

·专题研究·

北祁连俯冲-增生杂岩带中低温榴辉岩的地球化学特征

于胜尧, 张建新, 孟繁聪, 戚学祥

(中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037)

摘要: 北祁连俯冲-增生杂岩带中的低温榴辉岩以透镜体形式产于蓝片岩和多硅白云母片岩中。根据稀土元素、微量元素及 Sr-Nd 同位素分析研究, 可将本区低温榴辉岩分为两类: I 类榴辉岩以轻重稀土分异不明显和具有 Eu 正异常为特征; II 类榴辉岩的轻稀土富集, 有轻微的 Eu 负异常。Sm-Nd 同位素研究显示, I 类榴辉岩样品的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值为 2.5~6.9, 平均值为 4.5; II 类榴辉岩 $\epsilon\text{Nd}(t) = -3.3 \sim 1.4$ 。这些研究成果表明, I 类榴辉岩的原岩来源于长期亏损的地幔源区, 可能形成于大洋环境, 而 II 类榴辉岩的原岩在形成过程中很明显混入了陆壳物质, 据此推断其原岩形成于大陆边缘或洋陆过渡环境。

关键词: 北祁连; 低温榴辉岩; Sm-Nd 同位素; 地球化学特征

中图分类号: P588.3; P591

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2007)02-0101-08

Geochemical characteristics of low-temperature eclogites from the subduction-accretionary complex in the North Qilian Mountain

YU Sheng-yao, ZHANG Jian-xin, MENG Fan-cong and QI Xue-xiang

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The low-temperature eclogites from the subduction-accretionary complex in the North Qilian Mountain occur as lenses within blueschists and phengite-schists. Based on REE and trace element analyses as well as Sr-Nd isotopic data, the authors divided the eclogites into two types. Type I eclogites are characterized by nearly flat REE normalized patterns and a distinctly positive Eu anomaly, suggesting cumulate protoliths, while Type II eclogites have slightly Eu anomalies and an enriched LREE pattern. The values of $\epsilon\text{Nd}(t)$ from Type I eclogite group vary between 2.5 and 6.9, indicating depleted mantle sources. The values of $\epsilon\text{Nd}(t)$ from Type II eclogites vary between -3.3 and 1.4. These data suggest that the protoliths of Type I eclogites originated in an oceanic environment. Type II eclogites show a possible mixing with a continental crust contaminant during the emplacement of the protoliths, suggesting the probable derivation from a continental/oceanic transitional zone or a continental margin.

Key words: North Qilian; low-temperature eclogites; Sm-Nd isotope; geochemical characteristics

发育于会聚板块边缘的 HP/LT 变质岩通常被认为是大洋板块俯冲变质作用的产物, 它以发育蓝片岩和低温榴辉岩为特征。HP/LT 变质岩被认为

主要记录了洋壳物质从俯冲到折返的动力学过程, 对于研究大洋板块俯冲过程有着重要意义 (Guinchi *et al.*, 1999)。

收稿日期: 2006-04-08; 修订日期: 2006-11-14

基金项目: 国土资源部百名优秀青年人才计划; 中国地质调查局地质调查项目(1212010611811, 200313000058); 国家自然科学基金资助项目(40472102, A0272095)

作者简介: 于胜尧(1981-), 男, 在读硕士研究生, 构造地质学专业, E-mail: yushengyao@gmail.com

北祁连俯冲-增生杂岩带的 HP/LT 变质岩的研究始于上世纪 70 年代末,吴汉泉(1980,1982)、吴汉泉等(1990,1992)探讨了蓝片岩的变质变形特征、形成的 pT 条件及形成时代,后又在北祁连发现了低温榴辉岩,并对榴辉岩的野外产出特征、岩石矿物组合、形成的 pT 条件及原岩成岩环境进行了初步研究(Wu *et al.*, 1993, 宋述光, 1997)。虽然普遍认为榴辉岩的原岩形成于洋壳环境,然而,由于榴辉岩原岩恢复和形成环境的确定是一项复杂和困难的工作,到目前为止,除少数研究外(Song *et al.*, 2006),对北祁连 HP/LT 变质带中低温榴辉岩的原岩恢复还缺少系统的研究。

由于榴辉岩经历了复杂的变质历史,原岩恢复的唯一可靠途径就是借助于地球化学方法,目前,稀土元素和 Sr-Nd 同位素一般被认为是比较可靠的源区示踪剂(Hajash *et al.*, 1984)。本文在野外和岩相学研究的基础上,通过对北祁连 HP/LT 变质带中低温榴辉岩的全岩及 Sr、Nd 同位素地球化学的研究,探讨其原岩特征及成岩环境。

1 区域地质背景

北祁连俯冲-增生杂岩带总体呈长条状沿

NWW-SEE 方向分布于祁连县与黑河-八宝河盆地平行的一个长 200 km、宽 30 km 的狭长地带,其南界以托莱山蛇绿岩带与中祁连地块相连,北侧以走廊南山-冷龙岭火山弧带与走廊南山北坡弧后盆地为界(图 1)(许志琴等, 1994; 张建新等, 1995, 1997; Xia *et al.*, 2003)。这套杂岩的成分十分复杂,主要由蛇绿岩及蛇绿混杂岩、高压低温变质岩、海沟相滑塌堆积、增生火山链和弧前复理石楔组成。原岩成分为泥砂质沉积岩、硅质岩、碳酸盐岩、具洋壳性质的基性火山岩和超基性岩(许志琴等, 1994)。

俯冲-增生杂岩带的 HP/LT 变质岩分布在祁连县清水沟-百经寺一带(图 1),被认为是早古生代与洋壳俯冲有关的增生楔的深部组成部分(张建新等, 1998),以含有蓝片岩和低温榴辉岩为特征。已有的 Ar-Ar 和最近报道的少量锆石 U-Pb 年代学资料显示 HP/LT 岩石形成时代为 440~468 Ma(Liou *et al.*, 1989; 吴汉泉, 1987; Wu *et al.*, 1993; 张建新等, 1997; 宋述光等, 2004)。

2 榴辉岩的野外关系及岩石学特征

本文所研究的样品分别采自祁连县香子沟、瓦窑沟、百经寺以及清水沟等地(图 1)。除 1 个样品外

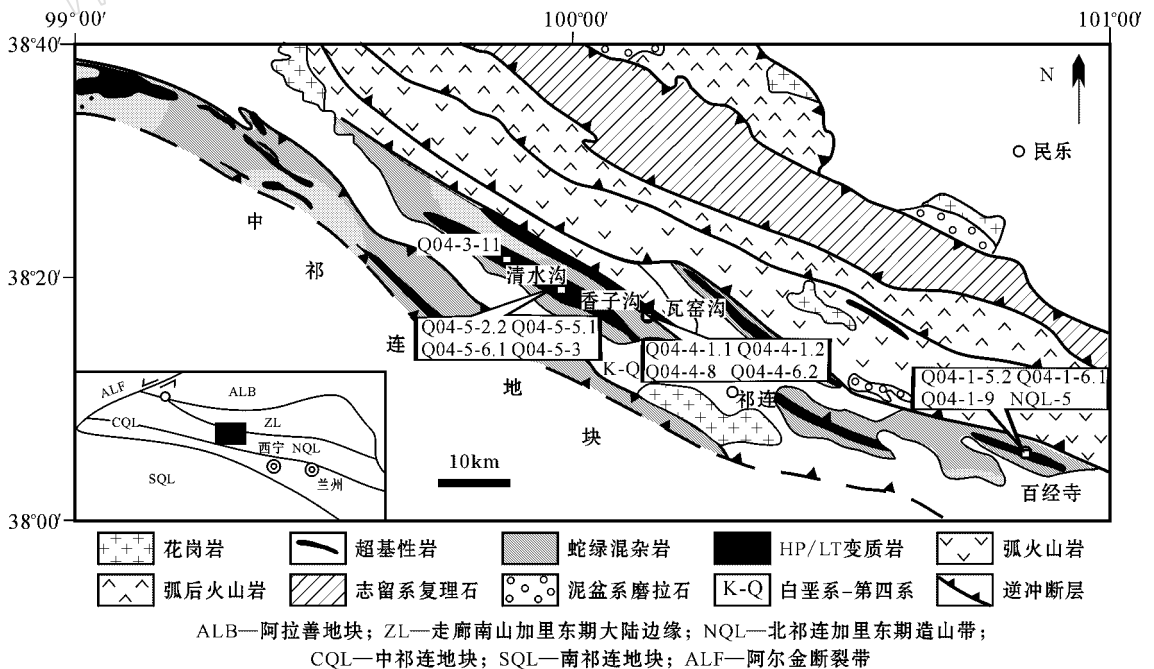


图 1 北祁连中段区域地质图(据张建新等, 2006)

Fig. 1 Simplified geological map of the middle part of the North Qilian area (after Zhang Jianxin *et al.*, 2006)

(Q04-4-1.1 蓝片岩),所有样品均为榴辉岩(本文把含有石榴子石和绿辉石的变质基性岩均称之为榴辉岩,不考虑石榴子石和绿辉石含量的多少),它们一般以透镜体的形式产在蓝片岩和多硅白云母片岩中,透镜体大小可从几十厘米变化到几十米,且透镜体长轴方向一般平行于蓝片岩的片理方向。榴辉岩主要由石榴子石、绿辉石、蓝闪石、多硅白云母、绿帘石和石英所组成,部分样品还含有硬柱石(张建新等 2006)。而蓝片岩中除了不含绿辉石,其他矿物组合与榴辉岩相似。根据含硬柱石榴辉岩中峰期矿物共生组合所估算的温度和压力分别为 $420 \sim 510^{\circ}\text{C}$ 、 $2.1 \sim 2.4 \text{ GPa}$ (张建新等 2006),而其他榴辉岩的峰期矿物组合给出的变质条件为 $430 \sim 560^{\circ}\text{C}$ 和 $2.1 \sim 2.6 \text{ GPa}$ 。

3 地球化学特征

3.1 测试方法

主量元素、微量元素和稀土元素的分析在北京地质测试分析中心完成。主量元素采用 X 射线荧光光谱方法分析,所用仪器为日本理学 3080,此方法的优点是谱线简单、干扰少、分析的浓度范围广($0.005\% \sim 100\%$)、精确度高,误差 $< 0.5\%$;微量元素 Zr、Nb、V、Cr、Sr、Ba、Cl、Zn、Ni、Rb 和 Y 用 X 射线荧光光谱分析(Rigaku-2100),误差分析为 Ba = 5% 、Cl = $2\% \sim 14\%$,其他元素 $< 3\%$;其他微量元素及稀土元素采用 ICP-MS(TJA-PQ-ExCell)分析,误差 $< 5\%$ 。

Rb-Sr、Sm-Nd 同位素测定在中国科学院地质与

地球物理研究所完成。Rb-Sr、Sm-Nd 同位素分析分别采用 MAT-260 和 MAT-261 固体同位素质谱计进行。Sr、Nd 同位素质量分馏分别用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 进行校正。详细化学流程和同位素比值测试参见张宗清等(1994)和 Chen 等(2000, 2002)。

3.2 主量元素

从表 1 可以看出,所有 13 件样品的主量元素成分变化范围较大。 SiO_2 含量为 $40.66\% \sim 55.99\%$,大部分样品显示出基性岩石的特征,少数样品属超基性岩石。 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ($1.14\% \sim 6.21\%$)含量较低,而 Al_2O_3 ($13.30\% \sim 19.24\%$)和 CaO ($4.10\% \sim 18.93\%$)含量较高, TiO_2 含量一般都小于 2% ,变化范围从 $0.55\% \sim 1.60\%$ 。在 TAS 图解中(图 2a)样品主要投入玄武岩区域,而在 $\text{Zr}/\text{TiO}_2 - \text{Nb}/\text{Y}$ 火成岩分类图解中(图 2b),大部分点都落入亚碱性岩石区域,主要为拉斑玄武岩和安山玄武岩,少数点落入碱性岩石区域。

3.3 稀土元素及微量元素

根据稀土元素和微量元素的变化特征及标准化配分模式,本区低温榴辉岩可分为两类:Ⅰ类榴辉岩以轻重稀土元素分异不明显和具有 Eu 正异常为特征;Ⅱ类榴辉岩以轻稀土元素富集和轻微的 Eu 负异常为特征。Ⅰ类榴辉岩的稀土元素分配模式及原始地幔标准化蛛网图如图 3a、4a 所示,它们的主要特征为:①稀土元素含量较低, $\text{REE} = 28.21 \times 10^{-6} \sim 53.09 \times 10^{-6}$,其中 $\text{LREE} = 20.62 \times 10^{-6} \sim 36.7 \times 10^{-6}$, $\text{HREE} = 7.59 \times 10^{-6} \sim 16.39 \times 10^{-6}$;②较弱的轻、重稀土元素分馏($\text{La}/\text{Yb})_N = 0.97 \sim 2.43$,平

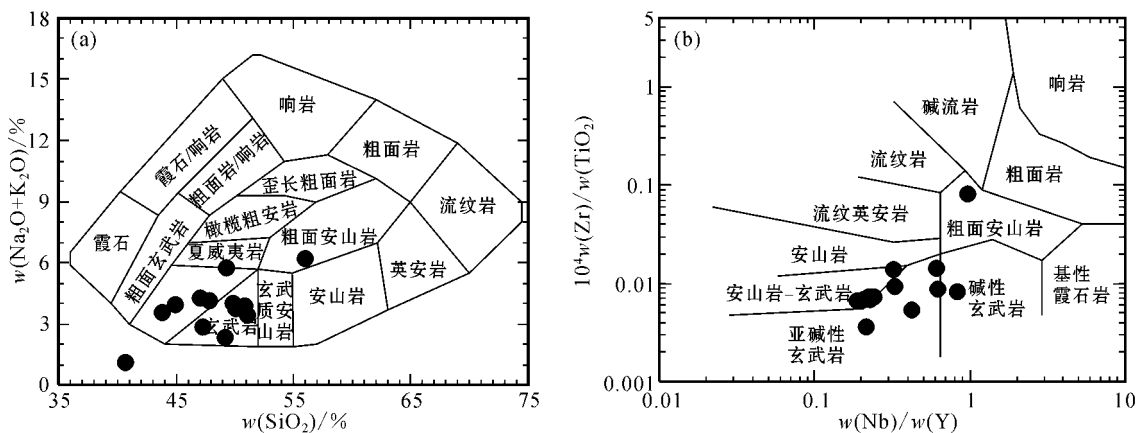


图 2 北祁连榴辉岩 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ (a) 和 $\text{Zr}/\text{TiO}_2 - \text{Nb}/\text{Y}$ 三元系 (b) 图解
Fig. 2 TAS (a) and $\text{Zr}/\text{TiO}_2 - \text{Nb}/\text{Y}$ (b) diagram of eclogites from the North Qilian area

表1 榴辉岩的主量元素($w_B/\%$)、微量元素和稀土元素($w_B/10^{-6}$)分析结果
 Table 1 Major element($w_B/\%$), trace element and REE($w_B/10^{-6}$) abundances of eclogites

样号	Q04-1-5.2	Q04-1-6.1	Q04-4-6.2	Q04-5-2.2	Q04-5-3	NQL-5	Q04-1-9	Q04-3-11	Q04-4-1.1	Q04-4-1.2	Q04-4-8	Q04-5-5.1	Q04-5-6.1
SiO ₂	47.28	49.22	47.82	50.87	49.82	50.07	47.10	55.99	43.85	44.88	49.26	51.10	40.66
TiO ₂	1.00	0.99	1.60	1.06	0.74	1.08	0.55	1.02	1.09	1.19	0.86	0.82	0.20
Al ₂ O ₃	16.65	15.40	15.31	13.88	15.87	15.78	16.44	15.74	13.74	13.46	13.76	13.30	19.24
Fe ₂ O ₃	3.09	1.96	4.12	3.19	2.68	3.43	4.02	1.65	2.16	1.86	5.11	3.84	7.96
FeO	5.41	6.14	6.70	6.34	11.57	5.07	4.28	5.98	7.74	6.61	6.66	5.41	6.72
MnO	0.13	0.14	0.12	0.15	0.18	0.16	0.12	0.10	0.19	0.15	0.12	0.13	0.13
MgO	7.24	9.01	7.64	7.22	7.86	7.83	7.26	5.96	9.14	6.80	6.04	9.05	2.54
CaO	14.01	10.83	8.82	10.69	.66	10.54	11.63	4.10	9.22	10.94	9.32	9.52	18.93
Na ₂ O	2.63	0.52	3.71	3.85	3.45	2.62	4.06	3.57	2.34	2.49	4.44	2.28	1.04
K ₂ O	0.22	1.83	0.44	0.06	0.53	1.12	0.23	2.64	1.23	1.48	1.30	1.15	0.10
P ₂ O ₅	0.13	0.41	0.14	0.17	0.09	0.10	0.01	0.23	0.20	0.29	0.13	0.12	0.14
H ₂ O ⁺	1.30	2.42	2.46	1.70	2.28	1.74	2.84	2.46	4.52	3.98	1.52	2.12	0.88
CO ₂	0.30	0.47	0.97	0.72	0.22	0.50	1.80	0.30	4.13	5.30	0.97	0.72	1.13
LOI	1.32	2.43	2.46	1.70	1.25	1.90	3.96	2.15	7.42	8.71	1.41	2.60	1.29
La	3.42	4.89	4.95	5.91	5.63	7.05	3.78	19.4	14.7	20.3	12.2	15.1	25.9
Ce	9.02	11.7	13.2	13.8	11.8	16	7.99	39.4	32.4	41.1	23.3	31.2	46.7
Pr	1.52	1.84	2.3	2.11	1.69	2.19	1.23	5.37	4.30	5.46	3.18	4.38	5.64
Nd	7.63	8.43	11.5	9.92	7.25	10.1	5.75	20.7	17.1	20.9	12.9	17.2	19.6
Sm	1.95	1.82	3.30	2.54	1.28	2.86	1.03	4.40	3.46	3.99	2.88	3.65	0.57
Eu	0.96	0.85	1.45	1.06	0.86	1.08	0.84	1.28	1.19	1.31	0.88	1.04	0.96
Gd	3.07	2.95	4.29	3.72	2.56	.51	1.88	4.63	3.73	4.02	3.69	4.28	3.69
Tb	0.58	0.54	0.74	0.67	0.46	0.64	0.34	0.76	0.63	0.62	0.65	0.74	0.62
Dy	3.93	3.64	4.63	4.40	3.09	0.78	2.21	4.72	3.99	3.76	4.27	4.91	3.84
Ho	0.85	0.77	0.93	0.94	0.67	0.75	0.44	0.93	0.82	0.76	0.90	1.03	0.81
Er	2.54	2.36	2.72	2.77	2.00	2.03	1.29	2.72	2.55	2.29	2.78	3.16	2.57
Tm	0.36	0.32	0.36	0.39	0.28	0.29	0.17	0.38	0.36	0.32	0.41	0.44	0.39
Yb	2.37	2.16	2.38	2.64	1.83	1.96	1.10	2.49	2.37	2.00	2.82	2.97	2.75
Lu	0.35	0.32	0.34	0.40	0.28	0.31	0.16	0.36	0.37	0.30	0.44	0.46	0.44
Y	22.0	20.1	22.9	23.5	17.0	19.3	11.3	23.0	20.6	19.0	23.0	26.7	24.9
Hf	1.78	1.64	2.33	2.03	1.45	2.1	0.56	3.74	2.32	2.37	2.28	3.12	4.48
Ta	0.25	0.30	0.44	0.22	0.21	0.21	0.14	1.02	0.84	1.11	0.59	0.55	6.51
Zr	68.3	66.2	87.3	72.6	54.3	78.9	19.9	147	94.8	98.0	79.0	112	162
Nb	5.04	3.76	9.65	4.83	3.78	4.66	2.42	13.9	12.9	15.9	7.58	8.57	23.9
Sc	28.5	25.1	22.7	32.0	30.7	31.3	31.5	18.1	24.9	19.3	34.3	32.1	6.77
Cr	348	325	170	140	259	333	13.4	124	311	268	113	160	29.5
Co	34.9	30.6	31.5	37.7	57.4	42.7	30.5	23.2	46.8	30.6	39.1	33.3	10.4
Ni	138	142	76.3	55.1	86.3	117	37.2	53.5	187	150	72.5	63.4	31.3
Cu	49.5	74.9	77.7	26.1	135	26	44.7	23.5	101	46.9	22.9	148	39.5
Zn	65.3	72.0	78.0	64.0	109	55.2	50.7	95.0	64.8	63.6	141	264	43.2
Rb	2.44	63.2	7.11	0.86	9.23	30.4	3.63	58.6	32.4	35.7	32.5	24.6	2.71
Pb	11.7	8.78	2.69	3.64	3.62	3.68	11.7	7.46	4.58	5.27	28.2	6.62	18.4
Th	0.52	0.76	0.54	2.01	2.41	1.25	1.07	6.48	3.46	3.41	6.17	3.16	43.3
U	0.07	0.19	0.08	0.23	0.29	0.54	0.05	0.82	0.46	0.56	1.16	0.31	7.84
Ba	70.0	343	64.4	26.9	222	304	175	680	355	396	327	862	39.9
Sr	417	295	218	232	126	341	419	138	175	251	266	190	1115
V	240	234	243	263	208	189	261	168	188	186	272	217	386
LREE	24.5	29.53	36.7	35.34	28.51	39.28	20.62	90.55	73.15	93.06	55.34	72.57	102.4
HREE	14.05	13.06	16.39	15.93	11.2	13.27	7.59	17.0	14.82	14.1	16.0	17.99	15.11
REE	38.55	42.59	53.09	51.27	39.68	52.55	28.21	107.54	87.97	107.13	71.3	90.56	117.5
(La/Yb) _N	0.973	1.526	1.402	1.509	2.074	2.425	2.317	5.253	4.182	6.843	2.917	3.428	6.35
(Eu/Eu*) _N	1.052	0.939	1.178	1.053	1.189	1.041	1.348	0.86	1.00	0.991	0.825	0.803	0.802

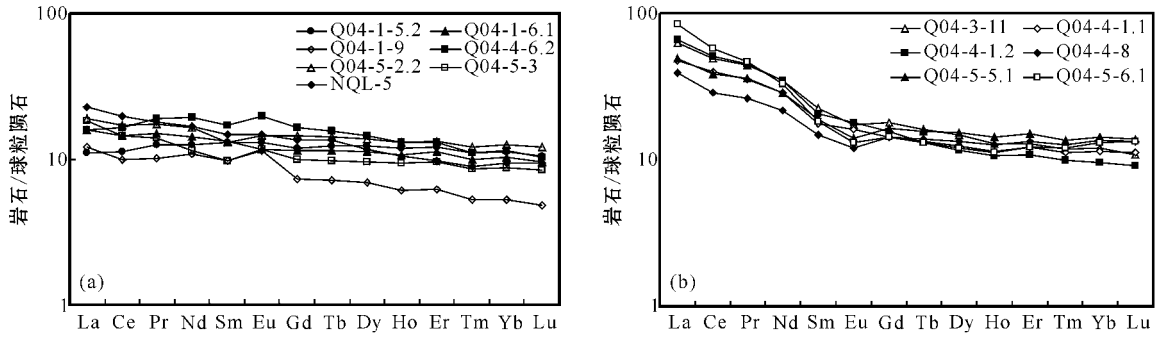


图 3 北祁连榴辉岩球粒陨石标准化稀土元素分配图 [据 Boynton(1984) 数据标准化]

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns of eclogites in the North Qilian area(after Boynton , 1984)

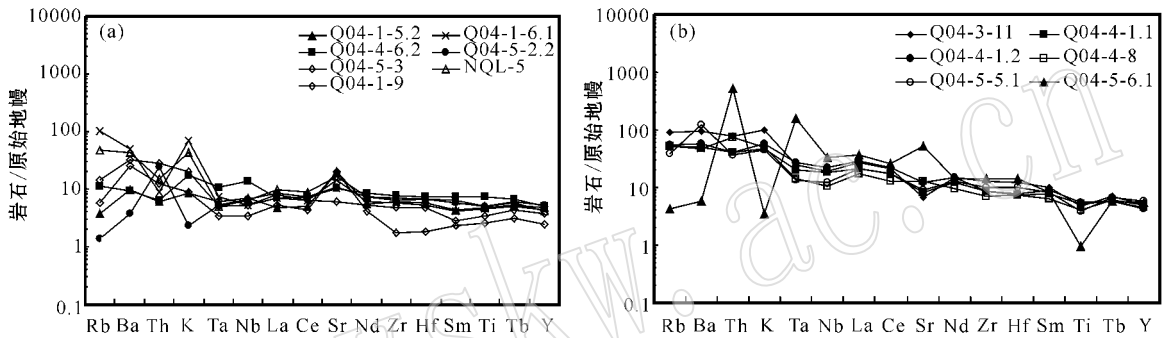


图 4 北祁连榴辉岩原始地幔标准化微量元素蛛网图 [据 Sun and McDonough(1984) 数据标准化]

Fig. 4 Primitive mantle normalized patterns of trace elements of eclogites in the North Qilian area(after Sun and McDonough , 1984)

均值为 1.74 ;③除样品 Q04-1-6.1 外 ,其他榴辉岩均表现出不同程度的正 Eu 异常 (Eu/Eu^*)_N = 1.05 ~ 1.35 ④Rb、Ba、Th、K、Sr 等大离子亲石元素较富集且分异明显 ,高场强元素 (HSFE) 丰度低且平坦不分异。 II 类榴辉岩的稀土元素分配模式及原始地幔标准化蛛网图如图 3b、4b 所示 ,它们的主要特征为 :①稀土元素含量相对较高 , $REE = 71.3 \times 10^{-6} \sim 117.48 \times 10^{-6}$,平均值为 97.00×10^{-6} ;②较强的轻、重稀土元素分馏 (La/Yb)_N = 2.91 ~ 6.84 ,平均值为 4.8 ;③轻微的负 Eu 异常 (Eu/Eu^*)_N = 0.80 ~ 1.00 ④除样品 Q04-5-6.1 外 ,其他样品均显示出富集 Rb、Ba、Th、K 等大离子亲石元素且高场强元素平坦无分异。

3.4 Sr-Nd 同位素

北祁连榴辉岩 Sr-Nd 同位素分析结果见表 2 ,本文用估计年龄 $t = 500$ Ma 来计算 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始值和 $\epsilon Nd(t)$ 。在 Sr-Nd 同位素相关图上 (图 5) , I 类榴辉岩的 $\epsilon Nd(t)$ 值为 2.5 ~ 6.9 ,平均值为 4.5 ,而 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始值变化较大 ($^{87}Sr/^{86}Sr$)_i = 0.704 7 ~ 0.708 2 ,显示其源区可能为亏损地幔 (Paquette *et al.* , 1989) ; II 类榴辉岩 $\epsilon Nd(t)$ 为 - 3.3 ~ 1.4 ,而 ($^{87}Sr/^{86}Sr$)_i 较高 (0.705 1 ~ 0.714 2) ,显示其在演化过程中受到壳源物质的混染 (Peucat *et al.* , 1990) 。

均值为 1.74 ;③除样品 Q04-1-6.1 外 ,其他榴辉岩均表现出不同程度的正 Eu 异常 (Eu/Eu^*)_N = 1.05 ~ 1.35 ④Rb、Ba、Th、K、Sr 等大离子亲石元素较富集且分异明显 ,高场强元素 (HSFE) 丰度低且平坦不分异。 II 类榴辉岩的稀土元素分配模式及原始地幔标准化蛛网图如图 3b、4b 所示 ,它们的主要特征为 :①稀土元素含量相对较高 , $REE = 71.3 \times 10^{-6} \sim 117.48 \times 10^{-6}$,平均值为 97.00×10^{-6} ;②较强的轻、重稀土元素分馏 (La/Yb)_N = 2.91 ~ 6.84 ,平均值为 4.8 ;③轻微的负 Eu 异常 (Eu/Eu^*)_N = 0.80 ~ 1.00 ④除样品 Q04-5-6.1 外 ,其他样品均显示出富集 Rb、Ba、Th、K 等大离子亲石元素且高场强元素平坦无分异。

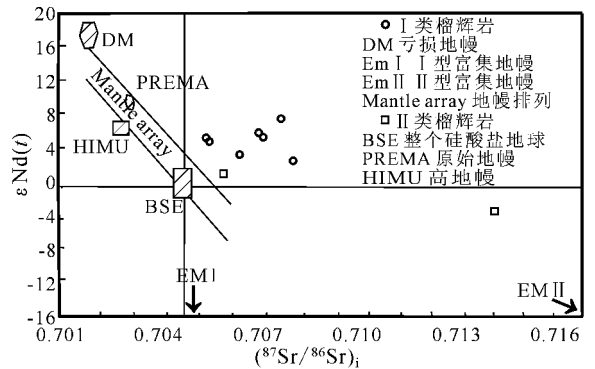


图 5 北祁连榴辉岩的 Sr-Nd 同位素相关图 [据 Zindler 等 , 1986)

Fig. 5 Sr-Nd isotope correlation plot for eclogites from the North Qilian area(after Zindler *et al.* , 1986)

3.5 构造环境判别

高场强元素 Zr、Nb、Ta、Hf 在蚀变和变质过程中具有很好的稳定性 ,因此是比较可靠的源区示踪

表 2 北祁连俯冲-增生杂岩带榴辉岩 Sr-Nd 同位素数据

Table 2 Sr-Nd isotope data of eclogites from North Qilian area

样号	Q04-5-2.2	NQL-5	Q04-1-5.2	Q04-1-6.1	Q04-1-9	Q04-4-6.2	Q04-5-3	Q04-4-8	Q04-4-1.1
岩石	榴辉岩	榴辉岩	榴辉岩	榴辉岩	榴辉岩	榴辉岩	榴辉岩	榴辉岩	蓝片岩
$\epsilon(\text{Rb}) \times 10^{-6}$	0.805	3.74	5.254	64.01	5.179	8.639	8.515	31.983	34.845
$\epsilon(\text{Sr}) \times 10^{-6}$	240.5	362.2	391.9	278.4	376.8	215	80.28	247	156.9
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.009 6	0.665 6	0.038 5	0.668 2	0.039 7	0.116 5	0.307 0	0.374 9	0.642 5
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}(2\sigma)$	0.707 083 ± 11	0.709 491 ± 12	0.707 834 ± 12	0.711 989 ± 12	0.708 447 ± 12	0.706 169 ± 11	0.708 470 ± 12	0.716 882 ± 12	0.709 718 ± 12
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$	0.707 015	0.704 749	0.707 560	0.707 228	0.708 164	0.705 339	0.706 283	0.714 215	0.705 139
$\epsilon(\text{Sm}) \times 10^{-6}$	3.155 5	3.798 5	2.534	2.578 8	1.887 9	3.696 2	1.911 4	3.083 4	3.684
$\epsilon(\text{Nd}) \times 10^{-6}$	10.15	13.16	7.557	8.596	6.501	11.365	6.818	11.71	16.16
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.188 2	0.174 7	0.203 0	0.181 6	0.175 8	0.196 9	0.169 7	0.159 4	0.138 0
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512 877	0.512 780	0.513 007	0.512 831	0.512 697	0.512 887	0.512 732	0.512 346	0.512 515
$\epsilon\text{Nd}(0)$	4.7	2.8	7.2	3.8	1.2	4.9	1.8	-6.5	-2.4
$\epsilon\text{Nd}(t)$	5.2	4.2	6.8	4.7	2.5	4.9	3.6	-3.3	1.4

剂。本区 I 类榴辉岩样品的 Zr、Hf 的丰度分别为 $19.9 \times 10^{-6} \sim 87.3 \times 10^{-6}$, $0.56 \times 10^{-6} \sim 2.33 \times 10^{-6}$, 与 MORB 值 ($Zr = 90 \times 10^{-6} \sim 96 \times 10^{-6}$, $Hf = 0.93 \times 10^{-6} \sim 2.4 \times 10^{-6}$, Pearce, 1982) 较为接近。II 类榴辉岩的 Zr、Hf 的丰度分别为 $79 \times 10^{-6} \sim 162 \times 10^{-6}$, $2.28 \times 10^{-6} \sim 4.48 \times 10^{-6}$, 略高于 MORB 值, 显示了受壳源物质混染的特征。两类榴辉岩的 Zr/Hf 和 Nb/Ta 值均与 MORB 中的值 ($Zr/Hf = 36$, $Nb/Ta = 17$, Sun and McDonough, 1989) 较为接近, 其中 I 类榴辉岩的 Zr/Hf 和 Nb/Ta 分别为 35.54 ~ 40.37 和 12.53 ~ 22.19; II 类榴辉岩的 Zr/Hf 和 Nb/Ta 分别为 34.65 ~ 41.35 和 3.67 ~ 15.58。

此外, 采用 $\text{FeO}^T - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ (a), $2\text{Nb} - \text{Zr}/4 - \text{Y}$ (b), $\text{FeO}/\text{MgO} - \text{TiO}_2$ (c) 和 $\text{V} - \text{Ti}/1000$ (d) 判别图解对源区进行判定 (图 6) 结果具有相似性。经分析得知, I 类榴辉岩主要投入洋中脊玄武岩区域, II 类榴辉岩除投入洋中脊玄武岩区域外, 部分样品落入岛弧玄武岩和板内玄武岩区域, 显示源区可能受到壳源物质混染的特征。

4 榴辉岩的原岩讨论

稀土元素一般被认为是比较可靠的源区示踪剂, 这是由于它们具有难溶和耐高温的特性, 即使发生榴辉岩相变质, REE 的特征也不会受到很大的影响 (Hajash, 1984)。本区 I 类榴辉岩在球粒陨石标准化稀土元素分配图上总体上表现出 REE 含量低和曲线平坦的特点, 除了 Q04-1-6.1 外, 其他样品都具有 Eu 正异常, 结合它们 Al_2O_3 含量高和 Ti 含量低的特征, 其原岩显示出辉长质堆晶的特征。样品

Q04-1-6.1 具有轻微的 Eu 负异常, 在球粒陨石标准化稀土元素分配图上呈现出与 N-MORB 较相似的特征。II 类榴辉岩显示出轻稀土富集和轻微的负 Eu 异常等特征, 在球粒陨石标准化稀土元素分配图上显示出与 E-MORB 或 T-MORB 相似的特征 (William and Griffin, 1985)。

Sr-Nd 同位素也是重要的源区示踪剂, 现今洋中脊玄武岩的 ϵNd 值为 $+8 \sim +12$, 而 500 Ma 前, $\epsilon\text{Nd}(t) = +6.9 \sim +10.9$ (Von Drach *et al.*, 1986)。本区 I 类榴辉岩具有较低的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值 ($2.5 \sim 6.9$), 显示出与亏损地幔相似或略低于亏损地幔的特征, 较低的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值很可能反映了源区同位素的原始特征, 而不是岩浆后期改造形成的 (Bernard and Cornichet, 1985); 因而它们可能来源于长期亏损 LREE 的地幔, 故其原岩具有洋壳成因特点, 演化过程中没有受到陆壳物质的明显混染; 而变化范围较大的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})$ ($0.7047 \sim 0.7082$), 可能与海水蚀变有关。II 类榴辉岩 $\epsilon\text{Nd}(t)$ ($-3.3 \sim 1.4$) 接近于零, 甚至为负值, 如此低的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 显示在原岩形成过程中可能明显受到地壳物质的混染。笔者新近获得的锆石 SHRIMP 年代学数据 (样品 Q04-4-8 和 Q04-5-6.1) 显示这类榴辉岩具有 710 Ma 左右的继承性锆石 (张建新等, 未发资料), 同样在北祁连还发现有 770 Ma 的花岗片麻岩 (曾建元等, 2006), 这些数据进一步说明 II 类榴辉岩在原岩演化过程中很可能是混入了陆壳物质。因此, 其原岩可能形成于大陆边缘或洋陆过渡环境, 而不是形成于典型的大洋环境。当然, 这还需要更多的地质、地球化学和同位素年代学资料来证实。

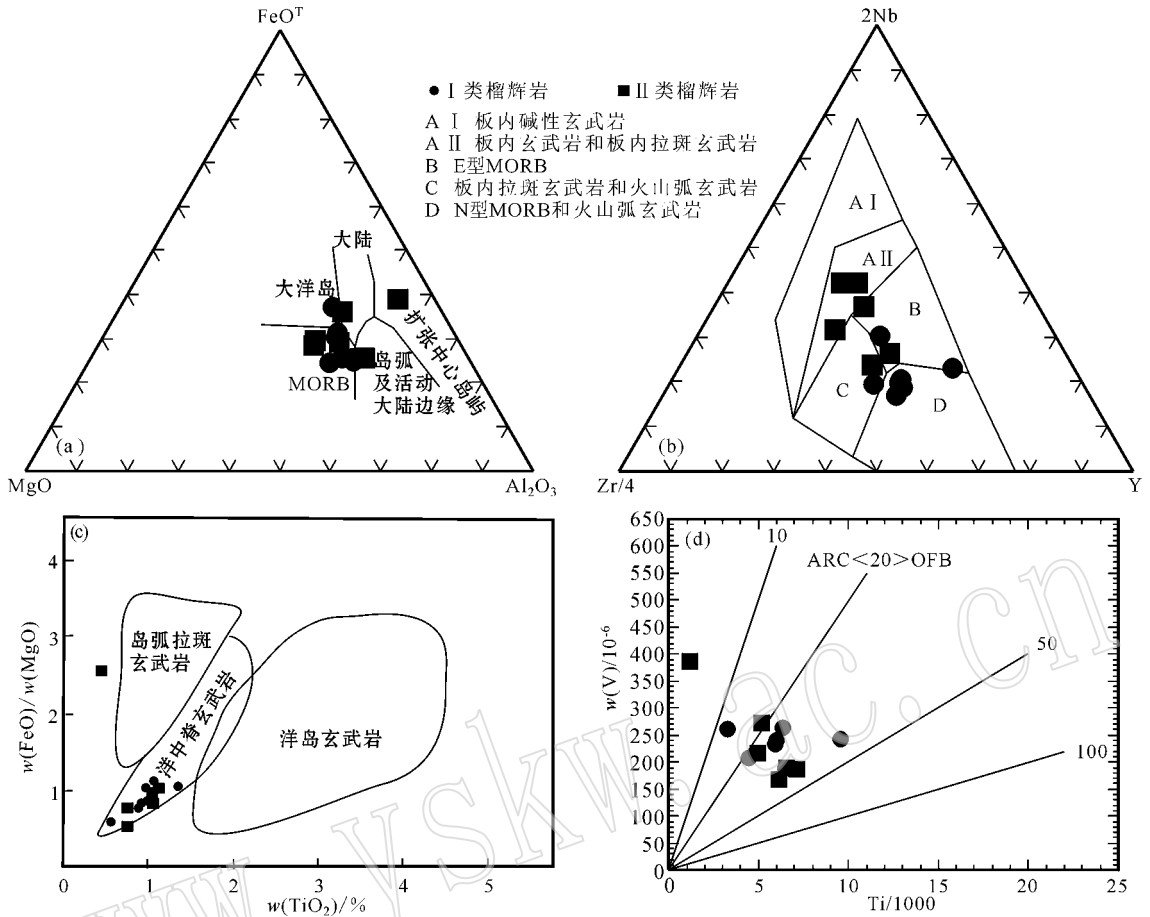


图 6 FeO^T - MgO - Al₂O₃ (a) 据 Pearce *et al.*, 1977, 2Nb - Zr/4 - Y (b) 据 Meschede, 1986, FeO/MgO - TiO₂ (c) (据 Glassiey, 1974) 和 V - Ti/1000 (d) 据 Shervais, 1982 构造环境判别图解

Fig. 6 FeO^T - MgO - Al₂O₃ (a) after Pearce *et al.*, 1977, 2Nb - Zr/4 - Y (b) after Meschede, 1986, FeO/MgO - TiO₂ (c) (after Glassiey, 1974) and V - Ti/1000 (d) after Shervais, 1982 tectonic discrimination diagrams

致谢 史仁灯博士对原稿进行了认真审查并提出了宝贵修改意见,在此表示感谢。

References

Bernard J and Cornichet J. 1985. Origin of eclogites from South Brittany, France: a Sm-Nd isotopic and study [J]. *Chemical Geology*, 52 : 185~201.

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

Chen F, Hegner E and Todt W. 2000. Zircon ages, Nd isotopic and chemical compositions of orthogneisses from the Black Forest, Germany—evidence for a Cambrian magmatic arc [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 88 : 791~802.

Chen F, Siebel W, Satir M, *et al.* 2002. Geochronology of the Karadere basement and implications for the geological evolution of the Istanbul zone [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 91 : 469~481.

Glassiey W. 1974. Geochemistry and tectonic of Gessent volcanic rocks Olympia, peninsula Washington [J]. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 85 :

785~794.

Guinchi C and Ricard Y. 1999. HP/LT metamorphism and dynamic of the accretionary wedge [J]. *Geophys. J. Int.*, 136 : 620~628.

Hajash Jr A. 1984. Rare earth element abundance and distribution patterns in hydrothermally altered basalts: experimental results [J]. *Contrib. Mineral Petrol.*, 85 : 409~412.

Jean-Louis Paquette *et al.* 1989. REE, Sm-Nd and U-Pb zircon study of eclogites from Alpine External Massif (Western Alps): evidence for crustal contamination [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 96 : 181~198.

Liou J G, Wang X W and Coleman R G. 1989. Blueschists in major suture zones of China [J]. *Tectonics*, 8 (3) : 609~619.

Meschede M A. 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram [J]. *Chem. Geol.*, 56 : 207~218.

Pearce J A and Gale G H. 1977. Identification of ore-deposition environment from trace element geochemistry of associated igneous host rocks [J]. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 7 : 14~24.

Pearce J A. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries [A]. Thorpes R S, ed. *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks* [C]. Chichester: Willy, 525~548.

Peucat J J, Bernard-Griffiths J, *et al.* 1990. Geochemical and geochronological cross section of the deep Variscan crust: The Cabo

- Ortega high-pressure nappe (northwestern Spain) [J]. Tectonophysics , 177 : 263 ~ 292 .
- Shervais J W . 1982 . Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas [J]. Earth Planet. Sci. Lett , 59 : 101 ~ 118 .
- Song Shuguang . 1997 . Tectonic evolution of subductive complex belts in the North Qilian Mountains [J]. Advance In Earth Sciences , 12 (4) : 351 ~ 365 (in Chinese with English abstract) .
- Song Shuguang , Zhang Lifei , Niu Yaoling , et al . 2004 . Zircon U-Pb SHRIMP ages of eclogites in the North Qilian Mountains and their tectonic implications [J]. Chinese Science Bulletin , 49 (6) : 592 ~ 595 (in Chinese with English abstract) .
- Song S G , Zhang L F , Niu Y , et al . 2006 . Evolution from oceanic subduction to continental collision : A case study of the Northern Tibetan Plateau inferred from geochemical and geochronological data [J]. Journal of Petrology , 47 : 435 ~ 455 .
- Sun S S and McDonough W F . 1989 . Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts : Implication for mantle composition and process [A]. Saunder A D and Norry M J . Magmatism in the Ocean Basin [C]. London : Geological Society Special Publication , 42 : 313 ~ 345 .
- Von Drach V , Marsh B D and Wasserburg G J . 1986 . Nd and Sr isotopes in the Aleutians : multicomponent parenthood of island-arc magmas [J]. Contrib. Mineral Petrol . , 92 : 13 ~ 34 .
- William L G , Hannes K B , et al . 1985 . REE , Rb-Sr and Sm-Nd studies of Norwegian eclogites [J]. Chemical Geology , 52 : 249 ~ 271 .
- Wu Hanquan . 1980 . The glaucophane-schist of eastern Qinling and northern Qilian mountains in China [J]. Acta Geological Sinica , 3 : 195 ~ 207 (in Chinese with English abstract) .
- Wu Hanquan . 1982 . Petrology and mineralogy of high pressure metamorphic zones in northern Qilian , China [J]. Bulletin of Xi ' an Institute of Geology and Mineral Resources , 4 : 5 ~ 19 (in Chinese with English abstract) .
- Wu Hanquan . 1987 . Mineralogical and polytypic characteristics of phengite and implication for K-Ar ages in Northern Qilian Mountains . China [J]. Bulletin of Xi ' an Institute of Geology and Mineral Resources , 15 : 33 ~ 46 (in Chinese with English abstract) .
- Wu Hanquan , Feng Yimin and Huo Youguang . 1990 . Discovery of lawsonite glaucophane schist and the signification in Sunan , Gansu , China [J]. Geological Review , 36 (3) : 277 ~ 280 (in Chinese with English abstract) .
- Wu Hanquan , Feng Yimin and Song Shuguang . 1993 . Metamorphic and deformation of blueschist belts and their tectonic implications , North Qilian mountains , China [J]. Journal of Metamorphic Geology , 11 : 523 ~ 536 .
- Wu Hanquan and Song Shuguang . 1992 . Two kinds of glaucophane and its structure character in North Qilian Mountains [A]. Modern Geology Research [C]. Nanjing : Nanjing Univistry Press , 74 ~ 80 (in Chinese) .
- Xia L Q , Xia Z C and Xu X Y . 2003 . Magmagenesis in the Ordovician in back basins of the northern Qilian Mountains , China [J]. Geological Society of America Bulletin , 115 : 1 510 ~ 1 522 .
- Xu Zhiqin , Xu Huifen , Zhang Jianxin , et al . 1994 . The Zoulangnanshan Caledonian subductive complex in the Northern Qilian Mountains and its dynamics [J]. Acta Geologica Sinica , 68 (1) : 1 ~ 14 (in Chinese with English abstract) .
- Zeng Jianyuan , Yang Hongyi , Wan Yusheng , et al . 2006 . The discovery of proterozoic magma from the metamorphic rocks in the North Qilian Mountains—Evidence from zircon U-Pb SHRIMP ages [J]. Chinese Science Bulletin , 51 (5) : 575 ~ 581 (in Chinese with English abstract) .
- Zhang Jianxin and Meng Fancong . 2006 . Lawsonite-bearing eclogites in the north Qilian and north Altyn Tagh : evidence for cold subduction of oceanic crust [J]. Chinese Science Bulletin , 51 : 1 238 ~ 1 244 (in Chinese with English abstract) .
- Zhang Jianxin and Xu Zhiqin . 1995 . Caledonian subduction-accretionary complex/volcanic arc zone and its derormation feature in the middle sector of North Qilian Mountains [J]. Acta Geoscientia Sinica , 69 (2) : 154 ~ 163 (in Chinese with English abstract) .
- Zhang Jianxin , Xu Zhiqin , Chen Wen , et al . 1997 . A tentative discussion on the ages of the subduction-accretionary complex/volcanic arcs in the middle sector of North Qilian Mountain [J]. Acta Petrologica Et Mineralogica , 16 (2) : 111 ~ 118 (in Chinese with English abstract) .
- Zhang Jianxin , Xu Zhiqin , Xu Huifen , et al . 1998 . Framework of North Qilian Caledonian subduction-accretionary wedge and its deformation dynamic [J]. Scientia Geologica Sinica , 33 (3) : 290 ~ 299 (in Chinese with English abstract) .
- Zhang Zongqing , et al . 1994 . Isotope Research About Metamorphic Stratum in Qinling [M]. Beijing : Geology Publishing Press (in Chinese) .
- Zindler A and Hart S R . 1986 . Chemical Geodynamics [J]. Annual Review of Earth Planet Science , 14 : 493 ~ 571 .

附中文参考文献

- 宋述光 . 1997 . 北祁连俯冲杂岩带的构造演化 [J]. 地球科学进展 , 12 (4) : 351 ~ 365 .
- 宋述光 , 张立飞 , Niu Y S , 等 . 2004 . 北祁连山榴辉岩 SHRIMP 定年及其构造意义 [J]. 科学通报 , 49 (6) : 592 ~ 595 .
- 吴汉泉 . 1980 . 东秦岭和北祁连山的蓝闪片岩 [J]. 地质学报 (3) : 195 ~ 207 .
- 吴汉泉 . 1982 . 北祁连山高压变质带的岩石学和矿物学 [J]. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊 (4) : 5 ~ 19 .
- 吴汉泉 . 1987 . 北祁连山多硅白云母矿物学和多型特征以及对 K-Ar 年龄的思考 [J]. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊 , 15 : 33 ~ 46 .
- 吴汉泉 , 冯益民 , 霍有光 . 1990 . 北祁连山中段甘肃肃南奥陶系变质硬柱石蓝闪片岩的发现及其意义 [J]. 地质论评 , 36 (3) : 277 ~ 280 .
- 吴汉泉 , 宋述光 . 1992 . 北祁连山两种蓝闪片岩及其构造特征 [A]. 现代地质研究文集 (上) [C]. 南京 : 南京大学出版社 , 74 ~ 80 .
- 许志琴 , 徐惠芬 , 张建新 , 等 . 1994 . 北祁连走廊南山加里东俯冲杂岩地体及动力学 [J]. 地质学报 , 68 (1) : 1 ~ 14 .
- 曾建元 , 杨宏仪 , 万渝生 , 等 . 2006 . 北祁连山变质杂岩中新元古代岩浆活动的发现——来自 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年的证据 [J]. 科学通报 , 51 (5) : 575 ~ 581 .
- 张建新 , 孟繁聪 . 2006 . 北祁连和北阿尔金含硬柱石榴辉岩 : 冷洋壳俯冲作用的证据 [J]. 科学通报 , 51 : 1 238 ~ 1 244 .
- 张建新 , 许志琴 . 1995 . 北祁连中段加里东俯冲-增生杂岩/火山弧带及其变形特征 [J]. 地球科学 , 69 (2) : 154 ~ 163 .
- 张建新 , 许志琴 , 陈文 , 等 . 1997 . 北祁连中段俯冲-增生杂岩/火山弧的时代探讨 [J]. 岩石矿物学杂志 , 16 (2) : 111 ~ 118 .
- 张建新 , 许志琴 , 徐惠芬 , 等 . 1998 . 北祁连加里东期俯冲-增生楔结构及动力学 [J]. 地质科学 , 33 (3) : 290 ~ 299 .
- 张宗清 , 等 . 1994 . 北秦岭变质地层同位素年代学研究 [M]. 北京 : 地质出版社 .