

# Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti: 风化与蚀变过程中的原岩示踪\*

严桃桃 龚庆杰\*\* 李金哲 陈晶 周伟伟 李睿堃

YAN TaoTao, GONG QingJie\*\*, LI JinZhe, CHEN Jing, ZHOU WeiWei and LI RuiKun

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

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

2016-02-23 收稿, 2016-05-17 改回.

**Yan TT, Gong QJ, Li JZ, Chen J, Zhou WW and Li RK. 2016. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti: Protoliths tracer in the process of weathering and alteration. *Acta Petrologica Sinica*, 32(8):2425–2432**

**Abstract** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Ti were usually considered as immobile elements during the process of weathering and alteration. The ratios between Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Ti can be used to trace geochemical processes. On the basis of statistically analyzing the average chemical compositions of 157 igneous rocks from China, we found that there was a good power function relationship between their SiO<sub>2</sub> abundances and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti values as  $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}) = 0.073 \times \text{SiO}_2 - 0.89$ , units of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> and Ti are in %. Combined with the total-alkali vs. SiO<sub>2</sub> (TAS) diagram, a new diagram of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs. Ti to distinguish rock type had been proposed in this study. This diagram is able to differentiate four types of igneous rocks including felsic rocks, intermediate-felsic rocks, intermediate rocks, and intermediate-mafic & mafic rocks. On the new constructed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti diagram, both the fresh granites and their weathering products from the Jiaodong weathering profile located in the eastern China were plotted in the area of felsic rocks; both the fresh granodiorite and their weathering products from the Zhoukoudian weathering profile located in the northern China were plotted in the area of intermediate-felsic rocks; both the fresh basaltic andesites and their weathering products from the Xiongershan weathering profile located in the central China were plotted in the area of intermediate-mafic & mafic rocks. As a result, the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti diagram could be used to trace the protoliths of weathering rocks. On the new constructed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti diagram, all samples from the fresh, altered and mineralized biotite granite in the Jiaojia gold deposit were plotted in the region of felsic rocks; all of the fresh, altered and mineralized basaltic andesites in the Niutougou gold deposit were plotted in the region of intermediate-mafic & mafic rocks. Therefore, the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti diagram could be used to trace their parent rocks on altered samples.

**Key words** Immobile element; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti diagram; Igneous rock; Weathering profile; Altered rock; Provenance

**摘要** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Ti 在风化和热液蚀变等地球化学过程中通常被认为是不活动元素, 两者的比值 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti 常被用来指示地球化学作用过程。通过对中国 157 件火成岩样品元素含量平均值的统计发现, 火成岩样品中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti 与 SiO<sub>2</sub> 含量值之间存在着较好的幂函数关系:  $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}) = 0.073 \times \text{SiO}_2 - 0.89$ , 式中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 和 Ti 含量单位均为%。本文基于得到的经验方程和 TAS 图解构建了一个新的判别岩石类型的图解——Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti 图解。该图解可以区分酸性岩、中酸性岩、中性岩、中基性岩-基性岩四类岩性。通过对三个火成岩风化剖面的研究发现, 花岗岩风化剖面从新鲜基岩到风化形成的土壤在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti 图解中均落在酸性岩区, 花岗岩长岩风化剖面从新鲜基岩到风化形成的土壤样品均落在中酸性岩区, 玄武质安山岩风化剖面从新鲜基岩到风化形成的土壤样品均落在中基性岩-基性岩区。不同风化程度的风化产物与其母岩在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti 图解中所在的区域一致, 即 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti 图解可以用来追溯火成岩风化产物的母岩岩性。通过对胶东焦家金矿和豫西牛头沟金矿两个矿区岩石的研究发现, 黑云母花岗岩从新鲜岩石到其蚀变岩及其形成矿石的样品在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti 图解中均落在酸性岩区。玄武质安山岩从新鲜岩石到其蚀变岩及其形成矿石的样品在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti 图解中均落在中基性岩-基性岩区。即不同蚀变程度的蚀变产物与其原岩在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti 图解中所在的区域一致, 这表明新构建的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti 图解可以用来示踪蚀变岩的原岩性质。

**关键词** 不活动元素; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti 图解; 火成岩; 风化剖面; 蚀变岩; 原岩判别

中图法分类号 P595

\* 本文受国家自然科学基金重点项目(41230311)和国家科技支撑计划课题(2011BAB04B09)联合资助。

第一作者简介: 严桃桃, 男, 1989 年生, 博士生, 地球化学专业, E-mail: tt\_yan@cugb.edu.cn

\*\* 通讯作者: 龚庆杰, 男, 1972 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地球化学教学与科研工作, E-mail: qjiegong@cugb.edu.cn

## 1 引言

在风化和热液蚀变等地球化学过程中一些元素通常被认为是不活动元素,例如  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Ji *et al.*, 2000; Pokrovsky *et al.*, 2006; Das and Krishnaswami, 2007) 和 Ti (Nesbitt and Markovics, 1997; Panahi *et al.*, 2000; Braun *et al.*, 2009)。这些元素常常被用来指示地球化学作用过程中其他元素的行为 (Nesbitt and Markovics, 1997; Duzgoren-Aydin *et al.*, 2002; Gong *et al.*, 2011)。不活动元素的比值  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}$  常被作为一个地球化学参数,用于追溯风化产物的母岩 (Duzgoren-Aydin *et al.*, 2002; Gong *et al.*, 2011, 2015)。

常用的划分火成岩类型的图解有全碱-硅 (TAS) 图解和 QAPF 图解。TAS 图解是根据岩石中全碱 ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) 和二氧化硅 ( $\text{SiO}_2$ ) 的百分含量对岩石类别进行划分。构建此图解的  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  这三种氧化物在风化和蚀变等地球化学作用过程中往往被认为是活动的 (Duzgoren-Aydin *et al.*, 2002), 易被活化迁移, 因此 TAS 图解只适用于新鲜火成岩 (针对喷出岩) 岩石类型的判别, 不适用于受风化或蚀变作用的火成岩 (Le Maitre, 1989; Rollison *et al.*, 2000)。QAPF 图解法是根据岩石 (针对侵入岩) 中矿物含量对岩浆岩类别进行划分, 判别岩性时要求岩石中矿物相对含量明确确定 (Streckeisen, 1974)。然而, 在地球化学作用过程中岩石的化学组成和矿物组成均会发生不同程度的变化, 尤其是原岩遭受强烈风化或蚀变时。上述两种图解只适用于新鲜火成岩的判别, 目前尚缺少对受风化或蚀变作用影响明显的岩石的母岩的岩性判别图解。

本文结合地球化学参数  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}$  与 TAS 图解, 尝试构建一个新的判别火成岩岩石类型的图解, 该图解不仅能够区分新鲜岩石的岩性类别, 还可以对受风化或蚀变作用影响的岩石同样适用。

## 2 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}$ 图解的构建

### 2.1 数据源

本次研究数据来源于《应用地球化学元素丰度数据手册》(迟清华和酆明才, 2007) 第一章《火成岩化学组成与元素丰度》中全部 158 件火成岩的样品数据, 在剔除其中 1 件碳酸岩样品后剩余 157 件。

参照 Le Maitre (1989) 提出的火山岩全碱-硅 (TAS) 图解分类, 数据源中 157 件火成岩样品在 TAS 图解中的投影如图 1 所示。如果仅按照 TAS 图解中  $\text{SiO}_2$  含量 (%) (酸度) 来划分, 火成岩可划分为 6 类 (如图 2 所示): a-酸性岩 ( $\text{SiO}_2 > 69\%$ ), b-中酸性岩 ( $\text{SiO}_2 = 63\% \sim 69\%$ ), c-中性岩 ( $\text{SiO}_2 = 57\% \sim 63\%$ ), d-中基性岩 ( $\text{SiO}_2 = 52\% \sim 57\%$ ), e-基性岩 ( $\text{SiO}_2 = 45\% \sim 52\%$ ), f-超基性岩 ( $\text{SiO}_2 < 45\%$ )。中基性岩和中性岩是依据 TAS 图解中玄武质安山岩与安山岩的  $\text{SiO}_2$

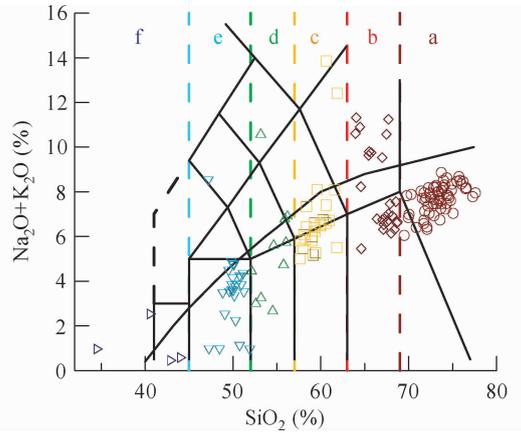


图1 数据源样品的 TAS 图解中的分布特征图 (底图引自 Le Maitre, 1989; 其中碱性性与亚碱性分界线引自 Irvine and Baragar, 1971)

a-酸性岩, n=62; b-中酸性岩, n=25; c-中性岩, n=26; d-中基性岩, n=13; e-基性岩, n=27; f-超基性岩, n=4. 氧化物的含量为不含  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  重新折算的质量百分数

Fig. 1 The distribution of source samples in the TAS diagram (after Le Maitre, 1989; the boundary between alkali and sub-alkali after Irvine and Baragar, 1971)

a-felsic rock, n = 62; b-intermediate-felsic rock n = 25; c-intermediate rock, n = 26; d-Intermediate-mafic rock, n = 13; e-mafic rock, n = 27; f-ultra-mafic rock, n = 4. The contents of oxides were recalculated after excluding the contents of  $\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CO}_2$

边界值 ( $\text{SiO}_2 = 57\%$ ) 来进行划分; 中酸性岩和酸性岩是依据 TAS 图解中流纹岩  $\text{SiO}_2$  含量的最小临界值 ( $\text{SiO}_2 = 69\%$ ) 来进行划分。按照上述 6 类火成岩划分标准, 157 件火成岩样品中超基性岩为 4 件, 基性岩为 27 件, 中基性岩为 13 件, 中性岩为 26 件, 中酸性岩为 25 件, 酸性岩为 62 件。

### 2.2 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}$ - $\text{SiO}_2$ 关系图

为了探讨不同岩性中  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}$  的特征, 我们绘制了 157 件火成岩样品  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}$  与  $\text{SiO}_2$  含量的关系图 (图 2), 为了统一变量单位,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  和 Ti 含量的单位均采用 %。

由图 2 可以看出, 随着火成岩样品中  $\text{SiO}_2$  含量的增大,  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}$  也随之增大。由于超基性岩中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和 Ti 的含量极少,  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}$  误差较大, 因此剔除超基性岩的 4 件样品, 剩余的 153 件火成岩样品的  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}$  与  $\text{SiO}_2$  存在较好的幂函数关系。我们尝试拟合出两者的定量关系, 剔除 5 件偏离较远的样品后拟合出 148 件火成岩样品  $\text{SiO}_2$  与  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}$  平均含量关系的经验方程, 方程式为:

$$\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}) = 0.073 \times \text{SiO}_2 - 0.89 \quad (n = 148, R^2 = 0.91) \quad (1)$$

式中  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  和 Ti 元素含量单位量均为 %, 拟合结果满足显著性检验要求。

经验方程拟合线与上述 6 类岩性岩石的分界线 ( $\text{SiO}_2$  (%) = 45, 52, 57, 63, 80) 的交点的纵轴坐标值分别为 11.2,

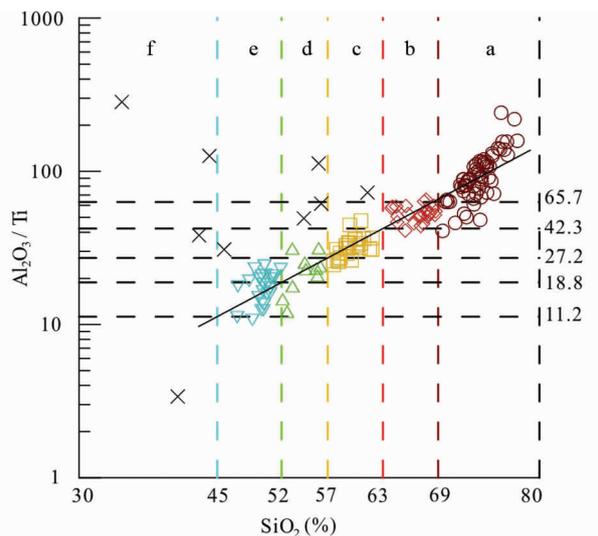


图2 数据源样品中  $Al_2O_3/Ti$  与  $SiO_2$  的关系图  
a-酸性岩;b-中酸性岩;c-中性岩;d-中基性岩;e-基性岩;f-超基性岩;黑色×为拟合经验方程时剔除的样品点;拟合实线方程为  $\ln(Al_2O_3/Ti) = 0.073 \times SiO_2 - 0.89$ , 其中  $n = 148, R^2 = 0.91$

Fig. 2  $Al_2O_3/Ti$  vs.  $SiO_2$  diagram of source samples

a-felsic rock; b-intermediate-felsic rock; c-intermediate rock; d-intermediate-mafic rock; e-mafic rock; f-ultra-mafic rock; × represents the eliminated data when fitting an empirical equation; fitted line is  $\ln(Al_2O_3/Ti) = 0.073 \times SiO_2 - 0.89$  on 148 dots with  $R^2 = 0.91$

18.8, 27.2, 42.3, 65.7。因此,基性岩样品的  $Al_2O_3/Ti$  的大致变化范围为 11.2 ~ 18.8;中基性岩的  $Al_2O_3/Ti$  的变化范

围为 18.8 ~ 27.2;中性岩的  $Al_2O_3/Ti$  的变化范围为 27.2 ~ 42.3;中酸性岩的  $Al_2O_3/Ti$  的变化范围为 42.3 ~ 65.7;酸性岩的  $Al_2O_3/Ti$  的比值一般大于 65.7。不同岩性的火成岩岩石具备特定的  $Al_2O_3/Ti$  比值范围。因此  $Al_2O_3/Ti$  和  $SiO_2$  一样可以作为一个区分岩性的地球化学指标。

### 2.3 $Al_2O_3$ -Ti 图解

为了进一步研究  $Al_2O_3/Ti$  与岩性的关系,我们绘制了上述 157 件火成岩样品的  $Al_2O_3$  与 Ti 的关系图(图 3a)。

由图 3a 可以看出,不同岩性的火成岩样品在  $Al_2O_3$ -Ti 关系图中的投点分别聚集在不同范围。上述  $Al_2O_3/Ti$ - $SiO_2$  关系图(图 2)中不同岩性火成岩的  $Al_2O_3/Ti$  比值的分界值在  $Al_2O_3$ -Ti 关系图中体现为 5 条过原点的直线(图 3a),斜率分别为 11.2, 18.8, 27.2, 42.3 和 65.7。不同岩性岩石  $Al_2O_3/Ti$  比值的变化范围对应为相邻直线扫过的弧区范围。 $Al_2O_3$ -Ti 关系图可以划分出五个不同岩性区:a-酸性岩区;b-中酸性岩区;c-中性岩区;d-中基性岩区;e-基性岩区(图 3a)。

由图 3a 可知,有一部分酸性岩样品点落在了中酸性岩区(b区),但不难发现 b 区内中酸性岩样品绝大多数位于该区酸性岩样品的上部,二者具有明显的分界线。依据数据源中这两类岩石样品  $Al_2O_3$  与 Ti 的含量我们绘出了二者的分界线。将分界线以上的 b 区作为中酸性岩岩石的识别区,记为 II 区。将 a 区和分界线以下的 b 区合并作为中酸性岩的识别区,区记为 I 区(图 3b)。此外,由图 3a 可见,中基性岩区(d区)和基性岩区(e区)的边界线不能很好地区分数据源中这两类岩石样品,因此我们将这两个区合并记为 IV 区

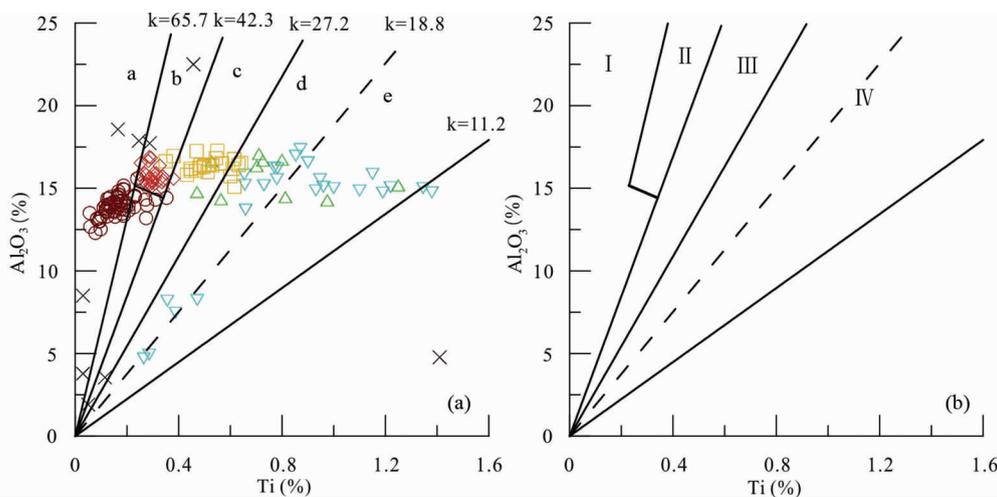


图3 数据源样品的  $Al_2O_3$ -Ti 关系图

图 3a:a-酸性岩区;b-中酸性岩区;c-中性岩区;d-中基性岩区;e-基性岩区;黑色×为拟合经验方程时剔除的样品点;图 3b:I-酸性岩区;II-中酸性岩区;III-中性岩区;IV-中基性岩和基性岩区

Fig. 3  $Al_2O_3$  versus Ti diagram of source samples

In Fig. 3a: a-felsic rock; b-intermediate-felsic rock; c-intermediate rock; d-intermediate-mafic rock; e-mafic rock; × represents the eliminated data when fitting a empirical equation. In Fig. 3b: I-felsic rock; II-intermediate-felsic rock; III-intermediate rock; IV-intermediate-mafic rock and mafic rock

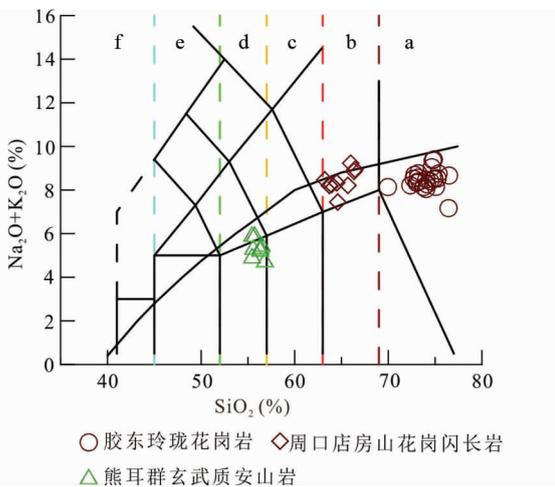


图4 岩石样品在 TAS 图解中的分布特征图

a-酸性岩区; b-中酸性岩区; c-中性岩区; d-中基性岩区; e-基性岩区; f-超基性岩区

Fig. 4 The distribution of igneous rock samples in the TAS diagram

a-felsic rock; b-intermediate-felsic rock; c-intermediate rock; d-intermediate-mafic rock; e-mafic rock; f-ultra-mafic rock

(基性和中基性岩区), 将两区的原先的边界线用虚线表示(图 3b)作为参照。对于没有更改的中性岩区(c 区)记为 III 区。构建的  $Al_2O_3$ -Ti 图解如图 3b 所示。在进行岩性判别时, 将样品中  $Al_2O_3$  与 Ti 两项的含量投至  $Al_2O_3$ -Ti 图解中则可大致判断岩石样品的岩性。值得注意的是在构建图解过程中我们发现由于超基性岩中  $Al_2O_3$  和 Ti 的含量极少,  $Al_2O_3$ /Ti 误差较大, 在构建图解时剔除了超基性岩样品, 因此该图解不适用于超基性岩样品的判别。

$Al_2O_3$ -Ti 图解由不活动组分  $Al_2O_3$  和 Ti 构建, 理论上同样适用于风化或蚀变的岩石。本文选取了山东胶东地区、河南熊耳山地区和北京周口店地区三个地区新鲜岩石样品、火成岩风化剖面样品和蚀变岩样品来探讨构建的  $Al_2O_3$ -Ti 图解的应用。

### 3 $Al_2O_3$ /Ti 区分岩浆岩类别

#### 3.1 数据源

为了验证构建的  $Al_2O_3$ -Ti 图解在区分岩浆岩类别时的应用, 我们选取了胶东玲珑花岗岩样品 24 件(Yang *et al.*, 2012), 北京周口店房山岩体花岗闪长岩样品 9 件(Xu *et al.*, 2012; 蔡剑辉等, 2005), 河南熊耳群玄武质安山岩样品 8 件(Wang *et al.*, 2010)。岩石样品的 TAS 图解见图 4。按照上文所述的仅按照 TAS 图解中  $SiO_2$  含量划分火成岩方案, 所选取的胶东地区花岗岩属于酸性岩, 北京周口店地区花岗闪长岩属于中酸性岩, 河南熊耳山地区玄武质安山岩属于中基性岩。

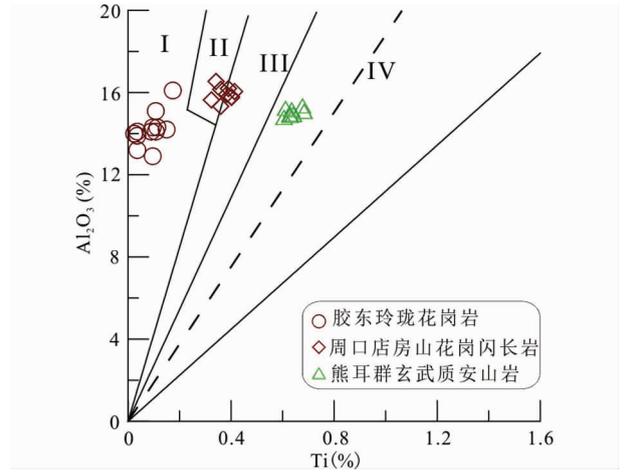


图5 岩石样品的  $Al_2O_3$ -Ti 图解

I-酸性岩区; II-中酸性岩区; III-中性岩区; IV-中基性岩和基性岩区

Fig. 5  $Al_2O_3$ -Ti diagram of igneous rock samples

I-felsic rock; II-intermediate-felsic rock; III-intermediate rock; IV-intermediate-mafic rock and mafic rock

#### 3.2 $Al_2O_3$ -Ti 图解

将上述 41 件岩石样品投入  $Al_2O_3$ -Ti 图解中(图 5), 可见花岗岩样品落在 I 区(酸性岩区), 花岗闪长岩落在 II 区(中酸性岩区)(其中部分样品沿着 II 区和 III 区的分界线分布, 这与其在 TAS 图解中沿着  $SiO_2 = 57\%$  线分布一致), 玄武质安山岩落在 IV 区(中基性岩和基性岩区)。岩石样品根据  $Al_2O_3$ -Ti 图解划分岩性结果与参照 TAS 图解划分岩石类型一致。可见  $Al_2O_3$ -Ti 图解能较好的区分岩性。

在运用 TAS 图解判别岩性时, 需先剔除样品中  $H_2O$  和  $CO_2$  含量, 对  $SiO_2$ 、 $K_2O$  和  $Na_2O$  的含量进行重新折算。而在利用  $Al_2O_3$ -Ti 图解法区分岩性时, 只需测得  $Al_2O_3$  和 Ti 含量, 无需对氧化物含量进行重新换算。这相对于 TAS 图解更为方便。

### 4 $Al_2O_3$ /Ti 示踪岩浆岩风化产物的母岩

在风化过程中  $Al_2O_3$  和 Ti 两元素通常被认为是不活动元素。两者的比值  $Al_2O_3$ /Ti 在风化过程中应该保持不变, 风化产物中的  $Al_2O_3$ /Ti 的值保留着其母岩中两元素的初始比值。因此  $Al_2O_3$ -Ti 图解理论上可以用来示踪岩浆岩风化产物的物源。

#### 4.1 数据源

风化壳作为一个研究风化作用的典型模型得到了广泛研究(Ji *et al.*, 2000, 2004; Ma *et al.*, 2007; Gong *et al.*, 2011, 2013, 2015), 风化壳样品从底部新鲜岩石到风化岩石到表层土壤, 代表着风化作用的不同阶段。不同层位的风化壳样品

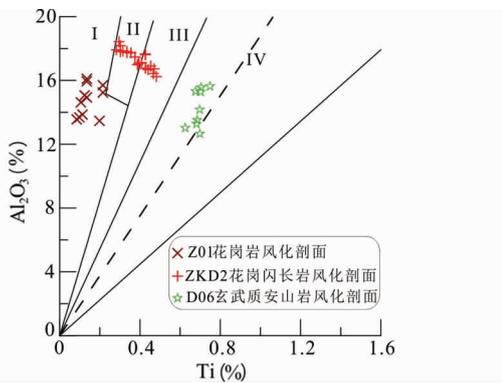


图6 风化剖面样品在  $Al_2O_3$ -Ti 图解中的投点图  
 I-酸性岩区; II-中酸性岩区; III-中性岩区; IV-中基性岩和基性岩区  
 Fig. 6  $Al_2O_3$ -Ti diagram of samples from weathering profile  
 I-felsic rock; II-intermediate-felsic rock; III-intermediate rock; IV-intermediate-mafic rock and mafic rock

代表着不同风化程度的风化产物。通过对风化壳的研究可以很好地了解风化过程中元素的行为。

本次研究参照已经报道过的3个火成岩风化剖面,分别为胶东地区 Z01 风化剖面(Gong *et al.*, 2013),河南熊耳山地区 D06 风化剖面(马云涛等, 2015)和北京周口店地区 ZKD2 风化剖面(Gong *et al.*, 2015)。

Z01 风化剖面位于胶东焦家金矿望儿山地区以东,为一发育在玲珑黑云母花岗岩上的风化剖面,剖面高约 7.5m,从表层土壤到底部新鲜黑云母花岗岩共收集了 11 件样品(Gong *et al.*, 2013)。ZKD2 风化剖面位于北京东南部,为一发育在花岗闪长岩上的风化剖面,剖面高约 7m,从表土层到底部花岗闪长岩共收集了 20 件样品(Gong *et al.*, 2015)。D06 风化剖面位于豫西熊耳山地区,为一母岩为玄武质安山岩的风化剖面,剖面高约 7m,从表土层到底部花岗闪长岩共收集了 11 件样品(马云涛等, 2015)。

#### 4.2 $Al_2O_3$ -Ti 图解示踪

收集到的上述 3 个风化剖面的 42 件样品在  $Al_2O_3$ -Ti 图解中的投点如图 6 所示。

从图 6 可以看出,不同岩性岩石的风化产物在  $Al_2O_3$ -Ti 图解中分别聚集在不同的区域。花岗岩从新鲜基岩到风化岩石到风化形成的土壤在  $Al_2O_3$ -Ti 图解中均落在酸性岩区,花岗闪长岩样品从新鲜基岩到风化岩石到风化形成的土壤在  $Al_2O_3$ -Ti 图解中大部分落在中酸性岩区,部分样品落在中性岩区,玄武质安山岩样品从新鲜基岩到风化岩石到风化形成的土壤在  $Al_2O_3$ -Ti 图解中均落在中基性岩-基性岩区。

显然,从表层土壤到风化岩石到底部的基岩,虽然岩石经历了不同程度的风化作用,但其风化产物与其母岩对应的区域一致。因此  $Al_2O_3$ -Ti 图解可以用来追溯岩石风化产物

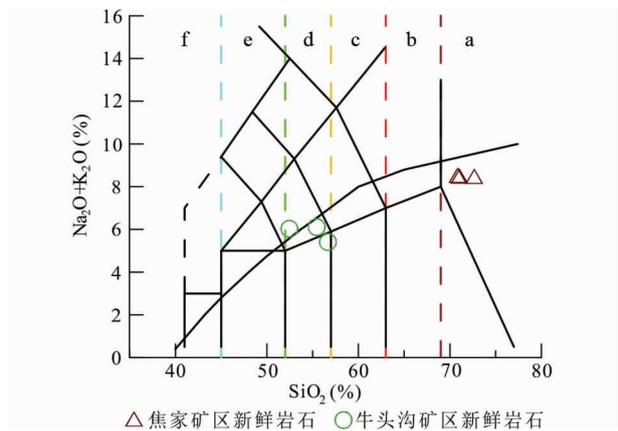


图7 牛头沟金矿区及焦家金矿区新鲜岩石样品 TAS 图解

a-酸性岩区; b-中酸性岩区; c-中性岩区; d-中基性岩区; e-基性岩区; f-超基性岩区

Fig. 7 TAS diagram of fresh igneous rock samples from the Niutougou gold deposit and Jiaojia gold deposit  
 a-felsic rock; b-intermediate-felsic rock; c-intermediate rock; d-intermediate-mafic rock; e-mafic rock; f-ultra-mafic rock

的母岩。借助  $Al_2O_3$ -Ti 图解,通过研究风化产物可以追溯和判别其物质来源。例如对于一个地区风化形成的土壤我们借助  $Al_2O_3$ -Ti 图解,可以判别土壤风化前的母岩性质,结合该区地质背景进一步推断风化产物(土壤)的物质来源。这对矿产勘查或者环境污染源问题的研究有一定的指导意义。

### 5 $Al_2O_3/Ti$ 判别蚀变岩石的原岩

在热液蚀变过程中,  $Al_2O_3$  和 Ti 通常被认为是不活动的,常被选为不活动元素来进行质量平衡计算(Barton *et al.*, 1991; Condie and Sinha, 1996; Das and Krishnaswami, 2007; Gong *et al.*, 2016)。即岩石在蚀变过程中  $Al_2O_3/Ti$  的比值保持相对稳定,蚀变岩中特征参数  $Al_2O_3/Ti$  与其新鲜岩石中的  $Al_2O_3/Ti$  保持一致。因而,  $Al_2O_3$ -Ti 图解应当可以用来判别蚀变岩石的母岩。本文选取胶东地区和豫西地区岩石及其蚀变岩来进行研究。

#### 5.1 数据源

胶东作为中国最重要的金矿集区,区内大型-超大型金矿床集中产出(Deng and Wang, 2016; 杨立强等, 2000, 2006; Yang *et al.*, 2006; 王中亮, 2012),已探明金矿资源量占全国近 1/3(Deng *et al.*, 2003, 2006, 2008, 2011; Yang *et al.*, 2007; 杨立强等, 2007);其中,破碎带蚀变岩型金矿床是最重要的金矿床类型,占胶东已探明金矿资源量的 90% 以上(杨立强等, 2014)。焦家金矿床是著名的“焦家式”破碎带蚀变岩型金矿。玲珑黑云母花岗岩为焦家金矿床主要赋矿围岩和各

类蚀变岩原岩(张炳林等,2014)。本文选取了胶东焦家金矿床围岩蚀变带上 19 件岩石样品,其中黑云母花岗岩样品 3 件、钾化花岗岩 5 件、黄铁矿化钾化花岗岩 2 件、绢英岩 6 件、黄铁绢英岩 3 件(张炳林等,2014)。

豫西地区是我国仅次于胶东地区的第二产金基地(Deng *et al.*, 2006, 2008, 2011; Yang *et al.*, 2007, 2009, 2014),熊耳山地区是豫西地区重要的金矿集区之一,受到了国内外众多地质工作者的重视(Mao *et al.*, 2002; Chen *et al.*, 2009; 吴发富等, 2012; Deng *et al.*, 2014)。牛头沟金矿是熊耳山地区近年来发现的大型矿床之一(Wang *et al.*, 2012; 贾玉杰等, 2013; 佟依坤等, 2014)。本文选取了牛头沟金矿区 9 件玄武质安山岩样品,其中新鲜岩石 3 件、蚀变岩 3 件、矿石样品 3 件(龚庆杰等, 2015)。

选取的两个矿区的 6 件新鲜岩石样品的 TAS 图解如图 7 所示。按照上文所述的仅按照 TAS 图解中 SiO<sub>2</sub> 含量划分火山岩方案,焦家矿区新鲜岩石样品属于酸性岩类,牛头沟矿区新鲜岩石样品属于中基性岩类。

## 5.2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti 图解判别蚀变岩

收集到的上述 2 个地区 28 件岩石样品在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti 图解中的投点如图 8 所示。

从图 8 可以看出,两个地区的岩石样品在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti 图解中分别聚集于两个不同区域内,焦家金矿区 19 件岩石样品均落在 I 区(即酸性岩区);牛头沟矿区 9 件岩石样品均落在 IV 区(中基性岩和基性岩区)。显然,对于胶东焦家金矿区岩石样品,黑云母花岗岩从新鲜岩石到蚀变岩再到矿石虽然经历不同程度的蚀变作用,其蚀变岩以及矿石中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti 的值保持在较小的变化范围,与其新鲜母岩在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti 图解中位置一致;对于牛头沟矿区玄武质安山岩,其新鲜岩石、蚀变岩以及矿石的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti 的值也几乎保持不变。值得一提的是,牛头沟 9 件样品几乎都落在了 IV 中参照虚线的左侧,即偏中性岩,这与其母岩在 TAS 图解(图 7)中对应的岩性吻合。因此,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti 图解可以用来判别蚀变岩石的原岩。

## 6 结论

(1)火成岩中不活动元素比值 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti 与 SiO<sub>2</sub> 含量存在较好的幂函数关系,经验方程为  $\ln(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}) = 0.073 \times \text{SiO}_2 - 0.89$ ,式中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub> 和 Ti 元素含量单位均为%。

(2)基于火成岩中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti 比值与 SiO<sub>2</sub> 含量的经验方程和 TAS 图解可以构建一个新的判别岩性的图解:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti 图解。构建的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti 图解可以较好地地区分火成岩类型。当火成岩受风化或蚀变作用影响无法运用常用的 TAS 图解和 QAPF 图判别岩性时可以参照 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti 图解,该图解可以大致判别风化或蚀变火成岩的母岩岩性,而且在运用 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti 图解判别岩性时,无需剔除样品中 H<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 含量对氧化物含量进行重新换算,判别方法较为简单。

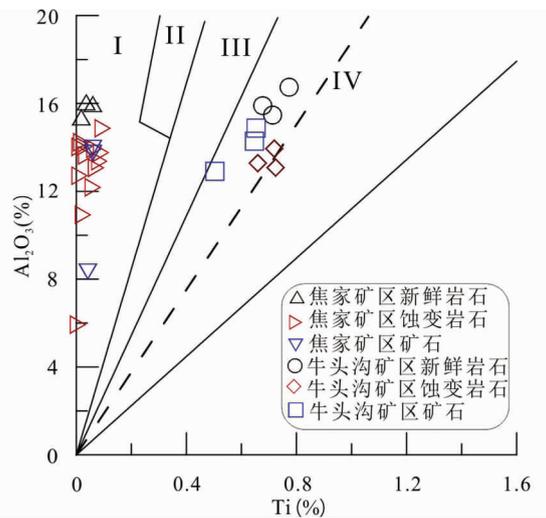


图 8 焦家矿区及牛头沟矿区岩石样品在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti 图解中的投点

I-酸性岩;II-中酸性岩;III-中性岩;IV-中基性岩和基性岩

Fig. 8 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti diagram of igneous rock samples from the Niutougou gold deposit and Jiaojia gold deposit

I-felsic rock; II-intermediate-felsic rock; III-intermediate rock; IV-intermediate-mafic rock and mafic rock

(3)Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti 图解可以用来追溯火成岩风化产物的母岩,还可以用来判别火成岩蚀变产物的原岩。

致谢 感谢中国地质大学(北京)杨立强教授、王中亮讲师、刘宁强讲师在本文完成过程中提出的宝贵建议。

## References

- Barton MD, Ilchik RP and Marikos MA. 1991. Metasomatism. In: Kerick DM (ed.). Contact Metamorphism. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 26(1): 321 - 349
- Braun JJ, Desclotres M, Riotte J, Fleury S, Barbiéro L, Boeglin JL, Violette A, Lacarce E, Ruiz L, Sekhar M, Kumar MSM, Subramanian S and Dupré B. 2009. Regolith mass balance inferred from combined mineralogical, geochemical and geophysical studies: Mule Hole gneissic watershed, South India. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(4): 935 - 961
- Cai JH, Yan GH, Mou BL, Ren KX, Song B and Li FT. 2005. Zircon U-Pb age, Sr-Nd-Pb isotopic compositions and trace element of Fangshan complex in Beijing and their petrogenesis significance. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 776 - 788 (in Chinese with English abstract)
- Chen YJ, Pirajno F, Li N, Guo DS and Lai Y. 2009. Isotope systematics and fluid inclusion studies of the Qiyugou breccia pipe-hosted gold deposit, Qinling orogen, Henan Province, China: Implications for ore genesis. *Ore Geology Reviews*, 35(2): 245 - 261
- Chi QH and Yan MC. 2007. Handbook of Elemental Abundance for Applied Geochemistry. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 148 (in Chinese)
- Condie KC and Sinha AK. 1996. Rare earth and other trace element mobility during mylonitization: A comparison of the Brevard and Hope Valley shear zones in the Appalachian Mountains, USA.

Journal of Metamorphic Geology, 14(2): 213–226

- Das A and Krishnaswami S. 2007. Elemental geochemistry of river sediments from the Deccan Traps, India: Implications to sources of elements and their mobility during basalt-water interaction. *Chemical Geology*, 242(1–2): 232–254
- Deng J, Yang LQ, Sun ZS, Wang JP, Wang QF, Xin HB and Li XJ. 2003. A metallogenic model of gold deposits of the Jiaodong granite-greenstone belt. *Acta Geologica Sinica*, 77(4): 537–546
- Deng J, Yang LQ, Ge LS, Wang QF, Zhang J, Gao BF, Zhou YH and Jiang SQ. 2006. Research advances in the Mesozoic tectonic regimes during the formation of Jiaodong ore cluster area. *Progress in Natural Science*, 16(8): 777–784
- Deng J, Wang QF, Yang LQ, Zhou L, Gong QJ, Yuan WM, Xu H, Guo CY, Liu XW and Zhu XL. 2008. The structure of ore-controlling strain and stress fields in the Shangzhuang gold deposit in Shandong Province, China. *Acta Geologica Sinica*, 82(4): 769–780
- Deng J, Wang QF, Wan L, Liu H, Yang LQ and Zhang J. 2011. A multifractal analysis of mineralization characteristics of the Dayingezhuang disseminated-veinlet gold deposit in the Jiaodong gold province of China. *Ore Geology Reviews*, 40(1): 54–64
- Deng J, Gong QJ, Wang CM, Carranza EJM and Santosh M. 2014. Sequence of Late Jurassic-Early Cretaceous magmatic-hydrothermal events in the Xiong'ershan region, central China: An overview with new zircon U-Pb geochronology data on quartz porphyries. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 161–172
- Deng J and Wang QF. 2016. Gold mineralization in China: Metallogenic provinces, deposit types and tectonic framework. *Gondwana Research*, 36: 219–274
- Duzgoren-Aydin NS, Aydin A and Malpas J. 2002. Re-assessment of chemical weathering indices: Case study on pyroclastic rocks of Hong Kong. *Engineering Geology*, 63(1–2): 99–119
- Gong QJ, Deng J, Yang LQ, Zhang J, Wang QF and Zhang GX. 2011. Behavior of major and trace elements during weathering of sericite-quartz schist. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(1–2): 1–13
- Gong QJ, Deng J, Wang CM, Wang ZL and Zhou LZ. 2013. Element behaviors due to rock weathering and its implication to geochemical anomaly recognition: A case study on Linglong biotite granite in Jiaodong Peninsula, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 128: 14–24
- Gong QJ, Deng J, Jia YJ, Tong YK and Liu NQ. 2015. Empirical equations to describe trace element behaviors due to rock weathering in China. *Journal of Geochemical Exploration*, 152: 110–117
- Gong QJ, Yu JS, Han DY, Liu NQ, Tong YK, Jia YJ and Ma YT. 2015. *Geochemical Exploration Model for Niutougou Au Deposit and Quantitative Prediction on Au Resources in Xiong'ershan Region, Western Henan Province, China*. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1–174 (in Chinese)
- Gong QJ, Yan TT, Li JZ, Zhang M and Liu NQ. 2016. Experimental simulation of element mass transfer and primary halo zone on water-rock interaction. *Applied Geochemistry*, 69: 1–11
- Irvine TN and Baragar WRA. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523–548
- Ji HB, Ouyang ZY, Wang SJ and Zhou DQ. 2000. Element geochemistry of weathering profile of dolomitite and its implications for the average chemical composition of the upper-continent crust. *Science in China (Series D)*, 43(1): 23–35
- Ji HB, Wang SJ, Ouyang ZY, Zhang S, Sun CX, Liu XM and Zhou DQ. 2004. Geochemistry of red residua underlying dolomites in karst terrains of Yunnan-Guizhou Plateau: I. The formation of the Pingba profile. *Chemical Geology*, 203(1–2): 1–27
- Jia YJ, Gong QJ, Han DY, Liu NQ, Xia XL and Li XL. 2013. Sample granularity of soils and stream sediments in geochemical surveys: A case study of the Niutougou gold deposit, Xiong'ershan gold mine in Henan Province. *Geology and Exploration*, 49(5): 928–938 (in Chinese with English abstract)
- Le Maitre RW. 1989. *A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1–193
- Ma JL, Wei GJ, Xu YG, Long WG and Sun WD. 2007. Mobilization and re-distribution of major and trace elements during extreme weathering of basalt in Hainan Island, South China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(13): 3223–3237
- Ma YT, Gong QJ, Han DY, Liu NQ, Yuan YT, Tong YK and Jia YJ. 2015. Behavior of major and trace elements during weathering of andesite: A case study of the Xiong'ershan Region, western Henan Province. *Geology and Exploration*, 51(3): 545–554 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Goldfarb RJ, Zhang ZW, Xu WY, Qiu YM and Deng J. 2002. Gold deposits in the Xiaoqinling-Xiong'ershan region, Qinling Mountains, central China. *Mineralium Deposita*, 37(3–4): 306–325
- Nesbitt HW and Markovics G. 1997. Weathering of granodioritic crust, long-term storage of elements in weathering profiles, and petrogenesis of siliciclastic sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(8): 1653–1670
- Panahi A, Young GM and Rainbird RH. 2000. Behavior of major and trace elements (including REE) during Paleoproterozoic pedogenesis and diagenetic alteration of an Archean granite near Ville Marie, Québec, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(13): 2199–2220
- Pokrovsky OS, Schott J and Dupré B. 2006. Trace element fractionation and transport in boreal rivers and soil porewaters of permafrost-dominated basaltic terrain in Central Siberia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(13): 3239–3260
- Rollison HR. 2000. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. In: Yang XM, Yang XY and Chen SX (trans.). Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 1–275 (in Chinese)
- Streckeisen A. 1974. Classification and nomenclature of plutonic rocks recommendations of the IUGS subcommission on the systematics of Igneous Rocks. *Geologische Rundschau*, 63(2): 773–786
- Tong YK, Gong QJ, Han DY, Liu NQ, Xu ZY and Yu WL. 2014. Indicator element association in geochemical surveys: A case study of the Niutougou gold deposit in western Henan Province. *Geology and Exploration*, 50(4): 712–724 (in Chinese with English abstract)
- Wang XL, Jiang SY and Dai BZ. 2010. Melting of enriched archaic subcontinental lithospheric mantle: Evidence from the ca. 1760Ma volcanic rocks of the Xiong'er Group, southern margin of the North China craton. *Precambrian Research*, 182(3): 204–216
- Wang ZL. 2012. *Metallogenic system of Jiaojia gold orefield, Shandong Province, China*. Ph. D. Dissertation. Beijing: China University of Geosciences, 1–230 (in Chinese)
- Wang ZL, Gong QJ, Sun X, Wu FF and Wang WX. 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology of quartz porphyry from the Niutougou gold deposit in Songxian County, Henan Province. *Acta Geologica Sinica*, 86(2): 370–382
- Wu FF, Gong QJ, Shi JX, Li JQ and Wang ZL. 2012. Ore-controlling geological factors of gold deposits in the Xiong'ershan region, western Henan Province. *Geology and Exploration*, 48(5): 865–875 (in Chinese with English abstract)
- Xu HJ, Song YR, Ye K, Zhang JF and Wang HR. 2012. Petrogenesis of mafic dykes and high-Mg adakitic enclaves in the Late Mesozoic Fangshan low-Mg adakitic pluton, North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 54–55: 143–161
- Yang KF, Fan HR, Santosh M, Hu FF, Wilde SA, Lan TG, Lu LN and Liu YS. 2012. Reactivation of the Archean lower crust: Implications for zircon geochronology, elemental and Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry of Late Mesozoic granitoids from northwestern Jiaodong Terrane, the North China Craton. *Lithos*, 146–147: 112–127
- Yang LQ, Zhang ZJ, Wang GJ, Deng J, Zhao AH and Wang JP. 2000. Lithospheric structure and deep-seated mineralization in Jiaodong gold deposit concentration region, Shandong, China. *Earth Science*, 25(4): 421–427 (in Chinese with English abstract)
- Yang LQ, Deng J, Wang QF, Gao BF and Xu H. 2006. Deep-seated tectonic and geological process controls on mineralization and mineral resources. *Mineral Deposits*, 25(S1): 107–110 (in Chinese)

- Yang LQ, Deng J, Ge LS, Wang QF, Zhang J, Gao BF, Jiang SQ and Xu H. 2007. Metallogenic epoch and genesis of the gold deposits in Jiaodong Peninsula, eastern China: A regional review. *Progress in Nature Science*, 17(2): 138–143
- Yang LQ, Deng J, Zhang J, Wang QF, Gao BF, Zhou YH, Guo CY and Jiang SQ. 2007. Preliminary studies of fluid inclusions in Damoqujia gold deposit along Zhaoping fault zone, Shandong Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(1): 153–160 (in Chinese with English abstract)
- Yang LQ, Deng J, Guo CY, Zhang J, Jiang SQ, Gao BF, Gong QJ and Wang QF. 2009. Ore-forming fluid characteristics of the Dayingezhuang gold deposit, Jiaodong gold province, China. *Resource Geology*, 59(2): 181–193
- Yang LQ, Deng J, Goldfarb RJ, Zhang J, Gao BF and Wang ZL. 2014.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronological constraints on the formation of the Dayingezhuang gold deposit: New implications for timing and duration of hydrothermal activity in the Jiaodong gold province, China. *Gondwana Research*, 25(4): 1469–1483
- Yang LQ, Deng J, Wang ZL, Zhang L, Guo LN, Song MC and Zheng XL. 2014. Mesozoic gold metallogenic system of the Jiaodong Gold Province, eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 30(9): 2447–2467 (in Chinese with English abstract)
- Zhang BL, Yang LQ, Huan SY, Liu Y, Liu WL, Zhao RX, Xu YB and Liu SG. 2014. Hydrothermal alteration in the Jiaojia gold deposit, Jiaodong, China. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(9): 2533–2545 (in Chinese with English abstract)
- 贾玉杰, 龚庆杰, 韩东昱, 刘宁强, 夏旭丽, 李晓蕾. 2013. 化探方法技术之取样粒度研究——以豫西牛头沟金矿 1:5 万化探普查为例. *地质与勘探*, 49(5): 928–938
- 马云涛, 龚庆杰, 韩东昱, 刘宁强, 袁玉涛, 佟依坤, 贾玉杰. 2015. 安山岩风化过程中元素行为——以豫西熊耳山地区为例. *地质与勘探*, 51(3): 545–554
- Rollison HR. 2000. 岩石地球化学. 杨学明, 杨晓勇, 陈双喜译. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1–275
- 佟依坤, 龚庆杰, 韩东昱, 刘宁强, 徐增裕, 于文龙. 2014. 化探技术之成矿指示元素组合研究——以豫西牛头沟金矿为例. *地质与勘探*, 50(4): 712–724
- 王中亮. 2012. 焦家金矿田成矿系统. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学, 1–230
- 吴发富, 龚庆杰, 石建喜, 李建全, 王中亮. 2012. 熊耳山矿集区金矿控矿地质要素分析. *地质与勘探*, 48(5): 865–875
- 杨立强, 王光杰, 张中杰, 邓军, 赵爱华, 王建平. 2000. 胶东金矿集中区岩石圈结构与深部成矿作用. *地球科学*, 25(4): 421–427
- 杨立强, 邓军, 王庆飞, 高帮飞, 徐浩. 2006. 深部构造与地质过程控矿研究. *矿床地质*, 25(S1): 107–110
- 杨立强, 邓军, 张静, 王庆飞, 高帮飞, 周应华, 郭春影, 江少卿. 2007. 山东招平断裂带大磨曲家金矿床流体包裹体初步研究. *岩石学报*, 23(1): 153–160
- 杨立强, 邓军, 王中亮, 张良, 郭林楠, 宋明春, 郑小礼. 2014. 胶东中生代金成矿系统. *岩石学报*, 30(9): 2447–2467
- 张炳林, 杨立强, 黄锁英, 刘跃, 刘文龙, 赵荣新, 徐咏彬, 刘胜光. 2014. 胶东焦家金矿床热液蚀变作用. *岩石学报*, 30(9): 2533–2545

#### 附中文参考文献

- 蔡剑辉, 阎国翰, 牟保磊, 任康绪, 宋彪, 李凤棠. 2005. 北京房山岩体锆石 U-Pb 年龄和 Sr、Nd、Pb 同位素与微量元素特征及成因探讨. *岩石学报*, 21(3): 776–788
- 迟清华, 鄢明才. 2007. 应用地球化学元素丰度数据手册. 北京: 地质出版社, 1–148
- 龚庆杰, 喻劲松, 韩东昱, 刘宁强, 吴发富, 佟依坤, 贾玉杰, 马云涛. 2015. 豫西牛头沟金矿地球化学找矿模型与定量预测. 北京: 冶金工业出版社, 1–174