

# 北羌塘盆地三叠系康南组砂岩地球化学特征 及其对物源区和构造背景的制约

屈李华<sup>1</sup>, 刘喜方<sup>2</sup>, 赵芳<sup>1</sup>, 周晓颖<sup>1</sup>, 李金锁<sup>2</sup>

(1. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局物化探大队, 新疆 昌吉 831100;

2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

**摘要:** 沉积盆地中碎屑砂岩的地球化学特征主要受物源区的制约, 分析碎屑砂岩的化学成分可以揭示盆地砂岩的物源属性和构造背景。笔者对北羌塘盆地三叠系康南组碎屑砂岩进行全岩分析。样品具有高  $\text{SiO}_2$  含量,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  值变化较大,  $\text{TFe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$  含量中等。稀土元素配分模式图显示富集轻稀土元素,  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 3.96 \sim 9.25$ , 平均为 6.32,  $\delta\text{Eu}$  明显负异常;  $\delta\text{Ce}$  呈弱负异常。碱土金属元素和化学蚀变指数(CIA)以及成分变异指数(IPV)说明其源区物质较新鲜, 成熟度相对较低, 化学风化作用较弱—中等。此外, 微量元素  $\text{Th}/\text{U}$ 、 $\text{La}/\text{Sc}$ 、 $\text{Th}/\text{Sc}$  等值以及  $\text{TiO}_2 - \text{Ni}$ 、 $\text{La}/\text{Th} - \text{Hf}$ 、 $\text{Co}/\text{Th} - \text{La}/\text{Sc}$  和  $\text{Th}/\text{Sc} - \text{La}/\text{Sc}$  源岩判别图解反映砂岩的物源具有长英质特征。砂岩的  $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{La} - \text{Th}$ 、 $\text{La}/\text{Y} - \text{Sc}/\text{Cr}$  双变量图解,  $\text{La} - \text{Th} - \text{Sc}$ 、 $\text{Th} - \text{Sc} - \text{Zr}/10$ 、 $\text{Th} - \text{Co} - \text{Zr}/10$  三变量图解以及  $\text{Th}/\text{U}$ 、 $\text{Rb}/\text{Sr}$  等值表明北羌塘三叠系康南组碎屑砂岩的物源区构造背景以大陆岛弧为主, 兼有被动大陆边缘构造背景特征。

**关键词:** 碎屑沉积岩; 北羌塘盆地; 地球化学; 物源; 构造背景

中图分类号: P595

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2018)04-0097-17

## Geochemical Characteristics of the Sandstones from Triassic Kangnan Formation in North Qiangtang Basin (Tibet): Implications for Provenance and Tectonic Setting

QU Lihua<sup>1</sup>, LIU Xifang<sup>2</sup>, ZHAO Fang<sup>1</sup>, ZHOU Xiaoying<sup>1</sup>, LI Jinsuo<sup>2</sup>

(1. Geophysical and Geochemical Team of Xinjiang Geology Mineral Exploration and Development, Changji 831100, Xinjiang, China; 2. Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China)

**Abstract:** The geochemical composition of sandstones in sedimentary basin has been mainly controlled by the tectonic setting of the provenance. Therefore, it is possible to reveal the tectonic setting of the provenance and the nature of source rocks in terms of the geochemical composition of sandstones. The major and trace element compositions of clastic sandstone rocks in North Qiangtang Basin have been analyzed in this paper. These rocks are characterized by high  $\text{SiO}_2$  contents and moderate  $\text{TFe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$  contents, but the  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  ratios vary largely for different samples. Their REE patterns are uniform and similar to the ones of typical post-Archean shales, with LREE enrichment and flat HREE. Their  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  ratios vary from 3.96 to 9.25,

收稿日期: 2018-03-06; 修回日期: 2018-07-01

基金项目: 国土资源部地质调查项目“西藏盐湖锂钾资源调查评价”(1212011120982)

作者简介: 屈李华(1987-), 男, 工程师, 地质工程专业, 主要从事矿产资源勘查及其相关工作。E-mail: 852449500@qq.com

with an average of 6.32. These rocks have evident Eu depletions and weak Ce depletions. The relationship among alkaline earth elements, Chemical Index of Alteration (CIA) and Index of Compositional Variability (IPV) indicate that, the source area of these rocks was affected by a moderate weathering history. In addition, the Th/U, La/Sc, Th/Sc and Ba/Sr ratios of Kangnan Formation and the binary diagrams (such as  $\text{TiO}_2$  vs. Ni, La/Th vs. Hf, Co/Th vs. La/Sc and Th/Sc vs. La/Sc) denote that the origin of these sediments is characterized by superficial and felsic. The tectonic setting discrimination diagrams (such as  $\text{SiO}_2$  vs.  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ , La vs. Th, La/Y vs. Sc/Cr and La vs. Th vs. Sc, Th vs. Sc vs. Zr/10, Th vs. Co vs. Zr/10) and the Th/U, Rb/Sr ratios reveal that the tectonic settings of the provenance for Mesozoic sedimentary rocks in Qiangtang Basin belong to a passive continental margin and a continental island arc.

**Keywords:** clastic sandstones; North Qiangtang Basin; geochemistry; provenance; tectonic background

碎屑砂岩既是地球演化的产物,又是地球物质循环的重要组成部分,其成分特征蕴含着大量与地壳发展演化及沉积环境密切相关的信息,可以反映物源特征和地质构造背景(MCLENNAN et al., 1990; JAFARZADEH et al., 2008; GABO et al., 2009)。其化学成分受源岩、风化作用、搬运、沉积和成岩作用的共同制约,包含了丰富的源区物质、构造环境及早期地壳演化的信息(MCLENNAN et al., 1991; CULLERS, 1994a, 1994b, 1995; COX et al., 1995; CULLERS et al., 2000; DAS et al., 2003; SUGITANI et al., 2006; AKARISH et al., 2008)。因此,前人通过砂岩的地球化学特征判别其物源(TAYLOR et al., 1985),恢复沉积盆地构造环境(ROSER et al., 1986; HOFMANN, 2005; CAMPOS et al., 2007; GABO et al., 2009)以揭示碎屑砂岩成因及古风化条件(MCLENNAN et al., 1990, 1995)。

笔者通过对北羌塘盆地康如茶卡湖边康南组碎屑砂岩的主微量元素地球化学特征的研究,以揭示岩石的风化特征、沉积环境、成岩物质来源和物源区构造背景,进而阐述中三叠世康南组沉积环境的变化及物源区构造背景特征,为进一步揭示中三叠世羌塘盆地构造演化提供理论依据。

## 1 区域地质特征

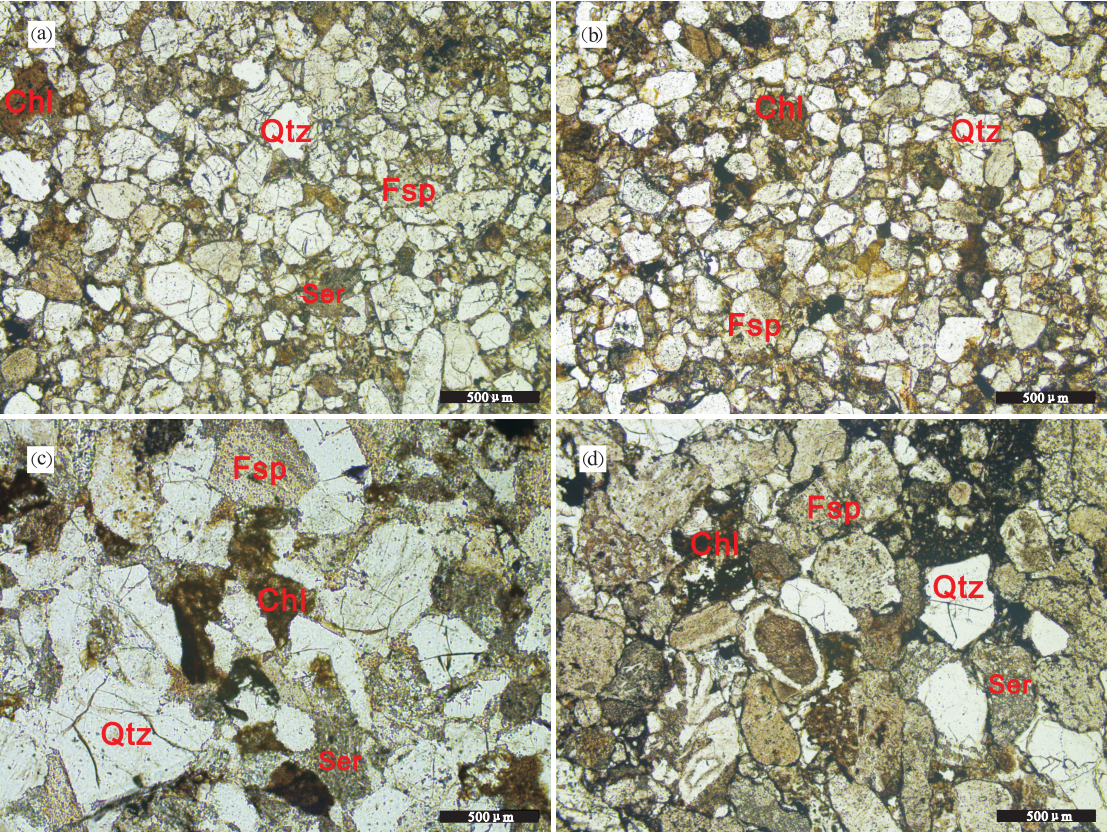
青藏高原从南至北被雅鲁藏布江缝合带、班公湖-怒江缝合带及可可西里-金沙江缝合带分为特提斯-喜马拉雅、拉萨、羌塘和松潘-甘孜 4 个板块(图

1a)(YIN et al., 2000; CHU et al., 2006; ZHANG et al., 2012)。羌塘盆地位于可可西里-金沙江缝合带和班公湖-怒江缝合带之间,是在古特提斯洋和中特提斯洋消亡、板块碰撞的基础上演化而来的叠合盆地(夏林圻等, 2010; 屈李华等, 2015; 黄继钧, 2001)。资料显示羌塘盆地由南羌塘凹陷、中央隆起带和北羌塘凹陷 3 个次级构造单元组成(刘勇等, 1998, 黄继钧, 2001; 王成善等, 2001; 王剑等, 2004, 2007; 白云山等, 2005; 王剑, 2009)。中央隆起带呈东西向展布,位于格拉丹东、玛依岗日及戈木日一带。北以玛尔果茶卡-阿木岗断裂和北羌塘拗陷为界,南以依布茶卡-毕洛错错断裂和南羌塘拗陷为界,将羌塘盆地分为南北 2 个拗陷带。侏罗纪时期的沉积受中央隆起带的明显控制,沿其两侧发育三叠-侏罗纪的边缘相沉积物,反映该带不仅在二叠纪末期就已经存在而且横贯整个盆地分布(王剑, 2009)。

北羌塘盆地位于可可西里-金沙江缝合带和中央隆起带之间,总体形态为东西向延伸的长条状展布。资料表明,基底可划分为若干次级凹陷和凸起,在平面上凹陷和凸起相间排列,总体上为近东西向带状展布(王剑, 2009)。单个凸起呈带状展布,主延伸方向为北西-西向,次延伸方向为北东-东向。区内地层出露齐全,中新界较为发育,以上二叠统和侏罗系大面积出露为特征,拗陷的南北边缘出露少量的晚古生界和中、下三叠统(王剑, 2009)。研究区三叠系出露康鲁组,康南组和肖茶卡组地层,三者呈平行不整合接触(图 1b)。

康鲁组位于热觉茶卡与兰新岭之间,岩层呈北





Qtz. 石英;Fsp. 长石;Chl. 绿泥石;Ser. 绢云母;a. D63 样品;b. D66 样品;c. D78 样品;d. D84 样品

图 2 北羌塘地区三叠系康南组砂岩的正交偏光显微照片

Fig. 2 Photomicrographs of sandstone rocks from the Kangnan Formation in North Qiangtang under cross-polarized light

3 地球化学特征

3.1 常量元素特征

样品常量元素含量见表 1。从表 1 可以看出，砂岩的 SiO<sub>2</sub> 的含量较高，为 57.9%~92.27%，平均为 81.4%；Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 3.97%~11.46%，平均为 8.38%；TiO<sub>2</sub> 含量为 0.18%~0.49%，平均为 0.32%；TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 1.40%~4.92%，平均为 2.67%。K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 值变化较大，为 0.30%~123%，平均为 34.23%，部分样品的 K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 值小于 1。TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + MgO 平均为 3.37%；Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO+Na<sub>2</sub>O)值为 4.93，推断是受富含黏土矿物的影响。烧失量为 1.25%~17.42%，平均为 4.17%；造成烧失量高得原因可能是富含碳酸岩或遭受过后期风化作用。

BHATIA 等(1986)通过研究澳大利亚东部古生代构造环境下杂砂岩的地球化学成分，总结出砂岩地球化学元素之间的相关系数，反映某些元素之间具有一定的相关性。笔者对砂岩样品的主量元素地球化学数据进行了相关性研究(表 3、图 3)。Harker 图解反映 SiO<sub>2</sub> 与 TiO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MnO<sub>2</sub> 和 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 等主量元素具有明显负相关关系，表明在很大程度上石英和硅酸盐矿物颗粒影响着全岩的化学性质(BHATIA et al., 1986)；SiO<sub>2</sub> 与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的相关系数为-0.555，反映砂岩中的铝黏土矿物及石英含量影响了其地球化学特征。K<sub>2</sub>O 与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 呈较弱的正相关性(0.356)，不仅反映长石类碎屑矿物对砂岩化学成分含量的影响程度，同时反映了砂岩中富铝、高钾的黏土矿物具有向伊利石发生转变的趋势(FEDO et al., 1995)。TiO<sub>2</sub> 与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 呈正相关性，相关系数为 0.721，表明在风化作用后，TiO<sub>2</sub> 具有向硅酸盐矿

表 1 康南组砂岩岩主量元素分析数据(%)及相关参数表  
Tab. 1 Major element compositions of the sandstones(%)from Kangnan Formation

| 样品                                                      | D62   | D63   | D64   | D66   | D68   | D76   | D77   | D78   | D80   | D83   | D84   | D86   | D87   |
|---------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 岩性                                                      | 石质砂   | 亚石质砂  | 亚石质砂  | 亚石质砂  | 石质砂   | 石质砂   | 石质砂   | 亚长石   | 亚长石   | 石质砂   | 亚长石   | 石质砂   | 石质砂   |
|                                                         | 屑砂岩   | 屑砂岩   | 屑砂岩   | 屑砂岩   | 屑砂岩   | 屑砂岩   | 屑砂岩   | 砂岩    | 砂岩    | 屑砂岩   | 砂岩    | 屑砂岩   | 屑砂岩   |
| SiO <sub>2</sub>                                        | 75.45 | 86.76 | 92.27 | 87.95 | 81.58 | 79.91 | 81.50 | 83.78 | 84.83 | 57.90 | 86.68 | 79.12 | 79.99 |
| TiO <sub>2</sub>                                        | 0.49  | 0.28  | 0.22  | 0.23  | 0.27  | 0.39  | 0.31  | 0.32  | 0.23  | 0.34  | 0.18  | 0.47  | 0.40  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                          | 11.46 | 4.02  | 4.23  | 3.97  | 9.32  | 11.04 | 10.59 | 8.20  | 7.94  | 9.16  | 7.49  | 10.49 | 11.03 |
| TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                         | 4.92  | 1.40  | 1.66  | 1.45  | 2.51  | 3.33  | 2.23  | 2.13  | 3.41  | 2.86  | 1.81  | 4.38  | 2.63  |
| MnO                                                     | 0.06  | 0.05  | 0.06  | 0.06  | 0.06  | 0.06  | 0.05  | 0.08  | 0.08  | 0.23  | 0.04  | 0.06  | 0.06  |
| MgO                                                     | 1.91  | 0.17  | 0.17  | 0.18  | 0.26  | 0.47  | 0.40  | 0.70  | 0.84  | 1.27  | 0.42  | 1.28  | 0.96  |
| CaO                                                     | 1.80  | 6.27  | 0.14  | 5.17  | 1.79  | 0.47  | 0.60  | 3.95  | 0.63  | 24.61 | 0.39  | 0.45  | 0.93  |
| Na <sub>2</sub> O                                       | 2.25  | <0.01 | <0.01 | <0.01 | 2.56  | 2.68  | 2.79  | <0.01 | 0.04  | 2.33  | 1.84  | 2.74  | 3.16  |
| K <sub>2</sub> O                                        | 1.72  | 1.04  | 1.26  | 0.99  | 1.66  | 1.62  | 1.48  | 0.85  | 2.01  | 1.37  | 1.19  | 1.08  | 0.96  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>                           | 0.09  | 0.03  | 0.03  | 0.03  | 0.05  | 0.08  | 0.09  | 0.08  | 0.04  | 0.09  | 0.04  | 0.05  | 0.03  |
| TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +MgO                    | 6.83  | 1.57  | 1.84  | 1.63  | 2.76  | 3.80  | 2.63  | 2.83  | 4.25  | 4.13  | 2.23  | 5.66  | 3.59  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>        | 0.15  | 0.05  | 0.05  | 0.05  | 0.11  | 0.14  | 0.13  | 0.10  | 0.09  | 0.16  | 0.09  | 0.13  | 0.14  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub>        | 23.39 | 14.36 | 19.23 | 17.26 | 34.52 | 28.31 | 34.16 | 25.63 | 34.52 | 26.94 | 41.61 | 22.32 | 27.58 |
| K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O                      | 0.76  | 97.0  | 123.  | 93.0  | 0.65  | 0.61  | 0.53  | 79.0  | 48.5  | 0.59  | 0.64  | 0.39  | 0.30  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /(CaO+Na <sub>2</sub> O) | 2.83  | 0.64  | 27.6  | 0.77  | 2.14  | 3.50  | 3.12  | 2.07  | 11.8  | 0.34  | 3.36  | 3.29  | 2.70  |
| CIA                                                     | 50.47 | 57.10 | 77.59 | 75.21 | 78.25 | 61.81 | 60.00 | 89.59 | 77.44 | 50.06 | 60.34 | 62.20 | 58.40 |
| ICV                                                     | 1.27  | 1.51  | 0.73  | 0.77  | 0.73  | 0.97  | 0.94  | 0.56  | 0.89  | 1.64  | 0.99  | 1.25  | 1.14  |

注:表中数据为扣除烧失量并换算成 100%后的量。TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>代表全铁。CIA=[Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CaO\*+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)]×100,ICV=(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O+CaO\*+MgO+TiO<sub>2</sub>+MnO)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,式中的化学成分含量均为摩尔数,CaO\*指硅酸盐矿物中的CaO,除了去除碳酸盐之外,还取决于全岩的P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>和Na<sub>2</sub>O的含量。据MCLENNAN等(1993), $n(\text{CaO}^*) = n(\text{CaO}) - n(\text{P}_2\text{O}_5) \times 10/3$ ,计算后,若 $n(\text{CaO}^*) < n(\text{Na}_2\text{O})$ ,则 $n(\text{CaO}^*) = n(\text{Na}_2\text{O})$ ;若 $n(\text{CaO}^*) \geq n(\text{Na}_2\text{O})$ ,则 $n(\text{CaO}^*) = n(\text{Na}_2\text{O})$ 。岩性划分依据PETTJOHN等(1973)。

表 2 康南组砂岩微量元素分析数据(10<sup>-6</sup>)及相关参数表

Tab. 2 Trace element compositions of the sandstones(10<sup>-6</sup>)from Kangnan Formation

| 样品                               | D62  | D63  | D64  | D66  | D68  | D76   | D77  | D78   | D80  | D83   | D84  | D86  | D87   |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|------|-------|------|------|-------|
| Li                               | 20.3 | 23.9 | 28.1 | 29.5 | 21.9 | 16.2  | 14.3 | 29.9  | 14.7 | 10.1  | 12.2 | 17.7 | 23.3  |
| Rb                               | 52.5 | 37   | 46.3 | 33.1 | 48.9 | 55    | 49.6 | 38.9  | 65.5 | 34.5  | 45   | 36.1 | 29.7  |
| Cs                               | 3.03 | 2.49 | 2.91 | 2.08 | 1.6  | 2.49  | 2.16 | 1.85  | 2.67 | 2.01  | 1.95 | 1.56 | 1.1   |
| V                                | 56.1 | 28.8 | 25.3 | 25.6 | 33.7 | 49.5  | 39.5 | 59.9  | 25.1 | 30.5  | 14.1 | 52.3 | 47.2  |
| Cr                               | 26.8 | 25.9 | 41.1 | 21.8 | 22.7 | 26.5  | 18.9 | 42.7  | 13.2 | 14.8  | 22   | 71.9 | 40.3  |
| Co                               | 7.35 | 3.87 | 3.72 | 5.49 | 2.61 | 3.78  | 4.07 | 6.89  | 3.06 | 8.44  | 2.48 | 7.45 | 7.42  |
| Ni                               | 9.41 | 7.57 | 11.8 | 10.1 | 4.95 | 7.08  | 6.02 | 19.4  | 4.27 | 11.2  | 7.04 | 21.1 | 8     |
| Ga                               | 14   | 4.47 | 4.75 | 4.25 | 9.28 | 12.4  | 10.9 | 8.74  | 9.11 | 8.94  | 7.55 | 12.2 | 11.7  |
| Sr                               | 206  | 216  | 287  | 310  | 71.5 | 83.1  | 87.7 | 114   | 29.4 | 186   | 43.5 | 56.7 | 68.3  |
| Ba                               | 333  | 262  | 204  | 500  | 137  | 167   | 147  | 234   | 82.9 | 99.3  | 366  | 79   | 85.4  |
| Pb                               | 11.3 | 33.2 | 23.8 | 28.8 | 4.83 | 9     | 9.43 | 17.5  | 14.4 | 11.1  | 7.14 | 7.7  | 3.32  |
| Th                               | 8.03 | 4.2  | 4.3  | 4.22 | 6.37 | 7.39  | 7.22 | 7.6   | 6.4  | 5.4   | 5.65 | 5.42 | 4.85  |
| U                                | 2.46 | 0.87 | 0.85 | 0.93 | 1.9  | 2.36  | 2.59 | 2.2   | 2.37 | 1.99  | 1.68 | 1.9  | 1.68  |
| Zr                               | 220  | 147  | 95.9 | 93.7 | 108  | 166   | 143  | 114   | 137  | 121   | 141  | 210  | 140   |
| Hf                               | 5.6  | 3.31 | 2.53 | 2.49 | 3.15 | 4.26  | 4.1  | 3.04  | 3.76 | 3.08  | 3.79 | 5.72 | 3.81  |
| Nb                               | 6.97 | 4.95 | 4.14 | 4.32 | 4.09 | 6.07  | 5.03 | 5.41  | 4.21 | 4.14  | 3.53 | 5.91 | 4.88  |
| Ta                               | 0.54 | 0.38 | 0.33 | 0.33 | 0.35 | 0.48  | 0.43 | 0.45  | 0.35 | 0.32  | 0.3  | 0.45 | 0.37  |
| Sc                               | 12.4 | 3.12 | 2.72 | 2.52 | 4.78 | 9.03  | 8.52 | 6.24  | 6.66 | 9.1   | 4.15 | 8.48 | 7.5   |
| Th/U                             | 3.26 | 4.83 | 5.06 | 4.54 | 3.35 | 3.13  | 2.79 | 3.45  | 2.70 | 2.71  | 3.36 | 2.85 | 2.89  |
| La/Sc                            | 1.74 | 3.30 | 3.59 | 4.48 | 3.24 | 2.35  | 2.50 | 3.67  | 3.27 | 2.55  | 3.33 | 1.83 | 1.57  |
| Th/Sc                            | 0.65 | 1.35 | 1.58 | 1.67 | 1.33 | 0.82  | 0.85 | 1.22  | 0.96 | 0.59  | 1.36 | 0.64 | 0.65  |
| Cr /Zr                           | 0.12 | 0.18 | 0.43 | 0.23 | 0.21 | 0.16  | 0.13 | 0.37  | 0.10 | 0.12  | 0.16 | 0.34 | 0.29  |
| Rb/Sr                            | 0.25 | 0.17 | 0.16 | 0.11 | 0.68 | 0.66  | 0.57 | 0.34  | 2.23 | 0.19  | 1.03 | 0.64 | 0.43  |
| Ba/Sr                            | 1.62 | 1.21 | 0.71 | 1.61 | 1.92 | 2.01  | 1.68 | 2.05  | 2.82 | 0.53  | 8.41 | 1.39 | 1.25  |
| La                               | 21.6 | 10.3 | 9.76 | 11.3 | 15.5 | 21.2  | 21.3 | 22.9  | 21.8 | 23.2  | 13.8 | 15.5 | 11.8  |
| Ce                               | 45.4 | 18.8 | 19.4 | 20   | 30.3 | 49.2  | 51.4 | 41.7  | 38.7 | 58.8  | 26   | 30.1 | 29.4  |
| Pr                               | 5.63 | 2.35 | 2.16 | 2.42 | 3.99 | 5.79  | 5.95 | 5.14  | 6.02 | 6.62  | 3.58 | 4.42 | 3.4   |
| Nd                               | 21.6 | 7.79 | 7.26 | 8.31 | 14.5 | 22.2  | 23.5 | 18.1  | 22.7 | 26.6  | 13.5 | 17.6 | 13.4  |
| Sm                               | 4.91 | 1.43 | 1.58 | 1.67 | 3.1  | 5.04  | 5.58 | 3.61  | 4.7  | 6.79  | 3.2  | 4.27 | 3.24  |
| Eu                               | 0.93 | 0.35 | 0.36 | 0.5  | 0.59 | 1.02  | 1.16 | 0.73  | 0.88 | 1.39  | 0.71 | 0.86 | 0.61  |
| Gd                               | 4.82 | 1.33 | 1.4  | 1.6  | 2.68 | 4.57  | 5.22 | 3.08  | 4.68 | 6.59  | 3.5  | 4.34 | 2.8   |
| Tb                               | 0.79 | 0.19 | 0.22 | 0.23 | 0.43 | 0.71  | 0.86 | 0.45  | 0.79 | 1.1   | 0.63 | 0.69 | 0.48  |
| Dy                               | 4.87 | 1.14 | 1.31 | 1.32 | 2.64 | 4.42  | 4.95 | 2.58  | 4.64 | 6.32  | 4.08 | 4.17 | 3.03  |
| Ho                               | 0.98 | 0.24 | 0.26 | 0.26 | 0.51 | 0.84  | 0.96 | 0.46  | 0.94 | 1.15  | 0.82 | 0.8  | 0.64  |
| Er                               | 3.17 | 0.77 | 0.83 | 0.86 | 1.89 | 2.88  | 3.19 | 1.55  | 3.2  | 3.58  | 2.81 | 2.66 | 2.27  |
| Tm                               | 0.48 | 0.11 | 0.12 | 0.13 | 0.28 | 0.4   | 0.44 | 0.21  | 0.44 | 0.5   | 0.4  | 0.37 | 0.34  |
| Yb                               | 3.23 | 0.73 | 0.74 | 0.81 | 1.96 | 2.72  | 3    | 1.42  | 2.99 | 3.21  | 2.7  | 2.41 | 2.5   |
| Lu                               | 0.49 | 0.12 | 0.11 | 0.12 | 0.29 | 0.43  | 0.44 | 0.22  | 0.47 | 0.49  | 0.4  | 0.36 | 0.38  |
| Y                                | 33   | 7.66 | 7.23 | 8.28 | 15.8 | 26.4  | 26.9 | 14.7  | 30.5 | 37.2  | 25.4 | 23.1 | 19.7  |
| ΣREE                             | 119  | 45.7 | 45.5 | 49.5 | 78.7 | 121.4 | 128  | 102.2 | 113  | 146.3 | 76.1 | 88.6 | 74.29 |
| LREE/HREE                        | 5.31 | 8.86 | 8.12 | 8.29 | 6.37 | 6.15  | 5.71 | 9.25  | 5.22 | 5.38  | 3.96 | 4.60 | 4.97  |
| La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub> | 4.80 | 10.1 | 9.46 | 10.0 | 5.67 | 5.59  | 5.09 | 11.6  | 5.23 | 5.18  | 3.67 | 4.61 | 3.39  |
| δEu                              | 0.58 | 0.76 | 0.72 | 0.92 | 0.61 | 0.64  | 0.65 | 0.65  | 0.57 | 0.63  | 0.65 | 0.60 | 0.60  |
| δCe                              | 0.99 | 0.90 | 0.99 | 0.89 | 0.92 | 1.07  | 1.10 | 0.90  | 0.81 | 1.15  | 0.89 | 0.88 | 1.12  |

注:球粒陨石参数数据 TAYLOR 等(1985),δEu=2×Eu<sub>N</sub>/(Sm<sub>N</sub>+Gd<sub>N</sub>);δCe =2×Ce<sub>N</sub>/( La<sub>N</sub>+ Pr<sub>N</sub>)。

物中富集的趋势(赵英利等,2012)。此外,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>与TiO<sub>2</sub>、MgO呈正相关关系(0.792和0.857),反映主量元素的构成是铁镁质组分。

3.2 微量元素(含 REE)

样品的微量元素含量及标准化蜘蛛网图见表2和图4a。微量元素含量变化较大,大离子亲石元素Rb、Sr、Cs、Pb、U、Th和Ba的含量分别为 $29.7\times10^{-6}\sim65.5\times10^{-6}$ 、 $29.4\times10^{-6}\sim310\times10^{-6}$ 、 $1.1\times10^{-6}\sim3.03\times10^{-6}$ 、 $3.32\times10^{-6}\sim33.2\times10^{-6}$ 、 $0.85\times10^{-6}\sim2.59\times10^{-6}$ 、 $4.2\times10^{-6}\sim8.03\times10^{-6}$ 和 $79\times10^{-6}\sim500\times10^{-6}$ (均值为 $44.00\times10^{-6}$ 、 $135.32\times10^{-6}$ 、 $2.15\times10^{-6}$ 、 $14.00\times10^{-6}$ 、 $1.83\times10^{-6}$ 、 $5.93\times10^{-6}$ 和 $207.43\times10^{-6}$ )。大离子亲石元素显著亏损,与上地壳和后太古宙澳大利亚页岩(PAAS)明显不同(TAYLOR et al.,1985)。高场强元素Nb、Hf、Ta和Zr的含量分别为 $3.53\times10^{-6}\sim6.57\times10^{-6}$ 、 $2.49\times10^{-6}\sim5.72\times10^{-6}$ 、 $0.30\times10^{-6}\sim0.54\times10^{-6}$ 和 $93.7\times10^{-6}\sim220\times10^{-6}$ (均值为 $4.90\times10^{-6}$ 、 $3.74\times10^{-6}$ 、 $0.39\times10^{-6}$ 和 $141.28\times10^{-6}$ )。过渡金属元素Cr、Ni、V、Co和Sc的含量分别为 $13.2\times10^{-6}\sim71.9\times10^{-6}$ 、 $4.27\times10^{-6}\sim21.1\times10^{-6}$ 、 $14.1\times10^{-6}\sim59.9\times10^{-6}$ 、 $2.48\times10^{-6}\sim8.44\times10^{-6}$ 和 $2.52\times10^{-6}\sim12.4\times10^{-6}$ (均值为 $29.89\times10^{-6}$ 、 $9.84\times10^{-6}$ 、 $37.51\times10^{-6}$ 、 $5.13\times10^{-6}$ 和 $6.56\times10^{-6}$ )。过渡金属元素含量显著低于上地壳和PAAS。蛛网图上总体表现为“三峰四谷-平坦型”,以富集La、Zr、Rb、Hf和Pb,但亏损P、Ti、K、Ta和Nb为特征,微量元素标准化与上

地壳和PAAS分配模式相似(TAYLOR et al.,1985),反映其具有相似的物源。

稀土元素的化学数据特征和球粒陨石标准化图见表2和图4b。总体上,总稀土元素丰度值为 $45.51\times10^{-6}\sim146.34\times10^{-6}$ ,平均为 $91.39\times10^{-6}$ 。LREE/HREE值为3.96~9.25,平均值为6.32,反映LREE富集,HREE亏损;(La/Yb)<sub>N</sub>值为3.39~11.57,平均为6.49,反映稀土元素分馏程度较高;δEu值为0.57~0.96,平均为0.66,明显Eu负异常;δCe值为0.81~1.15,平均为0.97,呈弱负异常。球粒陨石标准化图反映轻稀土元素富集,重稀土元素相对平坦,δEu明显亏损,δCe异常较弱,分布模式呈现右倾,与典型的上地壳和PAAS分配模式图相似(TAYLOR et al.,1985),反映砂岩的成分来源于上地壳源区的岩石。

4 讨论

陆源碎屑岩的地球化学成分通常受源岩性质、风化再循环、搬运和沉积作用以及沉积后期的成岩和变质作用等各种地质因素的控制(TAYLOR et al.,1985;MCLENNAN et al.,1990,1991;CULLERS,2000;许德如等,2007)。因此,陆源碎屑岩的地球化学特征是反映其早期地壳演化过程、物质来源及构造环境的重要手段(COX et al.,1995;HOFMANN,2005;SUGITANI et al.,2006;柏道远等,2007;SUN et al.,2008;胡国辉等,2012)。陆源碎屑岩在迁移或交代溶解过程中化学成分变化不大,

表 3 康南组砂岩主量元素相关系数表  
Tab.3 Correlation coefficient of the major elements in Kangnan sandstones

| n=13                            | SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MnO   | MgO   | CaO    | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> |
|---------------------------------|------------------|------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------|-------|--------|-------------------|------------------|-------------------------------|
| SiO <sub>2</sub>                | 1.00             |                  |                                |                                 |       |       |        |                   |                  |                               |
| TiO <sub>2</sub>                | -0.514           | 1.00             |                                |                                 |       |       |        |                   |                  |                               |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | -0.555           | 0.721            | 1.00                           |                                 |       |       |        |                   |                  |                               |
| TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | -0.473           | 0.792            | 0.742                          | 1.00                            |       |       |        |                   |                  |                               |
| MnO                             | -0.837           | 0.097            | 0.093                          | 0.115                           | 1.00  |       |        |                   |                  |                               |
| MgO                             | -0.655           | 0.773            | 0.640                          | 0.857                           | 0.370 | 1.00  |        |                   |                  |                               |
| CaO                             | -0.768           | 0.023            | -0.090                         | -0.084                          | 0.937 | 0.231 | 1.00   |                   |                  |                               |
| Na <sub>2</sub> O               | -0.541           | 0.589            | 0.846                          | 0.496                           | 0.089 | 0.408 | -0.003 | 1.00              |                  |                               |
| K <sub>2</sub> O                | -0.191           | 0.012            | 0.356                          | 0.496                           | 0.094 | 0.223 | -0.100 | 0.185             | 1.00             |                               |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>   | -0.620           | 0.512            | 0.652                          | 0.495                           | 0.341 | 0.493 | 0.270  | 0.440             | 0.359            | 1.00                          |

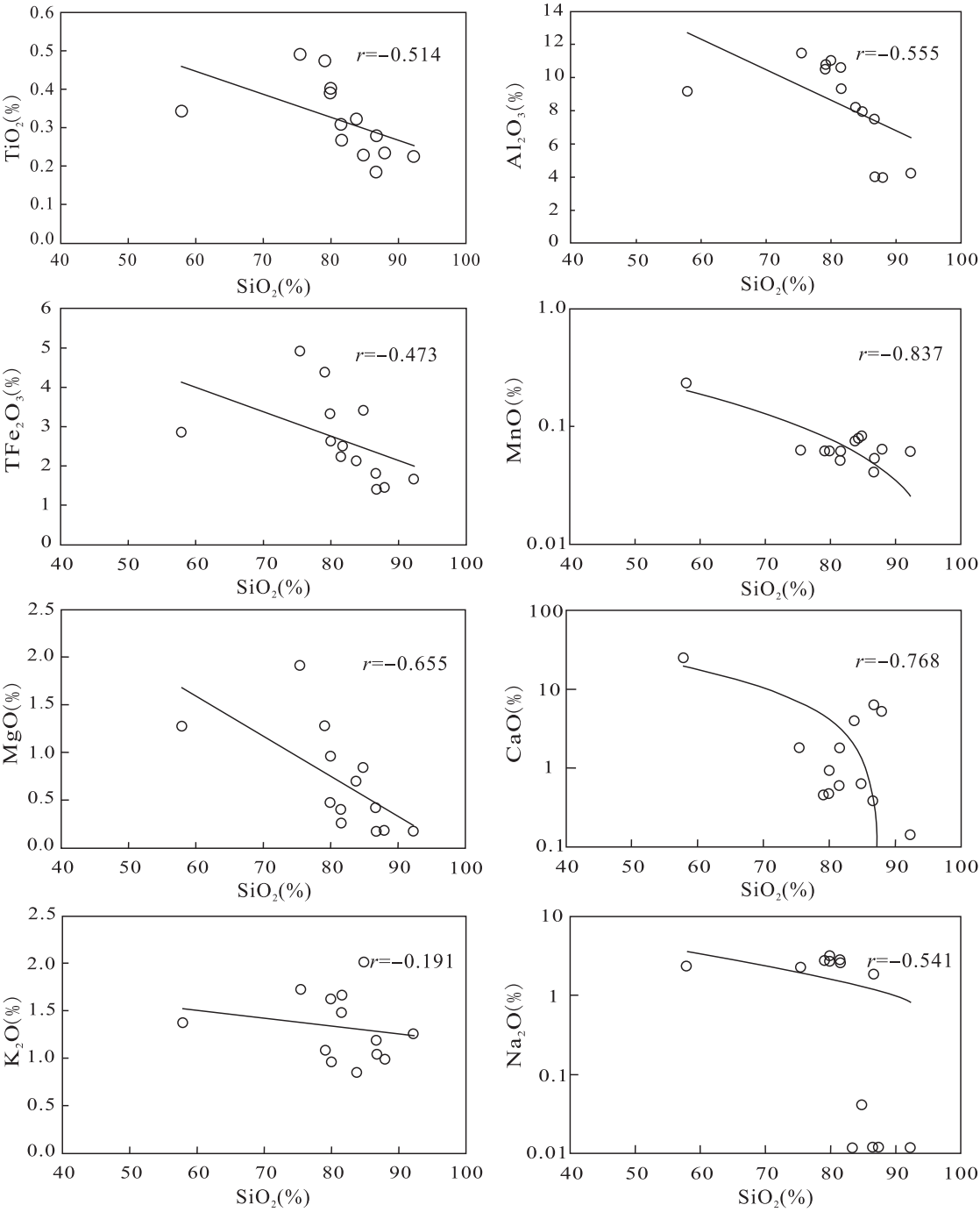


图 3 康南组砂岩岩套的 Harker 图解(据 BHATIA,1983)

Fig. 3 Harker major element variation diagrams of the sandstones from Kangnan Formation

尤其是微量元素具有较强的稳定性,可以用于反映物源区特征 (TAYLOR et al. ,1985;BHATIA et al. ,1986;ROLLINSON,1993);不同类型碎屑岩的主量元素含量的差异可以指示成岩的构造环境 (BHATIA,1985;ROSER et al. ,1986;MCLENNAN et al. ,1991,1993);沉积碎屑岩与其源岩中微

量元素的含量具有一致性,可用于判别源岩属性、沉积环境和构造背景等特征 (BHATIA,1983;ROSER et al. ,1986;TAYLOR et al. ,1985;MCLENNAN et al. ,1993;沈渭洲等,2009)。因此,在利用碎屑沉积岩地球化学特征进行源区岩化学成分、判定沉积构造环境时,必须对上述因素进行分析。

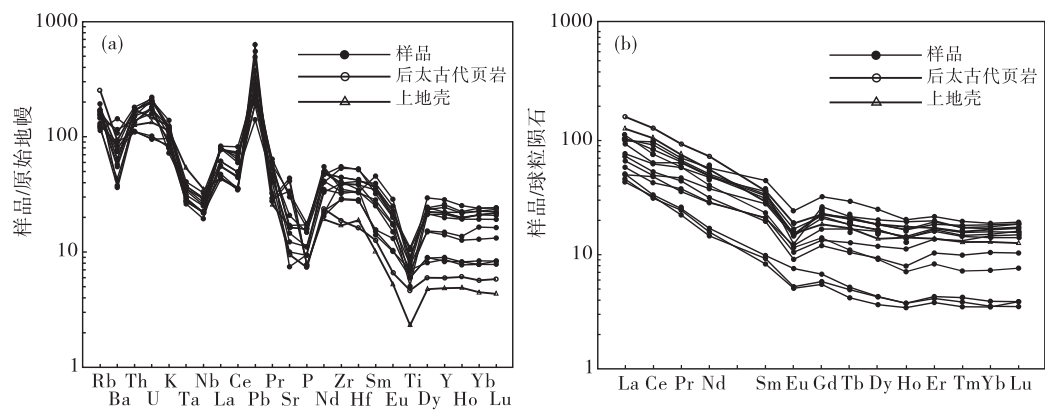


图 4 (a)康南组砂岩微量元素原始地幔标准化蛛网图和(b)稀土元素球粒陨石配分模式图(据 SUN et al. ,1989)

Fig. 4 (a)The primitive mantle-normalized spider diagram and (b)the chondrite-normalized REE patterns for sandstones from Kangnan Formation

4.1 源岩的风化特征

通过计算碱金属和碱土金属之间的关系可反映陆源碎屑岩的风化过程(NESBITT et al. ,1980; GU et al. ,2002)。康南组砂岩的 K - Rb( $r=0.88$ )和 K - Cs( $r=0.50$ )的相关系数为正相关(图 5),反映富 K 矿物遭受过风化作用(FENG et al. ,1990)。砂岩的 K - Sr( $r=-0.28$ )和 K - Ba( $r=-0.29$ )(图 5)之间为负相关关系,可能受制于离子交换作

用。例如,斜长石富集 Sr,在风化分解过程中导致 Sr 从源岩中析出,与黏土矿物中的 K 离子进行交换,造成 K 和 Sr 的负相关关系。

在风化过程中,斜长石比钾长石更容易分解蚀变,矿物中的 Na 离子比 K 离子更容易析出,导致长石类矿物发生黏土化、碱金属离子流失,以致矿物中  $K_2O/Na_2O$  值异常的高(王金平等, 2003)。

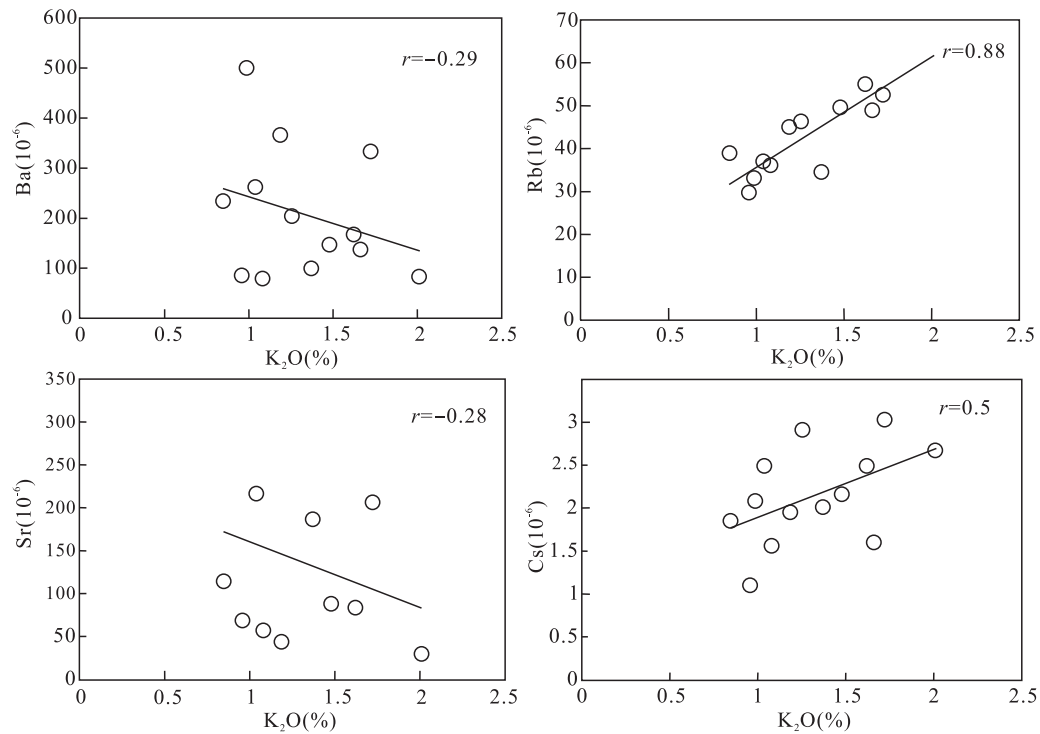


图 5 康南组砂岩的 K 与 Ba、Rb、Cs 和 Sr 元素关系图解(据 FENG et al. ,1990)

Fig. 5 K vs. Ba,Rb,Cs and Sr Plots of the sandstones from the Kangnan Formation

NESBITT et al. (1982) 认为可以把 CIA (Chemical index of alteration) 作为判别源区受化学风化程度强弱的一个化学指标, 并首次用于加拿大古元古代 Huronian 超群碎屑岩的研究 (NESBITT et al., 1989; FEDO et al., 1997)。通过研究认为在岩石风化过程中, 岩石的 CIA 值越高, 活泼的阳离子越容易随着地表流体迁移 (NESBITT et al., 1982)。前人通过 CIA 指数研究了中国不同地区冰期沉积物所遭受的化学风化及化学蚀变程度, 认为 CIA 值在 85~100 反映炎热、潮湿的亚热带条件下的强烈的风化程度; CIA 值在 65~85 反映温暖、湿润条件下中等风化程度; CIA 值在 50~65 反映寒冷、干燥的气候条件下低等的化学风化程度 (NESBITT et al., 1982, 1989, 1996; 丁海峰等, 2014)。另外, 考虑到新元古代后沉积再循环作用对物源成分的影响, 引入另一个参数, 即成分变异指数 (Index of compositional variability), 此参数用于判别碎屑岩是初次沉积的沉积物还是沉积再循环的沉积物。如果碎屑岩的 ICV 值大于 1, 表明其含有很少的黏土矿物, 反映首次沉积发生在活动的构造带内; 反之, 反映碎屑岩含有大量的黏土矿物, 表明沉积物经历过再循环或是在强烈的化学风化条件下首次沉积。本次样品的 CIA 值为 50.06~89.59, 个别小于 65, 反映大部分岩石受到寒冷、干燥的气候条件下低等的化学风化, 个别岩石受到中等风化; 样品的 ICV 值范围为 0.56~1.64, 大多数小于 1, 既反映了大多数岩石受到寒冷、干燥的气候条件下低等的化学风化, 小部分岩石受到中等风化, 又表明岩石经受过沉积再循环作用。

FEDO 等 (1995) 研究表明:  $\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO}^*) - \text{K}_2\text{O}$  三角图解不仅可以反映风化程度的变化趋势, 还反映了源岩的性质。在 A-CN-K 图解中 (图 6), 物源区新鲜的岩石的起点平行于 A-CN 边的理想趋势线 (图中实线所示), 而钾交代作用导致实际风化趋势线偏离理想趋势线 (图中虚线所示)。CIA 数据投影到 A-CN-K 图解上位于斜长石-钾长石连线与平均页岩之间, 而个别样品位于伊利石附近, 既说明样品总体处于低等风化阶段, 又反映了风化过程的实质是斜长石向伊利石和白云母等黏土矿物转化, 这与镜下观察到的绿泥石和绢云母蚀变情况一致。同时, 理想风化的趋势线与中线的交点也反映物源性质, 从图 6 中可以看出岩石的物源性质为上地壳长英质岩石。

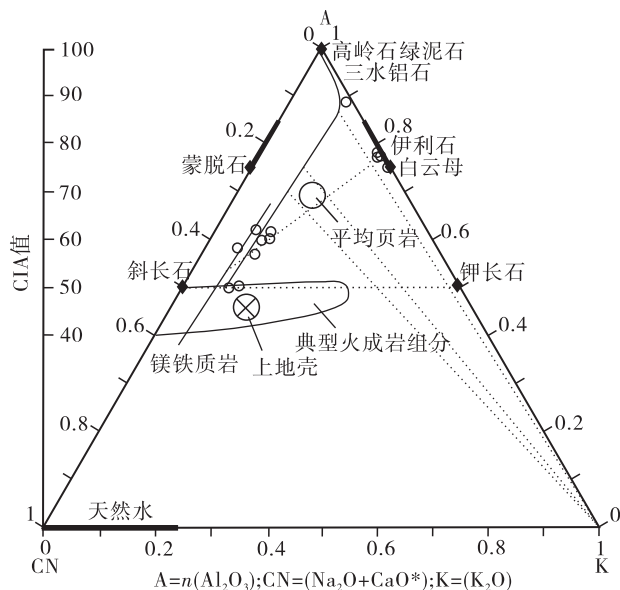


图 6 康南组砂岩的 A-CN-K 三角图解  
(据 FEDO et al., 1995)

Fig. 6 A-CN-K plots of analyzed Kangnan Formation sandstones

#### 4.2 物源区分析

碎屑砂岩是源岩的风化、搬运及沉积固结而形成, 其继承了源岩中的化学元素, 尤其是微量元素。因此, 影响碎屑砂岩中化学元素含量的主要因素在于其源岩中的丰度。碎屑砂岩的化学成分与源岩有关, 可以指示其的成岩物质来源 (CULLERS, 2000; SUN et al., 2013)。本次样品的数据分析表明: 本区砂岩的源岩是上地壳长英质岩石。其依据如下。

(1)  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  值是判别沉积物源区成分的有效方法 (GIRTYET et al., 1996)。当  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2 < 14$  时, 则反映其来源于铁镁质岩石; 当  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  值为 19~28 时, 反映物源为长英质岩石。本区砂岩的  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  值为 14.42~40.67, 平均值为 26.80, 大部分处于长英质岩石范围内, 反映砂岩成岩物质来源于长英质源区。

(2)  $\text{Cr}/\text{Zr}$  值也是区分长英质与铁镁质岩石源区 (WRONKIEWICZ et al., 1989) 另一参数。代表超铁镁-铁镁质组分的铬铁矿、橄榄石和辉石等矿物趋于富集 Cr 元素; 而代表长英质组分的锆石中富集 Zr 元素。本区砂岩总体显示较低的  $\text{Cr}/\text{Zr}$  值, 为 0.1~0.43, 均值为 0.22, 远远低于 1, 反映成岩物质来源于长英质源区。

(3)重矿物 Th 和 Sc 在沉积过程中的分异较小。Th 趋于富集在长英质岩石中,而 Sc 易于富集在铁镁质岩石中(CULLERS et al. ,1988)。本区砂岩的 Th /Sc 值为 0.59~1.67,均值为 1.05,略高于大陆岛弧的 0.85 和上地壳的 0.97(TAYLOR et al. ,1985),反映砂岩源区的铁镁质成分较少,反映成岩物质来源于上地壳的长英质源区。

(4)在  $\text{TiO}_2\text{--Ni}$  图解中(FLOYD et al. ,1989),投点落于长英质源区附近,远离铁镁质源区(图 7a)。在  $\text{La/Th--Hf}$  图解中(FLOYD et al. ,1987),

投点落于上地壳长英质源区和混合长英质-基性源区。反映本区砂岩以地壳中的长英质岩石为主,并伴有基性物质混入(图 7b)。在  $\text{Co/Th--La/Sc}$  图解中(FLOYD et al. ,1987),投点落于长英质火山岩附近,反映成岩物质以长英质为主(图 7c)。在  $\text{Th/Sc--La/Sc}$  图解上(TAYLOR et al. ,1985; CREASER et al. ,1997),投点落于上地壳的附近区域,且呈明显的负相关关系,反映源岩来自于上地壳成分(图 7d)。综上所述:成岩物质主要来源于上地壳长英质源区,可能有基性物质的混入。

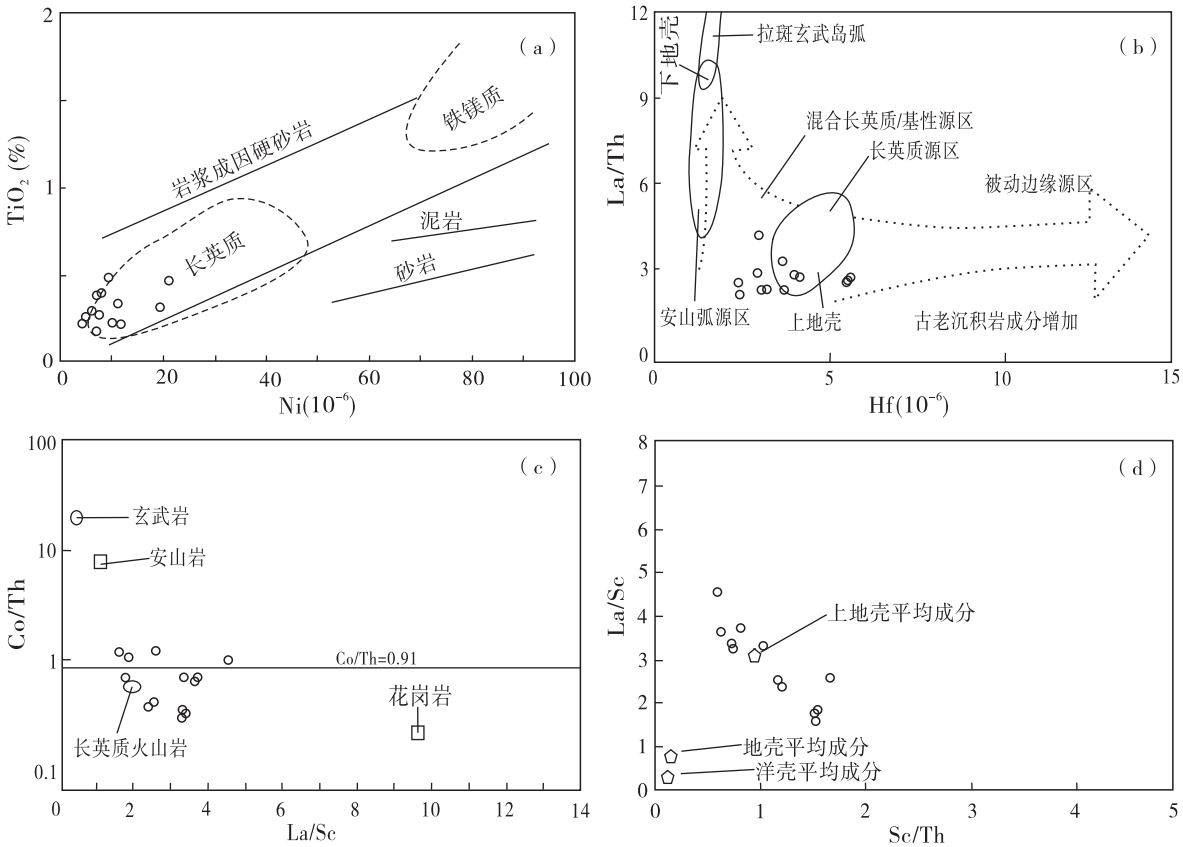


图 7 康南组砂岩物源区特征判别图解  
(a 据 FLOYD et al. ,1989;b,c 据 FLOYD ET AL. ,1987;d 据 CREASER et al. ,1997)  
Fig. 7 Provenance characteristic discrimination diagrams of the sandstones from the Kangnan Formation

4.3 物源区构造背景分析

尽管砂岩的化学成分受风化作用、变质作用和成岩作用的影响等多种地质因素的影响,但仍然可以有效地用于沉积盆地构造环境判别(GU et al. ,2002)。表 4 为不同构造背景下的砂岩成分(BHATIA,1983,1985;BHATIA et al. ,1986)。通过与不同构造背景下砂岩成分的对比以及主微量元

素图解,认为本区源岩的构造背景以大陆岛弧为主,兼有被动大陆边缘特征。其证据如下。

(1)砂岩样品的主量元素  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})$  的含量和比值与被动大陆边缘相近;而微量元素 Th/U、La/Sc、Th/Sc、Rb/Sr 和 Ba/Sr 值(分别为 3.46、2.88、1.05、0.43、2.09)与大陆岛

弧相近(分别为 4.6、1.82、0.85、0.65、3.55)(表 4),反映砂岩形成的构造背景具有以大陆岛弧为主兼有被动大陆边缘性质。

(2)大陆岛弧构造背景源区是切割的岩浆弧沉积物,稀土总量和 $(La/Yb)_N$ 值较高,弱的 Eu 负异常;大洋岛弧构造背景源区为未切割的岩浆弧沉积物,稀土总量低,轻稀土元素呈现弱富集,没有 Eu 负异常;而安第斯型被动大陆边缘、活动大陆边缘、克拉通盆地和地台的构造背景源区为克拉通内构造高地和隆起基地的沉积物,稀土总量和 $(La/Yb)_N$ 值高, Eu 表现为明显负异常(刘俊海等,2003)。另外,在大陆边缘附近, Ce 负异常不明显或者不出现(0.84~0.93)或甚至出现正异常;而在洋中脊附近, Ce 负异常显著(0.28±)。康南组砂岩的稀土总量

较高, $\Sigma REE$  为  $45.51 \times 10^{-6} \sim 146.3 \times 10^{-6}$ ,平均为  $91.39 \times 10^{-6}$ ; LREE/HREE 为 6.32,接近大陆岛弧; $(La/Yb)_N$ 值平均为 6.49,明显的 Eu 负异常, $\delta Eu$  均值为 0.66, Ce 负异常不明显,为 0.97(表 4)。样品的稀土元素特征符合大陆岛弧沉积物的特征,从稀土元素特征角度分析,康南组砂岩应该是大陆岛弧沉积。

(3)不同构造背景下形成的砂岩-泥岩的主量元素  $K_2O/Na_2O$  值和  $SiO_2$  的含量不同,ROSER 和 KORSCH 把沉积盆地划分为大陆岛弧、活动大陆边缘和被动大陆边缘 3 个类型。在  $SiO_2 - K_2O/Na_2O$  图解中(图 8a),康南组砂岩投点落在活动大陆边缘和被动大陆边缘。反映碎屑砂岩与活动大陆边缘和被动大陆边缘有关。

表 4 北羌塘三叠系砂岩与不同构造环境砂岩地球化学参数对比表  
Tab. 4 Geochemical parameter comparison of the sandstones between the Triassic North Qiangtang and the sandstone in other various tectonic settings

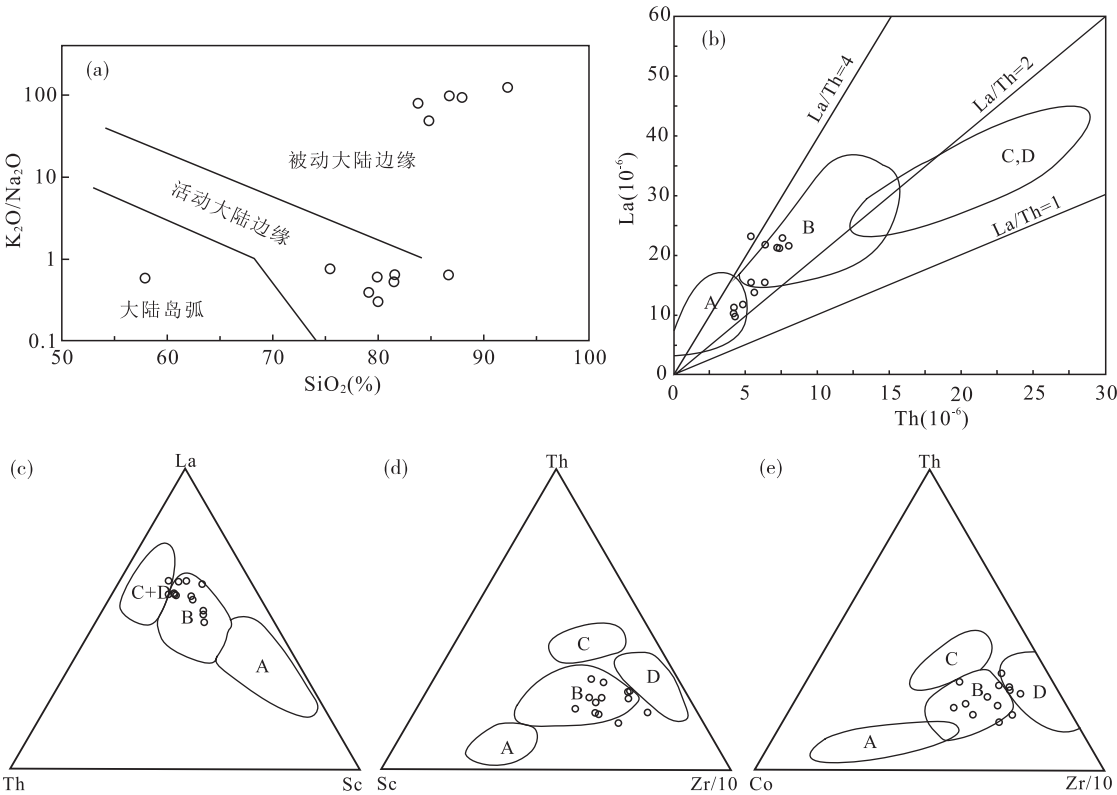
| 参数                                                       | 本文样品(13) | 活动大陆边缘 | 被动大陆边缘 | 大陆岛弧  | 大洋岛弧  | PAAS  | UPP  |
|----------------------------------------------------------|----------|--------|--------|-------|-------|-------|------|
| SiO <sub>2</sub>                                         | 81.36    | 73.86  | 81.95  | 70.69 | 58.83 | 62.8  | 66   |
| TiO <sub>2</sub>                                         | 0.32     | 0.46   | 0.49   | 0.64  | 1.06  | 1.0   | 0.5  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                           | 8.38     | 12.89  | 8.41   | 14.04 | 17.11 | 18.9  | 15.2 |
| TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +MgO                     | 3.37     | 4.63   | 2.89   | 6.79  | 11.73 | 8.7   | 6.7  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>         | 0.11     | 0.18   | 0.1    | 0.20  | 0.29  | 0.3   | 7.15 |
| K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O                       | 0.56 *   | 0.99   | 1.6    | 0.61  | 0.39  | 3.08  | 0.23 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /(Cao+ Na <sub>2</sub> O) | 2.65 *   | 2.56   | 4.15   | 2.24  | 1.72  | 7.56  | 0.87 |
| La                                                       | 16.92    | 37     | 39     | 27    | 8.2   | 38    | 30   |
| Ce                                                       | 35.32    | 78     | 85     | 59    | 19.4  | 80    | 64   |
| ΣREE                                                     | 91.39    | 186    | 210    | 146   | 58    | 161   | 146  |
| LREE/HREE                                                | 6.32     | 9.1    | 8.5    | 7.7   | 3.8   | —     | 9.47 |
| La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>                         | 6.49     | 12.3   | 15.9   | 11    | 4.2   | 9.2   | 9.2  |
| δEu                                                      | 0.66     | 0.6    | 0.55   | 0.8   | 1.04  | 0.64  | 0.65 |
| Th/U                                                     | 3.46     | 4.8    | 5.6    | 4.6   | 2.1   | 4.1   | 3.8  |
| La/Sc                                                    | 2.88     | 4.55   | 6.25   | 1.82  | 0.55  | 2.37  | 2.73 |
| Th/Sc                                                    | 1.05     | 2.59   | 3.06   | 0.85  | 0.15  | 1.1   | 0.97 |
| Rb/Sr                                                    | 0.43     | 0.89   | 1.19   | 0.65  | 0.05  | 0.8   | 0.32 |
| Ba/Sr                                                    | 2.09     | 3.8    | 4.7    | 3.55  | 0.95  | 3.25  | 1.57 |
| Ti/Zr                                                    | 13.52    | 15.3   | 6.74   | 19.7  | 56.8  | 28.55 | 15.8 |

注:构造特征参数引自 BHATIA(1983);PAAS 和 UPP 参数引自 TAYLOR et al. ,(1985)。

(4)BHATIA 等(1981,1983,1985,1986)的研究认为,Nb、Y、Sc、La、Th、Zr、Co 及 Ti 等微量元素与构造环境之间具有一定的关系,提出通过微量元素图解区分大洋岛弧、大陆岛弧、活动大陆边缘和被动大陆边缘等构造环境。使用 La-Th 双变量图解及 La-Th-Sc, Th-Sc-Zr/10 和 Th-Co-Zr/10 三变量图解对样品数据进行投点。由图 8 可知,La-Th 投影图中投点落在大陆岛弧和大洋岛弧区域(图 8b)。La-Th-Sc 投影图中投点落在大陆岛弧内(图 8c);Th-Sc-Zr/10 投影图中投点大多数落入大陆岛弧区,仅 2 个样品部分落在大陆岛弧边缘和被动大陆边缘夹角区域(图 8d);Th-Co-Zr/10 图解中投点落在大陆岛弧内,个别投点落于被动大陆边缘(图 8e)。综上所述,样品的主微量元素构造判别结果反映本区康物源区构造背景以大陆岛弧为主,被动大陆边缘构造背景次之。

早期资料显示:本区泥盆纪一早二叠世时期整体处于伸展状态,为伸展背景下(即被动大陆边缘)

的变深沉积,尤其是在石炭一早二叠世时期扩张达到高峰,导致堆积大量的浊积岩和火山岩;随着构造演化的持续进行,羌北北侧的可西里造山带向南逆冲、碰撞,形成可可西里-金沙江缝合带,进而形成典型的前陆盆地(边千韬等,1993;冯兴雷等,2010)。缝合带形成的过程又是构造背景演化的过程,不同地段的蛇绿岩中伴生富含放射虫的硅质岩,其放射虫时代为石炭一早二叠世,反映蛇绿岩在石炭一早二叠世之前形成,晚二叠世至三叠纪砂岩不整合覆盖在蛇绿岩之上(边千韬等,1993),推测“洋盆”应闭合于早二叠世末。沉积学原理反映三叠系康南组物源区应早于其时代或同时代期的地层,推断本组样品应来源于大陆岛弧或被动大陆边缘。笔者运用地球化学方法判定康南组砂岩源区构造应为大陆岛弧背景,兼有被动大陆边缘构造背景特征,与前人的研究结果相一致,佐证了地球化学分析结果的正确性,从沉积学方面为北羌塘盆地早三叠世以前的古构造演化提供依据。



A. 大洋岛弧; B. 大陆岛弧; C. 活动大陆边缘; D. 被动大陆边缘

图 8 康南组砂岩构造背景判别图(据 BHATIA et al., 1986)

Fig. 8 Tectonic setting discrimination plots of the sandstones from the Kangnan Formation

## 5 结论

(1)本区砂岩样品的成分变异指数(ICV)、化学蚀变指数(CIA)以及A-CN-K图解反映其成岩物质来源于不成熟物源区,形成环境相对活动,岩石经受过沉积再循环作用,经历过低等至中等的化学风化作用。

(2)本区砂岩样品的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值与上地壳的长英质物质组分相似, $\text{Ba}/\text{Sc}$ 、 $\text{Ba}/\text{Sr}$ 和 $\text{Rb}/\text{Sr}$ 等值与上地壳相似,在 $\text{TiO}_2-\text{Ni}$ 、 $\text{Hf}-\text{La}/\text{Th}$ 和 $\text{La}/\text{Sc}-\text{Co}/\text{Th}$ 图解上,投影点主要落在长英质岩石源区内,反映了砂岩物源来自上地壳,以长英质岩石为主。

(3)本区砂岩样品的 $\text{La}/\text{Sc}$ 、 $\text{Th}/\text{Sc}$ 、 $\text{Th}/\text{U}$ 、 $\text{Rb}/\text{Sr}$ 及 $\text{Ba}/\text{Sr}$ 值和 $\Sigma\text{REE}$ 、 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 、 $\delta\text{Eu}$ 与大陆岛弧相似。 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{La}-\text{Th}$ 、 $\text{La}-\text{Th}-\text{Sc}$ 、 $\text{Th}-\text{Sc}-\text{Zr}/10$ 、和 $\text{Th}-\text{Co}-\text{Zr}/10$ 图解表明,本区砂岩物源区的构造背景以大陆岛弧为主,也可能存在类似被动大陆边缘构造背景。通过运用地球化学方法判定的康南组沉积物源区构造与前人的研究结果相一致,从沉积学方面为北羌塘盆地早三叠世以前的古构造演化提供依据。

## 参考文献(References):

白云山,李莉,牛志军,等.羌塘中部各拉丹冬一带鄂尔陇巴组火山岩特征及其构造环境[J].地球学报,2005,26(2):113-120.

BAI Yunshan, LI Li, NIU Zhijun, et al. Characteristics and Tectonic Setting of Eerlongba Formation Volcanic Rocks in Geladandong Area of Central Qiangtang[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2005, 26(2): 113-120.

柏道远,周亮,王先辉,等.湘东南南华系—寒武系砂岩地球化学特征及对华南新元古代—早古生代构造背景的制约[J].地质学报,2007,81(6):755-771.

BAI Daoyuan, ZHOU Liang, WANG Xianhui, et al. Geochemistry of Nanhuan-Cambrian Sandstones in South-eastern Hunan, and Its Constraints on Neoproterozoic-Early Paleozoic Tectonic Setting of South China[J]. Acta Geological Sinica, 2007, 81(6): 755-771.

边千韬,沙金庚,郑祥身.西金乌兰晚二叠—早三叠世石英砂岩及其大地构造意义[J].地质科学,1993,28(4):

327-335.

BIAN Qiantao, SHA Jingen, ZHENG Xiangshen. The Late Permian-Early Triassic beach-subfacies quartzose sandstone in the Xi Jinulan area and its Tectonic Significance [J]. Scientia Geologica Sinica, 1993, 28(4): 327-335.

丁海峰,马东升,姚春彦,等.新疆阿克苏地区新元古代冰成沉积地球化学研究[J].地球化学,2014,43(3): 224-237.

DING Haifeng, MA Dongsheng, YAO Chunyan, et al. A geochemistry study on Neoproterozoic glaciogenic sediments in Aksu area, Xinjiang[J]. Geochimica, 2014, 43(3): 224-237.

冯兴雷,付修根,谭富文,等.北羌塘盆地沃若山剖面上三叠统土门格拉组沉积岩地球化学特征与构造背景分析[J].现代地质,2010,24(5):910-918.

FENG Xinglei, FU Xiugen, TAN Fuwen, et al. Geochemical Characteristic and Tectonic Significance of Upper Triassic Tumengela Formation in Woruo Mountains, North Qiangtang Basin[J]. Geoscience, 2010, 24(5): 910-918.

和钟铨,李才,杨德明,等.羌塘盆地三叠纪岩相古地理及构造控制[J].古地理学报,2002,4(4):9-18.

HE Zhonghua, LI Cai, YANG Deming, et al. Lithofacies palaeogeography and tectonic control of the Triassic Qiangtang Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2002, 4(4): 9-18.

胡国辉,周艳艳,赵太平.河南嵩山地区元古宙五佛山群沉积岩的地球化学特征及其对物源区和构造环境的制约[J].岩石学报,2012,28(11):3692-3704.

HU Guohui, ZHOU Yanyan, ZHAO Taiping. Geochemistry of Proterozoic Wufoshan Group sedimentary rocks in the Songshan area, Henan province: Implications for provenance and tectonic setting[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(11): 3692-3704.

黄继钧.藏北羌塘盆地构造特征及演化[J].中国区域地质,2001,20(2):178-186.

HUANG Jijun. Tectonic characteristics and evolution of the Qiangtang basin[J]. Regional Geology of China, 2001, 20(2): 178-186.

李才,程立人,于介江.中华人民共和国区域地质调查报告:玛依岗日幅 I45C003002[R].吉林:吉林大学地质调查研究院,2003,53-58.

刘俊海,杨香华,于水,等.东海盆地丽水凹陷古新统沉积岩的稀土元素地球化学特征[J].现代地质,2003,17(4): 421-427.

LIU Junhai, YANG Xianghua, YU Shui, et al. The REE

- Geochemical Characteristics of Paleocene-Eocene in the Lishui sag of the Donghai basin[J]. *Geoscience*, 2003, 17(4):421-427.
- 刘勇,曹春潮,吕金梅. 藏北羌塘盆地演化初探[J]. 断块油气田,1998,5(5):6-12.
- LIU Yong, CAO Chunchao, LÜ Jinmei. Tectonic Evolution in Qiangtang Basin of Northern Tibet[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field* 1998,5(5):6-12,22.
- 沈渭洲,舒良树,向磊,等. 江西井冈山地区早古生代沉积岩的地球化学特征及其对沉积环境的制约[J]. 岩石学报,2009,25(10):2442-2458.
- SHEN Weizhou, SHU Liangshu, XIANG Lei, et al. Geochemical characteristics of Early Paleozoic sedimentary rocks in the Jinggangshan area, Jiangxi Province and the constraining to the sedimentary environment[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009,25(10):2442-2458.
- 屈李华,刘喜方,李金锁,等. 北羌塘三叠系康鲁组沉积岩地球化学特征及其物源区和构造背景分析[J]. 现代地质,2015,29(04):789-803.
- QU Lihua, LIU Xifang, LI Jinsuo, et al. Geochemical Characteristics of Sedimentary Rocks from the Triassic Kanglu Formation, North Qiangtang Basin( Tibet): Implications for Provenance and Tectonic Setting[J]. *Geoscience*, 2015,29(04):789-803.
- 王成善,伊海生,李勇,等. 西藏羌塘盆地地质演化与油气远景评价[M]. 北京:地质出版社,2001,86-128.
- WANG Chengshan, YI Haisheng, LI Yong, et al. Geological Evolution and Hydrocarbon prospect Evaluation in Qiangtang Basin of Tibet [M]. Beijing: Publishing House, 2001,86-128(in chinese).
- 王剑,付修根,陈文西,等. 藏北羌塘盆地晚三叠世古风化壳地质地球化学特征及其意义[J]. 沉积学报,2007,25(4):487-494.
- WANG Jian, FU Xiugen, CHEN Wenxi, et al. The Late Triassic Paleo-weathering Crust in the Qiangtang Basin, Northern Tibet: geology, geochemistry and significance [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(4):487-494.
- 王剑,谭富文,王小龙,等. 藏北羌塘盆地早侏罗世-中侏罗世早期沉积构造特征[J]. 沉积学报,2004,22(2):198-205.
- WANG Jian, TAN Fuwen, WANG Xiaolong, et al. The Sedimentary and Tectonic Characteristics of Qiangtang Basin in the Early Jurassic in Northern Xizang( Tibet) [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004,22(2):198-205.
- 王剑. 青藏高原油气资源战略选区调查与评价[M]. 北京:地质出版社,2009,222-223.
- WANG Jian. Strategic selection and Evaluation of oil and gas resources in Qinghai-Tibet Plateau [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009, 222-223 (in chinese).
- 王金平,闵茂中,陈宏斌,等. 伊犁盆地水西沟群岩石学和地球化学特征[J]. 铀矿地质,2003,19(1):8-15.
- WANG Jinping, MIN Maozhong, CHEN Hongbin, et al. Petrological and geochemical characteristics of Shuixigou Group in Yili basin[J]. *Uranium Geology*, 2003,19(1):8-15.
- 夏林圻,李向民,马中平,等. 青藏高原新生代火山作用与构造演化[J]. 西北地质,2010,43(01):1-25.
- XIA Linqi, LI Xiangmin, MA Zhongping, et al. Cenozoic Volcanism and Tectonic Evolution on the Tibetan Plateau[J]. *Northwestern Geology*, 2010,43(01):1-25.
- 许德如,马驰, B. C. Nonna, 等. 海南岛西北部邦溪地区奥陶纪火山-碎屑沉积岩岩石学、矿物学和地球化学:源区及构造环境暗示[J]. 地球化学,2007,36(1):11-26.
- XU Deru, MA Chi, B. C. Nonna, et al. Petrological, mineralogical and geochemical characteristics of Ordovician volcanic-clastic sedimentary rocks in Bangxi area, Northwest Hainan Island, South China: Implications for provenance and tectonic setting [J]. *Geochimica*, 2007,36(1):11-26.
- 赵英利,刘永江,韩国卿,等. 大兴安岭中南段二叠纪砂岩主要元素地球化学特征及物源区构造环境的判别[J]. 吉林大学学报,2012,42(2):285-297.
- ZHAO Yingli, LIU Yongjiang, HAN Guoqing, et al. Geochemical Characteristics of Major Elements in the Permian Sandstones from the Central and Southern Great Xing'an Ranges and Discriminations on Their Tectonic Environment of the Provenance[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2012,42(2):285-297.
- AKARISH A I M, EL-GOHARY A M. Petrography and geochemistry of lower Paleozoic sandstones, East Sinai, Egypt: Implications for provenance and tectonic setting [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2008, 52(2):43-54.
- BHATIA M B, TAYLOR S R. Trace-element geochemistry and sedimentary provinces: a study from the Tasman Geosynclines, Australia [J]. *Chemical Geology*, 1981, 33:115-125.
- BHATIA M R, CROOK K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. *Contributions to mineralogy and*

- petrology, 1986, 92(2):181-193.
- BHATIA M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones[J]. The Journal of Geology, 1983, 91(6): 611-627.
- BHATIAM R. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: provenance and tectonic control[J]. Sedimentary Geology, 1985, 45(1): 97-113.
- CAMPOS Alvarez N O, ROSER B P. Geochemistry of black shales from the Lower Cretaceous Paja Formation, Eastern Cordillera, Colombia: Source weathering, provenance, and tectonic setting[J]. Journal of South American Earth Sciences, 2007, 23(4): 271-289.
- CHU M F, CHUNG S L, SONG B, et al. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on the Mesozoic tectonics and crustal evolution of southern Tibet[J]. Geology, 2006, 34(9): 745-748.
- COX R, LOWE D R, CULLERS R L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(14): 2919-2940.
- CREASER R A, ERDMER P, STEVENS R A, et al. Tectonic affinity of Nisutlin and Anvil assemblage strata from the Teslin tectonic zone, northern Canadian Cordillera: Constraints from neodymium isotope and geochemical evidence[J]. Tectonics, 1997, 16(1): 107-121.
- CULLERS R L, BASU A, SUTTNER L J. Geochemical signature of provenance in sand-size material in soils and stream sediments near the Tobacco Root batholith, Montana, USA [J]. Chemical Geology, 1988, 70(4): 335-348.
- CULLERS R L, PODKOVYROV V N. Geochemistry of the Mesoproterozoic Lakhanda shales in southeastern Yakutia, Russia: Implications for mineralogical and provenance control, and recycling[J]. Precambrian Research, 2000, 104(1): 77-93.
- CULLERS R L. The chemical signature of source rocks in size fractions of Holocene stream sediment derived from metamorphic rocks in the wet mountains region, Colorado, USA [J]. Chemical Geology, 1994a, 113(3): 327-343.
- CULLERS R L. The controls on the major and trace element variation of shales, siltstones, and sandstones of Pennsylvanian-Permian age from uplifted continental blocks in Colorado to platform sediment in Kansas, USA [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994b, 58(22): 4955-4972.
- CULLERS R L. The controls on the major and trace element evolution of shales, siltstones and sandstones of Ordovician to Tertiary age in the Wet Mountains region, Colorado, USA [J]. Chemical Geology, 1995, 123(1): 107-131.
- CULLERS R L. The geochemistry of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian-Permian age, Colorado, USA: implications for provenance and metamorphic studies[J]. Lithos, 2000, 51(3): 181-203.
- DAS B K, HAAKE B G. Geochemistry of Rewalsar Lake sediment, Lesser Himalaya, India: implications for source-area weathering, provenance and tectonic setting [J]. Geosciences Journal, 2003, 7(4): 2-312.
- FEDO C M, NESBITT H W, YOUNG G M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance[J]. Geology, 1995, 23(10): 921-924.
- FEDO C M, YOUNG G M, NESBITT H W. Paleoclimatic control on the composition of the Paleoproterozoic Serpent Formation, Huronian Supergroup, Canada: a greenhouse to icehouse transition[J]. Precambrian Research, 1997, 86: 201-223.
- FENG R, KERRICH R. Geochemistry of fine-grained clastic sediments in the Archean Abitibi greenstone belt, Canada: Implications for provenance and tectonic setting[J]. 1990, 54(4): 1061-1081.
- FLOYD P A, LEVERIDGE B E. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones[J]. Journal of the Geological Society, London, 1987, 144(4): 531-542.
- FLOYD P A, WINCHESTER J A, PARK R G. Geochemistry and tectonic setting of Lewisian clastic metasediments from the early Proterozoic Loch Maree Group of Gairloch, NW Scotland [J]. Precambrian Research, 1989, 45(1): 203-214.
- GABO J A S, DIMALANTA C B, ASIO M G S, et al. Geology and geochemistry of the clastic sequences from Northwestern Panay (Philippines): Implications for provenance and geotectonic setting[J]. Tectonophysics, 2009, 479(1): 111-119.
- GIRTY G H, RIDGE D L, KNAACK C, et al. Provenance and depositional setting of Paleozoic chert and argillite,

- Sierra Nevada, California[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1996, 66(1):107-118.
- GU X X, LIU J M, ZHENG M H, et al. Provenance and tectonic setting of the Proterozoic turbidites in Hunan, South China: geochemical evidence[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2002, 72(3):393-407.
- HOFMANN A. The geochemistry of sedimentary rocks from the Fig Tree Group, Barberton greenstone belt: Implications for tectonic, hydrothermal and surface processes during mid-Archaean times[J]. *Precambrian Research*, 2005, 143(1):23-49.
- JAFARZADEH M, HOSSEINI-BARZI M. Petrography and geochemistry of Ahwaz Sandstone Member of Asmari Formation, Zagros, Iran; Implications on provenance and tectonic setting [J]. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 2008, 25(2):247-260.
- MCLENNAN S M, HEMMING S R, TAYLOR S R, et al. Early Proterozoic crustal evolution; Geochemical and Nd - Pb isotopic evidence from metasedimentary rocks, southwestern North America[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta; Journal of the Geochemical Society and the Meteoritical Society*, 1995, 59(6):1153-1177.
- MCLENNAN S M, HEMMING S, MCDANIEL D K, et al. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics[J]. *Geological Society of America Special Papers*, 1993, 284:21-40.
- MCLENNAN S M, TAYLOR S R, MCCULLOCH M T, et al. Geochemical and Nd - Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: Crustal evolution and plate tectonic associations [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54(7):2015-2050.
- MCLENNAN S M, TAYLOR S R. Sedimentary rocks and crustal evolution: Tectonic setting and secular trends[J]. *The Journal of Geology*, 1991, 99(1):1-21.
- NESBITT H W, MARKOVICS G, PRICE R C. Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, 44(11):1659-1666.
- NESBITT H W, YONG G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 1982, 299(5885):715-717.
- NESBITT H W, YOUNG G M, McleNNan S M, et al. Effects of chemical weathering and sorting on the petrogenesis of siliciclastic sediments, with implications for provenance studies[J]. *The Journal of Geology*, 1996, 104(5):525-542.
- NESBITT H W, YOUNG G M. Formation and diagenesis of weathering profiles[J]. *The Journal of Geology*, 1989, 97:129-147.
- PETTIJOHN F. J, POTTER P. E, SIEVER R. Sand and Sandstone [J]. Springer-Verlag, New York. 1973: 46.
- ROLLINSON H R. Using Geochemical Data: Presentation, Interpretation ( Longman Geochemistry ) [ M ] . New York: Longman Publishing Group, 1993, 1-252.
- ROSE R B, KORSCH R J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO<sub>2</sub>-content and K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O ratio[J]. *Geol*, 1986, 94(5):635-651.
- SUGITANI K, YAMASHITA F, NAGAOKA T, et al. Geochemistry and sedimentary petrology of Archean clastic sedimentary rocks at Mt. Goldsworthy, Pilbara Craton, Western Australia; Evidence for the early evolution of continental crust and hydrothermal alteration [J]. *Precambrian Research*, 2006, 147(1):124-147.
- SUN W H, ZHOU M F, YAN D P, et al. Provenance and tectonic setting of the Neoproterozoic Yanbian Group, western Yangtze Block (SW China)[J]. *Precambrian Research*, 2008, 167(1):213-236.
- SUN L H, GUI H R, CHEN S. Geochemistry of sandstones from the Neoproterozoic Jinshanzhai Formation in northern Anhui Province, China: Provenance, weathering and tectonic setting[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2013, 32(1):95-103.
- SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42(1):313-345.
- TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The continental crust: its composition and evolution [M]. Oxford: Blackwell, 1985, 1-311.
- WRONKIEWICZ D J, KENT C C. Geochemistry and provenance of sediments from the Pongola Supergroup, South Africa; evidence for a 3.0 - Ga - old continental craton [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53(7):1537-1549.
- YIN A, HARRISON T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogeny[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2000, 28(1):211-280.
- ZHANG K J, ZHANG Y X, TANG X C, et al. Late Mesozoic tectonic evolution and growth of the Tibetan plateau prior to the Indo-Asian collision[J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 114(3):236-249.