

祁连山老君山砾岩的碎屑组成和源区大地构造背景

闫 臻¹, 肖文交¹, 刘传周¹, 袁 超², 王宗起³, 李继亮¹

YAN Zhen¹, XIAO Wen-jiao¹, LIU Chuan-zhou¹, YUAN Chao², WANG Zong-qi³, LI Ji-liang¹

1. 岩石圈演化国家重点实验室, 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 410640; 3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

1. *State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100029, China;*

2. *Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 410640, Guangdong, China;*

3. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*

摘要:老君山砾岩是一套由砾岩和杂砂岩组成的陆相粗碎屑岩。砾岩由来自下伏基底的超镁铁岩、中—基性火山岩、硅质岩、花岗岩等碎屑组成。杂砂岩中岩屑含量大于70%,石英约10%,长石约15%。岩屑以中基性火山岩和花岗岩为主;硅质岩屑是主要的沉积岩屑。锆石、磷灰石、磁铁矿是杂砂岩中最为丰富的重矿物,同时还有铬铁矿、石榴子石、电气石、金红石、黄铁矿。这些事实说明,老君山砾岩的源区曾出露有超镁铁岩、中基性火山岩、变质岩等类型的岩石。砂岩碎屑模式和粉砂岩、泥岩的地球化学成分均表明,老君山砾岩源区为大陆边缘弧和大洋岛弧,形成于活动大陆边缘与岛弧相关的沉积盆地中。

关键词:老君山砾岩;碎屑组成;重矿物;源区背景;与岛弧有关的盆地;祁连山

中图分类号:P534.44;P588.21².5

文献标识码:A

文章编号:1671-2552(2006)01~02-0083-16

Yan Z, Xiao W J, Liu C Z, Yuan C, Wang Z Q, Li J L. Detrital composition of the Laojunshan conglomerate in the Qilian Mountains, Northwest China and tectonic settings of its source regions. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25 (1-2): 83-98

Abstract: The Laojunshan conglomerate is a suite of continental coarse clastic rocks consisting of conglomerate and graywacke. Conglomerate is composed of fragments of ultramafic rocks, intermediate-basic volcanic rocks, chert and granite derived from the underlying basement. Graywacke contains more than 70% lithic fragments, of which quartz constitutes ~10% and feldspar ~15%. Intermediate-basic volcanic rocks and granite are the dominant lithic fragments. Chert fragments are dominant sedimentary fragments of greywacke. Zircon, apatite and magnetite are the most abundant heavy minerals in graywacke. In addition, chromite, garnet, tourmaline, rutile and pyrite also occur in sandstone. This demonstrates that ultramafic, intermediate-basic and metamorphic rocks may have outcropped in the source regions of the Laojunshan conglomerate. The sandstone detrital model and geochemical compositions of siltstone and mudstone of the Laojunshan conglomerate suggest that their source regions were the continental-margin arc and oceanic island arc. These indicate that the Laojunshan conglomerate formed in active continental margins and an arc-related basin.

Key words: Laojunshan conglomerate; detrital composition; heavy mineral; source region setting; arc-related basin; Qilian Mountains

老君山砾岩,也称沙流水群^①,分布于甘肃省—青海省境内的祁连山北麓,自西向东断续出露于玉门县疏璜山一带,经高台县红湾寺、白庙子、梨园河,张掖市苏油河上游,民乐县海潮坝、扁都口、老君山,武威市茂藏寺附近,古浪县古

浪峡,天祝县磨石沟,景泰县红水、黑山、五佛寺地区,中卫县野猫子山、下河沿至中宁县烟突子山,为一套紫红色、暗红色—紫色的粗碎屑岩,局部夹有少量灰岩或中性、基性火山岩,产有 *Taeniocrada* sp.,? *Drepanophycus* sp., *Subbardia*

收稿日期:2005-04-22;修订日期:2005-10-25

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(2001CB409801)、国家自然科学基金项目(40334044、40172080)和中国科学院知识创新项目(KZCX2-8W-119-01)联合资助。

作者简介:闫臻(1970-),男,博士,沉积学专业。E-mail:yanzhen@mail.igcas.ac.cn

① 甘肃省地质局区域地质调查大队.甘肃的泥盆系.1980.

sp., ? ? *Sawlbardia* sp., *Lepidodendropsis* sp., *Protolepidodendron* cf. *scharyanum* Krejci, *Zosterophyllum* sp., *Bothriolepis niushouhanensis* P'an et Wang (sp. nov.), *Antiarchi* sp., *Actinolepidae* sp., *Dipnoi* sp.等早一中泥盆世植物和鱼类化石^[1-4]。长期以来,前人对该套地层的研究主要集中于结构、时代、接触关系等问题上,而对于其组成、源区构造背景和大地构造意义研究甚少。

20世纪70年代以来,祁连造山带的构造格局研究已成为国内外地学界研究的热点,但多集中于榴辉岩、蓝片岩、蛇绿岩等俯冲增生杂岩的研究上^[5-32],而对该造山带中沉积岩的研究相对贫乏。对现代已知大地构造背景源区和相关沉积盆地内砂/砂岩碎屑组成的研究表明,沉积盆地中砂/砂岩的碎屑组成可用来准确地揭示沉积盆地类型及其源区大地构造背景^[33-53]。基于此因,本文将出露于祁连造山带北麓大盆达坂、肃南和海潮坝的老君山砾岩为研究对象(图1),着重研究该套地层中砾岩的组成、砂岩的碎屑组成、火山岩屑相对含量和砂岩重矿物组成特征,在此基础上研究各种组分的空间变化特征,并结合粉砂岩、泥岩的地球化学特征对其源区大地构造背景和盆地性质进行探讨。

1 老君山砾岩组成特征

老君山砾岩厚度变化较大,露头岩性差异也较大,在天祝、古浪、景泰一带其下部发育中性、基性火山岩,在景泰、中卫、中宁一带上部出现薄层灰岩^[2,3]。砾岩主要分布于其下部层位,中部以砂岩为主,上部则主要为泥质粉砂岩(图2)。

1.1 砾岩结构和组成特征

砾岩通常为厚层块状,颗粒支撑,由不同岩性的棱角状砾石混杂而成,显示了近源快速堆积的特征。此外,砾岩也以

透镜体形式出现在该套地层上部的砂岩层位中。根据砾石成分、砾径大小和磨圆度3个参数,可将这些砾岩分为4种类型。

(1)以棱角状砾石为主的砾岩(图版 I -A):该类砾岩分布于老君山砾岩的底部层位,为块状、颗粒支撑的粗砾岩,不整合于寒武系、奥陶系或志留系之上。砾石以火山岩和花岗岩为主,均为棱角状,砾石砾径一般大于12 cm,最大者可达30 cm。胶结物为粗砂,约占5%。总体上,此类砾岩在露头上表现为砾石类型相对简单,厚度变化极大,最厚可达80 m。大盆达坂露头,砾石主要为枕状玄武岩、安山岩、辉长岩和花岗岩。其中玄武岩和安山岩砾石分别占砾石含量的41%和27%(1 m²露头350个砾石统计的结果)。在海潮坝露头,则有少量变质岩和沉积岩砾石出现。

(2)以椭圆状砾石为主的砾岩(图版 I -B):此类砾岩除了具有前一类砾岩的结构特征外,还可见粒序结构和粗糙而不清晰的层理。砾石以含有大量次棱角状—椭圆状、中—粗砾花岗岩为特征。同时,花岗岩砾石在空间上具有从西(大盆达坂)向东(海潮坝)含量降低之趋势(25%~18%)。砂质胶结物含量变化较大(5%~10%)。

(3)颗粒支撑砾岩夹砂岩透镜体(图版 I -C):砾岩为中—厚层状,颗粒支撑。砾石砾径明显小于前2种类型,以中砾为主。砾石成分复杂,包括玄武岩、安山岩、辉长岩、花岗岩、片岩、板岩、石英岩、硅质岩、灰岩、砂岩和超基性岩。砾岩层底部具有明显的侵蚀面。正粒序和叠瓦状砾石在露头上普遍存在。不同尺度的砂岩透镜体分布于这些砾岩层间。此类砾岩向上过渡为粗砂岩。

(4)基质支撑的砾岩(图版 I -D):该类砾岩主要见于砂岩层中,常以透镜体形式存在,基质支撑,发育正粒序结构。此外,砾石为棱角状,叠瓦状构造发育。在大盆达坂露头,砾

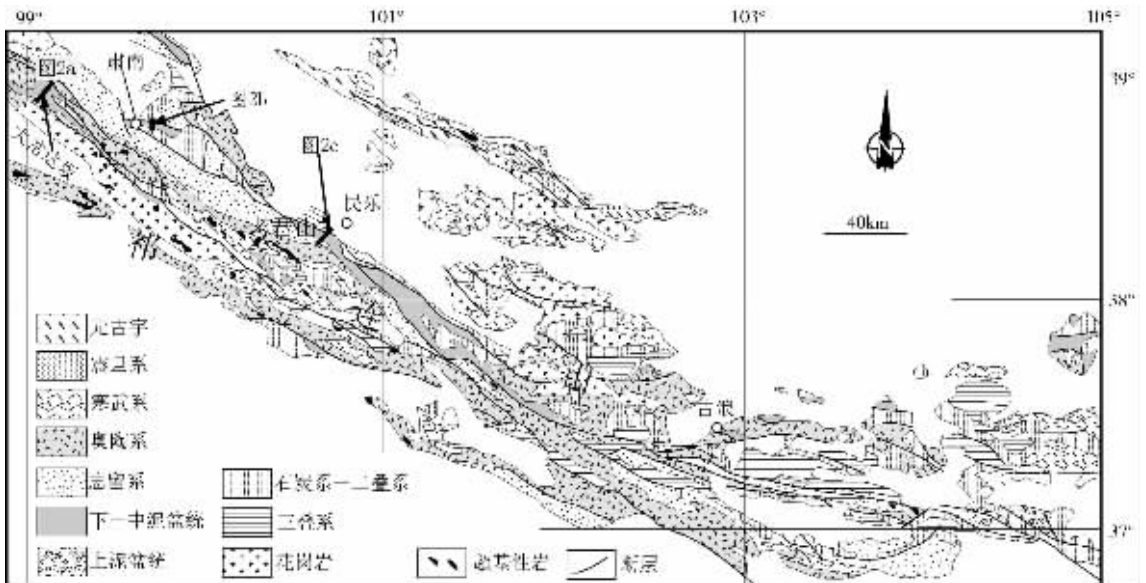


图1 研究区地质简图^[54]

Fig.1 Geological sketch map of the study area

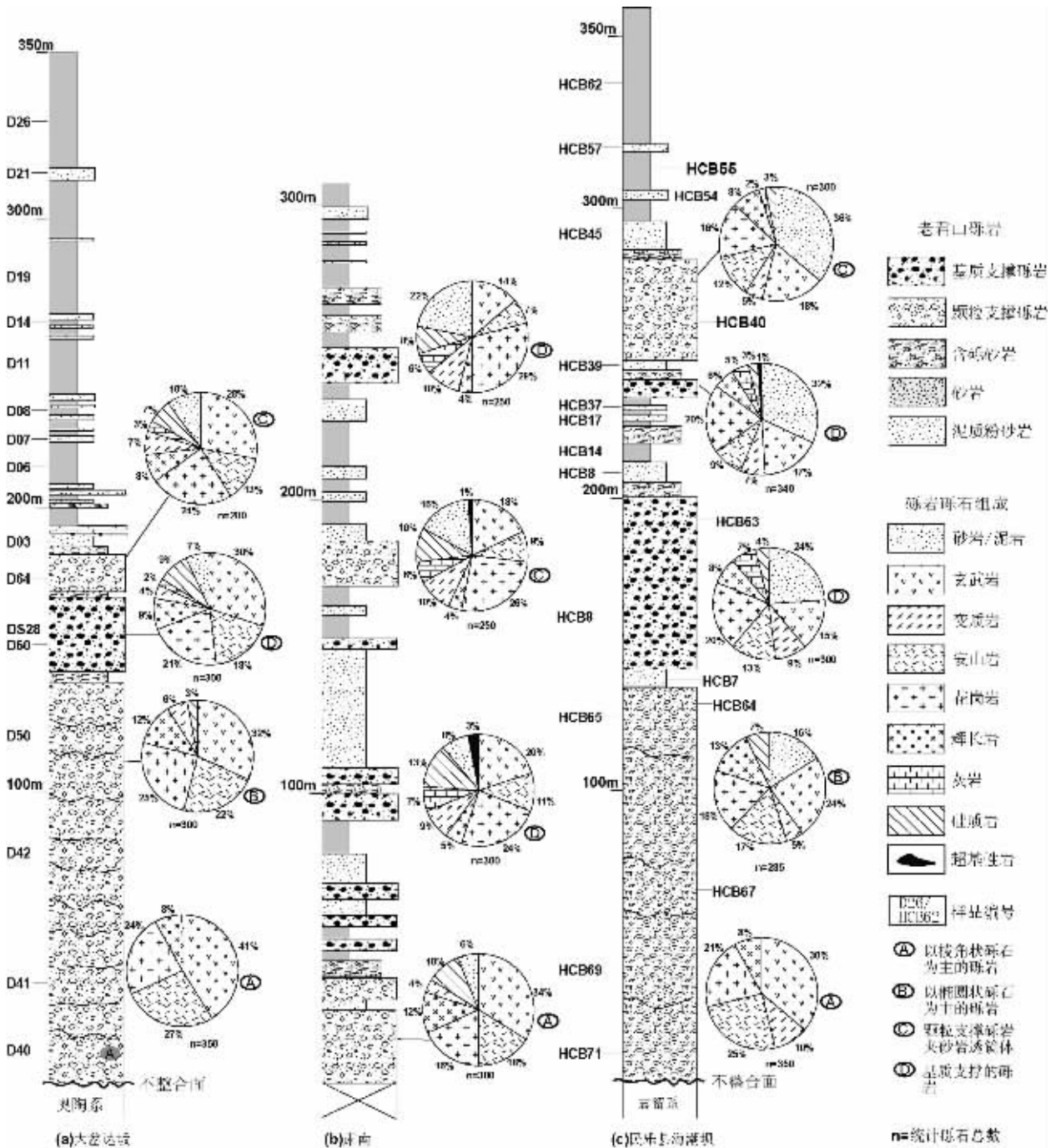


图2 老君山砾岩柱状示意图

Fig.2 Stratigraphic column of the Laojunshan conglomerate

石主要为火山岩和花岗岩,在海潮坝露头沉积岩砾石明显增多,肃南露头则以花岗岩和变质岩砾石为主。

总之,老君山砾岩基本上呈现出下粗上细之特点。砾岩底部的砾石为棱角状,大小混杂,与下伏岩性相一致,以玄武岩为主,明显具有近源沉积的特征;上部的砾石多呈次棱角状一浑圆状,由下而上砾径变小、成分由简单趋向复杂。尽管

其中夹有透镜状砂岩,但砾岩分选性整体上极差,反映了近源快速堆积的特点。

1.2 砂岩组成特征

砂岩为红色块状,分布于砾岩的顶部,厚度变化较大,自西向东厚度明显增大。露头可见槽状层理、板状斜层理、雨痕、泥裂等沉积构造。

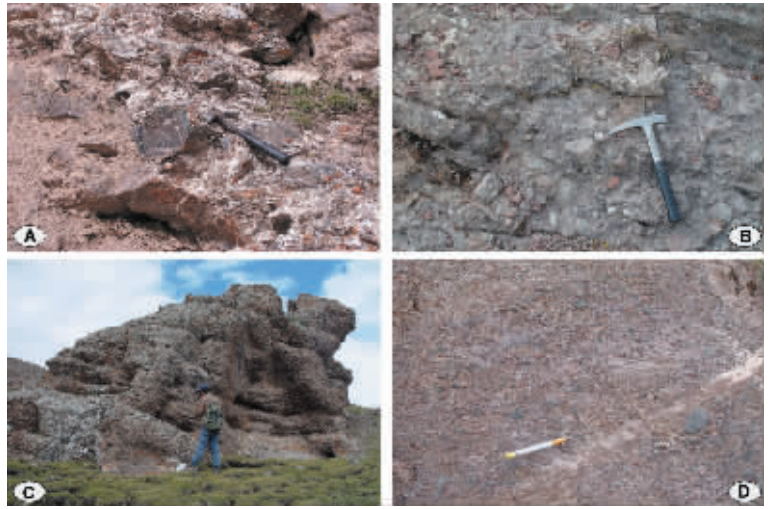
砂岩中岩屑含量为43.2%~89.4%，石英为4.6%~28.4%，长石为5.2%~36.5%(表1)。这表明，砂岩主要为岩屑杂砂岩和长石杂砂岩。石英碎屑以次棱角状为主。部分单晶石英颗粒具有波状消光特征，多晶石英颗粒表现为具有锯齿状边缘和平直边缘2种类型。同时，部分多晶石英颗粒具有“梳状”结构特征。长石碎屑多为棱角状、次棱角状，发生较强的绢云母化和碳酸盐化蚀变。钠长石环带发育。钾长石在岩石薄片中含有较少，主要为发育格子双晶的微斜长石。云母碎屑主要为颗粒粗大的白云母，膝折现象发育。

岩屑是砂岩中最主要的碎屑组成，以基性—酸性火山岩屑为主。根据岩屑的结构和构造，砂岩中的火山岩屑可分为具有充填结构或填间结构的玄武岩屑(图版II-A)、具有典型玻晶交织结构的安山岩屑(图版II-B)和具有霏细结构的酸性火山熔岩岩屑(图版II-C)3类。此外，还可见到少量火山碎屑岩屑(图版II-D)。玄武岩和安山岩岩屑是主要的火山岩屑，分别占火山岩屑的53.3%和30.1%。花岗岩屑在砂岩中含量仅次于火山岩屑，具有清晰的文象连生结构(图版II-E)。沉积岩屑和变质岩屑含量相对较低，其中沉积岩屑有砂岩、泥岩、硅质岩和灰岩4类，以硅质岩和砂岩屑为主(图版II-F、G)。部分砂岩屑中可见白云母和绿泥石的定向排列。硅质岩屑有2种类型：由等粒微晶石英构成(图版II-F)和由粗大石英晶体镶嵌构成(图版II-H)。变质岩屑包括基性片岩、板岩和石英片岩等类型。其中基性片岩主要由云母和绿泥石构成，在薄片并不多见。硅质片岩是变质岩屑中的主要类型，常由多晶石英颗粒或定向排列的石英颗粒构成，这类片岩常与白云母碎屑共生。此外，部分石英片岩由多个定向排列的具平直或锯齿状边界的单晶石英构成(图版II-H)。

2 砂岩重矿物组成特征

砂岩和泥岩样品中的重矿物主要为锆石、磷灰石、电气石、金红石、石榴子石、磁铁矿、钛铁矿、赤褐铁矿、铬铁矿、重晶石和少量黄铁矿，其含量见表2。其中锆石和磷灰石是样品

图版 I Plate I



①②③④代表砾岩类型,说明同图2

中含量最高的2类重矿物。

锆石有粉色半自形次圆状—次棱角状和玫瑰色次圆—滚圆状2种类型。前者通常占锆石总量的80%~85%，透明一半透明，裂纹发育，表面粗糙，可见溶蚀坑、浅沟槽、断口磨蚀等痕迹，含有固相黑色包体，粒径为0.03~0.15 mm。后者约占锆石总量的15%~20%，透明一半透明，表面粗糙呈毛玻璃面，断口有磨蚀痕迹，微裂纹发生铁染。磷灰石表现为透明一半透明的滚圆柱状和粒状。金红石为桔红色、红色和黑红色滚圆柱状颗粒。电气石为褐色半自形柱状和次棱角状2种形态，石榴子石为粉红色次棱角状、滚圆状，二者均主要分布于大岔达坂和海潮坝砂岩样品中。铬铁矿则为半自形次滚圆粒状和次棱角块状晶体，在各露头砂岩样品中含量变化大(1.46%~16.32%)，具有自西向东含量增大的特点。钛铁矿为半自形次滚圆扁粒状颗粒，磁铁矿和黄铁矿均为棱角状和次棱角状，磁铁矿在大岔达坂和海潮坝砂岩样品中含量较高。总之，这些矿物多数为棱角状和次棱角状，显示了未发生长距离搬运磨蚀的特征。

锆石、磷灰石和钛铁矿是3个剖面样品中分布最为普遍

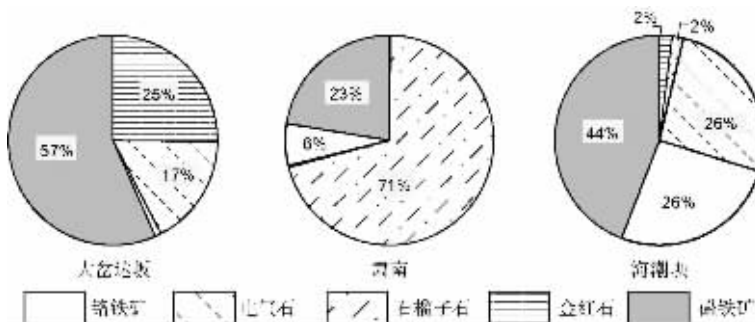


图3 大岔达坂、肃南和海潮坝老君山砾岩碎屑重矿物平均百分含量
Fig.3 Average heavy mineral content at the Dachadaban, Sunan and Haichaoba sections

的碎屑矿物组合。分别对这3个剖面中具有源区指示意义的碎屑矿物(图3)研究表明,石榴子石与铬铁矿组合在3个剖面中的含量变化尤为显著。铬铁矿在海潮坝剖面平均高达26%(16个样),向西急剧减少;石榴子石主要分布于肃南剖面样品中,平均高达71%(8个样品);电气石和金红石含量相对较少,主要出现于大岔达坂和海潮坝样品中。

3 源区特征及其性质探讨

碎屑岩的成分受多种因素影响,但是源区岩石类型是最直接的因素。对砂岩碎屑组分的研究是恢复源区岩石类型及其构造背景的主要途径之一^[33-36,39,41,48,49,52]。砂岩重矿物组合也为研究砂岩的源区提供了大量信息^[55,56]。粗粒碎屑岩,尤其是砾岩,包含有丰富可靠的源区信息和盆地构造演化信息^[53]。因此,综合研究砂岩碎屑组成、重矿物组合和砾岩砾石组成可揭示盆地源区岩石类型、构造演化和盆地性质。

3.1 砾岩源区

野外对13个砾岩露头进行了砾石百分含量统计,统计方法见Dürr的文献^[7]。野外仅对砾径大于5 cm的砾石进行统计,以确保砾石类型的真实性。统计结果表明(图2),垂向上,非火山岩砾石含量具有向上增多之趋势;纵向上,非火山岩砾石含量具有自西向东增多之趋势。枕状熔岩、安山岩、辉长岩和少量超基性岩砾石主要出现于砾岩的下部层位,花岗岩砾石含量在各剖面不同位置基本保持不变。这说明,火山岩是砾岩形成早期的主要物源,而沉积岩和变质岩则可能是老君山砾岩晚期的主要物源,花岗岩始终是该套砾岩物源的供给者。

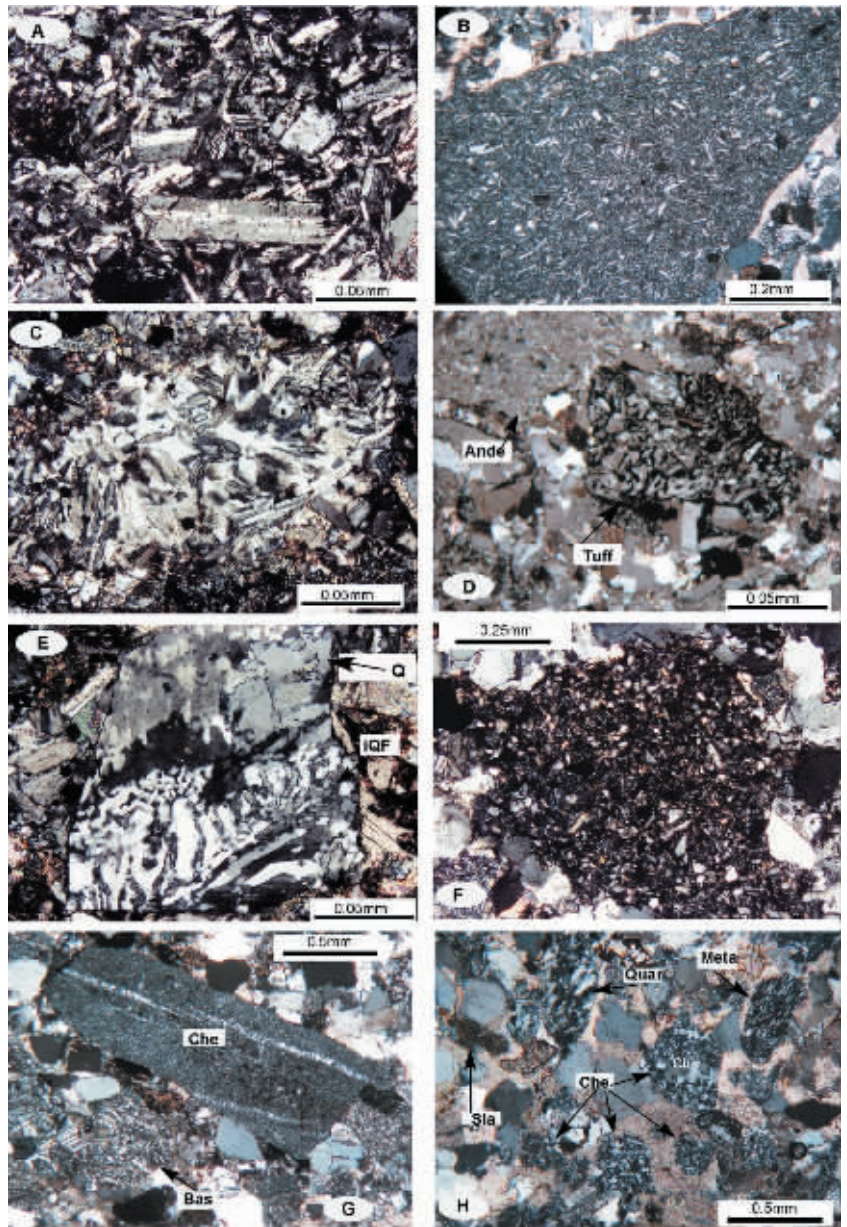
3.2 砂岩源区判别

3.2.1 砂岩碎屑组成

基性、中性、酸性火山岩、侵入岩和变质岩、沉积岩屑的共同存在,表明砂岩源区是一个出露火山岩、变质岩、沉积岩和花岗岩的混合源区。高L_v/L(火山岩屑/岩屑)和P/F(斜长石/长石)比率,低C/Q(多晶石英/石英)比率(表1),也说明老君山砾岩中的砂岩岩屑主要来自火山岩和侵入岩源区^[34]。

利用砂岩源区构造背景判别图对本研究区砂岩源区进行判别(图4),结果表明大岔达坂全部样品和1个海潮坝样品落入QtFL判别图过渡弧背景区内,其余样品全部落入切割弧背景区内。在QmFLt判别图中,海潮坝和肃南的砂岩样品落入未切割弧和岩屑再旋回背景区内,而大岔达坂样品仍全部

图版 II Plate II



Ande—安山岩屑;Tuff—包含有港湾状石英晶屑的凝灰岩屑;Q—石英碎屑;
iQF—花岗岩屑,具有文象连生结构;Quar—粗粒多晶石英组成的石英片岩岩屑;
Meta—变质基性片岩岩屑;Sla—板岩岩屑;Che—硅质岩屑;Bas—玄武岩岩屑

落入过渡弧背景区中。这说明,大岔达坂砂岩源区可能是一个盖层不发育的岛弧背景区,而肃南和海潮坝砂岩源区是一个由大量沉积岩、变质岩组成的盖层发育的岛弧背景区,这些盖层向西发生强烈剥蚀,导致岛弧基底火山岩和侵入岩向西完全暴露而为砂岩提供碎屑组分^[33]。野外研究表明,肃南和海潮坝的奥陶系除了大量枕状和块状玄武岩、辉长岩、安山岩等火山岩外,还分布有一定规模的沉积岩和变质岩,而在大岔达坂地区几乎全为超基性岩、玄武岩、安山岩、辉长岩和

表1 老君山砾岩中砂岩的碎屑成分统计
Table 1 Point-count data for fragments of sandstones in the Laojunshan conglomerate

样品号	QFL/%				QmFLt/%				QmPK/%				LmLvLs/%				LvFLmLvL/%			
	Q	F	L	Qm	F	Lt	Qm	P	K	Lm	Lv	Ls	Lvf	Lvmi	Lvl	C/Q	P/K	Lv/L		
D01	20.9	18.9	60.2	15.4	18.9	65.7	44.8	36.2	19	14.7	74.5	10.8	25.7	42.4	31.9	0.26	0.66	0.74		
D02	13.2	27.1	59.7	10.4	27.1	62.5	27.8	62.5	9.7	32.6	31.7	35.7	10	58.3	31.7	0.21	0.87	0.32		
D03	9.6	36.5	53.9	7.1	36.5	56.4	16.3	60.9	22.8	37.6	51.9	10.5	17.5	46.1	36.4	0.26	0.73	0.52		
D04	16.7	22.2	61.1	11.1	22.2	66.7	33.3	55	11.7	27.3	60.9	11.8	12.9	59.3	27.8	0.33	0.83	0.61		
D05	20.3	17.9	61.8	13.8	17.9	68.3	43.5	33.9	22.6	20.3	75.6	4.1	20.9	50.9	28.2	0.32	0.6	0.76		
D12	28.4	28.4	43.2	19.5	28.4	52.1	40.7	44.5	14.8	20.7	65.9	13.4	9.6	73.1	17.3	0.31	0.75	0.66		
D22	7.9	18.7	73.4	6.1	18.7	75.2	24.7	48.5	26.8	16.4	73.8	9.8	16.5	59.5	24	0.22	0.64	0.74		
DS3	6.7	11.7	81.6	4.8	11.7	83.4	29.1	54.5	16.4	8.1	61.6	30.3	21.8	51.3	26.9	0.27	0.77	0.62		
DS4	10.9	13.2	75.9	8.3	13.2	87.5	38.5	50.7	10.8	21.9	55.3	22.8	17.1	53	29.9	0.24	0.83	0.55		
DS8	5.1	16.8	78.1	3.3	16.8	78.9	16.7	68.9	14.4	7.5	65.8	26.7	12.6	64.3	23.1	0.34	0.83	0.66		
DS9	8.7	19.5	71.8	6.1	19.5	74.4	23.8	61.6	14.6	12.3	65.5	22.2	14.4	63.3	22.3	0.29	0.81	0.65		
DS15	12.6	5.2	82.2	2.6	5.2	92.2	33.3	57.8	8.9	5.4	70	24.6	9.3	70.8	19.9	0.31	0.87	0.86		
DY1	20.4	14.7	64.9	16.2	14.7	69.1	52.4	34.5	13.1	10.2	81.9	7.9	16.7	52.8	30.5	0.2	0.72	0.82		
DY2	18.4	11.9	69.7	14.9	11.9	73.2	55.6	30.6	13.8	10.7	78.5	10.8	18.5	52.3	29.2	0.19	0.69	0.78		
DY3	10.2	17	72.8	8.1	17	74.9	32	44	24	8.6	78.3	13.1	18.1	49.2	32.7	0.2	0.65	0.78		
DY4	14.7	12.9	72.4	9.9	12.9	77.2	43.5	40.9	15.6	16	75.5	8.5	19.3	44.4	36.3	0.32	0.72	0.76		
DY5	9.3	22.7	68	5.7	22.7	71.6	20.1	59.1	20.8	16.8	76.4	6.8	21.6	45.2	33.2	0.38	0.74	0.76		
DY6	16.7	11.4	71.9	11.8	11.4	76.8	51.1	38.1	10.8	20.2	68.7	11.1	19.1	44.6	36.3	0.29	0.78	0.69		
DY7	12.4	6.3	81.3	7.3	6.3	86.4	53.8	32.1	14.1	11.2	76.2	12.6	17.2	49.7	33.1	0.4	0.69	0.76		
DY8	4.6	6	89.4	3.2	6	90.8	35.4	0.5	14.6	11.8	75.3	12.9	15.6	50.8	33.6	0.26	0.77	0.75		
DY19	14.7	8.2	77.1	12.9	8.2	78.9	61.4	31.7	6.9	30.9	65.3	3.8	12.3	48.4	39.3	0.126	0.83	0.65		
DY20	11.2	6.9	81.9	10.6	6.9	82.5	60.9	29	10.1	46.5	48.9	4.6	15.6	48.3	36.1	0.04	0.74	0.49		
DY23	9.8	11.1	79.1	9.3	11.1	79.6	45.5	41.8	12.7	20.9	55.6	23.5	18.1	54.4	27.5	0.05	0.77	0.56		
DY24	8.3	11.6	80.1	6.6	11.6	81.8	36.4	45.5	18.1	22.1	54.1	23.8	17.9	50.3	31.7	0.2	0.71	0.55		
DY28	11.5	9.6	78.9	10.8	9.6	79.6	53.1	34.4	12.5	37.3	40.9	21.8	17.4	49.2	33.3	0.05	0.73	0.41		

注: Qm=单晶石英; Q=单晶石英+多晶石英; F=长石; P=斜长石; K=钾长石; Lr=岩屑; Lv=火山岩屑; Lm=变质岩屑; Ls=沉积岩屑; Lt=Lv+Lm+Ls; Lvf=具有霏细结构火山岩屑; Lvl=具有板(粒)状结构火山岩屑; Lvmi=具有微晶结构火山岩屑

表2 老君山砾岩中砂岩的重矿物含量

Table 2 Content of heavy minerals in sandstones of the Laojunshan conglomerate

编号	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	
锆石	5.646663	17.16001	19.46668	20.28733	13.96499	23.27423	16.51082	
磷灰石	10.08287	1.356719	2.433334	1.441123	1.745624	3.017974	2.529658	
金红石	0	3.743551	1.946668	3.530031	2.094749	4.680637	2.952483	
石榴子石	0	0	0	0	0	0	0	
电气石	0	0	2.067948	3.377922	1.283071	2.532223	3.869819	
铬铁矿	0	0	0	0.536178	0	0	0	
钛铁矿	36.48902	40.44114	41.35896	20.64286	51.32286	30.38668	24.76684	
赤褐铁矿	45.61128	20.98844	7.237818	12.06401	12.83071	16.88149	18.57513	
磁铁矿	0	15.28632	0	5.578799	0	12.47418	24.60354	
编号	DS1	DS6	DS8	DS9	DS13	DS15	DS19	
锆石	6.699262	0.938221	0.149687	1.269443	1.689094	0.145101	0.960967	
磷灰石	0	0.426464	0.018711	0	0.248396	0.036275	0.480484	
金红石	0	0	0.011227	0.152333	0	0	0	
石榴子石	4.037136	12.6187	6.21752	9.289858	0	3.129395	0	
电气石	0	0	0	0.048894	0	0	0	
铬铁矿	2.018568	0	1.036253	0.097788	0	0.020863	0	
钛铁矿	60.55704	18.92805	2.072507	4.889399	0	7.301923	1.179614	
赤褐铁矿	26.24138	63.09351	89.11779	78.23038	93.35614	87.62307	51.31321	
磁铁矿	0	3.952411	1.196686	2.416681	1.725617	1.580131	0.419777	
编号	DY1	DY2	DY3	DY4	DY5	DY6	DY7	DY8
锆石	4.949206	0.397635	2.8127	2.782872	9.995397	1.509787	12.4889	29.03611
磷灰石	1.227602	0.056805	1.2647	1.941539	1.999079	0.560402	4.162965	7.135918
金红石	1.068268	0.034083	0.121415	0.258872	0.99954	0	0	1.015098
石榴子石	0	0	0.414797	0	0.29234	2.107404	0	0
电气石	1.740269	0	0.829594	0.116063	1.169358	1.053702	11.40137	7.105686
铬铁矿	0.435067	0	0.414797	0	0	0	0	0
钛铁矿	39.15605	74.6746	38.16134	56.87084	35.08075	10.53702	0	0
赤褐铁矿	34.80537	23.33581	34.26224	30.17637	11.69358	76.92025	0	0
磁铁矿	15.15446	0.860867	19.87703	7.270986	1.702076	4.133551	0	0
编号	DY9	DY10	DY11	DY12	DY13	DY14	DY15	DY16
锆石	18.38367	13.00873	24.56573	37.72915	53.32375	65.3416	36.13832	10.9613
磷灰石	2.188532	0.33806	10.80282	5.750145	23.08645	17.49442	25.75532	1.192523
金红石	0	0	0	0	0	0	0	0
石榴子石	0	0	0	0	0	0	0	0
电气石	1.305031	19.25627	14.83345	6.103353	11.07582	4.789827	19.05318	22.83696
铬铁矿	16.31288	9.628134	3.178596	6.103353	2.584358	2.612633	3.17553	1.522464
钛铁矿	0	0	0	0	0	0	0	0
赤褐铁矿	0	0	0	0	0	0	0	1.826957
磁铁矿	4.044312	0	0	24.51937	0	0	0	0

注:D—大岔达坂;DS—肃南;DY—海潮坝;重矿物含量%

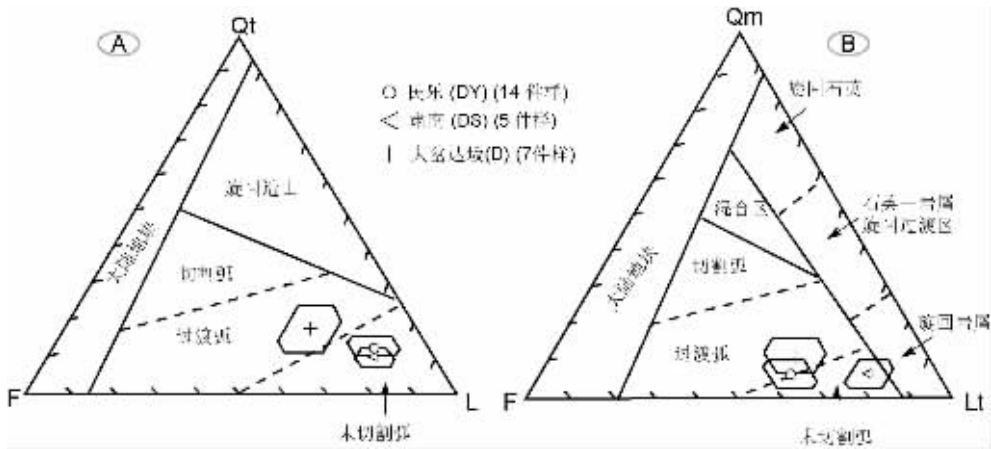


图4 砂岩QtFL和QmFLt源区构造背景判别图^[33,38]

Fig.4 Tectonic setting discriminating diagram for the QtFL and QmFLt source region of sandstone
Qt—石英颗粒;F—长石;L—岩屑(不包括多晶石英);Qm—单晶石英颗粒;Lt—岩屑(包括多晶石英颗粒)

部分玻安岩。

不同大地构造背景源区常为盆地提供不同的碎屑组成, Marsaglia等^[9]对环太平洋、加勒比海和地中海地区不同类型沉积盆地中砂/砂岩的组成与源区背景、盆地性质之间的关系进行了系统研究,结果表明:来自大陆边缘弧的沉积物相对于大洋岛弧源区而言,富含石英碎屑、长英质火山岩屑、钾长石和非火山岩屑;来自三叉裂谷和走滑大陆边缘背景区的沉积物与岩浆弧源区相比较,则以富含石英砂岩和岩屑含量变化极大为特征。老君山砾岩中砂岩含有丰富的中—基性火山岩屑、少量长英质火山岩屑及少量非火山岩屑,说明其源区可能具有大洋岛弧构造背景源区的特征。

为了进一步确定源区的构造背景,利用QmKP图解对老君山砾岩源区进行判别(图5-A)。从QmKP判别图可以看出,

来自研究区的样品绝大多数落入了俯冲杂岩背景区,仅有3个分别来自3个不同位置的样品落入了大陆边缘弧背景区。这说明,老君山砾岩主要由俯冲杂岩提供物源,同时大陆边缘弧也是一个重要的源区。

LmLvLs图解(图5-B)表明砂岩源区岩石类型以火山岩为主,并有变质岩出露,沉积岩相对较少。同时,LvLvmiLvl判别图(图5-C)也进一步支持这一推断。显然,丰富的火山岩屑、斜长石碎屑和高含量的安山岩、玄武岩屑及少量石英碎屑表明,老君山砾岩的源区是由残余岛弧与大陆边缘弧共同组成的混合构造背景区。

3.2.2 重矿物组合判别

砂岩重矿物组合表明,这些重矿物主要来自超基性、中—酸性火山岩和变质岩。具有磨蚀痕迹断口和铁染微裂纹

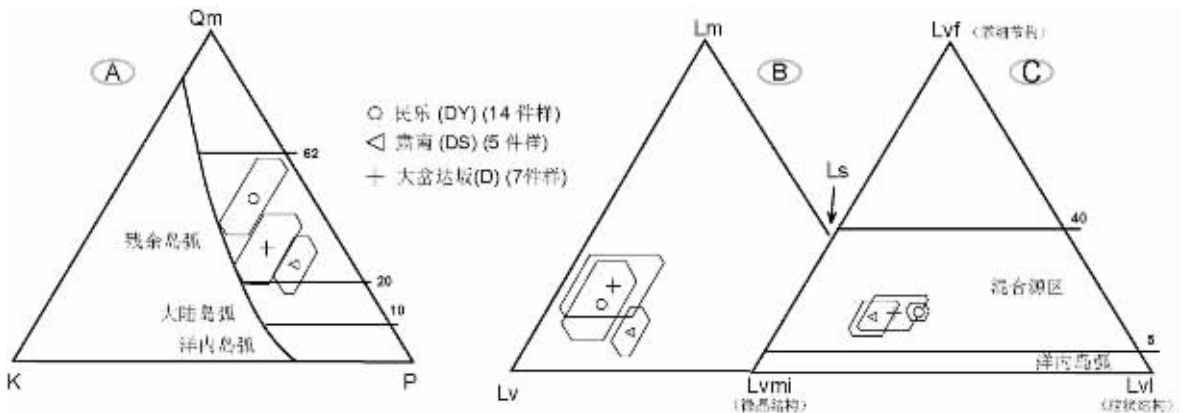


图5 砂岩QmKP、LmLvLs和LvLvmiLvl源区背景判别图^[48,49]

Fig.5 Tectonic setting discriminating diagram for the QmKP, LmLvLs and LvLvmiLvl source region of sandstone

Qm—单晶石英;K—钾长石;P—斜长石;Lm—变质岩屑;Lv—火山岩屑;Ls—沉积岩屑;Lvlf—具霏细结构的酸性火山岩屑;Lvmi—具微晶结构的中基性火山岩屑;Lvl—具板状(柱状)结构的基性火山岩屑

的滚圆状锆石可能来自于源区相对古老的岩石;少量滚圆状锆石、金红石和电气石可能暗示着源区有少量的沉积岩出露。然而,磷灰石、棱角状一次棱角状锆石、锆石和金红石组合可能来自酸性岩浆岩。当然,电气石来自于伟晶岩的可能性也是不能够排除的。

在每个剖面上,每一类重矿物表现为向上含量增大的趋势。然而,石榴子石在大岔达坂砂岩中未见到。这一信息进一步表明,变质岩在研究区的西段源区可能不存在,并不是老君山砾岩的主要物源。铬铁矿在3个研究区剖面的砂岩中均存在,但以海潮坝剖面最为丰富。这说明超基性岩是老君山砾岩的共同物源,可能海潮坝一带较其他地段发生强烈的剥蚀。砂岩样品中的黄铁矿显然来自于酸性侵入岩或火山岩,并非同沉积成因。这是因为老君山砾岩为一套氧化环境下形成的陆相沉积,它不能为同沉积的黄铁矿提供还原环境。

总之,各剖面中砂岩重矿物组合的差异,进一步反映了超基性—基性火山岩和酸性岩浆岩为老君山砾岩的形成提供了丰富的碎屑来源,变质岩和沉积岩尽管仅为其提供了部分物源,但也是老君山砾岩的重要源区。

3.3 泥岩和粉砂岩地球化学特征

尽管碎屑岩的组成受源区、搬运、成岩作用、构造等多种因素的影响,但是其地球化学成分仍能够可靠地反映古大陆边缘和沉积盆地演化的历史^[58-61]。微量元素,尤其是Th、Sc、Zr、Y、Cr、Hf、Co和稀土元素,在沉积作用过程中难以发生溶释而保持碎屑物源区的固有性质,因而被广泛用于沉积物源区和盆地性质研究。

分别对采自大岔达坂和海潮坝2个剖面中的9个泥岩样品和13个粉砂岩样品(其中HCB8为砾岩胶结物)进行主量、微量和稀土元素分析。取样位置见图2。该分析在中国科学院地质与地球物理研究所国家实验室完成,其中微量、稀土元素由靳新娣和李红颜工程师采用ICP-MS法测试,主量元素由李禾、曹杰和王红月工程师采用XRF法测试。测试结果见表3至表5。为了将老君山砾岩中细碎屑岩与上地壳的地球化学特征对比研究,稀土元

表3 老君山砾岩中粉砂岩、泥岩主量元素百分含量

样品号	D03	D07	D11	HCB06	HCB08	HCB17	HCB19	HCB30	HCB34	HCB37	HCB39	HCB45	HCB54	HCB57	HCB60	HCB62
SiO ₂	70.92	72.52	72.74	62.03	70.99	68.43	71.39	60.76	56.33	69.47	69.55	61.56	65.98	70.94	72.23	64.32
TiO ₂	0.39	0.55	0.51	0.8	0.59	0.86	0.66	0.7	0.69	0.65	0.66	0.77	0.75	0.5	0.49	0.71
Al ₂ O ₃	12.85	10.06	9.15	17	13.85	13.39	12.22	16.1	16.77	12.99	13.53	16.7	15.08	11.32	9.84	16.81
Fe ₂ O ₃ ^T	3.3	3.24	2.65	7.68	4.12	5.62	5	7.3	11.28	4.97	5.67	7.28	6.14	4.38	4.15	7.33
MnO	0.05	0.05	0.05	0.06	0.04	0.04	0.05	0.14	0.15	0.1	0.07	0.08	0.07	0.08	0.13	0.11
MgO	1.35	1.49	1.78	3.12	1.32	1.85	1.91	3.64	3.93	2.05	2.71	3.06	2.63	2.05	1.74	2.19
CaO	1.45	2.82	3.23	0.46	0.9	0.7	1.1	2.42	3.53	1.55	0.67	0.91	0.98	1.24	2.81	0.28
Na ₂ O	2.97	1.61	2.06	1.96	3.06	3.15	3.26	3.92	5.45	2.03	2.14	1.8	2.22	2.6	2.63	1.27
K ₂ O	3.93	2.58	1.93	3.31	0.18	1.95	1.57	1.84	0.5	2.46	2.21	3.4	2.78	1.52	1.08	4.03
P ₂ O ₅	0.14	0.18	0.16	0.18	0.13	0.21	0.16	0.36	0.1	0.17	0.16	0.18	0.18	0.13	0.14	0.16
LOI	2.47	4.05	4.55	3.86	3.35	3.12	3.48	4.06	3.13	4.21	3.63	2.93	3.8	3.53	3.71	3.36
K ₂ O/Al ₂ O ₃	0.31	0.26	0.21	0.19	0.16	0.15	0.13	0.11	0.03	0.19	0.16	0.20	0.18	0.13	0.11	0.24
K ₂ O/Na ₂ O	1.32	1.60	0.94	1.69	0.71	0.62	0.48	0.47	0.09	1.21	1.03	1.89	1.25	0.58	0.41	3.17
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	5.52	7.21	7.95	3.65	5.13	5.11	5.84	3.77	3.36	5.35	5.14	3.69	4.38	6.27	7.34	3.83
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0.18	0.14	0.13	0.27	0.20	0.20	0.17	0.26	0.30	0.19	0.19	0.27	0.23	0.16	0.14	0.26
TiO ₂ /Al ₂ O ₃	0.03	0.05	0.06	0.05	0.04	0.06	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05	0.04
Fe ₂ O ₃ ^T +MgO	4.65	4.73	4.43	10.80	5.44	7.47	6.91	10.94	15.21	7.02	8.38	10.34	8.77	6.43	5.89	9.52

表4 老君山砾岩中粉砂岩(Sil.)、泥岩(Mud.)微量元素含量
 Table 4 Trace element contents of siltstone and mudstone samples of the Laojunshan conglomerate

10⁻⁶

样品号 岩性	D03 Mud.	D06 Mud.	D07 Mud.	D08 Mud.	D11 Sil.	D14 Sil.	D21 Sil.	D26 Mud.	HCB7 Sil.	HCB8 Sil.	HCB14 Mud.	HCB17 Sil.	HCB37 Sil.	HCB39 Sil.	HCB45 Sil.	HCB54 Sil.	HCB55 Mud.	HCB57 Sil.	HCB62 Mud.
Li	23.51	11.37	13.02	11.4	11.71	37.28	38.31	56.81	12.12	27.64	40.71	34.24	40.87	32.08	20.44	20.6	10.81	25.83	28.83
Be	1.94	1.47	1.81	1.25	1.24	1.17	1.52	4.53	0.88	1.78	0.82	1.63	2.4	1.9	1.3	1.05	1.22	2.44	2.04
Sc	4.24	8.18	9.4	7.35	7.89	11.35	12.68	33.79	5.73	12.45	11.49	16.08	19.83	14.89	9.54	8.48	10.96	19.12	17.9
V	29.45	38.29	47.93	35.07	42.77	54.61	56.54	130.16	36.33	67.73	65.68	86.86	88.33	73.84	50.4	44.76	41.21	80.22	80.75
Cr	25.49	94.63	121.58	73.07	93.43	115.71	113.16	462.32	84	69.55	73.48	157.16	101.86	125.13	47.27	51.73	71.56	88.6	91.58
Co	8.35	6.35	7.69	5.73	7.28	10.79	13.77	20.72	4.11	10.9	14.77	17.34	19.56	16.6	12.23	10.72	4.98	27.39	28.95
Ni	11.1	14.11	28.1	12.87	25.26	36.76	33.09	58.89	9.7	94.52	23.2	30.5	36.85	28.83	16.75	14.72	18.06	49.01	43.18
Cu	25.15	12.98	14.65	9.52	16.13	57.83	29.46	34.81	12.37	40.73	11.15	19.21	56.58	31.75	28.26	18.73	22.62	41.75	24.47
Zn	53.23	30.09	242.43	33.94	37.77	47.18	64.58	121.91	20.47	61.33	73.03	82.62	80.39	68.01	49.73	49.84	32.04	83.29	85.75
Ga	15.02	10.28	12.54	9.66	10.7	12.19	14.87	25.51	8.36	15.14	11.88	16.77	21.7	18.07	12.18	10.4	10.42	21.48	21.2
Rb	140.36	81.72	103.98	76.12	72.8	67.95	96.69	241.96	70.48	92.17	48.29	80.7	143.57	114.7	63.05	46.38	72.95	173.65	155.69
Sr	71.62	91.98	83.11	94.02	130.91	145.47	148.11	36.07	177.5	162.32	147.06	152.36	88.04	103.5	120.23	128.8	218.07	64.67	58.16
Y	38.09	22.13	25.48	20.16	17.68	26.5	21.97	21.46	14.98	23.48	23.57	29.19	28.33	26.15	19.96	19.41	19.58	24.02	28.56
Zr	167.65	386.83	405.74	190.56	361.15	370.63	273.39	183.94	235.86	174.82	228.06	436.68	167.44	128.46	161.32	221.98	161.19	148.07	150.01
Nb	15.35	10.51	10.75	8.95	11.46	12.1	12.18	18.95	7.44	8.82	9.2	12.08	12.38	12.16	7.97	8.19	7.49	12.2	11.96
Cs	3.63	4.93	5.75	4.57	4.13	4.16	6.06	8.36	4.17	5.4	2.82	4.41	8.53	7.3	3.22	2.82	6.24	7.3	5.97
Ba	333.68	281.44	196.57	151.41	174.18	708.37	112.86	436.72	252.99	248.13	161.05	201.58	447.58	339.95	185.28	150.02	225.31	311.58	303.47
Hf	5.87	11.91	11.7	5.86	10.63	10.68	7.65	5.26	6.68	5.18	6.53	13.12	4.89	3.97	4.69	6.66	4.63	4.86	4.68
Ta	1.58	0.84	0.87	0.73	0.9	0.98	0.98	1.18	0.63	0.72	0.77	1.01	1.07	0.97	0.73	0.71	0.64	1.16	1.04
Tl	0.73	0.46	0.48	0.43	0.41	0.33	0.47	1.21	0.36	0.43	0.24	0.39	0.6	0.51	0.29	0.24	0.38	0.77	0.71
Pb	40.67	11.11	12.73	9.83	9.48	12.64	14.16	10.58	13.35	15.17	100.02	17.81	17	16.16	6.02	41.86	14.69	16.3	5.31
Bi	0.39	0.17	0.18	0.15	0.14	0.19	0.22	0.26	0.14	0.26	0.63	0.22	0.44	0.26	0.21	0.26	0.16	0.47	0.25
Th	14.11	10.76	11.7	8.77	10.9	12.84	11.42	5.61	8.17	12.61	12.77	16.11	14.76	13.89	9.9	10.92	8.14	15.57	16.05
U	3.67	2.69	2.71	2.06	2.58	2.58	2.34	1.95	2.07	2.51	3.78	3.18	2.72	2.61	2.05	2.1	1.7	2.66	2.76

表5 老君山砾岩中粉砂岩、泥岩稀土元素含量
Table 5 Rare element contents of siltstone and mudstone samples of the Laojunshan conglomerate

样品号	D03	D06	D07	D08	D11	D14	D21	D26	HCB7	HCB8	HCB14	HCB17	HCB37	HCB39	HCB45	HCB54	HCB55	HCB57	HCB62
La	23.16	33.99	35.71	27.71	31.47	36.66	32.43	21.02	20.13	30.14	37.3	40.58	45.56	42.49	29.03	28.96	22.11	37.72	38.25
Ce	52.94	59.82	67.08	48.83	57.93	69.61	61.27	43.76	35.51	57.7	70.93	77.43	90.89	78.57	55.28	57.08	39.8	75.25	81.46
Pr	6.86	8.05	8.22	6.51	7.48	8.48	7.49	5.38	4.4	7.01	8.73	9.55	10.64	9.42	6.46	6.82	5.2	8.63	9.32
Nd	26.47	30.27	31.34	24.45	27.84	32.43	28.83	19.63	16.81	27.08	33.64	35.92	39.35	36.25	24.15	25.81	19.88	31.8	35.47
Sm	6.08	5.85	5.74	4.67	5.34	5.74	5.1	3.56	3.2	5.06	6.05	6.94	7.27	6.89	4.69	4.9	3.86	5.96	7.2
Eu	0.6	1.15	1.13	0.91	1.29	1.27	1.27	0.67	0.75	1.04	1.13	1.49	1.61	1.42	0.98	1.02	0.92	1.27	1.27
Gd	5.91	4.95	5.24	4.2	4.26	5.35	4.65	3.29	2.82	4.37	5.23	6.06	6.42	6.01	4.07	4.4	3.53	5.3	6.45
Tb	1.12	0.8	0.84	0.71	0.67	0.88	0.72	0.63	0.47	0.75	0.79	0.99	1.01	0.95	0.67	0.72	0.6	0.87	1.12
Dy	7	4.46	4.78	3.79	3.66	4.92	4.16	3.82	2.68	4.4	4.41	5.62	5.26	5.31	3.55	3.92	3.5	4.92	6.33
Ho	1.43	0.84	0.88	0.73	0.69	0.97	0.8	0.79	0.55	0.86	0.86	1.14	1.05	1	0.72	0.73	0.68	0.94	1.11
Er	4.42	2.5	2.57	2.25	2.06	2.8	2.37	2.35	1.6	2.46	2.55	3.29	2.98	2.92	2.02	2.12	1.97	2.8	3.37
Tm	0.71	0.4	0.4	0.35	0.35	0.43	0.38	0.36	0.28	0.39	0.4	0.5	0.46	0.45	0.31	0.34	0.32	0.44	0.5
Yb	4.6	2.59	2.54	2.31	2.27	2.74	2.37	2.37	1.74	2.64	2.64	3.36	2.93	2.81	2	2.18	2.15	2.79	3.1
Lu	0.65	0.41	0.4	0.35	0.37	0.45	0.38	0.37	0.28	0.4	0.42	0.52	0.4	0.44	0.29	0.34	0.34	0.44	0.44
ΣREE	141.95	156.08	166.87	127.77	145.68	172.73	152.22	108	91.22	144.3	175.08	193.39	215.83	194.93	134.22	139.34	104.86	179.13	195.39
LREE/HREE	4.47	8.14	8.39	7.64	9.08	8.25	8.54	6.68	7.68	7.81	9.05	7.93	9.44	8.73	8.78	8.38	6.94	8.61	7.66
Eu/Eu*	1.02	2.05	2.00	1.80	2.44	2.24	2.39	1.51	1.79	1.99	1.97	2.43	2.56	2.32	1.94	1.97	1.99	2.22	2.02
La/Sc	5.46	4.16	3.80	3.77	3.99	3.23	2.56	0.62	3.51	2.42	3.25	2.52	2.30	2.85	3.04	3.42	2.02	1.97	2.14
Th/Sc	3.33	1.32	1.24	1.19	1.38	1.13	0.90	0.17	1.43	1.01	1.11	1.00	0.74	0.93	1.04	1.29	0.74	0.81	0.90
Cr/Th	1.81	8.79	10.39	8.33	8.57	9.01	9.91	82.41	10.28	5.52	5.75	9.76	6.90	9.01	4.77	4.74	8.79	5.69	5.71
Cr/Ni	2.30	6.71	4.33	5.68	3.70	3.15	3.42	7.85	8.66	0.74	3.17	5.15	2.76	4.34	2.82	3.51	3.96	1.81	2.12
Cr/V	0.87	2.47	2.54	2.08	2.18	2.12	2.00	3.55	2.31	1.03	1.12	1.81	1.15	1.69	0.94	1.16	1.74	1.10	1.13
Y/Ni	3.43	1.57	0.91	1.57	0.70	0.72	0.66	0.36	1.54	0.25	1.02	0.96	0.77	0.91	1.19	1.32	1.08	0.49	0.66
(La/Lu) _{cn}	0.38	0.88	0.95	0.84	0.91	0.87	0.91	0.61	0.77	0.80	0.95	0.83	1.21	1.03	1.07	0.91	0.69	0.91	0.93
(Gd/Yb) _{cn}	0.74	1.11	1.19	1.05	1.09	1.13	1.14	0.80	0.94	0.96	1.15	1.04	1.27	1.24	1.18	1.17	0.95	1.10	1.20

10⁻⁶

素标准化利用Taylor等^[60]的球粒陨石数据。

(1) 主量元素: 与粉砂岩相比较, 泥岩样品的SiO₂含量相对较高, 表明泥岩具有相对富含石英的源区。除了样品D03外, 粉砂岩中K₂O/Al₂O₃平均比值小于0.3, 暗示粉砂岩中钾长石含量相对较低。同时, Al₂O₃含量的变化反映了砂岩中粘土矿物和长石含量的变化。因此, 样品较高的Al₂O₃百分含量表明样品中的粘土矿物和其他类长石矿物含量也相对较高。另外, 样品的TiO₂和Fe₂O₃^T相对含量较高, 说明这些样品中具有丰富的碎屑重矿物, 如金红石、钛铁矿、钛磁铁矿等。

主量元素相对比值是研究沉积物构造环境和源区的重要指标^[58-61]。在砂岩log(K₂O/Na₂O)-SiO₂构造环境判别图^[61](图6-A)上, 2个粉砂岩样品落入岛弧环境区, 其他样品全部落入活动大陆边缘背景区。在TiO₂-(Fe₂O₃^T+MgO)^[58]和Al₂O₃/SiO₂-(Fe₂O₃^T+MgO)^[58]判别图上(图6-B、C), 部分粉砂岩样品落入大洋岛弧背景区, 其他样品全部落入大陆边缘弧和活动大陆边缘背景区中。

(2) 微量元素: 与上地壳微量元素相比较, 样品中的绝大多数微量元素含量普遍偏高。其中Co、Ni、Cr、V的相对比值变化于1×10⁻⁶~10×10⁻⁶之间, Sr、Ba、Nb含量偏低(图7)。所有粉砂岩样品中, Sr、Ba、Nb含量相对于Rb、Zr、Hf、Th、U而言,

总体显示亏损。泥岩中的Sr和Nb与粉砂岩相比较明显偏低, 但其中的Cr和Pb含量异常高。Cr、Ni、Co、V元素含量的变化通常受蚀变作用影响强烈, 但是沉积物中异常高的Cr和Ni含量, 表明其来源于基性和/或超基性岩石物源区。

泥岩样品中Sc、Y含量明显低于粉砂岩样品。这一结果与La、Th、U在细碎屑岩中相对富集, 而Co、Sc、Y在粗碎屑岩中含量相对较高^[60]的普遍认识相一致。在La-Th和Th-U图解上(图8-A、B), 除了D26泥岩样品外, 所有样品的La/Th和Th/U比值分别变化于2~4和3~6.6之间, 属于大陆边缘弧环境^[60]。在La-Th-Sc和Th-Sc-Zr/10构造判别图上(图8-C), 样品也都落入大陆边缘弧环境中。

(3) 稀土元素: 图9分别为大岔达坂和海潮坝粉砂岩、泥岩样品稀土元素标准化配分曲线。总体表现为轻稀土元素相对富集, 重稀土元素相对平坦并具有负Eu异常的特征。其中海潮坝泥岩和粉砂岩样品稀土元素总量(108×10⁻⁶~173×10⁻⁶)相对于大岔达坂泥岩和粉砂岩样品稀土元素总量(91×10⁻⁶~216×10⁻⁶)变化较小, 但绝大多数样品的稀土元素总量远高于上地壳的稀土平均总量(143×10⁻⁶)^[60]。

沉积物稀土元素配分曲线和Eu异常通常被用于推断源区和构造背景研究^[60]。酸性火山岩具有高的LREE/HREE比值和

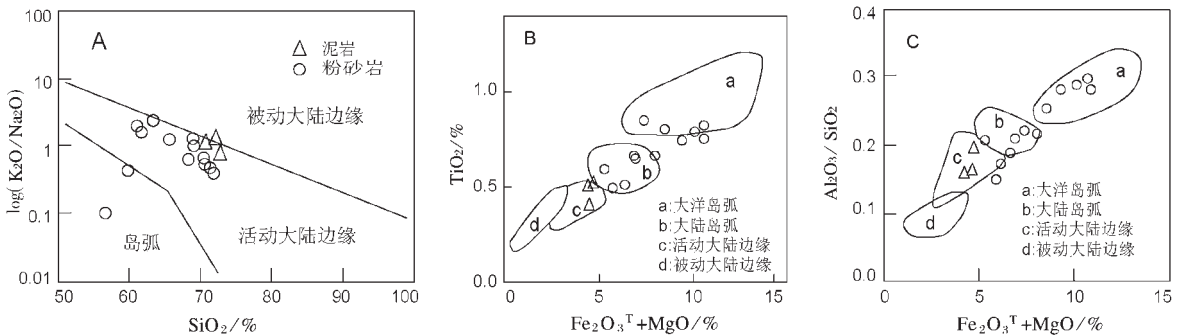


图6 砂岩形成构造环境判别图

Fig.6 Tectonic setting discriminating diagram for the formation of sandstones

A—log(K₂O/Na₂O)-SiO₂^[61]; B—TiO₂-(Fe₂O₃^T+MgO)^[58]; C—Al₂O₃/SiO₂-(Fe₂O₃^T+MgO)^[58]

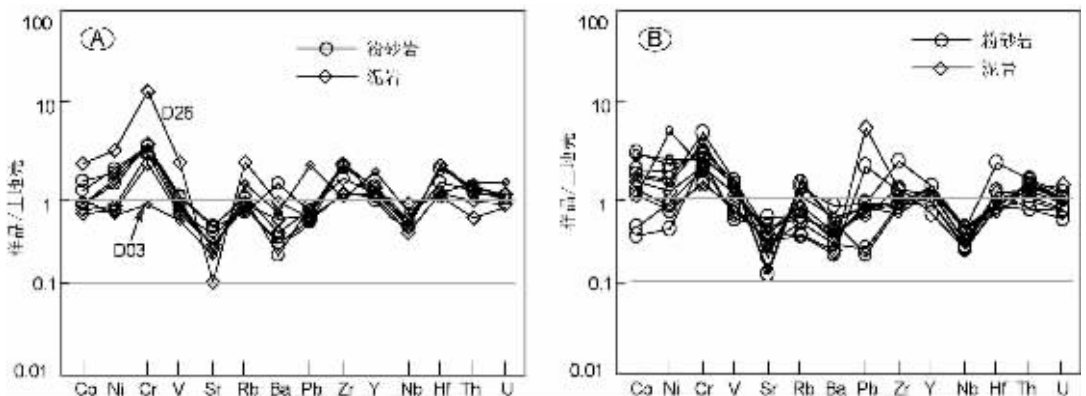


图7 多元素标准化蛛网图

Fig.7 Multi-element normalized spidergram for the siltstones and

mudstones of the Laojunshan conglomerate

明显的负Eu异常,基性火山岩具有低的LREE/HREE比值和弱或无Eu异常^[62]。老君山砾岩中粉砂岩、泥岩样品具有高的LREE/HREE比值(8.01, $n=19$)和明显的负Eu异常(2.03, $n=19$;表5),表明其源区以酸性火山岩为主。这一认识与砾岩成分研究所反映的物源相一致。另外,粉砂岩、泥岩样品与北美页岩具有相一致的稀土元素配分曲线特征,表明其源区除了基性—超基性岩石外,有大量酸性岩石存在^[63]。

4 讨论和结论

4.1 源区位置

砂岩成熟度是反映源区相对位置的重要指标。老君山砾岩由以含有棱角状砾石为特征的砾岩和低成熟度的杂砂岩组成,说明砾岩和砂岩均为近源沉积。

老君山砾岩基底的构造属性,前人已进行了大量研究,认为是由蛇绿岩、岛弧火山岩、双峰式火山岩、弧后扩张脊火山岩、蓝片岩、榴辉岩、浊积岩等共同组成的早古生代俯冲增生杂岩^[10,14,16,17,20,28,64]。区域上,该增生杂岩沿着肃南、祁连、俄博一带分布,为老君山砾岩提供各种成分的碎屑。这些碎屑并未发生长距离的搬运,而是在该增生杂岩的周缘发生快速沉积,形成颗粒支撑的砾岩和成熟度极低的杂砂岩。

砂岩碎屑组成研究表明,老君山砾岩源区构造背景具有残余岛弧和大陆边缘弧的双重属性。结合区域资料分析,认为该残余岛弧可能是该区俯冲增生杂岩中的一个重要组成单元。老君山砾岩中含有相当数量的花岗岩砾石和岩屑,可能来自大陆边缘弧。前人认为柴达诺花岗岩岩体和金佛寺花岗岩岩体是老君山砾岩中花岗岩碎屑的主要来源^[11,65]。如果这一认识正确,那么柴达诺花岗岩岩体和金佛寺花岗岩岩体则应具有大陆边缘弧的大地构造属性。然而,如何认识这2个岩体的构造属性和老君山砾岩中花岗岩砾石是由俯冲增生作用形成的增生岩浆弧还是由碰撞造山作用形成的碰撞型花岗岩提供的物源这一问题,对于如何认识晚古生代祁连造山作用是十分重要的。

古水流和祁连山晚古生代古地理变迁研究表明,老君山砾岩的源区位于其西南侧^[50-57,64-67]。这进一步说明,在北祁连老君山砾岩的南侧存在大陆边缘弧和残余弧。其中残余岛弧可能是增生杂岩的重要组成部分,而大陆边缘弧则可能为俯冲叠加于该增生杂岩中的岩浆弧。

4.2 盆地性质及其大地构造意义

对老君山砾岩的构造意义长期以来存在不同的认识,主要有造山后期的山间磨拉石盆地^[5,10,11,16,27]、裂谷盆地^[65,68]、前陆盆地^[66,69]或弧后盆地^[28]。这些不同认识集中反映了如何认识古老造山带内非海相沉积与造山带演化之间的关系问题。沉

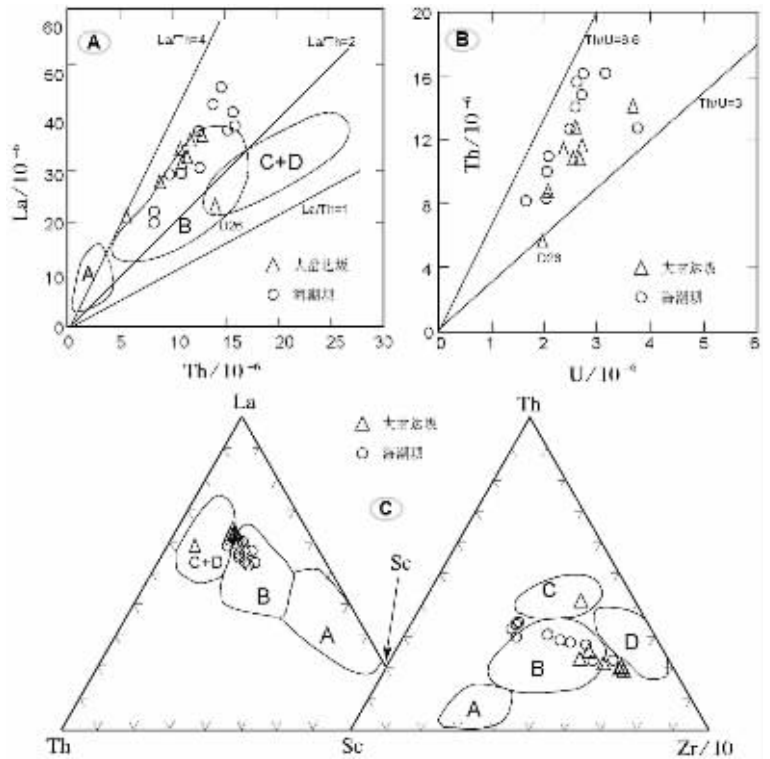


图8 砂岩形成构造环境判别图^[59]

Fig.8 Tectonic setting discriminating diagram for the formation of sandstone

A—大洋岛弧;B—大陆边缘弧;C—活动大陆边缘;D—被动大陆边缘

积盆地在造山带演化过程中遭受各种构造地质作用的影响,使原型发生破坏和改造,为盆地原型恢复和造山带大地构造格局的研究带来了极大的困难。然而,盆地中的沉积物却很好地记录并反映了盆地与造山带之间的演化历史。

砂岩的碎屑组成研究已成功地用于对不同沉积盆地源区和盆地类型的板块构造分类解释^[33,37,39,40,42-46]。Busby等^[70]根据板块构造边界类型将盆地划分为21种类型,并在对各类盆地大地构造环境分析的基础上系统地讨论了沉积相、沉积物组成及其源区。非海相粗碎屑岩在前陆盆地^[41,51]、弧前盆地^[38]或弧后盆地^[47,50]中均可出现,但是在这些盆地中,砾岩通常具有不同的形成机制和不同的岩相组合。弧后盆地中,砾岩常与火山碎屑流、远洋一半远洋沉积物和海底扇沉积体系相伴生^[47]。尽管蛇绿岩由于后期构造作用而被仰冲至弧后盆地中,但是蛇绿岩与增生楔的空间大地构造位置关系则充分表明蛇绿岩是弧前盆地而非弧后盆地的重要物源区^[71],例如安第斯造山带中的Magallanes盆地。弧前盆地中的非海相沉积物主要沉积于岛弧的周缘,碎屑主要来自岛弧,并形成以长石杂砂岩和岩屑杂砂岩为主的沉积组合^[35]。通常情况下,这些沉积物断续分布并不整合于岛弧之上,记录了俯冲增生造山作用和岛弧、增生杂岩源区的隆升剥蚀历史^[45]。前陆盆地内砂岩和

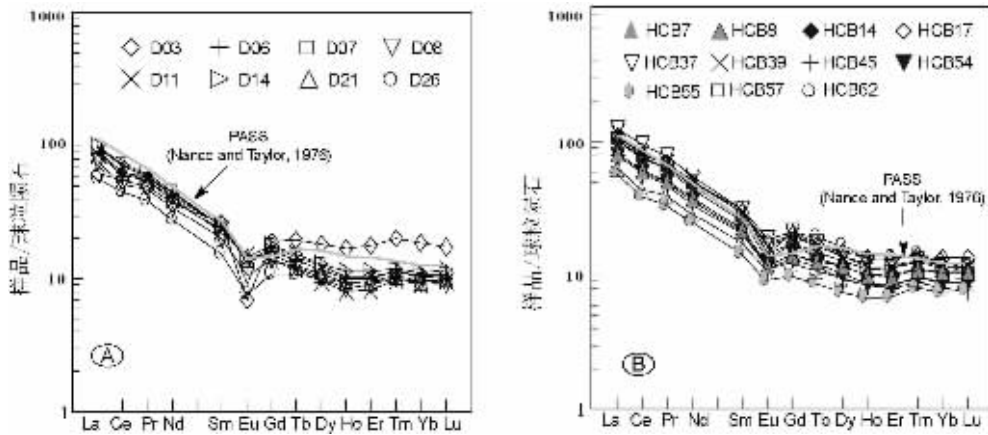


图9 砂岩、粉砂岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线

Fig.9 Chondrite-normalized REE distribution patterns for siltstones and mudstones

砾岩的碎屑主要来自俯冲杂岩、碰撞构造带和前陆褶冲带，以贫长石、富含石英/燧石、沉积岩和变质岩屑及少量火山岩屑为特征^[33,41,51]。

杜远生等^[6]认为北祁连造山带中志留系—泥盆系沉积相的变化是“北祁连加里东期造山过程的纵向不均一性和斜向碰撞、不规则边缘碰撞造山”的反映，并认为“北祁连—河西走廊奥陶纪弧后盆地火山岩—志留系复理石—海相磨拉石—中下泥盆统陆相磨拉石的充填序列以及空间分布特点”是“典型的弧后盆地向前陆盆地转化的沉积序列”。弧后前陆盆地(retroarc foreland basin)是指位于大洋板块俯冲形成的火山弧后侧的前陆盆地^[7]，其演化与薄皮逆冲褶皱带的发展密切相关；盆地内的沉积相主要为陆相和浅海相组合，在垂向上表现为进积序列，且陆相粗碎屑岩相(如砾岩)沉积于细粒沉积相之上；物源和古水流表明沉积物来自前渊和前陆褶冲带；砂岩以富含石英、贫长石为特征，并含有来自前陆褶冲带的沉积岩和变质岩屑，缺乏火山岩屑；垂向上，表现为砾岩与细碎屑沉积互层的特征，但是在近源区二者之间通常发育沉积间断面—不整合面。然而，老君山砾岩的碎屑组成研究表明，该套陆相沉积含有丰富的火山岩碎屑，以岩屑杂砂岩为主，且源区为残留岛弧和大陆边缘弧共同组成的混合背景区。砂岩重矿物组合和砾岩砾石组成则表明，老君山砾岩的源区出露火山岩、沉积岩和变质岩，也有花岗岩出露。岩石地球化学成分研究进一步表明，老君山砾岩形成于活动大陆边缘，其源区主要来自大陆边缘弧。这些事实充分说明老君山砾岩是与岛弧有关盆地中的沉积物，而与前陆盆地中沉积物的组成、物源背景完全不一致。

老君山砾岩形成于弧前盆地还是弧后盆地？这一问题的厘定对于研究祁连造山带古生代大地构造演化意义重大。来自现代、古老增生杂岩及邻侧岩浆岛弧源区的砂岩成分呈现出复杂多变的特征，这说明源区的复杂多样性，包括岛弧、海沟和汇聚板块边缘的洋壳部分^[33,34,49,73-76]。尽管岛弧是弧前盆

地的主要物源供给者，但也有部分来自增生杂岩和海沟前端沉积物提供的沉积岩、变质岩碎屑^[34,74,75]，从而使得弧前盆地中部分砂岩具有旋回造山物源的特征。砂岩中的铬铁矿表明，老君山砾岩中部分碎屑来自超镁铁质岩石。由此可见，尽管早古生代增生杂岩为老君山砾岩提供了部分物源，但其南侧的岛弧是老君山砾岩形成的主要源区。粉砂岩和泥岩岩石地球化学组成研究表明，这些细碎屑沉积物形成于活动大陆边缘背景，其源区为大陆边缘弧和大洋岛弧，这进一步暗示老君山砾岩可能形成于弧前盆地。此外，老君山砾岩内中基性或基性火山熔岩、英安岩、流纹岩及凝灰岩夹层^[2-4]的存在，也表明老君山砾岩形成时有大量火山物质成分的加入，这与粉砂岩、泥岩地球化学成分的研究结果相一致。如果这一推断正确，那么老君山砾岩并不是祁连山加里东运动的产物，这将与西秦岭地区不整合于早古生代岛弧—增生杂岩带之上的大草滩群^[77-79]相一致。

祁连造山带中，早中泥盆世老君山砾岩与晚泥盆世沙流水群之间为角度不整合关系。程裕淇^[80]认为中祁连和南祁连碰撞发生在晚泥盆世；左国朝等^[10]对北祁连早古生代大地构造演化研究后认为，北祁连晚泥盆世碰撞作用最终形成陆相磨拉石沉积沙流水群。

祁连造山带中泥盆纪弧前盆地的厘定对于解决古生代祁连构造演化过程中板块俯冲极性的争议十分关键，同时可为研究中亚构造演化提供基本地质依据。老君山砾岩弧前盆地及其南侧岛弧源区的厘定表明，阿拉善地块向南俯冲，并向位于祁连山北缘的北祁连岛弧带下部俯冲。这一结论将支持肖序常等^[6]、王荃等^[5]、Sobel等^[81]、Gehreles等^[82,83]的构造演化模式。但是沿着北祁连南侧，也存在着不同方向的俯冲增生体系^[10,11,25]。如果这些模式成立，那么在北祁连构造带将出现多个俯冲体系，类似于当今西南太平洋多岛海的古地理格局^[84]。

致谢：叶凯研究员、刘景波副研究员和刘兵研究员在野外考察过程中给予帮助，在此表示衷心的感谢！

参考文献:

- [1]黄汲清.中国主要地质构造单元[M].北京:地质出版社,1954.1-162.
- [2]沈纪祥.祁连山北麓老君山系的时代问题[J].地质论评,1959,19(5):220-222.
- [3]中国科学院地质研究所,等.祁连山地质志[M].北京:科学出版社,1963.163-170.
- [4]黄第藩.北祁连山东段北麓老君山系的研究[J].地质论评,1966,24(1):1-7.
- [5]王荃,刘雪亚.我国西部祁连山地区的古海洋地壳及其大地构造意义[J].地质科学,1976,1:42-55.
- [6]肖序常,陈国铭,朱志直.祁连山古蛇绿岩的地质构造意义[J].地质学报,1978,54(1):278-295.
- [7]吴汉泉.北祁连山高压变质带的岩石学和矿物学[J].西安地质矿产研究所所刊,1982,4:5-21.
- [8]吴汉泉,冯益民,霍有光,等.北祁连山中段甘肃南变质硬柱石蓝片岩的发现及其意义[J].地质论评,1990,36(3):277-280.
- [9]Wu H Q, Feng Y M, Song S G. Metamorphism and deformation of blueschist belts and their tectonic implications, North Qilian Mountains, China [J]. Journal of Metamorphic Geology, 1993, 11: 523-536.
- [10]左国朝,刘寄陈.北祁连早古生代大地构造演化[J].地质科学,1987,(1):14-24.
- [11]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[J].地球科学进展,1997,12(4):315-323.
- [12]左国朝,吴茂炳,毛景文,等.北祁连西段早古生代构造演化史[J].甘肃地质学报,1999,8(1):6-13.
- [13]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[J].地质科学,2002,37(3):302-312.
- [14]冯益民,吴汉泉.北祁连及其邻区古生代以来的大地构造演化初探[J].西北地质科学,1992,13(2):61-74.
- [15]冯益民,何世平.祁连山大地构造与造山作用[M].北京:地质出版社,1996.1-135.
- [16]许志琴,徐惠芬,张建新,等.北祁连走廊南山加里东俯冲杂岩增生地体及其动力学[J].地质学报,1994,68(1):1-15.
- [17]张建新,许志琴,徐惠芬,等.北祁连加里东期俯冲-增生楔结构及动力学[J].地质科学,1998,33(3):290-299.
- [18]张旗,郭原生,王岳明,等.祁连山地区镁铁-超镁铁岩的多样性[J].地球科学进展,1997,12(5):324-330.
- [19]张旗,钱青,王焰.蛇绿岩岩石组合及洋脊下岩浆作用[J].岩石矿物学杂志,2000,19(1):1-7.
- [20]夏林圻,夏祖春,任有祥,等.北祁连山石灰沟奥陶纪岛弧火山岩系岩浆性质的确定[J].岩石矿物学杂志,1991,10(1):1-10.
- [21]夏林圻,夏祖春,徐学义.北祁连山构造-火山岩浆演化动力学[J].西北地质科学,1995,16(1):1-28.
- [22]夏林圻,夏祖春,徐学义.北祁连山海相火山岩岩石成因[M].北京:地质出版社,1996.74-129.
- [23]夏林圻,夏祖春,徐学义.北祁连山早古生代洋脊-岛弧和弧后盆地火山作用[J].地质学报,1998,72(4):301-312.
- [24]Xia L, Xia Z, Zhao J, et al. Determination of properties of Proterozoic continental flood basalts of western part from North Qilian Mountains[J]. Science in China(Series D), 1999, 42(5): 506-514.
- [25]夏林圻,夏祖春,徐学义.北祁连山奥陶纪弧后盆地火山岩浆成因[J].中国地质,2003,30(1):48-60.
- [26]Xia L Q, Xia Z C, Xu X Y. Magmagenesis in the Ordovician backarc basins of the Northern Qilian Mountains, China[J]. Geological Society of America Bulletin, 2003, 115: 1510-1522.
- [27]宋述光.北祁连山俯冲杂岩带的构造演化[J].地球科学进展,1997,12(4):351-165.
- [28]宋述光,张立飞, Niu Y, 等.北祁连山榴辉岩锆石SHRIMP定年及其构造意义[J].科学通报,2004,49(6):592-595.
- [29]Song S G, Yang J S, Liou J G, et al. Petrology, geochemistry and isotopic ages of eclogites in the Dulan UHPM Terrane, the North Qaidam, NW China [J]. Lithos, 2003, 70: 195-211.
- [30]葛肖虹,刘俊来.北祁连造山带的形成与背景[J].地学前缘,1999,6(4):223-230.
- [31]Yang J S, Xu Z Q, Zhang J X, et al. Early Paleozoic North Qaidam UHP metamorphic belt on the north-eastern Tibetan plateau and a paired subduction model [J]. Terra Nova, 2002, 14: 397-404.
- [32]Wan Y, Xu Z, Yang J, et al. Ages and compositions of the Precambrian high-grade basement of the Qilian Terrane and its adjacent areas [J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75:375-384.
- [33]Dickinson W R, Suczek C A. Plate tectonics and sandstone compositions [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1979, 63: 2164-2182.
- [34]Dickinson W R, Valloni R. Plate settings and provenance of sands in modern ocean basins [J]. Geology, 1980, 8:82-86.
- [35]Dickinson W R. Compositions of sandstones in Circum-Pacific subduction complexes and fore-arc basins [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1982, 66:121-137.
- [36]Dickinson W R, Harbaugh D W, Saller A H, et al. Detrital modes of upper Paleozoic sandstones derived from Antler orogen in Nevada: implications for nature of Antler Orogeny [J]. American Journal of Science, 1983, 283: 481-509.
- [37]Dickinson W R. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones [A]. In: Zuffa G G ed. Provenance of arenites [M]. NATO Advanced Study Institute Series, NATO Advanced Study Institute, Dordrecht, 1985,148:3-61.
- [38]Dickinson W R. Forearc basins [A]. In: Busby C J, Ingersoll R V eds. Tectonics of sedimentary basins [M]. Blackwell Science, Oxford, 1995. 221-261.
- [39]Ingersoll R V. Actualistic sandstone petrofacies: Discriminating modern and ancient source rocks [J]. Geology, 1990,18:733-736.
- [40]Ingersoll R V, Graham S A, Dickinson W R. Remnant oceanic basins [A]. In: Busby C J, Ingersoll R V eds. Tectonics of sedimentary basins [M]. Blackwell Science, Oxford, 1995.363-391.
- [41]Graham S A, Tolson R B, Decelles P G, et al. Provenance modeling as a technique for analyzing source terrane evolution and controls on foreland sedimentation [A]. In: Allen P A, Homewood P eds. Foreland [C]. Special Publishing Number 8 of the International Association of Sedimentologists, 1986.425-436.
- [42]Graham S A, Hendrix M S, Wang L B, et al. Collisional successor basins of western China: impact of tectonic inheritance on sand composition [J]. Geological Society of American Bulletin, 1993, 105: 323-344.
- [43]Uddin A, Lundberg N. Unroofing history of the eastern Himalaya and the Indo-Burman Ranges: Heavy-mineral study of Cenozoic sediments from the Bengal basin, Bangladesh [J]. Journal of Sedimentary Research, 1998, 68: 465-472.
- [44]Boulter C A, Hopkinson L J, Ineson M G, et al. Provenance and geochemistry of sedimentary components in the Volcano-Sedimentary Complex, Iberian Pyrite Belt: discrimination between the sill-sediment-complex and volcanic-pile models [J]. Journal of the Geological Society, London, 2004,161:103-115.
- [45]Calvo C. Provenance of plutonic detritus in cover sandstones of

- Nicoya Complex, Costa Rica: Cretaceous unroofing history of a Mesozoic ophiolite sequence[J]. Geological Society of American Bulletin, 2003, 115: 832-844.
- [46] Cibin U, Spadafora E, Zuffa G G, et al. Continental collision history from arenites of episutural basins in the Northern Apennines, Italy[J]. Geological Society of American Bulletin, 2001, 113: 4-19.
- [47] Klein G D. The control of deposition depth, tectonic uplift, and volcanism on sedimentation processes in the backarc basins of the western Pacific Ocean[J]. Journal of Geology, 1985, 93: 1-25.
- [48] Marsaglia K M. Provenance of sands and sandstones from a rifted continental arc, gulf of California, Mexico[A]. In: Fisher R V, Smith G A eds. Sedimentation in volcanic settings[M]. Special Publication of Society for Sedimentary Geology, 1991, 45: 237-248.
- [49] Marsaglia K M, Ingersoll R V. Compositional trends in arc-related, deep-marine sand and sandstone: A reassessment of magmatic-arc provenance [J]. Geological Society of American Bulletin, 1992, 104: 1637-1649.
- [50] Marsaglia K M. Interarc and backarc basins[A]. In: Busby C J, Ingersoll R V eds. Tectonics of sedimentary basins[M]. Blackwell Science, Oxford, 1995. 299-329.
- [51] Miall A D. Collision-related foreland basins[A]. In: Busby C J, Ingersoll R V eds. Tectonics of sedimentary basins[M]. Blackwell Science, Oxford, 1995. 393-424.
- [52] Mork M B E. Compositional variations and provenance of Triassic sandstones from the Barents shelf[J]. Journal of Sedimentary Research, 1999, 69: 690-710.
- [53] Follo M F. Conglomerates as clues to the sedimentary and tectonic evolution of a suspect terrane: Wallowa Mountains, Oregon[J]. Geological Society of America Bulletin, 1992, 104: 1561-1576.
- [54] 马丽芳. 中国地质图(1:2500000)[M]. 北京:地质出版社, 2004.
- [55] Faupl P, Pavlopoulos A, Migiros G. Provenance of the Peloponnese (Greece) flysch based on heavy minerals[J]. Geological Magazine, 2002, 139: 513-524.
- [56] Nechaev V P, Ispording W C. Heavy-mineral assemblages of continental margins as indicators of plate-tectonic environments [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1993, 63: 1110-1117.
- [57] Dürr S B. Quick estimation of pebble volumes [J]. Journal of Sedimentary Research, 1994, 64: 677-679.
- [58] Bhatia M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstone[J]. Journal of Geology, 1983, 91: 611-627.
- [59] Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discriminating of sedimentary basins[J]. Contribution of Mineralogy Petrology, 1986, 92: 181-193.
- [60] Taylor S R, McLennan S M. The Continental crust: Its composition and evolution[M]. London, Blackwell, 1985. 312.
- [61] Roser B P, Korsch R J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suits using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio[J]. Journal of Geology, 1986, 94: 633-650.
- [62] Cullers R L. The geochemistry of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian-Permian age, Colorado, USA: Implications for provenance and metamorphic studies[J]. Lithos, 2000, 51: 181-203.
- [63] Cullers R J, Graf J L. Rare-earth elements in igneous rocks of continental crust: intermediate and silicic rocks-ore petrogenesis [A]. In: Henderson P ed. Rare earth element geochemistry[M]. Amsterdam, Elsevier, 1984. 275-316.
- [64] 张瑞林, 赵江天, 申少宁, 等. 北祁连山早古生代海相火山沉积相及地质找矿[M]. 北京:地质出版社, 1997. 1-132.
- [65] 魏春海. 中国祁连山地质构造的基本特征[J]. 地质学报, 1978, (2): 95-105.
- [66] 杜远生, 朱杰, 韩欣, 等. 从弧后盆地到前陆盆地——北祁连山带奥陶纪—泥盆纪的沉积盆地与构造演化[J]. 地质通报, 2004, 23(9-10): 911-917.
- [67] 金松桥, 朱伟元, 左国朝. 祁连山晚古生代地理变迁[J]. 石油实验地质, 1985, 7(1): 38-46.
- [68] 赵生贵. 祁连山带特征及其构造演化[J]. 甘肃地质学报, 1996, 5(1): 16-27.
- [69] Du Y, Wang J, Han X, et al. From flysch to molasse—early Hercynian foreland basin in North Qilan Mountains [J]. Journal of China University of Geosciences, 2003, 13(1): 1-7.
- [70] Busby C J, Ingersoll R V. Tectonics of sedimentary basins[M]. Blackwell Science, 1995. 579.
- [71] Fildani A, Cope T D, Graham S A, et al. Initiation of the Magallanes foreland basin: Timing of the southernmost Patagonian Andes orogeny revised by detrital zircon provenance analysis[J]. 2003, 21(12): 1081-1084.
- [72] Jordan T E. Retroarc foreland and related basins[A]. In: Busby C J, Ingersoll R V eds. Tectonics of sedimentary basins [M]. Blackwell Science, 1995. 331-362.
- [73] Critell S, De Rosa R, Platt J P. Sandstone detrital modes in the Makran accretionary wedge, southwest Pakistan: implication for tectonic setting and long-distance turbidite transportation [J]. Sedimentary Geology, 1990, 68: 241-260.
- [74] Critelli S. Sandstone detrital modes in the paleogene Liguride complex, accretionary wedge of the southern Apennines (Italy) [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1993, 63: 464-476.
- [75] Lash G G. Recognition of trench fill in orogenic flysch sequences[J]. Geology, 1985, 13: 867-870.
- [76] Velbel M A. Mineralogically mature sandstones in accretionary prisms[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1985, 55: 685-690.
- [77] 闫臻, 王宗起, 王涛, 等. 西秦岭大草滩群的沉积环境及构造意义 [J]. 地质通报, 2002, 21(8-9): 505-515.
- [78] Yan Z, Wang Z, Yan Q, et al. Devonian sedimentary environments and provenance of the Qinling Orogen (China): Constraints on Late Paleozoic southward accretionary tectonics of the North China Craton[J]. International Geology Review, 2005 (in press).
- [79] Yan Z, Wang Z, Wang T, et al. Provenance and tectonic setting of clastic deposits in the Devonian Xicheng Basin, Qinling orogen, Central China[J]. Journal of Sedimentary Research, 2005 (in press).
- [80] 程裕淇. 中国区域地质概论[M]. 北京:地质出版社, 1994. 1-517.
- [81] Sobel E, Arnaud N. A possible middle Paleozoic suture in the Altyn Tagh, NW China[J]. Tectonics, 1999, 18: 64-74.
- [82] Gehrels G E, Yin A, Wang X F. Detrital zircon geochronology of the northeastern Tibetan plateau[J]. Geological Society of American Bulletin, 2003, 115: 881-896.
- [83] Gehrels G E, Yin A, Wang X F. Magmatic history of the northeastern Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(B9): 2423.
- [84] Hall R. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations[J]. Journal of Asian Earth Science, 2002, 20: 353-431.