

# 塔里木盆地东南缘安南坝地区镁铁质麻粒岩的成因 ——来自地球化学及 Sr-Nd-Pb 同位素的制约

辜平阳<sup>1,2</sup>, 徐学义<sup>3</sup>, 何世平<sup>2</sup>, 陈锐明<sup>2</sup>, 庄玉军<sup>2</sup>, 赵慧博<sup>2</sup>, 查方勇<sup>2</sup>, 郭亚鹏<sup>2</sup>

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054;

2. 中国地质调查局 西安地质调查中心, 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710054;

3. 中国地质调查局, 北京 100037)

**摘要:** 甘肃阿克塞县安南坝地区镁铁质麻粒岩呈脉状、透镜状赋存于新太古代米兰岩群和 TTG 片麻岩中。岩石主要由斜长石(Pl) + 斜方辉石(Opx) + 单斜辉石(Cpx) + 角闪石(Amp) + 磁铁矿(Mt)等组成。安南坝镁铁质麻粒岩中 Ti、P、Nb、Ta、Th、Hf、Sr 及 REE 等元素与 Zr 相关性较好,表明其在变质作用过程中保持基本稳定。地球化学数据显示其原岩属于拉斑玄武质岩系列, SiO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量相对较低, CaO、MgO 含量相对较高。Mg<sup>#</sup> 值为 41.52~43.09, 低于原生玄武质岩石的 Mg<sup>#</sup> 值, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>T</sup>、MgO、CaO 与 SiO<sub>2</sub> 含量呈负相关性, 指示原岩岩浆演化过程中可能发生了辉石、角闪石等镁铁质矿物的分异结晶作用。镁铁质麻粒岩  $\Sigma$  REE 较低, 稀土元素配分模式为轻稀土元素弱富集、重稀土元素相对平坦的右倾型, Eu 异常不明显 ( $Eu/Eu^* = 0.91 \sim 1.01$ )。岩石富集 Rb、Ba、Sr 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、Zr、Ti 等高场强元素, 具有显生宙典型岛弧玄武质岩石的地球化学特征。Sr、Nd、Pb 同位素组成显示镁铁质麻粒岩原岩源自富集地幔, 并受到一定程度的地壳物质混染。构造环境分析表明安南坝镁铁质麻粒岩原岩形成于与俯冲有关的岛弧环境。在俯冲作用机制下, 俯冲板片流体交代使地幔楔发生富集, 形成富集地幔, 随着(弧后)伸展作用的加强, 进一步诱发富集地幔的部分熔融形成镁铁质岩浆, 最终岩浆就位形成辉长岩或辉绿岩脉, 后期在麻粒岩相变质作用条件下变质为镁铁质麻粒岩。

**关键词:** 镁铁质麻粒岩; 地球化学; Sr-Nd-Pb 同位素; 安南坝地区; 塔里木东南缘

中图分类号: P588.34<sup>+</sup>5; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)05-0811-13

## Petrogenesis of mafic granulites from Annanba area in southeastern Tarim: Evidence from geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopes

GU Ping-yang<sup>1,2</sup>, XU Xue-yi<sup>3</sup>, HE Shi-ping<sup>2</sup>, CHEN Rui-ming<sup>2</sup>, ZHUANG Yu-jun<sup>2</sup>, ZHAO Hui-bo<sup>2</sup>,  
ZHA Fang-yong<sup>2</sup> and GUO Ya-peng<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Earth Science & Resources College of Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MNR, Xi'an Geological Survey Center, Xi'an 710054, China; 3. China Geological Survey, Beijing 100037, China)

**Abstract:** Mafic granulites as veins or lens are commonly identified within Milan Rock Group and TTG gneiss in Annanba area of Aksay County, Gansu Province. The granulite is composed of plagioclase (Pl), orthopyroxene (Opx), clinopyroxene (Cpx), amphibole (Amp) and magnetite (Mt), which is characteristic of typical medium-low

收稿日期: 2018-03-10; 接受日期: 2018-07-23

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2017JM4001, 2017JM4031); 国家自然科学基金项目(41002063); 中国地质调查局地质调查项目(1212011121193, 12120114042701, DD20160014)

作者简介: 辜平阳(1982-), 男, 博士研究生, 主要从事构造地质学、地球化学研究, E-mail: pingyang-322@163.com。

pressure granulite facies rocks. Ti, P, Nb, Ta, Th, Hf, Sr and REE are well related to Zr of mafic granulites from Annan area, which shows that these elements remained basically unchanged and kept stable during the metamorphic process. Geochemical analysis shows that the mafic granulites belong to tholeiite series rocks, depleted in  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{P}_2\text{O}_5$ , and enriched in CaO, MgO,  $\text{Mg}^\#$  (41.52 ~ 43.09). The values of  $\text{Fe}_2\text{O}_3^\text{T}$ , MgO and CaO are negatively correlated with  $\text{SiO}_2$ , suggesting separation crystallization of pyroxene and amphibole during the evolution of the magma. The chondrite-normalized REE patterns show right-inclined feature with no obvious Eu (Eu/Eu\* = 0.91 ~ 1.01) anomalies, whereas the primitive mantle normalized trace element spidergrams are characterized by enriched LILE (such as Rb, Ba and S) and depleted HFSE (such as Nb, Ta, Zr and Ti), similar to the typical feature of Phanerozoic arc basalt. Sr, Nd, Pb isotopic compositions suggest that the protolith of mafic granulites was derived from enriched mantle, and underwent crustal contamination. Combined with the tectonic evolution of southeastern Tarim, the authors hold that the protolith of mafic granulites was formed in island arc, and related to a subduction environment. The formation process of mafic magma may be as follows: the mantle wedge was metasomatized by the fluid and simultaneously formed enriched mantle; back-arc extension took place under the mechanism of subduction, which triggered partial melting of enriched mantle, and then the mafic magma moved upward to the upper crust along the fissures to form gabbro or diabase veins; later, they were metamorphized into mafic granulite under the granulite facies metamorphism.

**Key words:** mafic granulites; geochemistry; Sr-Nd-Pb isotopes; Annanba area; southeastern Tarim

**Fund support:** Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2017JM4001, 2017JM4031); National Natural Science Foundation (41002063); Project of China Geological Survey (1212011121193, 12120114042701, DD20160014)

塔里木盆地中心被中生代巨厚沉积物覆盖, 基底变质岩主要出露在盆地东北缘的库鲁克塔格地区、西北缘的阿克苏-柯坪地区、西南缘的铁克里克地区及东南缘的阿尔金山-敦煌地区(张建新等, 2011)。相对于其它地区, 阿尔金山地区前寒武纪地质研究程度较低, 其基底主要由新太古代米兰岩群(亦称为阿克塔什塔格杂岩)和以 TTG 为主的花岗片麻岩构成(刘永顺等, 2009; 辛后田等, 2011, 2013; 辜平等, 2015<sup>①</sup>)。塔里木东南缘阿克塔什塔格山斜长角闪岩中一组锆石 U-Pb 年龄平均值为 2 589.37 Ma, 据此认为米兰岩群形成时代为新太古代(郑健康, 1995)。该岩群中基性岩全岩 Sm-Nd 等时线年龄为 2 792 ± 208 Ma, 中酸性片麻岩、基性麻粒岩及斜长角闪岩全岩等时线年龄为 2 787 ± 151 Ma, 从而将米兰岩群形成时代定为新太古代(车自成等, 1996)。新近获得米兰岩群长英质片麻岩(原岩为酸性火山岩) SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 2 592 ± 15 Ma(刘永顺等, 2010; 辛后田等, 2013), 岩石中长英质脉体核部岩浆锆石年龄为 2 516 Ma, 并结合前人资料, 将米兰岩群的形成时代厘定为新

太古代晚期(辛后田等, 2013)。相对变质表壳岩而言, 在 TTG 片麻岩的形成时代方面也取得若干重要研究进展, 如在阿克塔什塔格地区获得英云闪长片麻岩的成岩年龄分别为 2 604 ± 120 Ma(陆松年等, 2003), 2 567 ± 32 Ma(刘永顺等, 2010; 辛后田等, 2013), 安南坝地区英云闪长片麻岩和花岗闪长质片麻岩的形成时代为 2 658 ± 51 Ma, 2 544 ± 9 Ma(辜平等, 2015)<sup>①</sup>。

麻粒岩相岩石是早前寒武纪地块中最重要的岩石类型之一, 记录了下地壳的物质组成、物理化学状态、变质程度、所经历的构造-热事件序列等, 是认识下地壳及地质体构造演化的窗口(Mohan *et al.*, 2003; Puellas *et al.*, 2005; Yamamoto *et al.*, 2007)。前人曾在塔里木东南缘阿克塔什塔格地区米兰岩群中发现麻粒岩(车自成等, 1996; 刘永顺等, 2009; 辛后田等, 2011, 2013; 辜平等, 2015<sup>①</sup>), 岩石地球化学资料显示该地区镁铁质麻粒岩原岩为玄武质岩石(刘永顺等, 2010; 辛后田等, 2013)。最近, 作者等通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年, 获得塔里木东南缘安南坝地区镁铁质麻粒岩原岩的成岩时代为

① 辜平等, 董增产, 陈锐明, 等. 2015. 青海阿尔金 1:5 万打柴沟等 6 幅区域地质调查报告.

2 561 ± 29 Ma(辜平阳等, 2018)。由此可见, 镁铁质麻粒岩与米兰岩群、TTG 片麻岩形成时代基本一致。研究表明, 塔里木东南缘阿克塔什塔格地区米兰岩群和 TTG 片麻岩具有类似于埃达克岩的岩石地球化学特征, 表明它们形成于与俯冲有关的岛弧环境(刘永顺等, 2010; 辛后田等, 2013), 那么安南坝地区镁铁质麻粒岩的岩石地球化学特征、岩石成因及形成的构造背景是怎样的? 鉴于此, 本文以甘肃阿克塞县安南坝地区镁铁质麻粒岩为研究对象, 在详细

的野外地质剖面测制、岩相学及高级变质作用过程中元素活动性分析的基础上, 开展岩石地球化学、Sr-Nd-Pb 同位素研究, 为塔里木东南缘早前寒武纪地质演化研究提供新的科学依据。

## 1 区域地质背景

研究区位于塔里木盆地东南缘甘肃阿克塞县安南坝地区(图1a), 亦属阿北地块(校培喜等, 2014;

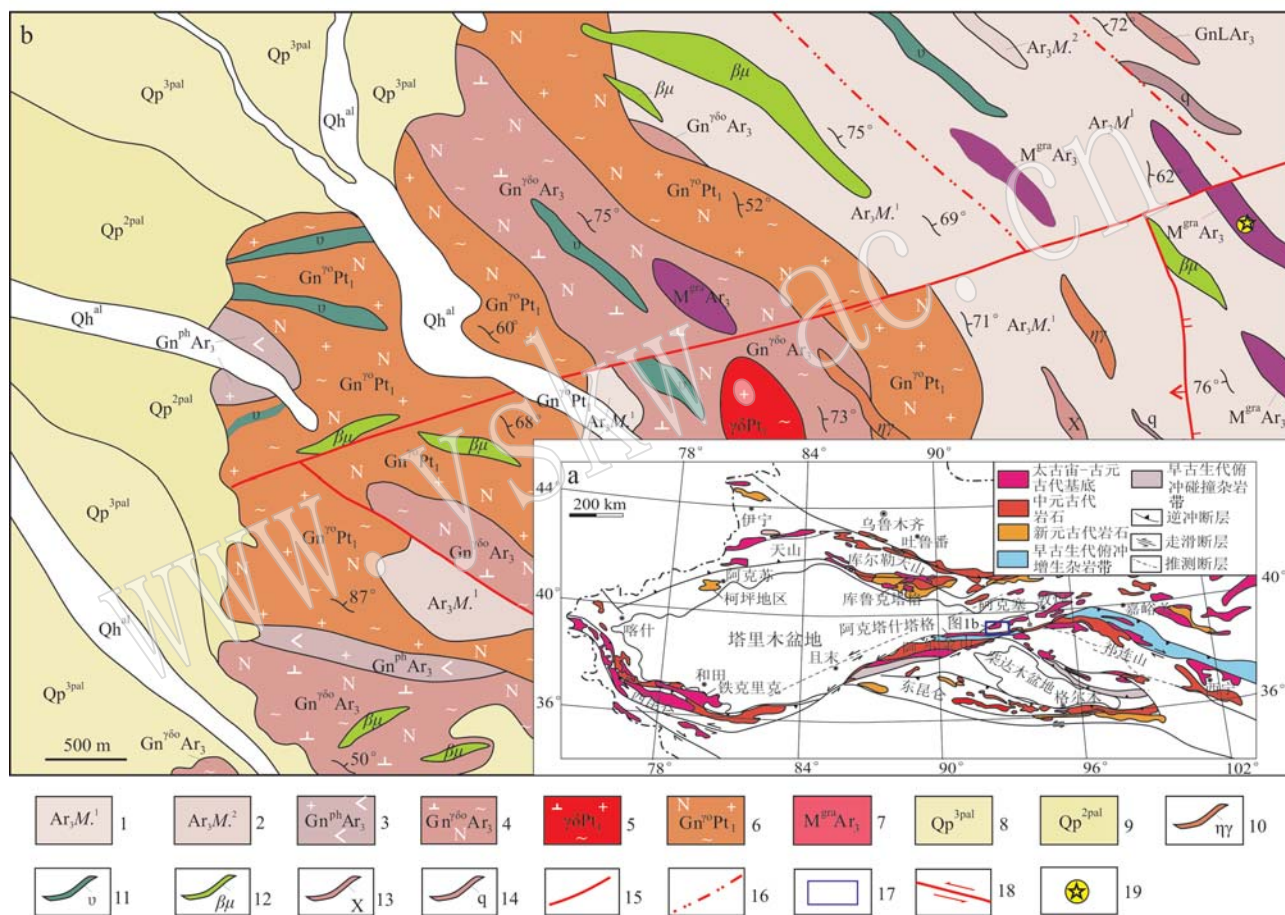


图1 塔里木盆地周缘前寒武纪变质岩分布图(a, 据 Lu *et al.*, 2008)及研究区地质图(b, 据辜平阳等, 2015)<sup>①</sup>

Fig. 1 Distribution of Precambrian metamorphic rocks around Tarim Basin(a, after Lu *et al.*, 2008) and geological map of the study area(b, after Gu Pingyang *et al.*, 2015)<sup>①</sup>

1—米兰岩群片麻岩段; 2—米兰岩群大理岩段; 3—斜长角闪片麻岩; 4—英云闪长片麻岩; 5—花岗闪长片麻岩; 6—斜长花岗岩片麻岩; 7—镁铁质麻粒岩; 8—上更新统冲洪积物; 9—中更新统冰水堆积物; 10—二长花岗岩脉; 11—变辉长岩脉; 12—变辉绿岩脉; 13—碳酸岩脉; 14—石英脉; 15—断层; 16—遥感解译断层; 17—研究区; 18—左行走滑断裂; 19—采样位置

1—gneiss member of Milan Rock Group; 2—marble member of Milan Rock Group; 3—amphibolite gneiss; 4—tonalitic gneiss; 5—granodiorite gneiss; 6—plagioclase granite gneiss; 7—mafic granulite; 8—Upper Pleistocene alluvial and proluvial deposits; 9—Middle Pleistocene glacial deposits; 10—monzogranite vein; 11—metamorphic gabbro vein; 12—metamorphic diabase veins; 13—carbonatite vein; 14—quartz vein; 15—fault; 16—remote sensing interpretation of fault; 17—study area; 18—left slip fault; 19—sampling site

① 辜平阳, 董增产, 陈锐明, 等. 2015. 青海阿尔金 1:5 万打柴沟等 6 幅区域地质调查报告.

辜平等, 2015<sup>①</sup>), 北侧被库姆塔格沙漠所覆盖, 南邻早古生代红柳沟-拉配泉蛇绿构造混杂岩带(辜平等, 2015)<sup>①</sup>。区内地质体呈北西-南东向展布, 主要为新太古代米兰岩群变质表壳岩和古侵入体, 二者构成早前寒武纪变质基底。研究区西部米兰岩群变质岩以规模不等的捕虏体状赋存于新太古代英云闪长片麻岩、斜长角闪片麻岩(原岩为基性侵入体)、古元古代钾化斜长花岗岩片麻岩中。研究区东部米兰岩群受岩体破坏程度较弱, 岩石组合保存相对完整。野外调查显示米兰岩群由片麻岩段和大理岩段组成, 其中片麻岩段岩石组合由条带状黑云斜长片麻岩、条带状角闪斜长片麻岩、黑云角闪斜长片麻岩、条带状变粒岩、浅粒岩、斜长角闪岩及少量的角闪二辉麻粒岩、紫苏斜长麻粒岩、石英岩等组成; 大理岩段主要由云母大理岩、含透辉石大理岩等组成(辛后田等, 2013; 辜平等, 2015<sup>①</sup>)。米兰岩群与变质古岩体侵入接触关系较为明显, 局部呈断层接触(图1b)。区内岩石普遍混合岩化, 发育条带状、肠状、网状长英质脉体, 构造变形强烈, 露头上可见中深层次的揉流褶皱、无根褶皱及片麻理紧闭同斜褶皱。晚期变辉长岩、变辉绿岩、浅肉红色二长花岗岩、碳酸岩等脉体呈北东-南西向和北西-南东向侵入(辜平等, 2015)<sup>①</sup>。

## 2 岩相学特征

安南坝镁铁质麻粒岩呈脉状产出, 与米兰岩群

和花岗片麻岩侵入接触关系较为明显(图2a), 局部受后期剪切作用呈透镜状。用于岩石地球化学、Sr-Nd-Pb 同位素研究的镁铁质麻粒岩(编号 Pm023-18)采自阿克塞县安南坝西 10 km 处, 岩性为灰黑色中细粒角闪二辉麻粒岩, 具粒状变晶结构(平衡镶嵌粒状变晶结构), 块状构造, 主要由斜长石(~40%)、斜方辉石+单斜辉石(30%~35%)、角闪石(20%~25%)、金属矿物(~5%)等组成(图2b)。斜长石为粒状, 粒径一般为 0.3~1.2 mm, 晶体中双晶发育。斜方辉石种属为紫苏辉石, 薄片具微弱多色性, 呈粉红色, 高突起, 平行消光, 最高干涉色为一级橙色, 二轴晶, 负光性, 粒径一般为 0.2~1.5 mm。单斜辉石薄片无色, 矿物种属为透辉石, 干涉色较高, 粒径大小为 0.3~1.1 mm。角闪石矿物晶体多呈不规则粒状, 粒径介于 0.3~2 mm 之间。金属矿物以磁铁矿为主, 粒径一般<0.2 mm, 星散分布, 具有典型中低压麻粒岩相岩石的矿物组合特征, 且单斜辉石、斜方辉石与斜长石间接接触界线平直, 显示平衡共生的特点(刘平华等, 2013)。

## 3 分析方法

样品地球化学分析测试在中国地质调查局西安地质调查中心国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室完成, 主量元素采用 Panalytical 公司 PW4400 型 X 荧光光谱仪(XRF)测定, 分析误差低于 1%, 其中 FeO 含量通过湿化学方法测定。微量元素采用

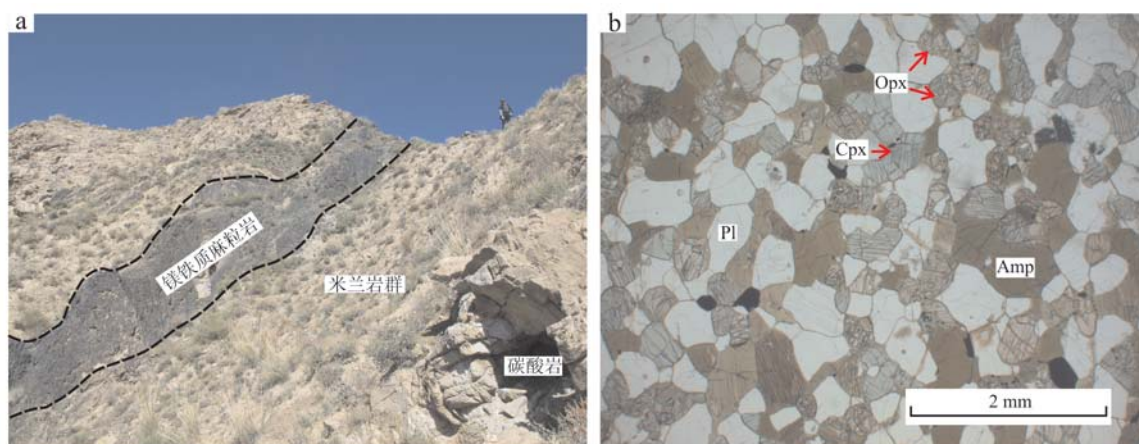


图2 安南坝地区镁铁质麻粒岩野外露头及显微镜下变质矿物组合特征(-)  
Fig. 2 The outcrops and metamorphic assemblages of mafic granulite in Annanba area(-)  
Opx—斜方辉石; Cpx—单斜辉石; Amp—角闪石; Pl—斜长石  
Opx—orthopyroxene; Cpx—clinopyroxene; Amp—amphibole; Pl—Plagioclase

① 辜平等, 董增产, 陈锐明, 等. 2015. 青海阿尔金 1:5 万打柴沟等 6 幅区域地质调查报告.



Thermo Fisher 公司 X-series II 型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测定,相对标准偏差优于 5%。

同位素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。Sr、Nd、Pb 同位素分别采用 AG50W-X8 (200~400 mesh)、HDEHP(自制)和 AG1-X8(200~400 mesh)离子交换树脂对 Sr、Nd、Pb 同位素进行分离,并在多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICPMS, Nu Plasma HR, Nu Instruments, Wrexham, UK)上采用静态模式进行。Nd 同位素标样 La Jolla 的测定值为  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511\,859 \pm 6 (2\sigma, n = 20)$ , Sr 同位素国际标样 NBS 987 测定值为  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710\,250 \pm 12 (2\sigma, n = 15)$ 。Sr 和 Nd 的同位素组成分别用  $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.119\,4$  和  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.721\,9$  校正仪器的质量分馏。全岩 Pb 同位素组成用  $^{205}\text{Tl}/^{203}\text{Tl} = 2.387\,2$  校正仪器的质量分馏,国际 Pb 同位素标样 NBS 981 的测试结果为  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 16.937 \pm 1 (2\sigma)$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.491 \pm 1 (2\sigma)$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 36.696 \pm 1 (2\sigma)$ , BCR-2 标样的测试结果为  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.742 \pm 1 (2\sigma)$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.620 \pm 1 (2\sigma)$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.705 \pm 1 (2\sigma)$ 。Pb 全流程空白值在 0.1~0.3 ng 之间。

## 4 分析结果

### 4.1 主量元素地球化学特征

安南坝地区镁铁质麻粒岩主量元素分析结果见表 1。岩石  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  含量相对较低,分

别为 47.77%~49.47% (平均 48.38%)、0.64%~0.87% (平均 0.75%)、14.42%~15.09% (平均 14.68%)、0.060%~0.073% (平均 0.064%)。 $\text{Na}_2\text{O}$  含量为 2.10%~2.46%,  $\text{K}_2\text{O}$  含量为 0.58%~0.67%。 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$  含量相对较高,分别为 10.24%~10.71% (平均 10.44%) 和 8.20%~8.82% (平均 8.63%)。 $\text{Mg}^\#$  值为 41.52~43.09, 低于原生玄武质岩石 ( $\text{Mg}^\# = 70$ , Wilson, 1989), 具有弱演化玄武质岩石的特征。

### 4.2 微量元素特征

安南坝地区镁铁质麻粒岩的微量元素分析结果见表 1。 $\Sigma \text{REE}$  较低,为  $37.37 \times 10^{-6} \sim 46.86 \times 10^{-6}$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  为 1.54~2.19, 岩石稀土元素配分模式为轻稀土元素弱富集、重稀土元素相对平坦的右倾型(3a)。样品 REE 配分曲线相互平行,显示稀土元素分异程度相当,具有同源岩浆演化的特征。Eu 异常不明显 ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.91 \sim 1.01$ ), 表明镁铁质麻粒岩原岩形成过程中基本无斜长石的结晶分离。在原始地幔标准化蛛网图(图 3b)上,镁铁质麻粒岩样品表现为富集 Rb、Ba、Sr 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、Zr、Ti 等高场强元素,与显生宙典型岛弧玄武岩特征类似 (McCulloch and Gamble, 1991; 刘平华等, 2013)。

### 4.3 Sr-Nd-Pb 同位素特征

安南坝地区镁铁质麻粒岩 Sr、Nd、Pb 同位素组成见表 2。岩石  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值相对较高,为 0.71521~0.723 81,  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  值为 0.221 4~0.388 1;  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$

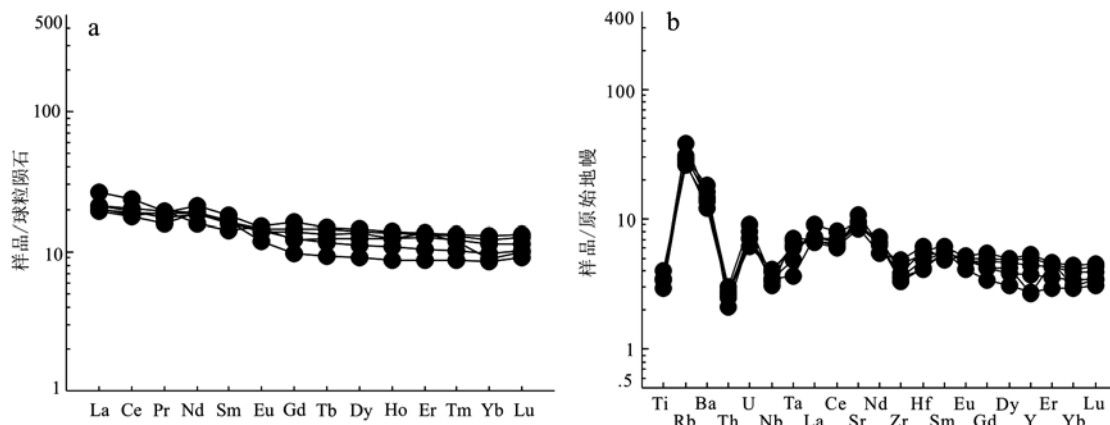


图 3 安南坝镁铁质麻粒岩球粒陨石标准化的稀土元素配分模式(a)和原始地幔标准化的微量元素蛛网图(b)  
(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle normalized trace element spidergram (b) for mafic granulites in Annanba area (norm values after Sun and McDonough, 1989)

表1 安南坝地区镁铁质麻粒岩主量元素含量( $w_B/\%$ )、微量元素含量( $w_B/10^{-6}$ )分析结果  
 Table 1 Major element ( $w_B/\%$ ) and trace element ( $w_B/10^{-6}$ ) compositions of mafic granulites in Annanba area, Aksay, Gansu

元素	Pm023-18-1	Pm023-18-2	Pm023-18-3	Pm023-18-4	Pm023-18-5	Pm023-18-6
SiO <sub>2</sub>	48.40	49.47	48.26	48.18	48.20	47.77
TiO <sub>2</sub>	0.76	0.64	0.74	0.74	0.75	0.87
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.49	14.69	14.63	14.42	14.77	15.09
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.27	2.99	3.13	3.12	3.17	3.14
FeO	8.89	8.14	9.27	9.24	8.92	9.16
MnO	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.17
MgO	8.82	8.20	8.72	8.79	8.79	8.51
CaO	10.41	10.71	10.24	10.32	10.55	10.44
Na <sub>2</sub> O	2.13	2.46	2.10	2.16	2.18	2.27
K <sub>2</sub> O	0.67	0.58	0.65	0.66	0.61	0.64
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07
LOI	1.90	1.86	1.98	2.07	1.79	1.85
Total	99.99	99.98	99.96	99.94	99.97	99.98
Mg <sup>#</sup>	36.51	36.87	35.75	36.01	36.55	35.39
La	4.81	4.57	4.68	6.24	4.98	5.03
Ce	11.02	10.80	11.60	14.40	11.90	12.50
Pr	1.78	1.50	1.76	1.86	1.66	1.83
Nd	9.85	8.79	8.81	8.94	8.60	7.47
Sm	2.77	2.52	2.46	2.48	2.43	2.15
Eu	0.86	0.69	0.84	0.80	0.82	0.88
Gd	2.50	2.01	2.95	2.87	2.53	3.30
Tb	0.46	0.35	0.54	0.50	0.43	0.56
Dy	3.15	2.31	3.56	3.46	2.82	3.72
Ho	0.71	0.49	0.76	0.70	0.61	0.78
Er	2.23	1.43	2.18	2.09	1.72	2.23
Tm	0.30	0.22	0.33	0.31	0.26	0.34
Yb	1.51	1.46	2.05	1.92	1.67	2.20
Lu	0.25	0.23	0.32	0.29	0.26	0.34
LREE	31.09	28.87	30.15	34.72	30.39	29.86
HREE	11.11	8.50	12.69	12.14	10.30	13.47
ΣREE	42.20	37.37	42.84	46.86	40.69	43.33
δEu	0.98	0.91	0.95	0.91	1.00	1.01
δCe	0.91	0.99	0.97	1.01	0.99	0.99
(La/Yb) <sub>N</sub>	2.15	2.11	1.54	2.19	2.01	1.54
(La/Sm) <sub>N</sub>	1.09	1.14	1.20	1.58	1.29	1.47
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	1.34	1.11	1.16	1.21	1.22	1.21
Ti	4 555.43	3 836.15	4 435.55	4 435.55	4 495.49	5 214.77
Ba	103.20	126.00	99.20	114.00	95.50	85.20
Rb	24.08	18.65	19.38	18.27	16.38	17.51
Sr	179.20	224.90	186.60	195.10	201.30	181.20
Y	12.20	12.40	23.00	20.40	17.10	24.30
Zr	42.90	37.10	40.20	40.10	50.60	55.20
Nb	2.20	2.39	2.78	2.50	2.48	2.94
Th	0.22	0.18	0.24	0.26	0.21	0.23
U	0.17	0.15	0.15	0.19	0.15	0.13
Ga	16.90	16.10	17.30	16.80	16.90	17.50
Ni	98.10	78.40	101.00	95.00	90.80	93.20
Cr	241.00	170.00	248.00	250.00	244.00	234.00
Hf	1.80	1.31	1.52	1.28	1.65	1.93
Sc	23.40	17.10	45.20	41.60	35.20	43.40
Ta	0.29	0.28	0.26	0.20	0.15	0.25
Co	52.60	45.80	58.50	55.40	51.00	53.60
Li	7.26	8.36	7.58	7.30	7.23	5.74
Be	0.45	0.41	0.64	0.48	0.42	0.55
Pb	5.20	5.65	5.06	5.40	5.48	6.74
Cs	0.75	0.76	0.94	0.74	0.68	0.48
Sn	83.30	83.20	87.40	87.80	92.30	85.90
Ge	2.08	2.07	1.99	2.28	2.09	2.19

表2 安南坝地区镁铁质麻粒岩 Sr、Nd、Pb 同位素组成

Table 2 Sr, Nd and Pb isotopic compositions of mafic granulites in Annanba area, Aksay, Gansu

样品编号	Pm023-18-1	Pm023-18-2	Pm023-18-3	Pm023-18-4	Pm023-18-5	Pm023-18-6
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.388 1	0.239 3	0.299 8	0.242 2	0.221 4	0.278 8
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.723 81	0.719 85	0.721 53	0.716 01	0.715 21	0.716 38
$2\sigma$	0.000 03	0.000 03	0.000 09	0.000 08	0.000 04	0.000 02
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	0.709 44	0.710 99	0.710 43	0.707 04	0.707 01	0.706 05
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.170 0	0.173 1	0.168 8	0.181 5	0.177 0	0.174 3
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512 233	0.512 294	0.512 145	0.512 441	0.512 399	0.512 303
$1\sigma$	0.000 004	0.000 006	0.000 005	0.000 008	0.000 005	0.000 008
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	0.509 362	0.509 370	0.509 294	0.509 375	0.509 409	0.509 359
$\varepsilon\text{Nd}(t)$	0.90	1.07	-0.43	1.17	1.84	0.85
$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	18.162	16.538	18.602	16.797	16.157	16.651
$2\sigma$	0.003	0.003	0.004	0.003	0.005	0.004
$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	15.746	15.435	15.650	15.431	15.378	15.433
$2\sigma$	0.006	0.006	0.004	0.004	0.004	0.005
$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	38.233	35.652	35.649	36.499	35.707	35.303
$2\sigma$	0.003	0.01	0.01	0.011	0.007	0.01
$(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$	17.245	15.793	17.771	15.810	15.389	16.110
$(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$	15.588	15.306	15.506	15.261	15.245	15.340
$(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$	37.893	35.396	35.268	36.113	35.399	35.029
$t_{\text{DM}}/\text{Ga}$	3.18	3.19	3.38	3.33	3.1	3.25
$t_{2\text{DM}}/\text{Ga}$	1.24	1.16	1.36	0.96	1.02	1.15
$\varepsilon\text{Sr}(t)$	114.04	136.15	128.16	79.88	79.45	65.83

值相对较低,为 0.512 145 ~ 0.512 441;  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  值为 0.168 8 ~ 0.181 5;  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值为 16.538 ~ 18.162,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值介于 15.378 ~ 15.746 之间,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值为 35.303 ~ 38.233。根据麻粒岩原岩成岩年龄  $t = 2\,561\text{ Ma}$  (辜平阳等, 2018) 对  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始比值、 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 、 $\varepsilon\text{Sr}(t)$ 、Pb 同位素比值等进行了统一计算。

## 5 讨论

### 5.1 变质过程中元素的活动性

蚀变作用和变质作用通常会导致大离子亲石元素 LILE (如 K、Rb、Ba、Cs) 具有明显的活动性,而稀土元素 REE 以及部分高场强元素 HFS (Nb、Ta、Zr、Hf、Th、REE、Ce、U、Ti) 在高级变质作用中亦能相对稳定 (Hajash, 1984; Becker *et al.*, 1999; Escuder-Viruet *et al.*, 2010)。安南坝镁铁质麻粒岩原岩经历了麻粒岩相变质作用,因此在讨论岩石成因和构造环境之前须分析元素的活动性。Zr 与其它元素在双变量图中的相关性是判别元素活动性方便且有效的方法,相关系数  $R < 0.75$  被认为是活动性元素,在变质作用过程中会发生迁移 (Polat *et al.*, 2002,

2009, 2012; Polat and Hofmann, 2003; 刘平华等, 2013)。安南坝镁铁质麻粒岩 Ti、P、REE、Nb、Ta、Th、Hf、Sr 等与 Zr 相关性较好 (图 4a ~ 4i), 与上述元素相比,活动性元素 K、Na、Rb 等与 Zr 没有明显的相关性,元素投点相对分散 (图 4j ~ 4l)。这表明 Ti、P、REE、Nb、Ta、Th、Hf、Sr 等元素在变质过程中保持基本稳定,可用来研究岩石成因。

### 5.2 岩石成因

选取受变质作用影响较小的元素进行了岩浆岩系列判别。安南坝镁铁质麻粒岩样品在  $\text{Zr}/\text{TiO}_2 - \text{Nb}/\text{Y}$  图解上所有样品均投到亚碱性玄武岩区 (图 5a), 在  $\text{Zr}/\text{P}_2\text{O}_5 - \text{Nb}/\text{Y}$  图解 (图 5b) 上, 投点进一步显示样品属于拉斑玄武岩系列。

塔里木东南缘安南坝地区镁铁质麻粒岩的  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$  与  $\text{SiO}_2$  含量呈负相关 (图略), 指示原岩岩浆演化过程中可能发生了辉石、角闪石等镁铁质矿物分异结晶作用。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、Eu 与  $\text{SiO}_2$  的含量无明显相关性 (图略), 在原始地幔标准化蛛网图上表现为 Ba、Sr 正异常, 且 Eu 异常不明显 (0.91 ~ 1.01), 说明在岩浆演化过程中斜长石的分异结晶作用不明显或者源区无明显的斜长石残留, 与岩石中斜长石含量较高 (~ 40%) 吻合。

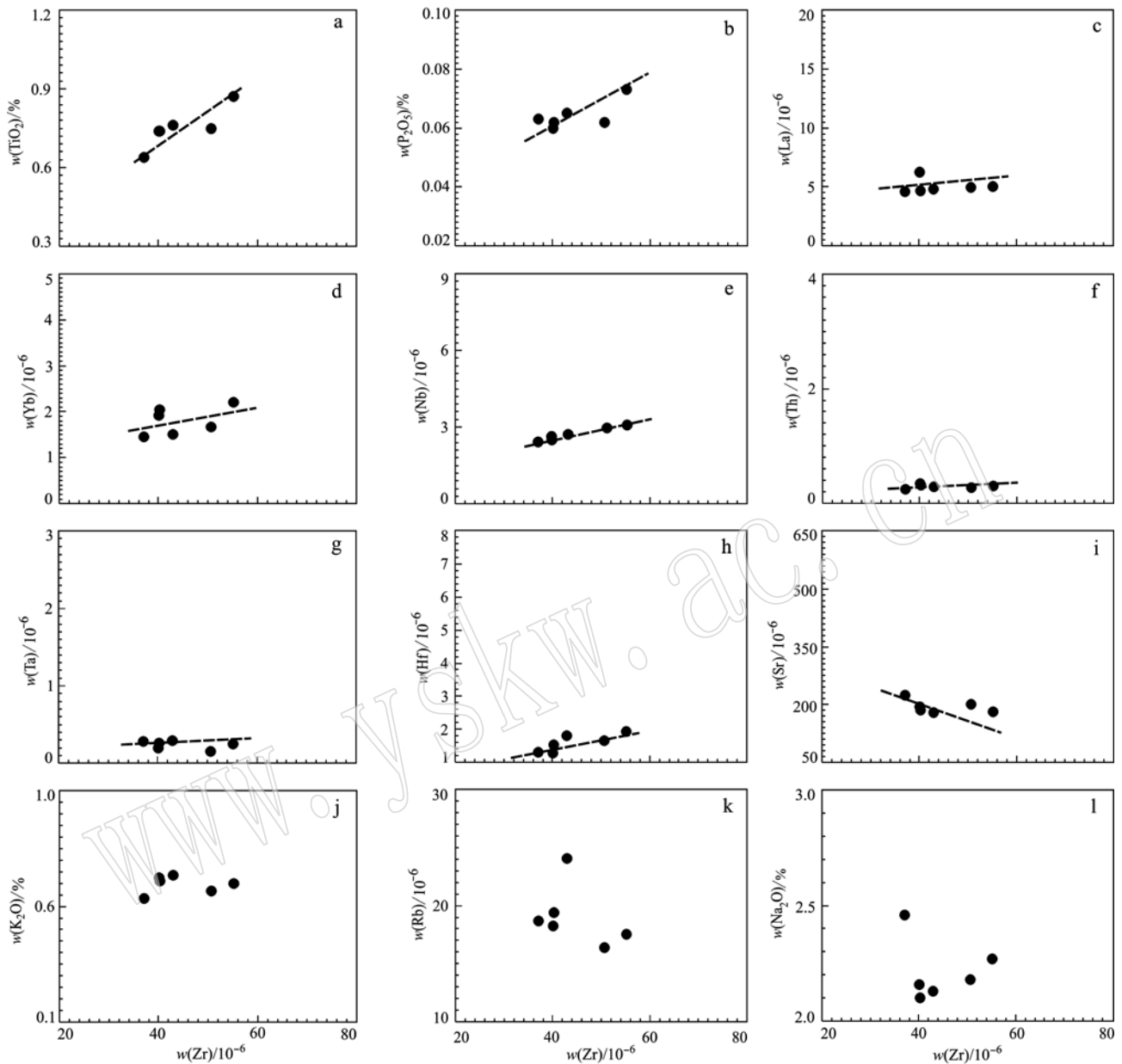


图4 安南坝镁铁质麻粒岩 Zr 与主、微量元素变化图

Fig. 4 Zr versus selected major and trace elements variation for the mafic granulites in Annanba area, Aksay, Gansu

安南坝地区镁铁质麻粒岩 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) 值为 0.706 05 ~ 0.710 99, 平均 0.708 49, 低于现代大陆硅质岩的平均值 (0.719), 稍高于未受地壳混染的大洋玄武岩 (0.702 ~ 0.707)。 $\varepsilon\text{Sr}(t)$  值变化范围较大, 为 65.83 ~ 136.15, 平均 100.58。Sr 同位素组成指示镁铁质麻粒岩成岩物质的幔源属性, 并受到地壳混染 (肖庆辉等, 2002; 辜平阳等, 2013)。岩石 ( $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ )<sub>i</sub> 值较低, 为 0.509 294 ~ 0.509 409,  $\varepsilon\text{Nd}(t)$  介于 -0.43 ~ 1.84 之间, 与受地壳混染的玄武岩浆  $\varepsilon\text{Nd}(t)$  值 (-1.5 ~ 1.7) 基本一致 (Lam-

bert *et al.*, 1989)。在  $\varepsilon\text{Nd}(t)$  - ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 关系图解 (图 6) 上, 数据点显示出 EM II 趋势, 表明其物质来源与富集地幔储库关系密切。( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>i</sub> = 15.389 ~ 17.771, ( $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>i</sub> = 15.245 ~ 15.588, ( $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>i</sub> = 35.029 ~ 37.893。在  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  -  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  图解 (图 7) 上, 3 个样品投点落在 EM I 区及附近, 2 个样品投点落在 EM II 区及附近, 进一步说明其物质来源于富集地幔。岩石中锆石  $\varepsilon\text{Hf}(t)$  值为 -6.28 ~ 8.42, 绝大部分为负值, 少部分为较小的正值,  $\varepsilon\text{Hf}(t)$  值均落在球粒陨石演化线上及附近, 暗



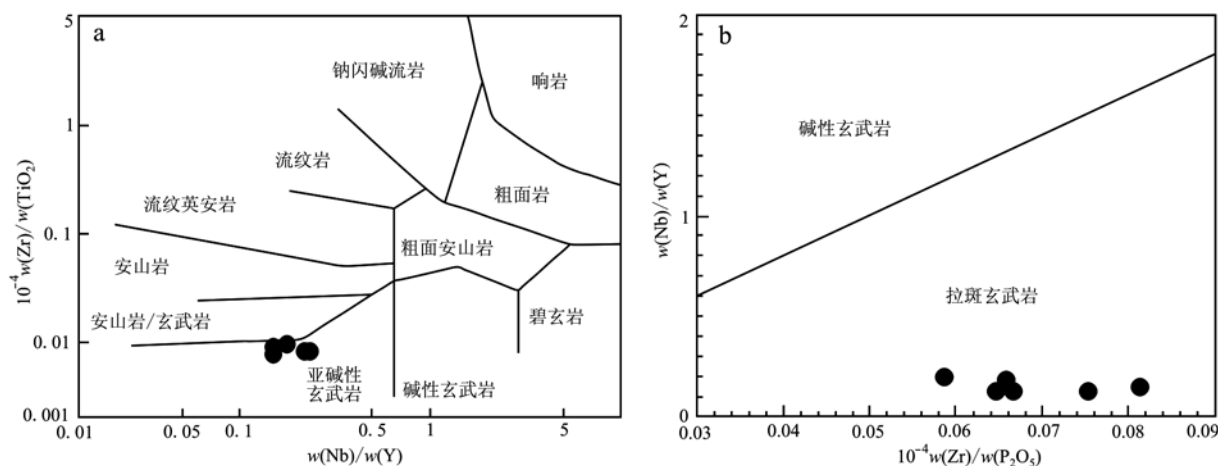
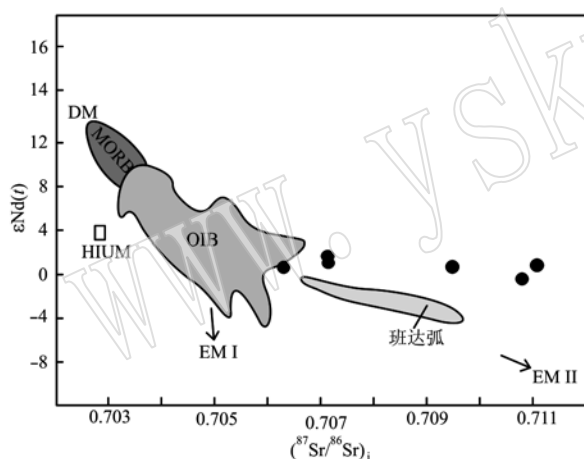
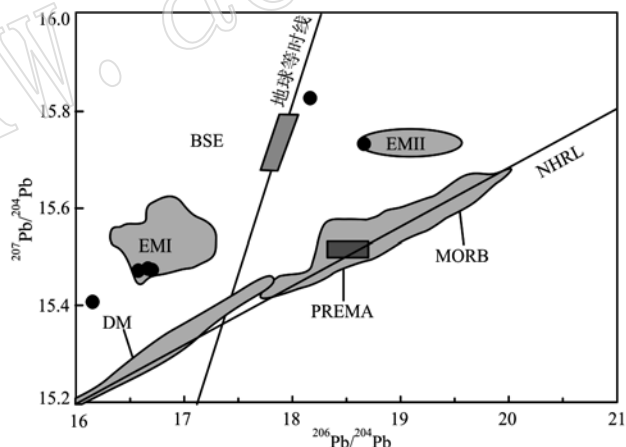


图5 安南坝地区镁铁质麻粒岩石分类图

Fig. 5 Rock classification diagrams of mafic granulites in Annanba area, Gansu

a—Zr/TiO<sub>2</sub> - Nb/Y 图解(据 Winchester and Floyd, 1977); b—Nb/Y - Zr/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 图解(据 Floyd and Winchester, 1975)a—Zr/TiO<sub>2</sub> - Nb/Y diagram( after Winchester and Floyd, 1977); b—Nb/Y - Zr/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> diagram( after Floyd and Winchester, 1975)图6 安南坝镁铁质麻粒岩  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  -  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  相关图解(据 Zindler and Hart, 1986)Fig. 6 The  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  -  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  diagram of mafic granulites in Annanba area (after Zindler and Hart, 1986)图7 安南坝镁铁质麻粒岩  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  -  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  相关图解(据 Zindler and Hart, 1986)Fig. 7 The  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  -  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  diagram of mafic granulites in Annanba area (after Zindler and Hart, 1986)

示其原岩源自富集地幔,并存在壳幔作用(辜平阳等, 2018)。 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  -  $\text{SiO}_2$  图解(图8)和  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  -  $\text{SiO}_2$  图解(图9)显示,  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值随着  $\text{SiO}_2$  含量的升高而升高,而  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值随着  $\text{SiO}_2$  含量的升高而降低,同样表明基性岩浆在上侵过程中受到了一定程度的地壳物质混染(杨堂礼等, 2015)。

研究表明,地壳混染可以造成玄武质岩石的 Nb、Ta、Ti 负异常(Ernst *et al.*, 2005; Polat *et al.*, 2011; 刘平华等, 2013),夏林圪等(2007)也指出对带有消减带信号的基性岩石,利用 Nb、Ta、Ti 等元素

作为判别因子会导致构造环境的误判,利用 Zr 含量 ( $<130 \times 10^{-6}$ )及 Zr/Y 值 ( $<4$ )可有效判断其是否属于岛弧玄武岩。安南坝地区镁铁质麻粒岩具有较低的 Zr 含量( $37.10 \times 10^{-6} \sim 55.20 \times 10^{-6}$ )及 Zr/Y 比值(1.97 ~ 3.52),暗示岩石可能形成于岛弧环境。在 Zr/Y - Zr 图解上样品主体投在岛弧玄武岩区(图10a);在 Ti - Zr - Y 图解上样品落在岛弧拉斑玄武岩、钙碱性玄武岩和 MORB 区(图10b);Nb - Zr - Y 图解上样品投在 N-MORB 和火山弧玄武岩区(图10c);MnO - TiO<sub>2</sub> - P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 图解显示样品具有岛弧拉

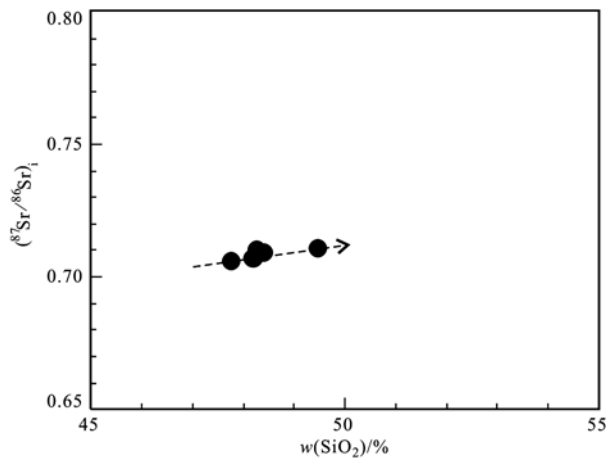
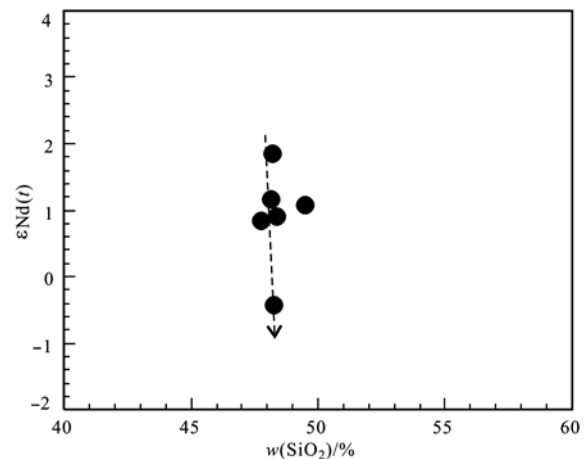
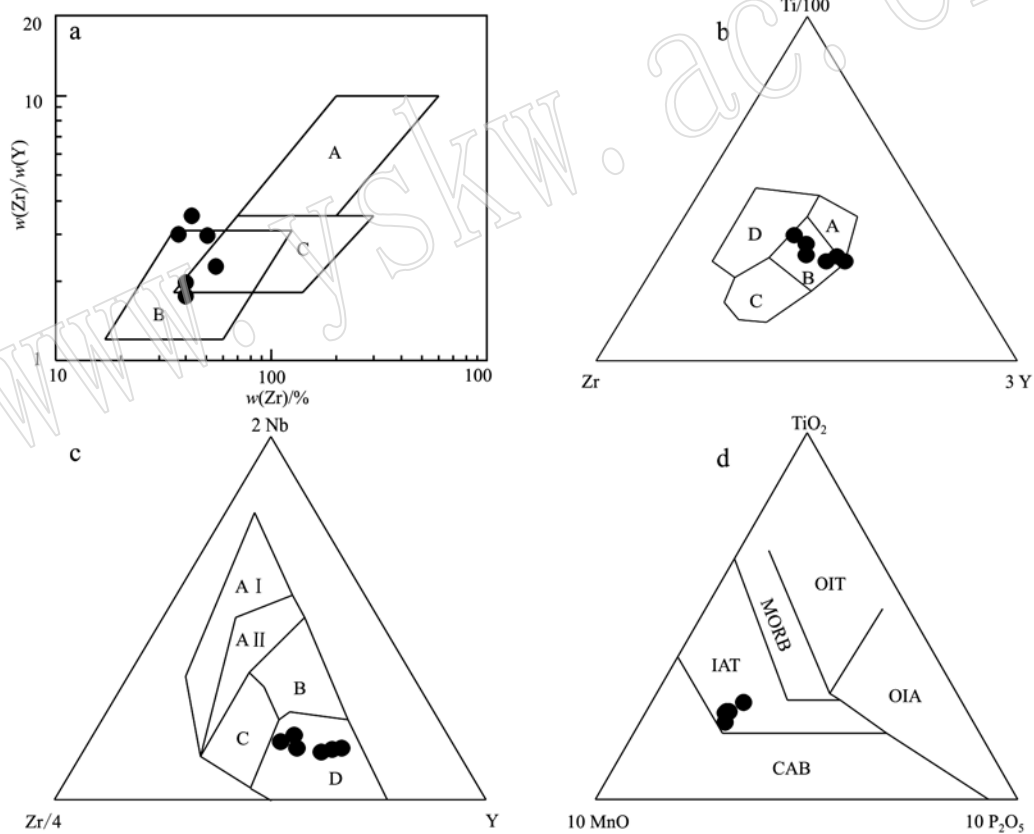
图8 安南坝镁铁质麻粒岩 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \text{SiO}_2$ 图解Fig. 8 The  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \text{SiO}_2$  diagram of mafic granulites in Annanba area图9 安南坝镁铁质麻粒岩 $\varepsilon\text{Nd}(t) - \text{SiO}_2$ 图解Fig. 9 The  $\varepsilon\text{Nd}(t) - \text{SiO}_2$  diagram of mafic granulites in Annanba area

图10 安南坝基性麻粒岩构造环境判别图解

Fig. 10 Tectonic discrimination diagrams for mafic granulites in Annanba area

a—Zr/Y—Zr 图解: A—板内玄武岩; B—岛弧玄武岩; C—洋中脊玄武岩; b—Ti—Zr—Y 图解: A—岛弧拉斑玄武岩; B—岛弧拉斑玄武岩、钙碱性玄武岩和 MORB; C—钙碱性玄武岩; D—板内玄武岩; c—Nb—Zr—Y 图解: A I—板内碱性玄武岩; A II—板内碱性玄武岩和板内拉斑玄武岩; B—E-MORB; C—板内拉斑玄武岩和火山弧玄武岩; D—N-MORB 和火山弧玄武岩; d—MnO—TiO<sub>2</sub>—P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 图解: MORB—洋中脊玄武岩; OIT—洋岛拉斑玄武岩或海山拉斑玄武岩; OIA—洋岛碱性玄武岩和海山碱性玄武岩; CAB—岛弧钙碱性玄武岩; IAT—岛弧拉斑玄武岩

a—Zr/Y—Zr diagram: A—intraplate basalt; B— island-arc basalt; C—mid-ocean ridge basalt; b—Ti—Zr—Y diagram: A— island-arc tholeiite basalt; B— island tholeiite basalt, calc-alkaline basalt and MORB; C—calc-alkaline basalt; D—intraplate basalt; c—Nb—Zr—Y diagram: A I—intraplate alkali basalt; A II—intraplate alkali basalt and intraplate tholeiite basalt; B—E-MORB; C—intraplate tholeiite basalt and volcanic arc basalt; D—N-MORB and volcanic arc basalt; d—MnO—TiO<sub>2</sub>—P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> diagram: MORB—mid-ocean ridge basalt; OIT—ocean island tholeiite or seamount tholeiite; OIA—ocean island alkali basalt or seamount alkali basalt; CAB— island arc calc-alkaline basalt; IAT— island arc tholeiite basalt

斑玄武岩区的特征(图 10d)。由此可见, 镁铁质麻粒岩兼有 MORB 和 IAB 型岩石的特征。Sr、Nd、Pb 同位素组成显示镁铁质麻粒岩原岩源自富集地幔, 但 Sr 含量( $179.20 \times 10^{-6} \sim 224.90 \times 10^{-6}$ , 平均  $194.72 \times 10^{-6}$ )显著高于地幔值( $17.8 \times 10^{-6}$ ) (Taylor and McLennan, 1985), 指示其岩浆源区可能受到俯冲板片流体交代作用的影响而使 Sr 含量增高 (McCulloch and Gamble, 1991; Hawkesworth *et al.*, 1993)。综合上述讨论, 我们认为安南坝镁铁质麻粒岩原岩可能形成于与俯冲有关的岛弧环境, 与前人研究认为米兰岩群和 TTG 形成于岛弧构造背景的结论一致(刘永顺等, 2010; 辛后田等, 2013)。在俯冲作用机制下, 俯冲板片流体交代使地幔楔发生富集, 形成富集地幔, 随着(弧后)伸展作用的加强, 进一步诱发富集地幔的部分熔融形成镁铁质岩浆, 且在上升过程中受到地壳混染, 最终岩浆就位形成辉长岩或者辉绿岩脉, 后期在麻粒岩相变质作用条件下形成镁铁质麻粒岩。

## 6 结论

(1) 安南坝地区镁铁质麻粒原岩为基性岩脉, 与米兰岩群侵入接触关系清楚, 局部受后期剪切作用呈透镜状。岩石主要由斜石、斜方辉石、单斜辉石、角闪石、金属矿物等组成, 为典型的中低压麻粒岩相岩石变质矿物组合。

(2) 镁铁质麻粒岩  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  含量相对较低,  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$  含量相对较高。岩石地球化学特征显示其原岩属于拉斑玄武质岩石系列, 原岩岩浆演化过程中可能发生了辉石、角闪石等镁铁质矿物的分异结晶作用。

(3) 在变质作用过程中 Ti、P、Nb、Ta、Th、Hf、Sr 及稀土元素等元素保持地球化学性质的稳定性。岩石稀土元素配分模式为轻稀土元素弱富集、重稀土元素相对平坦的右倾型, Eu 异常不明显。富集 Rb、Ba、Sr 等大离子亲石元素, 相对亏损 Nb、Ta、Zr、Ti 等高场强元素, 与显生宙典型岛弧玄武岩特征类似。Sr、Nd、Pb 同位素组成显示镁铁质麻粒岩原岩源自富集地幔, 并受到一定程度的地壳物质混染。

(4) 安南坝镁铁质麻粒岩原岩可能形成于与俯冲有关的岛弧环境。在俯冲作用机制下, 俯冲板片流体交代使地幔楔发生富集, 形成富集地幔, 随着(弧后)伸展作用的加强, 进一步诱发富集地幔部分

熔融形成镁铁质岩浆, 最终岩浆就位形成辉长岩或辉绿岩脉, 后期在麻粒岩相变质作用条件下形成镁铁麻粒岩。

**致谢** 在论文写作和修改过程中长安大学李永军教授、中国地质科学院地质研究所刘平华研究员及编辑部老师提出了宝贵的意见和建议, 在此一并表示诚挚的感谢。

## References

- Becker H, Jochum K P and Carlson R W. 1999. Constraints from high-pressure veins in eclogites on the composition of hydrous fluids in subduction zones [J]. *Chemical Geology*, 160(4): 291 ~ 308.
- Che Zicheng and Sun Yong. 1996. The age of the Altun granulite facies complex and the basement of the Tarim Basin [J]. *Regional Geology of China*, 15(1): 51 ~ 57 (in Chinese).
- Ernst R E, Buchan K L and Campbell I H. 2005. Frontiers in large igneous province research [J]. *Lithos*, 79(3 ~ 4): 271 ~ 297.
- Escuder-Viruete J, Pérez-Estaún A, Weis D, *et al.* 2010. Geochemical characteristics of the Río Verde complex, central Hispaniola: Implications for the paleotectonic reconstruction of the Lower Cretaceous Caribbean island-arc [J]. *Lithos*, 114(1 ~ 2): 168 ~ 185.
- Floyd P A and Winchester J A. 1975. Magma-type and tectonic setting discrimination using immobile elements [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 27: 211 ~ 218.
- Gu Pingyang, He Shiping, Li Rongshe, *et al.* 2013. Geochemical features and tectonic significance of granitic gneiss of Laguigangri metamorphic core complexes in southern Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(3): 756 ~ 768 (in Chinese).
- Gu Pingyang, Xu Xueyi, He Shiping, *et al.* 2018. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes of mafic granulite from Annanba area of Aksai, Gansu: Implications for the Precambrian geological evolution of the southeastern Tarim [J]. *Chinese Journal of Geology* (in Press) (in Chinese with English abstract).
- Hajash A Jr. 1984. Rare earth element abundances and distribution patterns in hydrothermally altered basalts: Experimental results [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 85(4): 409 ~ 412.
- Hawkesworth C J, Gallagher K, Hergt J M, *et al.* 1993. Mantle and slab contribution in arc magmas [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 21: 175 ~ 204.
- Lambert D D, Morgan J W, Walker R J, *et al.* 1989. Rhenium-osmium

- and samarium-neodymium isotopic systematics of the Stillwater Complex, Montana [J]. *Science*, 244: 1 169 ~ 1 174.
- Liu Pinghua, Liu Fulai, Cai Jia, *et al.* 2013. Geochronological and geochemical study of the Lijiaz mafic granulites from the Daqingshan-Wulashan metamorphic complex, the central Khondalite Belt in the North China Craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 462 ~ 484 (in Chinese).
- Liu Yongshun, Xin Houtian, Zhou Shijun, *et al.* 2010. Precambrian and Paleozoic Tectonic Evolution in the Lapeiquan Area of the Eastern Altyn Tagh Mountain [M]. Beijing: Geological Publishing House, 84 ~ 87 (in Chinese).
- Liu Yongshun, Yu Haifeng, Xin Houtian, *et al.* 2009. Tectonic units division and Precambrian significant geological events in Altyn Tagh Mountain, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 28(10): 1 430 ~ 1 438 (in Chinese).
- Lu S N, Li H K, Zhang C L, *et al.* 2008. Geological and geochronological evidence for the Precambrian evolution of the Tarim Craton and surrounding continental fragments [J]. *Precambrian Research*, 160(1 ~ 2): 94 ~ 107.
- Lu Songnian and Yuan Guibang. 2003. Geochronology of Early Precambrian magmatic activities of Aketashitage, east Altyn Tagh [J]. *Acta Geologica Sinica*, 77(1): 61 ~ 68 (in Chinese).
- McCulloch M T and Gamble J A. 1991. Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 102(3 ~ 4): 358 ~ 374.
- Mohan A, Singh P K and Saehan H K. 2003. High-density carbonic fluid inclusions in charnockites from Eastern Ghats, India: petrologic implications [J]. *J. Asian Earth Sci.*, 22: 101 ~ 113.
- Polat A, Appel P W U, Fryer B J, *et al.* 2009. Trace element systematics of the Neoproterozoic Fiskenset anorthosite complex and associated meta-volcanic rocks, SW Greenland: Evidence for a magmatic arc origin [J]. *Precambrian Research*, 175(1 ~ 4): 87 ~ 115.
- Polat A, Appel P W U and Fryer B J. 2011. An overview of the geochemistry of Eoarchean to Mesoproterozoic ultramafic to mafic volcanic rocks, SW Greenland: Implications for mantle depletion and petrogenetic processes at subduction zones in the early Earth [J]. *Gondwana Research*, 20(2 ~ 3): 255 ~ 283.
- Polat A, Fryer B J, Samson I M, *et al.* 2012. Geochemistry of ultramafic rocks and hornblende veins in the Fiskenset layered anorthosite complex, SW Greenland: Evidence for hydrous upper mantle in the Archean [J]. *Precambrian Research*, 214 ~ 215: 124 ~ 153.
- Polat A and Hofmann A W. 2003. Alteration and geochemical patterns in the 3.7 ~ 3.8 Ga Isua greenstone belt, West Greenland [J]. *Precambrian Research*, 126(3): 197 ~ 218.
- Polat A, Hofmann A W and Rosing M T. 2002. Boninite-like volcanic rocks in the 3.7 ~ 3.8 Ga Isua greenstone belt, West Greenland: Geochemical evidence for intra-oceanic subduction zone processes in the early Earth [J]. *Chemical Geology*, 184(3 ~ 4): 231 ~ 254.
- Puelles P, Abalos B and Gil Ibarguchi JI. 2005. Metamorphic evolution and thermobaric structure of the subduction-related Bacariza high-pressure granulite formation [J]. *Lithos*, 84: 125 ~ 149.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and process [A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins* [C]. Geological Society Special Publication, 42: 313 ~ 345.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution* [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1 ~ 328.
- 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]. *Chemical Geology*, 20: 325 ~ 343.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, *et al.* 2007. The discrimination between continental basalt and island arc basalt based on geochemical method [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 77 ~ 89 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Peixi, Gao Xiaofeng, Hu Yunxu, *et al.* 2014. The study of geological background of Aljin-Eastern Kunlun metallogenic belt [J]. Beijing: Geological Publishing House, 84 ~ 87 (in Chinese).
- Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Ma Daquan, *et al.* 2002. *The Ways of Investigation on Granitoids* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~ 294 (in Chinese).
- Xin Houtian, Liu Yongshun, Luo Zhaohua, *et al.* 2013. The growth of Archean continental crust in Aqtashtagh Area of Southeast Tarim: Constraints from petrochemistry and chronology about Milan Group and TTG-gneiss [J]. *Earth Science Frontiers*, 20(1): 240 ~ 259 (in Chinese).
- Xin Houtian, Zhao Fengqing, Luo Zhaohua, *et al.* 2011. Determination of the Paleoproterozoic geochronological framework in Aqtashtagh Area in southeastern Tarim, China, and its geological significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(12): 1 977 ~ 1 993 (in Chinese).
- Yamaamoto J, Kgai H, Kwaakami Y, *et al.* 2007. Paleo-Moho depth determined from the presence of CO<sub>2</sub> fluid inclusions: Raman spectroscopic barometry of mantle- and crust-derived rock [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 253: 369 ~ 377.
- Yang Tangli and Jiang Shaoyong. 2015. Petrogenesis of intermediate-felsic



- intrusive rocks and mafic microgranular enclaves (MMEs) from Dongleiwang deposit in Jiurui Ore District, Jiangxi Province: Evidence from zircon U-Pb geochronology geochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes[J]. *Earth Science*, 40(12): 2 002 ~ 2 020(in Chinese).
- Zhang Jianxin, Li Huaikun, Meng Fancang, *et al.* 2011. Polyphase tectonothermal events recorded in "metamorphic basement" from the Altyn Tagh, the southeastern margin of the Tarim basin, western China: Constraint from U-Pb zircon geochronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(1): 23 ~ 46(in Chinese).
- Zheng Jiankang. 1995. Outline of geological tectonic evolution in the eastern Altun orogenic belt[J]. *Qinghai Geology*, 2: 1 ~ 11(in Chinese).
- Zindler A and Hart S R. 1986. Chemical geodynamics[J]. *Annual Reviews Earth and Planetary Sciences*, 14: 493 ~ 571.
- 刘永顺, 辛后田, 周世军, 等. 2010. 阿尔金山东段拉配泉地区前寒武纪及古生代构造构造演化[M]. 北京: 地质出版社, 84 ~ 87.
- 刘永顺, 于海峰, 辛后田, 等. 2009. 阿尔金山地区构造单元划分和前寒武纪重要地质事件[J]. *地质通报*, 28(10): 1 430 ~ 1 438.
- 陆松年, 袁桂邦. 2003. 阿尔金山阿克塔什塔格早前寒武纪岩浆活动的年代学证据[J]. *地质学报*, 77(1): 61 ~ 68.
- 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 等. 2002. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京: 地质出版社, 1 ~ 294.
- 校培喜, 高晓峰, 胡云绪, 等. 2014. 阿尔金-东昆仑西段成矿带地质背景研究[M]. 北京: 地质出版社, 48 ~ 51.
- 辛后田, 刘永顺, 罗照华, 等. 2013. 塔里木盆地东南缘阿克塔什塔格地区新太古代陆壳增生: 米兰岩群和 TTG 片麻岩的地球化学及年代学约束[J]. *地学前缘*, 20(1): 240 ~ 259.
- 辛后田, 赵凤清, 罗照华, 等. 2011. 塔里木盆地东南缘阿克塔什塔格地区古元古代精细年代格架的建立及其地质意义[J]. *地质学报*, 85(12): 1 977 ~ 1 993.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 2007. 利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩[J]. *岩石矿物学杂志*, 26(1): 77 ~ 89.
- 杨堂礼, 蒋少涌. 2015. 江西九瑞矿集区东雷湾矿区中酸性侵入岩及其铁镁质包体的成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学与 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素制约[J]. *地球科学*, 40(12): 2 002 ~ 2 020.
- 张建新, 李怀坤, 孟繁聪, 等. 2011. 塔里木盆地东南缘(阿尔金山)“变质基底”记录的多期构造热事件: 锆石 U-Pb 年代学的制约[J]. *岩石学报*, 27(1): 23 ~ 46.
- 郑健康. 1995. 阿尔金造山带东段地质构造演化概论[J]. *青海地质*, 2: 1 ~ 11.
- 车自成, 孙 勇. 1996. 阿尔金麻粒岩相杂岩的时代及塔里木盆地的基底[J]. *中国区域地质*, 15(1): 51 ~ 57.
- 辜平阳, 何世平, 李荣社, 等. 2013. 藏南拉轨岗日变质核杂岩核部花岗岩片麻岩的地球化学特征及构造意义[J]. *岩石学报*, 29(3): 756 ~ 768.
- 辜平阳, 徐学义, 何世平, 等. 2018. 甘肃阿克塞县安南坝地区镁铁质麻粒岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成: 对塔里木东南缘前寒武纪地质演化的启示[J]. *地质科学*(待刊).
- 刘平华, 刘福来, 蔡 佳, 等. 2013. 华北克拉通孔兹岩带中段大青山-乌拉山变质杂岩立甲子基性麻粒岩年代学及地球化学研究[J]. *岩石学报*, 29(2): 462 ~ 484.