

doi: 10.12029/gc20160409

冯兴雷, 付修根, 谭富文, 等. 北羌塘盆地沃若山地区早侏罗世雀莫错组砂岩地球化学特征与物源判别意义[J]. 中国地质, 2016, 43(4): 1227-1237.

Feng Xinglei, Fu Xiugen, Tan Fuwen, et al. Geochemical characteristics and tectonic significance of Early Jurassic Quemo Co Formation in Woruoshan area, north Qiangtang basin[J]. Geology in China, 2016, 43(4): 1227-1237(in Chinese with English abstract).

北羌塘盆地沃若山地区早侏罗世雀莫错组砂岩 地球化学特征与物源判别意义

冯兴雷^{1,2} 付修根^{1,2} 谭富文^{1,2} 宋春彦^{1,2} 陈文彬^{1,2}

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610082; 2. 国土资源部沉积盆地与油气资源重点实验室, 四川 成都 610082)

摘要: 出露于羌塘盆地沃若山地区的雀莫错组砂岩是北羌塘盆地早侏罗世的沉积物, 对研究早侏罗世沉积盆地的演化特征具有重要的意义。通过对其地球化学特征的分析研究, 结果表明该组砂岩为被动大陆边缘裂陷期的沉积产物, 岩性主要为岩屑砂岩, 岩石矿物成分主要在钾长石、斜长石、伊利石、绿泥石以及石英之间变化。化学风化作用指标(CIW)、化学蚀变作用指标(CIA)和A-CN-K图解, 反映该组砂岩的碎屑成分受到了强烈的风化环境, 并在风化过程中发生钾交代作用, 长石发生伊利石化。化学组分指标(ICI)表明岩石碎屑为近源的第一次旋回沉积物, 受沉积分选和再循环作用影响不大; A-CN-K图解还反映出砂岩碎屑源岩中斜长石含量高于钾长石含量, 主要在花岗岩和花岗闪长岩之间变化; 稀土元素特征表明该组砂岩具有同源性, 其成分主要受源区岩石成分控制, 为酸性火山岩类。

关键词: 砂岩; 元素地球化学; 稀土元素; 物源; 北羌塘盆地

中图分类号: P588.21^{2.3}; P534.52 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2016)04-1227-11

Geochemical characteristics and tectonic significance of Early Jurassic Quemo Co Formation in Woruoshan area, north Qiangtang basin

FENG Xing-lei^{1,2}, FU Xiu-gen^{1,2}, TAN Fu-wen^{1,2}, SONG Chun-yan^{1,2}, CHEN Wen-bin^{1,2}

(1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610082, Sichuan, China; 2. Key Laboratory for Sedimentary Basin and Oil and Gas Resources, Ministry of Land Resources, Chengdu 610082, Sichuan, China)

Abstract: Early Jurassic Quemo Co Formation is very important for studying the sedimentary evolution from the late Triassic to the early Jurassic in Qiangtang basin. Geochemistry and provenance characteristics of sandstones in the Quemo Co Formation of Woruoshan area were studied by analyzing the selected major element and trace element compositions. The results suggest that the sandstone deposited in the chasmic stage of the passive continental margin. The sandstones are the lithic sandstone which mainly consist of K-feldspar, plagioclase, illite, chlorite and quartz. The chemical index of weathering (CIW), the chemical index of alteration (CIA) parameters and the A-CN-K plot of the sandstones suggest that weathering of the elastic constituents has been

收稿日期: 2015-05-13; 改回日期: 2016-05-18

基金项目: 中国地质调查局羌塘盆地金星湖—隆鄂尼地区油气资源调查项目(DD20160159)资助。

作者简介: 冯兴雷, 男, 1982年生, 工程师, 石油地质专业; E-mail: xingleifeng@qq.com。

intense in the area, the elastic constituents of sandstones underwent K-metasomatism during weathering processes, illite replaced feldspar and perhaps the original kaolinite in the feldspar. The index of compositional variability (*ICI*) suggests that some sandstones contain first cycle materials. The A-CN-K diagram indicates that a high average plagioclase-to-K-feldspar ratio in the provenance, varying from granodiorite to granite. The REE characteristics suggest only one source of acid igneous rock for the sandstones in this area.

Key words: sandstone; element geochemistry; REE; provenance; north Qiangtang basin

About the first author: FENG Xing-lei, male, born in 1982, engineer, majors in petroleum geology; E-mail: xingleifeng@qq.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Program(No. DD20160159).

沉积地球化学是研究沉积盆地特征的重要方法之一,由于碎屑沉积岩包含了丰富的源区物质组成、构造环境及早期地壳生长演化的信息,其地球化学研究目前已经被广泛地应用于揭示和制约盆地充填物的源岩性质、大地构造环境、不同构造单元物质组成空间变化、盆地内沉积历史变化及其与盆地周边各构造单元之间的相互关系。砂岩和泥岩由于比较均匀且微量元素含量较高,已经成为碎屑沉积岩地球化学研究的首选对象^[1-3]。

在羌塘盆地中部沃若山地区,上三叠统那底岗日组火山碎屑岩之上角度不整合沉积了一套由陆相向海相过渡的紫红色碎屑岩地层,即雀莫错组。前人对该套地层的时代、古生态环境等进行过研究,认为是羌塘中生代盆地早期演化的产物,记录了羌塘中生代盆地由陆相向海相的转变过程^[4-8]。因此,本文通过对羌塘盆地沃若山地区早侏罗世雀莫错组砂岩常量元素、微量元素特征、元素比值特征等地球化学特征的研究,深入探讨了这套岩石的岩石学特征、物源特征、成因及形成环境,为恢复北羌塘盆地早侏罗世的大地构造背景提供一定的制约,对于正确认识羌塘中生代盆地早期演化具有重要的意义。

1 地质背景

藏北羌塘盆地位于特提斯构造域东段,中生代盆地面积约 $18 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。王剑等(2008)^[9]通过对中生代盆地演化初期充填的那底岗日组火山的研究,认为中生代早期羌塘盆地为裂谷型盆地。盆地分别以可可西里金沙江缝合带和班公湖怒江缝合带为界,由北羌塘凹陷(北羌塘次级盆地)、中央隆起带和南羌塘凹陷(南羌塘次级盆地)3部分组成^[10-11]。沃若山地区位于北羌塘凹陷南缘,中央隆起带北侧,东西两侧分别与那底岗日和石水河相邻在沃若山

地区,主要出露上三叠统土门格拉组、那底岗日组,下侏罗统雀莫错组,中侏罗统布曲组、夏里组以及第四系。下侏罗统雀莫错分布在沃若山背斜的两翼(图1),与下伏的那底岗日组的火山碎屑岩呈不整合接触,与上覆布曲组碳酸盐岩地层呈整合接触。本次研究所选取的地层剖面位于沃若山背斜南翼,主体岩性为一套紫红色、灰绿色的块状砂砾岩、细砂岩、粉砂岩和泥岩,砾石分选和磨圆一般,从沉积相的研究表明:早期为一套砾岩冲洪积相,之后为一套三角洲相碎屑岩,表现为一个向上变深的海侵序列,为裂谷盆地早期沉积物。

2 样品采集与测试

本次样品采集位置(图2),主要集中在雀莫错组一段,样品主要岩性为紫红色-灰绿色中-细粒的砂岩。采集12件样品,主量元素和微量元素分析均在中国核工业集团北京地质研究院完成。主量元素通过Phillip PW2404 X射线荧光光谱仪分析测试,微量元素的分析在Finnigan MAT制造,HR-ICP-MS(Element I)上进行,元素数据误差小于5%,重复样分析结果吻合,样品分析具有较高精度。分析结果见表1和表2。

3 岩石地球化学特征

通过分析雀莫错组砂岩中氧化物以及微量元素(包含稀土元素)含量的变化,对砂岩的化学成分、砂岩的类型、物源区的风化指标、砂岩化学组分指标、砂岩沉积分选及再循环和沉积物碎屑源岩来源等进行了全面的分析研究,综合说明砂岩形成环境、来源及气候特征。

3.1 砂岩化学成分及类型

砂岩的类型与其本身组成矿物和矿物的化学成分有密切的关系,研究区雀莫错组砂岩总体来看

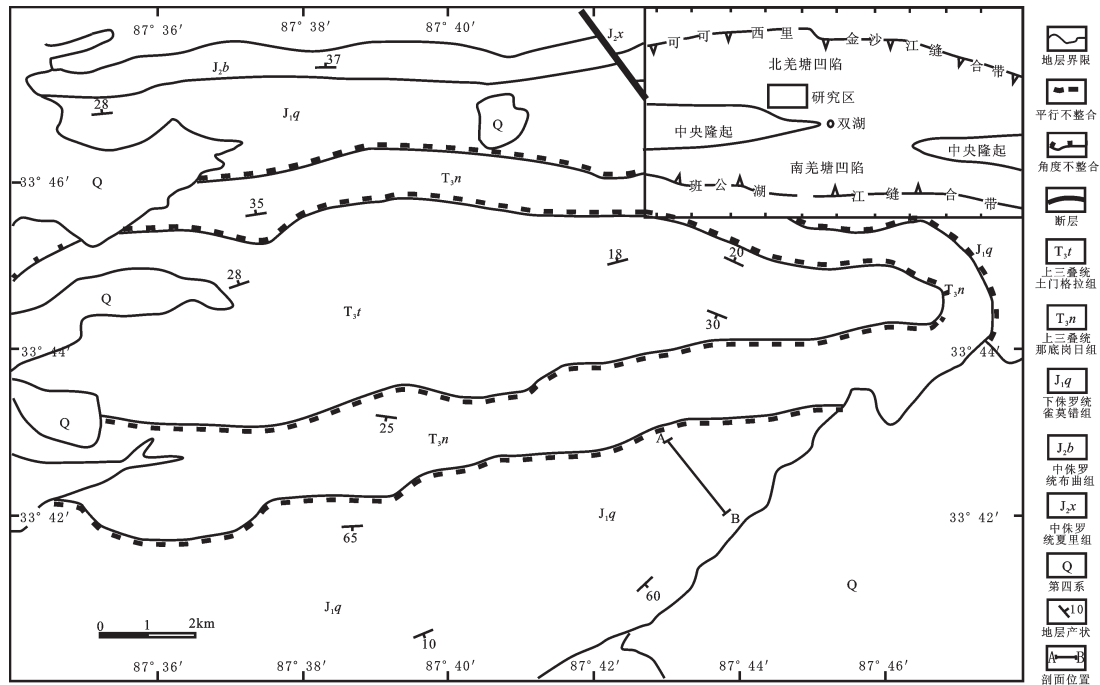


图1 沃若山地区地质图(据文献[9]修编)

Fig.1 Geological sketch map of Woruo Mountain (after reference [9])

SiO₂ 含量中等, 为 53.58%~58.36%, 平均值为 55.57%(表 1), 说明砂岩中石英或者富含硅质矿物(如长石等)含量较低, 岩石矿物成熟度不高; 而砂岩中 Al₂O₃ 的含量较高为 11.56%~13.23%, 平均值为 12.61%, 说明岩石富含云母、黏土矿物等富铝矿物。另外, 岩石中 CaO 的含量整体偏高为 7.66%~9.97%, 平均值为 8.79%, 这可能与雀莫错组上覆布曲组碳酸盐岩受后期的淋滤作用对下伏砂岩造成的侵染作用有关。

从沃若山地区雀莫错组砂岩 SiO₂-Al₂O₃ 图解分析^[12](图 3)可以看出: 砂岩中的 SiO₂ 和 Al₂O₃ 之间呈负相关关系, 岩石矿物成分主要在钾长石、斜长石、伊利石、绿泥石以及石英之间变化。而在包含方解石-石英、赤铁矿-磁铁矿、硅铝酸盐(黏土矿物和黑云母)-长石等砂岩各种组分端元的 Fe₂O₃-Al₂O₃ 图解上(图 4), 雀莫错组砂岩矿物类型主要分布与硅铝酸盐-长石端元之间, 表明砂岩中长石、黏土矿物含量很高, CaO 含量相对石英、和黏土矿物来说较低, 黏土矿物在砂岩成岩演化中起着重要的作用, 占主导地位。

根据 Pettijohn et al. (1972)^[13]用 Na₂O/K₂O 和 SiO₂/Al₂O₃ 做出的砂岩类型判别图版, 本文通过对雀莫错

砂岩的元素计算和投点(图 5), 发现砂岩类型主要为岩屑砂岩, 侧面上也反映了其近物源的沉积特征。

3.2 化学风化作用判别

目前经过大量学者的研究, 应用于判断沉积岩风化作用指标的主要有 A-CN-K 判别图、化学蚀变作用指标(CIA)和化学风化作用指标(CIW)。在进行这三种指标的计算过程中, 沉积物中的 CaO 主要指的是硅质矿物中的 Ca 元素含量, 为排除碳酸盐岩碎屑的输入和上覆碳酸盐岩地层的淋滤作用对实验样品中 Ca 元素含量的影响, 砂岩中碳酸盐矿物(方解石、白云石)和磷酸盐矿物(磷灰石)中的高含量 Ca 要事先除去。

沃若山地区雀莫错组上覆布曲组地层主要为碳酸盐岩, 为了排除后期淋滤作用的影响, 采样过程中尽量深挖, 采集新鲜样品; 而对于碎屑碳酸盐矿物的输入, 由于确定方解石和白云石的比例比较困难, 运用 Fedo 等给出的方法^[14], 无法有效去除碳酸盐中 Ca²⁺ 成分。所以在采用 Fedo 等的方法去除掉磷灰石中所含的 Ca²⁺ 后, 再采用 Bock 等提出的 CaO 校正方法进行 A-CN-K 判别图的绘制、CIA 和 CIW 值计算。假定 CaO^R 代表样品去除掉磷灰石后的 CaO 摩尔含量, 当 CaO^R>Na₂O 含量时, CaO* =

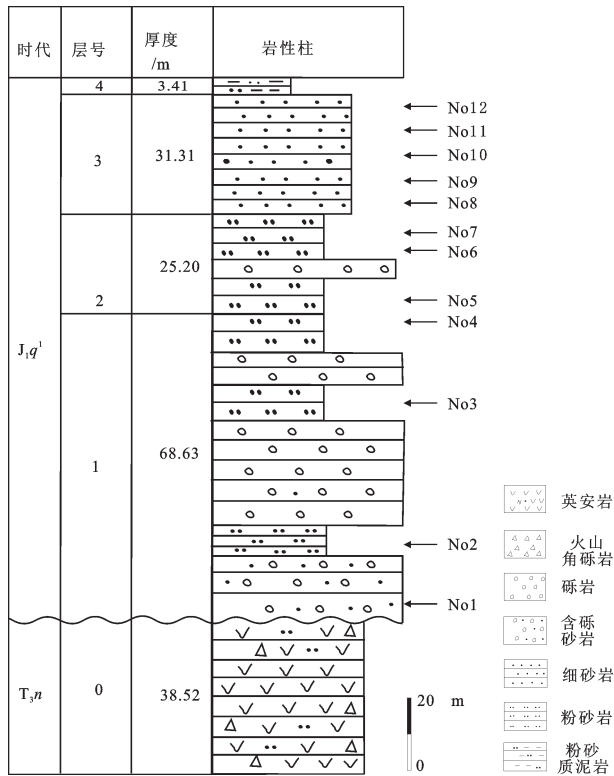


图2 研究区雀莫错组采样柱状图
Fig. 2 Columnar sections of the Quemo Co Formation, showing sampling locations

Na₂O; 当 CaO^R ≤ Na₂O 含量时, CaO* = CaO^R, 以此排除可能存在的碳酸盐矿物的影响。计算获得 *CIA* 和 *CIW* 值,并在 A-CN-K 三角图中投点。

3.2.1 A-CN-K 判别图

A-CN-K 图版主要用于判别风化作用、钾交代作用和碎屑组分。Fedo 等^[15]研究的结果表明斜长石-钾长石风化形成黏土矿物过程应该平行图解的 CN 一侧(图 6 虚线①),例如,英云闪长岩、花岗闪长岩和花岗岩投点(T、Gd 和 G)在长石连线上,首先,逐渐由斜长石一端向钾长石一端迁移,说明钾长石发生了斜长石交代作用;其次,如果没有其他作用影响,那么它发生风化作用变为黏土矿物将沿着平行虚线的方向(图 6 中虚线②和④)。因此,根据砂岩化学成分变化趋势,可以推断发生风化作用以前的斜长石/钾长石比率。但在风化作用过程中,砂岩发生钾的交代作用可能有两个极端方式:一种方式是富含 Al 的矿物像高岭石、长石可能发生伊利石化;另一种方式是斜长石可能变成自生钾长石。因此

造成实际风化过程相对图中虚线向右倾斜的趋势(图 6 中实线①)。但无论经过任何一种钾交代作用,风化趋势的趋势线与钾长石和钾长石-斜长石连线的交点仍然能够估计风化作用以前的斜长石与钾长石比率(图 5 中实线左端点)。

钾交代作用引起的长石中的高岭石和伊利石化,使得风化趋势线向右与标准风化趋势线之间呈现夹角;变化趋势线反向延长与斜长石-钾长石连线的交点,分布在花岗闪长岩和花岗岩端元之间,反映了砂岩碎屑源岩中斜长石含量比钾长石高,比率约为 21:4。

3.2.2 CIA 和 CIW 指标

CIA 和 *CIW* 指标都是运用砂岩中的稳定元素氧化物和不稳定元素的氧化物之间的比值变化来判断风化强度的指标。其计算公式分别为:*CIA*(蚀变作用指标) = $\frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O} \times 100$ 和 *CIW*(化学风化作用指标) = $\frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO + Na_2O} \times 100$,高值代表受到的风化作用强烈^[16-17]。

首先,从 A-CN-K 图解上 Al₂O₃、CaO + Na₂O 和 K₂O 的值,先可以估算出几个数值:(1)未经风化的砂岩(图 6 中虚线①左端点)*CIA* 值大约为 50,(2)未经交代作用的砂岩的 *CIA* 值最高可达 80 左右(图 6 中虚线①顶点)。

沃若山地区雀莫错组砂岩样品实际计算出的 *CIA* 值在 67.96~72.33 变化(表 2),根据 Fedo 等^[15]给出的计算方案,假设砂岩未受钾的交代作用,风化作用将沿着图 5 中虚线①进行,估算得到的 *CIA* 值大约为 78(从图 6 中实线顶端沿与 A-K 边界平行的方向,与虚线①交点处的 *CIA* 值),可见研究区砂岩是在经历了强烈的风化作用而形成的,并且由于受钾的交代作用而使得 *CIA* 值降低。另外,*CIW* 值经计算为 78.74~83.58,平均值为 82.21,变化与 *CIA* 值是一致,都反映了较为强烈的风化环境(图 6)。

3.3 化学成分变化与再循环

从野外露头观察,雀莫错组主要为一套紫红色为主体砂砾岩和砂岩沉积,砾石的分选和磨圆都较差,砂岩主要为中-细砂岩,反映为一套近源沉积物。而通过地球化学手段分析沉积岩碎屑源岩成分,主要是通过化学组分指标 ($ICV = \frac{Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO + MgO + Ti_2O_3}{Al_2O_3}$) 和一些重矿物元素指标(如, Th、Sc、Zr 等元素)。

表1 沃若山地区雀莫错组(J₁q) 主量元素测试结果(%)

Table 1 Major elements (wt.%) data of the Woruo Mountain area in Qiangtang basin, northern Tibet

样品编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SiO ₂	55.19	55.88	55.04	56.02	53.58	55.95	53.92	56.56	56.64	55.70	58.36	56.45
Al ₂ O ₃	12.95	12.58	12.22	13.44	12.82	12.84	13.23	13.17	11.73	12.23	11.56	12.50
FeO	2.25	2.10	1.95	2.20	2.20	2.25	2.40	2.35	2.25	2.30	2.15	2.20
Fe ₂ O ₃	3.25	3.29	3.01	3.27	3.63	3.31	3.18	3.17	2.67	2.75	3.00	2.78
MgO	3.24	3.01	2.54	3.13	3.01	3.22	3.26	3.11	2.69	2.80	2.42	2.82
CaO	8.58	8.66	9.97	7.87	9.46	8.05	9.09	7.66	9.32	9.42	8.60	8.79
Na ₂ O	1.30	1.36	1.65	1.32	1.27	1.27	1.19	1.31	1.47	1.36	1.50	1.33
K ₂ O	2.59	2.45	2.46	2.72	2.59	2.68	2.68	2.66	2.23	2.42	2.29	2.49
MnO	0.12	0.12	0.14	0.11	0.12	0.12	0.12	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12
TiO ₂	0.89	0.91	0.73	0.88	0.88	0.86	0.86	0.88	0.86	0.86	0.81	0.86
P ₂ O ₅	0.14	0.15	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.15	0.15	0.14	0.15
烧失量	9.08	9.08	9.66	8.51	9.74	8.75	9.43	8.52	9.36	9.42	8.56	8.93
Fe ₂ O ₃ ^T	5.50	5.39	4.96	5.47	5.83	5.56	5.58	5.52	4.92	5.05	5.15	4.98
CaO*	1.30	1.36	1.65	1.32	1.27	1.27	1.19	1.31	1.47	1.36	1.50	1.33
(SiO ₂ / Al ₂ O ₃)	0.63	0.65	0.65	0.62	0.62	0.64	0.61	0.63	0.68	0.66	0.70	0.65
(Na ₂ O/K ₂ O)	-0.30	-0.26	-0.17	-0.31	-0.31	-0.32	-0.35	-0.31	-0.18	-0.25	-0.18	-0.27
K ₂ O/Na ₂ O	1.99	1.80	1.49	2.06	2.04	2.11	2.25	2.03	1.52	1.78	1.53	1.87
Al ₂ O ₃ / SiO ₂	0.23	0.23	0.22	0.24	0.24	0.23	0.25	0.23	0.21	0.22	0.20	0.22
Al ₂ O ₃ / (CaO ₂ +Na ₂ O)	1.31	1.26	1.05	1.46	1.19	1.38	1.29	1.47	1.09	1.13	1.14	1.24
Fe ₂ O ₃ ^T +MgO	8.74	8.40	7.50	8.60	8.84	8.78	8.84	8.63	7.61	7.85	7.57	7.80
CIA	71.39	70.87	67.96	71.49	71.42	71.10	72.33	71.38	69.41	70.41	68.61	70.82
CIW	83.28	82.22	78.74	83.58	83.46	83.49	84.75	83.41	79.96	81.81	79.40	82.45
ICV	0.97	0.98	0.99	0.94	0.99	0.98	0.93	0.94	0.97	0.94	1.00	0.93

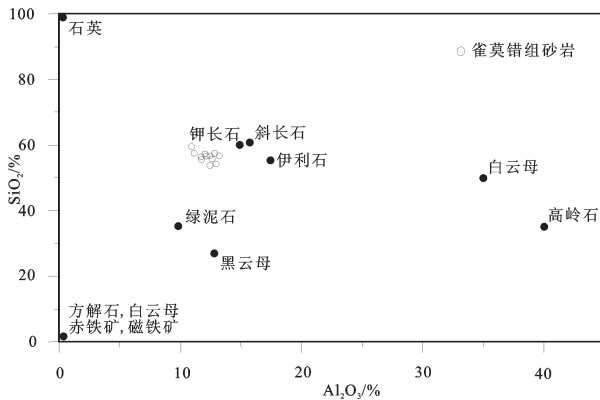


图3 沃若山地区雀莫错组砂岩 SiO₂-Al₂O₃图解
Fig.3 SiO₂ versus Al₂O₃ diagram of the sandstones in the Qemo Co Formation of Woruo Mountain, Qiangtang Basin

判断砂岩碎屑源岩成分的ICV指标中,非黏土矿物碎屑源岩组分比黏土矿物组分ICV值高(例如:一般情况下,高岭石约0.03~0.05、蒙脱石0.15~0.3、

伊利石0.3、斜长石0.6、碱性长石0.8~1、黑云母8、角闪石和辉石10~100)。因此,主要由黑云母、闪石或辉石组成,而黏土矿物含量较低的砂岩ICV值一般要比1大得多,这种砂岩经常作为第一次旋回的沉积物在构造上活动的地区沉积^[18]。长石含量比较高并且含有大量黏土矿物的砂岩,ICV值趋向于小于1,形成于较小的隆起地区,伴随着较强的风化作用^[19]。这种砂岩石英含量较高,化学组分接近于石英砂岩。在强烈的风化作用过程中形成的第一次旋回陆源沉积物,在黏土中滞留较长的时间,可能进一步被风化,因此使得ICV值趋向于小于1^[20]。因此,ICV值大于1的砂岩很可能为第一次旋回的沉积物,而ICV值小于1的砂岩可能被再旋回,或者为经过强烈风化的第一次旋回沉积物。

笔者计算了沃若山地区雀莫错组砂岩的ICV值,其中对K₂O含量根A-CN-K判别图做了校正,

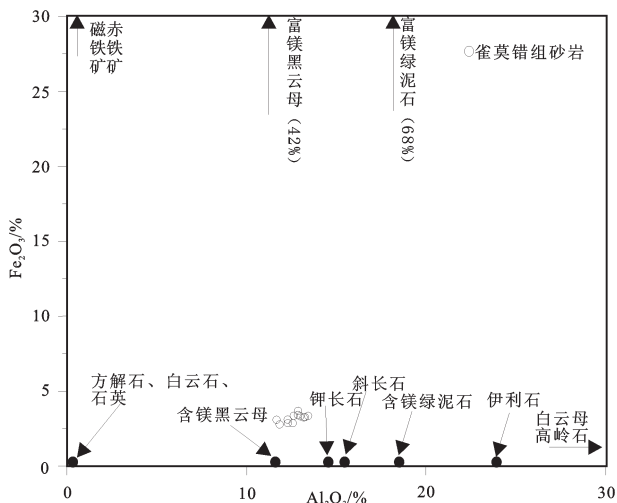


图4 沃若山地区雀莫错组砂岩 Fe₂O₃-Al₂O₃图解
Fig.4 Fe₂O₃ versus Al₂O₃ diagram of the sandstones in Quemo Co Formation of Woruo Mountain, Qiangtang Basin

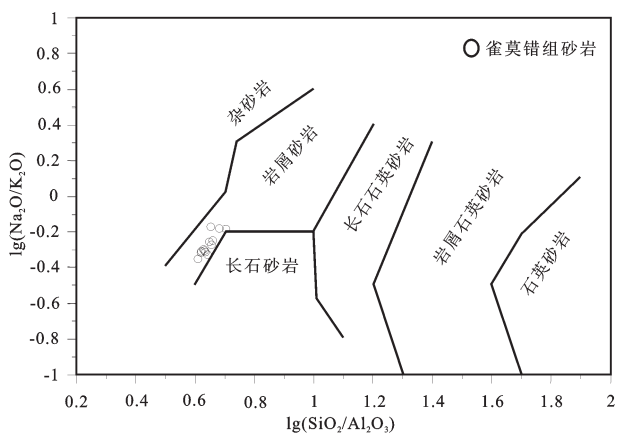


图5 沃若山地区雀莫错组砂岩 Na₂O/K₂O - SiO₂/Al₂O₃图解
Fig.5 Na₂O/K₂O versus SiO₂/Al₂O₃ diagram of the sandstones in Quemo Co Formation of Woruo Mountain, Qiangtang Basin

即假设砂岩没有发生钾的交代作用,而只发生风化作用的情况下 K₂O 的含量,计算方法按照前面所述的假设没发生钾的交代作用时 CIA 的值求得。并对 CaO 含量做了校正(方法与前面一致)。计算得到的 ICV 值大部分都接近于 1,在 0.93~1.00 变化,平均值为 0.96,大部分都小于 1,因此可以认为砂岩碎屑沉积物为第一次旋回沉积物。

此外,沉积分选及再循环可导致重矿物富集,从而导致某些微量元素富集。在图 Th/Sc-Zr/Sc 中(图 7),样品均与成分演化线(BFG)较为接近,表明

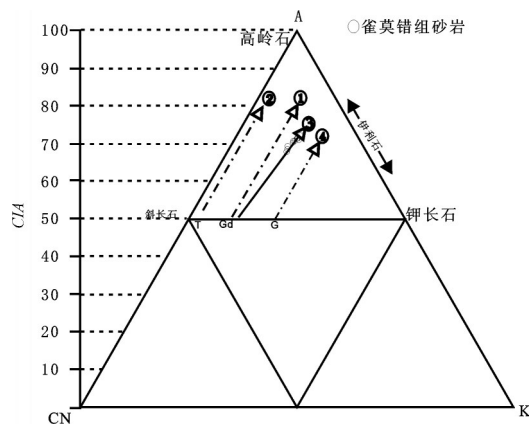


图6 沃若山地区雀莫错组砂岩 A-CN-K 判别图
T—英闪长岩;Gd—花岗闪长岩;G—为花岗岩;A=Al₂O₃; CN = CaO+Na₂O;K=K₂O
Fig. 6 A-CN-K triangular diagram of the sandstones in Quemo Co Formation of Woruo Mountain, Qiangtang Basin
T-Tonalite; Gd-Granodiorite; G-Granite;A=Al₂O₃; CN = CaO+Na₂O;K=K₂O

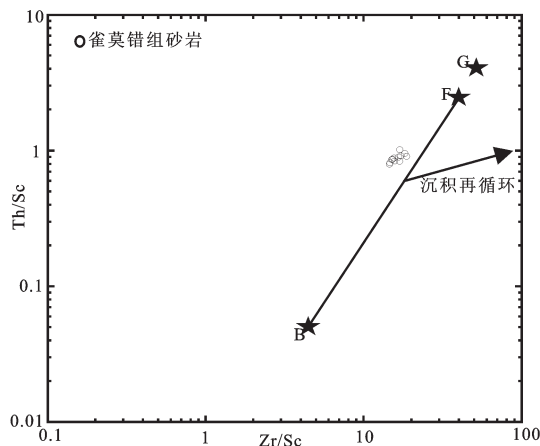


图7 沃若山地区雀莫错组砂岩 Zr/Sc-Th/Sc图解(据 McLemian 等修改)^[24]
B—玄武岩,F—长英质岩石,G—花岗岩
Fig. 7 Zr/Sc versus Th/Sc diagram of the sandstones in Quemo Co Formation of Woruo Mountain, Qiangtang Basin
B-Basalt;F-Felsic rock;G-Granite

样品成分主要受源区岩石成分控制,沉积分选和再循环作用影响不大,主要为第一旋回沉积物。

3.4 稀土元素特征与沉积物源岩限定

3.4.1 稀土元素特征

沃若山地区雀莫错组砂岩稀土元素分析结果见表 2,球粒陨石标准化^[21]后的稀土元素分布模式见图 8。总的来看,样品的稀土元素总量(ΣREE)为

161.25×10⁻⁶~175.43×10⁻⁶,表明雀莫错组泥质岩稀土元素相对富集。其中,ΣLREE值为143.44×10⁻⁶~154.77×10⁻⁶,ΣHREE值为17.58×10⁻⁶~20.66×10⁻⁶,ΣLREE/ΣHREE值为7.49~8.79,La_N/Yb_N(球粒陨石标准化)值为7.75~9.43,显示轻重稀土分馏明显、轻稀土元素富集而重稀土元素相对较低等特征。这从球粒陨石标准化稀土元素分布模式图(图8)也可以看出,分布曲线总体特征向右倾斜,La~Sm段曲线较陡,Ho~Lu段曲线较平缓,且Eu为低谷,具有明显的Eu负异常,这些反映了典型沉积岩的稀土分配特点。

3.4.2 沉积物源岩限定

沃若山地区雀莫错组砂岩各个样品的稀土分布模式曲线相似度极高,说明沉积物具有同源性。可根据稀土元素的特征进一步对其物源性进行判别分析。Allegre et al. (1978)^[22]通过轻重稀土的比值(La/Yb)和稀土总含量(ΣREE)之间的关系,对物源性进行

进行分析,分为:玄武岩区、花岗岩区、钙质泥岩区、球粒陨石区、金伯利岩区和碳酸盐岩区6大类;研究区的样品经过投点主要地分布在花岗岩区(图9),说明砂岩碎屑源岩主要为花岗岩类。此外,铕元素异常(δEu)也是反映沉积体系内地球化学状态的灵敏指标,可以作为鉴别物质来源的重要参数。赵振华等(1995)^[23]对各种岩类的Eu异常做了总结:花岗岩多为Eu负异常(δEu<0.9),中性斜长岩一般具Eu正异常(1.01<δEu<2.33),玄武岩大多数没有异常(0.90<δEu<1.0),其中具有负异常的样品多来自酸性火成岩。研究区雀莫错组砂岩δEu为负异常,在0.64~0.73变化,平均值为0.67,说明其形成沉积物中的碎屑源岩多为酸性火山岩类。

4 构造环境分析

碎屑岩的元素含量变化与沉积物源区构造背景之间有着内在的必然联系,碎屑岩元素可以很好

表2 沃若山地区雀莫错组(J₁q)微量元素测试结果(10⁻⁶)

Table 2 Trace elements (10⁻⁶) data of the Woruo Mountain area in Qiangtang basin, northern Tibet

样品编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Sc	14.1	14.1	12.1	13.7	14.2	14.9	13.7	14.6	13.8	13.6	12.2	13.6
V	119	117	97.8	115	124	116	111	114	102	107	107	105
Co	17.9	17.6	14.3	17.5	17.9	17.5	16.9	17.5	14.8	15.9	15	16
Ni	51.3	48	40.4	49.7	53.5	50.6	47.9	50.7	42.5	46.4	40.8	45.2
Cu	190	167	11.8	175	97.4	173	209	182	129	179	20.2	185
Zn	107	99.5	82.9	99.2	103	101	149	101	112	148	157	100
Sr	121	126	134	115	136	115	117	112	127	131	118	121
Ba	480	428	473	545	511	399	473	425	331	521	322	407
La	35.1	36.6	37	33.9	35	34.3	34	35.1	35.6	36.3	33.7	35.1
Ce	69.6	71	71.8	66.7	68.9	67.5	65.8	68.5	70	70.7	66.9	69
Pr	8.03	8.34	8.18	7.65	8.12	7.74	7.63	7.89	8.17	8.27	7.46	7.98
Nd	30.7	31.5	30.8	29.6	30.2	28.7	29.3	30.4	30.7	31.6	28.7	30
Sm	6.14	6.04	5.6	5.72	6.05	5.63	5.45	5.98	5.79	6.17	5.52	5.8
Eu	1.24	1.29	1.17	1.22	1.31	1.16	1.27	1.2	1.36	1.32	1.16	1.3
Gd	5.4	5.84	4.82	5.14	5.54	5.18	5.1	5.27	5.73	5.6	4.91	5.34
Tb	0.925	0.989	0.859	0.881	0.968	0.898	0.872	0.916	0.961	0.957	0.857	0.925
Dy	5.52	5.69	4.87	5.08	5.23	5.04	5.1	4.98	5.38	5.24	4.84	5.23
Ho	1.02	1.04	0.926	0.904	0.976	0.95	0.937	0.916	0.977	0.964	0.901	0.936
Er	3	3.07	2.62	2.9	2.82	2.74	2.78	2.81	3.01	2.92	2.72	2.68
Tm	0.48	0.483	0.416	0.458	0.456	0.438	0.441	0.44	0.453	0.454	0.417	0.435
Yb	3.06	3.06	2.65	2.77	2.83	2.77	2.67	2.76	2.77	2.85	2.73	2.82
Lu	0.476	0.491	0.416	0.426	0.431	0.45	0.429	0.42	0.447	0.463	0.434	0.459
Th	13	13.4	12.3	12.1	12.3	11.9	11.8	11.9	11.5	12.2	11.1	11.4
U	2.85	2.85	2.78	2.51	2.73	2.42	2.41	2.53	2.47	2.72	2.36	2.42
Zr	243	256	204	214	214	217	208	214	234	228	226	214
Hf	6.59	7.17	5.91	6.13	6.01	5.95	5.76	5.9	6.2	6.07	5.83	5.94
Th/Sc	0.92	0.95	1.02	0.88	0.87	0.8	0.86	0.82	0.83	0.9	0.91	0.84
Zr/Sc	17.23	18.16	16.86	15.62	15.07	14.56	15.18	14.66	16.96	16.76	18.52	15.74
Zr/10	24.3	25.6	20.4	21.4	21.4	21.7	20.8	21.4	23.4	22.8	22.6	21.4
Th/U	4.56	4.7	4.42	4.82	4.51	4.92	4.9	4.7	4.66	4.49	4.7	4.71
La/Th	2.7	2.73	3.01	2.8	2.85	2.88	2.88	2.95	3.1	2.98	3.04	3.08
ΣREE	170.7	175.4	172.1	163.4	168.8	163.5	161.8	167.6	171.4	173.8	161.3	168.1
LREE	150.8	154.8	154.6	144.8	149.6	145.0	143.5	149.1	151.6	154.4	143.4	149.2
HREE	19.88	20.66	17.58	18.56	19.25	18.47	18.33	18.51	19.73	19.45	17.81	18.83
LREE/HREE	7.59	7.49	8.79	7.80	7.77	7.85	7.83	8.05	7.69	7.94	8.05	7.92
La _N /Yb _N	7.75	8.08	9.43	8.27	8.36	8.37	8.61	8.59	8.68	8.61	8.34	8.41
δEu	0.64	0.66	0.67	0.67	0.68	0.65	0.73	0.64	0.71	0.67	0.67	0.70
δCe	0.94	0.92	0.93	0.94	0.93	0.94	0.93	0.93	0.93	0.93	0.96	0.94
La/Yb	11.47	11.96	13.96	12.24	12.37	12.38	12.73	12.72	12.85	12.74	12.34	12.45

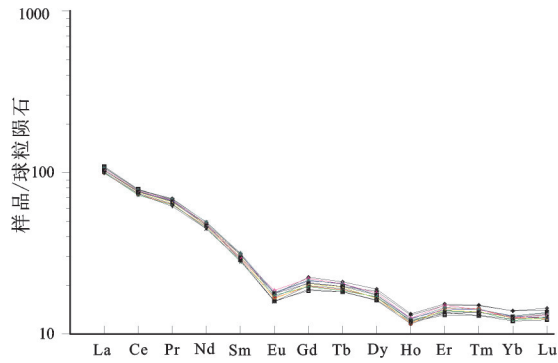


图8 沃若山地区雀莫错组砂岩稀土元素配分模式曲线
Fig. 8 REE patterns of the sandstones in Quemo Co Formation of Woruo Mountain, Qiangtang Basin

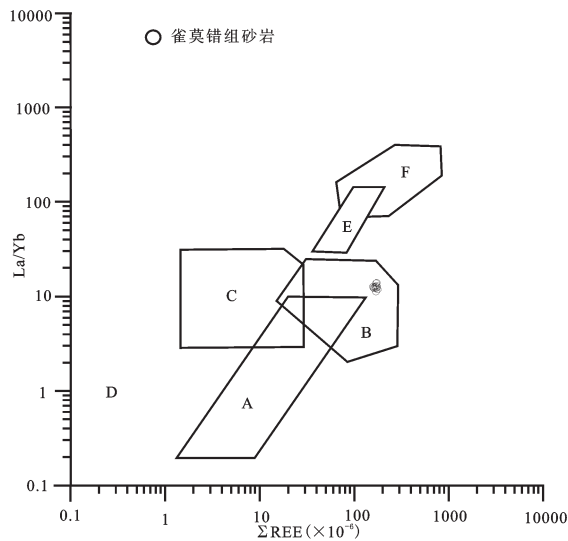


图9 羌塘盆地沃若山地区雀莫错组砂岩 La/Yb-ΣREE 图解
A—玄武岩区; B—花岗岩区; C—钙质泥岩区; D—球粒陨石区;
E—金伯利岩区; F—碳酸盐岩区
Fig. 9 La/Yb versus ΣREE diagram of the sandstones in Quemo Co Formation of Woruo Mountain, Qiangtang Basin
A—Basalt; B—Granite; C—Calcic mudstone; D—Chondrites;
E—Kimberlite; F—Carbonate

地反映物源区的大地构造背景和构造演化特征。前人已总结出板块构造环境碎屑岩化学组成特征的一系列判别图解和数据,且得到了地质学界的认可和广泛应用^[24-30]。本文运用多种图解进行判断,相互约束得出较为准确的构造背景。

4.1 主量元素构造背景判别

Bhatia(1984)^[25]、Roser and Korsch(1986)^[26]经过

研究,得出运用砂岩中的 SiO₂、K₂O、Na₂O、TiO₂、Al₂O₃等几种主量元素的比值及相关性可以判断沉积盆地构造环境;把盆地构造环境分为:大洋岛弧、大陆岛弧、活动大陆边缘和被动大陆边缘4种类型。其中火山岛弧区贫石英砂的砂岩系列(SiO₂平均值=58%,K₂O/Na₂O≤1);活动边缘(安第斯型)的中等含石英砂的砂岩系列(SiO₂=68%~74%,K₂O/Na₂O>1);以及被动陆缘的高含量石英砂的石英砂岩系列(SiO₂=89%,K₂O/Na₂O<1)。随着构造环境从被动大陆边缘到大洋岛弧的变化,砂岩的化学成分也发生变化,TiO₂、Al₂O₃/SiO₂增高,而K₂O/Na₂O、Al₂O₃/(CaO+Na₂O)降低。

首先,对研究区各个样品化学组成的分析结果进行计算,获得上述参数,然后将这些参数分别投入 TiO₂-(Fe₂O₃^T+MgO)、Al₂O₃/SiO₂-(Fe₂O₃^T+MgO)及 Al₂O₃/(CaO + Na₂O) - (Fe₂O₃^T + MgO)、K₂O/Na₂O-SiO₂源区构造环境判别图中(图10)。可见,研究区雀莫错组砂岩碎屑源区构造背景主要为大陆岛弧。

4.2 微量元素构造背景判别

微量元素对构造背景的判别,主要是运用沉积岩中 La、Th、Sc、Co、Zr、U、Hf 等元素的比值或相关性构造环境判别。因为不同构造位置砂岩的微量元素丰度和比值是不同的,从大洋岛弧→大陆岛弧→活动大陆边缘→被动大陆边缘, LREE (La、Ce、Nd)、Hf、Ba/Sr、La/Y 和 Ni/Co 系统增加,而镁铁质元素如 Sc、V、Cu、Co、Zn 和 Ba/Rb、K/Th、K/U 值减少,这与源区的变化(从安山岩→英安岩→花岗片麻岩→沉积岩)是同步的^[27]。此外,Bhatia et al.^[28]还认为当 Th/U 值为 2.5~3 时,其源岩主要为岛弧火山岩;Th/U 值约为 4.5 时,其物源主要以沉积岩为主,可能有岛弧火山岩碎屑混入;当 Th/U 值约为 6 时,可以肯定物源主要是再旋回沉积岩,且源岩可能存在 Th 矿化。当 La/Th 为 (6.7±2.0), Hf 含量约为 2×10⁻⁶ 时,为大洋岛弧构造背景;当 La/Th 约为 4.5, Hf 含量为 4×10⁻⁶~5×10⁻⁶ 时,为大陆岛弧构造背景;当 La/Th 约为 2.6, Hf 含量一般大于 5×10⁻⁶ 时,为活动大陆边缘或被动大陆边缘构造背景。

根据以上的判别方法,对研究区样品在 La-Th-Sc、Co-Th-Zr/10、Sc-Th-Zr/10、La/Th-Hf 和 Th/Sc-Sc 图解中投点分析(图11),为大陆岛弧构造背景;经过对元素的计算表明,研究区砂岩 Th/U 为

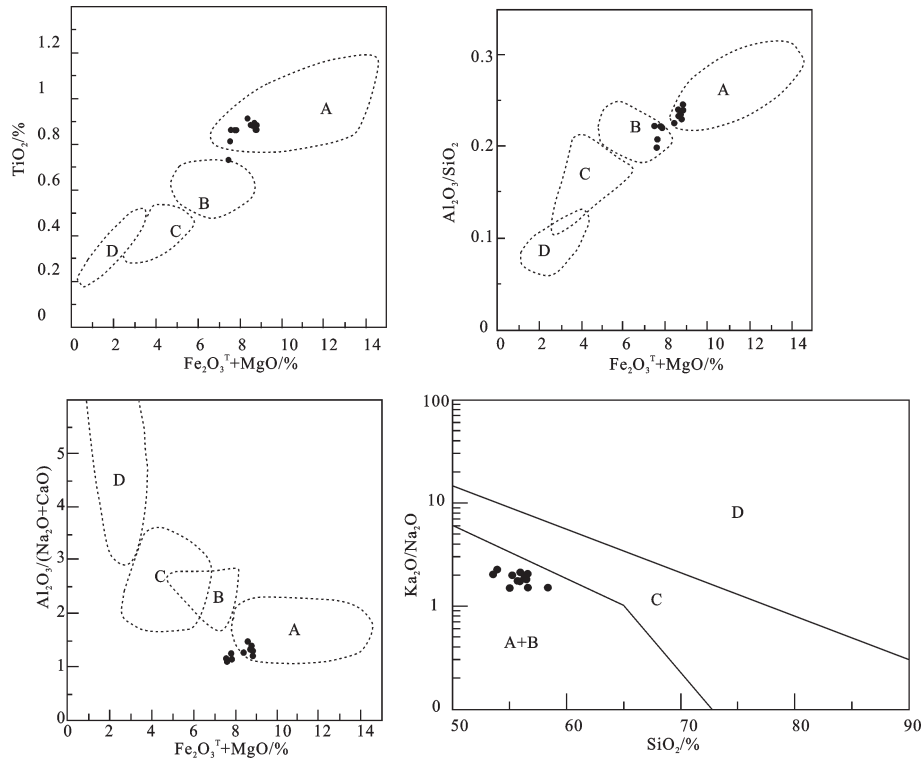


图10 羌塘盆地沃若山地区雀莫错组砂岩主量元素构造背景判别图

A—大洋岛弧;B—大陆岛弧;C—活动大陆边缘;D—被动大陆边缘

Fig. 10 Major element composition of sandstones for tectonic setting discrimination in the Quemo Co Formation of Woruo Mountain, Qiangtang Basin

A—Oceanic island arc; B—Continental island arc; C—Active continental margin; D—Passive continental margin

4.42~4.92,平均值为4.67,说明其物源有岛弧火山岩碎屑混入;同时,研究区样品的La/Th值为 2.7×10^{-6} ~ 3.1×10^{-6} ,Hf含量在 5.76×10^{-6} ~ 7.17×10^{-6} ,说明本次研究的物源区也具有活动大陆边缘的背景。

4.3 构造背景讨论

已有资料表明^[26,29,30,31],被动大陆边缘在其发展演化的过程中,发育具2类不同地球化学特征的砂岩,即在其裂陷阶段所形成的砂岩与移离阶段所形成的砂岩^[32]具不同的地球化学特征,裂陷阶段所形成的砂岩与活动大陆边缘所形成的砂岩具相似的主量和微量元素地球化学特征,移离阶段所形成的砂岩才真正具被动大陆边缘砂岩的地球化学特征。

从沃若山地区雀莫错组砂岩的岩石化学参数与构造环境之间关系的成分图解分析可见,该套砂岩是大陆岛弧和活动大陆边缘的构造背景;这表明该套砂岩是可能形成于被动大陆边缘的裂陷阶段。此外,该区雀莫错组沉积为一套冲洪积相地层,以紫红色、灰绿色的块状砂砾岩、细砂岩、粉砂

岩和泥岩为主,该充填序列也显示出了裂陷阶段盆地边缘断裂部位的沉积特征。从以上的总体特征来看,雀莫错组砂岩为一套被动大陆边缘裂陷阶段发育的地层。与前人^[7]通过盆内火山岩研究得出的结论相一致,有效地约束了盆地构造演化的特征。

5 结论

通过砂岩氧化物含量分析,羌塘盆地沃若山地区侏罗系雀莫错组砂岩岩石类型比较单一,主要为岩屑砂岩,反映其近物源的沉积特征。砂岩成分主要在钾长石、斜长石、伊利石、绿泥石等矿物之间进行变化,砂岩中长石、黏土矿物的含量较高,CaO含量相对较低,说明成岩过程中,黏土矿物起主导性作用。

研究区早侏罗世雀莫错组沉积为被动大陆边缘裂陷阶段的产物,砂岩的统一的稀土分配模式说明其来源于同一物源,并且化学组分变化反映为近物源的第一次旋回沉积物。A—CN—K三角图反映了该地区砂岩的碎屑源岩中斜长石含量要高于钾

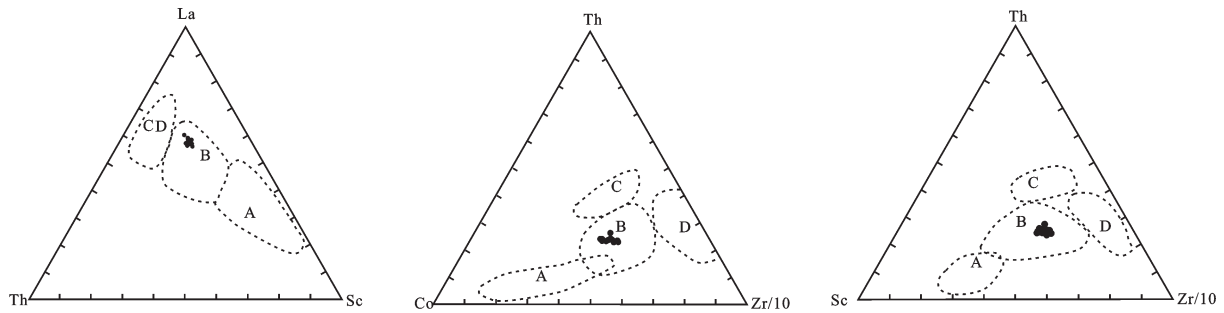


图 11 沃若山地区雀莫错组 La-Th-Sc、Co-Th-Zr/10、Sc-Th-Zr/10 构造背景判别图解^[27]

A—大洋岛弧;B—大陆岛弧;C—活动大陆边缘;D—被动大陆边缘

Fig. 11 Tectonic setting discrimination plots of La-Th-Sc, Co-Th-Zr/10, Sc-Th-Zr/10 of the Quemo Co Formation of Woruo Mountain, Qiangtang Basin

A—Oceanic island arc; B—Continental island arc; C—Active continental margin; D—Passive continental margin

长石含量,碎屑源岩成分在花岗闪长岩和花岗岩之间变化,说明物源来源混杂大量的火山弧的碎屑物质;砂岩的碎屑成分在风化过程中受到了钾的交代作用,斜长石由于钾的交代作用发生了伊利石化。化学蚀变作用指标和化学风化作用指标反映了砂岩的碎屑成分受到了强烈的风化作用。

致谢:成都地质调查中心杨哲超、罗红民等同志在藏北无人区给予积极合作与十分宝贵的后勤保障;在文章的撰写中,与杜佰伟高级工程师开展了有益的交流与讨论;同时,审稿专家对论文提出了宝贵的修改意见,在此一并致以衷心的感谢!

参考文献(References):

- [1] McLennan S M, Taylor S H, McCulloch M T, et al. Geochemical and Nd-Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: Crustal evolution and plate tectonic associations[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1990, 54(7):2015-2050.
- [2] McLennan S M, Taylor S H. Sedimentary rock and crustal evolution: Tectonic setting and secular trends[J]. *J Geol.*, 1991, 99(1):1-21.
- [3] 胡元邦, 侯中健, 邓江红, 等. 滇西昌宁更戛乡下泥盆统向阳寺组硅质岩地球化学特征及构造环境探讨[J]. *中国地质*, 2016, 43(2): 650-661.
Hu Yuanbang, Hou Zhongjian, Deng Jianghong, et al. Geochemical characteristics and tectonic environment discussion of chert from the Lower Devonian Xiangyangsi Formation in Gengga, Changning, Western Yunnan[J]. *Geology in China*, 2016, 43(2): 650-661(in Chinese with English abstract).
- [4] 付修根, 王剑, 吴滔, 等. 羌塘盆地胜利河地区雀莫错组地层及其古环境[J]. *中国地质*, 2010, 37(5): 1305-1312.
Fu Xiugen, Wang Jian, Wu Tao, et al. Stratigraphy and

paleoenvironment of the Quemo Co Formation in Shengli River area, northern Tibet [J]. *Geology in China*, 2010, 37(5): 1305-1312 (in Chinese with English abstract).

- [5] 曾胜强, 王剑, 冯兴雷, 等. 北羌塘盆地沃若山地区中—下侏罗统雀莫错组一段沉积环境分析[J]. *中国地质*, 2014, 41(1): 162-172.
Zeng Shengqiang, Wang Jian, Feng Xinglei, et al. A sedimentary environment analysis of the first member of the Quemo Co Formation in Woruo Mountain area of the North Qiangtang Basin [J]. *Geology in China*, 2014, 41(1): 162-172(in Chinese with English abstract)..
- [6] 王建坡, 赵兵. 羌塘雁石坪中侏罗统雀莫错组地层及沉积环境[J]. *沉积与特提斯地质*, 2004, 24(3): 43-47.
Wang Jianpo, Zhao Bing. Stratigraphy and sedimentary environments of the Qoimaco Formation in the Yanshiping region, Qiangtang [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2004, 24(3): 43-47(in Chinese with English abstract).
- [7] 谭富文, 王剑, 王小龙, 等. 羌塘盆地雁石坪地区中—晚侏罗世碳、氧同位素特征与沉积环境分析[J]. *地球学报*, 2004, 26(2): 119-126.
Tan Fuwen, Wang Jian, Wang Xiaolong, et al. Analysis of carbon and oxygen isotope composition and sedimentary environment of the Yanshiping area of the Qiangtang basin in Middle-Late Jurassic [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2004, 26(2):119-126(in Chinese with English abstract).
- [8] 李勇, 王成善, 伊海生, 等. 青藏高原中侏罗世—早白垩世羌塘复合前陆盆地充填模式[J]. *沉积学报*, 2001, 19(1): 20-27.
Li Yong, Wang Chengshan, Yi Haisheng, et al. Fill models of the Qiangtang composite foreland basin in Qinghai-Xizang Plateau, China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(1): 20-27 (in Chinese with English abstract).
- [9] 王剑, 付修根, 陈文西, 等. 北羌塘沃若山地区火山岩年代学及区域地球化学对比——对晚三叠世火山—沉积事件的启示[J]. *中国科学(D辑)*, 2008, 38(1): 33-43.
Wang Jian, Fu Xiugen, Chen Wenxi, et al. Chronology and

- geochemistry of the volcanic rocks in Woruo Mountain region, Northern Qiangtang depression: Implications to the Late Triassic volcanic-sedimentary events[J]. *Science in China (Series D)*, 2008, 38(1):33-43 (in Chinese).
- [10] 赵政璋, 李永铁, 叶和飞, 等. 青藏高原大地构造特征与盆地演化[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 23-25.
- Zhao Zhengzhang, Li Yongtie, Ye Hefei, et al. Tectonic Characteristics and Basin Evolution of the Qinghai-Tibet Plateau[M]. Beijing: Science Press, 2001: 23-25 (in Chinese).
- [11] 王剑, 谭富文, 李亚林, 等. 青藏高原重点沉积盆地油气资源潜力分析[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 34-88.
- Wang Jian, Tan Fuwen, Li Yalin, et al. The Potential of the Oil and Gas Resources in Major Sedimentary Basin on the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004:34-88 (in Chinese).
- [12] Cullers R L. The controls on the major and trace element variation of shale, silt stones, and sandstones of Pennsylvanian-Permian age from up lifted continental blocks in Colorado to platform sediment in Kansas, USA[J]. *Geochimica et Cosmochim Acta*, 1994, 58 :4955-4972.
- [13] Pettijohn F J, Potter P E, Siever R. Sand and Sandstone[M]. New York: Stringer-Verlag, 1972: 618.
- [14] 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]. *Pre-cambrian Research*, 1997, 86:210-223.
- [15] Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sandstones and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance[J]. *Geology*, 1995, 23: 921-924.
- [16] Harnois L. The CIW index: A new chemical index of weathering[J]. *Sedimentary Geology*, 1988, 55:319-322.
- [17] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major elemental chemistry of lutites[J]. *Nature*, 1982, 199:715-717.
- [18] Van de Kamp P C, Leake B E. Petrography and geochemistry of feldspathic and mafic sediments of the northeastern Pacific margin[J]. *Trans. R. Soc. Edinburgh Earth Sci.*, 1985, 76:411-449.
- [19] Cox R, Low D R, Cullers R L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995, 59:2919-2940.
- [20] Johnsson M J. Tectonic assembly of east central Alaska: Evidence from Cretaceous Tertiary sandstones of the Kandik River terrane[J]. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 2000, 112:1023-1042.
- [21] Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: It's Composition and Evolution[M]. Oxford: Blackwell, 1985.
- [22] Allegre C T. Quantitative modes of trace planet[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1978, 38(1):1-25.
- [23] 赵振华. 微量元素地球化学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 56-187.
- Zhao Zhenhua. Trace Element Geochemical Principle [M]. Beijing: Science Press, 1997:56-187(in Chinese).
- [24] McLennan S M. A geochemical approach to sedimentary provenance[C]//GSA.GSA Abstracts with Programs. Boulder: GSA, 1991, 23(5): 108.
- [25] Bhatia M R. Composition and classification of Paleozoic flysch mudrocks of eastern Australia: Implications in provenance and tectonic setting interpretation [J]. *Sediment Geol.*, 1984, 41(2/4) : 249-268.
- [26] Roser B P, Korsch R J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio[J]. *J. Geol.*, 1986, 94: 635-650.
- [27] Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins [J]. *Contrib. Mineral Petrol.*, 1986, 92(2) :181-193.
- [28] Bhatia M R, Taylor S R. Trace-element geochemistry and sedimentary provinces: A study from the Tasman Geosyncline, Australia [J]. *Chem. Geol.*, 1981, 33(1/2) :115-125.
- [29] Bhatia M R. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes mudrocks, provenance and tectonic control[J]. *Sed. Geol.*, 1985, 45-52.
- [30] 高长林, 叶得燎, 黄泽光, 等. 塔里木库鲁克塔格古原洋与地幔柱[J]. *石油实验地质*, 2004, 26(2): 161-168.
- Gao Changlin, Ye Deliao, Huang Zeguang, et al. Kuruktag Ur-ocean rift and mantle plume in the Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2004, 26(2): 161-168 (in Chinese with English abstract).
- [31] 高长林, 秦德余, 吉让寿, 等. 扬子板块北部古被动大陆边缘的地球化学特征[J]. *岩石矿物学杂志*, 1991, (4): 330-338.
- Gao Changlin, Qin Deyu, Ji Rangshou, et al. Geochemical characteristics of ancient passive continental margin of the northern Yangtze Plate [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1991, (4):330-338(in Chinese with English abstract).
- [32] 马文璞. 被动大陆边缘性质. 中国区域地质, 1986, (3): 239-248.
- Ma Wenpu. Geology of passive continental margins [J]. *Regional Geology of China*, 1986, (3): 239-248 (in Chinese with English abstract).