

DOI: 10.13745/j.esf.sf.2018.6.28

# 柴西南翼山构造上新统狮子沟组混积岩地球化学特征及物源指示意义

于冬冬<sup>1</sup>, 张永生<sup>1,\*</sup>, 邢恩袁<sup>1</sup>, 王琳霖<sup>1</sup>, 李 凯<sup>2</sup>, 黄囿霖<sup>3</sup>

1. 中国地质科学院 矿产资源研究所 国土资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037

2. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083

3. 中国石油青海油田分公司 勘探开发研究院, 甘肃 敦煌 736202

YU Dongdong<sup>1</sup>, ZHANG Yongsheng<sup>1,\*</sup>, XING Enyuan<sup>1</sup>, WANG Linlin<sup>1</sup>, LI Kai<sup>2</sup>, HUANG Youlin<sup>3</sup>

1. MLR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China

3. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Qinghai Oilfield Company, Dunhuang 736202, China

YU Dongdong, ZHANG Yongsheng, XING Enyuan, et al. Geochemical characteristics and implication for provenance of mixed rocks from the Pliocene Shizigou Formation in the Nanyishan structure of the western Qaidam Basin. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(4): 065-075

**Abstract:** The Pliocene mixed rocks contain large amounts of salt minerals in the Nanyishan structure of the western Qaidam Basin, and their provenance analyses can be valuable in finding the origin of the salt minerals. Based on field observation and microscopic identification, we analyzed the geochemical characteristics of mixed rocks from the Pliocene Shizigou Formation in the Nanyishan structure. Combined with rare earth element (REE) characteristics of granites from the surrounding orogenic belts, we discussed the provenance of terrigenous clastics in mixed rocks. The results showed that the detrital, carbonate and clay minerals in mixed rocks were homogeneously mixed, and the elemental contents of the rocks were closely related to the mineral composition. Except for Ca, Na, and Sr, the mixed rocks had generally lower mineral contents than those of the upper continental crust. Considering that CaO and Na<sub>2</sub>O are affected by the formation of carbonate and halite, Ca and Na are not suitable for identifying tectonic settings. In contrast, trace elements and REE such as Sc, Th, Co, Zr and Hf, retain mostly the geochemical information of source rocks and therefore can be used to evaluate the tectonic settings of the source area for provenance analysis. The REE patterns showed good consistency, indicating the terrigenous clastics of mixed rocks have the same provenance characteristics. Together with La-Th-Sc, Th-Sc-Zr/10, La/Th-Hf diagrams and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> ratio, our data suggest that the terrigenous clastics components of mixed rocks were derived from the felsic igneous rocks of continental island arc. In comparison with REE patterns in granites from the surrounding orogenic belts, we consider the Late Silurian and Late Permian granites to be the main source rocks for terrigenous clastics and salt minerals in the mixed rock. In addition, we hypothesize that the south part of the study area, Qimantag, is the main source area, and South Altyn Tagh in the west also takes part

收稿日期: 2018-01-04; 修回日期: 2018-04-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0602806); 中国地质调查局地质调查工作项目(121201103000150012)

作者简介: 于冬冬(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事盐类矿床与油气地质研究。E-mail: radon1203@163.com

\* 通讯作者简介: 张永生(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事盐类矿床与油钾(锂)兼探研究。E-mail: zys\_601@126.com

in the sedimentary source recharge.

**Key words:** mixed rocks; geochemistry; tectonic setting; provenance; Nanyishan structure; western Qaidam Basin

**摘 要:**柴西地区南翼山构造上新统混积岩中含有大量盐类矿物,其物源分析对盐矿物质来源研究有一定的参考价值。本文在野外观察和镜下鉴定的基础上,对南翼山构造上新统狮子沟组混积岩的地球化学特征进行了分析,并结合周缘造山带花岗岩的稀土元素数据,探讨了混积岩中陆源碎屑的物质来源。结果显示:南翼山构造狮子沟组混积岩中碎屑矿物、碳酸盐矿物和黏土矿物呈均匀混合的状态,元素含量与矿物组分密切相关,除 Ca、Na、Sr 元素外,其余元素含量普遍低于上地壳平均含量,其中 CaO 和 Na<sub>2</sub>O 受碳酸盐和石盐形成影响,不能用于判别构造背景,而 Sc、Th、Zr、Hf 等微量元素和稀土元素较完整地保留了源岩的地球化学信息,可用于源区构造背景的判别及物源示踪,同时稀土元素配分模式一致性较好,表明混积岩中陆源碎屑具有相同的物源特征。稀土元素配分模式、La-Th-Sc、Th-Sc-Zr/10、La/Th-Hf 图解以及 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 比值共同指示南翼山混积岩的陆源碎屑组分来源于大陆岛弧背景下的长英质火成岩,通过与周缘造山带花岗岩稀土配分模式对比,推断晚志留世和晚二叠世花岗岩是混积岩中陆源碎屑和盐类矿物的主要源岩,南部的祁漫塔格是主要的物源区,且西部的阿尔金山南段也有部分物源贡献。

**关键词:**混积岩;地球化学;构造背景;物源;南翼山构造;柴达木西部

**中图分类号:**P595;P619.21 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2018)04-0065-11

混积岩是介于碎屑岩和碳酸盐岩之间的一种过渡类型沉积岩,在古代和现代沉积环境中都相当常见<sup>[1-3]</sup>。由于混积岩在油气运移和储集方面发挥着重要作用,其研究价值逐渐受到重视,近 20 年来的研究工作取得了令人瞩目的成果,主要集中在:(1)混积岩的分类命名<sup>[4-7]</sup>;(2)混积岩的沉积特征、沉积模式和成因机理<sup>[8-11]</sup>;(3)混积岩型储层特征与油气地质意义<sup>[12-16]</sup>。混积岩通常由同一沉积环境中外来陆源碎屑和盆内碳酸盐颗粒相互作用产生,沉积过程不同、海平面和气候变化都会导致不同比例和规模的混合,比纯碎屑岩或碳酸盐岩具有更加复杂的沉积模式<sup>[3]</sup>,所以混积岩的研究需要采取多学科结合的方法。前期研究主要从混积岩的岩石学特征出发,研究其沉积环境、形成原因和油气成藏作用<sup>[8-16]</sup>。地球化学方法近年来才开始应用到混积岩的研究中,由于混积岩成分的复杂性,常规地球化学指标并不能直接用于混积岩,在进行物源示踪或沉积环境分析之前必须进行化学元素有效性的检验,目前多采用相关性分析判断化学元素来源于陆源碎屑还是自生矿物<sup>[17-18]</sup>。利用此方法,孙林华等<sup>[19]</sup>和伏美燕等<sup>[20]</sup>分别进行过混积岩的物源示踪和古环境分析,但总体上相关研究报道仍较少,因此本文有望对混积岩的地球化学研究提供一定的借鉴意义。

新生代时期南翼山构造处于湖相沉积环境,咸水湖泊中广泛发育混积岩,其中古近系和新近系混积岩作为油气良好的储层一直是前期研究的重点<sup>[14-16]</sup>,但近地表的上新统狮子沟组混积岩很少有人关注。近年来,柴达木西部新生代地层中发现了

富钾锂硼卤水资源<sup>[21]</sup>,查明钾锂硼的物质来源对下一步找矿突破具有重要意义,研究工作亟待开展。南翼山构造混积岩中伴生有大量盐类矿物,作为柴达木西部卤水开发的重点区域,混积岩的物源分析有望成为摸清卤水物质来源的突破口。本文以野外观察和镜下鉴定为基础,结合地球化学测试,分析了南翼山狮子沟组混积岩的地球化学特征和物源属性,以期对柴达木西部上新世以来盐矿的物质来源研究和咸水湖盆混积岩的地球化学研究提供一定的参考。

1 地质背景及样品采集

南翼山构造位于柴达木盆地西部,为一大型箱状背斜,整体呈 NW 向展布,背斜核部出露上新统狮子沟组,两翼被第四系覆盖,地表以风蚀残丘为主(图 1)<sup>[22]</sup>。南翼山沉积了约 6 km 厚的新生代地层,其中狮子沟组为一套滨浅湖相沉积,混合沉积特征明显,地层中多见石盐和石膏夹层<sup>[23-24]</sup>。南翼山构造形成演化受柴西地区周缘造山带活动控制,上新世时期随着阿尔金山和东昆仑山的隆升,柴西地区湖盆面积不断萎缩,沉积中心从一里坪地区逐渐迁至柴东三湖地区<sup>[25]</sup>,此时南翼山构造开始隆起,发育背斜雏形<sup>[26]</sup>。第四纪受阿尔金断裂强烈左行运动以及东昆仑和祁连山向盆内俯冲的影响,NE-SW 向挤压应力进一步加强<sup>[27]</sup>,南翼山形成“两断夹一隆”的背斜,同时不断遭受风化剥蚀,最终呈现了现今的构造形态<sup>[26]</sup>。

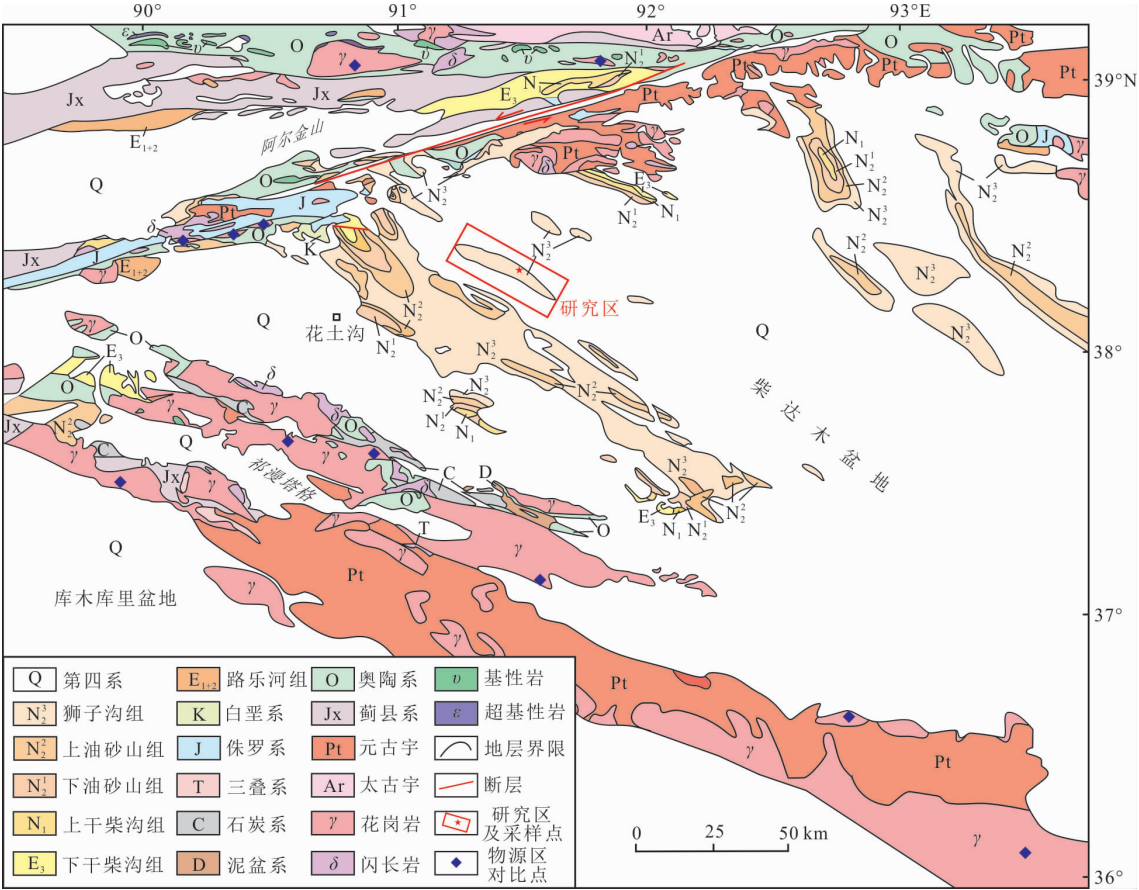
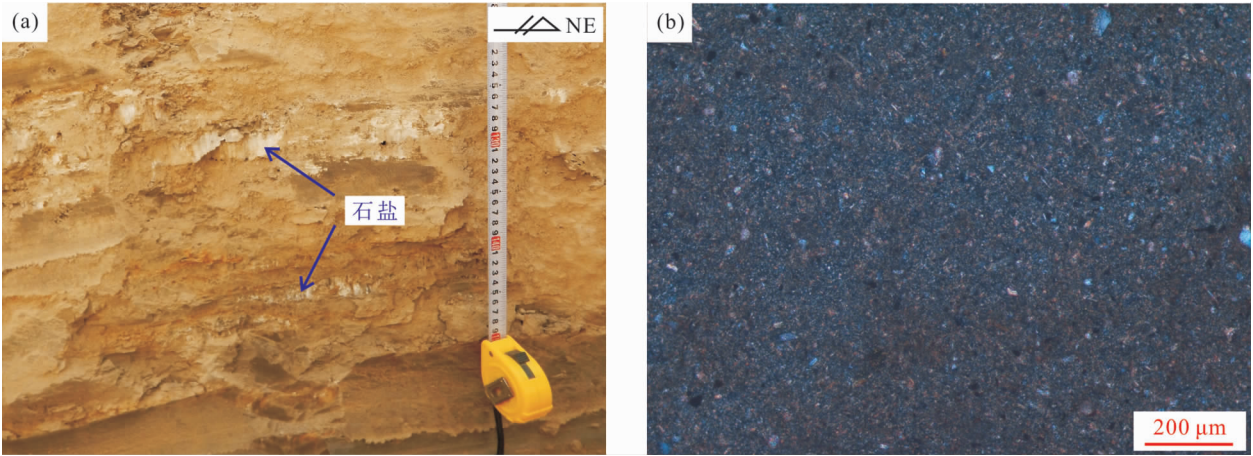


图1 柴西地区地质简图  
(据文献[22]修改)  
Fig.1 Schematic geological map of the western Qaidam Basin



a—棕色混积岩夹薄层石盐,镜头方向 305°;b—混积岩,碎屑矿物、泥晶方解石和黏土矿物均匀混合,正交偏光×100。  
图2 南翼山构造狮子沟组混积岩岩性特征

Fig.2 Lithological characteristics of mixed rocks from the Shizigou Formation in the Nanyishan structure

样品采集自南翼山构造狮子沟组地层,距地表约 2~4 m,包括 3 个采样点,共涉及 13 件样品(图 1)。样品以棕色块状为主,夹有薄层石盐,粒度较细,切面光滑,遇酸起泡剧烈(图 2a)。在显微镜下可见到

明显的混合沉积特征,其中碎屑矿物主要为细粉砂级石英颗粒,碳酸盐矿物以泥晶方解石为主,二者与黏土矿物均匀混合在一起(图 2b)。X 衍射分析结果表明,黏土矿物主要为伊利石和伊蒙混层,含有少

量绿泥石,碎屑矿物、碳酸盐矿物和黏土矿物大致呈 1:1.26:1.38 的比例混合,为典型的混积岩(图 3)。按照前人的分类方案<sup>[7]</sup>,将碎屑矿物和黏土矿物统一归为陆源碎屑,其中陆源碎屑占 55.00%~78.90%,平均为 63.61%,碳酸盐矿物占 14.90%~42.90%,平均为 32.77%,南翼山狮子沟组混积岩属于碳酸盐质陆源碎屑岩,主要为钙质泥岩。

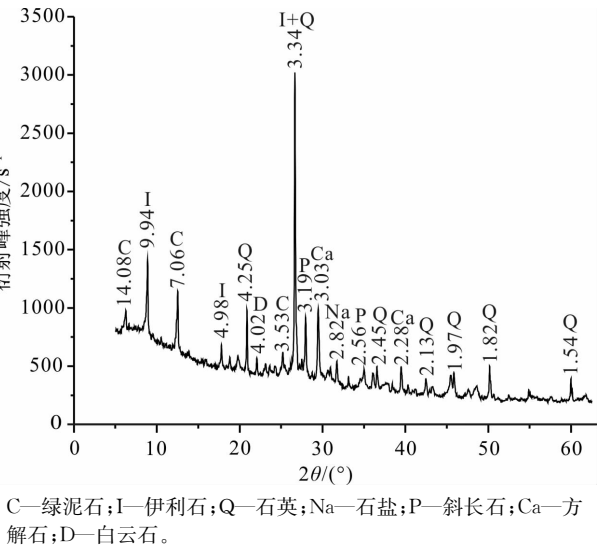


图 3 南翼山构造狮子沟组混积岩 X 衍射图谱  
Fig.3 X-ray diffraction spectrum of mixed rocks from the Shizigou Formation in the Nanyishan structure

2 测试方法及结果

样品测试工作委托核工业北京地质研究所分析

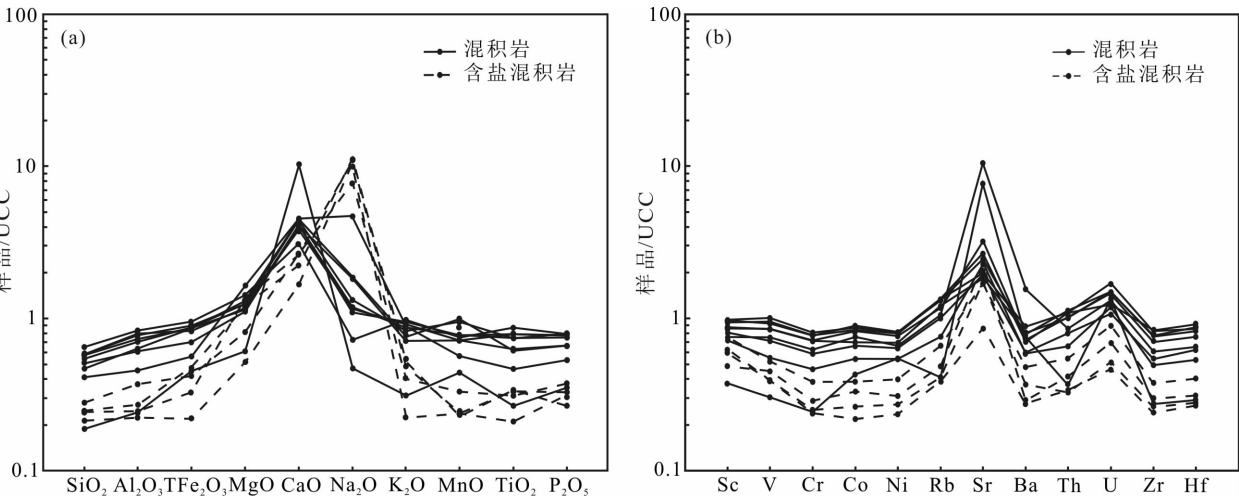


图 4 南翼山构造狮子沟组混积岩样品主量元素氧化物(a)和微量元素(b)UCC 标准化蛛网图 (UCC 数据来源于文献<sup>[28]</sup>)

Fig.4 Spider diagrams of UCC-normalized major (a) and trace elements (b) of mixed rocks from the Shizigou Formation in the Nanyishan structure

测试中心完成,包括全岩主量、微量和稀土元素分析,其中主量元素在 Axios<sup>mAX</sup>型 X 射线荧光光谱仪上进行测试,微量和稀土元素在 NexION300D 等离子体质谱仪上进行测试,执行标准分别为 GB/T 14506.28—2010 和 GB/T 14506.30—2010,分析误差均<5%。

2.1 主、微量元素

主量和微量元素测试数据见表 1。混积岩样品的主要化学成分为 SiO<sub>2</sub>、CaO、Na<sub>2</sub>O、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、K<sub>2</sub>O、FeO 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,平均含量分别为 28.19%、14.54%、13.91%、8.16%、2.82%、1.90%、1.77%和 1.51%,MnO、TiO<sub>2</sub> 和 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量低于 1%。烧失量 (LOI)介于 18.90%~35.07%,表明样品中可能含有较多的有机质和碳酸盐。与上地壳 (UCC) 氧化物含量相比<sup>[28]</sup>,CaO 明显富集,表明样品中方解石含量较高,与前文分析结果一致。含盐混积岩中 Na<sub>2</sub>O 含量很高,表明其与石盐的形成有关。其余元素呈略微亏损的状态(图 4a)。微量元素分析结果显示,大部分元素平均含量相较于上地壳平均含量轻微亏损,只有 Sr 元素富集现象十分明显,其含量为 (279~3 372) × 10<sup>-6</sup>,平均为 1 021 × 10<sup>-6</sup> (图 4b)。

2.2 稀土元素

稀土元素测试分析结果见表 2。根据球粒陨石含量进行标准化处理<sup>[29]</sup>,得到稀土元素的配分模式,并与 UCC、北美页岩 (NASC) 和澳大利亚后太古宙页岩 (PAAS) 稀土元素的配分模式进行对比<sup>[28-30]</sup>

(图 5)。Ce 和 Eu 异常计算公式分别为  $\delta Ce = Ce_N / (0.5La_N + 0.5Pr_N)$  和  $\delta Eu = Eu_N / (0.5Sm_N + 0.5Gd_N)$ 。结果表明:混积岩稀土元素总量  $\Sigma REE$  为  $(53.09 \sim 141.75) \times 10^{-6}$ , 平均为  $115.48 \times 10^{-6}$  (不包括含盐混积岩), 低于 UCC 的稀土总量  $(148.14 \times 10^{-6})^{[28]}$ 、NASC 的稀土总量  $(173.21 \times 10^{-6})^{[30]}$  和 PAAS 的稀土总量  $(184.76 \times 10^{-6})^{[29]}$ ; 轻重稀土元素比值 LREE/HREE 平均为 8.31,  $(La/Yb)_N$  平均为 8.14, 样品中轻重稀土分异明显。 $\delta Ce$  值介于 0.91~0.93, 平均为 0.92, 具有轻微的负异常。 $\delta Eu$  值介于 0.58~0.67, 平均为 0.62, 低于 NASC(0.68)、PAAS(0.63) 和 UCC(0.69), 具有较明显的负异常。整体上, 混积岩稀土元素配分模式一致性较好, 呈左高右低、整体平缓的趋势, 略低于 NASC 和 PAAS, 与 UCC 的配分模式较接近, 表明所有样品的物源具有相似的特征。

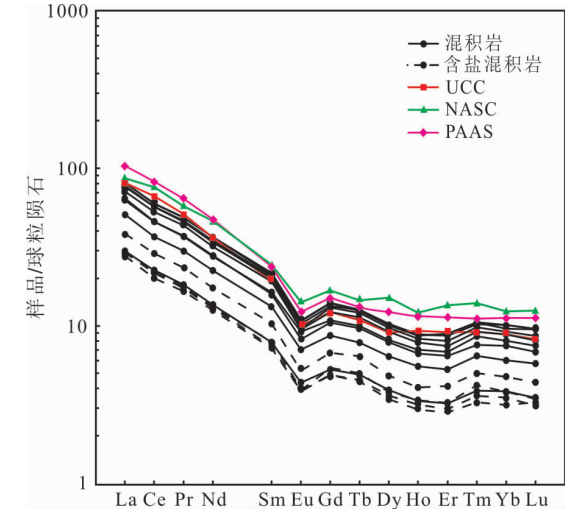


图 5 南翼山构造狮子沟组混积岩样品稀土元素配分模式 (UCC 数据来源于文献[28]; PAAS 数据来源于文献[29]; NASC 数据来源于文献[30])

Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns of mixed rocks from the Shizigou Formation in the Nanyishan structure

表 1 南翼山构造狮子沟组混积岩样品主量元素和微量元素测试分析结果

Table 1 Results of Major and trace elemental analyses of mixed rocks from the Shizigou Formation in the Nanyishan structure

样品号	岩性	$w_B/\%$											
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	FeO	LOI
N-11	含盐混积岩	16.25	3.78	0.89	3.43	9.36	36.4	1.34	0.024	0.214	0.053	0.76	
N-12	含盐混积岩	16.57	4.19	1.32	2.96	8.13	36.98	1.45	0.023	0.217	0.047	1.12	
N-13-1	混积岩	31.24	9.78	2.08	3.25	16.3	6.15	2.13	0.099	0.392	0.049	2.28	25.8
N-14-1	混积岩	36.35	10.75	2.06	3.1	15.87	4.34	2.32	0.096	0.474	0.04	2.35	22.16
N-14-2	混积岩	33.73	9.31	1.23	2.75	14.55	6.03	1.98	0.072	0.405	0.056	2.31	26.13
N-14-3	混积岩	38.64	11.96	1.97	3.07	13.8	3.8	2.58	0.072	0.506	0.08	2.55	20.87
N-20	含盐混积岩	14.28	3.44	0.17	1.28	6	34.56	0.62	0.024	0.133	0.12	0.94	
N-21-1	含盐混积岩	18.68	5.7	0.77	2.02	9.62	25.47	1.12	0.033	0.199	0.101	1.34	
N-21-2	混积岩	12.58	3.71	0.86	1.5	38.16	1.55	0.86	0.044	0.17	0.113	1.42	35.07
N-21-3	混积岩	27.38	7.06	1.5	4.09	16.52	15.68	2.48	0.057	0.297	0.116	1.34	
N-21-5	混积岩	38.35	11.32	2.41	2.82	14.66	3.9	2.44	0.078	0.478	0.116	1.95	21.42
N-22	混积岩	38.9	12.18	2.04	2.92	14.84	3.61	2.67	0.078	0.505	0.119	2.13	19.96
N-34	混积岩	43.47	12.88	2.28	3.52	11.26	2.37	2.75	0.075	0.561	0.119	2.57	18.90
样品号	岩性	$w_B/10^{-6}$											
		Sc	V	Cr	Co	Ni	Rb	Sr	Ba	Th	U	Zr	Hf
N-11	含盐混积岩	8.8	37.9	23.1	4.57	12.8	34.5	559	230	3.44	1.4	50.04	1.46
N-12	含盐混积岩	6.83	43.9	26.6	5.75	14.6	40.6	736	181	4.4	1.88	57.24	1.62
N-13-1	混积岩	10.6	72.8	57.7	13.1	31.2	88.8	3372	968	9.05	3.53	116.82	3.45
N-14-1	混积岩	12	82.9	66.3	14.3	36.2	98.6	1043	453	10.7	3.91	134.28	3.98
N-14-2	混积岩	11.3	69.4	54	11.5	30.1	85.2	632	374	8.44	2.91	103.86	3.3
N-14-3	混积岩	13.6	90.2	71.4	15.5	38.3	111	788	495	11.8	4.04	147.24	4.61
N-20	含盐混积岩	12.2	37.9	22.1	3.79	11	32.5	279	173	3.57	1.26	45.9	1.41
N-21-1	含盐混积岩	10.6	50.9	35.3	6.64	18.8	55.8	551	299	5.76	2.43	72	2.13
N-21-2	混积岩	5.28	29.4	22.2	7.43	25.7	34.6	2478	473	3.84	3.64	53.28	1.53
N-21-3	混积岩	10.1	53.8	42.7	9.39	25.6	64.1	734	367	6.9	3.22	94.68	2.81
N-21-5	混积岩	12.3	82.8	65.6	12.1	32.7	102	592	503	10.6	4.04	145.26	4.37
N-22	混积岩	13.2	92.4	72.1	14.6	37.6	112	640	553	11.5	4.63	156.96	4.54
N-34	混积岩	13.7	98.1	74.6	15.1	38.3	113	869	438	11.5	3.36	158.76	4.81



表 2 南翼山构造狮子沟组混积岩样品稀土元素测试分析和计算结果  
Table 2 Results of analysis and calculation of rare earth elements in mixed rocks from the Shizigou Formation in the Nanyishan structure

样品号	岩性	$w_B/10^{-6}$										
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er
N-11	含盐混积岩	11.1	21.50	2.45	9.32	1.73	0.34	1.51	0.27	1.39	0.27	0.75
N-12	含盐混积岩	10.8	20.90	2.4	9.46	1.87	0.34	1.67	0.29	1.47	0.29	0.82
N-13-1	混积岩	23.7	44.50	5.11	19.8	3.82	0.81	3.35	0.59	3.13	0.61	1.72
N-14-1	混积岩	28.3	54.50	6.28	24.6	4.67	0.84	4.05	0.71	3.75	0.71	2.01
N-14-2	混积岩	23.2	44.20	5.16	20	3.73	0.73	3.26	0.57	3.05	0.58	1.63
N-14-3	混积岩	30.1	57.50	6.70	26.2	5.03	0.95	4.33	0.75	3.98	0.76	2.19
N-20	含盐混积岩	10.3	19.50	2.29	9.05	1.69	0.34	1.50	0.26	1.32	0.25	0.72
N-21-1	含盐混积岩	14.3	27.70	3.24	12.5	2.42	0.46	2.09	0.38	1.86	0.35	1.05
N-21-2	混积岩	11.1	21.70	2.52	9.76	1.85	0.38	1.64	0.29	1.51	0.29	0.81
N-21-3	混积岩	18.8	35.60	4.13	16.1	3.11	0.62	2.69	0.46	2.48	0.48	1.34
N-21-5	混积岩	27.1	51.80	6.14	23.5	4.51	0.87	3.97	0.68	3.53	0.72	1.96
N-22	混积岩	28.7	55	6.41	24.9	4.84	0.91	4.14	0.74	3.86	0.75	2.12
N-34	混积岩	30	57.7	6.74	26.3	4.95	0.95	4.30	0.73	3.88	0.76	2.18

样品号	岩性	$w_B/10^{-6}$							LREE/HREE	(La/Yb) <sub>N</sub>	$\delta Ce$	$\delta Eu$
		Tm	Yb	Lu	Y	$\Sigma REE$	LREE	HREE				
N-11	含盐混积岩	0.13	0.88	0.12	7.6	51.76	46.44	5.32	8.73	8.52	0.93	0.63
N-12	含盐混积岩	0.15	0.96	0.13	8.2	51.57	45.77	5.79	7.90	7.59	0.93	0.58
N-13-1	混积岩	0.31	2.02	0.29	17.4	109.75	97.74	12.01	8.14	7.93	0.91	0.67
N-14-1	混积岩	0.35	2.31	0.33	20	133.42	119.19	14.23	8.38	8.28	0.93	0.58
N-14-2	混积岩	0.27	1.88	0.26	16.2	108.52	97.02	11.50	8.44	8.34	0.92	0.62
N-14-3	混积岩	0.38	2.40	0.37	21.9	141.62	126.48	15.15	8.35	8.48	0.92	0.60
N-20	含盐混积岩	0.12	0.79	0.13	7.25	48.26	43.17	5.08	8.49	8.78	0.91	0.65
N-21-1	含盐混积岩	0.18	1.19	0.17	10.1	67.89	60.62	7.27	8.34	8.12	0.92	0.61
N-21-2	混积岩	0.14	0.96	0.14	8.33	53.09	47.31	5.77	8.2	7.78	0.93	0.66
N-21-3	混积岩	0.23	1.52	0.22	13.7	87.78	78.36	9.42	8.32	8.36	0.91	0.64
N-21-5	混积岩	0.35	2.29	0.32	19.9	127.74	113.92	13.82	8.25	8.00	0.91	0.62
N-22	混积岩	0.38	2.52	0.37	21.3	135.63	120.76	14.87	8.12	7.70	0.92	0.61
N-34	混积岩	0.37	2.53	0.37	20.6	141.75	126.64	15.11	8.38	8.01	0.92	0.61

3 讨论

3.1 构造背景

构造背景限定了沉积盆地的物源属性,是进行物源分析的基础,目前地球化学元素分析被广泛应用于构造背景和物源的讨论<sup>[31-32]</sup>。沉积物中 Al、Ti 含量常作为陆源碎屑贡献量的指标<sup>[33]</sup>,混积岩样品的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量与 TiO<sub>2</sub>、SiO<sub>2</sub>、Sc、Th、Zr 等呈现了很强的正相关性,说明它们主要来自陆源碎屑;而与 CaO 和 Na<sub>2</sub>O 呈现不相关或负相关性,说明 CaO 主要与碳酸盐沉积有关,Na<sub>2</sub>O 主要来自石盐。另外,稀土元素总量  $\Sigma REE$  与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 也表现出强正相关性,而  $\delta Ce$  与  $\Sigma REE$ 、 $\delta Eu$  无相关性,说明稀土元素主要来源于陆源碎屑,且未受后期成岩作用的影响

(图 6)。综上所述可以看出,混积岩中 Cao 和 Na<sub>2</sub>O 并不适合判断构造背景,而 Sc、Th、Zr、Hf 等微量元素和稀土元素与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 呈良好的正相关性,表明受成岩作用影响较弱,较完整地保留了源区岩石的地球化学信息,可以用来判断源区的构造背景以及进行物源示踪。

Bhatia<sup>[31]</sup>归纳总结出大洋岛弧、大陆岛弧、活动大陆边缘和被动大陆边缘 4 类构造环境,利用 La-Th-Sc、Th-Co-Zr/10、Th-Sc-Zr/10 和 La/Sc-Ti/Zr 等图解可以进行判别<sup>[32]</sup>。南翼山狮子沟组混积岩样品在 La-Th-Sc 和 Th-Sc-Zr/10 图解中比较一致,几乎全部落在大陆岛弧区域中(图 7)。同时,混积岩样品的稀土元素特征值也更接近大陆岛弧(表 3),所以认为南翼山构造地表混积岩的陆源碎屑组分主要来自于大陆岛弧环境中。

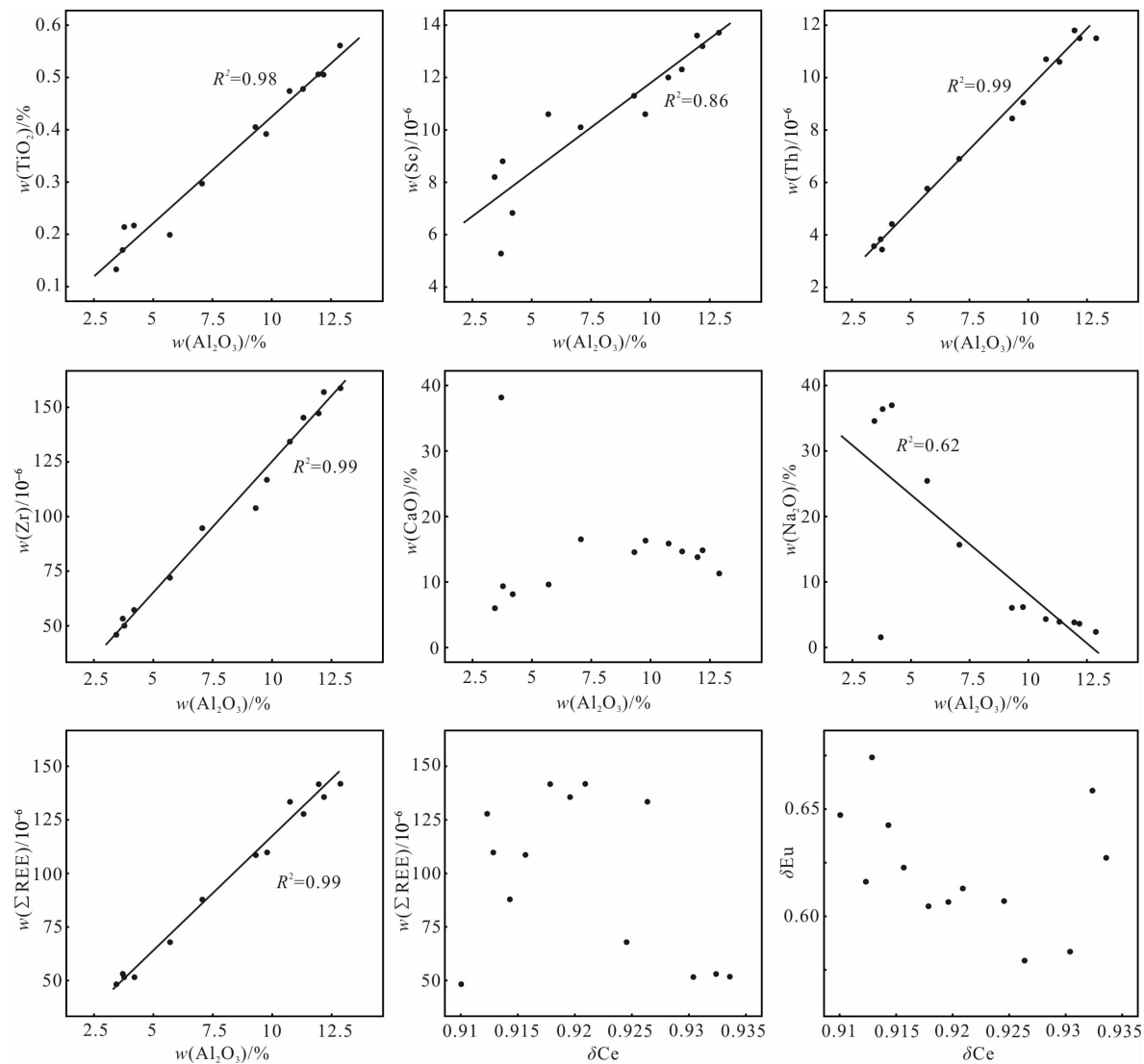


图 6 狮子沟组混积岩样品中主量、微量和稀土元素的相关性图解  
Fig.6 Correlations of major, trace elements and rare earth elements in mixed rocks from the Shizigou Formation

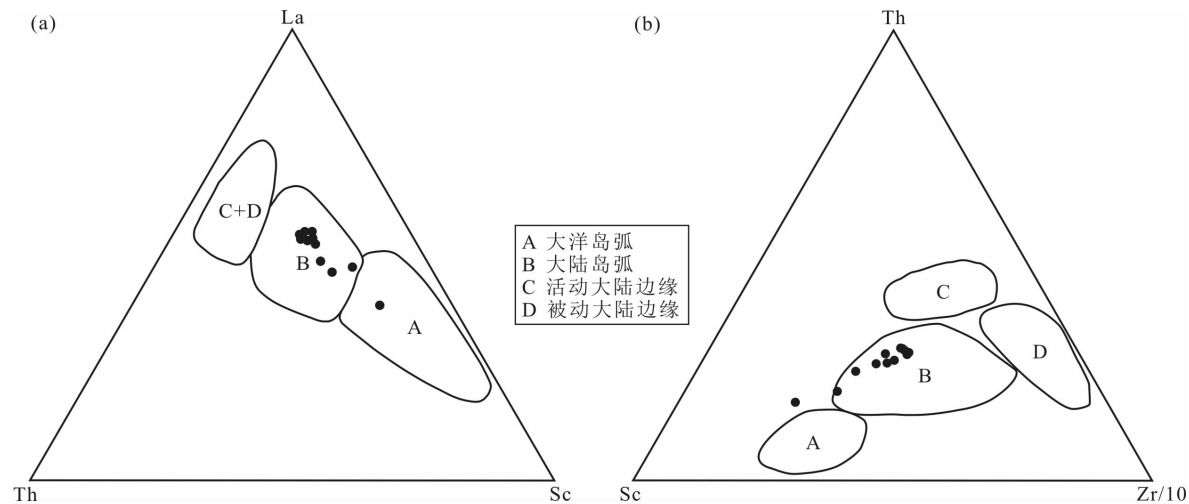


图 7 南翼山构造狮子沟组混积岩构造背景判别图解  
(底图据文献[32])

Fig.7 Discrimination diagrams for tectonic settings of mixed rocks from the Shizigou Formation in the Nanyishan structure

表3 南翼山构造狮子沟组混积岩样品与不同构造背景杂砂岩稀土元素对比表<sup>[31]</sup>  
Table 3 Comparison of REE characteristics of mixed rocks from the Shizigou Formation  
in the Nanyishan structure and graywackes under different tectonic settings<sup>[31]</sup>

构造背景	$w(\text{La})/10^{-6}$	$w(\text{Ce})/10^{-6}$	$\delta\text{Eu}$	$w(\sum\text{REE})/10^{-6}$	LREE/HREE	$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$
大洋岛弧	8±1.7	19±3.7	1.04±0.11	58±10	3.8±0.9	2.8±0.9
大陆岛弧	27±4.5	59±8.2	0.79±0.13	146±20	7.7±1.7	7.5±2.5
主动大陆边缘	37	78	0.6	186	9.1	8.5
被动大陆边缘	39	85	0.56	210	8.5	10.8
南翼山混积岩	24.56	46.94	0.62	115.48	8.31	8.14

3.2 物源确定

稀土元素的分布模式可以反映盆地沉积物的物源性质,通常轻稀土富集、重稀土亏损和Eu负异常的特征暗示源岩主要为长英质岩,混积岩样品中的稀土元素配分模式正是呈现此特征。利用La/Th-Hf图解进一步判断源岩属性<sup>[34]</sup>,在La/Th-Hf图中,混积岩样品主要落在长英质岛弧源区,表明源岩以长英质火成岩为主(图8)。另外,主量元素氧化物也能提供一定的物源信息,前人研究认为碎屑岩的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>的比值可以用来判断源岩类型<sup>[35]</sup>。相关性分析表明,混积岩样品中Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和TiO<sub>2</sub>主要来源于陆源碎屑,可以作为物源判别指标,其Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>比值介于17.67~28.64,平均为23.24,指示研究区的源岩可能主要是长英质火成岩<sup>[36]</sup>。

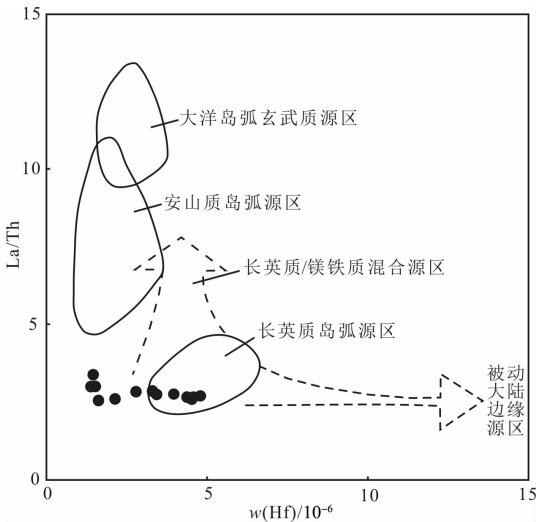


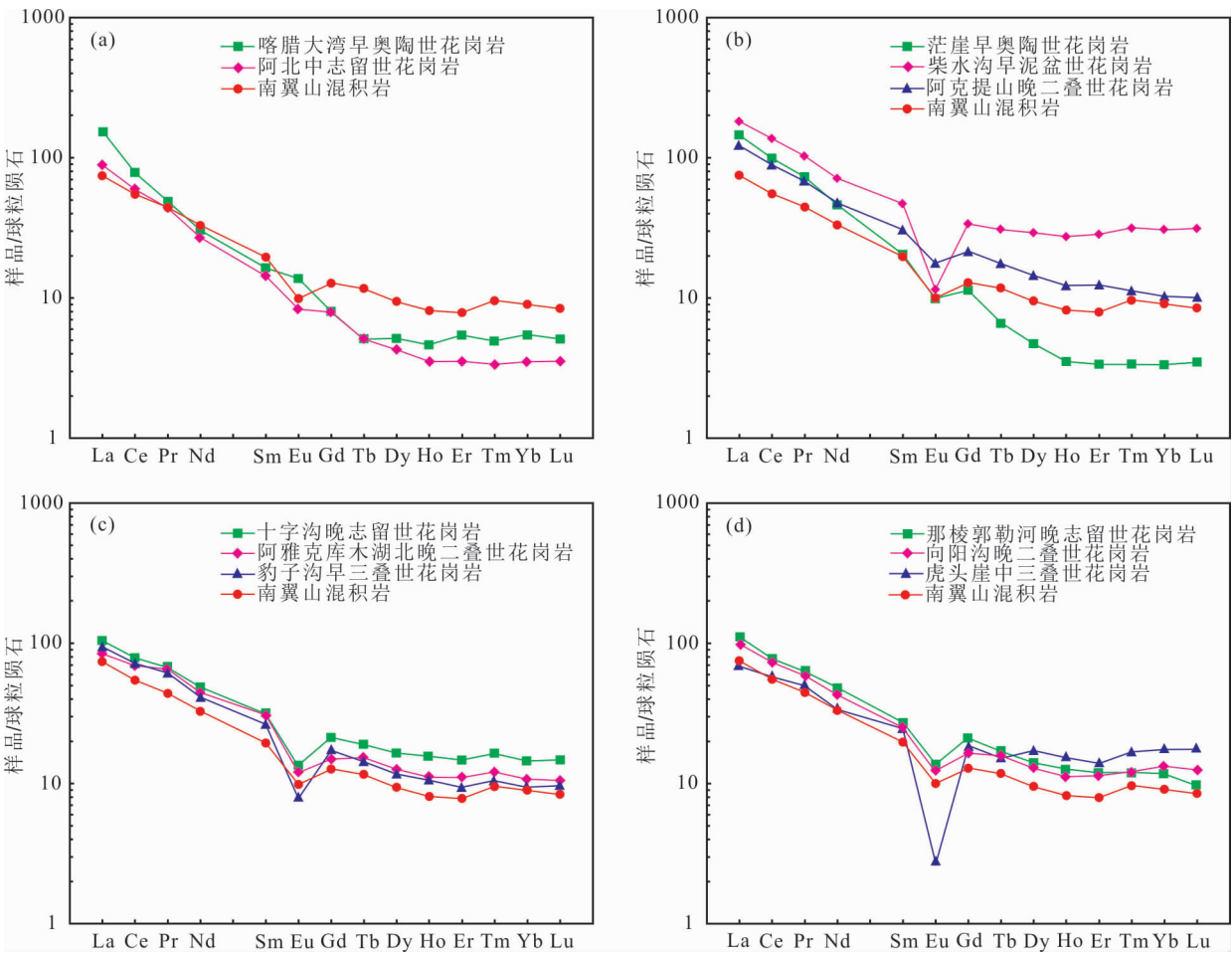
图8 南翼山构造狮子沟组混积岩La/Th-Hf图解  
(底图据文献<sup>[34]</sup>)  
Fig.8 La/Th-Hf diagram of mixed rocks from the Shizigou  
Formation in the Nanyishan structure

由此可见,南翼山构造狮子沟组混积岩的源区可能为大陆岛弧环境,陆源碎屑物质主要来自花岗岩。南翼山构造西部为阿尔金造山带,南部为东昆仑造山带,上新世末期受青藏高原隆升的影响,阿尔

金和东昆仑造山带都比较活跃,这些造山带的隆升剥蚀为盆内沉积提供了物源<sup>[37]</sup>。前期地质调查发现,阿尔金山和东昆仑山遍布有大量花岗岩,从早古生代至早中生代均有发育<sup>[38]</sup>,显然想要准确的确定混积岩的物源区,必须对柴西及周缘地区古生代和中生代的构造背景加以分析。研究表明,震旦纪柴达木地块及邻区开始形成大陆裂谷盆地,至寒武纪已发育成熟的洋盆。奥陶纪开始发生俯冲消减作用,至晚志留世一早泥盆世,洋盆最终闭合<sup>[38-39]</sup>,在此过程中形成了诸多火山岛弧,包括北祁连—北阿尔金山火山岛弧、柴北缘—南阿尔金山火山岛弧、祁漫塔格火山岛弧和中昆仑火山岛弧等,早古生代阿尔金—祁连—东昆仑地区处于多地体、多洋盆、多岛弧的古构造环境中<sup>[40]</sup>。早石炭世东昆仑地区开始发育新的洋盆,早二叠世松潘—甘孜洋向昆仑—柴达木地块下俯冲,在柴达木南缘形成陆缘弧和弧后盆地<sup>[41]</sup>,中三叠世东昆仑地区完成由洋壳俯冲到碰撞造山的转换,之后进入陆内演化阶段<sup>[40,42]</sup>。因此,奥陶纪一早泥盆世和早二叠世—中三叠世形成的花岗岩有可能是研究区的源岩。

在上述基础上,收集了阿尔金和祁漫塔格早古生代至早中生代花岗岩的稀土元素数据,具体包括阿尔金北段喀腊大湾早奥陶世花岗岩和阿北中志留世花岗岩<sup>[43-44]</sup>,阿尔金南段茫崖早奥陶世花岗岩、柴水沟早泥盆世花岗岩和阿克提山晚二叠世花岗岩<sup>[45-46]</sup>,祁漫塔格西段十字沟晚志留世花岗岩、阿雅克库木湖北晚二叠世花岗岩和豹子沟早三叠世花岗岩<sup>[47-48]</sup>,祁漫塔格东段那棱郭勒河晚志留世花岗岩、向阳沟晚二叠世花岗岩和虎头崖中三叠世花岗岩<sup>[42,49-50]</sup>(图1)。将它们稀土元素平均值的配分模式与南翼山混积岩进行对比,发现混积岩样品的稀土配分模式与晚志留世和晚二叠世花岗岩相似性最好,而它们主要分布在研究区南部的祁漫塔格西段和东段,部分分布在西部的阿尔金南段(图9)。岩





a—阿尔金北段;b—阿尔金南段;c—祁漫塔格西段;d—祁漫塔格东段。  
图9 南翼山构造狮子沟组混积岩及物源区花岗岩稀土元素配分模式  
Fig.9 Chondrite-normalized REE patterns in mixed rocks from the Shizigou Formation  
in the Nanyishan structure and in granites from source regions

石地球化学特征显示,晚志留世花岗岩形成于后碰撞阶段,但同时具有大陆岛弧性质<sup>[47,49]</sup>,前人通过“滞后型弧火山岩”这一概念进行了合理解释,即后碰撞阶段岩浆原岩可能是由俯冲阶段产生而储存于下地壳或软流圈的原岩产生的<sup>[51]</sup>。晚二叠世花岗岩为典型的洋壳俯冲形成的大陆岛弧花岗岩<sup>[42,46]</sup>,与构造背景分析结果相符。由此推断南翼山混积岩中陆源碎屑主要来自晚志留世和晚二叠世花岗岩,其中南部的祁漫塔格是主要的物源区,也有部分陆源碎屑来自于西部的阿尔金南段。

南翼山狮子沟组混积岩中盐类矿物主要出现在层间裂缝中,呈层状展布,其上下的混积岩隔水性较好,且断裂和裂缝发育较少(图2a),表明卤水并非来源于大气降水渗流和深部卤水的上涌,而是封存于层间的沉积卤水,其与混积岩的陆源碎屑具有相同的物源。

4 结论

- (1)南翼山构造狮子沟组混积岩为碳酸盐质陆源碎屑岩,其中碎屑矿物、碳酸盐矿物和黏土矿物大致呈1:1.26:1.38的比例均匀混合。相较于上地壳平均含量,混积岩中Ca、Na、Sr元素明显富集,其余元素普遍相对亏损。稀土元素具有总量较低、轻稀土富集、重稀土亏损、Ce和Eu负异常的特点,其配分模式左高右低、整体平缓,呈现了稳定的一致性,表明南翼山混积岩具有相同的物源特征。
- (2)相关性分析表明,高含量氧化物Cao和Na<sub>2</sub>O分别与碳酸盐和石盐的形成有关,不适合用于混积岩构造背景的判别,而Sc、Th、Zr、Hf等微量元素和稀土元素主要来源于陆源碎屑,且未受成岩作用影响,保留了源岩的地球化学信息,可以作为源

区构造背景判断及物源示踪的指标。

(3)La-Th-Sc 和 Th-Sc-Zr/10 图解表明南翼山混积岩的陆源碎屑组分来源于大陆岛弧环境中,稀土元素配分模式、La/Th-Hf 图解以及  $Al_2O_3/TiO_2$  比值共同指示混积岩的源岩为长英质火成岩。对比周缘造山带酸性花岗岩的稀土元素配分模式,发现与晚志留世和晚二叠世花岗岩相似性最好,其主要分布在祁漫塔格,部分在阿尔金南段。混积岩中陆源碎屑和盐类矿物具有相同的物源,研究区南部的祁漫塔格是主要的物源区,西部的阿尔金南段是次要物源区。

感谢中国石油青海油田分公司梅建森、高雪峰、袁伟等工程师在野外工作中提供的指导与支持,感谢河北区域地质矿产调查研究所和核工业北京地质研究所工作人员在样品加工和测试工作中的帮助,感谢评审专家和编辑在审稿过程中提出的宝贵意见。

## 参考文献

- [1] MOUNT J F. Mixing of siliciclastic and carbonate sediments in shallow shelf environments[J]. *Geology*, 1984, 12(12): 432-435.
- [2] TIRSGAARD H. Cyclic sedimentation of carbonate and siliciclastic deposits on a Late Precambrian ramp: the Elisabeth Bjerg Formation (Eleonore Bay supergroup), East Greenland[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1996, 66(4): 699-712.
- [3] CHIARELLA D, LONGHITANO S G, TROPEANO M. Types of mixing and heterogeneities in siliciclastic-carbonate sediments[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 88: 617-627.
- [4] 张雄华. 混积岩的分类和成因[J]. *地质科技情报*, 2000, 19(4): 31-34.
- [5] 杨朝青, 沙庆安. 云南曲靖中泥盆统曲靖组的沉积环境: 一种陆源碎屑与海相碳酸盐的混合沉积[J]. *沉积学报*, 1990, 8(2): 59-66.
- [6] 郭福生, 严兆彬, 杜杨松. 混合沉积、混积岩和混积层系的讨论[J]. *地学前缘*, 2003, 10(3): 68-68.
- [7] 董桂玉, 陈洪德, 何幼斌, 等. 陆源碎屑与碳酸盐混合沉积研究中的几点思考[J]. *地球科学进展*, 2007, 22(9): 931-939.
- [8] 张金亮, 司学强. 断陷湖盆碳酸盐与陆源碎屑混合沉积: 以东营凹陷金家地区古近系沙河街组第四段上亚段为例[J]. *地质论评*, 2007, 53(4): 448-453.
- [9] 陈世悦, 张顺, 刘惠民, 等. 湖相深水细粒物质的混合沉积作用探讨[J]. *古地理论*, 2017, 19(2): 271-284.
- [10] 赵会民. 辽河西部凹陷雷家地区古近系沙四段混合沉积特征研究[J]. *沉积学报*, 2012, 30(2): 283-290.
- [11] 徐伟, 陈开远, 曹正林, 等. 咸化湖盆混积岩成因机理研究[J]. *岩石学报*, 2014, 30(6): 1804-1816.
- [12] MCNEILL D F, CUNNINGHAM K J, GUERTIN L A, et al. Depositional themes of mixed carbonate-siliciclastics in the South Florida Neogene: application to ancient deposits[J]. *AAPG Memoir*, 2004, 80: 23-43.
- [13] BARNABY R J, WARD W B. Outcrop analog for mixed siliciclastic-carbonate ramp reservoirs-stratigraphic hierarchy, facies architecture, and geologic heterogeneity: Grayburg Formation, Permian Basin, U.S.A.[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2007, 77(1): 34-58.
- [14] 张宁生, 任晓娟, 魏金星, 等. 柴达木盆地南翼山混积岩储层岩石类型及其与油气分布的关系[J]. *石油学报*, 2006, 27(1): 42-46.
- [15] 冯进来, 曹剑, 胡凯, 等. 柴达木盆地中深层混积岩储层形成机制[J]. *岩石学报*, 2011, 27(8): 2461-2472.
- [16] FENG J L, CAO J, HU K, et al. Dissolution and its impacts on reservoir formation in moderately to deeply buried strata of mixed siliciclastic-carbonate sediments, Northwestern Qaidam Basin, Northwest China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 39(1): 124-137.
- [17] 邵磊, 刘志伟, 朱伟林. 陆源碎屑岩地球化学在盆地分析中的应用[J]. *地学前缘*, 2000, 7(3): 297-304.
- [18] 常华进, 储雪蕾, 冯连君, 等. 氧化还原敏感微量元素对古海洋沉积环境的指示意义[J]. *地质论评*, 2009, 55(1): 91-99.
- [19] 孙林华, 桂和荣, 陈松, 等. 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[J]. *地球学报*, 2010, 31(6): 833-842.
- [20] 伏美燕, 李娜, 黄茜, 等. 滨岸浅海混合沉积对海平面与气候变化的响应: 以塔里木盆地巴麦地区石炭系为例[J]. *沉积学报*, 2017, 35(6): 1110-1120.
- [21] 郑绵平, 张雪飞, 侯献华, 等. 青藏高原晚新生代湖泊地质环境与成盐成藏作用[J]. *地球学报*, 2013(2): 129-138.
- [22] 陈宣华, 党玉琪, 尹安, 等. 柴达木盆地及其周缘山系盆山耦合与构造演化[M]. 北京: 地质出版社, 2010: 1-437.
- [23] 甘贵元, 魏成章, 常青萍, 等. 柴达木盆地南翼山湖相碳酸盐岩油气藏特征及形成条件[J]. *石油实验地质*, 2002, 24(5): 413-417.
- [24] 党玉琪, 尹成明, 赵东升. 柴达木盆地西部地区古近纪与新近纪沉积相[J]. *古地理论*, 2004, 6(3): 297-306.
- [25] 付锁堂, 张道伟, 薛建勤, 等. 柴达木盆地致密油形成的地质条件及勘探潜力分析[J]. *沉积学报*, 2013, 31(4): 672-682.
- [26] 于冬冬, 张永生, 侯献华, 等. 柴西南翼山构造形成演化及其对油气成藏的控制[J]. *断块油气田*, 2017, 24(6): 740-744.
- [27] 张涛, 宋春晖, 王亚东, 等. 柴达木盆地西部地区晚新生代构造变形及其意义[J]. *地学前缘*, 2012, 19(5): 312-321.
- [28] RUDNIK R L, GAO S. Composition of the continental crust [M]// *Treatise on geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 2003, 3: 1-64.
- [29] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The continental crust: its

- composition and evolution[M]. Oxford: Blackwell, 1985: 57-72.
- [30] HASKIN L A, HASKIN M A, FREY F A, et al. Relative and absolute terrestrial abundances of the rare earths[M]// AHRENS L H. Origin and distribution of the elements. Oxford: Pergamon, 1968: 889-911.
- [31] BHATIA M R. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: provenance and tectonic control[J]. *Sedimentary Geology*, 1985, 45(1): 97-113.
- [32] BHATIA M R, CROOK K A W. Trace element characteristics of greywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1986, 92(2): 181-193.
- [33] 贺子丁, 刘志飞, 李建如, 等. 南海西部 54 万年以来元素地球化学记录及其反映的古环境演变[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(3): 327-336.
- [34] FLOYD P A, LEVERIDGE B E. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho Basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbidite sandstones[J]. *Journal of the Geological Society*, 1987, 144(4): 531-542.
- [35] HAYASHI K I, FUJISAWA H, HOLLAND H D, et al. Geochemistry of approximately 1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(19): 4115-4137.
- [36] KESKIN S. Geochemistry of Çamardı Formation sediments, central Anatolia (Turkey): implication of source area weathering, provenance, and tectonic setting[J]. *Geosciences Journal*, 2011, 15(2): 185-195.
- [37] 关平, 简星. 青藏高原北部新生代构造演化在柴达木盆地中的沉积记录[J]. *沉积学报*, 2013, 31(5): 824-833.
- [38] 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 造山的高原: 青藏高原的地体拼合、碰撞造山及隆升机制[M]. 北京: 地质出版社, 2007: 37-202.
- [39] 汤良杰, 金之钧, 张明利, 等. 柴达木震旦纪—三叠纪盆地演化研究[J]. *地质科学*, 1999, 34(3): 289-300.
- [40] 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 青藏高原与大陆动力学: 地体拼合、碰撞造山及高原隆升的深部驱动力[J]. *中国地质*, 2006, 33(2): 221-238.
- [41] 赵文津, 吴珍汉, 史大年, 等. 昆仑山深部结构与造山机制[J]. *中国地质*, 2014, 41(1): 1-18.
- [42] 王秉璋, 陈静, 罗照华, 等. 东昆仑祁漫塔格东段晚二叠世—早侏罗世侵入岩岩石组合时空分布、构造环境的讨论[J]. *岩石学报*, 2014, 30(11): 3213-3228.
- [43] 吴玉, 陈正乐, 陈柏林, 等. 北阿尔金喀腊大湾南段二长花岗岩地球化学、SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素特征及其对壳-幔相互作用的指示[J]. *地质学报*, 2017, 91(6): 1227-1244.
- [44] 孟令通, 陈柏林, 王永, 等. 北阿尔金早古生代构造体制转换的时限: 来自花岗岩的证据[J]. *大地构造与成矿学*, 2016, 40(2): 295-307.
- [45] 康磊, 校培喜, 高晓峰, 等. 茫崖二长花岗岩、石英闪长岩的年代学、地球化学及岩石成因: 对阿尔金南缘早古生代构造-岩浆演化的启示[J]. *岩石学报*, 2016, 32(6): 1731-1748.
- [46] 吴才来, 郜源红, 雷敏, 等. 南阿尔金茫崖地区花岗岩类锆石 SHRIMP U-Pb 定年、Lu-Hf 同位素特征及岩石成因[J]. *岩石学报*, 2014, 30(8): 2297-2323.
- [47] 王秉璋. 祁漫塔格地质走廊域古生代—中生代火成岩岩石构造组合研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012: 71-201.
- [48] 李光明, 沈远超, 刘铁兵. 东昆仑祁漫塔格地区华力西期花岗岩地质地球化学特征[J]. *地质与勘探*, 2001, 37(1): 73-78.
- [49] 郝娜娜, 袁万明, 张爱奎, 等. 东昆仑祁漫塔格晚志留世—早泥盆世花岗岩: 年代学、地球化学及形成环境[J]. *地质论评*, 2014, 60(1): 201-215.
- [50] 李侃, 高永宝, 钱兵, 等. 东昆仑祁漫塔格虎头崖铅锌多金属矿区花岗岩年代学、地球化学及 Hf 同位素特征[J]. *中国地质*, 2015, 42(3): 630-645.
- [51] 李伍平, 路凤香. 钙碱性火山岩构造背景的研究进展[J]. *地质科技情报*, 1999, 18(2): 15-18.