中国科学: 地球科学 2010 年 第 40 卷 第 4 期: 414 ~ 425
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

北祁连造山带老君山组沉积地球化学与物源分析

徐亚军[②], 杜远生[①②*], 杨江海[②], 黄虎[②]

① 生物地质与环境地质教育部重点实验室, 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074;
② 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074
* 联系人, E-mail: duyuansheng126@126.com; dxyyz@cug.edu.cn

收稿日期: 2009-04-27; 接受日期: 2009-10-09
国家自然科学基金(批准号: 40672080 和 40921062)、"111"项目(编号: B08030)和中国地质大学(武汉)优秀青年教师资助计划资助

摘要 老君山组砾岩是北祁连造山带早泥盆世、中泥盆世强烈隆升阶段形成的陆相磨拉石沉积. 由西到东, 来自肃南、民乐、古浪和靖远的 41 件砂岩的岩石地球化学特征显著不同: ① 主量元素显示, 西部(肃南、民乐)样品 $MgO+Fe_2O_3^T$ 值和 Al_2O_3/SiO_2 值高于东部, 而东部样品 K_2O/Na_2O 比值高于西部; ② 在上地壳标准化分布图中, 所有样品均亏损 Nb, Ta 元素. 其中西部样品亏损 Rb 元素, 而富集 Sc, Co, Ni, V 和 Cr 元素. 而东部样品亏损 Sr 元素且不富集 Sc, Co, Ni, V 和 Cr 元素; ③ 稀土元素球粒陨石标准化分配型式均显示右倾型, 而 La_N/Yb_N 比值和 Eu/Eu*值西部样品较低, 而东部样品较高. 岩石地球化学特征表明, 老君山组源岩在东西两段上存在差异. 西部肃南一带源岩主要为铁镁质岩石, 而东段古浪、靖远一带源岩主要为长英质岩石, 民乐一带源岩兼具上述两种岩石特征. 根据砾石形态以及沉积地球化学, 老君山组沉积物主要以未遭受沉积分选和再循环作用的近源堆积为主, 且西部源岩未遭受化学风化而东部遭受了低-中等程度的化学风化. 大地构造背景判别和源岩限定, 西部肃南一带沉积物可能主要来自于卷入造山带的北祁连岛弧, 自民乐向东, 沉积物既有来自北祁连岛弧的物质也有来自中祁连变质基底的物质. 物源配置的东西差异以及志留系-泥盆系在全区的发育特征暗示, 北祁连造山带由于早古生代中祁连地块与阿拉善地块之间的"斜向碰撞或不规则边缘碰撞"作用, 导致了泥盆纪早期造山作用在走向上存在不均一造山特点.

关键词
老君山组
北祁连造山带
沉积地球化学
物源
造山作用

对于多旋回造山带而言, 前期的造山记录易被后期的地质作用改造, 大量的反映造山历史的信息被破坏甚至消失, 而遗留下来的沉积物却为追溯这些历史留下了可能. 碎屑岩中包含了重要的有关大陆地壳组成、演化和生长的信息[1~3]. 不同的学者从碎屑岩岩石学、矿物学、地球化学及同位素年代学等方面开展了大量的研究, 以追溯逝去的历史[4,5]. 沉积地球化学是重要的方法之一, 它可从多方面反映源区特征, 进行古环境的再造. 例如, 碎屑岩的地球化学特征可以确定沉积物源岩源区, 重建沉积盆地大地构造背景以及揭示古气候条件等[6~8]. 近来, 被大量地应用于造山带演化研究[9~14], 是认识造山带的一个有效途径.

北祁连加里东造山带位于青藏高原东北缘[15]. 前人通过蛇绿岩和火山岩、蓝片岩和高压变质带、硅质岩以及构造变形等多个方面的研究证实了该造山

引用格式: Xu Y J, Du Y S, Yang J H, et al. Sedimentary geochemistry and provenance of the Lower and Middle Devonian Laojunshan Formation, the North Qilian Orogenic Belt. Sci China Earth Sci, 2010, 53: 356–367, doi: 10.1007/s11430-010-0009-z

带在早古生代经历了裂解-洋盆-俯冲-沟弧盆体系-碰撞的构造演化过程[16~21], 并于早泥盆世、中泥盆世强烈隆升[15,22], 形成中泥盆统、下泥盆统老君山组陆相磨拉石. 因此老君山组碎屑岩详细地记录了造山带强烈隆升时的物质组成和隆升过程, 对于了解该时期造山带隆升特征具有重要意义.

1　区域地质背景与采样

北祁连造山带位于华北板块西南缘龙首山与中祁连地块之间, 北界为龙首山断裂, 南缘与中祁连北缘断裂相接, 东端为同心-固原右行走滑断裂, 西端为左行走滑的阿尔金断裂所截切. 根据冯益民和何世平[17]的划分方案, 北祁连造山带自北向南可以划分为河西走廊弧后盆地、北祁连岛弧、俯冲杂岩和消减洋壳残片等不同的单元, 并可归并为河西走廊弧后盆地、北祁连岛弧、海沟俯冲杂岩 3 个构造分区(图 1).

北祁连泥盆系分为中、下统老君山组和上统沙流水组[23], 两组地层沿造山带的分布具不均一性[24]. 老君山组是我国著名的陆相磨拉石之一, 主体岩性为紫红色块状砾岩、砂砾岩, 夹少量细砂岩、粉砂岩. 砾石磨圆、分选较差, 主要呈扇状体分布于河西走廊与北祁连山北缘的结合部, 沉积相研究表明为山前或山间盆地相沉积[22,24], 与下伏地层呈角度不整合接触. 上泥盆统沙流水组主要分布在东段武威-景泰一带并具一定的分带性, 是碰撞造山期后的磨拉石沉积[20,22]. 岩性主要为紫红色薄层泥岩与灰白色的中厚层砂砾岩互层. 沉积相研究为陆相湖盆沉积, 其内发育震积岩、风暴岩事件沉积[25,26]. 沙流水组与老君山组之间呈角度不整合接触.

为研究造山作用在走向上的特征, 研究样品沿北祁连山展布方向由西向东分布于肃南青龙沟、民乐二道沟、古浪古浪峡和靖远沙流水. 主要采集砾岩夹层中的粗砂岩-粉砂岩以及泥质岩. 共分析样品 41 件, 主量元素测试在武汉综合岩矿测试中心采用 X 荧光光谱分析, 获得 13 种主量元素含量. 微量元素和稀土元素在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室采用 ICP-MS 仪器测试, 获得 37 种微量和稀土元素含量(表 1).

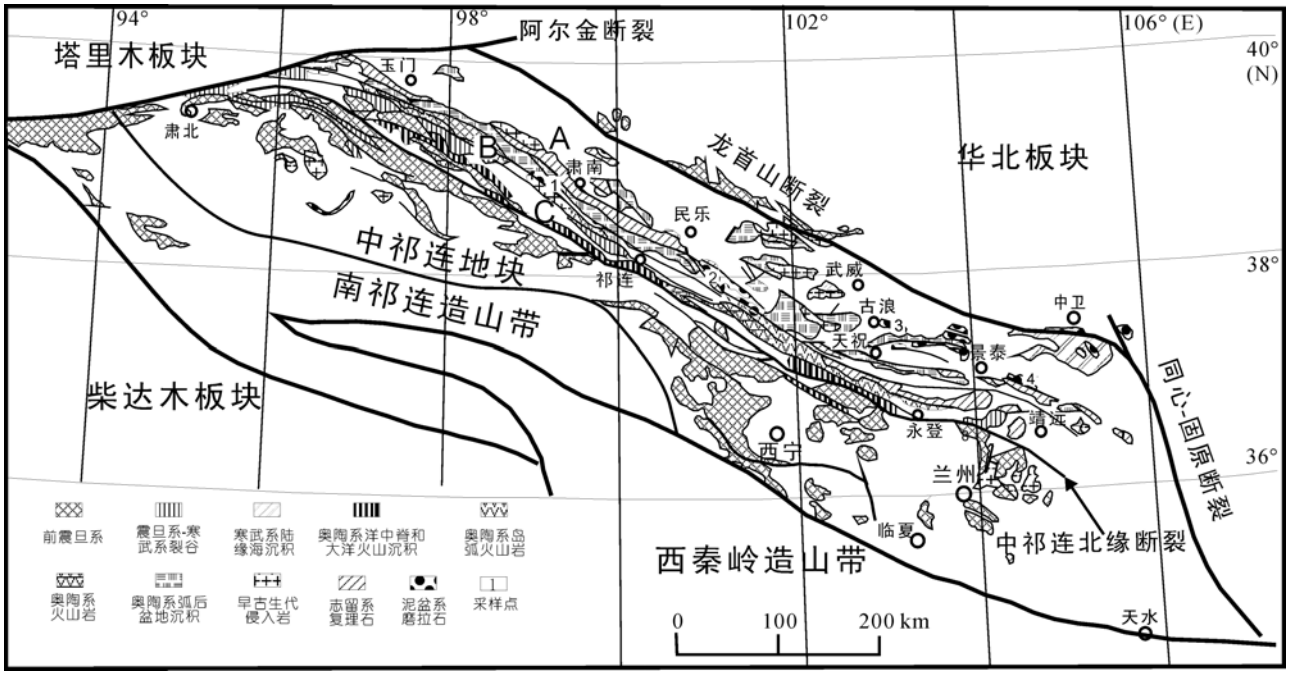

图 1　北祁连造山带构造分区与研究剖面分布图

据文献[17]修改. 构造分区: A, 河西走廊弧后盆地; B, 岛弧; C, 海沟俯冲杂岩. 研究剖面和采样点: 1, 肃南青龙沟; 2, 民乐二道沟; 3, 古浪古浪峡; 4, 靖远沙流水

表 1　北祁连造山带老君山组碎屑岩地球化学数据表 [a)]

采样位置	肃南										民乐											
岩性	粗砂岩										泥岩	粗砂岩	细砂岩									
样品号	QL-1	QL-2	QL-3	QL-4	QL-6	QL-7	QL-9	QL-10	QL-11	QL-14	ED1	ED1-2	ED3	ED4	ED5	ED6-2	ED7-2	ED13-2	ED15-2	ED16	ED21	ED27
主量元素(wt%)																						
SiO_2	61.49	58.72	57.83	58.38	64.92	58.95	58.93	64.7	60.76	62.11	66.31	67.01	71.48	65.79	62.91	65.38	64.97	58.2	66.17	60.8	65.77	69.37
TiO_2	0.55	0.55	0.58	0.6	0.4	0.55	0.56	0.54	0.52	0.5	0.54	0.45	0.62	0.52	0.87	0.72	0.34	0.8	0.67	0.52	0.57	0.57
Na_2O	3.46	3.31	3.79	3.96	3.54	4.31	4.24	3.07	3.68	3.61	1.93	3.36	0.38	3.87	3.11	0.55	3.63	1	2.17	2.54	2.7	5.8
MgO	3.98	4.99	4.72	5	1.97	4.39	4.9	2.8	3.49	3.07	2.19	1.27	0.77	1.32	0.49	3.42	0.76	4.05	2.42	2.47	2.79	1.46
Al_2O_3	12.49	13.94	12.59	14.26	15.2	13.6	13.52	12.07	12.22	12.06	12.31	11.83	12.62	11.56	15.76	12.86	15.96	16.34	11.82	10.14	11.63	10.66
MnO	0.16	0.19	0.18	0.17	0.08	0.14	0.13	0.15	0.16	0.18	0.05	0.07	0.07	0.11	0.07	0.14	0.04	0.07	0.1	0.14	0.08	0.04
P_2O_5	0.12	0.1	0.11	0.11	0.09	0.11	0.09	0.13	0.11	0.12	0.14	0.1	0.15	0.13	0.16	0.15	0.11	0.17	0.16	0.13	0.13	0.13
K_2O	1.81	1.66	0.94	1.13	3.77	1.29	1.33	1.9	1.34	1.47	2.6	1.33	3.09	1.48	2.26	1.03	2.39	4.35	2.18	1.56	2.01	0.74
CaO	5.13	5.14	7.19	5	3.15	5.2	4.94	4.78	6.13	5.61	2.95	4.18	1.27	4.18	0.6	0.7	1.01	2.24	3.6	8.7	3.71	3.52
$Fe_2O_3^T$	4.98	5.79	5.44	6.52	2.98	5.37	5.08	4.51	5.39	5.25	4.79	3.75	5.15	5.04	11.10	11.28	7.70	7.32	5.44	3.65	4.85	3.34
H_2O^+	2.42	3.23	2.72	3.06	1.93	2.71	2.89	2.4	2.38	2.27	2.06	1.55	2.56	1.59	2.16	4.14	1.85	3.69	2.23	1.97	2.22	0.39
CO_2	3.38	2.69	3.88	1.89	1.89	3.38	3.28	2.99	3.88	3.78	4.28	5.17	1.79	4.28	0.38	0.4	1.06	1.84	3.08	7.26	3.48	3.88
总量	99.8	100.05	99.79	99.81	99.75	99.79	99.65	99.82	99.82	99.81	99.78	99.83	99.78	99.82	99.82	99.79	99.76	99.83	99.84	99.74	99.82	99.82
CIA	48	52	48	50	49	46	46	49	47	47	56	48	72	44	65	81	60	66	55	50	51	39
微量元素(μg/g)																						
Sc	14.8	17.7	3.67	21.3		16.8	16.5	13.4	16.2	14.9	12.3	10.0	12.0	26.3	13.7	11.3	7.68	16.2	12.0	9.66	11.4	7.05
V	104	124	34.5	157		117	115	90.0	105	114	94.5	81.1	75.9	191	132	121	101	99.3	90.1	58.2	90.7	62.9
Cr	171	180	7.07	173		152	200	78.5	128	96.1	61.8	47.6	108	266	60.6	124	44.7	101	118	77.3	118	134
Co	16.7	19.9	4.57	21.3		18.5	19.7	14.6	16.3	15.3	21.0	9.09	9.57	25.4	11.6	35.5	6.48	20.3	13.0	11.4	12.7	5.63
Ni	65.6	69.7	2.58	65.8		75.4	87.5	33.7	46.3	39.9	26.0	14.0	35.4	122	46.3	138	21.1	61.8	56.0	34.4	49.0	19.6
Ga	12.7	13.6	23.6	14.7		13.3	13.1	13.5	12.4	13.1	14.7	10.3	14.3	29.6	14.3	16.6	15.4	21.0	13.4	10.9	13.0	11.2
Rb	61.3	58.9	167	42.2		43.4	43.1	77.1	48.6	55.3	93.6	42.3	106	129	70.1	37.3	83.8	154	78.6	62.9	74.6	14.0
Sr	195	365	461	365		264	288	179	166	151	118	153	105	330	130	56.5	87.0	43.0	91.1	215	99.9	156
Y	19.7	19.9	10.2	20.8		17.9	15.4	22.7	19.8	20.6	19.7	12.7	22.8	49.7	24.8	30.8	7.17	27.3	23.1	25.1	23.6	21.3
Zr	180	96.6	321	91.3		91.9	87.4	200	149	115	145	86.0	248	314	98.4	129	88.0	159	261	184	193	379
Nb	6.35	4.66	11.6	4.40		4.35	3.50	7.20	5.23	5.78	9.39	4.28	10.8	24.1	7.78	13.0	4.15	16.0	13.3	11.0	12.1	12.5
Cs	4.04	16.0	1.29	9.19		3.31	4.90	9.26	6.57	4.49	5.77	4.65	8.96	7.72	6.43	2.88	4.59	10.1	5.16	3.40	5.61	0.23
Ba	584	418	1841	294		609	2034	400	314	324	816	347	756	1026	326	495	708	403	454	1167	397	551
Hf	4.71	2.63	7.68	2.48		2.55	2.37	5.38	4.01	3.14	4.17	2.27	6.87	8.41	2.85	3.76	2.48	4.42	6.95	5.07	5.09	9.80
Ta	0.61	0.36	0.79	0.33		0.35	0.28	0.59	0.43	0.44	0.81	0.34	0.87	1.88	0.43	1.02	0.31	1.20	1.00	0.84	0.89	0.96
Pb	36.4	25.5	31.3	24.0		28.4	85.1	22.5	21.7	15.8	19.0	10.1	8.32	35.9	29.5	12.0	25.5	24.2	23.3	32.0	26.8	46.9
Th	7.70	5.66	24.5	5.62		4.88	4.59	10.2	7.21	7.99	11.2	4.89	11.6	24.1	5.52	11.2	6.55	16.1	12.9	10.8	11.3	11.7
U	1.97	1.68	2.05	1.40		1.69	1.63	2.21	1.76	1.87	2.78	1.62	2.45	8.68	2.74	3.02	1.71	3.18	3.04	2.50	2.83	12.9
La	21.8	20.0	87.0	16.9		15.7	14.4	24.7	21.6	20.7	30.3	13.5	28.8	52.0	22.4	16.0	5.75	35.9	31.4	32.0	30.2	29.2
Ce	42.2	37.5	159	33.4		31.6	29.4	50.5	42.5	40.1	55.8	29.2	51.6	96.0	40.1	31.8	11.5	74.8	58.4	58.0	55.6	50.5
Pr	5.21	4.57	17.1	4.17		3.91	3.67	6.16	5.13	4.90	6.67	3.20	6.44	12.0	5.09	3.33	1.31	8.95	7.15	7.41	6.84	6.28
Nd	19.8	17.5	54.5	16.6		15.6	14.2	23.4	19.8	18.9	24.6	12.3	24.0	45.3	19.0	11.4	5.18	32.6	26.2	27.3	25.7	23.4
Sm	4.11	3.62	7.23	3.54		3.30	3.12	4.77	3.90	3.82	4.84	2.52	4.66	9.61	4.43	2.97	1.53	6.19	5.26	5.59	5.05	4.46
Eu	1.00	0.92	1.41	0.96		0.92	1.00	1.03	0.90	0.91	1.04	0.70	1.05	2.16	1.06	0.74	0.45	1.28	1.10	1.20	1.12	1.03

续(表 1)

采样位置	肃南										民乐											
岩性	粗砂岩										泥岩	粗砂岩	细砂岩									
样品号	QL-1	QL-2	QL-3	QL-4	QL-6	QL-7	QL-9	QL-10	QL-11	QL-14	ED1	ED1-2	ED3	ED4	ED5	ED6-2	ED7-2	ED13-2	ED15-2	ED16	ED21	ED27
Gd	3.78	3.43	4.36	3.66		3.23	3.01	4.31	3.63	3.73	4.15	2.28	4.20	9.13	4.60	4.31	1.46	5.37	4.55	4.99	4.49	3.92
Tb	0.58	0.54	0.48	0.57		0.50	0.48	0.66	0.57	0.60	0.63	0.37	0.66	1.44	0.72	0.81	0.22	0.83	0.71	0.75	0.71	0.63
Dy	3.41	3.29	2.19	3.50		3.12	2.92	4.09	3.54	3.67	3.72	2.26	4.04	9.01	4.36	5.39	1.30	4.92	4.23	4.39	4.24	3.82
Ho	0.72	0.70	0.38	0.74		0.65	0.57	0.84	0.71	0.76	0.74	0.49	0.84	1.80	0.91	1.13	0.27	1.03	0.87	0.89	0.83	0.79
Er	1.95	1.93	0.91	2.04		1.80	1.59	2.35	1.99	2.15	2.02	1.40	2.41	5.09	2.59	3.20	0.78	2.98	2.41	2.52	2.36	2.24
Tm	0.28	0.29	0.12	0.30		0.26	0.24	0.35	0.30	0.31	0.35	0.24	0.41	0.83	0.41	0.54	0.14	0.51	0.41	0.42	0.38	0.38
Yb	1.92	1.92	0.72	2.02		1.72	1.56	2.37	1.94	2.05	2.19	1.62	2.53	5.14	2.70	3.14	0.86	3.18	2.61	2.66	2.38	2.42
Lu	0.28	0.29	0.10	0.31		0.27	0.23	0.34	0.28	0.30	0.33	0.25	0.38	0.79	0.41	0.46	0.13	0.46	0.38	0.38	0.35	0.36
La_N/Yb_N	7.67	7.03	81.09	5.66		6.20	6.27	7.04	7.53	6.81	9.33	5.63	7.69	6.83	5.61	3.44	4.50	7.64	8.13	8.13	8.58	8.16
Eu/Eu*	0.76	0.78	0.71	0.81		0.85	0.99	0.68	0.72	0.73	0.69	0.88	0.71	0.70	0.71	0.63	0.91	0.66	0.67	0.68	0.71	0.74
ΣREE	107.04	96.47	335.97	88.73		82.61	76.38	125.91	106.77	102.87	137.38	70.29	131.96	250.26	108.78	85.18	30.85	179.04	145.70	148.46	140.30	129.47

采样位置	古浪							靖远												
岩性	粗砂岩							细砂岩								粉砂岩				
样品号	GL2-3	GL4-1	GL7-1	GL14-1	GL14-3	GL14-5	GL14-6	XS-3-2	XS-5	XS-6-2	XS-6-3	XS-8-3	XS-10-3	XS-12-1	XS-13-2	XS-13-3	XS-14-1	XS-14-3	XS-15	PAAS
主量元素(wt%)																				
SiO_2	64.81	69.99	69.48	50.6	52.67	60.98	46.6	69.81	55.33	64.95	66.52	56.47	65.88	66.7	69.09	64.81	72.36	67.74	68.89	62.8
TiO_2	0.43	0.48	0.25	0.41	0.4	0.5	0.35	0.35	0.39	0.44	0.65	0.58	0.56	0.7	0.49	0.51	0.45	0.52	0.44	1
Na_2O	0.37	0.78	2.89	0.16	0.16	0.12	0.12	1.19	1.1	1.46	1.56	1.05	1.17	1.42	0.95	1.19	0.77	0.31	0.45	1.2
MgO	1.57	1.39	1.12	1.41	1.85	1.89	1.6	2.27	1.61	2.15	2.52	2.32	2.09	2.11	2.06	1.98	2.43	2.55	2	2.2
Al_2O_3	10.57	11.92	15.7	9.42	10.37	10.84	8.14	7.83	7.93	9.5	10.94	10.51	9.4	9.88	8.77	9.64	9	9.35	7.51	18.9
MnO	0.05	0.04	0.02	0.11	0.11	0.06	0.09	0.05	0.08	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.07	0.05	0.08	0.07	0.11
P_2O_5	0.06	0.11	0.07	0.1	0.09	0.12	0.08	0.08	0.07	0.09	0.13	0.11	0.12	0.14	0.11	0.11	0.09	0.12	0.11	0.16
K_2O	2.63	3.03	0.64	2.21	2.12	2.49	1.88	1.43	1.46	1.45	1.84	2.56	1.98	1.86	1.66	2.11	1.49	1.91	1.43	3.7
CaO	7.92	3.48	2.29	17.11	14.59	9.15	20.14	6.93	15.68	8.2	4.79	11.08	7.49	5.65	6.33	7.65	3.72	6.27	8.08	1.3
$Fe_2O_3^T$	3.78	3.75	2.07	3.00	3.21	3.67	2.66	2.65	3.17	3.67	4.72	4.25	3.65	4.85	3.21	3.76	3.94	3.63	2.49	6.5
H_2O^+	2.35	2.34	3.55	2.26	2.68	2.77	1.99	1.91	1.85	2.35	2.72	2.63	2.33	2.35	2.34	2.31	2.72	2.92	2.31	
CO_2	5.47	2.64	1.74	13.14	11.74	7.36	16.32	5.47	11.34	5.67	3.58	8.36	5.27	4.28	4.88	5.87	2.99	4.58	6.17	
总量	99.82	99.83	99.79	99.82	99.84	99.79	99.84	99.85	99.86	99.84	99.84	99.83	99.84	99.83	99.82	99.85	99.85	99.85	99.86	
CIA	71	66	62	75	77	76	75	58	60	59	60	62	60	59	63	60	67	74	70	69
微量元素(μg/g)																				
Sc	7.30	8.36	4.15	7.12	7.97	9.26	6.87	6.71	7.66	8.83	11.6	10.7	9.93	11.7	8.59	9.08	8.73	6.79	9.39	16
V	51.6	55.3	24.9	57.0	60.0	66.5	48.9	47.2	54.8	57.0	74.2	74.2	67.3	89.5	55.1	59.3	65.0	38.4	53.4	
Cr	56.5	47.9	12.1	49.8	49.3	57.7	42.8	38.6	37.1	37.7	57.8	57.5	49.5	62.8	41.4	45.0	39.9	40.7	66.5	110
Co	8.50	7.85	3.62	6.86	8.77	8.82	7.31	7.90	8.58	10.5	14.2	10.4	8.91	10.3	8.25	9.26	9.14	7.03	10.1	
Ni	25.8	21.6	7.07	23.0	26.4	27.1	22.8	18.0	18.3	20.4	30.3	24.7	20.2	22.5	17.3	20.4	18.1	15.3	23.1	55
Ga	13.4	15.1	14.3	11.8	12.9	13.6	10.3	8.75	9.13	10.8	13.6	13.1	11.3	11.8	9.96	11.4	10.1	8.64	10.9	20
Rb	116	135	28.9	94.8	97.1	111	85.1	50.4	62.1	60.2	80.9	102	80.1	74.5	65.8	84.2	59.9	59.3	76.8	160
Sr	84.0	56.6	359	120	163	107	137	129	89.8	80.0	73.0	106	87.6	73.3	83.9	94.4	57.9	90.4	66.0	200
Y	17.0	16.2	6.54	19.1	20.9	17.0	19.0	14.3	18.7	17.4	19.2	25.0	22.3	24.5	19.3	22.1	15.3	22.8	22.9	27
Zr	142	170	120	171	110	167	107	132	98.2	141	237	219	217	307	264	188	183	263	243	210

续(表 1)

采样位置	古浪							靖远												
岩性	粗砂岩							细砂岩								粉砂岩				
样品号	GL2-3	GL4-1	GL7-1	GL14-1	GL14-3	GL14-5	GL14-6	XS-3-2	XS-5	XS-6-2	XS-6-3	XS-8-3	XS-10-3	XS-12-1	XS-13-2	XS-13-3	XS-14-1	XS-14-3	XS-15	PAAS
Nb	8.74	10.2	8.09	7.49	7.38	9.53	6.56	6.13	6.45	6.73	11.3	10.2	9.40	11.6	8.25	8.43	6.64	7.67	8.83	19
Cs	5.67	4.18	2.84	4.03	5.39	3.98	3.79	4.65	3.80	4.64	5.33	9.80	7.62	6.28	5.33	8.91	4.69	5.71	7.60	
Ba	581	581	733	495	421	784	466	296	278	293	404	440	386	361	402	370	285	265	374	650
Hf	3.75	4.44	3.03	4.28	2.88	4.24	2.75	3.59	2.51	3.57	6.17	5.64	5.65	7.92	6.93	4.92	4.91	6.80	6.29	5
Ta	0.71	0.84	0.59	0.59	0.58	0.73	0.48	0.48	0.50	0.52	0.88	0.76	0.70	0.97	0.63	0.63	0.51	0.57	0.66	1.28
Pb	20.4	23.0	32.7	21.0	23.9	20.3	21.3	15.9	14.8	18.8	25.7	27.1	23.7	28.2	22.0	21.0	21.6	17.2	23.0	20
Th	12.5	16.0	10.1	11.4	10.9	13.6	9.01	6.26	6.79	7.91	10.9	10.7	9.64	13.8	9.89	9.45	8.54	8.46	10.1	14.6
U	1.99	2.53	0.87	1.69	1.57	2.03	1.46	1.24	1.09	1.39	1.81	2.10	1.79	2.23	1.88	1.74	1.69	1.69	1.75	3.1
La	21.0	27.0	34.0	24.3	19.1	22.9	16.8	21.7	25.8	23.6	22.6	33.7	27.6	32.7	26.1	27.7	15.8	25.5	25.8	38.2
Ce	40.6	45.0	53.8	43.9	34.0	40.3	30.9	40.0	37.3	39.7	43.3	55.1	52.1	63.6	47.4	50.7	33.2	49.2	47.8	79.6
Pr	5.12	5.77	6.17	5.36	4.59	5.04	4.16	4.60	5.27	5.07	5.12	7.06	6.35	7.70	5.83	6.46	3.80	6.16	5.91	8.83
Nd	18.4	21.1	20.2	19.5	17.3	18.3	15.5	16.7	18.9	18.6	18.5	25.7	23.3	28.5	21.4	23.7	14.1	22.9	21.5	33.9
Sm	3.71	3.85	2.62	3.79	3.47	3.41	3.36	3.14	3.57	3.51	3.54	4.75	4.55	5.53	4.02	4.39	2.75	4.53	4.26	5.55
Eu	0.80	0.81	0.62	0.87	0.84	0.75	0.77	0.71	0.78	0.81	0.79	1.00	0.93	1.10	0.87	0.96	0.61	0.93	0.89	1.08
Gd	3.23	3.43	1.77	3.53	3.45	3.23	3.25	2.82	3.39	3.25	3.44	4.38	4.12	4.80	3.68	4.07	2.59	4.01	3.94	4.66
Tb	0.50	0.51	0.24	0.53	0.55	0.49	0.52	0.44	0.52	0.50	0.53	0.69	0.64	0.75	0.57	0.64	0.42	0.64	0.64	0.77
Dy	3.00	2.96	1.31	3.16	3.45	2.95	3.13	2.65	3.16	3.07	3.31	4.19	3.82	4.41	3.35	3.81	2.54	3.77	3.85	4.68
Ho	0.59	0.61	0.26	0.63	0.70	0.63	0.60	0.53	0.65	0.62	0.69	0.87	0.79	0.90	0.69	0.78	0.55	0.78	0.82	0.99
Er	1.70	1.69	0.71	1.70	1.88	1.78	1.69	1.49	1.85	1.77	1.93	2.50	2.21	2.47	1.95	2.18	1.60	2.16	2.23	2.85
Tm	0.26	0.26	0.12	0.25	0.28	0.28	0.25	0.22	0.27	0.26	0.30	0.37	0.31	0.37	0.30	0.32	0.24	0.33	0.33	0.41
Yb	1.72	1.80	0.76	1.64	1.76	1.86	1.62	1.48	1.79	1.76	2.02	2.52	2.18	2.45	2.06	2.15	1.72	2.16	2.34	2.82
Lu	0.25	0.28	0.12	0.24	0.26	0.27	0.23	0.22	0.25	0.27	0.30	0.37	0.32	0.35	0.32	0.32	0.27	0.34	0.34	0.43
La_N/Yb_N	8.29	10.16	30.16	10.00	7.34	8.31	6.99	9.87	9.73	9.06	7.55	9.03	8.53	9.02	8.56	8.71	6.20	8.01	7.43	9.72
Eu/Eu*	0.69	0.67	0.83	0.71	0.73	0.68	0.71	0.71	0.68	0.72	0.68	0.66	0.64	0.64	0.68	0.68	0.69	0.65	0.65	0.63
ΣREE	100.83	115.06	122.76	109.44	91.54	102.28	82.79	96.65	103.47	102.81	106.38	143.19	129.17	155.63	118.45	128.20	80.11	123.38	120.63	185

a) PAAS 数据引自 Taylor 和 McLennan[27]; CaO 为全钙(包含磷灰石中的钙); $Fe_2O_3^T$ 为总铁

2　地球化学特征

2.1　元素特征

研究样品主量元素特征值显示出一定的规律性. Al_2O_3/SiO_2 由西向东逐渐降低, 显示 SiO_2 由西向东富集; K_2O/Na_2O 比值东部(古浪、靖远)高于西部(肃南、民乐), 显示东部相对于西部富集含钾矿物而亏损斜长石; $MgO+Fe_2O_3^T$ 含量西部显著高于东部, 显示铁镁质组分西部高于东部; 而 $Al_2O_3/(CaO+Na_2O)$除民乐 3 个样品较高外, 东西差别不明显(图 2).

微量元素含量总体较澳大利亚后太古代平均页岩[27](PAAS)低, 且西部微量元素含量变化范围较东部大. 在上地壳标准化蛛网图中, 4 个地区样品微量元素含量均显示不同程度的 Nb, Ta 亏损, 此外, 除肃南 QL-3 样品和古浪 GL7-1 样品外, 西部(肃南、民乐)样品普遍亏损 Rb 元素, 且大多富集 Sc, Co, Ni, V 和 Cr 元素. 而东部 Sr 元素亏损量较西部大且不具有 Sc, Co, Ni, V 和 Cr 元素的富集(图 3).

稀土元素含量除民乐一个样品外, 在球粒陨石标准化分配模式图中均较 PAAS 低, 且民乐的稀土元素值变化范围大于其他三地样品. 稀土元素分配模式均显示右倾, 轻稀土元素(LREE)富集, 重稀土元素(HREE)较平坦(除样品 QL-3, GL 7-1). La_N/Yb_N 由西向东升高(图 4, 表 1), 且东部(古浪、靖远)样品均显示明显的 Eu 负异常, 而西部(肃南、民乐)除民乐部分样品显示明显的 Eu 负异常外, 其他样品显示微弱或无 Eu 异常(图 4, 表 1).

2.2　影响因素

沉积岩的地球化学成分受诸多因素影响, 如源岩属性, 风化强度与沉积再循环、沉积分选、成岩作用等. 因此, 在研究沉积物物源特征以前, 必须对上述因素进行评估.

2.2.1　成岩后生作用

成岩及其后生作用常造成主量元素出现异常, 如钙化造成 CaO 分布的离散[28], 热液作用造成 SiO_2 含量的突然升高[10], Na^+的流失造成 K_2O/Na_2O 比值的异常等. 然而老君山组样品中 CaO, SiO_2 和 K_2O/Na_2O 比值分布较集中, 与 PAAS 相比没有出现上述异常(图 2, 表 1), 表明成岩及其后生作用并没有显著影响样品成分.

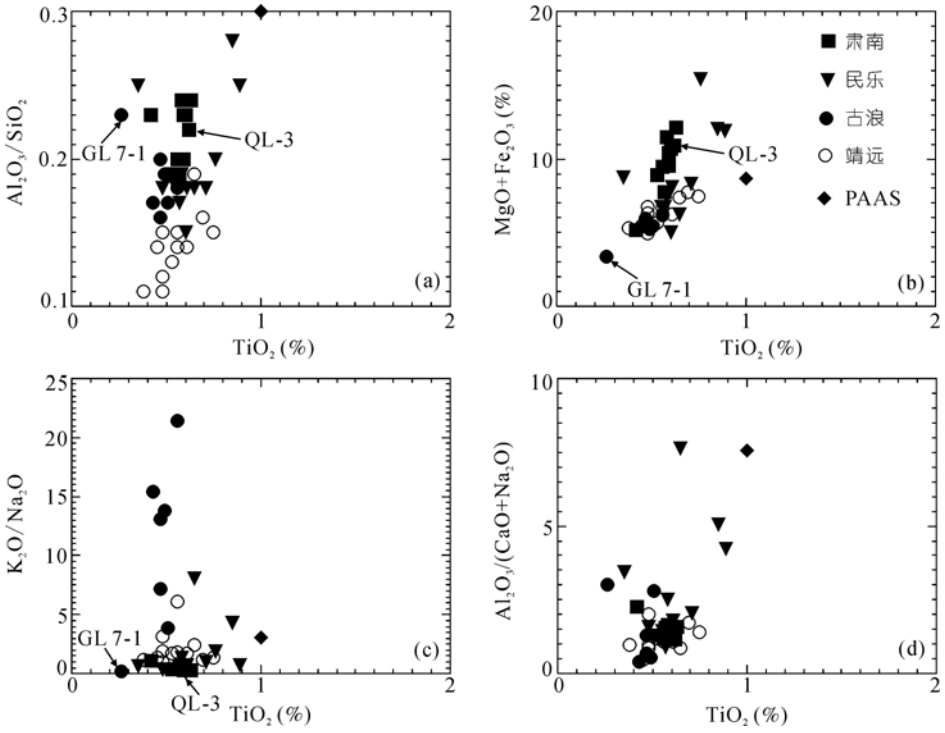

图 2　老君山组碎屑岩主量元素特征值分布图

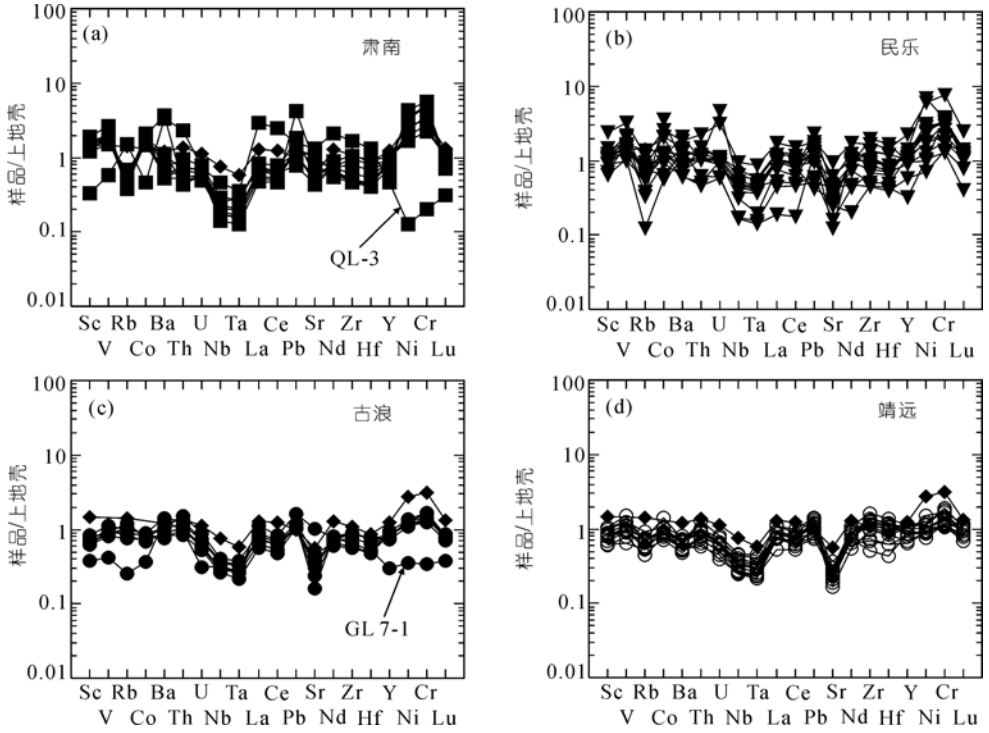

图 3　老君山组碎屑岩微量元素上地壳标准化蛛网图

图例同图 2, 上地壳标准化数据引自 Taylor 和 McLennan[27]

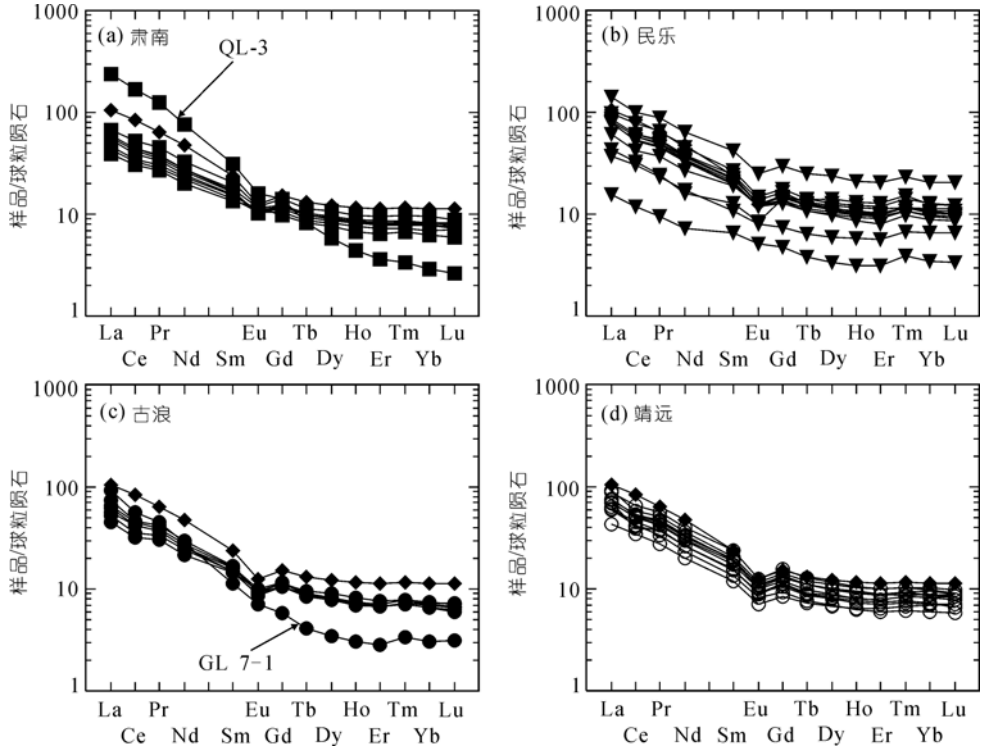

图 4　老君山组碎屑岩稀土元素球粒陨石标准化分配模式图

图例同图 2, 球粒陨石标准化数据引自 Taylor 和 McLennan[27]

2.2.2　沉积分选与再循环

通过野外露头观察, 老君山组主要为磨圆、分选较差的砾岩, 因而推断为近源堆积, 因此, 沉积分选作用对样品成分的影响不大. 此外, 民乐样品 Ed1 为泥质岩, 而靖远沙流水样品 XS13-2, XS13-3, XS14-1, XS14-3, XS15 均为粉砂岩, 上述样品与各自采样区其他粒度较大的样品的地球化学元素浓度分布一致, 没有出现异常, 表明沉积物粒度对样品成分的控制作用不明显, 因而进一步证明沉积分选作用没有造成样品成分分异.

沉积分选及再循环可导致重矿物富集, 从而导致某些元素富集[29]. 在 Th/Sc-Zr/Sc 图中(图 5), 除民乐样品 ED27 样品外, 其他样品均与成分演化线(BFG)较为接近, 表明样品成份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. 而民乐 ED27 样品中可能含有较多经过沉积再循环的古老沉积物成分, 造成锆石的富集, 从而引起 Zr 元素的富集[9].

2.2.3　化学风化的影响

化学风化作用常常影响着碎屑岩的化学组成. 在风化过程中, 稳定的阳离子被保存在风化产物中(如 Al^{3+}, Ti^{4+}等), 而不稳定的阳离子往往流失(如 Na^{+}, Ca^{2+}, K^{+}等)[30]. 元素的丢失程度取决于化学风化强度[31]. Nesbitt 和 Young[8]提出利用化学蚀变指数(CIA)来定量评价岩石遭受的化学风化强度. 其中, CIA = $100\times[Al_2O_3/(Al_2O_3+CaO^*+Na_2O+K_2O)]$, 式中各元素采用摩尔百分含量, 其中 CaO*仅指硅酸盐矿物中的 CaO 摩尔百分含量.

除了硅质矿物以外, 碎屑岩中的 CaO 主要储存于磷酸盐(磷灰石)和碳酸盐(方解石和白云石)之中. 而碳酸盐矿物主要来自两个途径: 第一是碳酸盐岩碎屑的输入; 第二是上覆碳酸盐岩地层的淋滤. 北祁连地区石炭系主要为碳酸盐岩, 覆盖在泥盆系之上. 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, 尽管 Fedo 等[30]给出了去除碳酸盐中 Ca^{2+}成分的方法, 但是因确定方解石和白云石的比例比较困难, 而无法有效去除碳酸盐中 Ca^{2+}成分. 所以在采用 Fedo 等[30]的方法去除掉磷灰石中所含的 Ca^{2+}后, 再采用 Bock 等[32]提出的 CaO 校正方法进行 CIA 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 $CaO_R>Na_2O$ 含量时, $CaO^*=Na_2O$; 当 $CaO_R\leqslant Na_2O$ 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 值(表 1)并在 A-CN-K 三角图中投点(图 6). 计算结果显示肃南 CIA 值介于 46~52, 平均 48; 民乐 CIA 值介于 39~81, 平均 57; 古浪 CIA 值介于 62~77, 平均 72; 靖远 CIA 值介于 58~74, 平均 63. 暗示肃南源岩没有经历化学风化, 而民乐除一件样品(ED6-2)CIA 值较高外, 其余均较低, 反映源区经历了较低的化学风化; 而东部经历了低-中等程度的化学风化. 因而总体来讲, 西部老君山组源岩未遭受化学风化, 而东部仅经历了低-中等

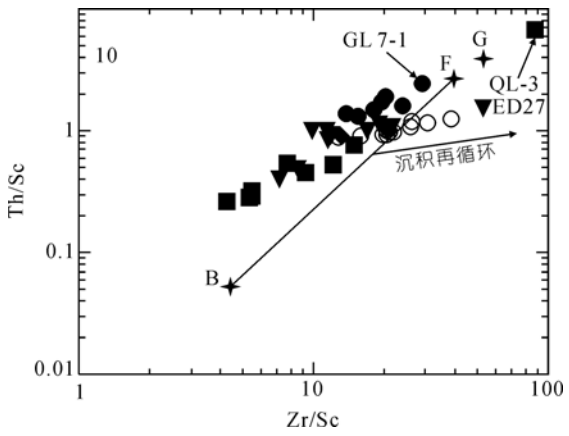

图 5　老君山组碎屑岩 Zr/Sc-Th/Sc 图

据 McLennan 等[1]修改, 图例同图 2. B, 玄武岩; F, 长英质岩石; G, 花岗岩

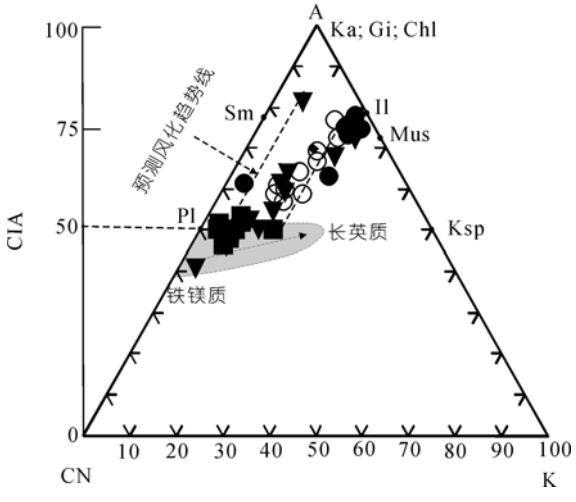

图 6　老君山组碎屑岩 A-CN-K 三角图

据 Fedo 等[30]修改, 图例同图 2. Ka, 高岭石; Gi, 水铝矿; Chl, 绿泥石; Sm, 蒙脱石; Il, 伊利石; Mus, 白云母; Pl, 斜长石; Ksp, 钾长石; 阴影区显示典型火成岩区域, 据文献[33]修改

程度的化学风化. 而由微量元素、稀土元素均一的分配形式来看, 风化作用并未影响到岩石中保存的源区信息.

综合以上信息, 老君山组沉积物主要为近源沉积物, 沉积和成岩-后生作用对物源的元素地球化学示踪影响不大, 适宜于作为物源研究的对象.

3 讨论

3.1 老君山组源岩界定

稀土元素(REE)和高场强元素以及部分过渡金属(如 Co)通常被认为是沉积过程中最稳定的元素, 且 Sc, Co, Cr, Ni, V 倾向于富集于铁镁质岩石中, 而 Th 和 La 倾向于富集于长英质岩石之中[34]. 此外, 长英质岩石具有高的 LREE/HREE 比值和明显的负 Eu 异常, 铁镁质岩石具有低的 LREE/HREE 比值和弱或无 Eu 异常[35]. 因此, 利用这些元素能有效地判别碎屑沉积岩源区成分[9,13]. 从岩石地球化学特征上来看, 不同地区老君山组源岩在空间上存在不同.

肃南样品除 QL-3 外, 均具有高的 Al_2O_3/SiO_2 比值(低的 SiO_2 含量)和高的 $MgO+Fe_2O_3^T$ 含量(图 2), 富集 Sc, Co, Ni, V 和 Cr(图 3), 同时 LREE/HREE 比值较低(La_N/Yb_N, 5.66~7.67, 平均值 6.78), 且负 Eu 异常微弱或无 Eu 异常(图 4). 主量元素、微量元素显示源岩以铁镁质岩石为主的特征. 而样品 QL-3 亏损 Sc, Ni, V 和 Cr 元素, 富集 Th, La, Nd, Zr, Hf 元素, 总稀土含量高达 336.97(表 1), La_N/Yb_N 比值高达 81, 并具中等负 Eu 异常(表 1), 显示花岗岩的特征[35](图 5).

民乐样品可分为两组. 第一组具有高的 Al_2O_3/SiO_2 比值和高的 $MgO+Fe_2O_3^T$ 含量(图 2), 富集 Sc, Co, Ni, V 和 Cr(图 3), 稀土元素显示低等富集 LREE, 且负 Eu 异常微弱或无 Eu 异常(图 4), 显示源岩以铁镁质岩石为主的特征. 第二组样品具有低的 Al_2O_3/SiO_2 比值和低的 $MgO+Fe_2O_3^T$ 含量(图 2); 富集 Th, La, Zr, Hf 元素(图 3); 稀土元素显示中等富集 LREE, 且具负 Eu 异常(图 4), 显示源岩以长英质岩石为主的特征.

古浪样品除 GL7-1 外, 均具有中等的 Al_2O_3/SiO_2 比值和中等的 $MgO+Fe_2O_3^T$ 含量(图 2), 弱亏损 Sc, Co 和轻度富集 Th, La(图 3), 稀土元素显示中高程度的 LREE 富集, 且具显著的负 Eu 异常(图 4). 显示源岩以长英质岩石为主的特征. 而样品 GL7-1 与其他样品相比, 具有高的 Al_2O_3/SiO_2, 低的 $MgO+Fe_2O_3^T$ 含量和 K_2O/Na_2O 比值, 亏损 Sc, Ni, V 和 Cr 等元素, 具有较高的总稀土含量, La_N/Yb_N 比值较高, 达到 30, 具负 Eu 异常. 亦显示长英质岩石的特征.

靖远样品具有低的 Al_2O_3/SiO_2 比值(高的 SiO_2 含量)和低的 $MgO+Fe_2O_3^T$ 含量(图 2), 稀土元素显示中高程度的 LREE 富集, 且具显著的负 Eu 异常(图 4). 显示源岩以长英质岩石为主的特征.

因此, 地球化学特征表明, 肃南源岩主要为铁镁质岩石, 并有少量花岗质岩石; 民乐地区沉积物既有铁镁质成分的输入也有长英质成分的输入; 而民乐向东的古浪、靖远一带, 源岩主要为长英质岩石. 这一特征由图 6 也可得到启示, 因为预测风化趋势线反向延长, 与长石连线(Pl-Ksp)的交点指示源岩中斜长石与钾长石比例, 可判断源岩成分[30], 在图 6 中, 肃南样品投在铁镁质岩区, 而从民乐向东, 样品投点逐渐靠近长英质岩区.

不同的构造环境, 形成的沉积岩的碎屑物质组成和地球化学成份不同, 可据此判定沉积物源岩形成的构造背景. 根据 Bhatia 等[7,36]提出的常量元素、微量元素构造背景判别图(图 7, 8), 老君山组样品主要投在大陆岛弧和活动大陆边缘环境并有少量样品投在大洋岛弧环境, 不具有被动大陆边缘的沉积背景. 其中西部肃南一带沉积物主要来自卷入造山带的大洋岛弧和大陆岛弧, 而自民乐向东沉积物既有来自卷入造山带的大洋岛弧和大陆岛弧的物质也有来自陆块的物质.

老君山组形成于早泥盆世、中泥盆世北祁连山强烈隆升时期, 且具有近源堆积的特征. 结合源岩岩性及形成的大地构造背景判别, 推断源岩可能主要位于南部造山带. 为进一步确定源岩层位及岩性, 把老君山组样品与造山带内部及中祁连地块变质基底岩石进行对比发现, 沉积于造山带西部肃南一带山前的磨拉石主要来自卷入造山带的北祁连岛弧, 而从民乐向东, 沉积于造山带山前的磨拉石既有来自卷入造山带的北祁连岛弧的物质, 也有来自中祁连变质基底的物质(图 9).

3.2 老君山组物源配置对造山作用的响应

北祁连造山带东西两区从前寒武基底到早古生代火山岩组成上存在明显的差别[39,40]. 前人研究认为, 造成这种东西差异的原因可能是由于早古生代

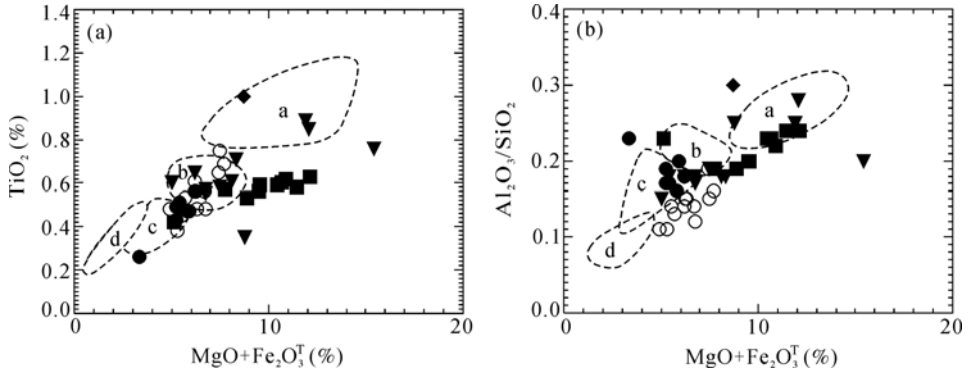

图 7　老君山组碎屑岩主量元素构造背景判别

据 Bhatia[36], 图例同图 2. a, 大洋岛弧; b, 大陆岛弧; c, 活动大陆边缘; d, 被动大陆边缘

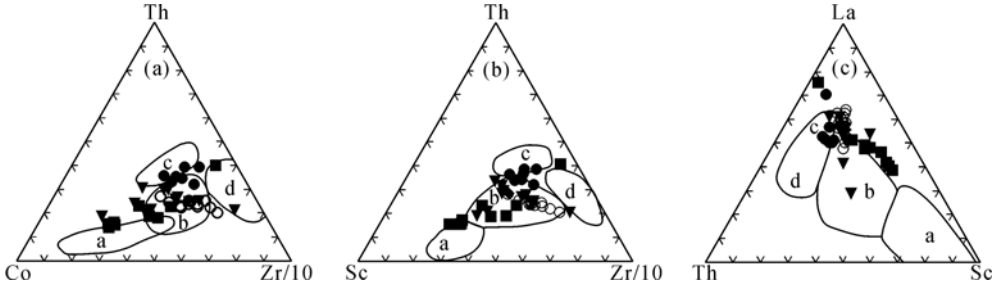

图 8　老君山组碎屑岩 Th-Co-Zr/10(a), Th-Sc-Zr/10(b)和 La-Th-Sc(c)构造环境判别图

据 Bhatia 和 Crook[7], 图例同图 2. a, 大洋岛弧; b, 大陆岛弧; c, 活动大陆边缘; d, 被动大陆边缘

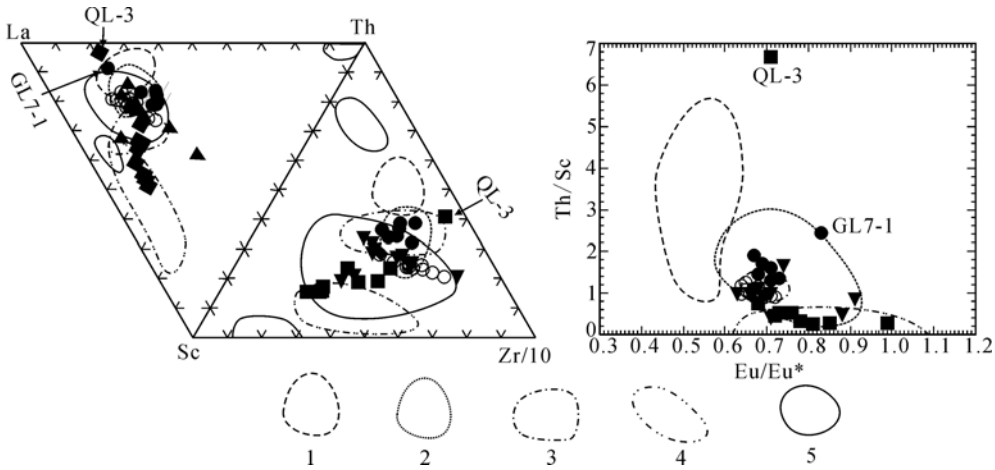

图 9　老君山组沉积物源岩限定

样品图例同图 2. 1, 马衔山群花岗岩; 2, 马衔山群变沉积岩; 3, 兴隆山群变沉积岩; 4, 西部岛弧; 5, 石灰沟岛弧. 中祁连变质基底数据引自文献[37, 38], 北祁连岛弧数据引自文献[18]

时期北祁连洋盆洋脊扩张速率存在东慢西快的特征[18], 造成东西两段消减模式的不同[39], 这可能导致了志留纪陆-陆"斜向碰撞或不规则边缘碰撞"[24,41].

早泥盆世、中泥盆世处于北祁连造山带强烈隆升时期, 在北祁连造山带山前沉积了大量的同造山期的磨拉石——老君山组[22]. 从老君山组物源的空间

配置情况来看, 泥盆纪北祁连造山带的物质组成在走向上是不对称的, 这种不对称性反映造山带的隆升过程可能在东西两段上存在不均一性. 西部肃南一带碎屑物质主要来自北祁连岛弧, 而东段既有来自北祁连岛弧的物质, 也有来自中祁连地块的物质, 因而推断, 在造山带东段, 中祁连地块已经与北祁连一起完全卷入造山带, 并成为剥蚀区, 而在造山带西段, 中祁连地块参与造山的程度可能较弱.

此外, 从整个造山带志留系-泥盆系发育情况来看, 志留系在西部肃南一带发育完全, 下志留统肮脏沟组、中志留统泉脑沟山组和上志留统旱峡组之间整合接触. 而东部靖远一带仅发育褶皱了的下志留统肮脏沟组, 中上志留统缺失. 泥盆系分布东西部差异也很明显. 中下泥盆统老君山组以扇体断续分布于整个造山带北侧, 东部沉积范围及厚度显著大于西部[15]. 因而, 结合物源分布特征以及志留系-泥盆系在造山带东西部分布上的差异, 可推断, 北祁连造山带在隆升过程中存在“东强西弱”的不均一造山特点, 这种不均一造山作用导致了中上志留统在东部的缺失, 而引起这种不均一造山特点的主要原因可能与“斜向碰撞或不规则边缘碰撞”的碰撞形式有关.

4 结论

北祁连造山带老君山组沉积地球化学研究表明: (1) 老君山组沉积物主要为近源沉积物, 沉积和成岩-后生作用对物源的元素地球化学示踪影响不大; (2) 西部肃南老君山组沉积物主要来自卷入造山带的北祁连岛弧物质, 而自民乐向东沉积物既有来自北祁连岛弧也有来自中祁连变质基底的物质; (3) 北祁连造山带由于早古生代中祁连地块与阿拉善地块之间的“斜向碰撞或不规则边缘碰撞”作用, 导致泥盆纪早期造山作用在走向上存在“东强西弱”的不均一造山特点.

致谢 野外工作期间得到甘肃省地矿局第三地质矿产勘查院李大庆等同志的帮助, 三位评审专家对文章提出了建设性意见, 在此一并表示衷心感谢.

参考文献

1 McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K, et al. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. Geol Soc Am Spec Paper, 1993, 284: 21—40
2 Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust. In: Rudnick R L, ed. Treatise on Geochemistry, version 3, The Crust. Oxford: Elsevier-Pergamon, 2003. 1—64
3 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. Precambrian Res, 2005, 143: 23—49
4 Hegde V S, Chavadi V C. Geochemistry of late Archaean metagreywackes from the Western Dharwar Craton, South India: Implications for provenance and nature of the Late Archaean crust. Gondwana Res, 2009, 15: 178—187
5 Li R W, Li S Y, Jin F Q, et al. Provenance of Carboniferous sedimentary rocks in the northern margin of Dabie Mountains, central China and the tectonic significance: Constraints from trace elements, mineral chemistry and SHRIMP dating of zircons. Sediment Geol, 2004, 166: 245—264
6 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. Geochim Cosmochim Acta, 1995, 59: 1153—1177
7 Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of gyaywake and tectonic of sedimentary basins. Contrib Mineral Petrol, 1986, 92: 181—193
8 Nesbitt H W M, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. Nature, 1982, 299: 715—717
9 Long X P, Sun M, Yuan C, et al. Early Paleozoic sedimentary record of the Chinese Altai: Implications for its tectonic evolution. Sediment Geol, 2008, 208: 88—100
10 Kasanzu C, Maboko M A H, Manya S, et al. Geochemistry of fine-grained clastic sedimentary rocks of the Neoproterozoic Ikorongo Group, NE Tanzania: Implications for provenance and source rock weathering. Precambrian Res, 2008, 164: 201—213
11 Lambeck A, Huston D, Maidment D, et al. 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

Res, 2008, 166: 185—203
12 李双应, 李任伟, 王道轩, 等. 大别山北缘凤凰台组砾石地球化学特征及源区构造环境. 沉积学报, 2005, 23: 380—388
13 许德如, 马驰, Nonna B C, 等. 海南岛北西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. 地球化学, 2007, 36: 11—26
14 周炼, 高山, 刘勇胜, 等. 扬子克拉通北缘碎屑沉积岩地球化学特征及意义. 地球科学——中国地质大学学报, 2007, 32: 29—38
15 杜远生, 张哲, 周道华, 等. 北祁连-河西走廊志留纪和泥盆纪古地理及其对同造山过程的沉积响应. 古地理学报, 2002, 4: 1—8
16 张旗, 孙晓猛, 周德进, 等. 北祁连蛇绿岩特征、形成环境及其构造意义. 地球科学进展, 1997, 12: 366—393
17 冯益民, 何世平. 祁连山大地构造与造山作用. 北京: 地质出版社, 1996. 1—135
18 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 北祁连山海相火山岩岩石成因. 北京: 地质出版社, 1996. 74—103
19 杜远生, 朱杰, 顾松竹, 等. 北祁连造山带寒武系-奥陶系硅质岩沉积地球化学特征及其对多岛洋的启示. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37: 1314—1329
20 Xu Z Q, Yang J S, Wu C L, et al. Timing and mechanism of formation and exhumation of the Northern Qaidam ultrahigh-pressure metamorphic belt. J Asian Earth Sci, 2006, 28: 160—173
21 Song S G, Niu Y L, Zhang L F, et al. Tectonic evolution of Early Paleozoic HP metamorphic rocks in the North Qilian Mountains, NW China: New perspectives. J Asian Earth Sci, 2009, 35: 334—353
22 左国朝, 吴汉泉. 北祁连中段早古生代双向俯冲——碰撞造山模式剖析. 地球科学进展, 1997, 12: 315—322
23 甘肃省地质矿产局. 甘肃省岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997. 1—314
24 杜远生, 朱杰, 韩欣, 等. 从弧后盆地到前陆盆地——北祁连造山带晚加里东-早海西期的沉积盆地与构造演化. 地质通报, 2004, 23: 911—917
25 Du Y S, Xu Y J, Yang J H. Soft-sediment deformation structures related to earthquake from the devonian of the Eastern North Qilian Mts. and its tectonic significance. Acta Geol Sin, 2008, 82: 801—840
26 杜远生, 周道华, 龚淑云, 等. 甘肃靖远-景泰泥盆系湖相风暴岩及其古地理意义. 矿物岩石, 2001, 21: 69—73
27 Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Oxford: Blackwell, 1985. 1—312
28 Gu X X. Geochemical characteristics of the Triassic Tethys-turbidites in the northwestern Sichuan, China: Implications for provenance and interpretation of the tectonic setting. Geochim Cosmochim Acta, 1994, 58: 4615—4631
29 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. Geochim Cosmochim Acta, 1990, 43: 375—388
30 Fedo C M, Nesbtit H W. Unravelling the effects of potassium metasomatzsm in sedimentary rocks and paleosoles, with implications for paleoweathing conditions and provenance. Geology, 1995, 23: 921—924
31 Condie K C, Noll J P D, Conway C M. Geochemical and detrital mode evidence for two sources of Early Proterozoic sedimentary rocks from the Tonto Basin Supergroup, central Arizona. Sediment Geol, 1992, 77: 51—76
32 Bock B, McLennan S M, Hanson G N. Geochemistry and provenance of the Middle Ordovician Austin Glen Member (Normanskill Formation) and the Taconian Orogeny in New England. Sedimentology, 1998, 45: 635—655
33 She Z B, Ma C Q, Mason R, et al. Provenance of the Triassic Songpan-Ganzi flysch, west China. Chem Geol, 2006, 231: 159—175
34 Taylor S R, McLennan S M. The geochemical evolution of the continental crust. Rev Geophys, 1995, 33: 241—265
35 Cullers R L. The geochemistry of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian-Permian age, Colorado, USA: Implications for provenance and metamorphic studies. Lithos, 2000, 51: 181—203
36 Bhatia M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstone. J Geol, 1983, 91: 611—627
37 Wan Y S, Yang J S, Xu Z Q, et al. Geochemical characteristics of the Maxianshan complex and Xinglongshan Group in the eastern segment of the Qilian orogenic belt. J Geol Soc China, 2000, 43: 52—68
38 Smith A D. The geochemistry and age of ophiolitic strata of the Xinglongshan Group: Implications for the amalgamation of the Central Qilian belt. J Asian Earth Sci, 2006, 28: 133—142
39 李文渊, 郭周平, 王伟. 北祁连山加里东期聚敛作用的构造转换及其成矿响应. 地质论评, 2005, 51: 120—127
40 左国朝, 刘义科, 张崇. 北祁连造山带中-西段陆壳残块群的构造-地层特征. 地质科学, 2002, 37: 302—312
41 戚学祥, 张建新, 李海兵, 等. 北祁连南缘右行韧性走滑剪切带的同位素年代学及其地质意义. 地学前缘, 2004, 11: 469—479