

doi:10.3799/dqkx.2010.110

# 北祁连西段石鸡河地区火山岩地球化学特征及其动力学意义

刘晓煌<sup>1,2</sup>, 邓 军<sup>1</sup>, 孙兴丽<sup>1</sup>, 刘玖芬<sup>2</sup>, 孙柏年<sup>3</sup>, 康洪杰<sup>3</sup>

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

2. 武警黄金第七支队, 山东烟台 264004

3. 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 甘肃兰州 730000

**摘要:** 石鸡河一带是近年新发现的北祁连山多金属成矿带, 气候和自然条件恶劣, 研究程度很低。该区地层岩性为阳起石岩、角岩和细碧岩; 岩石地球化学和 Nd 同位素数据显示岩石来源于亏损地幔, 具有 N-MORB 洋脊玄武岩特征; Sr 同位素特征显示地层 Sr 同位素组成的改变是蚀变引起, 而不是由地壳物质加入引起的。Sm-Nd 等时线年龄为  $481 \pm 20$  Ma, 提出了石鸡河地区地层形成于早奥陶世, 成岩环境为北祁连洋扩张环境, 而非区域资料上显示的残留海盆封闭、大陆碰撞造山环境。

**关键词:** 石鸡河; 岩石地球化学; Rb-Sr 同位素; Sm-Nd 等时线年龄; N-MORB 洋脊玄武岩。

中图分类号: P597.3; P588.34

文章编号: 1000-2383(2010)06-0959-10

收稿日期: 2010-05-26

## Geochemistry and Tectonic Setting of Lavas from Shijihe Area in Western North Qilian Mountains

LIU Xiao-huang<sup>1,2</sup>, DENG Jun<sup>1</sup>, SUN Xing-li<sup>1</sup>, LIU Jiu-fen<sup>2</sup>, SUN Bai-nian<sup>3</sup>, KANG Hong-jie<sup>3</sup>

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. No. 7 Gold Geological Party, Yantai 264004, China

3. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems of the Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

**Abstract:** Recent studies showed that the Shijihe area is an important polymetallic metallogenic belt in western part of North Qilian Mountains in China. However, geological study degree is very low due to its remoteness and poor conditions. The Lavas of Shijihe area consists of actinolite hornstone and spilite. The geochemical characteristics of metamorphic basic lava with flat REE distribution patterns, the contents of HFSE similar to N-MORB and  $\epsilon_{Nd}(0) = +9.03 \sim +9.42$  (except the sample 08p1) manifest that the rocks belong to the tholeiitic basalt series. Sr isotope characteristics indicate that Sr isotopic composition of the rocks was altered because of the metamorphism of the rock instead of the interfused crust. Sm-Nd isochron age is  $481 \pm 20$  Ma. The metamorphic basic lavas of Shijihe area is residue of Early Ordovician. The diagenesis environment is oceanic ridge instead of continental collision with closing of ocean basin.

**Key words:** Shijihe; geochemistry; Rb-Sr isotope; Sm-Nd isochron age; N-MORB ocean ridge basalt.

近年来,在石鸡河一带花岗岩体的外接触带和地层中发现有铜、铅、锌、磁铁矿等矿产(刘晓煌等, 2007; 康洪杰等, 2008)。由于其交通条件和自然条件十分恶劣, 研究程度低, 可供参考的资料只有 1:20 万《祁连山幅》(1974)区域地质报告和 1:25 万《昌马、酒泉幅》(2000)遥感解译资料。这些资料将该区

的地层划归为大洋闭合后同碰撞—挤压环境中陆相沉积建造(左国朝等, 2002; 徐卫东等, 2006; 樊光明和雷东宁, 2007; 何世平等, 2008)。笔者通过野外观察和地质、地球化学特征认为该区地层形成于早奥陶世, 是洋盆拉伸阶段的洋中脊火山岩建造(夏林圻等, 1996, 2000, 2003; 杜远生等, 2006, 2007; 李王晔

等, 2007; 曾建元等, 2007; 闫臻等, 2008)。本文的研究发现对该区区域演化特征、与之接触的金佛寺岩体成因和寻找与海底火山有关的矿产有着重要意义。

### 1 地质概况和岩相学

该区位于北祁连造山带与河西走廊过渡带——金佛寺岩体的南段, 分布在丰乐河的石鸡河一带(图

1), 面积不大, 地层呈条带状沿北西—南东向展布, 岩石发生了低级变质作用, 为绿片岩相变质; 西段、东段分别被断裂 F1 和 F2 控制, 北西段被金佛寺岩体侵入, 南东段与志留纪千枚岩呈不整合接触。岩石主要由阳起石岩、角岩和细碧岩组成(图 2)。阳起石岩主要由钠长阳起石岩、石英阳起石岩和绿帘阳起石岩组成; 角岩主要由阳起绿帘石英角岩、磁铁矿化阳起石英角岩和磁铁矿化石英阳起石角岩组成; 细碧岩主要是绢云母化细碧岩。

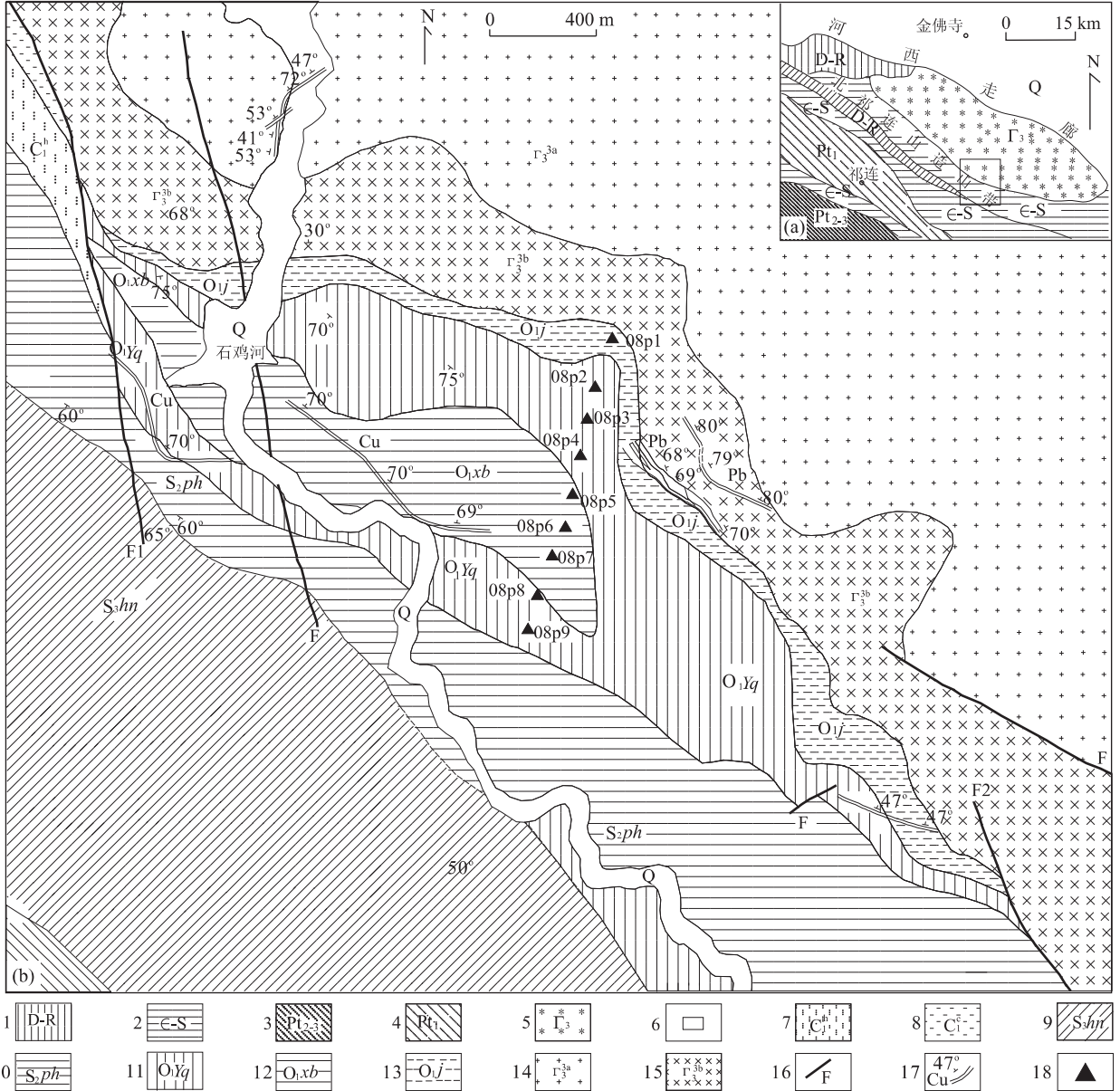


图 1 石鸡河地区地质示意图

Fig. 1 Geological sketch map of the Shijihe area

1. 泥盆—第三纪沉积; 2. 寒武—志留纪火山沉积; 3. 中新元古代裂谷沉积; 4. 古元古代北大河岩群; 5. 加里东金佛寺岩体; 6. 研究区范围; 7. 石炭纪泥岩、砂岩、页岩; 8. 石炭纪细砂岩、粉砂岩; 9. 志留纪硬砂岩; 10. 志留纪千枚岩; 11. 奥陶纪阳起石岩; 12. 奥陶纪细碧岩; 13. 奥陶纪角岩; 14. 加里东一期花岗岩; 15. 加里东二期花岗岩; 16. 断裂; 17. 矿脉及产状; 18. 取样位置

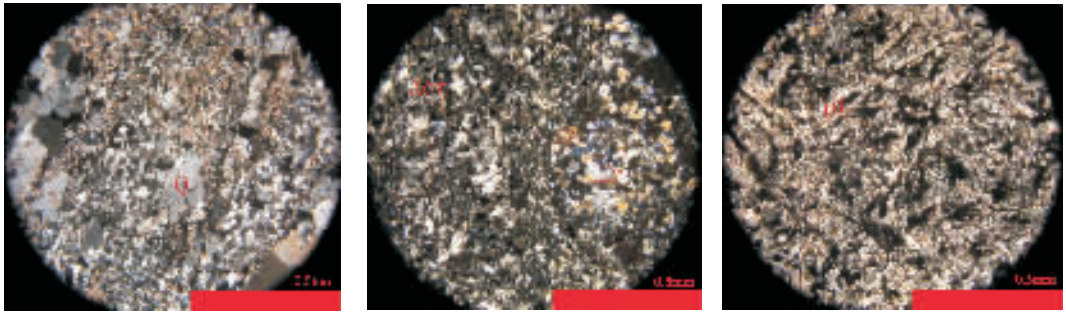


图 2 阳起绿帘石英角岩(a)、绿帘阳起石岩(b)和绢云母化细碧岩(c)薄片

Fig. 2 Actinolite-chloritization quartz hornstone (a), chloritization actinolite (b) and sericitization spilitic (c)  
单偏光 10×5; Q: 石英; Act: 阳起石; Ep: 绿帘石; Pl: 钠长石

阳起绿帘石英角岩:块状构造,粒状变晶结构,主要矿物成分为石英、阳起石、绿帘石、碳酸盐、磁铁矿。石英他形粒状或显微粒状分布,并有细脉状石英分布,含量为 75%;阳起石纤维状或针状分布,粒径为 0.2~0.3 mm,含量为 5%;绿帘石粒状或集合体分布,含量为 10%;绢云母鳞片状分布于石英间隙,含量为 4%;碳酸盐粒状或细脉状分布,含量为 2%;磁铁矿自形—他形粒状分布,含量为 4%(图 2a)。

磁铁矿化阳起石英角岩:块状构造,纤维粒状变晶结构,主要矿物成分为石英、阳起石、绿帘石、碳酸盐、磁铁矿。石英他形粒状或显微粒状分布,并有细脉状石英分布,含量为 64%;阳起石纤维状或针状分布,粒径为 0.2~0.3 mm,含量为 10%;绿帘石粒状或集合体分布,含量为 3%;碳酸盐粒状或细脉状分布,含量为 3%;磁铁矿自形—他形粒状分布,含量为 20%。

磁铁矿化石英阳起石角岩:块状构造,粒状纤维状变晶结构,主要矿物成分为阳起石、石英、绿帘石、磁铁矿。阳起石纤维状或针状分布,粒径为 0.2~0.3 mm,含量为 40%;石英他形粒状分布于阳起石间隙,含量为 27%;绿帘石粒状或集合体分布,含量为 3%;磁铁矿自形—他形粒状分布,含量为 30%。

钠长阳起石岩:块状构造,纤维状结构,主要矿物成分为阳起石、钠长石、石英、磁铁矿、黄铁矿。阳起石纤维状或针状分布,横切面可见两组斜交解理,解理夹角为  $56^\circ \wedge 124^\circ$ ,粒径为 0.15~1.00 mm,含量为 75%~85%;钠长石板条状分布,具钠长石双晶,含量为 10%~15%;石英他形粒状分布于阳起石间隙,含量为 3%;磁铁矿自形分布,含量为 2%~5%;黄铁矿他形粒状分布,含量为 1%。

石英阳起石岩:块状构造,纤维状变晶结构,主要矿物成分为石英、阳起石、绿帘石、碳酸盐、磁铁

矿。阳起石自形长柱状或针状分布,含量为 67%;石英呈细脉状分布,含量为 20%;绿帘石片状分布,含量为 6%;碳酸盐粒状或细脉状分布,含量为 3%;磁铁矿自形或他形粒状分布,含量为 4%。

绿帘阳起石岩:块状构造,纤维状结构,主要矿物成分为阳起石、绿帘石、钠长石、石英、磁铁矿。阳起石纤维状或针状分布,粒径为 0.2~0.3 mm,含量 75%;绿帘石粒状或集合体分布,含量 12%;石英他形粒状分布于阳起石间隙,含量 3%;磁铁矿他形粒状分布,含量 10%(图 2b)。

绢云母化细碧岩:块状构造,斑状结构,主要矿物成分为石英、绢云母、绿帘石、碳酸盐、磁铁矿。钠长石弯曲板条状不规则排列分布,有的呈斑晶,具绢云母化,含量为 53%;绿帘石粒状或集合体分布,含量为 10%;绢云母鳞片状分布,交代钠长石,含量为 20%;碳酸盐呈细脉状分布,含量为 2%;磁铁矿自形或他形粒状分布于钠长石间隙,含量为 15%(图 2c)。

## 2 样品采集及描述

地层样品取自索同沟地区的地层附近,样品新鲜、粒度均匀(中粒)。所有样品经室内系统鉴定和严格筛选,代表性强,取样位置见图 1。08p1 为阳起绿帘石英角岩,粒状变晶结构,块状构造。岩石经变质重结晶作用生成石英、阳起石、绿帘石和碳酸盐等。矿物成分主要有石英、阳起石、绿帘石、碳酸盐和磁铁矿。08p2、08p3、08p7、08p8、08p9 为绿帘阳起石岩,纤维状结构,块状构造。其主要矿物成分有阳起石、绿帘石、钠长石、石英和磁铁矿。08p3 样品裂隙较多,多被碳酸盐充填。08p5、08p6、08p4 为绢云母化细碧岩,斑状结构,块状构造。其主要矿物成分有石英、绢云母、绿帘石、碳酸盐和磁铁矿。08p4 样品

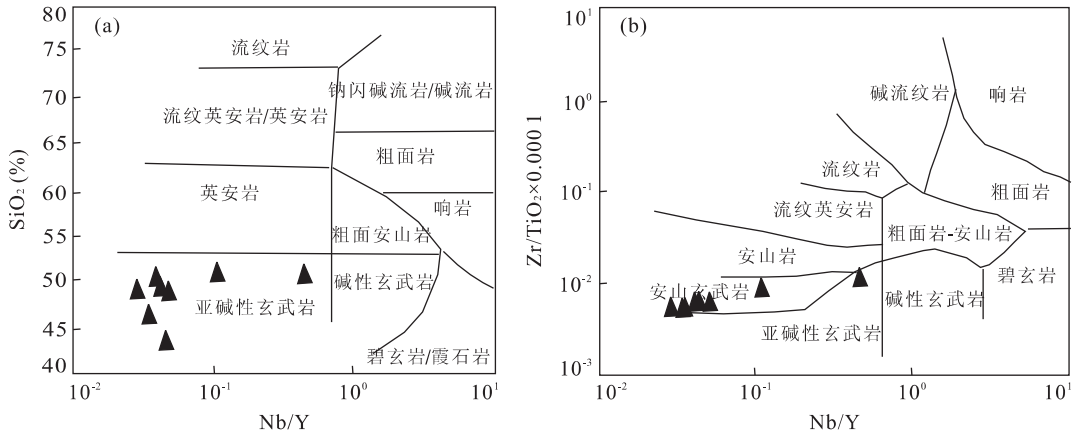


图 3 石鸡河地区火山岩  $\text{SiO}_2$ -Nb/Y 图解(a)和  $\text{Zr}/\text{TiO}_2 \times 0.000 1$ -Nb/Y 图解(b)

Fig. 3 Diagrams of  $\text{SiO}_2$ -Nb/Y (a) and  $\text{Zr}/\text{TiO}_2 \times 0.000 1$ -Nb/Y (b)

裂隙较多,多被碳酸盐充填。

### 3 分析方法

主量元素、微量元素、稀土元素和铷锶同位素测年样品用碾钵手工研磨到 200 目。主量元素除  $\text{FeO}$  采用标准湿化学分析外,其余均用 XRF 分析,测试仪器为日本理学(RIGAKU)产 RIX2100 型 X 射线荧光光谱仪,精度一般小于 5%。微量和稀土元素采用美国 Perldn Elmer 公司生产的新一代 ELAN6100DRC 型 IPC-MS 进行测定。测试精度介于 5%~10%,分析方法见 Govindaraju(1994)。

$\text{Sr}$ 、 $\text{Nd}$  同位素测定在西北大学大陆动力学国家重点实验室采用英国 Nu Instrument 公司生产的 Nu Plasma 多接收等离子体质谱仪。全过程采用 USGS 标准物质 BHVO~2, AGV~1, BCR~2 样监控,采用每 4 个样品夹 1 个质量监控样进行质量监控流程。上述标准物质测定值分别为: BHVO~2:  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.703 416 \pm 0.00 0017$ ,  $\text{Sr}=389 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Rb}=9.08 \times 10^{-6}$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512 949 \pm 0.000 013$ ,  $\text{Nd}=24.6 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Sm}=6.05 \times 10^{-6}$ ; AGV~1:  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.703 934 \pm 0.000 016$ ,  $\text{Sr}=658 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Rb}=67.9 \times 10^{-6}$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512 768 \pm 0.000 015$ ,  $\text{Nd}=32.3 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Sm}=5.86 \times 10^{-6}$ ; BCR~2:  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.704 991 \pm 0.000 016$ ,  $\text{Sr}=334 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Rb}=47.7 \times 10^{-6}$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512 631 \pm 0.000 014$ ,  $\text{Nd}=28.0 \times 10^{-6}$ ,  $\text{Sm}=6.70 \times 10^{-6}$ 。仪器利用  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.119 4$  按照指数法内部校正,质量监控选用 Sr987, 全流程本底  $<40 \text{ pg}$ ;  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.721 9$  按照指

数法内部校正,质量监控选用 La Jolla, 全流程本底  $<40 \text{ pg}$ , 分析方法见 Foster and Carter(2007)、McFarlane and McCulloch(2007)和杨岳衡等(2007)。

### 4 地球化学特征

#### 4.1 主量元素特征

通过分析可以看出:火山岩样品中  $\text{SiO}_2$  为 43.85%~51.01%,  $\text{TiO}_2$  为 0.84%~1.83% (除 08p7 外),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为 13.16%~17.25%,  $\text{TFe}_2\text{O}_3$  为 11.13%~17.54%。在  $\text{SiO}_2$ -Nb/Y (图 3a) 和  $\text{Zr}/\text{TiO}_2 \times 0.000 1$ -Nb/Y (图 3b) 图解上样品数据分别落入亚碱性玄武岩和安山玄武岩区域,说明该火山岩是亚碱性玄武岩。石鸡河地区火山岩样品的全岩地球化学分析数据(08p1、08p3 烧失量大,可能与碳酸盐较多有关)见表 1。

#### 4.2 微量元素特征

从石鸡河地区火山岩样品(除 08p1 和 08p4 外,可能与后期有流体活动有关)微量元素含量(表 1)可以看出:大离子亲石元素普遍富集,强烈富集 K、Rb、Ba、Cs,中等富集 Sr;高场强元素含量大部分与 N-MORB 相近。微量元素配分模式与 N-MORB (除大离子亲石元素外)具有明显的可比性。大离子亲石元素普遍富集和个别高场强元素富集可能是由于岩石的蚀变引起的,与岩矿鉴定相吻合。

#### 4.3 稀土元素特征

石鸡河地区火山岩样品(除 08p1 和 08p5 外,可能与后期有流体活动有关)稀土元素含量(表 1)及其配分模式与 N-MORB (图 4) 相近。火山岩样品的稀土总量为  $73.07 \times 10^{-6} \sim 34.26 \times 10^{-6}$ , 与

表 1 石鸡河地区火山岩主量元素(%)、微量元素( $\mu\text{g/g}$ )含量分析结果

Table 1 Geochemical composition of the metamorphic basic lava in the Shijihe area

项目	08p1	08p2	08p3	08p4	08p5	08p6	08p7	08p8	08p9	N-MORB	E-MORB	OIB
SiO <sub>2</sub>	50.44	49.17	43.85	50.69	51.01	50.66	49.53	49.68	46.71			
TiO <sub>2</sub>	1.74	1.72	0.84	1.69	1.05	1.73	2.35	1.83	1.28			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.16	15.84	15.99	17.25	17.19	13.71	17.18	13.82	13.76			
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.67	13.94	11.13	14.82	13.94	12.25	17.54	13.19	12.34			
MnO	0.17	0.24	0.23	0.22	0.27	0.23	0.12	0.21	0.17			
MgO	3.82	5.64	5.41	3.25	3.77	7.31	1.38	6.92	5.66			
CaO	4.25	7.38	17.15	7.17	6.94	8.99	3.03	9.14	15.24			
Na <sub>2</sub> O	1.51	4.15	1.04	2.75	3.9	3.36	5	3.42	2.5			
K <sub>2</sub> O	2.66	0.34	0.67	1.05	0.69	0.6	3.13	0.71	0.22			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.19	0.17	0.11	0.16	0.16	0.16	0.22	0.17	0.12			
LOI	7.84	1.62	3.26	0.87	1.06	1.22	0.69	1.15	1.76			
La	42.1	3.14	2.46	4.51	8.28	3.17	4.97	3.38	2.15	2.5	6.3	37
Ce	87.4	9.87	5.71	9.09	17.2	10.7	13.2	11.5	7.26	7.5	15	80
Pr	9.26	1.93	1.42	2.03	2.62	2.06	2.67	2.18	1.52	1.32	2.05	9.7
Nd	36.2	10.5	7.25	11	12.3	11.3	14.8	12.1	8.09	7.3	9	38.5
Sm	6.97	3.76	2.52	3.88	3.43	3.98	5.26	4.3	3.07	2.63	2.6	10
Eu	1.38	1.42	0.91	1.5	1.16	1.36	1.76	1.4	1.13	1.02	0.91	3
Gd	5.88	4.97	3.23	5.15	4.19	5.23	6.81	5.56	4.11	3.68	2.97	7.62
Tb	0.89	0.94	0.6	0.98	0.75	0.99	1.26	1.05	0.79	0.67	0.53	1.05
Dy	5.1	6.31	3.92	6.4	4.83	6.63	8.56	7.04	5.37	4.55	3.55	5.6
Ho	1.03	1.41	0.87	1.39	1.07	1.5	1.9	1.58	1.21	1.05	0.79	2.62
Er	2.79	3.9	2.39	3.81	2.95	4.15	5.31	4.37	3.4	2.97	2.31	2.62
Tm	0.39	0.56	0.35	0.54	0.43	0.6	0.76	0.64	0.5	0.46	0.36	0.35
Yb	2.63	3.77	2.29	3.56	2.87	4.08	5.08	4.32	3.35	3.05	2.37	2.16
Lu	0.39	0.56	0.34	0.51	0.43	0.6	0.73	0.63	0.5	0.46	0.35	0.3
Y	28.7	36.6	23.6	35.2	28.4	40.1	49.6	42.4	33	28	22	29
项目	08p1	08p2	08p3	08p4	08p5	08p6	08p7	08p8	08p9	N-MORB	E-MORB	OIB
Sr	90.5	247	531	334	442	128	108	113	248	90	155	660
Rb	108	17.1	27.2	44	26.8	14	71	17.2	6.64	0.56	5.04	31
Ba	326	45.9	37.6	69.5	405	48.1	561	26.5	20.7	6.3	57	350
Cs	4.86	3.23	5.42	6.28	4.6	1.4	2.55	1.67	1.99	0.007	0.063	0.013
U	2.91	0.17	0.23	0.35	0.55	0.3	0.19	0.19	0.22	0.047	0.18	0.075
Th	12.8	0.3	0.33	0.23	2.53	0.28	0.38	0.28	0.23	0.12	0.6	4
Ta	1.13	0.12	0.08	0.09	0.23	0.11	0.09	0.11	0.06	0.13	0.843	3
Nb	13.3	1.84	1.16	1.44	3.15	1.68	1.48	1.83	1.16	2.33	8.3	48
Zr	202	107	53.8	99.2	94.4	115	138	120	76.6	74	73	280
Hf	4.98	2.77	1.59	2.68	2.48	2.92	3.65	3.07	2.08	2.05	3.4	7.8
Th/Yb	4.87	0.08	0.14	0.06	0.88	0.07	0.07	0.06	0.07	0.04	0.25	1.85
Th/Nb	0.96	0.16	0.28	0.16	0.8	0.17	0.26	0.15	0.2	0.05	0.07	0.08
Nb/La	0.32	0.59	0.47	0.32	0.38	0.53	0.3	0.54	0.54	0.93	1.32	1.3
Hf/Th	0.39	9.23	4.82	11.65	0.98	10.43	9.61	10.96	9.04	17.08	5.67	1.95
Ce/Nb	0.12	0.93	2.41	1.39	0.65	0.85	0.97	0.87	1.6	3.22	1.81	1.67
Ti/Y	363	282	213	288	222	259	284	259	232	271	273	593
La/Ta	37	26	32	53	36	29	58	31	34	19	7	12
Hf/Ta	4.41	23.08	20.65	31.53	10.78	26.55	42.94	27.91	32.5	15.77	4.03	2.6
Sm/Nd	0.19	0.36	0.35	0.35	0.28	0.35	0.36	0.36	0.38	0.36	0.29	0.26
∑REE	202.41	53.04	34.26	54.35	62.51	56.35	73.07	60.05	42.45	39.16	49.09	200.52
LREE/HREE	9.6	1.37	1.45	1.43	2.57	1.37	1.4	1.38	1.21	1.32	2.71	7.98
(La/Yb) <sub>n</sub>	11.48	0.6	0.77	0.91	2.07	0.56	0.7	0.56	0.46	0.59	1.91	12.29
(La/Sm) <sub>n</sub>	3.9	0.54	0.63	0.75	1.56	0.51	0.61	0.51	0.45	0.61	1.56	2.39
δEu	0.66	1	0.98	1.03	0.94	0.91	0.9	0.88	0.97	1	1	1.05

测试单位:西北大学大陆动力学国家重点实验室,2009.

N-MORB和 E-MORB 的稀土总量相差不大,但相对略高; LREE/HREE 比值为 1.45 ~ 1.25, 与 N-MORB 的比值 1.32 相近;  $La_N/Yb_N$  值为 0.91 ~ 0.46, 与 N-MORB 的比值 0.59 相近;  $La_N/Sm_N$  值为 0.75 ~ 0.45, 与 N-MORB 的比值 0.61 相近;  $Sm/Nd$  值为 0.38 ~ 0.35, 与 N-MORB 的比值 0.36 相近;  $\delta Eu$  值为 1.03 ~ 0.88, 与 N-MORB 和 E-MORB 相近, 但相对略显负铕异常. 轻重稀土分异不明显; 样品配分曲线近乎平行, 显示其为同源岩浆的产物. 总体来看石鸡河地区火山岩具有 N-MORB 岩特征.

#### 4.4 Nd、Sr 同位素特征

$Sm-Nd$  年龄计算采用国际通用的 ISOPLOT 程序进行. 使用衰变常数  $\lambda(^{87}Rb) = 1.42 \times 10^{-11}/a^{-1}$ ,  $\lambda(^{147}Sm) = 6.54 \times 10^{-12}/a^{-1}$ . 年龄计算过程中输入的误差是根据前述标样与平行样测定结果确定的, 统一相对误差分别为:  $^{147}Sm/^{144}Nd = \pm 0.5\%$ ,  $^{143}Nd/^{144}Nd = \pm 0.003\%$ .  $Nd$  模式年龄计算参见 Li *et al.* (2003).  $Sm-Nd$  等时线年龄反映的是其形成或冷却年龄 (Black, 1988; Whitehouse, 1988),  $Sm$  和  $Nd$  主要保存在石榴石、磷灰石、榍石、锆石、角闪石和辉石等矿物中, 且  $Sm-Nd$  同位素体系的封闭温度为  $650 \sim 700^\circ C$ , 因此在低级到中级变质作用条件下, 岩石的变形作用和流体作用对  $Sm$ 、 $Nd$  同位素体系改变极小 (Su and Fullagar, 1995; 钟志洪等, 1997; Freeman *et al.*, 1998). 研究也表明, 在高角闪岩—麻粒岩相条件 (约  $650^\circ C$ ),  $Sm$ 、 $Nd$  同位素体系及稀土元素在全岩尺度上基本未发生改变和重新调整 (Su and Fullagar, 1995; Black, 1988; Whitehouse, 1988; 钟志洪等, 1997). 因此, 运用  $Sm-Nd$  同位素体系能准确对低级变质作用的岩石定年.

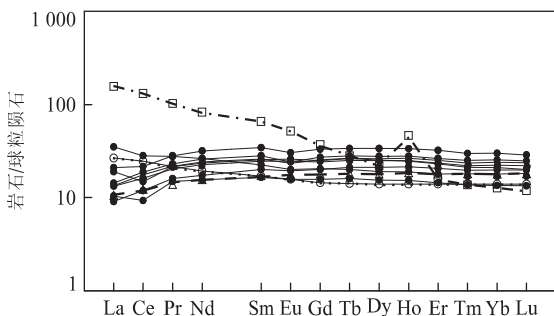


图 4 稀土元素球粒陨石标准化分布型式

Fig. 4 Chondrite-normalized rare earth element patterns of the metamorphic basic lava in the Shijihe area

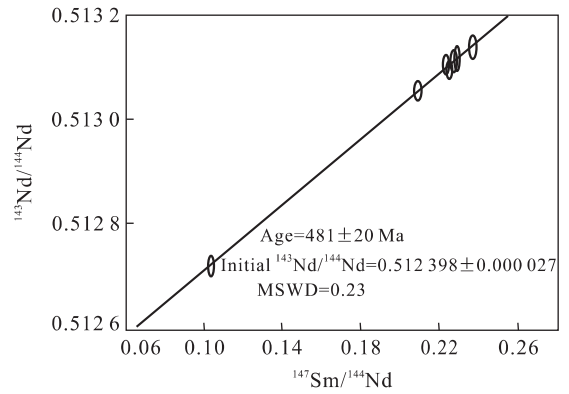


图 5 石鸡河地区火山岩  $Sm-Nd$  同位素等时线年龄

Fig. 5 Diagram of  $Sm-Nd$  isotopic isochron age of the metamorphic basic lava in the Shijihe area

对表 2 同位素数据作图 5, 获得全岩  $Sm-Nd$  等时线年龄为  $481 \pm 20$  Ma,  $Initial^{143}Nd/^{144}Nd = 0.512398 \pm 0.000027$ ,  $MSWD = 0.23$ . 这个年龄代表了岩石的形成或冷却封闭年龄, 时代为早奥陶世.

$Rb/Sr$  值为  $0.04 \sim 0.58$  (08p1 除外), 值低;  $Sm/Nd$  值为  $2.56 \sim 5.88$ , 值高;  $^{143}Nd/^{144}Nd$  比值为  $0.512723 \sim 0.513141$ , 值较高;  $^{87}Sr/^{86}Sr$  值为  $0.70671 \sim 0.73101$ , 值高;  $\epsilon_{Nd}(0)$  为  $+8.1 \sim +9.8$  (08p5 除外);  $\epsilon_{Sr}(t)$  为  $29 \sim 31$  (08p1 除外), 值为正. 除  $Sr$  同位素特征外, 其他特征均在亏损地幔范围, 说明岩石来源于亏损地幔 ( $Sr$  同位素特征变化, 可能与变质作用有关).

大洋中脊玄武岩  $\epsilon_{Nd}(0)$  的范围大约为  $+7 \sim +13$ , 平均  $+10$ . 洋岛玄武岩的  $\epsilon_{Nd}(0)$  值为  $+4 \sim +8$ . 岛弧玄武岩  $\epsilon_{Nd}(0)$  值  $< +10$ , 绝大多数岛弧熔岩  $\epsilon_{Nd}(0)$  值介于  $+3.1 \sim +9$  (DePaolo, 1976; O'Nions *et al.*, 1977; McCulloch and Black, 1984). 样品的  $\epsilon_{Nd}(0)$  大部分接近 10, 具有大洋中脊玄武岩特征.

现在典型大洋中脊新鲜玄武岩样品的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  值处于  $0.7022 \sim 0.7033$  范围内, 平均值  $0.7027$  (Hofmann and Hart, 1978). 样品  $^{87}Sr/^{86}Sr$  初始值范围为  $0.70601 \sim 0.70632$ , 比大洋中脊玄武岩比值范围大得多.  $\epsilon_{Sr}(0)$  值不随着  $\epsilon_{Nd}(0)$  值的增大而依次降低, 这说明,  $\epsilon_{Sr}(0)$  值的变化可能是蚀变的结果, 而不是地壳物质加入引起的 (McCulloch *et al.*, 1983).

## 5 讨论与结论

一般情况下, 高场强元素在蚀变和变质作用过

表 2 石鸡河地区火山岩 Sr-Nd 同位素测定值

Table 2 Sr-Nd isotopic analyses of the metamorphic basic lava in the Shijihe area

样号	08p1	08p2	08p3	08p4	08p5	08p6	08p7	08p8	08p9
Rb	112.62	10.04	35.59	22.99	64.67	4.62	63.94	8.78	9.02
Sr	90.20	245.00	528.00	332.00	435.00	130.00	110.00	100.00	243.00
<sup>87</sup> Rb/ <sup>86</sup> Sr	3.6099	3.6099	0.1182	0.1944	0.1997	0.4289	0.1026	1.6784	0.2533
<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	0.73101	0.73101	0.70682	0.70735	0.70738	0.70897	0.70671	0.71761	0.70776
2s	14	14	14	16	23	16	21	18	20
Nd		10.321		11.211	12.122	11.463	13.501	12.030	8.050
Sm		1.761		3.860	4.509	4.248	5.091	4.548	3.146
<sup>147</sup> Sm/ <sup>144</sup> Nd		0.2287		0.2083	0.1032	0.2281	0.2251	0.2241	0.2363
<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd		0.513121		0.513055	0.512723	0.513118	0.513101	0.513108	0.513141
2σ		17		13	15	13	15	13	18
Rb/Sr	1.25	0.04	0.07	0.07	0.15	0.04	0.58	0.09	0.04
Sm/Nd		0.17		0.34	0.37	0.37	0.38	0.38	0.39
ε <sub>Sr</sub> (t)	34	30	30	30	30	30	31	30	29
ε <sub>Nd</sub> (t)		7.5		7.4	7.4	7.5	7.3	7.5	7.4
ε <sub>Sr</sub> (0)	376	33	40	41	64	31	186	46	32
ε <sub>Nd</sub> (0)		9.4		8.1	1.7	9.4	9.0	9.2	9.8

测试单位:西北大学大陆动力学国家重点实验室,2009. Sr-Nd 同位素测定时 t=480 Ma;Rb、Sr、Nd 和 Sm 单位为 10<sup>-6</sup>.

程中具有良好的稳定性,因此成为示踪岩石成因、源区性质和构造环境判别的有效标志.石鸡河地区火山岩主量元素含量显示亚碱性玄武岩特征,在 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-TiO<sub>2</sub> 图解(图 6)中样品除 08p1 外都落入洋脊拉斑玄武岩区域, TiO<sub>2</sub> 含量大部分大于 1%,明显区别于岛弧火山岩,这说明岩石形成环境为大洋环境,非岛弧环境.微量元素 N-MORB 洋中脊玄武岩的 Th/Yb ≤ 0.1, Th/Nb ≤ 0.07, Nb/La > 0.8, Hf/Th ≥ 8, 而火山弧玄武岩 ARCB 却相反. N-MORB 洋中脊玄武岩和火山弧玄武岩 ARCB 的 Ti/Y < 350, La/Ta > 15, Hf/Ta ≥ 5, 而 WPB 板内玄武岩却相反.石鸡河地区火山岩除 08p1 和 08p5 外, Th/Yb 值 0.08~0.06(只有 08p3 较高为 0.14), Th/Nb 值 0.28~0.15, Nb/La 值 0.59~0.30,

Hf/Th 值 11.65~9.04(只有 08p3 较低为 4.82), Ti/Y 值 288~213, La/Ta 值 58~26, Hf/Ta 值 42.94~20.65.在 2Nb-Zr/4-Y 图解中样品基本落入 N-MORB 洋中脊玄武岩区域,这些特征基本符合 N-MORB 洋中脊玄武岩特征.

Nd 同位素特征显示岩石来源于亏损地幔,具有 N-MORB 洋中脊玄武岩特征;Sr 同位素特征显示蚀变改变岩石 Sr 同位素特征,而不是地壳物质加入引起的.

区域地质演化研究表明:祁连山从晚寒武世开始是大洋裂谷的萌生期(许志琴等,2003;万渝生等,2003;张宏飞等,2006).早奥陶世,北祁连属于大洋环境(夏林圻等,2000,2003;左国朝等,2002);中晚奥陶世,完整沟弧盆体系(侯青叶等,2005;董国安等,2007;于胜尧等,2007).志留纪-泥盆纪,残留海盆封闭,两侧刚性大陆碰撞造山和抬升(侯青叶等,2005;李文渊等,2005;杜远生等,2006,2007;樊光明和雷东宁,2007;李王晔等,2007;于胜尧等,2007;曾建元等,2007).

北祁连有完整的蛇绿岩层序(如川刺沟、玉石沟),从底部到顶部一般为:斜辉橄榄岩、辉橄岩夹纯橄岩的超基性岩-辉长岩、细碧岩及辉绿岩墙-硅质岩和少量凝灰岩(夏林圻等,1996).本区火山岩系主要为中部细碧岩层序,这为北祁连山加里东古洋壳的存在提供了直接证据.

石鸡河地区火山岩的 Sm-Nd 成岩等时线年龄为 481±20 Ma,形成时代为中奥陶世.这个年龄与

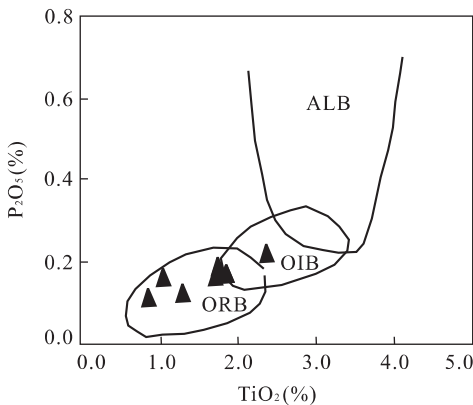


图 6 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-TiO<sub>2</sub> 图解

Fig. 6 Map of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-TiO<sub>2</sub>

ORB, 洋脊拉斑玄武岩; OIB, 洋岛拉斑玄武岩; ALB, 碱性玄武岩区

北祁连川刺沟蛇绿岩  $495.11 \pm 13.78$  Ma 全岩 Sm-Nd 等时线年龄(夏林圻等, 1996)和玉石沟蛇绿岩  $521.48 \pm 23.79$  Ma 全岩 Rb-Sr 等时线年龄(夏林圻等, 1996)相近。

综上所述可以看出:该区的岩石显示洋中脊玄武岩的特征,属于北祁连洋在早奥陶世处于扩张期,洋中脊玄武岩火山—沉积岩系,是北祁连洋在早奥陶世处于扩张期,洋中脊玄武岩火山—沉积岩系。

在北祁连地区这类岩石被保存程度是很低的,因为作为古大洋岩石圈的组成,大部分由于板块俯冲消减作用又循环回到地幔中去了,只有少量以仰冲岩片的形式被保存下来。石鸡河地区的火山岩由于面积较小、工作程度低,在  $1:20$  万和  $1:25$  万的地质填图中容易被忽略,虽然是少量,但其构造演化意义重大:这反映北祁连的构造演化具有复杂性;表明石鸡河地区在早奥陶世处于北祁连洋扩张环境,不是区域资料上显示的残留海盆封闭、大陆碰撞造山环境。

## References

- Black, L. P., 1988. Isotopic resetting of U-Pb zircon and Rb-Sr and Sm-Nd whole-rock systems in enderby land, Antarctica; implications for the interpretation of isotopic data from polymetamorphic and multiply deformed terrains. *Precambrian Research*, 38(4): 355—365. doi: 10.1016/0301-9268(88)90033-2
- DePaolo, D. J., 1976. Nd isotopic variations and petrogenetic models. *Geophysical Research Letters*, 3(5): 249—252. doi: 10.1029/GL003i005p00249
- Dong, G. A., Yang, H. R., Yang, H. Y., et al., 2007. Shrimp U-Pb geochronology of the zircons from the Precambrian basement of the Qilian block and its geological significances. *Chinese Science Bulletin*, 52(19): 2687—2701. doi: 10.1007/s11434-007-0356-0
- Du, Y. S., Zhu, J., Gu, S. Z., 2006. Sedimentary geochemistry and tectonic significance of Ordovician cherts in Sunan, North Qilian Mountains. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(1): 101—109 (in Chinese with English abstract).
- Du, Y. S., Zhu, J., Gu, S. Z., et al., 2007. Sedimentary geochemistry of the Cambrian-Ordovician cherts; implication on archipelagic ocean of North Qilian orogenic belt. *Science in China (Series D)*, 50(11): 1628—1644.
- Fan, G. M., Lei, D. N., 2007. Precise timing and significance of Caledonian structural deformation chronology in Southeast Qilian. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(1): 39—44 (in Chinese with English abstract).
- Foster, G. L., Carter, A., 2007. Insights into the patterns and locations of erosion in the Himalaya—a combined fission-track and in situ Sm-Nd isotopic study of detrital apatite. *Earth and Planetary Science Letters*, 257(3—4): 407—418. doi: 10.1016/j.epsl.2007.02.044
- Freeman, S. R., Butler, R. W. H., Cliff, R. A., et al., 1998. Direct dating of mylonite evolution: a multi-disciplinary geochronological study from the Moine thrust zone, NW Scotland. *Journal of the Geological Society*, 155(5): 745—758. doi: 10.1144/gsjgs.155.5.0745
- Govindaraju, K., 1994. Compilation of working values and sample description for 383 geostandards. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 18(Suppl.): 1—158. doi: 10.1046/j.1365-2494.1998.53202081.x-1
- He, S. P., Wang, H. L., Chen, J. L., et al., 2008. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of basic dikes within maxianshan rock group in the Central Qilian Mountains and its tectonic implications. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(1): 35—45 (in Chinese with English abstract).
- Hofmann, A. W., Hart, S. R., 1978. An assessment of local and regional isotopic equilibrium in the mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 38(1): 44—62. doi: 10.1016/0012-821X(78)90125-5
- Hou, Q. Y., Zhang, H. F., Zhang, B. R., et al., 2005. Characteristics and tectonic affinity of Lajishan paleo-mantle in Qilian orogenic belt; a geochemical study of basalts. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(1): 61—70 (in Chinese with English abstract).
- Kang, H. J., Sun, B. N., Liu, X. H., et al., 2008. Stable isotopic characteristics of Xiliugou polymetallic deposit in the western part of the North Qilian Mountains. *Geological Journal of China Universities*, 14(3): 433—441 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. Y., Guo, Z. P., Wang, W., 2005. Caledonian convergent transformation and metallogenetic response in the North Qilian Mountains. *Geological Review*, 51(2): 120—127 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. Y., Li, S. G., Guo, A. L., et al., 2007. Zircon shrimp U-Pb ages and trace element geochemistry of the Kuhai gabbro and the Dur'ngoi diorite in the southern east Kunlun tectonic belt, Qinghai, Western China and their geological implications. *Science in China (Series D)*, 50(Suppl. 2): 331—338. doi: 10.1007/s11430-007-0003-4.
- Li, X. H., Li, Z. X., Zhou, H. W., et al., 2003. Shrimp U-Pb zircon age, geochemistry and Nd isotope of the Guanda-



- oshan pluton in SW Sichuan: petrogenesis and tectonic significance. *Science in China (Series D)*, 46(Suppl. 1): 73—83.
- Liu, X. H., Sun, B. N., Qu, W. J., et al., 2007. Re-Os dating of molybdenite in Xiliugou W. Mo deposit in western part of North Qilian Mountains and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2434—2442 (in Chinese with English abstract).
- McCulloch, M. T., Black, L. P., 1984. Sm-Nd isotopic systematics of Enderby Land granulites and evidence for the redistribution of Sm and Nd during metamorphism. *Earth and Planetary Science Letters*, 71(1): 46—58. doi: 10.1016/0012-821X(84)90051-7
- McCulloch, M. T., Jaques, A. L., Nelson, D. R., et al., 1983. Nd and Sr isotopes in kimberlites and lamproites from western Australia: an enriched mantle origin. *Nature*, 302: 400—403. doi: 10.1038/302400a0
- McFarlane, C. R. M., McCulloch, M. T., 2007. Coupling of in-situ Sm-Nd systematics and U-Pb dating of monazite and allanite with applications to crustal evolution studies. *Chemical Geology*, 245(1—2): 45—60. doi: 10.1016/j.chemgeo.2007.07.020
- O'Nions, R. K., Hamilton, P. J., Evensen, N. M., 1977. Variations in  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  in oceanic basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 34(1): 13—22. doi: 10.1016/0012-821X(77)90100-5
- Su, Q., Fullagar, P. D., 1995. Rb-Sr and Sm-Nd isotopic systematics during greenschist facies metamorphism and deformation: examples from the southern Appalachian Blue Ridge. *The Journal of Geology*, 103(4): 423—436. doi: 10.1086/629761
- Wan, Y. S., Xu, Z. Q., Yang, J. S., et al., 2003. The Precambrian high-grade basement of the Qilian terrane and neighboring areas: its ages and compositions. *Acta Geoscientia Sinica*, 24(4): 319—324 (in Chinese with English abstract).
- Whitehouse, M. J., 1988. Granulite facies Nd-isotopic homogenization in the Lewisian complex of Northwest Scotland. *Nature*, 331: 705—707. doi: 10.1038/331705a0
- Xia, L. Q., Xia, Z. C., Xu, X. Y., 1996. Petrogenesis of marine volcanic rocks from North Qilian Mountains. Geological Publishing House, Beijing, 1—152 (in Chinese).
- Xia, L. Q., Xia, Z. C., Xu, X. Y., 2003. Magmagenesis of Ordovician back-arc basins in the northern Qilian Mountains. *Chinese Geology*, 30(1): 48—60 (in Chinese with English abstract).
- Xia, L. Q., Xia, Z. C., Zhao, J. T., et al., 2000. Determination of properties of Proterozoic continental flood basalts of western part from North Qilian Mountains. *Science in China (Series D)*, 42(5): 506—514. doi: 10.1007/BF02875244
- Xu, W. D., Zhou, X. W., Li, J. J., et al., 2006. The sequence stratigraphical characters of the Silurian system in the West of the northern Qilanshan. *Geological Survey and Research*, 29(2): 92—97 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., Zhao, Z. X., Yang, J. S., et al., 2003. Tectonics beneath plates and mantle dynamics. *Regional Geology of China*, 22(3): 149—159 (in Chinese with English abstract).
- Yan, Z., Li, J. L., Yong, Y., et al., 2008. Tectonic environment of Ordovician carbonate-cherts in the Shihuigou area, North Qilian orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 24(10): 2384—2394 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y. H., Zhang, H. F., Xie, L. W., et al., 2007. Accurate measurement of neodymium isotopic composition using neptune multiple collector inductively coupled plasma mass spectrometry. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 35(1): 71—74 (in Chinese with English abstract).
- Yu, S. Y., Zhang, J. X., Meng, F. C., et al., 2007. Geochemical characteristics of low-temperature eclogites from the subduction-accretionary complex in the North Qilian Mountain. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(2): 101—108 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, J. Y., Yang, H. R., Yang, H. Y., et al., 2007. The Dongcaohe ophiolite from the North Qilian Mountains: a fossil oceanic crust of the Paleo-Qilian ocean. *Chinese Science Bulletin*, 52(17): 2390—2401. doi: 10.1007/s11434-007-0300-3
- Zhang, H. F., Jin, L. L., Zhang, L., et al., 2006. Pb and Nd isotopic compositions of basement and granitoid in the Qilianshan: constraints on tectonic affinity. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(1): 57—65 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, Z. H., Zhang, Q. L., Sun Z., 1997. Rb-Sr and Sm-Nd isotopic systems in ductile shear zone. *Geology-Geochemistry*, 3: 70—75 (in Chinese with English abstract).
- Zuo, G. C., Liu, Y. K., Zhang, C., 2002. Tectono-stratigraphic characteristics of continent crustal remnants in central-western sector of the North Qilian orogen. *Scientia Geologica Sinica*, 37(3): 302—312 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 董国安, 杨怀仁, 杨宏仪, 等, 2007. 祁连地块前寒武纪基底锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及其地质意义. *科学通报*, 52(13): 1572—1585.

- 杜远生,朱杰,顾松竹,2006.北祁连肃南一带奥陶纪硅质岩沉积地球化学特征及其多岛洋构造意义.地球科学——中国地质大学学报,31(1):101—109.
- 杜远生,朱杰,顾松竹,等,2007.北祁连造山带寒武系—奥陶系硅质岩沉积地球化学特征及其对多岛洋的启示.中国科学(D辑),37(10):1314—1329.
- 樊光明,雷东宁,2007.祁连山东南段加里东造山期构造变形年代的精确限定及其意义.地球科学——中国地质大学学报,32(1):39—44.
- 何世平,王洪亮,陈隽璐,等,2008.中祁连马衔山岩群内基性岩墙群锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及其构造意义.地球科学——中国地质大学学报,33(1):35—45.
- 侯青叶,张宏飞,张本仁,等,2005.祁连造山带中部拉脊山古地幔特征及其归属:来自基性火山岩的地球化学证据.地球科学——中国地质大学学报,30(1):61—70.
- 康洪杰,孙柏年,刘晓煌,等,2008.北祁连山西段西柳沟铅锌矿稳定同位素特征.高校地质学报,14(3):433—441.
- 李王晔,李曙光,郭安林,等,2007.青海东昆南构造带苦海辉长岩和德尔尼闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及痕量元素地球化学——对“祁—柴—昆”晚新元古代—早奥陶世多岛洋南界的制约.中国科学(D辑),50(增刊2):331—338.
- 李文渊,郭周平,王伟,2005.北祁连山加里东期聚敛作用的构造转换及其成矿响应.地质论评,51(2):120—127.
- 刘晓煌,孙柏年,屈文俊,等,2007.北祁连山西段西柳沟钨钼矿的 Re-Os 定年及地质意义.岩石学报,23(10):2434—2442.
- 万渝生,许志琴,杨经绥,等,2003.祁连造山带及邻区前寒武纪深变质基底的年代和组成.地球学报,24(4):319—324.
- 夏林圻,夏祖春,徐学义,1996.北祁连山海相火山岩岩石成因.北京:地质出版社,1—152.
- 夏林圻,夏祖春,徐学义,2003.北祁连山奥陶纪弧后盆地火山岩浆成因.中国地质,30(1):48—60.
- 夏林圻,夏祖春,赵江天,等,2000.北祁连山西段元古宙大陆溢流玄武岩性质的确定.中国科学(D辑),30(1):1—8.
- 徐卫东,周学武,李俊建,等,2006.北祁连西段志留系层序地层层学特征.地质调查与研究,29(2):92—97.
- 许志琴,赵志兴,杨经绥,等,2003.板块下的构造及地幔动力学.地质通报,22(3):149—159.
- 闫臻,李继亮,雍拥,等,2008.北祁连石灰沟奥陶纪碳酸盐岩—硅质岩形成的构造环境.岩石学报,24(10):2384—2394.
- 杨岳衡,张宏福,谢烈文,等,2007.多接收器电感耦合等离子质谱精确测定钨同位素组成.分析化学,35(1):71—74.
- 于胜尧,张建新,孟繁聪,等,2007.北祁连俯冲—增生杂岩带中低温榴辉岩的地球化学特征.岩石矿物学杂志,26(2):101—108.
- 曾建元,杨怀仁,杨宏仪,等,2007.北祁连东草河蛇绿岩:一个早古生代的洋壳残片.科学通报,52(7):825—835.
- 张宏飞,靳兰兰,张利,等,2006.基底岩系和花岗岩类 Pb-Nd 同位素组成限定祁连山带的构造属性.地球科学——中国地质大学学报,31(1):57—65.
- 钟志洪,张庆龙,孙珍,1997.韧性剪切带中的 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素体系.地质地球化学,3:70—75.
- 左国朝,刘义科,张崇,2002.北祁连造山带中—西段陆壳残块群的构造—地层特征.地质科学,37(3):302—312.