

# 阿尔金南缘构造带西段辉绿岩墙群的地球 化学特征及构造环境

覃小锋<sup>1,2</sup> 夏斌<sup>1</sup> 李江<sup>2</sup> 陆济璞<sup>2</sup> 许华<sup>2</sup> 周府生<sup>2</sup> 胡贵昂<sup>2</sup> 李乾<sup>2</sup>

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东广州 510640; 2. 广西区域地质调查研究院, 广西桂林 541003)

**摘要:** 对阿尔金南缘构造带西段辉绿岩墙群的岩石学和地球化学的详细研究表明, 该区辉绿岩墙群为拉斑系列岩石, 其主量元素以中等  $TiO_2$  (1.19% ~ 1.59%)、高  $MgO$  (5.51% ~ 7.88%)、贫  $K_2O$  (0.04% ~ 0.84%) 和  $P_2O_5$  (0.10% ~ 0.20%)、 $Na_2O > K_2O$  为特征; 高场强元素(HFSE)丰度特征显示其为 E-MORB 型或过渡型玄武岩质岩石, 稀土元素总量相对较高, 轻重稀土元素分馏不显著 [ $(La/Yb)_N = 1.93 \sim 3.61$ ,  $LREE/HREE = 3.01 \sim 4.10$ ], 在球粒陨石标准化配分模式图上呈略富集型。结合玄武岩构造环境判别图解综合分析推测, 它们可能形成于一种裂谷向 MORB 环境过渡的构造环境, 即初始小洋盆构造环境。

**关键词:** 辉绿岩墙群 地球化学 构造环境 阿尔金南缘构造带西段

中图分类号: P588.14<sup>+</sup>5; P595; P54

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2008)01-0014-09

## Geochemical characteristics and tectonic settings of the diabase dyke swarms in the western segment of the southern Altun tectonic belt

QIN Xiao-feng<sup>1,2</sup>, XIA Bin<sup>1</sup>, LI Jiang<sup>2</sup>, LU Ji-pu<sup>2</sup>, XU Hua<sup>2</sup>, ZHOU Fu-sheng<sup>2</sup>, HU Gui-ang<sup>2</sup> and LI Qian<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. Guangxi Institute of Regional Geological Survey, Guilin 541003, China)

**Abstract:** Detailed petrographic and geochemical studies show that the diabase dyke swarms in the western segment of the southern Altun tectonic belt belong to tholeiite series. The major elements of the diabase dykes are characterized by intermediate  $TiO_2$  (1.19% ~ 1.59%), high  $MgO$  (5.51% ~ 7.88%), poor  $K_2O$  (0.04% ~ 0.84%) and  $P_2O_5$  (0.10% ~ 0.20%) and  $Na_2O > K_2O$ ; Characteristics of high field strength elements contents show that the diabase dyke swarms are of E-type MORB or transitional types from continental (intraplate) rift basalt to mid-ocean ridge basalt. The diabase dyke swarms have high contents of  $\Sigma REE$  and unremarkable fractionation between LREE and HREE [ $(La/Yb)_N = 1.93 \sim 3.61$ ,  $LREE/HREE = 3.01 \sim 4.10$ ]. Chondrite-normalized REE diagrams show a slightly enriched LREE patterns. Combined with the basalt tectonic discrimination diagrams, it is held that the diabase dyke swarms in the western segment of the southern Altun tectonic belt might have been formed in a transitional tectonic environment from rift to MORB, i. e., the tectonic environment of an initial small oceanic basin.

**Key words:** diabase dyke swarms; geochemistry; tectonic setting; western segment of the southern Altun tectonic belt

收稿日期: 2007-07-06; 修订日期: 2007-09-10

基金项目: 广西自然科学基金资助项目(桂科自 0728089); 中国地质调查局地质大调查项目资助(19991300008091)

作者简介: 覃小锋(1969-), 男, 汉族, 博士研究生, 高级工程师, 从事构造地质学和区域地质学研究, 电话: 0773-3624310, E-mail:

qinxiaofeng@263.net.

阿尔金南缘构造带(阿尔金南缘断裂)位于西藏、新疆、青海、甘肃四省区之间,西起西藏拉竹龙,东至甘肃金塔,主体呈北东方向延伸,全长约1600 km。尽管多数研究者认为阿尔金南缘构造带的性质、构造意义是确定阿尔金造山带乃至中国西北部大地构造形成演化的关键,但对于新元古代—早古生代阿尔金造山作用的性质、区域构造属性、演化时限与过程、构造样式与基本格局等重大问题,仍有较大争议(Hoffman, 1991;何国琦等, 1994;程裕淇, 1994;赖绍聪等, 1996;潘桂棠等, 1997;刘良等, 1998;王焰等, 1999;张旗等, 2001;Zhang Jianxin *et al.*, 2001),争论的焦点之一便是阿尔金南缘边界断裂的性质与时空演化问题。阿尔金南缘构造带(阿尔金南缘断裂)中发育大量的辉绿岩墙群,前人根据对构造带东段茫崖一带的研究结果,认为辉绿岩墙群与镁铁-超镁铁质岩块空间上紧密共生,具有蛇绿岩特征(何国琦等, 1994;程裕淇, 1994;赖绍聪等, 1996;潘桂棠等, 1997;王焰等, 1999;张旗等, 2001),时代为早古生代(刘良等, 1998),但迄今还鲜见对这些基性岩墙有过系统研究。笔者对阿尔金南缘构造带西段的研究结果表明,这些辉绿岩墙群往往与早古生代镁铁质-超镁铁质岩块紧密共生以构造岩片形式存在于阿尔金南缘构造混杂岩带中<sup>①</sup>。因此,这些辉绿岩墙群的构造性质尚需做进一步的系统研究。

辉绿岩墙群是岩石圈地幔伸展作用和构造-岩浆演化的重要标志,作为一种特殊的构造岩浆类型,被广泛应用于重建古老陆块聚合、伸展和裂解过程(Hoffman, 1991;Radhakrishna and Joseph, 1996;李江海等, 1997;陈隽璐等, 2006)。本文拟对这些辉绿岩墙群的地质特征、岩石化学和地球化学等进行系统研究,并探讨其形成的构造背景,这对于深入研究阿尔金南缘构造带的形成与演化具有重要的意义。

## 1 地质概况

阿尔金山脉分隔北部的塔里木地块和南部的柴达木地块,总体呈北东东向延伸,是塔里木地块和柴达木地块长期相互作用而成的复合型造山带(覃小锋等, 2006, 2007)。大量研究证明,阿尔金构造带西段可进一步划分为北阿尔金地块、中阿尔金地块和南阿尔金地块3个次级构造单元<sup>①</sup>(覃小锋等,

2006),其中南阿尔金地块(阿尔金南缘构造带)主要由新元古代—早古生代变质岩系、呈残块状分布的新太古界—古元古界金水口岩群、中生界及元古代、加里东期和海西期花岗岩组成(图1)。地块北部主要为青白口系索尔库里群,岩性主要为碳酸盐岩、变质碎屑岩和变质火山(碎屑)岩等,岩石总体上尚保持着成层有序状态,局部可见原始水平层理和水平微层理,且索尔库里群的灰岩中产有层形叠层石,反映索尔库里群可能形成于构造活动趋于稳定的滨海至碳酸盐台地环境;而地块南部沿着阿尔金南缘断裂分布的早古生代变质岩系的岩石类型异常复杂,主要由变质基性-超基性岩、变质碎屑岩、绿片岩、板岩、千枚岩、片岩、石英岩、大理岩、钙镁硅酸盐岩及少量的角闪质岩石等岩石类型组成,岩石遭受了强烈的构造混杂作用,整个岩系均已显示出长程(长距离)无序而短程(短距离)部分有序的非史密斯地层特点,总体以岩片的形式出露。其中的辉绿岩往往呈较密集的席状岩墙群分布,并与镁铁质-超镁铁质岩块紧密共生以构造岩片形式存在(图2、3),有的受变形变质作用改造而发生透镜体化,总体呈北东向平行断裂带呈串珠状展布,但受变形变质作用改造较弱部位可见岩墙与围岩呈明显的侵入接触关系,接触面清楚,倾角 $70^{\circ}\sim 85^{\circ}$ ,有的岩墙边部尚可见十几厘米~几十厘米的不对称冷凝边,具微-细晶结构,往岩墙中心则具变粗趋势。岩墙规模大小不等,宽一般为几十厘米~几十米,个别达上百米。

## 2 岩石学特征

辉绿岩墙群的岩石类型较单一,主要为辉长辉绿岩和辉绿岩,岩石均已遭受到不同程度的变形变质作用改造,普遍具蛇纹石化、透闪石-阳起石化、斜黝帘石化和绿泥石-绿帘石化现象,部分岩石已完全变成斜长阳起石岩或斜长绿泥石岩。岩石呈深灰绿-墨绿色,具变余(辉长)辉绿结构,局部具嵌晶含长结构,定向构造。矿物组合为辉石(部分为橄榄石)(20%~60%)和斜长石(25%~48%),部分岩石含少量石英(0~5%)和角闪石(1%~8%),副矿物主要有磷灰石、榍石、钛铁矿、磁铁矿和磁黄铁矿等。基性斜长石绢云母化和斜黝帘石化明显,残余晶体多呈半自形长板状,部分具去钙现象而变为钠长石

① 广西壮族自治区地质调查研究院, 2003. 新疆1:25万瓦石峡幅、阿尔金山幅区域地质调查报告.

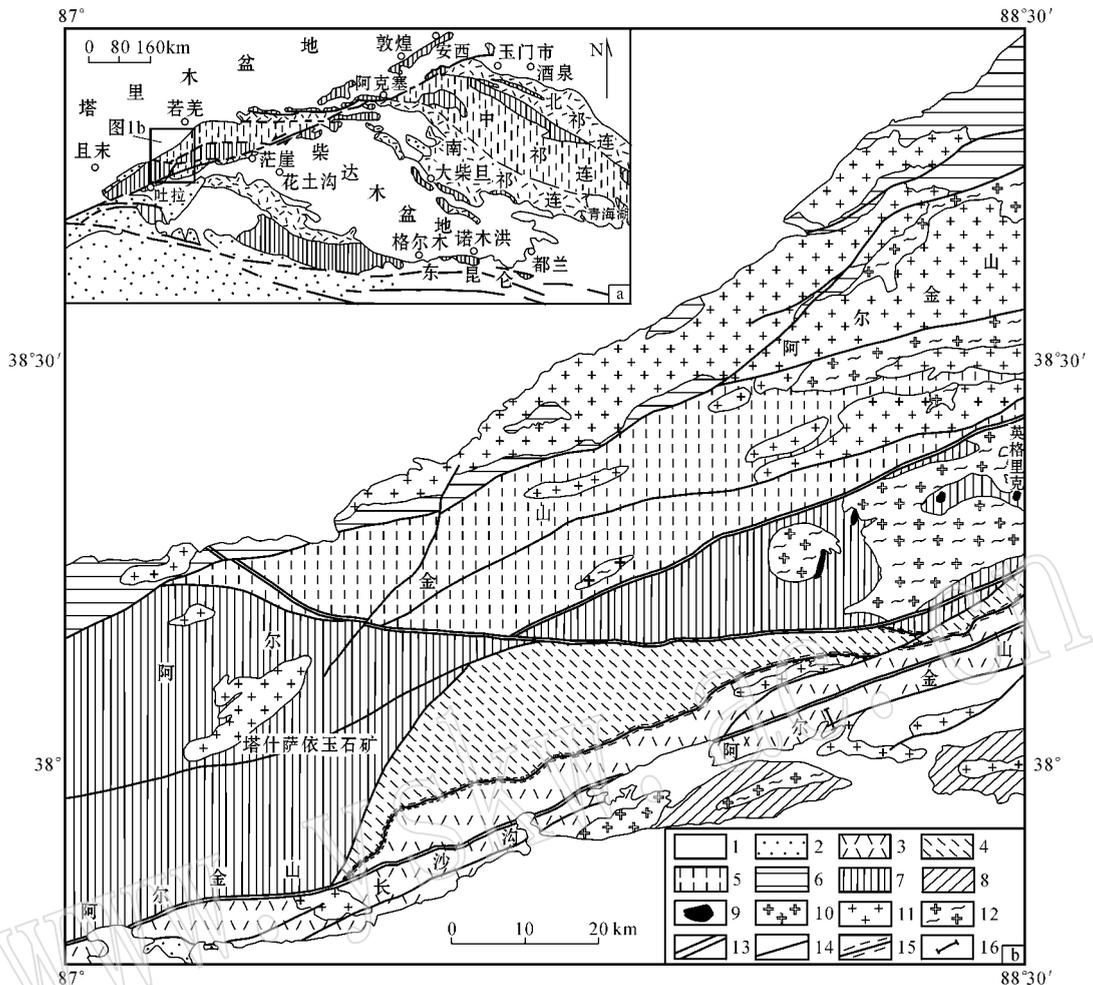


图1 阿尔金构造带西段地质略图

Fig. 1 Geological sketch map of the western segment of Altun tectonic belt

1—新生界 2—中生界 3—下古生界 4—青白口系索尔库里群 5—蓟县系塔普达坂群 6—长城系巴什库干群 7—新太古界-古元古界阿尔金岩群 8—新太古界-古元古界金水口岩群 9—超基性岩; 10—海西期岩体; 11—加里东期岩体; 12—新元古代花岗质片麻岩; 13—复合型深大断裂; 14—一般断层; 15—韧性断层; 16—图2位置

1—Cenozoic; 2—Mesozoic; 3—Early Paleozoic; 4—Suokeruli Group of Qingbaikouan System; 5—Taxidaban Group of Jixianian System; 6—Bashenkuergan Group of Changchengian System; 7—Complex of Neoproterozoic-Paleoproterozoic Altun Group; 8—Complex of Neoproterozoic-Paleoproterozoic Jinshuikou Group; 9—ultrabasic rock; 10—Hercynian intrusion; 11—Caledonian intrusion; 12—Neoproterozoic granitic gneiss; 13—compound deep fault; 14—general fault; 15—ductile fault; 16—location of Fig. 2

( $An = 6 \sim 9$ ) 辉石和橄榄石多已蚀变为蛇纹石、透闪石、阳起石、绿泥石和绿帘石等, 部分被方解石交代, 残余下来的颗粒多呈半自形-他形粒状, 局部仍可见其包嵌细晶斜长石形成嵌晶含长结构。

### 3 地球化学特征

在室内外地质研究基础上, 优选蚀变弱的辉绿岩代表性样品, 在武汉综合岩矿测试中心完成主、微量和稀土元素分析。主元素采用 X 荧光光谱法 (XRF) 分析, 微量元素和稀土元素用 ICP-AES 方法测定。分析结果列于表 1、2 中。

#### 3.1 主量元素特征

阿尔金南缘构造带西段 7 件辉绿岩样品的  $SiO_2$  含量变化不大, 在 47.74%~50.33% 范围内, 平均值为 49.04%, 属基性岩类; 除 0047-2 样品外, 其他样品  $Al_2O_3$  含量较低, 变化在 11.72%~14.34%, 接近于太平洋中脊拉斑玄武岩的  $Al_2O_3$  平均含量 (14.86% X Melson *et al.*, 1976) 和洋岛拉斑玄武岩的  $Al_2O_3$  平均含量 (13.45% X Wilson, 1989);  $TiO_2$  多在 1.19%~1.59% 之间 (3006-1A 相对较高, 达 2.24%), 平均为 1.52%, 与 MORB 平均值 (1.5%) 一致, 可与大西洋中脊和印度洋中脊拉斑玄武岩的  $TiO_2$  平均含量 (分别为 1.49% 和 1.19%) 相对比

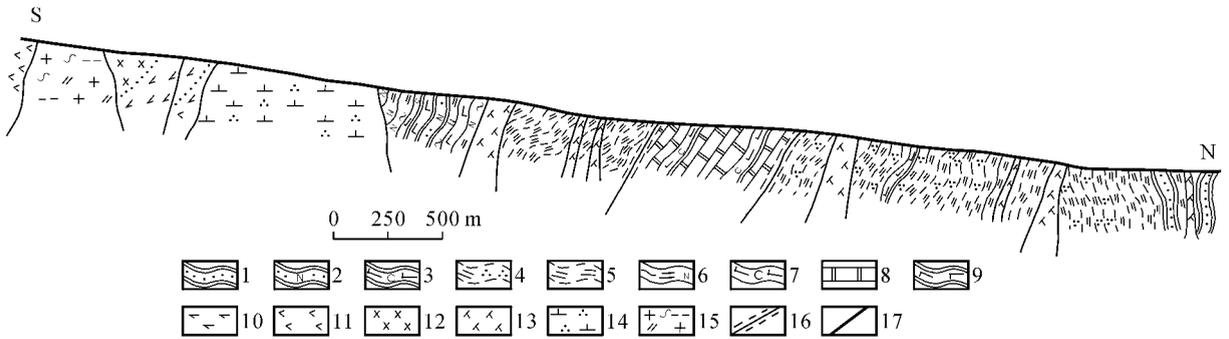


图 2 阿尔金南缘构造带西段辉绿岩墙群实测剖面图

Fig. 2 Stratigraphic section of diabase dyke swarms in the western segment of southern Altun tectonic belt

1—变质砂岩；2—变质长石砂岩；3—含炭钙质板岩；4—绢云石英千枚岩；5—绢云千枚岩；6—钠长绿泥片岩；7—含炭钙质片岩；8—重结晶灰岩；9—变质基性火山岩；10—变辉石岩；11—角闪石岩；12—变辉长岩；13—变辉绿岩；14—石英闪长岩；15—片麻状斑状黑云二长花岗岩；16—韧性断层；17—断层

1—meta-sandstone；2—meta-feldspar sandstone；3—carbonous calcareous slate；4—sericite-quartz phyllite；5—sericite phyllite；6—albite-chlorite schist；7—carbonous calcareous schist；8—recrystallized limestone；9—metabasic volcanic rocks；10—metapyroxenite；11—hornblendite；12—metagabbro；13—metadiabase；14—quartz diorite；15—gneissic porphyritic biotite monzonitic granite；16—ductile fault；17—fault

表 1 辉绿岩墙的化学成分分析结果

$w_B/\%$

Table 1 Chemical composition analyses of diabase dykes

| 序号                             | 1      | 2      | 3       | 4        | 5      | 6      | 7      |
|--------------------------------|--------|--------|---------|----------|--------|--------|--------|
| 样品编号                           | 0047-2 | 3171-1 | 3006-1A | 0088-1-1 | 0090-4 | 0092-3 | 0091-4 |
| 岩石名称                           | 辉绿岩    | 辉绿岩    | 辉绿岩     | 辉绿岩      | 辉绿岩    | 辉绿岩    | 辉长辉绿岩  |
| SiO <sub>2</sub>               | 49.13  | 49.12  | 47.74   | 49.31    | 49.64  | 47.99  | 50.33  |
| TiO <sub>2</sub>               | 1.36   | 1.59   | 2.24    | 1.32     | 1.19   | 1.37   | 1.55   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 16.21  | 12.32  | 11.72   | 13.06    | 13.44  | 14.34  | 13.35  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2.28   | 2.60   | 4.04    | 3.60     | 1.32   | 3.11   | 3.02   |
| FeO                            | 6.87   | 11.67  | 11.60   | 8.05     | 8.67   | 7.97   | 8.00   |
| CaO                            | 7.35   | 10.17  | 9.99    | 6.67     | 9.60   | 10.38  | 8.14   |
| MgO                            | 7.07   | 5.51   | 6.53    | 7.22     | 7.27   | 7.88   | 7.66   |
| MnO                            | 0.16   | 0.25   | 0.23    | 0.13     | 0.15   | 0.18   | 0.16   |
| K <sub>2</sub> O               | 0.75   | 0.67   | 0.20    | 0.84     | 0.08   | 0.04   | 0.17   |
| Na <sub>2</sub> O              | 3.05   | 1.93   | 2.18    | 2.19     | 3.48   | 1.79   | 3.46   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.20   | 0.15   | 0.20    | 0.10     | 0.11   | 0.13   | 0.14   |
| H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>  | 3.86   | 2.22   | 2.80    | 4.69     | 3.56   | 3.93   | 3.48   |
| H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>  | 0.39   | 0.24   | 0.24    | 1.12     | 0.60   | 0.51   | 0.66   |
| CO <sub>2</sub>                | 1.43   | 1.53   | 0.27    | 2.49     | 1.24   | 0.57   | 0.19   |
| 总和                             | 100.11 | 99.97  | 99.98   | 100.79   | 100.35 | 100.19 | 100.31 |

(Melson *et al.*, 1976)。总之,阿尔金南缘构造带西段的辉绿岩总体以高 MgO(5.51%~7.88%)和 FeO(6.87%~11.67%)、贫 K<sub>2</sub>O(0.04%~0.84%)和 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(0.10%~0.20%)、Na<sub>2</sub>O > K<sub>2</sub>O 为特征。在 Zr/TiO<sub>2</sub>-Nb/Y 分类图解(Winchester and Floyd, 1977)(图 4)上显示本区辉绿岩样品为拉斑玄武质岩石;在 SiO<sub>2</sub>-Nb/Y 图解(Winchester and Floyd, 1977)(图 5)上落入亚碱性系列区,而在 SiO<sub>2</sub>-FeO<sup>T</sup>/MgO 图解(Miyashiro, 1975)(图 6)上落入拉斑系列区,显示本区辉绿岩总体具拉斑玄武岩系列演化趋势。

### 3.2 微量元素特征

高场强元素 Zr、Hf 和 Nb 在蚀变和变质作用过

程中具有良好稳定性,是岩石成因和源区性质的良好示踪剂。从表 2 中可以看出,除岩石蚀变较严重、碳酸盐化较强烈的 4 号样品(0088-1-1)外,其他辉绿岩微量元素 Zr 和 Hf 含量分别在  $117 \times 10^{-6} \sim 155 \times 10^{-6}$  和  $3.0 \times 10^{-6} \sim 3.9 \times 10^{-6}$  之间,略高于 MORB(分别为  $90 \times 10^{-6}$  和  $2.4 \times 10^{-6}$ )(Pearce, 1982)的含量,而远低于 OIB 的含量(分别为  $280 \times 10^{-6}$  和  $7.8 \times 10^{-6}$ )(Sun and McDonough, 1989);Nb 丰度为  $9.1 \times 10^{-6} \sim 13.8 \times 10^{-6}$ ,平均值为  $11.21 \times 10^{-6}$ ,与 N-MORB 和 OIB 的含量(分别为  $3.5 \times 10^{-6}$  和  $48.0 \times 10^{-6}$ )(Pearce, 1982; Sun and McDonough, 1989)差别较大,而与 E-MORB 含量( $8.3 \times 10^{-6}$ )较为相近

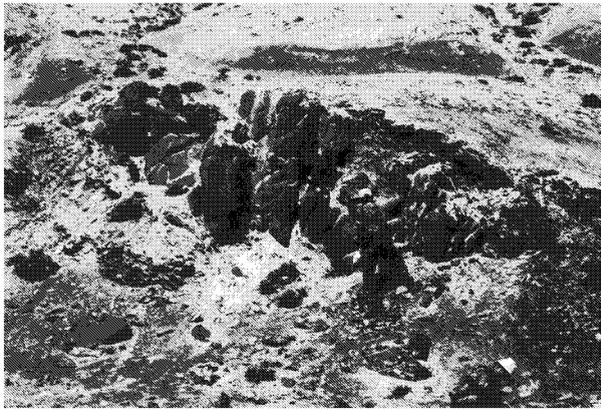


图 3 辉绿岩墙野外照片

Fig. 3 Field photo of diabase dyke

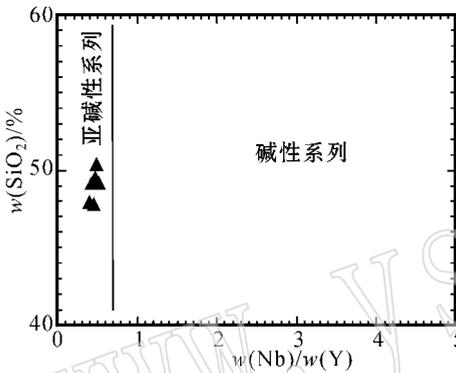


图 5 SiO<sub>2</sub> - Nb/Y 图解(据 Winchester and Floyd, 1977)

Fig. 5 SiO<sub>2</sub> - Nb/Y diagram(after Winchester and Floyd, 1977)

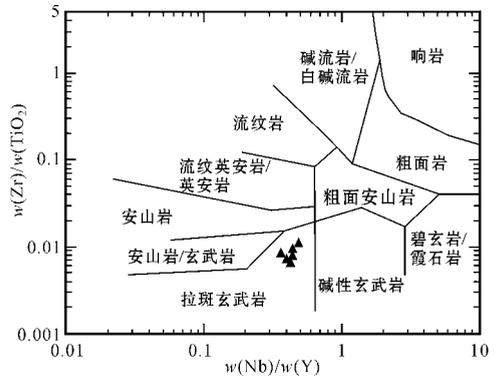


图 4 Zr/TiO<sub>2</sub> - Nb/Y 图解(据 Winchester and Floyd, 1977)

Fig. 4 Zr/TiO<sub>2</sub> versus Nb/Y classification diagram(after Winchester and Floyd, 1977)

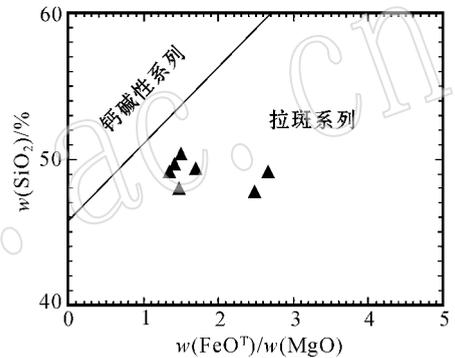


图 6 SiO<sub>2</sub> - FeO<sup>+</sup>/MgO 图解(据 Miyashiro, 1975)

Fig. 6 SiO<sub>2</sub> - FeO<sup>+</sup>/MgO diagram(after Miyashiro, 1975)

(Sun and McDonough, 1989)。这表明辉绿岩明显区别于低Zr、Hf、Nb含量的N-MORB和高Zr、Hf、Nb含量的OIB。高场强元素比值Zr/Nb是有效的环境判别指标,N-MORB的Zr/Nb值多大于30,E-MORB和洋岛拉斑玄武岩的Zr/Nb值约为10(Wilson, 1989),而本区辉绿岩Zr/Nb值多在10~12之间。

微量元素比值蛛网图能够深刻地揭示岩浆成因、演化及其构造背景。从表2和图7中可以看出,本区辉绿岩P以前的大离子亲石元素丰度变化范围相对较宽,相对丰度变化较复杂,而高场强元素(Zr、Hf、Sm、Y、Yb)的富集程度不强,相对丰度多数小于MORB的2倍,均以不分异并贴近于MORB为特征,在微量元素比值蛛网图上具有相对较平坦的分布型式,显示其与E-MORB型或过渡型玄武岩的配分模式相似(王仁民等, 1987)。

总之,本区辉绿岩的高场强元素(HFSE)丰度特征明显区别于洋岛拉斑玄武岩(OIB)和N-MORB,而与E-MORB型或过渡型玄武岩相似,显示其为E-

MORB型或过渡型玄武岩质岩石。

### 3.3 稀土元素特征

稀土元素分析结果(表2)表明,本区辉绿岩稀土元素总量较高,变化在 $52.49 \times 10^{-6} \sim 93.75 \times 10^{-6}$ 之间( $La/Yb$ )<sub>N</sub>介于1.93~3.61之间( $La/Sm$ )<sub>N</sub>介于1.35~2.08之间, LREE/HREE=3.01~4.10,表明轻重稀土元素分馏不明显。 $\delta(Eu) = 0.88 \sim 1.01$ ,具微弱的Eu正负异常,在球粒陨石标准化配分模式图解(图8)上显示为轻微富集型的稀土元素配分型式。

## 4 构造环境判别

微量元素和稀土元素特征的分析结果表明,本区辉绿岩具E-MORB型或过渡型玄武岩质岩石特征。由于本区辉绿岩经历了多次蚀变和变质作用改造,其主量元素成分也许不能很好地反映岩石形成

表 2 辉绿岩墙的微量元素和稀土元素分析结果

 $\omega_B/10^{-6}$ 

Table 2 Minor element and REE analyses of diabase dykes

| 序号                   | 1      | 2      | 3       | 4        | 5      | 6      | 7      |
|----------------------|--------|--------|---------|----------|--------|--------|--------|
| 样品编号                 | 0047-2 | 3171-1 | 3006-1A | 0088-1-1 | 0090-4 | 0092-3 | 0091-4 |
| 岩石类型                 | 辉绿岩    | 辉绿岩    | 辉绿岩     | 辉绿岩      | 辉绿岩    | 辉绿岩    | 辉长辉绿岩  |
| Li                   | 34.3   | 9.0    | 9.8     | 79.9     | 50.7   | 153.9  | 56.1   |
| Be                   | 1.7    | 2.6    | 2.3     | 1.4      | 1.3    | 1.8    | 1.4    |
| Nb                   | 13.8   | 11.0   | 11.2    | 9.1      | 10.7   | 10.4   | 12.3   |
| Sc                   | 25.0   | 30.3   | 46.9    | 28.2     | 30.4   | 32.7   | 29.3   |
| Y                    | 27.33  | 27.22  | 26.25   | 20.87    | 23.37  | 27.53  | 26.72  |
| Zr                   | 155    | 121    | 125     | 92       | 117    | 123    | 135    |
| Th                   | 3.2    | 3.1    | 2.0     | <1.0     | 2.0    | 1.9    | 2.0    |
| Sr                   | 242    | 176    | 141     | 224      | 92     | 353    | 452    |
| Ba                   | 358    | 166    | 66      | 413      | 37     | 19     | 66     |
| V                    | 173.1  | 386.9  | 598.2   | 306.4    | 272.9  | 283.3  | 301.0  |
| Co                   | 34.4   | 45.8   | 55.8    | 48.4     | 40.1   | 34.6   | 44.7   |
| Cr                   | 209.3  | 85.7   | 22.8    | 183.9    | 200.7  | 297.0  | 325.1  |
| Ni                   | 70.2   | 52.3   | 46.0    | 95.3     | 76.4   | 93.3   | 101.4  |
| Cu                   | 32.7   | 150.3  | 176.8   | 138.6    | 68.6   | 74.8   | 97.8   |
| Pb                   | 23.9   | 27.0   | 36.9    | 13.7     | 20.1   | 24.2   | 19.5   |
| Zn                   | 93     | 117    | 104     | 94       | 87     | 97     | 102    |
| W                    | 0.6    | 0.9    | 0.9     | 0.6      | 0.7    | 0.6    | 0.7    |
| Mo                   | 0.67   | 0.34   | 0.33    | 0.26     | 0.40   | 0.25   | 0.30   |
| As                   | 3.01   | 3.61   | 2.83    | 13.59    | 4.57   | 19.80  | 15.85  |
| Sb                   | 0.55   | 0.54   | 0.67    | 1.86     | 0.87   | 1.43   | 1.82   |
| Hg                   | 0.064  | 0.019  | 0.027   | 0.039    | 0.049  | 0.011  | 0.054  |
| F                    | 500    | 557    | 406     | 559      | 415    | 658    | 552    |
| Rb                   | 24.8   | 16.0   | <3.0    | 20.3     | <3.0   | <3.0   | <3.0   |
| Hf                   | 3.9    | 3.8    | 3.2     | 2.3      | 3.0    | 3.6    | 3.7    |
| Te                   | 0.05   | 0.09   | 0.06    | 0.08     | 0.08   | 0.08   | 0.07   |
| Cl                   | 0.012  | 0.045  | 0.037   | 0.008    | 0.012  | 0.008  | 0.010  |
| Au*                  | 0.7    | 1.3    | 1.8     | 2.5      | 0.7    | 0.7    | 1.2    |
| Ga                   | 21.0   | 23.8   | 13.9    | 19.8     | 17.0   | 13.5   | 21.4   |
| Ag*                  | 0.062  | 0.278  | 0.237   | 0.133    | 0.064  | 0.049  | 0.035  |
| Sn                   | 1.5    | 0.8    | 0.9     | 1.4      | 1.2    | 1.2    | 1.6    |
| B                    | 38     | 24     | 9       | 9        | 13     | 25     | 21     |
| U                    | 1.0    | 0.8    | 0.8     | 0.9      | 1.0    | 1.0    | 1.0    |
| Ta                   | 0.5    | <0.5   | <0.5    | <0.5     | <0.5   | <0.5   | <0.5   |
| La                   | 14.18  | 8.09   | 10.35   | 9.16     | 10.72  | 11.88  | 11.87  |
| Ce                   | 32.66  | 22.96  | 23.46   | 14.38    | 21.25  | 23.35  | 27.91  |
| Pr                   | 4.17   | 2.92   | 3.42    | 2.19     | 2.92   | 3.17   | 3.46   |
| Nd                   | 18.48  | 13.56  | 15.35   | 10.08    | 12.95  | 13.90  | 15.34  |
| Sm                   | 4.47   | 3.78   | 4.05    | 2.83     | 3.32   | 3.60   | 4.08   |
| Eu                   | 1.42   | 1.29   | 1.40    | 1.01     | 1.01   | 1.17   | 1.26   |
| Gd                   | 4.79   | 4.36   | 4.61    | 3.28     | 3.68   | 4.01   | 4.44   |
| Tb                   | 0.82   | 0.76   | 0.81    | 0.59     | 0.65   | 0.70   | 0.77   |
| Dy                   | 5.43   | 4.86   | 4.94    | 3.62     | 4.16   | 4.44   | 4.8    |
| Ho                   | 0.96   | 0.95   | 0.95    | 0.73     | 0.86   | 0.91   | 0.94   |
| Er                   | 2.78   | 2.84   | 2.91    | 2.14     | 2.36   | 2.63   | 2.69   |
| Tm                   | 0.43   | 0.45   | 0.44    | 0.32     | 0.34   | 0.36   | 0.38   |
| Yb                   | 2.77   | 2.82   | 2.69    | 1.88     | 2.14   | 2.22   | 2.39   |
| Lu                   | 0.39   | 0.41   | 0.40    | 0.28     | 0.32   | 0.33   | 0.35   |
| ∑REE                 | 93.75  | 70.05  | 75.78   | 52.49    | 66.68  | 72.67  | 80.68  |
| LREE/HREE            | 4.10   | 3.01   | 3.27    | 3.09     | 3.60   | 3.66   | 3.81   |
| LREE                 | 75.38  | 52.60  | 58.03   | 39.65    | 52.17  | 57.07  | 63.92  |
| HREE                 | 18.37  | 17.45  | 17.75   | 12.84    | 14.51  | 15.60  | 16.76  |
| δEu                  | 0.93   | 0.97   | 0.99    | 1.01     | 0.88   | 0.94   | 0.90   |
| δCe                  | 1.01   | 1.14   | 0.95    | 0.75     | 0.90   | 0.90   | 1.04   |
| (La/Yb) <sub>N</sub> | 3.45   | 1.93   | 2.59    | 3.28     | 3.38   | 3.61   | 3.35   |
| (La/Sm) <sub>N</sub> | 2.00   | 1.35   | 1.61    | 2.04     | 2.03   | 2.08   | 1.83   |

\* Au 和 Ag 的单位为  $10^{-9}$ 。

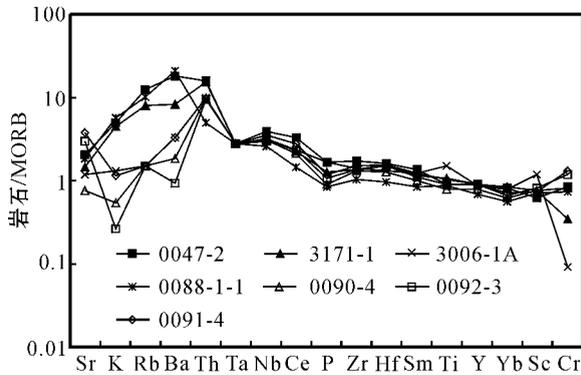


图 7 辉绿岩墙微量元素比值蛛网图解

Fig. 7 MORB-normalized incompatible element spider diagram of diabase dykes  
MORB 数据引自 Pearce(1982)  
data of MORB from Pearce(1982)

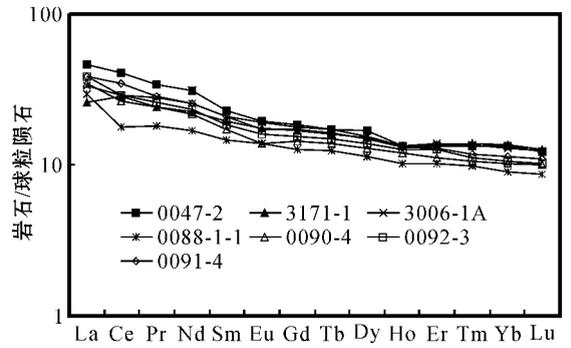


图 8 辉绿岩墙稀土元素配分模式图

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns of diabase dykes  
球粒陨石标准化数据引自 Boynton(1984)  
data of chondrite from Boynton(1984)

时的构造环境,而不活动的微量元素协变关系是构造环境判别的有效方法,在众多的不活动微量元素构造环境判别图解(图 9)中,本区辉绿岩主要落入大洋中脊玄武岩区或大洋中脊玄武岩区和板内玄武岩区的分界线两侧。其中在 Ti-Zr 图解(Pearce and Cann, 1973)(图 9a)中主要落入大洋中脊玄武岩区;在 Ti/100-Zr-Sr/2 图解(Pearce and Cann, 1973)(图 9b)中大部分投点落入大洋中脊玄武岩区,部分投点落入钙碱性玄武岩区;在 Ti-Zr 图解(Pearce, 1982)(图 9c)中主要落入大洋中脊玄武岩区;而在 Y/15-La/10-Nb/8 图解(Cabanis and Lecolle, 1989)(图 9d)中则落入大洋中脊玄武岩区和板内玄武岩区分界线两侧。各种构造环境判别图解的判别结果亦表明,本区辉绿岩可能形成于大陆裂谷向 MORB 环境过渡的构造环境。

## 5 讨论及结论

前述主量元素、微量元素和稀土元素的分析结果表明,本区辉绿岩主量元素地球化学以接近大西洋中脊和印度洋中脊拉斑玄武岩的  $TiO_2$  含量(多在 1.19%~1.59% 之间)和高  $MgO$  (5.51%~7.88%) 贫  $K_2O$  (0.04%~0.84%) 和  $P_2O_5$  (0.1%~0.2%)  $Na_2O > K_2O$  为特征,高场强元素(HFSE)丰度特征显示其为 E-MORB 型或过渡型玄武岩质岩石,明显区别于洋岛拉斑玄武岩(OIB)和 N-MORB。

Ormerod 等(1988)曾指出  $Zr/Ba$  比值大于 0.2 的玄武岩源区来自软流圈地幔,而  $Zr/Ba$  比值小于 0.2 的则来自岩石圈地幔,本区辉绿岩的  $Zr/Ba$  比值为 0.22~6.47,表明其源区来自软流圈地幔。综合分析认为,本区辉绿岩形成于阿尔金南缘古洋盆初始扩张阶段,即初始小洋盆构造环境。

通过对阿尔金山西段详细的野外地质调查发现<sup>①</sup>,沿阿尔金南缘构造带出露有数十个早古生代镁铁质-超镁铁质岩块,保存有较好的堆晶岩块、玄武岩块和辉绿岩块。前人对阿尔金南缘构造带东段玄武岩块的研究结果表明,其具有 MORB 型蛇绿岩特征,形成于成熟的洋中脊环境(刘良等,1998)。笔者的研究表明,阿尔金南缘构造带西段绿片岩(玄武岩退变质形成的产物)存在洋中脊、洋岛和火山弧 3 种环境类型(另文讨论),而辉绿岩形成于大陆裂谷向 MORB 环境过渡的构造环境,它们可能代表了阿尔金南缘古洋盆形成演化过程的不同端元阶段岩浆活动。这些代表古洋盆不同演化阶段的岩块的厘定,共同揭示了阿尔金南缘断裂带中缝合带的存在,并反映了沿阿尔金南缘构造带存在从初始裂谷扩张、形成洋盆、后期洋壳俯冲消减、碰撞造山的完整板块构造演化过程。发育于各岩块之间及其内部倾向南东的一系列逆冲型韧性剪切带的存在以及岩石经受了绿片岩相高压变质作用改造的特征(覃小锋等,2006)亦表明,这几种形成于不同构造演化阶段的岩石是通过洋壳消减、碰撞造山、构造混杂以及漫长复杂的构造折返过程拼合在一起的。

① 广西壮族自治区地质调查研究院, 2003. 新疆 1:25 万瓦石峡幅、阿尔金山幅区域地质调查报告.

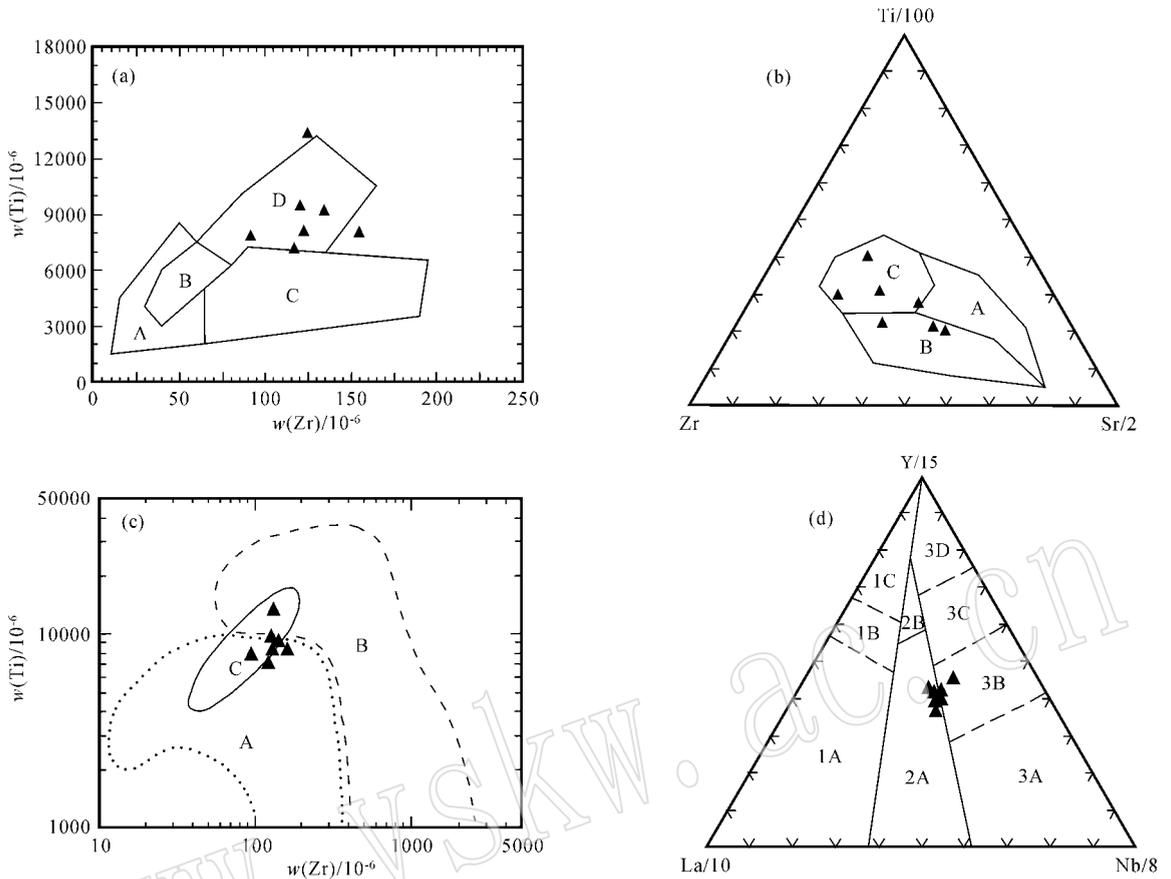


图 9 辉绿岩墙构造环境判别图解

Fig. 9 Tectonic discriminant diagram of diabase dykes

a 为 Ti-Zr 图解(据 Pearce 和 Cann,1973):A—岛弧拉斑玄武岩, B—MORB、钙碱性玄武岩和岛弧拉斑玄武岩, C—钙碱性玄武岩, D—MORB; b 为 Ti/100-Zr-Sr/2 图解(据 Pearce 和 Cann,1973):A—岛弧玄武岩, B—钙碱性玄武岩, C—MORB; c 为 Ti-Zr 图解(据 Pearce,1982):A—火山弧玄武岩, B—板内玄武岩, C—MORB; d 为 Y/15-La/10-Nb/8 图解(据 Cabanis 和 Lecomte,1989):1A—钙碱性玄武岩, 1B—过渡区, 1C—火山弧玄武岩, 2A—大陆玄武岩, 2B—弧后盆地玄武岩, 3A—陆内裂谷碱性玄武岩, 3B、3C—E-MORB(3B 富集, 3C 略富集), 3D—N 型 MORB

a—Ti-Zr diagram(after Pearce and Cann,1973):A— island arc tholeiite, B—MORB, calc-alkaline basalt and island arc tholeiite, C—calc-alkaline basalt, D—MORB; b—Ti/100-Zr-Sr/2 diagram(after Pearce and Cann,1973):A— island arc basalt, B—calc-alkaline basalt, C—MORB; c—Ti-Zr diagram(after Pearce,1982):A—volcanic arc basalt, B—intraplate basalt, C—mid-ocean ridge basalt(MORB); d—Y/15-La/10-Nb/8 diagram(after Cabanis and Lecomte,1989):1A—calc-alkaline basalt, 1B—transition region, 1C—volcanic arc basalt, 2A—continental basalt, 2B—ackarc basin basalt, 3A— continental rift alkaline basalt, 3B and 3C—E-type MORB(3B—enrichment, 3C—slight enrichment), 3D—N-type MORB

**致谢** 参加野外调查和室内研究的还有黄宏伟、蒙有言、韦杏杰、周秋娥、龙爱林、韦盛孔、李锦诚、刘武文、赖润宁等,还得到王汉荣教授级高工的指导和地质调查局区调处及西北项目办的支持,在此一并表示感谢。

References

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

Cabanis B and Lecomte M. 1989. Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: un outil pour la discrimination de series volcaniques et la mise en evidence des processus de melange et/ou de contamination crustale[J]. C. R. Acad. Sci, Ser. II, 309: 2 023-2 029.

Chen Junlu, He Shiping, Wang Hongliang, et al. 2006. Zircon LA-ICPMS U-Pb age of mafic dykes in the area between the Qinling and the Qilian orogenic belts and its geological implication[J]. Acta Petrologica et Mineralogica 25(06): 455~462(in Chinese with English abstract).

Cheng Yuqi. 1994. Regional Geology of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 215~217(in Chinese).

He Guoqi, Li Maosong, Liu Dequan, et al. 1994. Crustal Evolution and Mineralization in Paleozoic of Xinjiang, China[M]. Urumchi: Peo-

- ple Publishing House of Xinjiang, 43~47 (in Chinese).
- Hoffman P F. 1991. Did the breakout of Laurentia turn Gondwanaland inside-out? [J]. *Science*, 252: 1406~1412.
- Lai Shaocong, Deng Jinfu and Zhao Hailing. 1996. Volcanism and Tectonic Evolution in the Northern Margin of Qinghai-Tibet Plateau [M]. Xi'an Science and Technology Press of Shannxi Province, 74~96 (in Chinese).
- Li Jianghai, He Wenyuan and Qian Xianglin. 1997. Genetic mechanism and tectonic setting of Proterozoic mafic dyke swarm: its implication for paleoplate reconstruction [J]. *Geological Journal of China Universities*, 3(3): 273~281 (in Chinese with English abstract).
- Liu Liang, Che Zicheng, Wang Yan, et al. 1998. The evidence of Sm-Nd isochron age for the early Paleozoic ophiolite in Mangya area, Altun Mountain [J]. *Chinese Science Bulletin*, 43(8): 880~883 (in Chinese).
- Melson W G, Vallier T L, Wright T L, et al. 1976. Chemical diversity of abyssal volcanic glass erupted along Pacific, Atlantic and Indian Ocean sea floor spreading centers [A]. *The Geophysics of the Pacific Ocean Basin and Its Margin* [C]. Washington D C: Am Geophys Union, 351~367.
- Miyashiro A. 1975. Classification characteristics and origin of ophiolites [J]. *Journal of Geology*, 83: 249~281.
- Ormerod D S, Hawkesworth C J, Rogers N W, et al. 1988. Tectonic and magmatic transiency in the Western Great Basin, USA [J]. *Nature*, 333(6171~6172): 349~353.
- Pan Guitang, Chen Zhiliang, Li Xingzhen, et al. 1997. Tectonic Evolution of East Tethy [M]. Beijing: Geological Publishing House, 30~33 (in Chinese).
- Pearce J A. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries [A]. *Thorpe R S. Andesites* [C]. Chichester: Wiley, 525~548.
- Pearce J A and Cann J R. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analysis [J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 19: 290~300.
- Qin Xiaofeng, Li Jiang, Lu Jipu, et al. 2006. Tectonic evolution of the western segment of the Altyn Tagh collisional orogen Northwest China [J]. *Geological Bulletin of China*, 25(1~2): 104~112 (in Chinese with English abstract).
- Qin Xiaofeng, Xia Bin, Chen Shurong, et al. 2007. Geochemical characteristics and tectonic significance of the Metabasic volcanic rocks of Altyn Tagh complexes in the western segment of Altyn Tagh tectonic belt [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 27(2): 143~152 (in Chinese with English abstract).
- Radhakrishna T and Joseph M. 1996. Proterozoic palaeomagnetism of the mafic dyke swarms in the high-grade region of southern India [J]. *Precambrian Research*, 76(1~2): 31~46.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [A]. *Saunders A D, Norry M J, et al. Magmatism in the Ocean Basin* [C]. Geological Society Special Publication, 42: 313~345.
- Wang Renmin, He Gaopin, Chen Zhenzhen, et al. 1987. Diagrammatize Discriminancy of Originality Rocks of Metamorphic Rocks [M]. Beijing: Geological Publishing House, 52~58 (in Chinese).
- Wang Yan, Liu Liang, Che Zicheng, et al. 1999. Geochemical characteristics of early Paleozoic ophiolite in Mangya area, Altun Mountain [J]. *Geological Review*, 45(suppl.): 1010~1014 (in Chinese with English abstract).
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis* [M]. London: Unwin Hyman, 1~466.
- Winchester J A and Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements [J]. *Chem. Geol.*, 20: 325~343.
- Zhang Jianxin, Zhang Zeming, Xu Zhiqin, et al. 2001. Petrology and geochronology of eclogites from the western segment of the Altyn Tagh, northwestern China [J]. *Lithos*, 56(2~3): 187~206.
- Zhang Qi and Zhou Guoqing. 2001. *Ophiolite of China* [M]. Beijing: Science Press, 46~48 (in Chinese).

#### 附中文参考文献

- 陈隽璐, 何世平, 王洪亮, 等. 2006. 秦岭祁连山带接合部位基性岩墙的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义 [J]. *岩石矿物学杂志*, 25(06): 455~462.
- 程裕淇. 1994. *中国区域地质概论* [M]. 北京: 地质出版社, 215~217.
- 何国琦, 李茂松, 刘德权, 等. 1994. 中国新疆古生代地壳演化及成矿 [M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 43~47.
- 赖绍聪, 邓晋福, 赵海玲. 1996. 青藏高原北缘火山作用与构造演化 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 74~96.
- 李江海, 何文渊, 钱祥麟. 1997. 元古代基性岩墙群的成因机制、构造背景及其古板块再造意义 [J]. *高校地质学报*, 3(3): 273~281.
- 刘良, 车自成, 王焰, 等. 1998. 阿尔金茫崖地区早古生代蛇绿岩的 Sm-Nd 等时线年龄证据 [J]. *科学通报*, 43(8): 880~883.
- 潘桂棠, 陈智良, 李兴振, 等. 1997. 东特提斯地质构造形成演化 [M]. 北京: 地质出版社, 30~32.
- 覃小锋, 李江, 陆济璞, 等. 2006. 阿尔金碰撞造山带西段的构造特征 [J]. *地质通报*, 25(1~2): 104~112.
- 覃小锋, 夏斌, 陈暑荣, 等. 2007. 阿尔金构造带西段阿尔金杂岩变质基性火山岩的地球化学特征及其构造意义 [J]. *桂林工学院学报*, 27(2): 143~152.
- 王仁民, 贺高品, 陈珍珠, 等. 1987. 变质岩原岩图解判别法 [M]. 北京: 地质出版社, 52~58.
- 王焰, 刘良, 车自成, 等. 1999. 阿尔金茫崖地区早古生代蛇绿岩的地球化学特征 [J]. *地质论评*, 45(增刊): 1010~1014.
- 张旗, 周国庆. 2001. *中国蛇绿岩* [M]. 北京: 科学出版社, 46~48.