

柴达木盆地北缘早奥陶世陆-弧碰撞及弧后前陆盆地 ——来自碎屑岩地球化学的证据

孙娇鹏¹⁾, 陈世悦¹⁾, 马寅生²⁾, 彭渊²⁾, 邵鹏程¹⁾, 马帅¹⁾, 代昆²⁾, 郑策²⁾

1) 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛, 266580;

2) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京, 100081

内容提要:奥陶纪是柴达木盆地北缘早古生代碰撞造山演化的重要时期,柴达木地块与滩间山岛弧碰撞起始时限以及欧龙布鲁克海盆盆地类型、构造-古地理格局一直存在争议。本文在对欧龙布鲁克地块早奥陶世碎屑岩沉积野外观测及室内分析的基础上,测试了 30 个砂泥岩样品的主量元素、微量元素及稀土元素含量。结果表明,石灰沟组碎屑岩建造具有快速堆积、低成分成熟度、低结构成熟度的特征;该套碎屑岩沉积于活动大陆边缘背景下的弧后前陆盆地,碎屑物质来自南部由大陆上地壳与岛弧物质组成的上隆基底;早奥陶世(488~472 Ma)柴达木地块与滩间山岛弧陆-弧碰撞已经开始,但陆-弧碰撞起始时间不会早于 493 Ma。在此基础上,结合前人研究成果,认为早古生代欧龙布鲁克地块处于滩间山岛弧北部,盆地沉降、沉积演化受柴达木盆地北缘洋盆俯冲及柴达木地块-滩间山岛弧碰撞控制,寒武纪发育弧后伸展盆地,奥陶纪初期转为弧后挤压前陆盆地,弧后伸展与弧后挤压、沉积体系转换发生在 490~480 Ma 之间。该成果从沉积学角度为柴达木盆地北缘陆-弧碰撞起始时限提供了新的制约。

关键词:柴达木盆地北缘;早奥陶世;碎屑岩;地球化学;陆-弧碰撞;弧后前陆盆地

柴达木盆地北缘构造带早古生代板块汇聚事件一直是地学界的研究热点(Wang Huichu, 2006; Zhu Xiaohui et al., 2015; Sun Jiaopeng et al., 2015a)。近年来,前人在造山带的物质组成、高压-超高压变质作用、洋陆俯冲-陆陆碰撞及相关构造-岩浆-热事件等领域取得了一系列的进展,并初步建立了构造热事件年代框架(Wang Huichu, 2006; Zhu Xiaohui et al., 2015; Sun Jiaopeng et al., 2015b)。但是,受燕山-喜马拉雅期构造活动的影响,柴达木盆地北缘早古生代结合带遭受了强烈改造,保存下来的碰撞造山记录较少且内部组成极不完整(Wang Huichu et al., 2003)。构造混杂岩带内不连续产出的岩浆岩与变质岩岩片,保存在毗邻板块活动边界沉积盆地中的地质信息虽然是间接的,但更为连续,尤其是造山带内的岩浆、变质事件往往伴随极强的挤压、抬升,这些岩浆岩、变质岩可以很快地抬升至地表并快速进入沉积盆地,对活动构造带内的地质事件形成极快的沉积响应(Sun Jiaopeng et al., 2015c)。在这方面 Bhatia et al. (1986)及 Sun Linhua et al. (2010, 2011)均开展了卓

有成效的研究,但研究区至今未见与柴达木盆地北缘构造带早古生代聚合事件有关的沉积学研究。本文在露头实测基础上,采集碎屑岩样品进行薄片鉴定与地球化学分析,厘定石灰沟组碎屑岩物源区,明确研究区早奥陶世盆山格局及大地构造背景,为柴达木盆地北缘构造带早古生代造山演化提供沉积学约束。

1 区域地质概况及样品测试

研究区位于青海省中部,大地构造位置介于柴达木盆地北缘加里东造山带(包括鱼卡-沙柳河高压-超高压变质带及滩间山岛弧带)与宗务隆晚古生代一早中生代裂陷带之间,野外工作主要对城墙沟及大煤沟南两个剖面进行实测与采样(图 1)。石灰沟组底部与多泉山组碳酸盐岩角砾岩与泥页岩互层段(图 2a)为连续沉积,顶部被泥盆系阿姆尼克组磨拉石角度不整合超覆(图 1b、c,图 2g、h)。石灰沟组包括下部黑色泥页岩夹薄层灰岩段(图 2 柱状图及 2b)和上部含细砾中细砂岩与灰黑色泥页岩互层段(图 2 柱状图及 2c~g)两部分。砂泥岩互层段可

注:本文为中国地质调查局地质调查项目“柴达木盆地油气资源潜力评价”(编号 1212010818054)和“柴达木盆地古生代油气资源调查评价”(编号 1212011120964)联合资助成果。

收稿日期:2014-09-29;改回日期:2015-08-06;责任编辑:周健。

作者简介:孙娇鹏,男,1988 年生。博士研究生,主要从事沉积学与大地构造演化方面的研究。Email:sunjiaopeng@163.com。

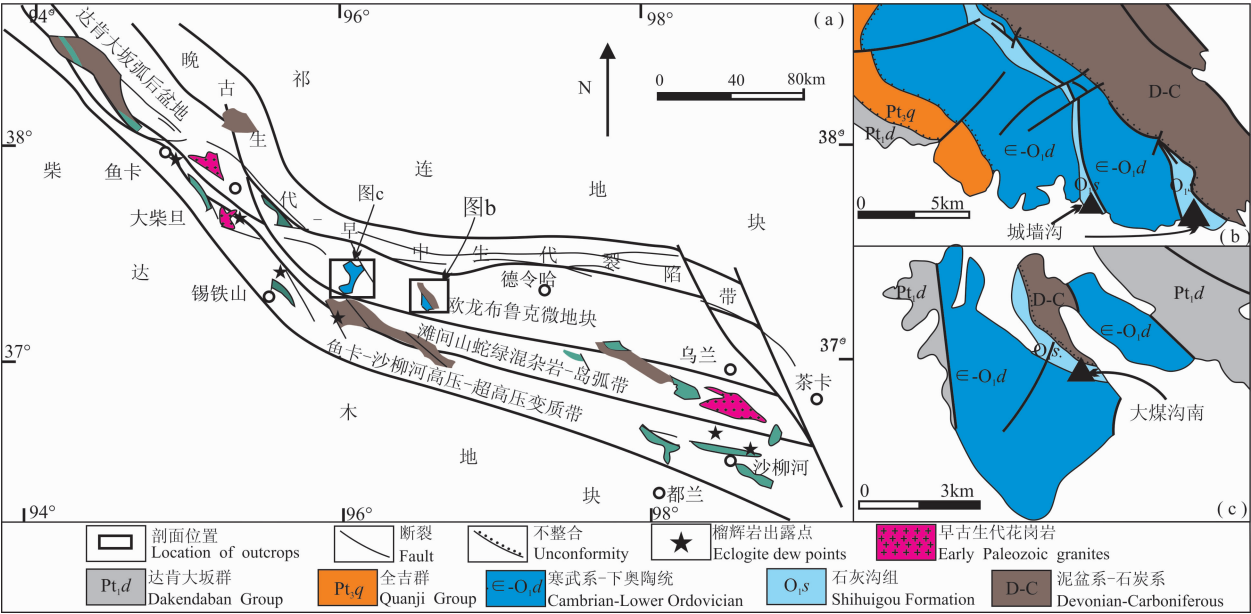


图 1 柴达木盆地北缘地质简图(据孙娇鹏等,2014a)
Fig. 1 Sketch geological map of the north Qaidam area (after Sun Jiaopeng et al. ,2014a)
(a) —柴达木北缘大地构造简图;(b) —城墙沟地质简图;(c) —大煤沟南地质简图
(a) —Sketch tectonic diagram of north Qaidam;(b) —sketch geological map of Chengqianggou area;
(c) —sketch geological map of Dameigounan area

再细划分为厚层砂岩夹薄层泥岩、泥岩与中薄层砂岩互层两类(图 2)。砂岩底面及内部槽模、渠模、火焰、块状层理、粒序层理及波痕等沉积构造极为发育(部分见图 2e),镜下鉴定显示碎屑颗粒磨圆中等、尖棱角状颗粒屡见不鲜,分选较差,颗粒杂乱排列,结构成熟度较低(图 2f)。总体而言,该套砂泥岩互层沉积重力流成因特征明显,厚层砂岩夹薄层泥岩段属砂质碎屑流沉积,中部泥岩与中薄层砂岩互层段应为浊流沉积(Sun Jiaopeng et al. ,2015c)。

本次测试的碎屑岩样品采集于大煤沟南剖面,包括 20 件砂岩、8 件泥岩及 2 件粉砂岩样品。采样后,除去样品表面的泥土及风化面,在实验室内粉碎至 200 目,主、微量元素含量测试在广州澳实矿物实验室完成。主量元素采用 ME-XRF06 法测试,稀土元素和微量元素含量分别采用 ME-MS81 和 ME-MS61 法测试,详细测试流程及测试精度参见 Sun Jiaopeng et al. (2015c),测试结果见表 1。

2 样品地球化学特征

从主量元素测试结果(表 1)来看,砂、泥岩样品中 K₂O、CaO、Na₂O 含量差异明显,但 Al₂O₃、TF_{Fe}O₃ 及 MgO 含量变化不大。样品 SiO₂ 含量中等,砂岩 SiO₂ 含量要高于泥岩,平均 76.13%,泥岩

样品 SiO₂ 含量平均 51.34%;泥岩 CaO 含量远高于砂岩,平均达 28.02%,而砂岩 CaO 含量均值仅为 4.78%;泥岩中 K₂O 相对富集,平均 2.81%,砂岩 K₂O 含量均值为 1.92%;砂岩中 Na₂O 含量要远高于泥岩,砂、泥岩 Na₂O 含量均值分别为 1.15%与 0.23%。Al₂O₃ 含量中等,介于 6.87%~14.21%之间,平均 9.94%;TF_{Fe}O₃ + MgO 含量中等,最大 9.73%,最小 3.72%,平均 5.67%。将扣除烧失量并进行过 CaO、K₂O 含量校正后的数据与大陆上地壳进行比较(图 3a)。校正后的砂泥岩样品主量元素 SiO₂、Al₂O₃、TF_{Fe}O₃、MgO 及 TiO₂ 含量差别不大、与大陆上地壳极为接近;CaO、K₂O、MnO 及 P₂O₅ 均明显低于大陆上地壳,砂泥岩中 K₂O、MnO、P₂O₅ 均表现为一致的弱—中等亏损;Na₂O 与 CaO 在砂泥岩中亏损程度不一,泥岩极其强烈亏损 Na₂O,但砂岩则表现为 Na₂O 中等亏损,泥岩 CaO 亏损强烈,但砂岩中 CaO 亏损不明显。

黏土岩类贫长石、石英等矿物,因此泥岩中 SiO₂ 含量偏低。黏土矿物的层状铝硅酸盐骨架间缝、孔隙十分发育,这利于成岩流体顺畅交互,因此黏土岩类更容易发生方解石的胶结与交代,这导致泥岩中 CaO 强烈富集。石灰沟组上下均发育大套碳酸盐岩,提供了足够的 Ca²⁺ 离子物质基础。参照

续表 1

样品编号	DMG16	DMG17	DMG18	DMG19	DMG20	DMG21	DMG22	DMG23	DMG24	DMG25	DMG26	DMG27	DMG28	DMG29	DMG30
岩性	砂岩	砂岩	砂岩	砂岩	砂岩	砂岩	砂岩	砂岩	砂岩	砂岩	砂岩	砂岩	砂岩	砂岩	泥岩
Al ₂ O ₃	9.23	8.20	10.38	13.30	10.65	9.92	10.22	8.95	8.44	9.11	10.46	6.78	8.08	9.24	8.09
CaO	8.17	3.73	6.52	3.34	2.73	3.44	10.23	3.77	4.84	6.71	3.30	4.86	5.79	5.04	23.60
Fe ₂ O ₃	4.01	2.46	4.13	6.25	4.13	3.71	4.15	3.28	3.17	4.16	3.47	2.57	2.47	3.39	3.16
K ₂ O	1.52	1.43	1.97	2.57	2.01	1.80	2.00	1.64	1.38	1.49	2.05	1.14	1.52	1.72	2.20
MgO	1.75	1.14	2.00	2.86	1.90	1.78	2.12	1.51	1.50	1.71	1.67	1.11	1.14	1.51	1.66
Na ₂ O	1.26	1.12	1.11	1.00	1.03	1.18	1.04	1.05	1.19	1.22	1.16	0.94	1.09	1.11	0.14
SiO ₂	63.90	76.44	65.52	63.40	71.73	72.33	58.75	73.83	72.31	66.48	71.83	76.28	72.09	71.24	38.80
Ce	70.40	70.20	52.40	61.60	65.50	63.70	66.90	64.70	67.90	57.20	70.10	54.20	63.60	63.70	47.80
Co	5.70	3.10	7.80	9.60	6.50	5.40	7.20	5.00	4.30	4.40	5.60	2.80	3.60	5.10	6.10
Cr	32.00	26.00	40.00	63.00	41.00	37.00	45.00	31.00	28.00	34.00	42.00	22.00	25.00	34.00	41.00
Hf	2.60	4.90	2.60	2.70	4.00	3.50	3.30	4.70	4.00	3.10	3.90	4.20	3.20	3.30	1.60
La	34.70	35.20	26.30	31.00	33.50	31.90	34.20	30.80	31.40	29.00	37.70	27.70	33.60	32.60	26.50
Dy	5.20	4.00	3.50	4.20	3.10	3.60	4.00	3.80	3.70	5.30	3.60	3.90	4.30	4.00	2.60
Er	3.20	2.80	2.30	2.90	2.10	2.50	2.50	2.50	2.60	3.00	1.90	2.20	2.50	2.20	1.50
Eu	1.30	0.90	1.10	1.10	0.90	0.90	1.20	1.00	1.00	1.20	0.90	1.00	1.20	1.10	0.70
Gd	5.60	5.00	4.40	4.70	3.70	4.10	4.30	4.60	4.30	5.70	4.20	4.00	4.60	4.70	3.00
Ho	1.00	0.80	0.70	0.80	0.70	0.70	0.70	0.80	0.80	1.00	0.70	0.80	0.80	0.80	0.50
Lu	0.50	0.40	0.30	0.40	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.40	0.30	0.30	0.40	0.30	0.20
Nd	29.00	29.00	23.80	27.80	24.70	26.20	27.40	28.40	26.60	29.60	28.70	25.40	29.80	29.10	20.80
Pr	7.10	7.30	6.20	7.00	6.60	6.80	7.20	7.50	6.80	6.30	6.70	5.70	6.80	6.30	5.20
Sm	6.70	6.00	5.60	5.90	5.10	5.40	5.70	6.00	5.70	6.40	5.00	4.80	5.40	5.50	3.40
Tb	0.80	0.70	0.60	0.70	0.50	0.60	0.70	0.60	0.60	0.90	0.70	0.60	0.80	0.70	0.40
Tm	0.50	0.40	0.40	0.40	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40	0.50	0.30	0.40	0.40	0.30	0.20
Yb	2.60	2.50	2.00	2.50	2.00	2.10	2.20	2.30	2.20	2.90	1.90	2.20	2.40	2.20	1.40
Nb	80.20	156.00	79.50	87.10	127.00	119.00	122.00	147.50	131.00	103.50	134.50	137.50	107.00	113.00	48.70
Ni	64.50	66.90	54.40	62.20	60.40	62.50	66.20	67.20	63.40	61.90	69.20	57.90	68.30	64.70	47.30
Pb	5.20	4.00	3.50	4.20	3.10	3.60	4.00	3.80	3.70	5.30	3.60	3.90	4.30	4.00	2.50
Rb	3.20	2.80	2.30	2.90	2.10	2.50	2.50	2.50	2.60	3.00	1.90	2.20	2.50	2.20	1.50
Sc	1.30	0.90	1.10	1.10	0.90	0.90	1.20	1.00	1.00	1.20	0.90	1.00	1.20	1.10	0.80
Sr	5.60	5.00	4.40	4.70	3.70	4.10	4.30	4.60	4.30	5.70	4.20	4.00	4.60	4.70	3.10
Ta	1.00	0.80	0.70	0.80	0.70	0.70	0.70	0.80	0.80	1.00	0.70	0.80	0.80	0.80	0.50
Th	0.50	0.40	0.30	0.40	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.40	0.30	0.30	0.40	0.30	0.20
U	7.10	7.30	6.20	7.00	6.60	6.80	7.20	7.50	6.80	6.30	6.70	5.70	6.80	6.30	5.30
V	6.70	6.00	5.60	5.90	5.10	5.40	5.70	6.00	5.70	6.40	5.00	4.80	5.40	5.50	3.80
Y	0.50	0.40	0.40	0.40	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40	0.50	0.30	0.40	0.40	0.30	0.20
Zn	2.60	2.50	2.00	2.50	2.00	2.10	2.20	2.30	2.20	2.90	1.90	2.20	2.40	2.20	1.40

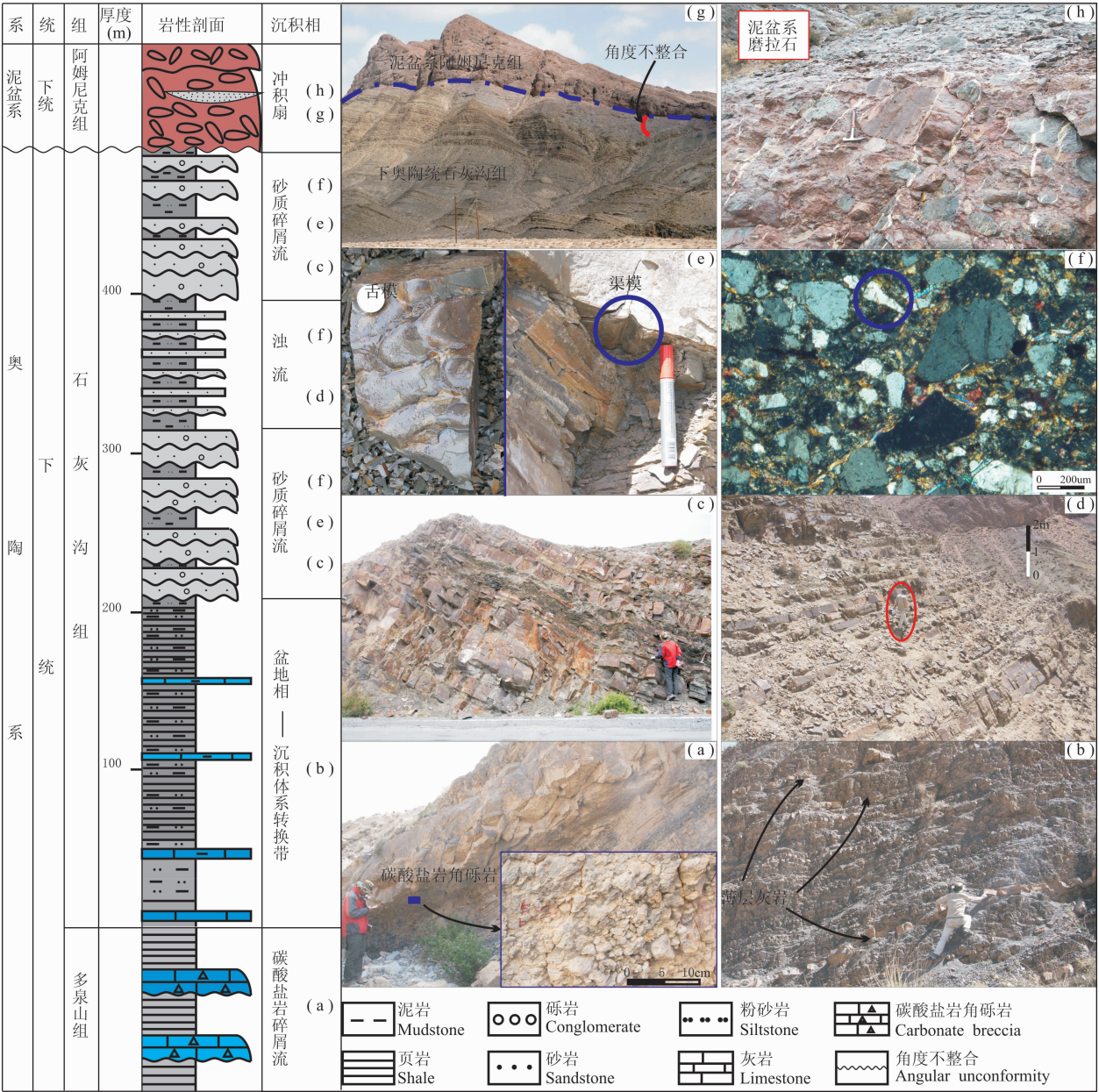


图 2 大煤沟剖面石灰沟组沉积特征及典型照片

Fig. 2 Typical photos of Shihuigou Formation sedimentary features in Dameigou outcrop

(a)一大煤沟南多泉山组碳酸盐岩角砾岩;(b)一大煤沟南石灰沟组下部暗色泥岩夹薄层灰岩;(c)一大煤沟南石灰沟组上部砂岩夹泥岩;(d)一大煤沟南石灰沟组上部砂岩、泥岩互层;(e)一大煤沟南石灰沟组上部浊积岩特征沉积构造;(f)一石灰沟组上部砂岩典型镜下照片(50×,+);(g)一大煤沟泥盆系与复理石角度不整合接触;(h)一大煤沟泥盆系磨拉石

(a)—Carbonate breccia of Duoquanshan Formation in south Dameigou outcrop;(b)—dark mudstone folder thin-layer limestone of lower Shihuigou Formation in south Dameigou outcrop;(c)—sandstone folder mudstone of upper Shihuigou Formation in south Dameigou outcrop;(d)—sand and mudstone interbedding of upper Shihuigou Formation in south Dameigou outcrop;(e)—typical sedimentary structures of turbidite in upper Shihuigou Formation in south Dameigou outcrop;(f)—typical sandstone microscopic photographs of upper Shihuigou Formation in south Dameigou outcrop;(g)—unconformity between Devonian and flysch in south Dameigou outcrop;(h)—Devonian molasses in south Dameigou outcrop

Nesbitt et al. (1982) 以及 Fedo et al. (1995) 的 CaO 校正公式, 泥岩与砂岩中 CaO 的摩尔百分含量远高于 Na₂O 摩尔百分含量, 几乎全部 CaO 来自成

岩作用。相对砂岩样品, 泥岩高 K₂O 含量、低 Na₂O 含量可能与成岩过程中高岭石向蒙脱石、伊利石的转换导致的极强的钾交代有关。应该说, 石灰沟组

碎屑岩样品存在明显的成岩后生改造,这是早古生代碎屑岩储层的普遍特征,故而稳定性较弱的碱金属氧化物 Na_2O 、 K_2O 及 CaO 并不适宜作为判别指标,在使用主量元素分析物源、构造环境的时候,必须先对 CaO 以及 K_2O 含量进行校正,具体方法见 Nesbitt et al. (1982)以及 Fedo et al. (1995)等的相关论述,后文中的主量元素判别图解及相关论述均使用校正后数值。

石灰沟组碎屑岩稀土元素含量(表 1)、特征比值及标准化后的分配型式(图 3c、d)显示, ΣREE 大多在 $110\sim165\ \mu\text{g/g}$ 之间,平均 $139\ \mu\text{g/g}$,明显低于北美页岩($173.21\ \mu\text{g/g}$),与大陆上地壳($146.37\ \mu\text{g/g}$)含量较为接近; La/Yb 大多在 $12\sim19$ 之间,平均为 15.43; $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 最大 11.36、最小 6.58,平均 9.23; $(\text{La/Yb})_{\text{N}}$ 平均 10.40,大多数介于 $8.3\sim13.3$ 之间; δEu 为 $0.49\sim0.72$,平均为 0.63,介于壳型花岗岩(0.46)与壳幔型花岗岩(0.84)之

间,呈中等—明显 Eu 负异常; δCe 均值 0.96,介于 $0.86\sim1.07$ 之间,无明显异常。球粒陨石标准化的稀土元素分配型式明显右倾,轻稀土富集,重稀土分异较弱, Eu 中等—强负异常, Ce 无明显异常(图 3c)。与北美页岩相比,除个别样品稀土元素含量偏低之外,其余样品各稀土元素含量极为接近北美页岩,北美页岩标准化的稀土元素分配型式曲线极为平坦(图 3d)。

特征微量元素大陆上地壳标准化的分配型式规律性不明显(图 3b), Rb、Pb、Sr、Ba 及 K 等大离子亲石元素(LILE)中等—强烈亏损,但 U、Th 以及 La、Ce 等轻稀土元素亏损不明显; Nb、Zr、Hf 及 Y 等高场强元素(HFSE)整体明显亏损, Zr、Hf、Y 弱亏损, Nb 强亏损; 相容元素 V、Sc、Co、Ni 等整体弱亏损。总体而言,绝大多数微量元素(包括 REE)与大陆上地壳(或北美页岩)较为接近,相容元素及高场强元素的明显亏损表明物源缺少铁镁物质质加

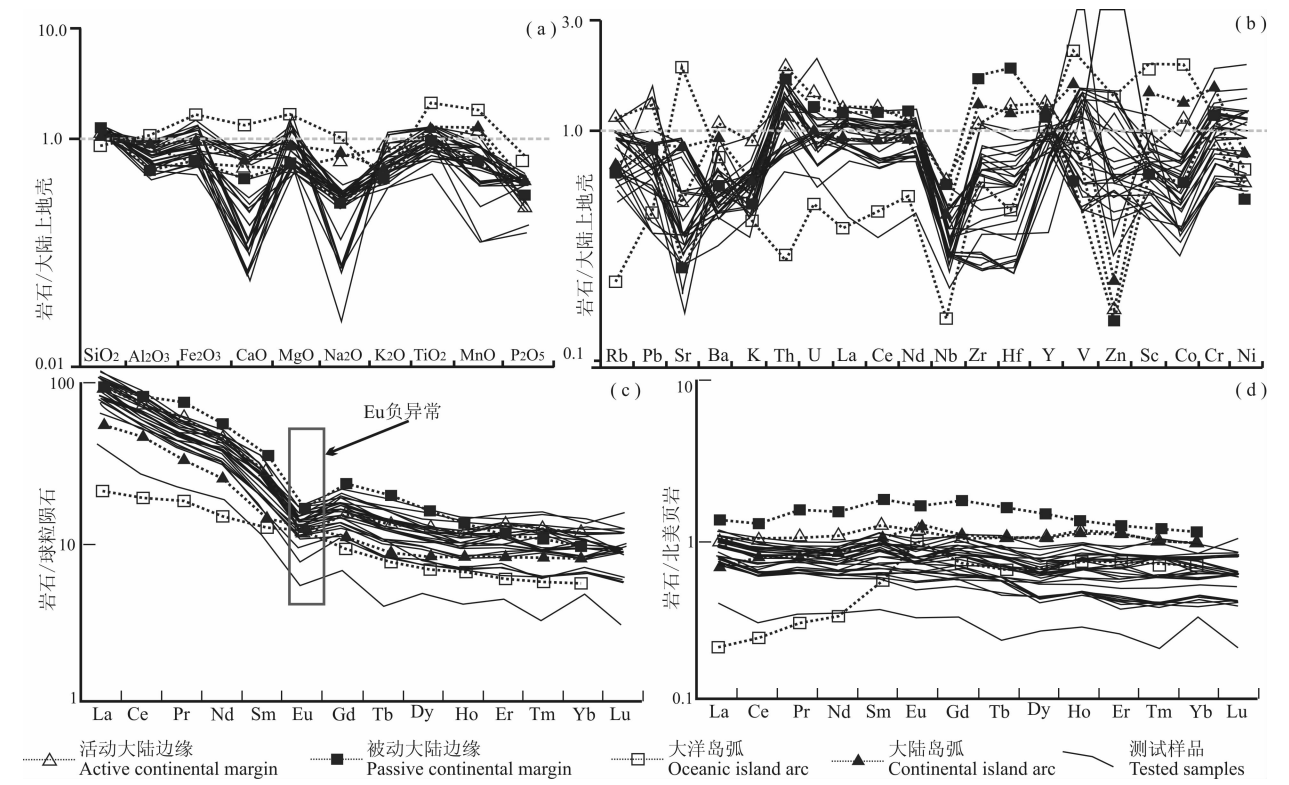


图 3 大煤沟剖面石灰沟组碎屑岩球粒陨石、北美页岩、大陆上地壳标准化蛛网图
(大陆上地壳数据引自 McLennan et al. ,1995)
Fig. 3 Chondrite, NASC, UCC normalized patterns of clastic rocks of Shihuigou Formation from Dameigou outcrop
(UCC date quote from McLennan et al. ,1995)
(a)—大陆上地壳标准化的特征主量元素蛛网图; (b)—大陆上地壳标准化的特征微量元素蛛网图;
(c)—球粒陨石标准化的稀土元素分布型式图; (d)—大陆上地壳标准化的稀土元素分布型式图
(a)—UCC normalized patterns of typical major elements; (b)—UCC normalized patterns of typical trace elements;
(c)—chondrite normalized REE diagrams; (d)—UCC normalized REE diagrams

入,也不存在明显的沉积再旋回。

3 源区岩石风化及再旋回

除受物源区岩石类型控制之外,沉积岩的化学成分还受化学风化以及沉积分选与再旋回等因素的影响,因此,使用沉积岩化学成分对其物源区岩石组合及地球化学特征进行推断之前,需要评估这些因素的影响,弱化学风化、弱沉积再循环的沉积岩才能客观地反映源区岩石特征。现阶段最常用的针对主量元素化学风化评估的参数为 CIA 指数及 A-CN-K 图解,针对微量元素的图解主要为 Th/U-Th 图解、Zr/Sc-Th/Sc 图解(图 4)。

衡量源岩遭受化学风化强度的化学蚀变指数(CIA)由 Nesbitt et al. (1982)提出,计算公式 $CIA = 100 \times [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)]$,式中各氧化物均为摩尔百分含量,CaO* 只包括硅质矿物中的 CaO,碳酸盐岩中的 CaO 需经过校正扣除,校正方法见 Fedo et al. (1995),并在 A-CN-K

三角图(修改自 Nesbitt and Young,1982)中进行投点。计算出来的 CIA 值介于 59.1~74.9 之间,平均 65.7,中等偏低的 CIA 值(图 4a)说明源区岩石化学风化程度不强,测试样品主量元素含量受源区岩石组合控制。A-CN-K 三角图中显示样品投点与 A-CN 边存在明显夹角,表明相对原始物质正常风化趋势存在钾的加入,暗示源区岩石存在一定程度钾交代(Nesbitt et al., 1982)。

大离子亲石元素 Th 在酸性岩中富集,而相容元素 Sc 则富集于基性岩类,Th/Sc 值一般不受沉积再循环影响(McLennan et al., 1990);Zr 主要赋存于锆石中,作为稳定矿物的锆石随沉积再旋回而富集,因此 Zr 会明显增加且不受后期热液等的影响,Th/Sc-Zr/Sc 图解常被用来衡量沉积再循环程度(Lambeck et al., 2008)。在 Th/Sc-Zr/Sc 图解(图 4b,据 McLennan et al., 1993)中,所有样品大多位于成分演化线(BFG)附近,分布在 UCC 与 PAAS 周围,说明砂岩成分受源岩控制,不存在明显的沉积

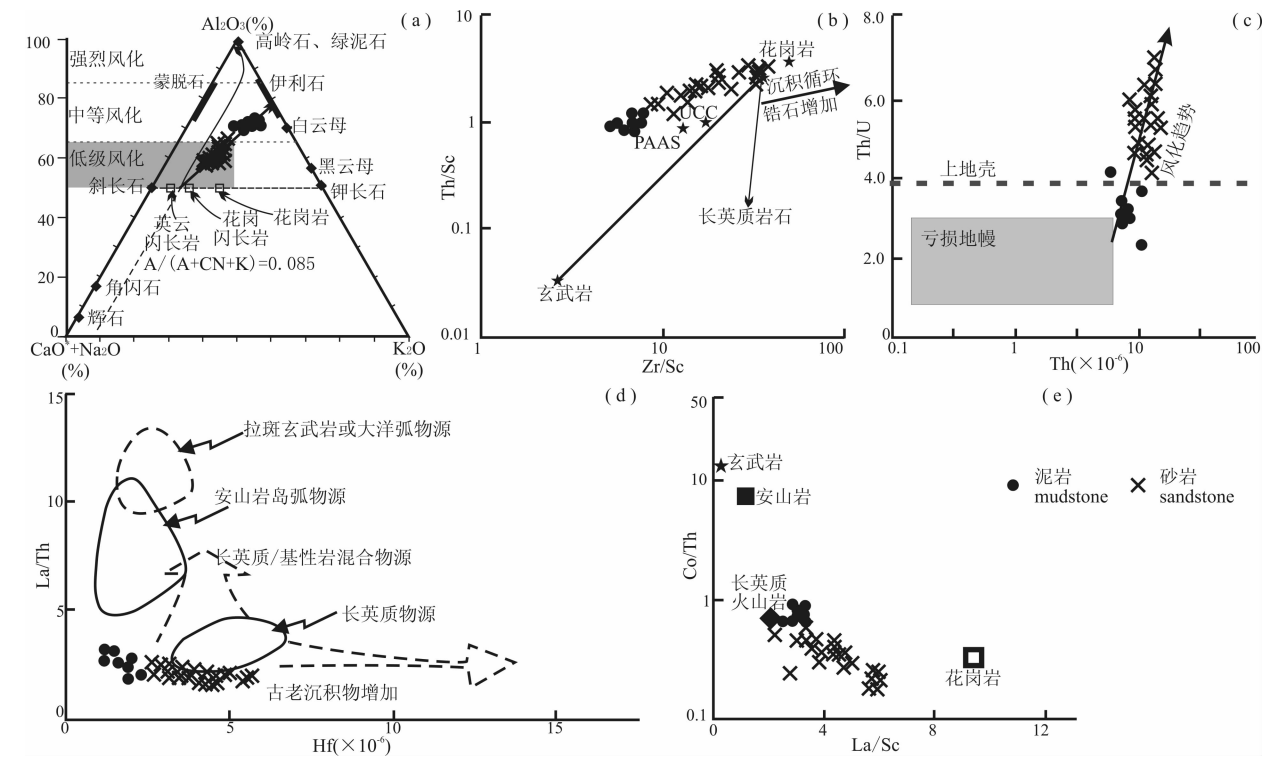


图 4 大煤沟地区石灰岩组碎屑岩源区风化强度及岩石学类型判别

Fig. 4 Weathering intensity and petrological types for clastic rocks of Shihuigou Formation from Dameigou area (a)—A-CN-K 判别图解(据 Nesbitt et al., 1982);(b)—Zr/Sc-Th/Sc 判别图解(据 Bhatia et al., 1986);(c)—Th-Th/U 判别图解(据 Bhatia et al., 1986);(d)—Hf-La/Th 判别图解(据 Bhatia et al., 1986);(e)—La/Sc-Co/Th 判别图解(据 Bhatia et al., 1986) (a)—A-CN-K discrimination diagram(after Nesbitt et al., 1982);(b)—Zr/Sc-Th/Sc discrimination diagram(after Bhatia et al., 1986);(c)—Th-Th/U discrimination diagram(after Bhatia et al., 1986);(d)—Hf-La/Th discrimination diagram(after Bhatia et al., 1986);(e)—La/Sc-Co/Th discrimination diagram(after Bhatia et al., 1986)

再旋回。而 Th-Th/U 图解(图 4c, 据 McLennan et al., 1993)中, 样品 Th/U 值均 <8 , 大多位于上地壳附近, 同样表明源区岩石未受强化学风化的影响。从 Th/Sc-Zr/Sc 及 Th-Th/U 判别关系来看, 石灰沟组碎屑岩源区风化强度中等, 样品中微量元素含量客观反映了源区岩石微量元素特征。

连续采集的 30 个样品来自同一物源区且风化强度一致, 但泥岩、砂岩样品在不同图解中分布状态存在明显差异。这种差异与砂岩、黏土岩类搬运-沉积过程中搬运方式的差异有关; 黏土岩类以悬浮搬运为主, 黏土矿物中富集 Al_2O_3 , 因此 A-CN-K 图中泥岩样品 CIA 值明显高于砂岩; Zr 在锆石中富集, 锆石以滚动搬运为主, 悬浮载荷中缺少锆石, 因此黏土岩类 Zr 含量明显偏低, 所以在 Th/Sc-Zr/Sc 图解中泥岩样品偏左; 表生环境下, Th 只有+4 价且不易溶解, 在真溶液、胶体中不富集, 主要作为颗粒一部分随碎屑物质进入盆地, 因此悬浮搬运形成的黏土岩类贫 Th, 导致 Th/Sc、Th/U 值偏低, 在 Th/Sc-Zr/Sc 图解中泥岩样品偏下, Th-Th/U 图解中泥岩样品偏左下。从该角度来看, 碎屑岩类的地球化学特征在某种程度上受搬运过程影响, 在判别过程中应尽量挑选难溶元素以及近物源搬运的砂级碎屑岩进行判别。

综上, 从 A-CN-K 图解及 Th/Sc-Zr/Sc、Th-Th/U 图解判别结果来看, 石灰沟组碎屑岩源区未受到强化学风化的影响, 也不存在再旋回物质的加入, 因此, 碎屑岩近乎完整地保存了源区岩石组合信息, 岩石地球化学成分可以客观反映源区物质组成及构造背景。同时, 较低的 CIA 值、偏弱的风化程度也表明物源区具有快速风化、快速剥蚀的特征, 这种高的风化-剥蚀速率客观地反映了当时较为活动的构造背景及盆山落差。

4 源区岩石类型及构造环境

主微量元素分析测试结果(表 1)、元素蛛网图(图 2)中绝大多数样品相同元素含量变化较小, 变化趋势一致, 表明各样品之间亲缘关系密切, 来自同一物源。考虑到主量元素中碱金属氧化物在剥蚀、搬运、沉积及成岩各阶段均具有较强的迁移性, 本次选用稳定主量元素及稀土元素、微量元素对源区岩石组合及构造背景进行分析。

表生状态的沉积物中 Fe、Ti、Mg 元素不易流失且在水体中停留时间较短, 基本可以代表母源的原始含量, 因此碎屑岩中的 Fe、Ti、Mg 氧化物的含量

是反映源区地化特征及构造背景的良好参数(Bhatia et al., 1986)。石灰沟组碎屑岩 SiO_2 含量中等, 砂岩样品平均 76.13%, 泥岩样品 SiO_2 含量平均 51.34%; $TFe_2O_3 + MgO$ 中等(平均 5.67%), TiO_2 中等富集(平均 3.96%), 表明源区岩石贫铁镁质矿物, 以中酸性物质为主。从大陆上地壳标准化的分布型式图(图 3a)也可以明显看出, 岩石地球化学特征与大洋岛弧极不一致, 而与大陆岛弧、活动大陆边缘极为相似。

球粒陨石标准化的稀土元素分配型式图(图 3c)中测试样品呈现明显的 Eu 负异常, 北美页岩标准化的稀土元素分配型式图(图 3d)中稀土元素分配曲线平坦, 明显不同于大洋岛弧岩石稀土元素分配型式。此外, 在球粒陨石、北美页岩标准化的稀土元素分配曲线中, 各稀土元素标准化值几乎全部位于被动大陆边缘之下, 表现出与大陆岛弧及活动大陆边缘较为接近的特点。

大陆上地壳标准化的特征微量元素蛛网图中(图 3b), 相容元素不富集而且 Sr 强烈亏损, 均不同于以基性岩类为主的大洋岛弧。高场强元素弱-强烈亏损, Rb、Pb、Sr 及 K 等大离子亲石元素亏损, Th、U 及 LREE 无明显亏损, 显示出源区岩石以中酸性岩类为主的特点。整体来看, 测试样品的微量元素更接近于大陆岛弧、活动大陆边缘环境砂岩, 与大洋岛弧、被动大陆边缘存在较大不同。

在 Hf-La/Th 图解(图 4d, 修改自 Floyd et al., 1987)中全部样品均远离安山质、玄武质物源区, 一致落在长英质、长英质/基性岩混合物源区范围内。La/Sc-Co/Th 图解(图 4e, 据 Gu et al., 2002)表明, 相容元素 Sc 含量远低于轻稀土元素 La, 大离子亲石元素 Th 含量则略高于相容元素 Co, 全部投点均落在长英质火山岩与花岗岩之间, 更接近于长英质火山岩。

综上所述, 石灰沟组碎屑岩碎屑物质来自上地壳中酸性岩类, 与大洋岛弧完全不同, 从主量元素、稀土元素及微量元素含量来看, 绝大多数样品微量元素含量均明显低于被动大陆边缘型物源区, 一致表现出与大陆岛弧、活动大陆边缘较为接近的地球化学特征。

在物源区分析的基础上, 使用 Bhatia et al. (1986)提出的构造环境判别图(图 5a、b、c)对该套复理石建造沉积期构造环境进行判别。判别结果显示绝大多数样品落于活动大陆边缘范围内, 少量数值点落在大陆岛弧范围内(图 5), 也表现出与大洋

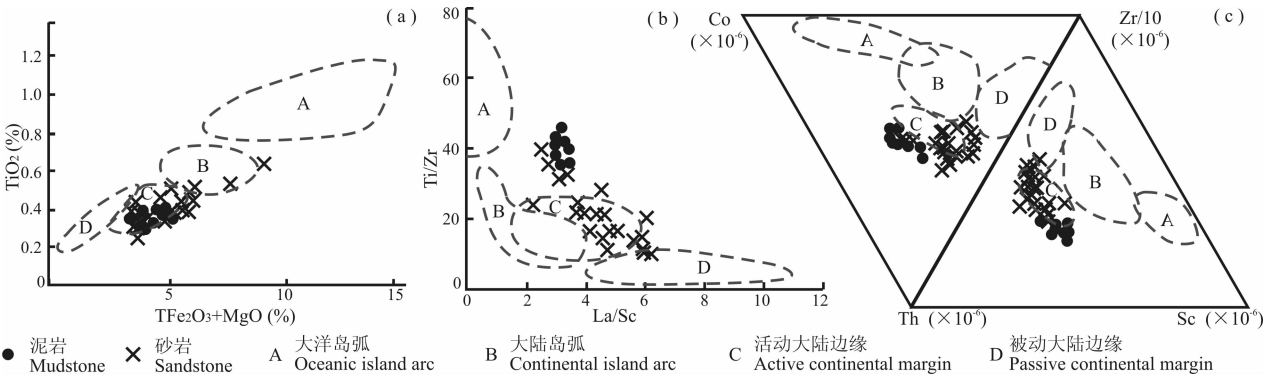


图 5 大煤沟地区石灰沟组碎屑岩构造环境判别图(据 Bhatia et al. ,1986)

Fig. 5 Tectonic setting discrimination for clastic rock of Shihuigou Formation from Dameigou area (after Bhatia et al. ,1986)

(a)—TFe₂O₃-TiO₂ 判别图解及结果;(b)—La/Sc-Ti/Zr 判别图解及结果;(c)—Th-Zr/10-Co 及 Zr/10-Th-Sc 判别图解及结果

(a)—TFe₂O₃-TiO₂ discrimination diagram and result;(b)—La/Sc-Ti/Zr discrimination diagram and result;

(c)—Th-Zr/10-Co and Zr/10-Th-Sc discrimination diagram and result

岛弧、被动大陆边缘明显不同的特点。

5 讨论

现阶段,柴北缘洋陆俯冲及陆弧碰撞的起始时限尚存在一定争议;Zhu Xiaohui et al. (2014)则认为俯冲开始于寒武纪初,Xu Zhiqin et al. (2003)及 Ren Junhu(2010)认为晚寒武世—早奥陶世开始柴北缘洋盆向北俯冲,也有学者认为俯冲约在 450 Ma(晚奥陶世)开始(Li Feng et al. ,2007);现阶段不少观点倾向于柴北缘洋盆消失、陆弧碰撞开始于中奥陶世晚期—晚奥陶世(Wu Cailai et al. ,2004; Hao Guojie,2004; Xin Houtian et al. , 2006; Ren Junhu, 2010; Zhu Xiaohui et al. ,2014)。

从研究现状来看,柴达木东北部地区早古生代大地构造演化的研究主要从柴北缘构造带早古生代岩浆、变质作用角度开展,未见沉积学证据的支撑。因此,需要从构造-岩浆-变质-沉积的角度综合探讨柴达木东北部早古生代构造演化,为柴北缘洋陆俯冲及陆弧碰撞的研究提供沉积学证据的约束。

5.1 石灰沟组碎屑岩物源及构造背景

沉积盆地构造环境判别结果表明,早古生代欧龙布鲁克地块位于滩间山岛弧及欧南弧后盆地北部,盆地类型不是早先一致认为的柴北缘洋盆北侧被动大陆边缘盆地(Feng Zengzhao et al. ,2000; Yuan Zhentao,2009)。石灰沟组碎屑岩镜下鉴定未发现碳酸盐岩岩屑,而欧龙布鲁克地块寒武纪—早奥陶世早期沉积了数千米厚的碳酸盐岩,无法想象如此厚的碳酸盐岩中存在一条碎屑颗粒运移通道,

且通过该通道搬运的碎屑物质所形成的砂岩内不含碳酸盐岩岩屑。石灰沟组这套厚层、多期次、不同层次非稳定性的浊积岩形成暗示源区构造活动较强、应力释放频繁、物质充足且搬运路径坡角较陡,故而碎屑颗粒成分成熟度、结构成熟度较低,具明显近物源沉积特征,这些证据都不支持碎屑颗粒来自北部祁连地块腹地。碎屑岩地球化学分析结果表明,石灰沟组复理石形成于与活动大陆边缘相关的沉积盆地,碎屑物质主要来源于隆升的陆壳基底(Bhatia et al. ,1986),但物源区也包含大量大陆岛弧物质,这在很多碎屑岩地球化学参数上均有明显的响应,前人研究也证实早奥陶世大陆岛弧物质依旧存在(Yuan Guibang et al. ,2002)。因此,石灰沟组碎屑岩物源区表现出大陆岛弧与上隆地壳双重属性,构成由大陆上地壳与大陆岛弧组成的上隆基底,石灰沟组砂泥岩碎屑物质应来自南部毗邻活动大陆边缘的滩间山陆-弧碰撞造山带(图 6)。

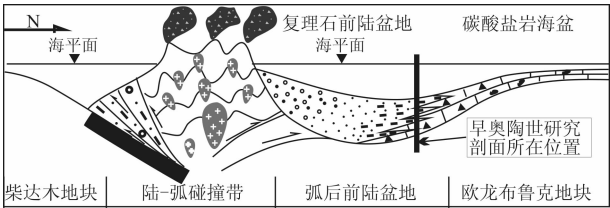


图 6 奥陶纪初期柴达木盆地北缘地区构造-沉积剖面简图

Fig. 6 Sketch structure-sedimentary section diagram of north Qaidam basin area in early Ordovician

5.2 对陆-弧碰撞起始时限约束

前文对石灰沟组碎屑岩构造环境及源区特征的分析表明,早奥陶世(488~472 Ma)开始,由于陆源碎屑的向北超覆,欧龙布鲁克地块南缘大煤沟南、城墙沟一带由早期发育的自北向南展布的碳酸盐岩沉积体系(Feng Zengzhao et al., 2000; Yuan Zhentao, 2009)转为自南向北展布的陆源碎屑岩沉积体系,因此石灰沟组下部连续沉积的暗色泥页岩中存在一个岩石学类型、沉积相类型、沉积体系展布方向转换界面(图2、6、7)。弧后盆地扩张阶段,弧后海盆加深、变大,岛弧与台地之间距离加大,碎屑物质下超点会越来越远离台地,该沉积转换、复理石的远端上超表明弧后盆地已经开始消亡、转为挤压背景下的弧后前陆盆地,该沉积转换是对柴达木地块与滩间山岛弧碰撞的响应。考虑到大煤沟南、城墙沟位置偏北,对活动大陆边缘陆源碎屑沉积响应存在一定时间滞后性,要更早于488~472 Ma陆-弧碰撞已经开始。Zhu Xiaohui et al. (2014)研究表明直至493 Ma弧后盆地依旧处于扩张状态。那么,欧南弧后盆地由伸展盆地转为挤压盆地以及柴达木地块与滩间山岛弧陆-弧碰撞起始时间虽然晚于493 Ma、但早于~472 Ma。

5.3 柴达木盆地北缘地区早古生代构造-岩浆-变质-沉积演化

近些年,柴达木盆地北缘地区发表了大量与柴北缘构造带早古生代大地构造演化有关的研究成果,本节基于本次给出的沉积学、沉积地球化学证据,在前人建立的构造-岩浆-变质演化研究的基础上,从构造-岩浆-变质-沉积的角度综合探讨柴达木东北部早古生代构造演化,以求为柴北缘洋陆俯冲及陆弧碰撞的研究提供沉积学证据的约束。

柴北缘大陆裂谷形成于850~700 Ma(Wang Huichu et al., 2003; Zhu Xiaohui et al., 2015; Xin Houtian et al., 2006),裂谷的形成与Rodinia超大陆裂解有关(Sun Jiaopeng et al., 2014a; Chen Shiyue et al., 2015),大洋形成、扩张大致发生在700~535 Ma(Zhu Xiaohui et al., 2015)。

新元古代末期(580~540 Ma),柴达木地块与欧龙布鲁克地块开始靠拢,柴北缘洋洋壳开始自南向北俯冲于欧龙布鲁克地块之下,欧龙布鲁克地块南缘形成滩间山大陆边缘弧(Wang Huichu et al., 2003; Wang Huichu, 2006),滩间山岛弧构造带内开始发育岛弧变玄武岩(542 ± 13 Ma; Wang Huichu et al., 2003)与变辉长岩(535 ± 2 Ma; Zhu Xiaohui

et al., 2012)。该期伸展-挤压的转换事件造成欧龙布鲁克地块发生抬升,欧龙布鲁克山剖面全吉群顶部黑土坡组、红铁钩组及皱节山组遭受剥蚀,形成全吉群与下寒武统的角度不整合接触关系(Sun Jiaopeng et al., 2014b)。

535~500 Ma,洋壳向北俯冲于欧龙布鲁克地块之下,俯冲洋壳发生部分熔融,形成埃达克质英安岩(512.4 ± 8.5 Ma; SHI Rendeng et al., 2003),熔体残留体发生榴辉岩相变质作用(Wang Huichu, 2006)。500~475 Ma,洋壳继续俯冲,随着角闪岩相向榴辉岩相转变,岩石脱水形成的流体造成地幔楔和下地壳部分熔融,形成中基性—中酸性钙碱性系列火山岩(Wang Huichu et al., 2003)。柴北缘洋洋壳俯冲导致弧后地区发生伸展,欧南弧后盆地形成,535~493 Ma弧后洋盆的扩张(Zhu Xiaohui et al., 2014)造成隆起状态的欧龙布鲁克地块发生沉降,早寒武世发育蒸发台地相白云岩-紫红色泥岩混合沉积,寒武纪中晚期随着弧后扩张、沉降及海侵加剧,发育浅滩-台地相碳酸盐岩沉积,早奥陶世多泉山组沉积期发育滩-台缘斜坡滑动沉积(Sun Jiaopeng et al., 2014b);南侧靠近滩间山岛弧一带,主要发育火山岩-火山碎屑岩沉积,靠近盆地中心一带以砂质碎屑流、浊流发育为主要特点。

约475~435 Ma,柴北缘洋盆彻底消失,随后发生陆壳俯冲,俯冲陆壳岩石发生高压/超高压变质作用(458~420 Ma; Zhu Xiaohui et al., 2015)以及同碰撞S型花岗岩(450~440 Ma; Zhu Xiaohui et al., 2015)。大量侵入体的添加以及造山作用导致岛弧带发生褶皱加厚,岛弧带内发生中低角闪岩相-绿片岩相变质作用。柴达木地块-滩间山岛弧的陆弧碰撞导致欧南弧后盆地开始消亡,分布于滩间山岛弧构造带北侧的碎屑流、浊流沉积逐渐向北进积、超覆。早奥陶世(约475 Ma),碎屑物质超覆至大煤沟南、城墙沟一带,堆积在早期碳酸盐岩沉积体系之上,构成岩石学类型、沉积相类型、沉积体系展布方向的转换(图6、7)。

随后,持续的陆-弧、陆-弧-陆碰撞造成欧南弧后盆地彻底关闭、欧龙布鲁克地块早古生代海相沉积盆地消亡并发生反转遭受剥蚀,直至早泥盆世由于东昆仑、宗务隆以及兴海构造带的伸展才再次负反转、接受沉积(Sun Jiaopeng et al., 2015b)。

6 结论

石灰沟组碎屑岩沉积建造具有快速堆积、低成

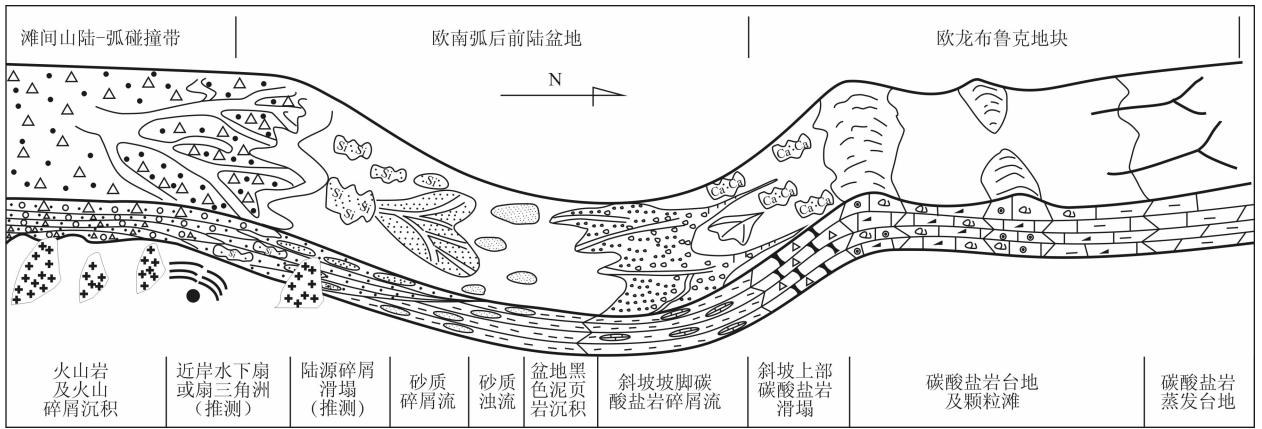


图 7 早古生代欧龙布鲁克地块南缘沉积模式简图

Fig. 7 Sketch sedimentary model diagram showing the Early Paleozoic tectono-paleogeography of south Oulongbuluke block

分成熟度、低结构成熟度的特点。地球化学结论表明该套碎屑岩沉积于活动大陆边缘背景下的弧后前陆盆地,碎屑物质来源于南部由大陆上地壳与岛弧物质组成的上隆基底,该时期陆-弧碰撞已经开始。

石灰沟组复理石沉积时限介于 488~472 Ma 之间,因此,柴达木地块与滩间山岛弧陆-弧碰撞起始时间要早于 488~472 Ma,但晚于 493 Ma,陆-弧碰撞时间下限要早于现阶段通过岩浆、变质事件等所推算出来的中一晚奥陶世。

早古生代欧龙布鲁克地块处于滩间山岛弧北部,盆地沉降、沉积演化受柴北缘洋盆俯冲及柴达木地块-滩间山岛弧碰撞控制,寒武纪为弧后伸展盆地,奥陶纪初期转为弧后挤压前陆盆地,弧后伸展与弧后挤压、沉积体系转换发生在 490~480 Ma 之间。

致谢:野外工作得到刘文平、张谦、段忠孝等同志的大力协助,高立祥博士审阅了初稿并给出了诸多意见,责任编辑和审稿专家多次给出宝贵修改意见,在此一并表示衷心的感谢。

References

Bhatia M R, Crook K W. 1986. Trace element characteristics of greywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 92: 181~193.

Chen Shiyue, Sun Jiaopeng, Liu Wenping, Zhang Yue, Zhang Yukai, MA Shuai, Liu Yao. 2015. The discovery of Neoproterozoic tillite in the Dameigou region of Qinghai province and its geological significance. *Journal of Stratigraphy*, 39 (1): 81~88 (in Chinese with English abstract).

Fedo C M, Nesbitt H W. 1995. Unravelling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with

implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23: 921~924.

Feng Zengzhao, Zhang Jiaqiang, JIN Zhenkui, BAO Zhidong, Wang Guoli. 2000. Lithofacies palaeogeography of the Ordovician in Northwest China. *Journal of Palaeogeography*, 2 (03): 1~14 (in Chinese with English abstract).

Floyd P A, Leveridge B E. 1987. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho Basin, South Cornwall: Framework mode and geochemical evidence from turbidities and stones. *Journal of the Geological Society*, 144 (4): 531~542.

Gu X X, Liu J M, Zheng M H, Tang J X, Qi L. 2002. Provenance and tectonic setting of the Proterozoic turbidites in Hunan, South China: Geochemical evidence. *Journal of Sedimentary Research*, 72 (3): 393~407.

Lambeck A, Huston D, Maidment D, Peter S. 2008. Sedimentary geochemistry, geochronology and sequence stratigraphy as tools to typecast stratigraphic units and constrain basin evolution in the gold mineralized Palaeoproterozoic Tanami Region, Northern Australia. *Precambrian Research*, 166: 185~203.

LI Feng, WU Zhiliang, LI Baozhu. 2007. Recognition on formation age of the Tanjianshan Group on the northern margin of the Qaidam basin and its geological significance. *Geotectonica et Metallogenia*, 31 (02): 226~233 (in Chinese with English abstract).

McLennan S M, Taylor S R, McCulloch M T, Maynard J B. 1990. Geochemical and Nd-Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: crustal evolution and plate tectonic associations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43: 375~388.

McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K, Hanson G N. 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics. *GSA Special Papers*, 284: 21~40.

McLennan S M, Hemming S R, Taylor S R, Eriksson K A. 1995. Early Proterozoic crustal evolution: Geochemical and Nd-Pb isotopic evidence from metasedimentary rocks, southwestern North America. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59 (6): 1153~1173.

Nesbitt H M, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299: 715~717.

Ren Junhu. 2010. A study on tectonic evolution during the period of

- Nanhua to Devonian at the north and south of Qaidam basin. Xi'an: Northwest University (in Chinese with English abstract).
- SHI Rendeng, Yang Jingsui, WU Cailai. 2003. The discovery of adakitic dacite in Early Palaeozoic island arc volcanic rocks on the northern margin of Qaidam basin and its geological significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(3): 229~236 (in Chinese with English abstract).
- SHI Rendeng, Yang Jingsui, WU Cailai, TSUYOSHI IIZUKA, TAKAFUMI HIRATA. 2004. Island arc volcanic rocks in the north Qaidam UHP metamorphic belt. *Acta Geologica Sinica*, 78(01): 52~64 (in Chinese with English abstract).
- Sun Jiaopeng, Chen Shiyue, PENG Yuan, HU Zhongya, Zhang Yukai, MA Shuai, Liu Yao. 2014a. Features of Neoproterozoic Glaciomarine sedimentary in Quanjia area and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 88(07): 1134~1140 (in Chinese with English abstract).
- Sun Jiaopeng, Chen Shiyue, HU Zhongya, Liu Wenping, GUO Chen, MA Shuai. 2014b. Research on the mixed model and developmental characteristic of the clastic-carbonate diamictite facies in the northern Qaidam. *Natural Gas Geoscience*, 25(10): 1586~1593 (in Chinese with English abstract).
- Sun Jiaopeng, Chen Shiyue, PENG Yuan, SHAO PengCheng, MA Shuai, Liu Jin. 2015a. Determination of Early Cambrian Zircon SHRIMP U-Pb datings in Zongwulong tectonic belt, northern margin of Qaidam Basin and its geological significance. *Geological Review*, 61(4): 743~751 (in Chinese with English abstract).
- Sun Jiaopeng, Chen Shiyue, PENG Yuan, Liu Wenping, Zhang Yukai. 2015b. Research on Northern Qaidam tectonic attributes during Devonian. *Journal of China University of Petroleum (Edition of natural Sciences)*, 39(02): 23~30 (in Chinese with English abstract).
- Sun Jiaopeng, Chen Shiyue, PENG Yuan, SHAO Pengcheng, MA Shuai, Liu Jin. 2015c. Provenance and tectonic background of the Lower Ordovician flysch in Oulongbuluke microplate. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 39(05): 27~35 (in Chinese with English abstract).
- Sun Linhua, GUI Herong, Chen Song, MA Yanping, Wang Guiliang. 2010. Provenance and tectonic setting of the Neoproterozoic diamictites from JiaYuan Formation in northern Anhui Province: evidence from geochemical study. *Acta Geoscientia Sinica*, 31(6): 833~842 (in Chinese with English abstract).
- Sun Linhua, GUI Herong. 2011. Transition of Neoproterozoic tectonic background in northern Anhui Province: evidence from geochemistry of clastic rocks. *Acta Geoscientia Sinica*, 32(5): 523~532 (in Chinese with English abstract).
- Wang Huichu, LU Songnian, Yuan Guibang, Xin Houtian, Zhang Baohua, Wang Qinghai, Tian Qi. 2003. Tectonic setting and age of the "Tanjianshan Group" on the northern margin of the Qaidam basin. *Geological Bulletin of China*, 22(07): 487~493 (in Chinese with English abstract).
- Wang Huichu. 2006. Early Paleozoic Collisional Orogeny and Magmatism on Northern Margin of the Qaidam Basin. Beijing: China University of Geoscience (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Xin Houtian, Wang Huichu, Zhou Shijun. 2006. Geological events and tectonic evolution of the north margin of the Qaidam basin. *Geological Survey and Research*, 29(04): 311~320 (in Chinese with English abstract).
- Qinghai Bureau of Geology and Mineral Resources. 1991. Regional Geology of Qinghai Province. Beijing: Geological Publishing House, 1~741. (in Chinese without English abstract).
- XU Zhiqin, Yang Jingsui, WU Cailai, LI Haibing, Zhang JianXin, QI Xuexiang, SONG Shuguang, WAN Yusheng, Chen Wen, QIU Haijun. 2003. Timing and mechanism of formation and exhumation of the Qaidam Ultra-Pressure metamorphic belt. *Acta Geologica Sinica*, 77(02): 163~176 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Guibang, Wang Huichu, LI Huimin, HAO Guojie, Xin Houtian, Zhang Baohua, Wang Qinghai, Tian Qi. 2002. Zircon U-Pb age of the gabbros in Luliangshan area on the northern margin of Qaidam basin and its geological implication. *Progress in Precambrian Research*, 25(01): 36~38+37~40 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Zhentao. 2009. Lower Paleozoic lithofacies and paleogeography in Olongbluk fields. Shandong University of Science and Technology (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiaohui, Chen Danling, Liu Liang, Wang Chao, Yang Wenqiang, Cao Yuting, Kang Lei. 2012. Chronology and geochemistry of the mafic rocks in Xitieshan area, North Qaidam. *Geological Bulletin of China*, 31(12): 2079~2089 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiaohui, Chen Danling, Liu Liang, Zhao Jiao, Zhang Le. 2014. Geochronology, geochemistry and significance of the Early Paleozoic retroarc type ophiolite in Luliangshan area, North Qaidam. *Acta Petrologica Sinica*, 30(3): 822~834 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiaohui, Chen Danling, Wang Chao, Wang Hong, Liu Liang. 2015. The initiation, development and termination of the Neoproterozoic-Early Paleozoic ocean in the northern margin of Qaidam basin. *Acta Geologica Sinica*, 89(2): 234~251 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 陈世悦,孙娇鹏,刘文平,张跃,庄毓凯,马帅,刘姚. 2015. 青海大煤沟新元古代冰碛岩的发现及地质意义. *地层学杂志*, 39(1): 81~88.
- 冯增昭,张家强,金振奎,鲍志东,王国力. 2000. 中国西北地区奥陶纪岩相古地理. *古地理学报*, 2(03): 1~14.
- 李峰,吴志亮,李保珠. 2007. 柴达木北缘滩间山群时代及其地质意义. *大地构造与成矿学*, 31(02): 226~233.
- 任军虎. 2010. 柴达木盆地南、北缘南华-泥盆纪构造演化. 陕西: 西北大学博士学位论文.
- 史仁灯,杨经绥,吴才来. 2003. 柴北缘早古生代岛弧火山岩中埃达克质英安岩的发现及其地质意义. *岩石矿物学杂志*, 22(3): 229~236.
- 史仁灯,杨经绥,吴才来, Tsuyoshi Iizuka, Takafumi Hirata. 2004. 柴达木北缘超高压变质带中的岛弧火山岩. *地质学报*, 78(01): 52~64.
- 孙娇鹏,陈世悦,彭渊,胡忠亚,庄毓凯,马帅,刘姚. 2014a. 全吉地区新元古代滨岸冰川沉积特征及地质意义. *地质学报*, 88(07): 1134~1140.
- 孙娇鹏,陈世悦,胡忠亚,刘文平,郭晨,马帅. 2014b. 柴达木北缘古生代碎屑岩-碳酸盐岩混积相发育特征及组合模式研究. *天然气*

- 地球科学, 25(10):1586~1593.
- 孙娇鹏, 陈世悦, 彭渊, 邵鹏程, 马帅, 刘金. 2015a. 柴达木盆地北缘宗务隆构造带早古生代锆石 SHRIMP 年龄的测定及其地质意义. 地质论评, 61(4):743~751.
- 孙娇鹏, 陈世悦, 彭渊, 刘文平, 庄毓凯. 2015b. 柴北缘构造带泥盆纪构造属性研究. 中国石油大学学报(自然科学版), 39(02):23~30.
- 孙娇鹏, 陈世悦, 彭渊, 邵鹏程, 马帅, 刘金. 2015c. 欧龙布鲁克微地块下奥陶统复理石物源和构造背景研究. 中国石油大学学报(自然科学版), 39(05):27~35.
- 孙林华, 桂和荣, 陈松, 马艳平, 王桂梁. 2010. 皖北新元古代贾园组混积岩物源和构造背景的地球化学示踪. 地球学报, 31(6):833~842.
- 孙林华, 桂和荣. 2011. 皖北地区新元古代构造背景的转换:来自碎屑岩地球化学的证据. 地球学报, 32(5):523~532.
- 王惠初, 陆松年, 袁桂邦, 辛后田, 张宝华, 王青海, 田琪. 2003. 柴达木盆地北缘滩间山群的构造属性及形成时代. 地质通报, 22(07):487~493.
- 王惠初. 2006. 柴达木盆地北缘早古生代碰撞造山及岩浆作用. 北京:中国地质大学(北京)博士学位论文.
- 辛后田, 王惠初, 周世军. 2006. 柴北缘的大地构造演化及其地质事件群. 地质调查与研究, 29(04):311~320.
- 青海省地质矿产局. 1991. 青海省区域地质志. 北京:地质出版社, 1~741.
- 许志琴, 杨经绥, 吴才来, 李海兵, 张建新, 戚学祥, 宋述光, 万渝生, 陈文, 邱海峻. 2003. 柴达木北缘超高压变质带形成与折返的时限及机制. 地质学报, 77(02):163~176.
- 袁桂邦, 王惠初, 李惠民, 郝国杰, 辛后田, 张宝华, 王青海, 田琪. 2002. 柴北缘绿梁山地区辉长岩的锆石 U-Pb 年龄及意义. 前寒武纪研究进展, 25(01):36~38+37~40.
- 袁振涛. 2009. 欧龙布鲁克下古生界岩相古地理研究. 山东:山东科技大学硕士学位论文.
- 朱小辉, 陈丹玲, 刘良, 王超, 杨文强, 曹玉亭, 康磊. 2012. 柴北缘锡铁山地区镁铁质岩石的时代及地球化学特征. 地质通报, 31(12):2079~2089.
- 朱小辉, 陈丹玲, 刘良, 赵姣, 张乐. 2014. 柴北缘绿梁山地区早古生代弧后盆地型蛇绿岩的年代学、地球化学及大地构造意义. 岩石学报, 30(03):822~834.
- 朱小辉, 陈丹玲, 王超, 王红, 刘良. 2015. 柴达木盆地北缘新元古代一早古生代大洋的形成、发展和消亡. 地质学报, 89(2):234~251.

Early Ordovician Continental-Arc Collision and Retroarc Foreland Basin on the Northern Margin of Qaidam Basin: Geochemical Evidence from Clastic Rocks

SUN Jiaopeng¹⁾, CHEN Shiyue¹⁾, MA Yinsheng²⁾, PENG Yuan²⁾,
SHAO Pengcheng¹⁾, MA Shuai¹⁾, DAI Kun²⁾, ZHENG Ce²⁾

1) School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong, 266555;

2) Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081

Abstract

Ordovician is an important period for the Early Paleozoic collisional orogenic evolution in the northern margin of Qaidam basin, but the initial timing of continent-arc collision, basin type and paleogeographic pattern have long been in dispute. This study, based on field observations and lab analyses of the Early Ordovician clastic deposition in the Oulongbuluke block, tested 30 mud sand samples for major elements, trace elements and rare earth elements. Results indicate that clastic rocks of the Shihuigou Formation are characterized by rapid accumulation, low maturation of texture and component. The series of clastic rocks deposited in retroarc foreland under the background of active continental margin, with detritus derived from the southern upwelling basement composed by upper continental crust and island arc. Continental-arc collision caused by Qaidam block and Tanjianshan island arc had started since the Early Ordovician (488~472Ma), but the initial timing of continent-arc collision was no earlier than 493 Ma. Combining previous research results, this study proposes the following understanding. The Oulongbuluke block was located to the north of Tanjianshan island arc during Early Paleozoic Era. The basin subsidence and sedimentary evolution was controlled by oceanic crust subduction and continental-arc collision. Retroarc stretch basin developed during Cambrian period and then transferred to retroarc extrusion foreland basin in the Early Ordovician. Retroarc stretch and retroarc compression occurred approximately 490~480 Ma long with sedimentary system transformation. The conclusions presented in this study provide new sedimentary constraint on the initial timing of continent-arc collision.

Key words: northern Qaidam; Early Ordovician; detrital rock; geochemistry; continent-arc collision; retroarc foreland basin