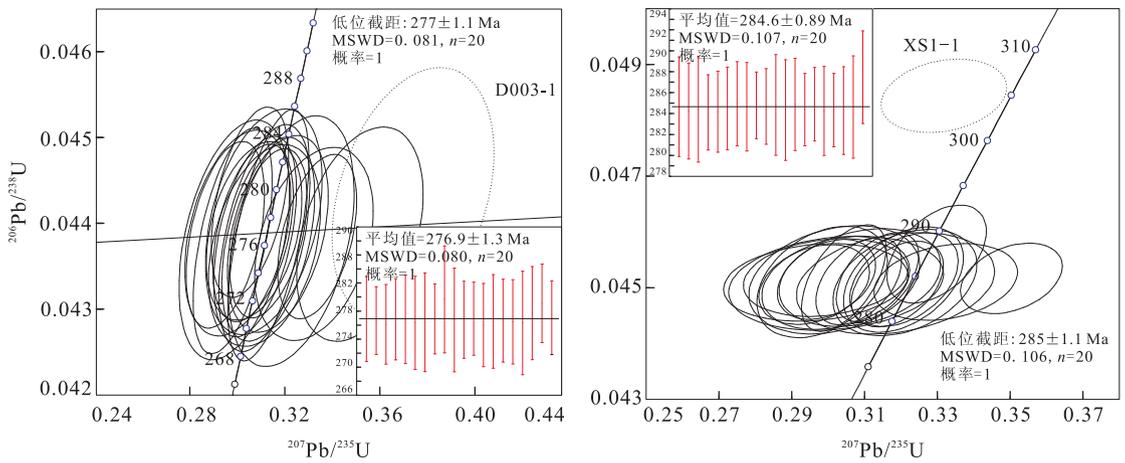


图 7 锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 7 Concordia U-Pb diagram of zircon from the mafic-ultramafic rocks

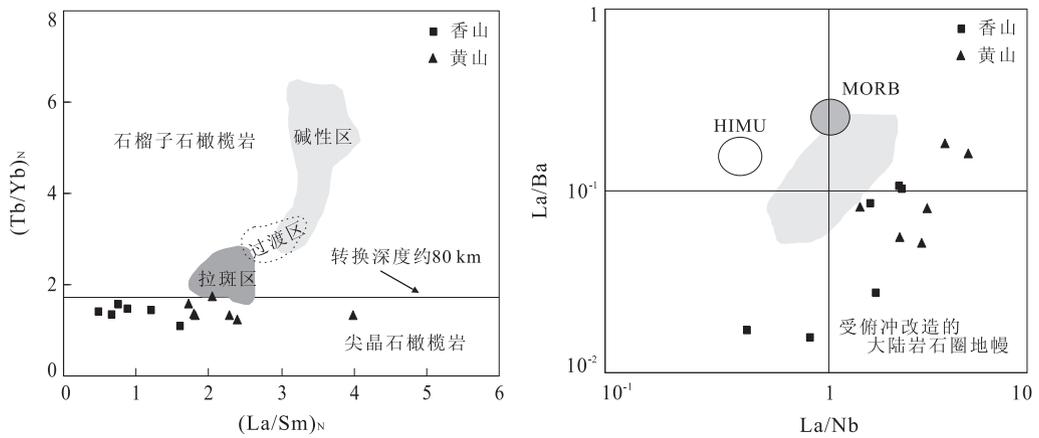


图 8 黄山镁铁质-超镁铁质杂岩岩浆源区判别图

Fig. 8 Discriminating figure of magma source from the mafic-ultramafic rocks

二者关系图中,超镁铁质橄榄岩基本未发生变化,而镁铁质辉长岩变化趋势较为明显,这与镜下观察一致,辉石主要为普通辉石,仅有少量的紫苏辉石见于辉石橄榄岩中.火成岩中 Al_2O_3 含量仅次于 SiO_2 ,岩浆中 Al_2O_3 含量高,则粘度大,暗示长石含量高,在 $Mg^{#}$ 与 Al_2O_3 关系图中,黄山东与香山超镁铁岩几乎没有变化,而镁铁质岩呈现相对较好的相关性,暗示长石的分离结晶明显,同样,斜长石的分离结晶会造成 CaO/Na_2O 比值的变化,图中超镁铁岩 CaO/Na_2O 比值基本没有变化,而辉长岩中随着斜长石的分离结晶, CaO/Na_2O 比值明显递增(图 9).这些变化规律表明在二者成岩过程中主要发生了橄榄石、单斜辉石、斜长石的分离结晶/堆晶.

部分熔融程度高低或深部岩浆分异程度是造成岩石轻重稀土元素分馏程度不同的原因之一,图 3 显示了黄山东与香山杂岩体经历了不同程度的部分

熔融及岩浆分异,这可能是黄山东与香山稀土形态差异的主要原因. Hole *et al.* (1984) 认为如果存在俯冲物质的加入,则会造成负 Ce^* 异常,黄山东与香山镁铁质-超镁铁质杂岩大多数具有弱的 Ce^* 异常(0.83~0.99),这可能与洋壳俯冲物质的加入有关.

6.2.2 同化混染 来自 Sr、Nd、O、Pb、Os 等同位素以及微量元素的证据表明,北疆地区铜镍硫化物矿床的岩浆确实受到地壳物质的混染(王玉往等, 2010),但是混染程度差异较大,根据前人研究,香山岩体与黄山东源区略有差异,具有 MORB 和 EMI 组分特征. 而我们知道,EMII 型地幔常与陆壳有亲缘关系,常为壳幔交代成因,上述黄山东岩体的源区具有 EMII 型特征,可能暗示其受到陆壳混染的可能性更大,而香山稀土及源区特征显示其几乎未受到陆壳混染或受到同等程度微弱的混染. Mao *et al.* (2003) 对黄山东及香山岩体矿石硫化物 Re-Os

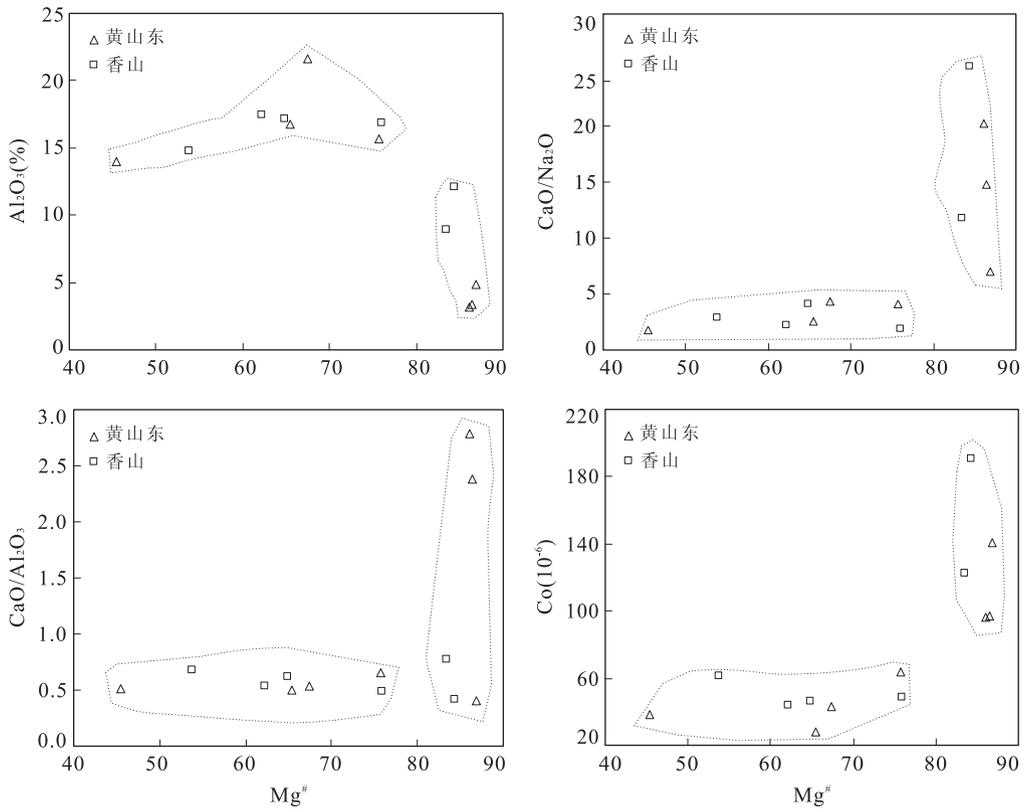


图 9 $Mg^{\#}$ 对 Al_2O_3 、 CaO/Na_2O 、 CaO/Al_2O_3 、 Co 图解

Fig. 9 Diagram of $Mg^{\#}$ vs. Al_2O_3 、 CaO/Na_2O 、 CaO/Al_2O_3 、 Co

同位素研究表明,岩浆在运移及侵位过程中的确受到了不同程度的地壳混染.最近夏明哲(2009)对黄山东岩体中样品进行混染模拟,表明岩体遭受了5%~8%的中—上地壳物质的混染作用.

6.3 岩浆活动的动力学背景

长期以来,天山古生代洋盆最终闭合的时限一直存在较大的争议,主要原因在于缺乏确切的年龄证据.许多学者根据新疆北部地区主要蛇绿岩带来自化石及不整合接触面的证据,判断早石炭世洋壳已经基本消失(李锦轶等,1990;朱宝清和冯益民,1994;夏林圻等,2002,2004).值得关注的是,天山及邻区早石炭世火山岩系与下伏地层(包括前寒武纪结晶基底和前石炭纪褶皱基底)之间呈广泛的区域性不整合接触,已经得到地质学界的认同.例如,东天山北部七角井组与下伏泥盆系岛弧火山岩系呈角度不整合接触,天山西段特克斯县城南,存在约80~100 m的由砾岩、砂砾岩和砂岩构成的粗碎屑岩层,其与新元古界青白口系的灰岩—大理岩—白云岩层呈角度不整合接触,这套粗碎屑岩可见韵律构造,具有碰撞造山作用产生的特征性代表沉积序列的山前磨拉石建造.所以夏林圻等(2002)认为早

石炭世应当代表天山古生代洋盆最终闭合时限的上限.一般认为,碰撞造山过程从大洋岩石圈的消亡到大陆岩石圈碰撞后挤压应力场转化为区域伸展应力场的一段时间约50~100 Ma(李继亮等,1999),王瑜等(2002)通过对东天山觉罗塔格地区克孜尔塔格岩体角闪石、黑云母及钾长石 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年代学研究,认为东天山造山带NS向挤压作用转化为右行走滑时限为276 Ma,如此推算天山古生代洋盆闭合于376~326 Ma,为晚泥盆世—早石炭世,最晚早石炭世闭合.

近年来,许多地质学家对沿康古尔塔格—黄山断裂的分布的镁铁质—超镁铁质部分岩体进行了锆石U-Pb和矿石Re-Os测年,表明这些岩体大多数形成于298~270 Ma之间(Mao *et al.*, 2008).笔者所测辉长岩中的锆石U-Pb年龄也位于其间.研究发现天山及邻近地区分布许多A型花岗岩带,例如黄山—镜儿泉镁铁质—超镁铁质岩邻近卡拉麦里—哈尔里克碱性花岗岩带,测年数据表明,这些花岗岩形成于270~300 Ma(Han *et al.*, 1997),与镁铁质—超镁铁质岩体具有时间上的耦合性,表明它们形成于相同的构造背景和时代. Loiselle and Wones

(1979)年定义 A 型花岗岩是产生在板内裂谷环境并且具有碱性,富 Nb、Zr、REE、负 Eu 异常,低镁钙含量等特点的一种岩石. Eby (1990, 1992) 和 Whalen *et al.* (1996) 进一步研究认为 A 型花岗岩可以形成于各种伸展构造环境,从大陆边缘弧后盆地拉张到后碰撞伸展最后到板内构造环境. 尽管其确切的岩石成因尚有争议,但可以确定的是它对于伸展构造环境的指示具有不可替代的意义,至于是否形成于弧后拉张、后造山带伸展或者板内环境,则需要年代学及地球化学数据加以限制和解释. 黄山东与香山杂岩相对富集大离子亲石元素 (K、Sr、Ba), 高场强元素 (Pb、U), 而相对亏损高场强元素 (Nb、P), 适度亏损 (Zr、Hf), 稀土配分曲线基本为平坦型, 其与岛弧岩浆岩与 MORB 型玄武岩地球化学特征有很大的差别, 何况前述黄山东及香山超镁铁—镁铁质杂岩受到了不同程度的壳源物质混染, 可见其形成于弧后拉张的几率较小, 可能为后碰撞伸展或板内构造环境, 但前述东天山 NS 向挤压结束于 276 Ma, 那么黄山东与香山超镁铁—镁铁质杂岩形成于 284 Ma 左右, 显然处于后碰撞向板内阶段的转变时期, 故 A 型花岗岩成为其典型标志. 该期并非纯粹的板内环境, 仍有间歇性的伸展, 先前主碰撞期岩石圈急剧增厚, 增厚的岩石圈地幔根部发生拆沉, 软流圈地幔物质底侵并导致岩石圈地幔发生部分熔融, 最终岩浆上升侵位, 产生大规模岩浆作用.

7 结论

黄山东与香山镁铁质—超镁铁质岩体年代学表明其形成于早二叠世, 为尖晶石稳定域不同熔融程度的产物, 岩浆侵位过程中经历了橄榄石、辉石、斜长石及角闪石的分离结晶和不同程度的地壳混染作用. 是岩石圈地幔根部发生拆沉, 软流圈地幔物质底侵并导致岩石圈地幔发生部分熔融的产物, 处于后碰撞向板内转变阶段岩石圈间歇性伸展时期, 其成矿地质背景与石炭纪干墩组与梧桐窝子组火山岩构造地质背景明显不同, 为典型后碰撞间歇性伸展期重要地质热成矿事件.

References

Allegre, C. J., Minster, J. F., 1978. Quantitative Models of Trace Element Behavior in Magmatic Processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 38(1): 1—25. doi: 10.1016/0012-821X(78)90123-1

Bai, Y. L., 1993. Geological-Geochemical Characteristics and Tectonic Significance of the Ophiolites Block in Huangshan Area, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 11(1): 34—42 (in Chinese with English abstract).

Cai, T. C., 1999. Lithostratigraphy of the Xinjiang Uygur Autonomous Region. China University of Geosciences Press, Wuhan, 239—241 (in Chinese).

Chen, B., Xia, M. Z., Wang, B. Y., et al., 2011. Lithochemistry and Petrogenesis of Huangshan Intrusion, East Tianshan, Xinjiang. *Mineral Petrol*, 31(1): 11—21 (in Chinese with English abstract).

Cox, K. G., 1980. A Model for Flood Basalt Volcanism. *Journal of Petrology*, 21(4): 629—650. doi: 10.1093/petrology/21.4.629

Eby, G. N., 1990. The A-Type Granitoids: A Review of Their Occurrence and Chemical Characteristics and Speculations on Their Petrogenesis. *Lithos*, 26(1—2): 115—134. doi: 10.1016/0024-4937(90)90043-Z

Eby, G. N., 1992. Chemical Subdivision of the A-Type Granitoids: Petrogenetic and Tectonic Implications. *Geology*, 20(7): 641—644. doi: 10.1130/0091-7613(1992)020<0641:CSOTAT>2.3.CO;2

Gu, L. X., Zhu, J. L., Guo, J. C., et al., 1994. The East Xinjiang-Type Mafic-Ultramafic Complexes in Orogenic Environments. *Acta Petrologica Sinica*, 10(4): 339—356 (in Chinese with English abstract).

Gu, L. X., Zhang, Z. Z., Wu, C. Z., et al., 2006. Some Problems on Granites and Vertical Growth of the Continental Crust in the Eastern Tianshan Mountains, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1103—1120 (in Chinese with English abstract).

Gu, L. X., Zhang, Z. Z., Wu, C. Z., et al., 2007. Permian Geological, Metallurgical and Geothermal Events of the Huangshan-Jingerquan Area, Eastern Tianshan: Indications for Mantle Magma Intraplating and Its Effect on the Crust. *Acta Petrologica Sinica*, 23(1): 2869—2880 (in Chinese with English abstract).

Gu, X. W., Guo, Q., 2007. Geological Characteristics and Metallogeny of East Tianshan Mountain Jinshan. *Xinjiang Geology*, 25(3): 274—278 (in Chinese with English abstract).

Guo, J. C., Hu, S. X., Gu, L. X., et al., 1992. Geological Features and Tectonic Evolution of East Tianshan Caledonian Trench-Arc-Basin Fold Belt. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences Edition)*, 28(3): 431—438 (in Chinese with English abstract).

Han, B. F., Wang, S. G., Jahn, B. M., et al., 1997. Depleted-Mantle Source for the Ulungur River A-Type Gran-

- ites from North Xinjiang, China; Geochemistry and Nd-Sr Isotopic Evidence, and Implication for Phanerozoic Crustal Growth. *Chemical Geology*, 138(3-4): 135-159. doi:10.1016/S0009-2541(97)00003-X
- Han, B. F., Ji, J. Q., Sun, B., et al., 2004. SHRIMP Zircon U-Pb Ages of Kalatongke No. 1 and Huangshandong Cu-Ni-Bearing Mafic-Ultramafic Complexes, North Xinjiang, and Geological Implications. *Chinese Science Bulletin*, 49(2): 2424-2429. doi:10.1007/BF03183432
- Han, C. M., Mao, J. W., Yang, J. M., et al., 2002. Type of Late Palaeozoic Endogenetic Metal Deposits and Related Geodynamical Evolution in the East Tian. *Acta Geologica Sinica*, 76(2): 222-234 (in Chinese with English abstract).
- Han, C. M., Xiao, W. J., Zhao, G. C., et al., 2010. In-Situ U-Pb, Hf and Re-Os Isotopic Analyses of the Xiangshan Ni-Cu-Co Deposit in Eastern Tianshan (Xinjiang), Central Asia Orogenic Belt: Constraints on the Timing and Genesis of the Mineralization. *Lithos*, 120(3): 547-562. doi:10.1016/j.lithos.2010.09.019
- Hess, P. C., 1993. Phase Equilibria Constraints on the Origin of Ocean Floor Basalts. *Geophysical Monograph-American Geophysical Union*, 71: 67-67. doi:10.1029/GM071p0067
- Hole, M. J., Saunders, G. F., Marriner, T. J., 1984. Subduction of Pelagic Sediments; Implication for the Origin of Ce-Anomalous Basalts from the Mariana Island. *Journal of the Geological Society*, 141: 453-472. doi:10.1144/gsjgs.141.3.0453
- Horn, I., Rudnick, R. L., McDonough, W. F., 2000. Precise Elemental and Isotope Ratio Determination by Simultaneous Solution Nebulization and LA-ICP-MS: Application to U-Pb Geochronology. *Chemical Geology*, 167: 405-425. doi:10.1016/S0009-2541(99)00168-0
- Jahn, B. M., 2004. The Central Asian Orogenic Belt and Growth of the Continental Crust in the Phanerozoic. *Geological Society, London, Special Publications*, 226(1): 73-100. doi:10.1144/GSL.SP.2004.226.01.05
- Ji, J. S., Feng, Y. C., Zhang, L. C., 1998. The Metallogeny of Metallogenic Areas in Eastern Tianshan. *Mineral Deposits*, 17: 197-200 (in Chinese).
- Kosler, J., Fonneland, H., Sylvester, P., et al., 2002. U-Pb Dating of Detrital Zircons for Sediment Provenance Studies—A Comparison of Laser Ablation ICP-MS and SIMS Techniques. *Chemical Geology*, 182: 605-618. doi:10.1016/S0009-2541(01)00341-2
- Li, J. L., Sun, S., Hao, J., et al., 1999. Time Limit of Collision Event of Collision Orogens. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 315-32 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. X., Qin, K. Z., Xu, X. W., et al., 2007. Geochemistry of Baishiquan Cu-Ni-Bearing Mafic-Ultramafic Complex in East Tianshan, Xinjiang, Constraints on Ore Genesis and Tectonic Setting. *Mineral Deposits*, 26(1): 43-57 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. Y., He, G. Q., Xu, X., et al., 2006. Crustal Tectonic Framework of Northern Xinjing and Adjacent Regions and Its Formation. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 148-168 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. Y., Xiao, X. C., Tang, Y. Q., et al., 1990. Main Characteristics of Late Paleozoic Plate Tectonic in the Southern Part of East Junggar, Xinjiang. *Geological Review*, 36(4): 305-316 (in Chinese with English abstract).
- Loiselle, M. C., Wones, D. R., 1979. Characteristics and Origin of Anorogenic Granites. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 11: 468.
- Mao, J. W., Pirajno, F., Zhang, Z. H., et al., 2008. A Review of the Cu-Ni Sulphide Deposits in the Chinese Tianshan and Altay Orogens (Xinjiang Autonomous Region, NW China): Principal Characteristics and Ore-Forming Processes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(2-4): 184-203. doi:10.1016/j.jseaes.2007.10.006
- Mao, J. W., Yang, J. M., Qu, W. J., et al., 2003. Re-Os Age of Cu-Ni Ores from the Huangshandong Cu-Ni Sulfide Deposit in the East Tianshan Mountains and Its Implication for Geodynamic Processes. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 220-226. doi:10.1111/j.1755-6724.2003.tb00565.x
- McKenzie, D., Bickle, M. J., 1998. The Volume and Composition of Melt Generated by Extension of the Lithosphere. *Journal of Petrology*, 29(3): 625-679. doi:10.1093/petrology/29.3.625
- Muhetaer, Z., Zhang, X. F., Chen, B., et al., 2010. The Structure Evolution of Eastern Tianshan Mts Orogenic Zone in Late Paleozoic and Polymetal Mineral Resources Metallogenic Regularity. *Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition)*, 27(1): 5-12 (in Chinese with English abstract).
- Qin, K. Z., Fang, T. H., Wang, S. L., et al., 2002. Plate Tectonics Division, Evolution and Metallogenic Settings in Eastern Tianshan Mountains, NW-China. *Xinjiang Geology*, 20(4): 222-234 (in Chinese with English abstract).
- Qin, K. Z., Peng, X. M., San, J. Z., et al., 2003. Type Major Ore Deposits, Division of Metallogenic Belts in Eastern Tianshan, and Discrimination of Potential Prospects of

- Cu, Au, Ni Mineralization. *Xinjiang Geology*, 21(2): 143—150 (in Chinese with English abstract).
- Spath, A., Leroex, A., Akech, N. O., 2001. Plume-Lithosphere Interaction and the Origin of Continental Rift-Related Alkaline Volcanism—The Chyulu Hills Volcanic Province, Southern Kenya. *Journal of Petrology*, 42(4): 765—787. doi:10.1093/petrology/42.4.765
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts; Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313—345. doi:10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19
- Wang, J. B., Xu, X., 2006. Post-Collision Tectonic Evolution and Metallogenesis in Northern Xinjiang, China. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 23—31 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Li, J. Y., Li, W. Q., 2002. ⁴⁰Ar—³⁹Ar Chronological Evidence of Dextral Shear and Tectonic Evolution of the Eastern Tianshan Orogenic Belt. *Xinjiang Geology*, 20(4): 315—319 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. W., Wang, J. B., Wang, L. J., et al., 2004. REE Characteristics of Cu-Ni Sulfide Deposits in the Hami Area Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 20(4): 935—948 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. W., Wang, J. B., Wang, L. J., et al., 2010. PGE Metallogenesis Related to Mafic-Ultramafic Complex in North Xinjiang. *Earth Science Frontiers*, 17(1): 137—152 (in Chinese with English abstract).
- Whalen, J. B., Jenner, G. A., Longstaffe, F. J., et al., 1996. Geochemical and Isotopic (O, Nd, Pb and Sr) Constraints on A-Type Granite Petrogenesis Based on the Topsails Igneous Suite, Newfoundland Appalachians. *Journal of Petrology*, 37(6): 1463—1489. doi:10.1093/petrology/37.6.1463
- Xia, M. Z., 2009. The Mafic-Ultramafic Intrusions in the Huangshan Region Eastern Tianshan, Xinjiang; Petrogenesis and Mineralization Implication (Dissertation) Chang'an University, Xi'an, 22—46 (in Chinese with English abstract).
- Xia, M. Z., Jiang, C. Y., Qian, Z. Z., et al., 2008. Geochemistry and Petrogenesis for Hulu Intrusion in East Tianshan, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 24(12): 2749—2760 (in Chinese with English abstract).
- Xia, L. Q., Xia, Z. C., Xu, X. Y., et al., 2002. Some Thoughts on the Characteristics of Paleozoic Ocean-Continent Transition from Tianshan Mountains. *Northwestern Geology*, 35(4): 9—20 (in Chinese with English abstract).
- Xia, L. Q., Xia, Z. C., Xu, X. Y., et al., 2004. Carboniferous Tianshan Igneous Megaprovince and Mantle Plume. *Geological Bulletin of China*, 23(9): 903—910 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, Q. H., Qin, K. Z., Tang, D. M., et al., 2010. Xiangshanhaxi Composite Cu-Ni-Ti-Fe Deposit Belongs to Comagmatic Evolution Product; Evidence from Ore Microscopy, Zircon U-Pb Chronology and Petrological Geochemistry, Hami, Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 503—522.
- Zhang, L. C., 1999. Study and Prognosis on Geological-Geochemical Dynamics of Mineralization in Kanggultag Gold Copper Ore Belt, East Tianshan (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing, 31—34 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. H., Zhang, H. F., Tang, Y. J., et al., 2008a. Geochemistry of Permian Bimodal Volcanic Rocks from Central Inner Mongolia, North China; Implication for Tectonic Setting and Phanerozoic Continental Growth in Central Asian Orogenic Belt. *Chemical Geology*, 249(3—4): 262—281. doi:10.1016/j.chemgeo.2008.01.005
- Zhang, Z. H., Mao, J. W., Du, A. D., et al., 2008b. Re-Os Dating of two Cu-Ni Sulfide Deposits in Northern Xinjiang, NW China and Its Geological Significance. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2(2—4): 204—217. doi:10.1016/j.jseaes.2007.10.005
- Zhou, M. F., Leshner, C. M., Yang, Z. X., et al., 2004. Geochemistry and Petrogenesis of 270 Ma Ni-Cu-(PGE) Sulfide-Bearing Mafic Intrusions in the Huangshan District, Eastern Xinjiang, Northwest China; Implications for the Tectonic Evolution of the Central Asian Orogenic Belt. *Chemical Geology*, 209(3—4): 233—257. doi:10.1016/j.chemgeo.2004.05.005
- Zhu, B. Q., Feng, Y. M., 1994. Plate Tectonics and Evolution in West Junggar of Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 12(2): 91—105 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, W. B., Ma, R. S., Wang, C. Y., 1996. Tectonic Attribute of Huangshan-Jingerquan Complex in Eastern Xinjiang, China. *Scientific Geologica Sinica*, 31(1): 22—32 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白云来, 1993. 新疆黄山地区蛇绿岩块的地质、地球化学特征及构造意义. *新疆地质*, 11(1): 34—42.
- 蔡士赐, 1999. 新疆维吾尔自治区岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社, 239—241.
- 陈波, 夏明哲, 王帮耀, 等, 2011. 新疆东天山黄山岩体岩石地

- 球化学特征及岩石成因. 矿物岩石, 31(1): 11—21.
- 顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 等, 2006. 关于东天山花岗岩与陆壳垂向增生的若干认识. 岩石学报, 22(5): 1103—1120.
- 顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 等, 2007. 东天山黄山—镜儿泉地区二叠纪地质—成矿—热事件: 幔源岩浆内侵及其地壳效应. 岩石学报, 23(11): 2869—2880.
- 顾连兴, 诸建林, 郭继春, 等, 1994. 造山带环境中的东疆型镁铁—超镁铁杂岩. 岩石学报, 10(4): 339—356.
- 古学伟, 郭全, 2007. 东天山尖山铜矿床地质特征及成矿规律. 新疆地质, 25(3): 274—278.
- 郭继春, 胡受奚, 顾连兴, 等, 1992. 加里东造山带在东天山 ($E 85^{\circ}\sim 95^{\circ}$) 构造格架中的重要地位及其地质特征. 南京大学学报(自然科学), 28(3): 431—438.
- 韩春明, 毛景文, 杨建明, 等, 2002. 东天山晚古生代内生金属矿床类型和成矿作用的动力学演化规律. 地质学报, 76(2): 222—234.
- 姬金生, 丰成友, 张连昌, 1998. 东天山成矿区成矿规律研究. 矿床地质, 17: 197—200.
- 李继亮, 孙枢, 郝杰, 等, 1999. 碰撞造山带的碰撞事件时限的确定. 岩石学报, 15(2): 315—320.
- 李金祥, 秦克章, 徐新旺, 等, 2007. 新疆东天山白石泉 Cu-Ni 硫化物矿床杂岩体的地球化学特征及其对矿床成因和构造背景的制约. 矿床地质, 26(1): 43—57.
- 李锦轶, 何国琦, 徐新, 等, 2006. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨. 地质学报, 80(1): 148—168.
- 李锦轶, 肖序常, 汤耀庆, 等, 1990. 新疆东准噶尔卡拉麦里地区晚古生代板块构造的基本特征. 地质论评, 36(4): 305—316.
- 木合塔尔·扎日, 张晓帆, 陈斌, 等, 2010. 东天山造山带晚古生代构造演化与多金属矿产成矿规律. 新疆大学学报(自然科学版), 27(1): 5—12.
- 秦克章, 方同辉, 王书来, 等, 2002. 东天山板块构造分区, 演化与成矿地质背景研究. 新疆地质, 20(4): 302—308.
- 秦克章, 彭晓明, 三金柱, 等, 2003. 东天山主要矿床类型, 成矿区带划分与成矿远景区优选. 新疆地质, 21(2): 143—150.
- 王京彬, 徐新, 2006. 新疆北部后碰撞构造演化与成矿. 地质学报, 80(1): 23—31.
- 王瑜, 李锦轶, 李文铅, 2002. 东天山造山带右行剪切变形及构造演化的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年代学证据. 新疆地质, 20(4): 315—319.
- 王玉往, 王京彬, 王莉娟, 等, 2004. 新疆哈密黄山地区铜镍硫化物矿床的稀土元素特征及意义. 岩石学报, 20(4): 935—948.
- 王玉往, 王京彬, 王莉娟, 等, 2010. 新疆北部镁铁—超镁铁质岩的 PGE 成矿问题. 地学前缘, 17(1): 137—152.
- 夏明哲, 2009. 新疆东天山黄山岩带镁铁—超镁铁质岩石成因及成矿作用(博士学位论文). 西安: 长安大学, 22—46.
- 夏明哲, 姜常义, 钱壮志, 等, 2008. 新疆东天山葫芦岩体岩石学与地球化学研究. 岩石学报, 24(12): 2749—2760.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等, 2002. 天山古生代洋陆转化特点的几点思考. 西北地质, 35(4): 9—20.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等, 2004. 天山石炭纪大火成岩省与地幔柱. 地质通报, 23(9—10): 903—910.
- 肖庆华, 秦克章, 唐冬梅, 等, 2010. 新疆哈密香山西铜镍—钛铁矿床系同源岩浆分异演化产物——矿相学、锆石 U-Pb 年代学及岩石地球化学证据. 岩石学报, 26(2): 503—522.
- 张连昌, 1999. 东天山康古尔塔格金铜矿带成矿地质地球化学动力学研究及预测(博士学位论文). 北京: 中国地质大学, 31—34.
- 朱宝清, 冯益民, 1994. 新疆西准噶尔板块构造及演化. 新疆地质, 12(2): 91—105.
- 朱文斌, 马瑞士, 王赐银, 1996. 论新疆东部黄山—镜儿泉杂岩带的构造属性. 地质科学, 31(1): 22—32.