

柴北缘锡铁山榴辉岩的地球化学特征*

孟繁聪 张建新 杨经绥 许志琴

MENG FanCong, ZHANG JianXin, YANG JingSui and XU ZhiQin

中国地质科学院地质研究所大陆动力学实验室,北京 100037

Laboratory of Continental Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2002-02-22 收稿, 2003-01-20 改回.

Meng FC, Zhang JX, Yang JS and Xu ZQ. 2003. Geochemical characteristics of eclogites in Xitieshan area, North Qaidam of northwestern China. *Acta Petrologica Sinica*, 19(3):435-442

Abstract Eclogites occur as lenses in gneisses in Xitieshan area, Northern Qaidam. They indicate a whole-rock chemical composition similar to tholeiite with $\text{SiO}_2 = 45.0\% \sim 49.83\%$ and $\text{Al}_2\text{O}_3 = 11.3\% \sim 16.52\%$. REE patterns of eclogites include three types: (1) REE-enriched pattern with $(\text{La}/\text{Yb})_N = 1.74 \sim 2.81$ and $\delta_{\text{Eu}} = 0.86 \sim 1.07$, indicating the characteristics similar to E-MORB; (2) flat pattern with $(\text{La}/\text{Yb})_N = 0.80 \sim 1.22$ and $\delta_{\text{Eu}} = 0.96 \sim 1.20$, similar to T-MORB; (3) LREE depletion pattern with $(\text{La}/\text{Yb})_N = 0.66$ and $\delta_{\text{Eu}} = 1.03$, similar to N-MORB. Eclogites show light enrichment in Rb, Ba, Th, and can be related to crustal contamination. Nd isotopic analyses gave $\epsilon_{\text{Nd}}(0) = 2.52 \sim 10.98$, $\epsilon_{\text{Nd}}(800\text{Ma}) = 3.05 \sim 9.20$, indicating characteristics of an oceanic depleted mantle reservoir. Therefore, we tentatively suggest that the eclogites probably resulted from subduction of oceanic crust. This is obviously different from eclogite of Dabie-Sulu area.

Key words North Qaidam, Eclogite, Geochemical characteristics

摘要 柴北缘锡铁山的榴辉岩呈透镜状分布在片麻岩中,榴辉岩的 SiO_2 为 45.0% ~ 49.83%, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 11.31 \sim 16.52$, 与火成岩中的拉斑玄武质岩石类似。其稀土配分模式有 3 种类型:(1)轻稀土富集型, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 1.74 \sim 2.81$, $\delta_{\text{Eu}} = 0.86 \sim 1.07$, 与 E-MORB 类似;(2)平坦型, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 0.80 \sim 1.22$, $\delta_{\text{Eu}} = 0.96 \sim 1.20$, 与 T-MORB 相似;(3)轻稀土亏损型, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 0.66$, $\delta_{\text{Eu}} = 1.03$, 与 N-MORB 类似。微量元素中 Rb、Ba、Th 略富集,可能与地壳物质的混染有关。 $\epsilon_{\text{Nd}}(0) = 2.52 \sim 10.98$, $\epsilon_{\text{Nd}}(800\text{Ma}) = 3.05 \sim 9.20$, 显示大洋亏损地幔的特征。初步认为榴辉岩是洋壳俯冲的产物,与大别-苏鲁地区榴辉岩的成因明显不同。

关键词 柴北缘;榴辉岩;地球化学

中图法分类号 P588.346

近年来,在中国西部的柴达木盆地北缘和阿尔金山,先后发现了产在长英质片麻岩中的榴辉岩,主要集中在柴北缘大柴旦的鱼卡河、锡铁山、都兰以及阿尔金的且末。目前对这些榴辉岩的研究,侧重于榴辉岩的矿物化学研究并以此讨论榴辉岩所经历的 P - T - t 演化轨迹和峰期变质年代,其次是在榴辉岩及其围岩中寻找残留的岩石经历过超高压变质的证据(张建新等,1998,1999;2000,2001;杨经绥等,1998,2000,2001;宋述光等,2001;刘良等,1996;张雪亭等,1999)。这些研究对探讨中国西部大陆的形成和演化至关重要。榴

辉岩的原岩是发生超高压变质作用形成榴辉岩的物质基础,柴北缘榴辉岩原岩性质及其形成的构造背景的恢复对讨论中国西部大陆乃至整个中国大陆的形成和演化具有同样重要的意义。例如,这些榴辉岩的原岩是形成于大洋环境还是大陆环境?榴辉岩的形成代表了洋壳的俯冲还是陆壳的俯冲?

榴辉岩由于经历了复杂的进变质历史和退变质历史,其原始产状难以恢复,因而其原岩属性和构造环境的确定是一项十分困难的工作。目前在露头上所见到的榴辉岩与围岩

* 本文为国家地质调查项目(200013000170)和国土资源部“十五”重点基础项目(20010201)资助成果。

第一作者简介:孟繁聪,男,1967年生,博士,副研究员,从事火成岩岩石学研究, E-Mail: mengfancong@ccsd.org.cn

的接触关系,反映的是二者在折返过程中经历的共同的变质和变形作用的痕迹。因此,唯一的恢复途径是借助于榴辉岩的岩石化学和地球化学特征来对其原岩的可能性进行讨论。对于这一手段,许多学者也持怀疑态度,原因是某些元素在变质过程中有明显的活动性(凌文黎等,2000;周汉文等,1997;Griffin and Brueckner,1985)。也有许多学者持肯定态度,因为主要元素的含量在变质过程的变化是很小的,通常保留了原岩组分的特征,因而可以用来恢复原岩(Волкова и др.,2001),稀土元素(REE)在榴辉岩相变质作用过程中是稳定的,不活动的(Bernard-Griffiths,1985; Shatsky *et al.*,1990)。高级变质作用对岩石 Sm-Nd 同位素体系的影响不大,可以作为较有效的示踪剂。本文将主要根据榴辉岩的岩石化学和地球化学特征对锡铁山榴辉岩的可能原岩进行讨论。

1 地质背景及榴辉岩的产状

柴北缘的前寒武系是一套中高级变质岩系,主要由斜长角闪岩、云母片岩、片麻岩等组成(达肯大坂群)。早古生代地层发育上奥陶统,主要为火山岩及砂页岩夹灰岩(滩间山群);晚古生代地层则发育上泥盆统和石炭系,是一套陆相粗

碎屑岩、火山岩及海陆交互的含煤碎屑岩沉积。此外,还有少量三叠系出露,主要为云母石英长石杂砂岩、砾岩夹灰岩透镜体。在这些地层中,还分布着大量的花岗岩,据前人资料,其时代分属于早古生代、晚古生代和中生代(青海地质矿产局,1991)。

柴北缘的榴辉岩从西向东在鱼卡河(杨经绥等,1998;李怀坤等,1999)、锡铁山(张建新等,1999)和都兰(杨经绥等,2000)都有出露,向东一直延伸到都兰的沙柳河(张雪亭等,1999;郝国杰等,2001),构成了WNW-ESE走向的长达350km的榴辉岩带(图1)。阿尔金山的榴辉岩主要在且末的江勒萨依出露(Hanson *et al.*,1995;刘良等,1996;张建新等,1999)。通过对柴北缘大柴旦和阿尔金两处的榴辉岩在野外产状、围岩特征、岩石及矿物组合、形成的PT条件、地球化学及原岩特征以及它们的形成时代的对比研究,发现它们具有非常相似的特征,推测阿尔金榴辉岩带和柴北缘榴辉岩带在早古生代是同一条榴辉岩带,后被阿尔金巨型走滑断裂所切割(张建新,1998,1999;许志琴,1999;Zhang *et al.*,2001)。最近在阿尔金和柴北缘地区均发现有超高压变质作用的标志(张建新等,2002;宋述光等,2001),特别是在柴北缘都兰地区的榴辉岩的片麻岩围岩锆石包体中发现有柯石英(杨经绥等,2001),确证了柴北缘超高压(UHP)变质作用的存在。

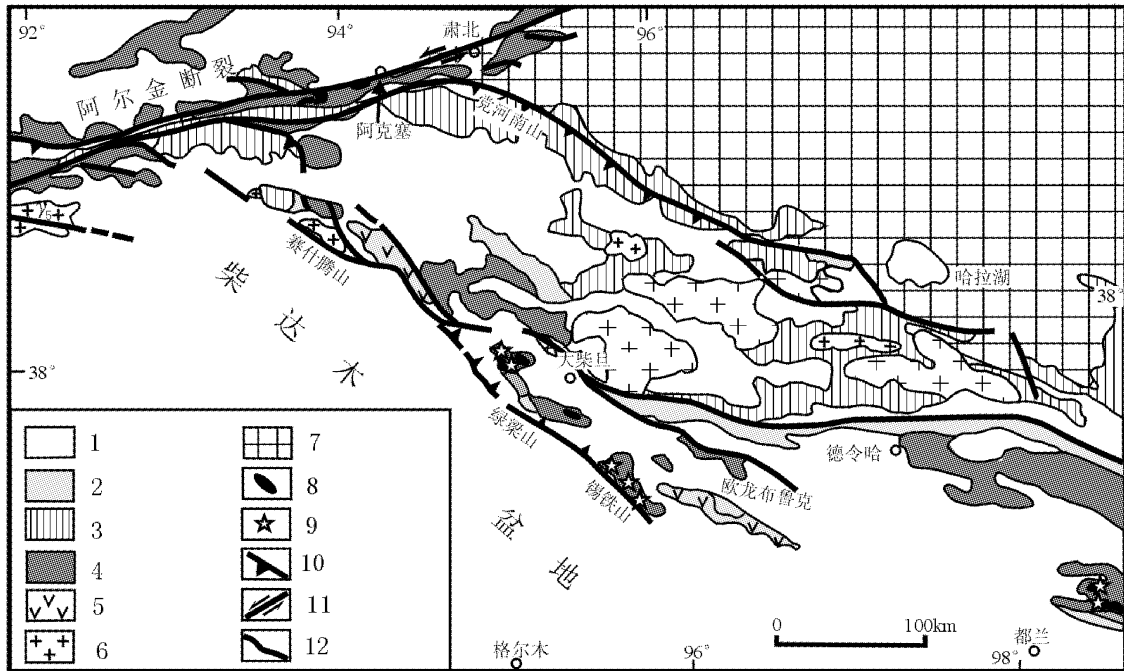


图1 柴北缘地质简图及榴辉岩分布
1-第四系,2-上古生界,3-下古生界,4-元古界,5-火山岩,6-花岗岩,7-祁连山体,8-超基性岩,9-榴辉岩,10-逆冲断层,11-走滑断层,12-断层

Fig. 1 Simplified geological map of North Qaidam Area and location of eclogites

锡铁山的榴辉岩呈数米到近百米的透镜状块体分布在含夕线石的片麻岩中,大多变为石榴麻粒岩和石榴角闪岩,仅在较大的透镜体的中心保存有较新鲜的榴辉岩。榴辉岩的片麻岩围岩主要由长石(30%)、石英(30%)、黑云母(15%~20%)、石榴石(5%~10%)、夕线石(5%)和白云母(5%)组成,显示出副片麻岩的特征,其原岩可能为富铝的泥砂质岩石。围岩普遍受到了高角闪岩相甚至麻粒岩相的变质作用,到目前为止,还没有发现它曾遭受高压变质作用的痕迹。

大柴旦鱼卡河的榴辉岩由一米到数十米大小不等的榴辉岩块体呈透镜状分布于达肯大坂群的片麻岩之中,这些片麻岩主要为含石榴子的长英质片麻岩、斜长角闪片麻岩、含石墨的片麻岩和含石榴子石的白云母片麻岩等。榴辉岩透镜体的长轴平行于围岩片麻理走向(NWW-SEE),一些榴辉岩已退变成石榴角闪岩。榴辉岩的围岩白云母花岗片麻岩主要由长石(35%)、石英(40%)、白云母(10%~15%)等矿物组成,含少量石榴石(<5%),室内岩相学观察及锆石的形态特点显示出正片麻岩的特征。

都兰榴辉岩产在都兰北东40km野马滩西的元古代变质杂岩中。榴辉岩带展布近EW或NW向,与其围岩展布方向一致。榴辉岩呈小透镜体产于云母石英片岩或片麻岩中。沙柳河榴辉岩出露于野马滩东,呈透镜状、带状或团块状产于达肯大坂群片麻岩和超基性杂岩中,榴辉岩透镜体长50~150米,宽25~75米,长轴方向与围岩片麻理一致(张雪亭等,1999)。

上述野外产状表明,柴北缘榴辉岩的围岩相对单一,主要为各类片麻岩,仅有少量产在超基性岩中,如沙柳河的部分榴辉岩(郝国杰,2001)。榴辉岩透镜体的长轴方向与围岩片麻理方向一致,这可能反映了它们经历了共同的晚期退变质历史。

2 榴辉岩的矿物组成

锡铁山榴辉岩的矿物组合相对简单,保存较好的榴辉岩的峰期的矿物组合为石榴子石+绿辉石+金红石+石英,石榴子石主要呈半自形和它形,粒度小于1mm,被斜长石和Cpx+Pl或Amp+Pl组成的冠状体所围绕(矿物代号见Kretz,1983,下同),并显示出被体积扩散所改造的环带特征:具有均匀的核($\text{Prp}_{47-50}\text{Alm}_{28-31}\text{Gr}_{17-22}$)和被退变反应所改造的边($\text{Prp}_{38-45}\text{Alm}_{28-38}\text{Gr}_{20-23}$)。这些特征明显不同于大柴旦榴辉岩的具有生长环带的石榴子石,可能与其生长过程中较高的温度条件有关。另外,一些退变榴辉岩(石榴麻粒岩)的石榴子石具有较低的镁铝榴石的成分(30~38mol%),它们也显示出均匀的核和扩散的边,这些石榴子石可能是在减压过程中新形成或在高温条件下再平衡作用的产物,并且被沿着边部的连续的退变质反应所改造(张建新等,2002)。总体上,锡铁山榴辉岩中石榴子石的镁铝榴石的

成分明显高于大柴旦榴辉岩。绿辉石的硬玉分子含量为22~26mol%,明显较大柴旦榴辉岩的低。绿辉石普遍被细粒CpxII+Pl(7~9mol%)所组成的蠕虫状后成合晶(5~20 μm)和粗粒的网格状后成合晶(20~100 μm)所代替,这种后成合晶又增生有更粗粒的CpxIII(3~5mol%),靠近石榴子石,可见CpxIII围绕石英形成冠状体,这些结构又被Amp+Pl+Ilm的生长所代替。

3 榴辉岩的地球化学特征

选择锡铁山退变程度不同的榴辉岩进行化学分析(表1),分析在国家地质实验测试中心完成,主元素及La、Ce、Nd、Rb、Ba、Sr、Ni、Zr采用ICP-AES方法;FeO采用容量滴定法;K₂O采用原子吸收法;其它元素采用ICP-MS方法。

3.1 主元素

锡铁山榴辉岩的SiO₂为45.0%~49.83%,保存较好的榴辉岩(弱退变榴辉岩)和强退变榴辉岩的SiO₂和Al₂O₃含量没有明显的区别,SiO₂、Al₂O₃含量都比较低,与火成岩中的玄武质岩石类似。MgO、FeO*(FeO+Fe₂O₃)、TiO₂和Na₂O的含量两者差别较大,弱退变榴辉岩MgO含量为13.21%~13.89%,FeO*为8.69%~9.18%,TiO₂为0.44%~0.54%,Na₂O在0.94%~1.11%之间;而强退变榴辉岩的MgO含量为7.43%~9.45%,FeO*为11.47%~13.29%,TiO₂在1.12~1.18%之间,Na₂O为1.52%~2.12%(表1)。在AFM三角图解中(图2),所有样品投在拉斑玄武岩区,根据主量元素特征,还不能确定拉斑玄武岩的形成环境,因为在洋脊、洋岛、岛弧及大陆裂谷环境都有拉斑玄武岩形成,其中岛弧拉斑玄武岩与洋脊拉斑玄武岩特征类似,而洋岛拉斑玄武岩与大陆裂谷拉斑玄武岩特征更接近。

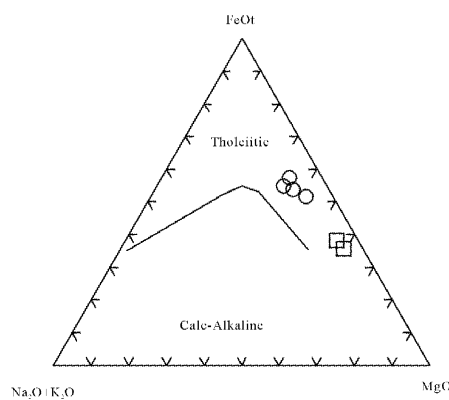


图2 锡铁山榴辉岩的AFM图解

Fig. 2 AFM diagram of eclogite in Xitieshan area

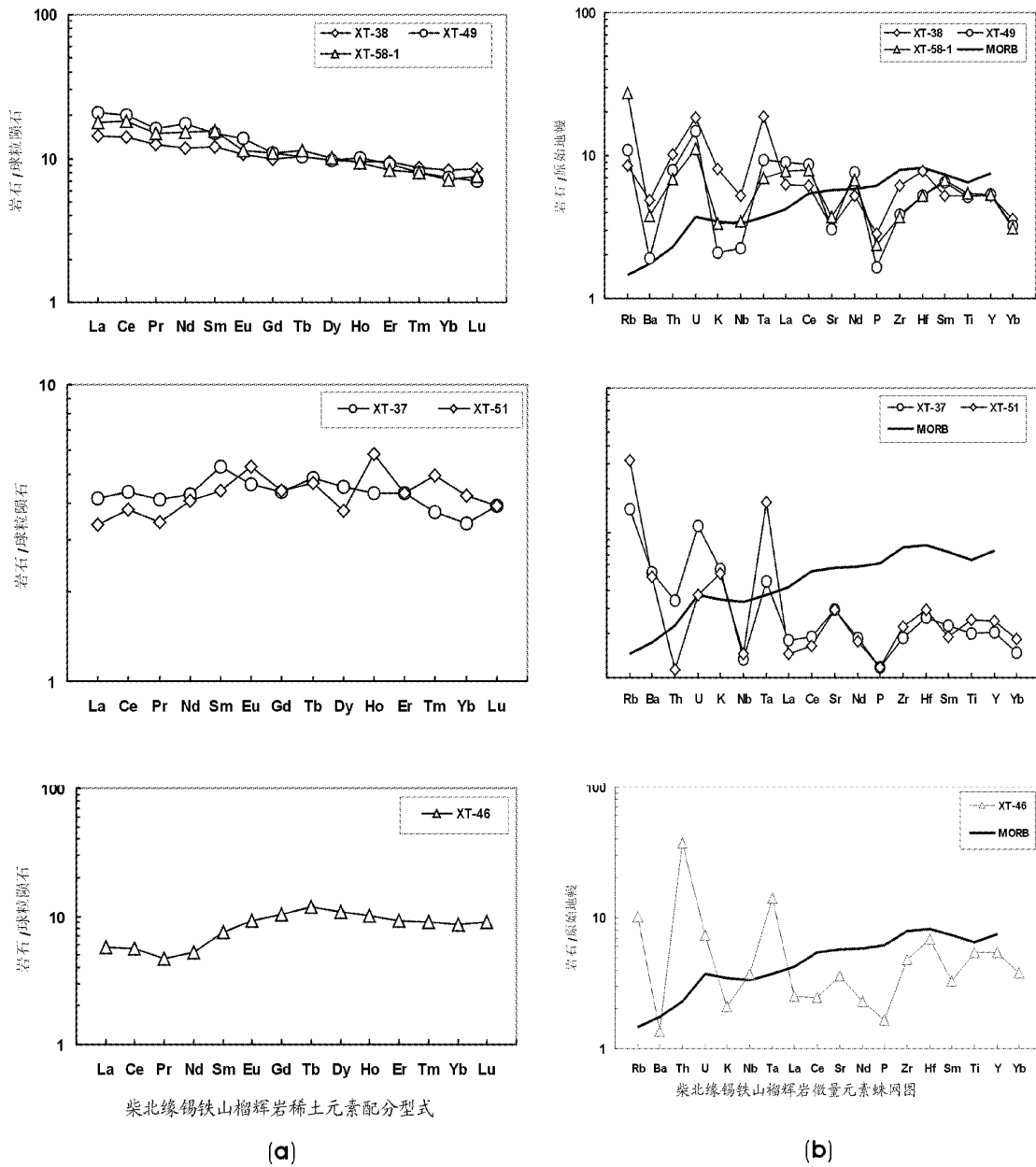


图3 (a) 锡铁山榴辉岩的稀土配分型式; (b) 锡铁山榴辉岩微量元素蛛网图, MORB 为正常洋中脊的平均值 (Rollinson, 1993)

Fig. 3 (a) Chondrite-normalized REE distribution patterns of eclogites from Xitieshan; (b) Primary mantle-normalized spidergrams of trace elements for eclogites from Xitieshan

3.2 稀土和微量元素

根据稀土总量和稀土元素球粒陨石标准化配分模式 (表1, 图3a), 锡铁山榴辉岩可分成三种类型, 第一种为高稀土含量和轻稀土略富集型 (XT-38, XT-58-1, XT-49), $\Sigma \text{REE} = 63.40 \sim 75.17 (10^{-6})$, La 的丰度为球粒陨石的 15~25 倍, $(\text{La}/\text{Sm})_N = 1.16 \sim 1.39$, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 1.74 \sim 2.81$, $\delta\text{Eu} = 0.86 \sim 1.07$, 轻稀土元素之间分馏不明显, 不具有明显的 Eu

异常 (XT-38, XT-49) 或有轻度的 Eu 负异常 (XT-58-1), 这种 REE 特征与 E-MORB (富集型洋脊玄武岩) 类似; 第二种为低稀土含量和稀土配分模式平坦型 (XT-37, XT-51), $\Sigma \text{REE} = 23.85 \sim 24.80 (10^{-6})$, La 的丰度为球粒陨石的 3~6 倍, $(\text{La}/\text{Sm})_N = 0.76 \sim 0.78$, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 0.80 \sim 1.22$, $\delta\text{Eu} = 0.96 \sim 1.20$, 其中样品 XT-51 具有轻度的 Eu 正异常。这种 REE 特征与 T-MORB (过渡型洋脊玄武岩) 相似 (Bernard-Griffiths *et al.*, 1985); 第三种为中等稀土含量和 LREE 为亏

表1 锡铁山榴辉岩的主元素(%)及稀土元素和微量元素(10^{-6})组成Table 1 Major (%) and trace element (10^{-6}) concentration of eclogites from Xitieshan

样品号	XT-37	XT-38	XT-46	XT-49	XT-51	XT-58-1
退变程度	弱	强	强	强	弱	强
SiO ₂	48.97	49.86	47.65	45.08	46.66	49.83
TiO ₂	0.44	1.13	1.17	1.12	0.54	1.18
Al ₂ O ₃	11.31	14.83	15.46	16.52	14.99	14.7
Fe ₂ O ₃	1.27	1.39	1.07	1.79	1.73	2.00
FeO	7.42	10.88	12.22	10.15	7.45	9.47
MnO	0.19	0.22	0.23	0.21	0.17	0.20
MgO	13.89	7.43	7.79	9.45	13.21	7.72
CaO	14.03	11.05	11.25	12.70	11.96	11.43
K ₂ O	0.27	0.39	<0.1	<0.1	0.25	0.16
Na ₂ O	0.94	2.12	1.92	1.52	1.11	1.8
P ₂ O ₅	<0.05	0.12	0.07	0.07	0.05	0.1
LOI	0.62	<0.1	0.12	0.37	1.08	0.32
Total	99.35	99.42	98.95	98.98	99.2	98.91
La	1.28	4.43	1.78	6.42	1.04	5.55
Ce	3.52	11.44	4.54	16.06	3.05	14.7
Pr	0.5	1.52	0.57	1.97	0.42	1.81
Nd	2.57	7.11	3.15	10.54	2.44	9.17
Sm	1.03	2.34	1.48	2.9	0.86	3.02
Eu	0.34	0.79	0.68	1.01	0.39	0.83
Gd	1.13	2.56	2.67	2.83	1.14	2.83
Tb	0.23	0.49	0.56	0.49	0.22	0.54
Dy	1.46	3.13	3.48	3.12	1.21	3.23
Ho	0.31	0.69	0.73	0.72	0.42	0.67
Er	0.9	1.99	1.95	1.92	0.9	1.76
Tm	0.12	0.28	0.29	0.26	0.16	0.26
Yb	0.71	1.72	1.82	1.54	0.88	1.48
Lu	0.13	0.28	0.3	0.23	0.13	0.25
Y	9.62	24.63	25.25	25.16	11.54	25.07
ΣREE	23.85	63.4	49.25	75.17	24.8	71.17
(La/Sm) _N	0.78	1.19	0.76	1.39	0.76	1.16
(La/Yb) _N	1.22	1.74	0.66	2.81	0.80	2.53
δEu	0.96	0.98	1.03	1.07	1.20	0.86
Sc	53.51	46.63	48.66	41.99	36.67	42.33
Rb	10	5.9	7	7.5	22	19
Sr	70.16	74.42	85	72.42	69.56	88.52
Ba	36.53	33.07	9.32	13.02	33.59	25.93
Zr	21	68	53	43	25	41
Nb	1	3.9	2.8	1.7	1.1	2.6
Ta	0.2	0.8	0.6	0.4	0.7	0.3
U	0.3	0.5	0.2	0.4	0.1	0.3
Th	0.3	0.9	3.3	0.7	0.1	0.6
Hf	0.8	2.4	2.1	1.6	0.9	1.6
V	222.4	311.4	328.1	294.8	165.1	304.5
Cr	621	227	345	402	1010	353
Ni	252	102	94	213	299	139
Co	54.97	50.66	40.31	46.13	43.76	39.64

分析由国家地质测试中心完成;主元素及 La、Ce、Nd、Rb、Ba、Sr、Ni、Zr 采用 ICP-AES 方法;FeO 采用容量滴定法;K₂O 采用原子吸收法;其它元素采用 ICP-MS 方法。LOI 为灼减量

损型(XT-46), $\Sigma \text{REE} = 49.25 (10^{-6})$, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 0.76$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 0.66$, $\delta\text{Eu} = 1.03$, 具 Eu 正异常。这种 REE 特征与 N-MORB(亏损型洋脊玄武岩)类似(Bernard-Griffiths *et al.*, 1985)。因此,榴辉岩的稀土元素特征显示其原岩可能形成于大洋环境,但与现代大洋洋脊玄武岩(MORB)又存在差别。大洋拉斑玄武岩,无论形成于何种环境(岛弧、正常洋中脊或者洋岛),其稀土配分模式均为亏损型(转引自李昌年,1992)。锡铁山榴辉岩除亏损型外,还有轻稀土富集型和平坦型,后者的原岩可能受到陆壳物质的混染,也可能是亏损地幔部分熔融程度较低或者同源岩浆存在结晶分异作用所致。

榴辉岩的微量元素原始地幔标准化图(图 3b)中,轻稀土富集型的榴辉岩(XT-38, XT-58-1, XT-49),多数元素的原始地幔标准化值小于 10,其中 U 相对富集,而 Ba、K、Nb、P、Sr 相对亏损。稀土配分曲线平坦型的样品(XT-37, XT-51),多数元素的原始地幔标准化值小于 2,其中 Rb、Ba、K、Ta、Sr 相对富集, Th、Nb、P 相对亏损。轻稀土亏损型的样品(XT-46),原始地幔标准化值介于 2~10 之间,其中 Th、Ta、Hf 相对富集, Ba、K、P 相对亏损。所有样品的微量元素标准化曲线在 N-MORB 曲线上下波动,显示它们有一定的亲缘性,其中大离子亲石元素 Rb、Th 略富集, Nb、P 明显亏损,则可能与地壳物质的轻度混染有关。

3.3 Nd 同位素组成

对锡铁山 8 个榴辉岩样品进行了 Sm-Nd 同位素测试(表 2)。其中 5 个样品的分析测试在中国科学院地质与地球物理研究所同位素实验室完成,3 个样品的测试是在台湾成功大学地球科学系同位素实验室完成。测试流程为:将 Sm-Nd 样品称入 FEP 容器中,同时称取适合数量的 ¹⁴⁹Sm-¹⁵⁰Nd 混合稀释剂,加入适合数量的 HClO₄ 和 HF 后,盖严,并在大约 100℃ 条件下过夜 3 天,然后在大约 200℃ 条件下进一步分解样品并驱除 HF、破坏氟化物直接蒸干。用 2.5 NHCl 提取、离心、清液在直径 6mm、柱床高 8cm 的 AG50 × 12、200~400 目树脂柱上分离 REE。进而在直径 4 mm、柱床高 5cm 的萃淋树脂(200~400 目)柱上分离 Cl、Nd、Sm。同位素测定在 MAT262 多接收质谱上完成。Sm、Nd 测定金属离子。用 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219 进行 Nd 同位素质量歧视校正。样品测定期间标样的测量结果为:JMC:0.511973 ± 15 ~ 0.511972 ± 11 (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd),实验室全流程本底大约为:Sm、Nd:10⁻¹¹g。

8 个样品的分析结果显示,锡铁山榴辉岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(0) = -0.25 \sim 10.98$,除 XT-38 为负值外,其余全部为正值。榴辉岩锆石的 U-Pb TIMS 和 SHIRMP 测年结果表明,其榴辉岩相变质作用的时代为 485~500Ma,原岩基性岩浆结晶时代为 750~800Ma(张建新等,另文发表)。原岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(800\text{Ma}) = -0.48 \sim 9.20$,除 XT-38 为负值外,也全部为正值,表明原岩

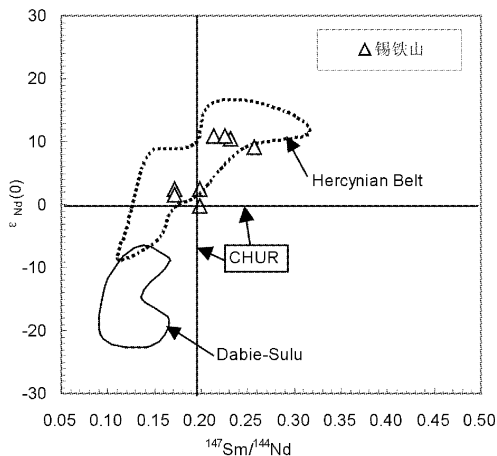
表2 锡铁山榴辉岩的 Sm-Nd 同位素组成

Table 2 Sm and Nd isotopic compositions for eclogites from Xitieshan

序号	分析样品	Sm(10^{-6})	Nd(10^{-6})	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma$	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	$\epsilon_{\text{Nd}}(800\text{Ma})$
1	QZ19-9	1.004	2.617	0.2319	0.513175	11	10.47	6.88
2	XT-37	0.9722	2.745	0.2142	0.513201	17	10.98	9.20
3	XT-49	3.3030	11.660	0.1714	0.512767	16	2.52	5.1
4	XT-51	0.9898	2.649	0.2260	0.513194	9	10.85	7.86
5	XT-33	1.126	2.649	0.2570	0.513110	18	9.21	3.05
6	XT-38	2.34	7.11	0.1991	0.512625	9	-0.25	-0.48
7	XT-58-1	3.02	9.17	0.1992	0.512762	15	2.42	2.17
8	ZJ01-10-1	2.58	9.12	0.1711	0.512714	12	1.48	3.93

1~5, Sm、Nd 含量由同位素稀释法获得,中科院地质所同位素室,测试仪器为 MAT262 多接收质谱仪,用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 进行 Nd 同位素质量歧视校正。6~8, Sm、Nd 含量由 ICP-MS 法获得,台湾成功大学地球科学系同位素室,测试仪器为 MAT262 多接收质谱仪,用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 进行 Nd 同位素质量歧视校正。

成与欧洲华里西造山带的榴辉岩的 Sm-Nd 组成十分类似,可能是洋壳俯冲的结果。

图4 锡铁山榴辉岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(0) - ^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 图解

其它地区数据均出自 Jahn (1999)

Fig. 4 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ versus $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ plots for eclogites from the Xitieshan

起源于亏损地幔,榴辉岩的 Nd 同位素组成与现代大洋中脊玄武岩类似,接近 0.51325,进一步说明了榴辉岩的原岩可能形成于大洋环境。法国的 Armorican 杂岩体及西班牙 Cabo Ortegal 杂岩体中的榴辉岩也具有类似的 Nd 同位素组成,其原岩被认为形成于大洋环境 (Bernard-Griffiths *et al.*, 1985)。锡铁山榴辉岩的 Sm-Nd 同位素组成与大别、苏鲁地区榴辉岩 Sm-Nd 同位素组成明显不同,后者绝大多数样品 $\epsilon_{\text{Nd}}(0) < 0$ (图 4),具有陆壳玄武质岩石的特征,榴辉岩被认为是陆壳深俯冲作用的产物 (Jahn, 1999)。锡铁山榴辉岩的 Sm-Nd 组

4 地质意义讨论

柴北缘锡铁山榴辉岩的岩石化学和地球化学特征均显示其原岩具有 MORB 特征,阿尔金榴辉岩的岩石化学和地球化学也具有类似的特征 (张建新等, 2001)。表明这些榴辉岩的原岩极有可能形成于大洋环境。柴北缘残留的一套早古生代海相火山岩 (滩间山群火山岩),也表明早古生代柴北缘存在过古大洋,榴辉岩和浅变质火山岩可能是不同俯冲深度上的古洋壳残片 (赖少聪等, 1996)。在赛什腾山变质火山岩的大理岩夹层中发现了珊瑚、腕足化石,锡铁山变质火山岩的大理岩夹层中发现有牙形刺化石及其碎片,加上变质火山岩的全岩等时线年龄为 464.6Ma (郭介人等, 1987),因而认为这套浅变质火山岩的形成时代为晚奥陶世 (O_3)。但最近的研究表明,在绿梁山段侵入到变质火山岩 (滩间山群) 中的辉长岩,其形成年龄为 496Ma (袁桂邦等, 2002)。从而将变质火山岩的形成时代推到了早奥陶纪-寒武纪,这表明柴北缘的浅变质火山岩并不全部形成于晚奥陶纪,有必要将柴北缘的滩间山群进行解体。奥陶纪-寒武纪的火山岩与榴辉岩原岩的关系是需要进一步深入探讨的课题,柴北缘形成于奥陶纪-寒武纪的火山岩为一套海相的火山-沉积是毫无疑问的,似乎与榴辉岩在形成时代上能够匹配,大柴旦榴辉岩的峰期变质时代为 496Ma (张建新等, 2000),锡铁山榴辉岩的峰期变质时代为 485~500Ma (张建新, 另文发表),不管滩间山群火山岩是否由榴辉岩的深俯冲作用引发的还是大洋未完全消减的残留,都间接表明榴辉岩的原岩形成于大洋环境。

榴辉岩原岩的基性岩浆的形成时代为 750~800Ma (张

建新等,另文发表),柴北缘达肯大坂杂岩中的花岗质片麻岩的地球化学特征和年代学表明,新元古代(700~800Ma)柴北缘造山带开始裂解,构造机制发生转化,从挤压转化为伸展(赵风清等,2000)^①。根据榴辉岩具有的 MORB 的地球化学特征,这种拉张可能达到了形成大洋的程度(新元古代的大洋?)。

榴辉岩的片麻岩围岩的原岩为古老地壳重熔的“S”花岗岩(正片麻岩原岩)和高成熟度的泥砂质沉积岩(副片麻岩原岩),片麻岩相似的 Sm-Nd 同位素及 T_{DM} 显示它们具有相似的古元古代地壳物质来源(Wan *et al.*, 2001),与阿尔金和柴北缘其它不含榴辉岩的阿尔金群和达肯大坂群以及祁连地块的前寒武变质基底具有相似的 Sm-Nd 同位素特征及 T_{DM} , 表明它们可能来源于同一地块。榴辉岩及其片麻岩围岩中超高压证据的发现(张建新等,2002;宋述光等,2001;杨经绥等,2001),表明它们都经历了早古生代的超高压(UHP)变质作用,而不含榴辉岩的片麻岩虽然遭受了早古生代造山作用的影响,但未卷入超高压变质作用,因为这些片麻岩中只有早古生代的年代信息而未发现任何超高压变质的证据。

柴北缘锡铁山榴辉岩与大别-苏鲁榴辉岩明显不同,大别山片麻岩中榴辉岩的原岩为大陆拉斑玄武岩(刘晓春,1992),苏北片麻岩中的榴辉岩的原岩大致相当于大陆裂谷型基性火成岩(王式洸等,1995),榴辉岩的形成是大陆深俯冲的结果。柴北缘这种具 MORB 特征的榴辉岩与法国的 Armorican 岩体、西班牙 Cabo Ortegal 岩体、德国南部 Munchberg Massif 地块、西阿尔卑斯、南极 Ross 造山带和南乌拉尔的 Максюттов 杂岩中的榴辉岩相似(Bernard-Griffiths *et al.*, 1985; Stosch, 1990; Bernard-Griffiths *et al.* 1991; DI Vincenzo *et al.*, 1997; Волкова Н. И. и др., 2001)。这种具有洋壳原岩性质的榴辉岩分布在具有典型陆壳亲缘性的片麻岩中的现象,一些学者解释两者之间为构造接触关系,即大洋岩石圈向下俯冲,遭受 HP-UHP 变质作用,然后构造侵位于地壳层次的陆壳岩石(片麻岩)中(Jahn, 1999)。但与此不同的是,柴北缘的陆壳岩石也遭受了 HP-UHP 变质作用。所以较合理的解释是,大洋岩石圈向下俯冲先遭受 HP-UHP 变质作用,随后拖曳陆壳岩石也向下俯冲遭受 HP-UHP 变质作用,之后二者在深部“共生”在一起,经历了后期共同的折返历史。即俯冲过程为“先后”关系,折返过程为“共生”关系。这一解释还需要进一步的岩石学、矿物学、年代学以及变形构造学研究来修正,这也是我们目前正在进行的工作。

致谢: 成文过程中与台湾成功大学地球科学系杨怀仁博士、中国地质科学院地质研究所张宗清研究员进行了有益的讨论,在此表示感谢。

References

Bernard-Griffiths J, Peucat J J, Menot R P. 1991. Isotopic (Rb-Sr, U-

- Pb and Sm-Nd) and trace element geochemistry of eclogites from the pan-African belt: A case study of REE fractionation during high-grade metamorphism. *Lithos*, 27:43-57
- Bernard-Griffiths J, Peucat Jean-Jacques, Cornichet J. 1985. U-Pb Nd isotope and REE geochemistry in eclogites from the Cabo Ortegal Complex, Galicia Spain: an example of REE immobility conserving MORB-like patterns during high-grade metamorphism. *Chemical Geology*, 52(2): 217-225
- Bernard-Griffiths J and Cornichet J. 1985. Origin of eclogites from south Brittany, France: A Sm-Nd isotopic and REE study. *Chemical Geology*, 52(2): 185-201
- Bureau of Geology and Mineral Resource, Qinghai Province(BGMRQH). 1991. Regional geology of Qinghai province. Beijing: Geological Publishing House, 1-662(in Chinese with English abstract)
- DI Vincenzo G, Palmeri R, Talarico F, Andriessen A M and Ricci C A. 1997. Petrology and geochronology of eclogites from the Lanterman Range, Antarctica. *Journal of Petrology*, 38(10): 1391-1416
- Griffin W L and Brueckner H K. 1985. REE, Rb-Sr and Sm-Nd studies of Norwegian eclogites. *Chemical Geology*, 52(2): 249-271
- Hanson A, Chang E, Zhou D, Ritts B, Sobel E, Graham S, Chu C, Liu J, Zhang R, Liu J G. 1995. Discovery of eclogite in the Altun Tagh Mountains, SE Tarim Basin, NW China: *Eos, Trans., AGU*, 76(17), Spring Meeting, Supplement, 283
- Hao Guojie, Lu Songnian, Li Huaikun, Zheng Jiankang. 2001. Determination and significance of eclogite on Shaliuhe, in the north margin of the Qaidam basin. *Progress in Precambrian Research*, 24(3): 154-162(in Chinese with English abstract)
- Jahn B-M. 1999. Sm-Nd isotope tracer of UHP metamorphic rocks: implications for continental subduction and collisional tectonics. *International Geology Review*, 41(10): 859-885
- Kretz R. 1983. Symbols for rock-forming minerals, *American Mineralogist*, 68:277-279
- Lai Shaocong, Deng Jinfu and Zhao Hailing. 1996. Paleozoic ophiolites and its tectonic significance on north margin of Qaidam basin. *Geoscience*, 10(1): 18-28(in Chinese with English abstract)
- Li Huaikun, Lu Songnian, Zhao Fengqing, Yu Haifeng, Zheng Jiankang. 1999. Determination and significance of the coesite eclogite on the Yuqia River on the north margin of the Qaidam Basin. *Geoscience*, 13(1):43-50(in Chinese with English abstract)
- Ling Wenli, Jia Wanglu, Gao Shan, Zhang Benren. 2000. Trace element effect of fluid-metasomatism during the HP-UHP metamorphism in the Dabie Mountains and its geochemical significance. *Geochimica*, 29(6):533-541(in Chinese with English abstract)
- Liu Liang, Che Zicheng, Luo Jinhai, Wang Yan, Gao Zhangjian. 1996. Recognition and implication of eclogite in the western Altun Mountains, Xinjiang. *Chin. Sci. Bull.* 41: 1485-1488(in Chinese)
- Liu Xiaochun. 1992. Origin of eclogites from the Dabie Mountains: Evidence from protolith. *Anhui Geology*, 2(4):24-34(in Chinese with English abstract)
- Rollinson H R 1993. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. New York, 144-145
- Shatsky V S, Kozmenko O A and Sobolev N V. 1990. Behaviour of rare-earth elements during high-pressure metamorphism. *Lithos*, 25: 219-226
- Song Shuguang and Yang Jingsui. 2001. Sanidine + quartz inclusions in Dulan eclogites; evidence for UHP metamorphism on the north margin of the Qaidam basin, NW China. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 179-185(in Chinese with English abstract)
- Stosch H G, Lugmair G W. 1990. Geochemistry and evolution of MORB-type eclogites from the Munchberg Massif, southern Germany. *EPSL*. 99: 230-249
- Wan Yusheng, Xu Zhiqin, Yang Jingsui and Zhang Jianxin. 2001. Age and compositions of the Precambrian high-grade basement of the Qilian Terrane and its adjacent areas. *Acta Geologica Sinica*, 75(4): 375-384

① 赵风清等. 2000. 柴达木地块北缘达肯大坂杂岩中新元古代花岗质带的地球化学特征. 第二届海峡两岸祁连山及邻区地学研讨会论文摘要

- Wang Shiguang, Tan Xurong, Zhao Yunlong. 1995. REE geochemistry and origin of eclogite in northern Jiangsu province. *Geological Review*, 41(5):401-408 (in Chinese with English abstract)
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Zhang Jianxin, Jiang Mei, Li Haibing, Cui Junwen. 1999. A Comparison between the tectonic units on the two sides of the Altun sinistral strike-slip fault and the mechanism of lithospheric shearing. *Acta Geologica Sinica*, 73(3): 193-205 (in Chinese with English abstract)
- Yang Jingsui, Song Shuguan, Xu Zhiqin, Wu Cailai, Shi Rendeng, Zhang Jianxin, Li Haibing, Wan Yusheng, Liu Yan, Qiu Haijun, Liu Fulai, Shigenori Maruyama. 2001. Discovery of coesite in the north Qaidam Early Paleozoic Ultrahigh-High Pressure (UHP-HP) metamorphic belt, NW China. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 175-179 (in Chinese with English abstract)
- Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Li Haibing, Wu Cailai, Cui Junwen, Zhang Jianxin, Chen Wen. 1998. The discovery of eclogite in the northern margin of Qaidam basin, China. *Chin. Sci. Bull.*, 43(14): 1544-1549 (in Chinese)
- Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Song Shuguang, Wu Cailai, Shi Rendeng, Zhang Jianxin, Wan Yusheng, Li Haibing, Jin Xiaochi, Marc Jolivet. 2000. Discovery of eclogite in Dulan, Qinghai province and its significance for studying the HP-UHP metamorphic belt along the central orogenic belt of China. *Acta Geologica Sinica*, 74(2): 156-168 (in Chinese with English abstract)
- Yuan Guibang, Wang Huichu and Li Huimin. 2002. Zircon U-Pb age of the gabbros in Luliangshan Area on the northern margin of Qaidam Basin and its geological implication. *Progress in Precambrian research*, 25(1):36-40 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Jianxin, Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Zhang Zeming, Cui Junwen. 2001. Petrology, geochemistry and geochronology of eclogites from the western segment of the Alun tectonic belt, northwestern China. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 186-197 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Jianxin, Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Zhang Zeming, Chen Wen, Li Haibing. 2000. Peak and retrograde age of eclogites at the northern margin of Qaidam basin, Northwestern China: evidences from U-Pb and Ar-Ar dates. *Geochimica*, 29(3): 217-222 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Jianxin, Zhang Zeming, Xu Zhiqin, Yang Jingsui and Cui Junwen. 2001. Petrology and geochronology of eclogites from the western segment of the Altyn Tagh, northwestern China. *Lithos*, 56(2-3): 187-206
- Zhang Jianxin, Zhang Zeming, Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Cui Junwen. 1999. The ages of U-Pb and Sm-Nd for eclogite from the western segment of Altyn Tagh tectonic belt. *Chinese Science Bulletin*, 44: 1109-1112 (in Chinese)
- Zhang Jianxin, Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Meng Fancong, Li Haibing & Shi Rendeng. 2002. Evidence for UHP metamorphism of eclogites from the Altun Mountains. *Chinese Science Bulletin*, 47(3): 231-234 (in Chinese)
- Zhang Xueting, Lv Huiqing, Chen Zhengxing, Zhang Baohua, Li Fuxiang, Zhu Yuesheng, Li Chaolan, Wang Yan. 1999. Discovery of high-pressure metamorphic rocks of eclogite facies in Shaliuhe area of the north margin orogenic belt of Qaidam basin and its preliminary study. *Qinghai Geology*, 2:1-12 (in Chinese with English abstract)
- Zhou Hanwen, Li Xianhua and Liu Ying. 1997. Geochemical variation of cold eclogite from Hualiangting in the south Dabie Mountains during retrograde metamorphic processes. *Geochimica*, 26(5): 25-33
- 作用的微量元素效应及其地球化学意义. *地球化学*, 29(6):533-541
- 刘良, 车自成, 罗金海, 王焰, 高章鉴. 1996. 阿尔金山西段榴辉岩的确定及其地质意义. *科学通报*, 41: 1485-1488
- 刘晓春. 1992. 大别山榴辉岩的成因: 原岩属性提供的证据. *安徽地质*, 2(4):24-34
- 青海地质矿产局. 1991. 青海区域地质志. 北京:地质出版社, 1-662
- 宋述光, 杨经绥. 2001. 柴达木盆地北缘都兰地区榴辉岩中透长石+石英包裹体: 超高压变质作用的证据. *地质学报*, 75(2):179-185
- 王式洸, 谭绪荣, 赵云龙. 1995. 苏北榴辉岩的稀土元素地球化学及其成因讨论. *地质论评*, 41(5):401-408
- 许志琴, 杨经绥, 张建新, 姜枚, 李海兵, 崔军文. 1999. 阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制. *地质学报*, 73(3): 193-205
- 杨经绥, 宋述光, 许志琴, 吴才来, 史仁灯, 张建新, 李海兵, 万渝生, 刘焰, 邱海峻, 刘福来, Shigenori Maruyama. 2001. 柴达木盆地北缘早古生代高压-超高压变质带中发现典型超高压矿物——柯石英. *地质学报*, 75(2):175-179
- 杨经绥, 许志琴, 李海兵, 吴才来, 崔军文, 张建新, 陈文. 1998. 柴北缘地区榴辉岩的发现及潜在的地质意义. *科学通报*, 43(14): 1544-1549
- 杨经绥, 许志琴, 宋述光, 吴才来, 史仁灯, 张建新, 万渝生, 李海兵, 金小赤, Marc Jolivet. 2000. 青海都兰榴辉岩的发现: 试论我国中央造山带中的高压-超高压变质带的分布及构造意义. *地质学报*, 74(2):156-168
- 袁桂邦, 王惠初, 李惠民等. 2002. 柴北缘绿梁山地区辉长岩的锆石 U-Pb 年龄及意义. *前寒武纪研究进展*, 25(1):36-40
- 张建新, 许志琴, 杨经绥, 张泽明, 崔军文. 2001. 阿尔金山西段榴辉岩岩石学、地球化学和同位素年代学研究及其构造意义. *地质学报*, 75(2):186-197
- 张建新, 杨经绥, 许志琴, 张泽明, 陈文, 李海兵. 2000. 柴北缘榴辉岩的峰期和退变质年龄: 来自 U-Pb 及 Ar-Ar 同位素测定的证据. *地球化学*, 29(3): 217-222
- 张建新, 张泽明, 许志琴, 杨经绥, 崔军文. 1999. 阿尔金构造带西段榴辉岩的 Sm-Nd 及 U-Pb 年龄. *科学通报*, 44: 1109-1112
- 张建新, 杨经绥, 许志琴, 孟繁聪, 宋述光, 李海兵, 史仁灯. 2002. 阿尔金榴辉岩中超高压变质作用的证据. *科学通报*, 47(3): 231-234
- 张建新, 孟繁聪, 戚学祥. 2002. 柴达木盆地北缘大柴旦和锡铁山榴辉岩中石榴子石环带对比及地质意义. *地质通报*, 21(3):123-129
- 张雪亭, 吕惠庆, 陈正兴, 张宝华, 李福祥, 朱跃升, 李朝兰, 王彦. 1999. 柴北缘造山带沙柳河地区榴辉岩超高压变质岩石的发现及初步研究. *青海地质*, 2: 1-12
- 周汉文, 李献华, 刘颖. 1997. 南大别花凉亭冷榴辉岩退变质作用过程中的元素地球化学变异. *地球化学*, 26(5):25-33
- Волкова Н И, Френкель А Э, Буданов В И, Холодова Л Д, Лепезин Г Г. 2001. Эклогиты максютовского комплекса (Южный Урал): геохимические особенности и природа протолита. *Геохимия*, (10):1027-1038

附中文参考文献

- 郝国杰, 陆松年, 李怀坤, 郑健康. 2001. 柴北缘沙柳河榴辉岩岩石学及年代学初步研究. *前寒武纪研究进展*, 24(3):154-162
- 赖少聪, 邓晋福, 赵海玲. 1996. 柴达木北缘古生代蛇绿岩及其构造意义. *现代地质*, 10(1):18-28
- 李怀坤, 陆松年, 赵风清, 于海峰, 郑健康. 1999. 柴达木北缘鱼卡河含柯石英榴辉岩的确定及其意义. *现代地质*, 13(1):43-50
- 凌文黎, 贾望鲁, 高山, 张本仁. 2000. 大别超高压变质过程中流体