

文章编号: 1000-0550(2011)01-0041-44

# 甘肃靖远上泥盆统沙流水组沉积地球化学特征及其物源分析<sup>①</sup>

徐亚军<sup>1,2</sup> 杜远生<sup>1,2</sup> 杨江海<sup>2</sup> 陈甲才<sup>3</sup>

(1. 生物地质与环境地质教育部重点实验室 武汉 430074; 2. 中国地质大学地球科学学院 武汉 430074;  
3. 贵州省地质矿产勘查局 103 地质大队 贵州铜仁 554300)

**摘要** 甘肃靖远上泥盆统沙流水组沉积地球化学研究表明: 砂岩较泥质岩含有较高的 SiO<sub>2</sub> 含量和斜长石, 而泥质岩较砂岩含有较高的铁镁质组分和含钾矿物。砂岩和泥质岩样品均亏损 Nb、Ta、Sr 元素。砂岩中部分样品富集 Zr、Hf 元素和强烈的 Eu 的负异常, 部分样品显示 Zr、Hf 亏损和弱的负 Eu 异常。泥质岩样品均富集 Ni、Cr 元素, 但具有较强的 Eu 负异常。沙流水组岩石地球化学特征表现出源岩以酸性岩和基性岩混合为特征, 且遭受了中等程度的化学风化作用(CIA: 74~81), 在沉积过程中有少量来自被动大陆边缘的经历了沉积分选和再循环的古老物质加入。构造背景判别表明, 源岩主要形成于大陆岛弧和活动大陆边缘环境, 并有少量来自大洋岛弧和被动大陆边缘环境下形成的岩石。结合区域构造单元岩石组合特征认为, 北祁连沙流水组碎屑岩源岩主要为卷入造山带的北祁连岛弧、中祁连地块、俯冲杂岩带中的酸性岩石和基性岩石及少量花岗岩, 同时还有少量来自华北板块的、经过沉积分选和再循环的物质。综合上奥陶统一中、下泥盆统沉积演化特征及区域岩石学研究, 认为晚泥盆世是造山带强烈挤压之后转向伸展垮塌的时期, 上泥盆统沙流水组则是北祁连加里东期造山带由挤压向伸展转换的沉积记录。

**关键词** 沙流水组 沉积地球化学 物源 甘肃 北祁连造山带

**第一作者简介** 徐亚军 男 1978 年出生 博士 沉积学 E-mail: xuyajun19@163.com

**通讯作者** 杜远生 E-mail: duyuanheng126@126.com

中图分类号 595 文献标识码 A

北祁连造山带位于青藏高原东北缘, 是中祁连地块与华北板块西部阿拉善地块于加里东期形成的造山带。该造山带的构造演化历史对于了解我国西部板块群的拼合过程以及构造演化历史具有重要意义, 因而为中外地质学家所关注。志留纪—泥盆纪是北祁连造山带的构造转换时期, 志留纪复理石和泥盆纪磨拉石记录了该时期构造转换的详细细节, 是揭示造山带形成与盆地演化的沉积记录。近来, Yang 等<sup>[1]</sup> 利用碎屑锆石年代学方法研究了造山带东段靖远和西段肃南两地早志留世碎屑岩的物源特征, 并讨论了志留纪早期构造演化的特点。闫臻等<sup>[2]</sup> 利用碎屑岩碎屑组成、重矿物组合和沉积地球化学研究了中下泥盆统老君山组磨拉石的物源特征, 讨论了泥盆纪早期的沉积盆地的性质。然而, 上泥盆统沙流水组碎屑岩物源特征尚无研究报道, 沙流水组与造山带演化之间的关系尚不清楚。本研究利用碎屑岩沉积地球化学方法对该组地层的物源进行了深入分析, 并结合已有研究讨论了该组地层在造山带演化过程中的意义。

## 1 区域地质概况及研究剖面

北祁连加里东期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(图 1)。根据冯益民和何世平<sup>[3]</sup> 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<sup>[4]</sup>。中、下统老君山组是我国著名的陆相磨拉石之一, 与早中志留纪复理石沉积和晚志留纪海相磨拉石沉积组成了典型的前陆盆地沉积序列<sup>[5]</sup>。中、下泥盆统老君山组在全区广泛分布, 岩性为紫红色块状砾岩, 砾石磨圆、分选较差, 主要呈扇状体分布于整个祁连山山前、山间盆地内, 是祁连山强烈隆升阶段的沉

①国家自然科学基金项目(批准号: 41002030, 40672080 和 40621002), "111" 项目和中国地质大学(武汉)优秀青年教师基金(编号: CUGQD0832)联合资助。China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net  
收稿日期: 2009-11-03; 收修改稿日期: 2010-01-19

积记录;上泥盆统沙流水组主要分布在东段武威—景泰一带并具有一定的分带性,被认为是碰撞造山期后的磨拉石沉积<sup>[6]</sup>。岩性主要为紫红色薄层泥质粉砂岩、

泥岩与灰白色中厚层砂砾岩互层。研究剖面上砾岩中砾石主要为石英岩。砂岩中发育交错层理,泥岩中发育水平层理,并含有植物化石。沉积相研究为陆相湖

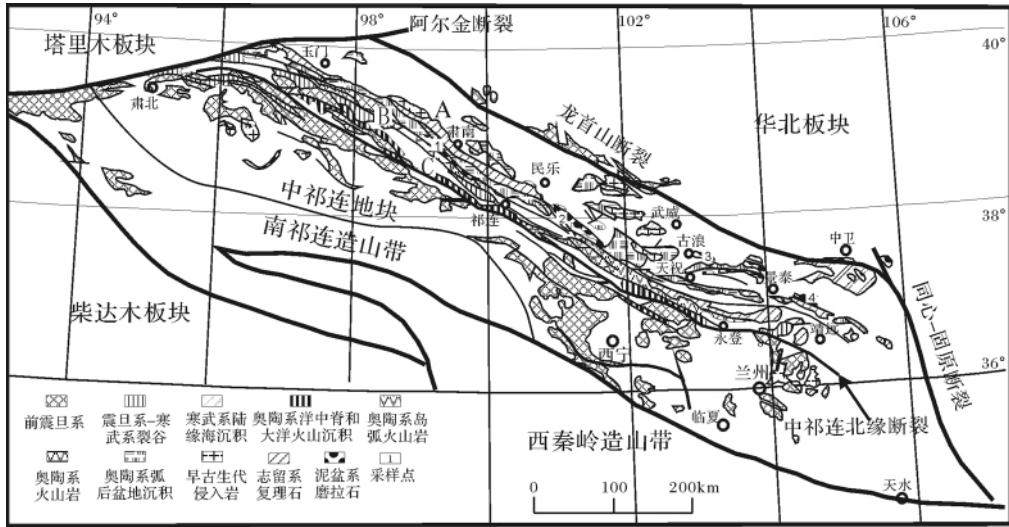


图 1 北祁连造山带东段地质简图(据文献[3],修改)

A. 河西走廊弧后盆地; B. 北祁连岛弧; C. 海沟俯冲杂岩

Fig. 1 The geological sketch of the eastern part of the North Qilian Orogenic Belt( after Reference [3 ])

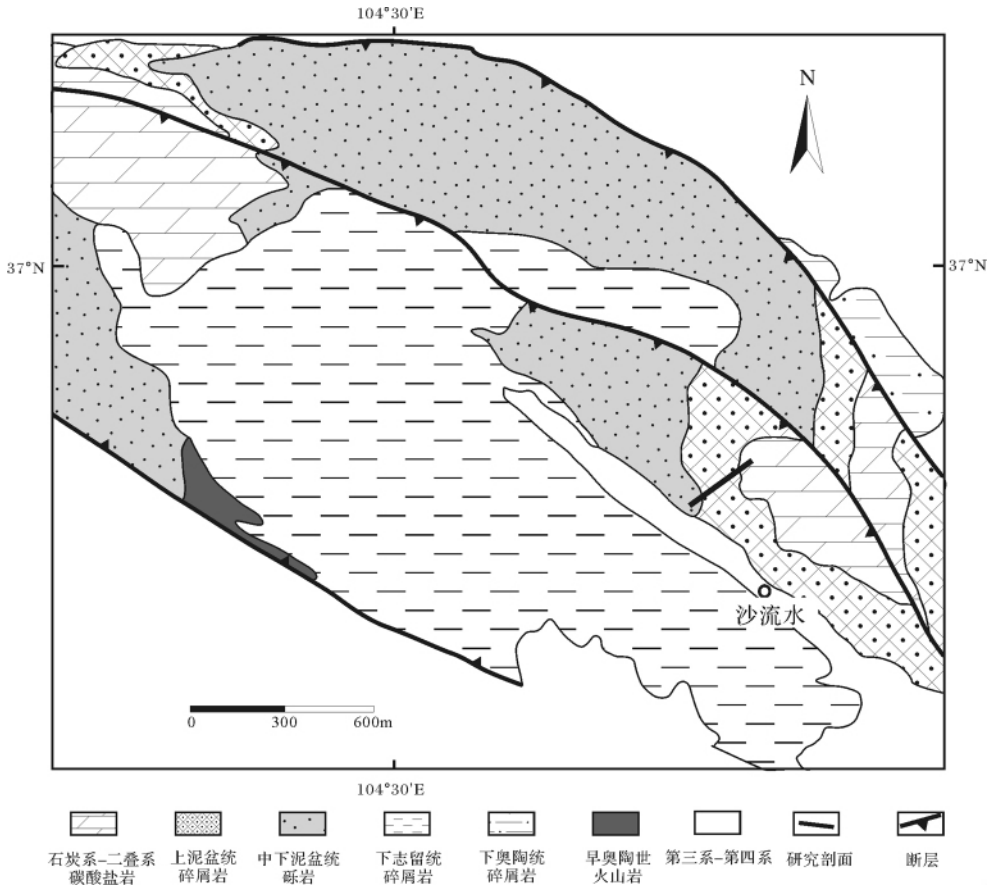


图 2 甘肃靖远沙流水地质简图

Fig. 2 Simplified geological map of the Shaliushui area

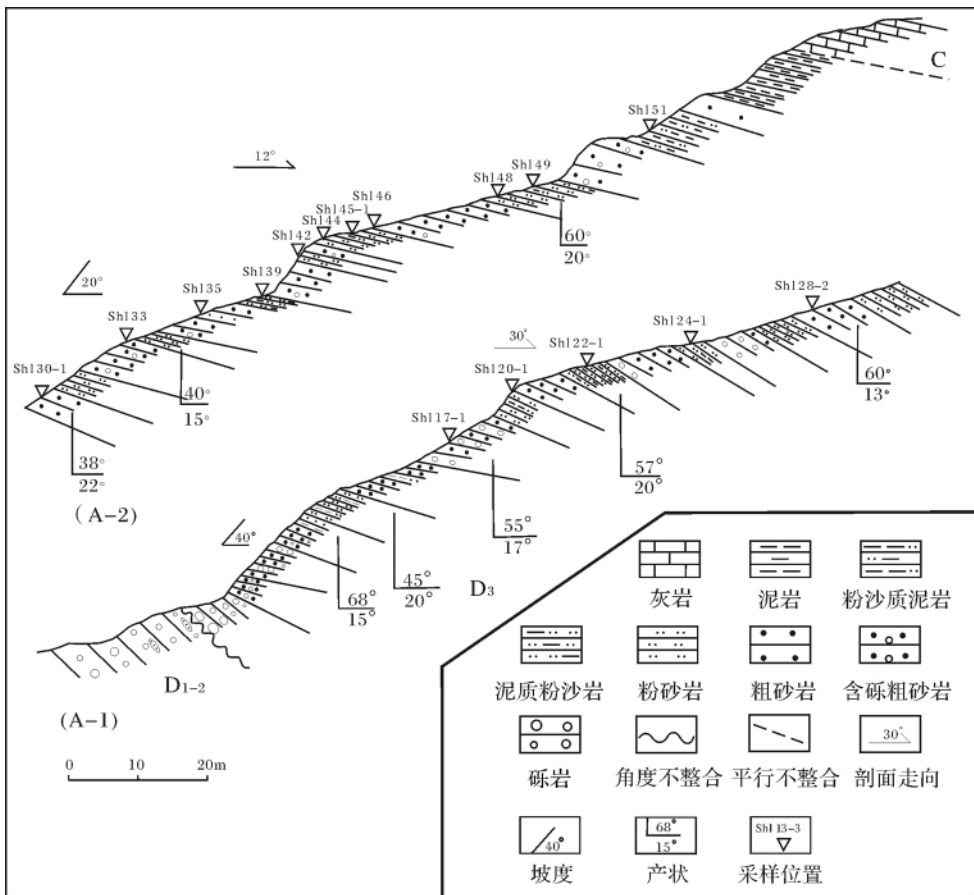


图 3 甘肃靖远沙流水组剖面及采样位置

Fig. 3 Profile and sampling location of Shaliushui Formation in Jingyuan County, Gansu province

盆沉积, 其内发育震积岩、风暴岩事件沉积<sup>[7, 8]</sup>。

研究剖面位于祁连山东段, 地理位置在甘肃省靖远县水泉乡沙流水村附近 (E: 36° 56' 54"; N: 104° 34' 35") (图 1, 图 2, 图 3)。沙流水组与下伏老君山组呈角度不整合接触, 与上覆石炭系呈平行不整合接触。底部有 5 m 左右的灰白色巨厚层砾岩, 最大砾石直径达 20 ~ 30 cm, 粒序层理发育; 向上粒度变细, 岩性主要为灰白色中—厚层粗砂岩—细砂岩与紫红色薄层粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩互层。由剖面底部向上部, 灰白色砂岩粒度逐渐变细, 砾石含量降低并逐渐消失。紫红色泥质岩中砂质含量变低直至与石炭系碳酸盐岩平行不整合接触。分析选取样品共 16 件, 岩性主要为粉砂质泥岩、泥岩以及中砂岩。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。微量元素在中国地质大学(武汉)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 种微量元素含量(附表 1)。

## 2 沙流水组地球化学特征及其影响因素

根据岩性, 把沙流水组的样品分为两组。一组为泥质岩 (MS) (包括粉砂质泥岩和泥岩), 另一组为砂岩 (SS) (主要为中砂岩)。

### 2.1 地球化学特征

主量元素中 SiO<sub>2</sub> 含量泥质岩较砂岩低 (泥岩: 39.01% ~ 62.97%, 平均 55.67%; 砂岩: 39.15% ~ 84.37%, 平均 63.39%) (表 1, 图 4a)。MgO + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>T 含量除一件砂岩样品 (Sh128-2) 外, 砂岩低于泥质岩, 表明泥质岩中铁镁质组分高于砂岩 (图 4b)。K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 比值泥岩普遍高于砂岩, 反映泥质岩含有较多的钾长石或含钾矿物, 而砂岩含有较多的斜长石 (图 4c)。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / (CaO + Na<sub>2</sub>O) 比值可用来反映样品中稳定组分与不稳定组分的相对含量<sup>[9]</sup>。所有样品中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / (CaO + Na<sub>2</sub>O) 比值普遍低于澳大利亚后太古代页岩 (PAAS), 表明样品中稳定组分与不稳定组

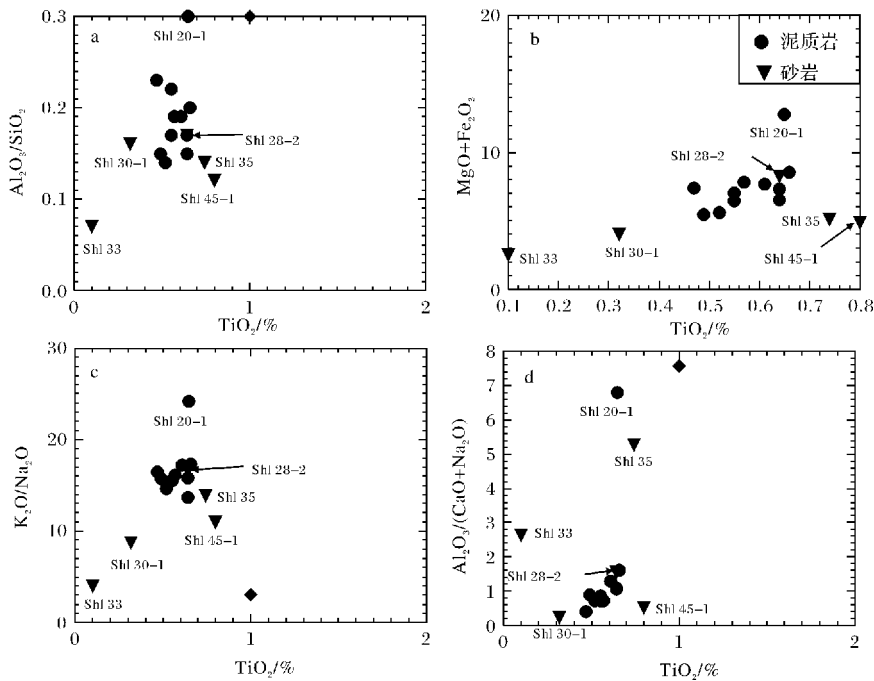


图 4 甘肃靖远沙流水组碎屑岩主要元素特征值

Fig. 4 Characteristic values of major elements of clastic rocks from the Shaliushui Formation, Jingyuan, Gansu province

分比值较低,样品中不稳定组分含量较高,而稳定组分含量较低,样品成熟度较低(图 4d)。

在上地壳标准化蛛网图中(图 5)泥质岩(MS)和砂岩(SS)具有相似的微量元素分配模式,但是,分布范围砂岩普遍大于泥质岩,表明砂岩没有经历沉积再循环作用的显著均一化。所有样品均显示高场强元素 Nb、Ta 和大离子亲石元素 Sr 的亏损。同时泥质岩均显示 Ni、Cr 元素的富集,而砂岩中部分样品(Shl45-1 和 Shl35)富集 Zr、Hf,而部分样品(Shl33 和 Shl33-1)显示 Zr、Hf 的亏损。

在球粒陨石标准化分配模式中,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)分布平坦(图 6)(砂岩  $La_N/Yb_N$ : 6.95 ~

16.69,平均值为 9.97;泥岩  $La_N/Yb_N$ : 7.48 ~ 10.37,平均值为 8.66)。泥质岩均显示较强的负 Eu 异常( $Eu/Eu^*$ : 0.58 ~ 0.67,平均值: 0.63)且与 PAAS 相近( $Eu/Eu^*$ : 0.65),砂岩 Eu 负异常较泥岩弱且分布范围较大( $Eu/Eu^*$ : 0.55 ~ 0.74,平均值: 0.63),亦暗示砂岩没有经历沉积再循环作用的显著均一化。

## 2.2 影响地球化学特征的因素

沉积岩的化学成分受诸多因素影响,如化学风化和沉积分选与再循环等。因此,在研究沉积物源特征以前,评估上述因素的影响非常重要。

### 2.2.1 化学风化

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

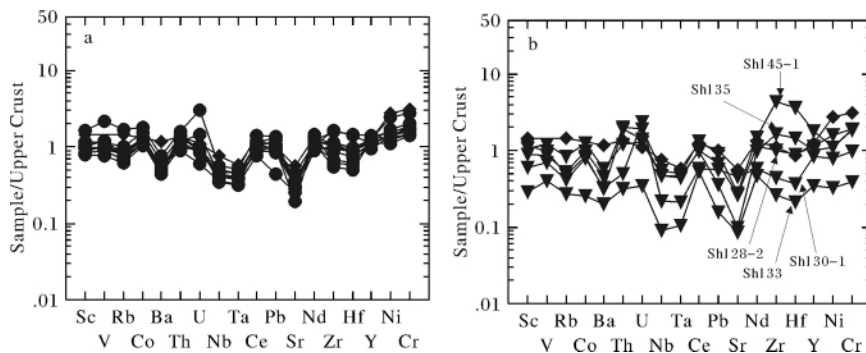


图 5 甘肃靖远沙流水组碎屑岩微量元素上地壳标准化蛛网图(上地壳标准化数据引自文献[10],图例同图 4)

Fig. 5 Upper crust-normalized spider diagram of clastic rock from the Shaliushui Formation, Jingyuan,

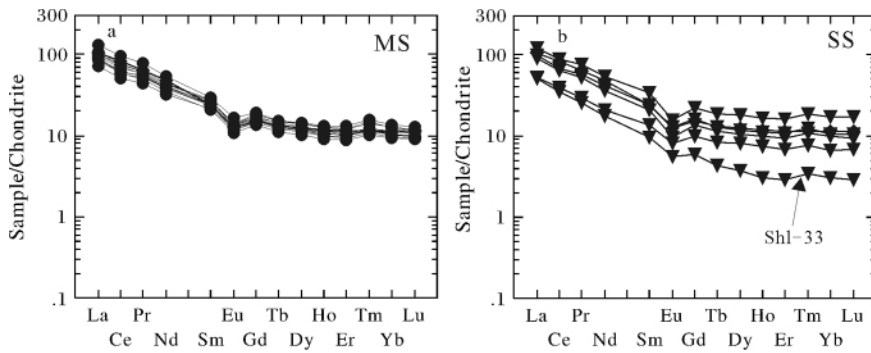


图 6 甘肃靖远沙流水组碎屑岩稀土元素球粒陨石标准化分配模式  
(球粒陨石标准化数据引自文献[10] 图例同图 4)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns of clastic rock from the Shaliushui Formation, Jingyuan, Gansu Province (Chondrite-normalized data from document [10], Symbols as in Fig. 4)

(如  $Al^{3+}$ 、 $Ti^{4+}$  等), 而不稳定的阳离子往往流失(如  $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $K^+$  等)<sup>[11]</sup>。元素的丢失程度取决于化学风化强度<sup>[12]</sup>。Nesbitt 和 Young<sup>[13]</sup> 提出利用化学蚀变指数(CIA)来定量评价源岩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  $CaO^*$  仅指硅质矿物中的  $CaO$  摩尔百分含量。

尽管 Fedo 等<sup>[11]</sup> 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。所以采用 Bock 等<sup>[14]</sup> 提出的方法, 当  $CaO > Na_2O$  含量时,  $Na_2O = CaO^*$ ; 当  $CaO \leq Na_2O$  含量时,  $CaO = CaO^*$ 。以此计算获得 CIA 值(表 1) 并在 A—CN—K 三角图中投点(图 7)。CIA 值范围在 74~81, 平均为 76, 属于中等程度的化学风化强度。表明源区岩石经历了中等程度的化学风化作用。此外在 A—CN—K 中, 泥质岩投点近似平行于 A—K 边, 可能和泥质岩中黏土矿物发生钾交代作用有关<sup>[15]</sup>, 这也可能是造成泥质岩样品中  $K_2O/Na_2O$  比值高于砂岩样品的原因之一。

### 2.2.2 沉积分选与再循环

沉积分选与再循环通常会造造成重矿物富集, 从而导致某些元素富集<sup>[16]</sup>。锆石是 Zr 元素的主要赋存矿物, 且矿物的稳定性很强, 会随着沉积再循环作用而富集于沉积物中。Th 通常在酸性岩中赋存, 而 Sc 常赋存于基性岩石中, 且 Th/Sc 比值在沉积再循环作用下不发生改变因而常被用做物源化学成分变化研究<sup>[17]</sup>。而 Zr/Sc 比值常因沉积再循环作用过程中锆石的富集而升高, 且不受后期热液稀释等作用影响<sup>[18]</sup>, 因而是重矿物富集的良好指标。因此 Th/

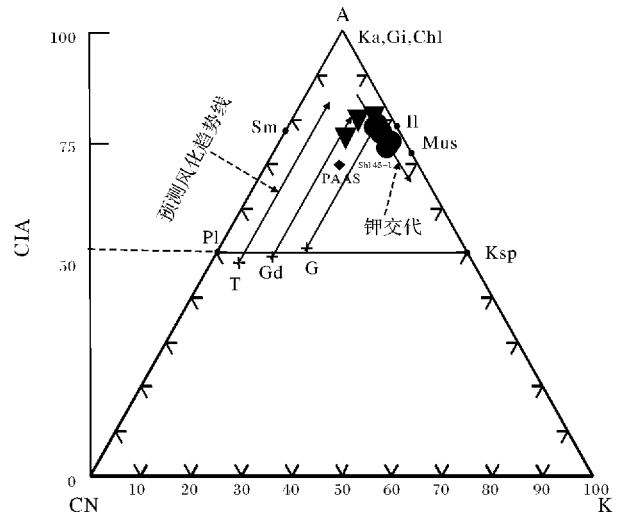


图 7 甘肃靖远沙流水组碎屑岩 A—CN—K 三角图  
(据文献[11], 图例同图 4)

Ka 为高岭石; Gi 为水铝石; Chi 为绿泥石; Sm 为蒙脱石; II 为伊利石; Mos 为白云母; Pl 为斜长石; Ksp 为钾长石; T 为英云闪长岩; Gd 为花岗岩; G 为花岗岩

Fig. 7 A—CN—K triangle diagram of clastic rocks from the Shaliushui Formation, Jingyuan, Gansu Province (after the reference [11], Symbols as in Fig. 4)

Sc—Zr/Sc 图常被用来评估沉积再循环作用。在 Th/Sc—Zr/Sc 图中(图 8) 除样品 Shl45-1 外, 所有砂岩样品靠近成分演化线(BFG), 并接近于大陆上地壳(UCC)和 PAAS, 显示砂岩成分受源岩成份的控制。而样品 Shl45-1 中可能含有较多经过沉积再循环的物质。泥质岩样品部分沿成分演化线分布, 但是部分脱离成分演化线而与锆石富集趋势线较为接近, 显示了锆石富集, 部分泥质岩中可能含有经过沉积再循环的物质(如样品 Shl17-1 和 Shl 51)。

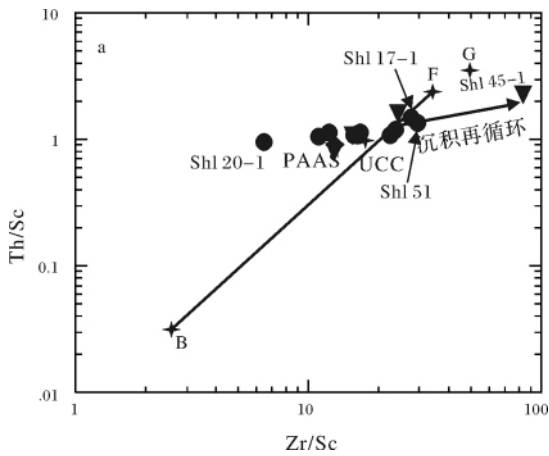


图 8 甘肃靖远沙流水组碎屑岩 Zr/Sc—Th/Sc 图  
(据文献[17],图例同图4)

B 玄武岩; F 长英质岩石; G 花岗岩

Fig. 8 Zr/Sc—Th/Sc diagram of elastic rocks from the Shaliushui Formation, Jingyuan, Gansu Province (after the reference [17]. Symbols as in Fig. 4)

此外受后期热液的影响,岩石中  $\text{SiO}_2$  含量的升高可改变岩石中微量元素的含量。因为  $\text{SiO}_2$  含量的升高可造成  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的降低,而  $\text{Al}_2\text{O}_3$  可控制微量元素的含量<sup>[19]</sup>。样品 Shl 33 中石英含量(84.4%)显著大于其它样品,可能受到后期热液的影响,造成该样品的稀土元素成分被稀释(图 5b),不能反映物源特征,因此在后面的分析中予以排除。

### 3 源岩属性及大地构造背景

#### 3.1 源岩属性

通常来讲,元素 Sc、Ni、Cr、Co 倾向于在基性岩石中富集,而 La、Th、Hf、Zr 以及 REE 倾向于富集于酸性岩石中<sup>[20]</sup>。

沙流水组样品地球化学数据显示,砂岩  $\text{SiO}_2$  含量除样品 Shl 30-1 较低外(39.15%),其它样品主要在 60%~75%。此外,砂岩具有较低的  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  比值和  $\text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$  值,说明样品中含有较少的钾长石和铁镁质组份,较多的斜长石。上述主量元素特征显示砂岩源岩以酸性岩石为主。另外样品 Shl 45-1 和 Shl 35 富集 Zr、Hf 元素和强烈的 Eu 的负异常( $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  分别为 0.55 和 0.56),也说明含有较多的酸性物质。而样品 Shl 30-1 显示 Zr、Hf 亏损和弱的负 Eu 异常(0.7),则可能更多地含有基性组份。

泥质岩  $\text{SiO}_2$  含量较砂岩低(平均 55.67%),而  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  比值和  $\text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$  值则较砂岩高,且样品富集 Ni、Cr 元素,反映样品中含有较多的含钾矿物

和基性组份,一致于化学风化评估所获泥质岩中黏土矿物发生了钾交代作用的结论,此外泥质岩样品具有较强的 Eu 负异常,表明泥质岩源岩形成过程中存在长石分馏作用,源岩中可能也混有酸性岩石碎屑。

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,因此,利用这些元素能有效地判别碎屑沉积岩源区成分<sup>[21,22]</sup>。在 Hf—La/Th 图中(图 9),砂岩样品零散分布,泥岩分布相对集中。砂岩样品 Shl 45-1 位于含有较多古老沉积物的被动大陆边缘物源一侧,说明源岩中含有较多来自被动陆缘的古老沉积物,一致于该样品中含有较多经历沉积分选和再循环物质的认识。此外砂岩样品 Shl 35-1 和泥质岩样品 Shl 17-1 和 Shl 51 中可能也含有一定量的来自被动陆缘的古老沉积物,所以位于长英质和基性混合物源区靠近被动大陆边缘一侧。砂岩样品 Shl 28-2 和部分泥质岩位于酸性岛弧物源区,反映源岩中含有岛弧环境下形成的酸性岩石。而砂岩 Shl 30-1 和部分泥岩位于长英质和基性混合物源区,并有向安山岩岛弧物源演化的趋势。

总的来说,沙流水组源岩成分较多,以酸性和基性岩石混合的物源为主,并伴有来自被动大陆边缘的古老沉积物。

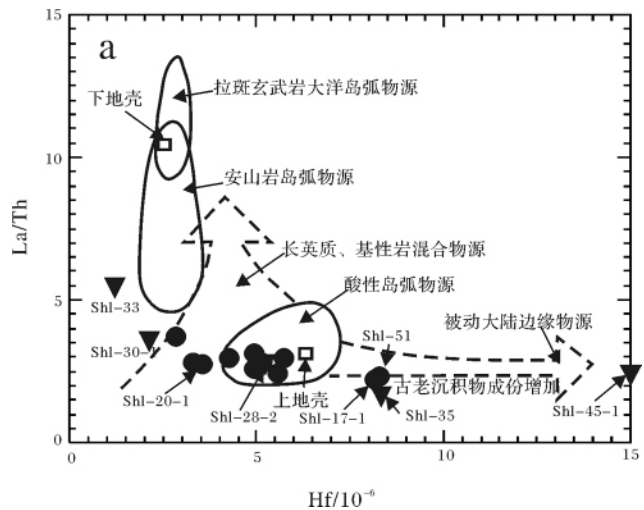


图 9 甘肃靖远沙流水组碎屑岩 Hf—La/Th 图  
(据文献[23],图例同图4)

Fig. 9 Hf—La/Th diagram of elastic rocks from the Shaliushui Formation, Jingyuan, Gansu Province (after reference [23]. Symbols as in Fig. 4)

#### 3.2 源区构造背景判别

不同的构造环境形成的沉积岩地球化学成分不同,可据此判定沉积岩形成的构造背景<sup>[24]</sup>。根据

Bhatia 等<sup>[24, 25]</sup>提出的常量元素、微量元素构造背景判别图(图 10, 图 11), 沙流水组样品主要投在大陆岛弧环境和活动大陆边缘环境并有 1 件砂岩样品 (Shl 45-1) 投在被动大陆边缘环境, 一件泥质岩样品 (Shl 20-1) 投在大洋岛弧环境。因此, 沙流水组沉积物主要来源于大陆岛弧和活动大陆边缘环境下形成的岩石, 并有少量来自大洋岛弧和被动大陆边缘环境下形成的岩石。

## 4 讨论

### 4.1 沙流水组物源区位置

北祁连造山带是在 Rodinia 联合大陆基础上经由寒武纪华北板块南缘裂解形成裂谷盆地, 早、中奥陶世形成洋盆和沟—弧—盆体系, 晚奥陶世—早、中泥盆世由中祁连地块与华北板块碰撞造山形成的<sup>[3, 26-29]</sup>。北祁连—走廊盆地在奥陶纪—泥盆纪经

历了由弧后盆地向前陆盆地的构造转换过程<sup>[5]</sup>。

来自下志留统的碎屑锆石年代学研究表明, 早志留世, 中祁连地块与华北板块在靖远一带已经碰撞, 而且来自中祁连地块和华北板块的沉积物覆盖了北祁连岛弧, 导致靖远一带同造山盆地内没有来自北祁连奥陶纪岛弧的沉积物。与此同时, 造山带西部肃南一带刚刚碰撞, 形成同碰撞的鹿角沟组砾岩。沉积物除来自中祁连地块和华北板块以外, 北祁连岛弧也提供了大量碎屑<sup>[1]</sup>。因此, 中祁连地块与华北板块的碰撞呈现出“东早西晚”的“斜向碰撞、不规则边缘碰撞”的特点。而由于这种独特的碰撞方式也导致北祁连造山带在早、中泥盆世的隆升具有“东强西弱”的不均一造山特点<sup>[30]</sup>以及形成了北祁连南缘大型韧性走滑剪切带<sup>[31]</sup>。来自中、下泥盆统老君山组砾岩的地球化学和碎屑锆石年代学研究表明, 北祁连西部肃南一带沉积物主要来自大陆边缘弧和残余岛

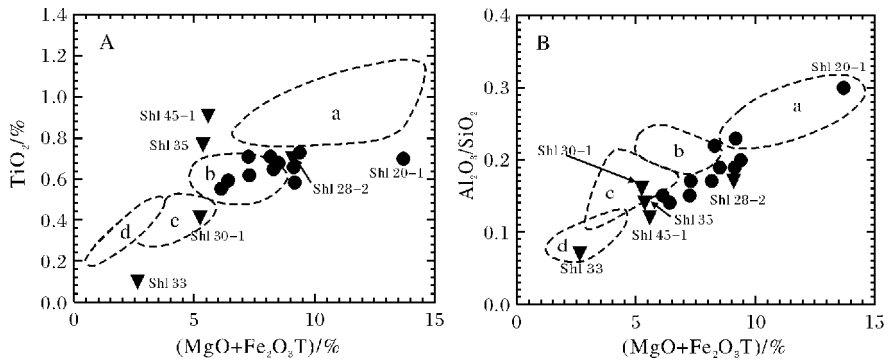


图 10 甘肃靖远沙流水组碎屑岩常量元素构造背景判别(据文献[24], 图例同图 4)

a 大洋岛弧; b 大陆岛弧; c 活动大陆边缘; d 被动大陆边缘

Fig. 10 The tectonic setting discrimination of major elements of clastic rocks from the Shaliushui Formation, Jingyuan, Gansu Province (after the reference [24], Symbols as in Fig. 4)

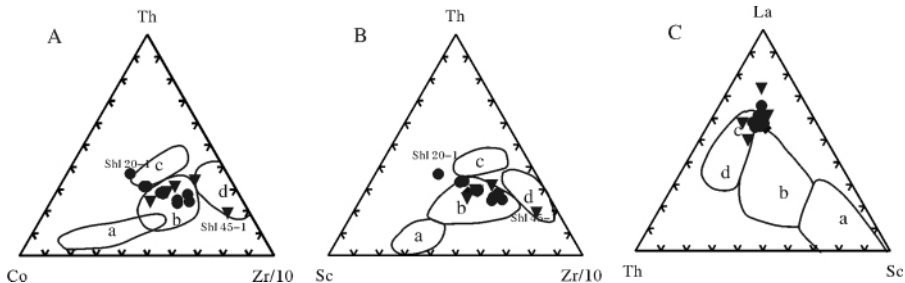


图 11 甘肃靖远沙流水组碎屑岩 Th - Co - Zr/10( A)、Th - Sc - Zr/10( B)、La - Th - Sc( C)

构造环境判别图据文献[25], 图例同图 4)

a. 大洋岛弧; b. 大陆岛弧; c. 活动大陆边缘; d. 被动大陆边缘

Fig. 11 Th - Co - Zr/10( A), Th - Sc - Zr/10( B) and La - Th - Sc( C) tectonic discrimination of clastic rocks from the Shaliushui Formation, Jingyuan, Gansu Province. (after the reference [25], Symbols as in Fig. 4)

弧<sup>[2,30]</sup>,东部靖远一带沉积物主要来自北祁连岛弧、中祁连地块和华北板块<sup>[30]</sup>。造山带东部靖远一带中、下泥盆统中北祁连岛弧物质的出现表明,早、中泥盆世时期强烈的造山作用使早志留世时被沉积物覆盖的北祁连岛弧卷入了造山带,并在隆升过程中被剥露出来。本文研究结果显示,晚泥盆世沙流水组沉积物主要来自活动大陆边缘以及大陆岛弧环境下形成的基性和酸性岩石,并伴有大洋岛弧和来自被动大陆边缘的古老沉积物。

区域地质资料显示,靖远一带南侧紧邻北祁连奥陶纪石灰沟岛弧,该岛弧是北祁连岛弧中发育最为完整的一段,从岛弧发育初期的拉斑玄武岩系到中期的钙碱性火山岩系,再到晚期的碱性火山岩,同时伴生与岛弧相关的火山碎屑岩等<sup>[27]</sup>,形成时代集中在 486~445 Ma<sup>[27,32]</sup>。另外,在祁连山东段也分布有多个与北祁连洋壳俯冲消减相关的岛弧型火山岩和花岗岩,年龄集中在 470~440 Ma<sup>[33~37]</sup>。根据沉积物地球化学特征推断,上述岛弧火山岩以及花岗岩可能是沙流水组沉积物中大陆岛弧沉积物的主要源区。

活动大陆边缘构造背景下的沉积物主要包括上隆基底的花岗岩、花岗片麻岩和硅质火山岩以及陆缘弧<sup>[38]</sup>。中祁连地块基底玄武岩、花岗岩及花岗片麻岩年龄集中在 940~700 Ma<sup>[39~43]</sup>,根据志留系一中、下泥盆统碎屑岩物源分析结果<sup>[1,30]</sup>,从晚奥陶世—早、中泥盆世,中祁连地块已与华北板块碰撞,中祁连地块东段并已经完全卷入造山带,因而活动大陆边缘沉积物则可能反映了来自中祁连地块变质基底的贡献。

北祁连岛弧南侧紧邻北祁连俯冲杂岩带,该杂岩带中包含具大洋及洋岛性质的蛇绿岩带<sup>[26,44,45]</sup>,时代集中在 550~490 Ma<sup>[46,47]</sup>。其构造性质一致于沉积物中少量的大洋岛弧物质,因而北祁连俯冲杂岩带也是沙流水组的物源区。如果这一推论正确的话,表明北祁连俯冲杂岩带也被卷入了造山带。

研究证明,北祁连洋壳在早、中奥陶世俯冲于华北板块之下<sup>[3,27~29,48]</sup>,因此华北板块具有被动大陆边缘的构造属性。因此本文地球化学物源分析中所获的来自被动大陆边缘的古老沉积物可能反映了来自华北板块的物质。

综上所述,沙流水组碎屑岩沉积物主要来自于盆地南侧卷入北祁连造山带的石灰沟岛弧以及相关的岛弧型花岗岩、中祁连地块基底和俯冲杂岩带,并伴有来自华北板块的古老的再旋回沉积物。

## 4.2 沙流水组的构造意义

北祁连加里东造山带奥陶纪—泥盆纪经历了从俯冲—碰撞的构造演化<sup>[3,26~29]</sup>。相邻同造山盆地也经历了从弧后盆地到前陆盆地的转换过程<sup>[5]</sup>。早、中泥盆世盆地处于造山带强烈隆升的磨拉石盆地阶段,中、下泥盆统老君山组作为该期的沉积记录被保存下来。上泥盆统沙流水组被认为是主造山期后再一次抬升形成的山间盆地磨拉石沉积<sup>[6,49]</sup>。根据对北祁连造山带从晚奥陶纪—泥盆纪同造山盆地碎屑岩的物源分析及与造山过程的关系,结合近来的岩石学研究,认为沙流水组碎屑岩应是北祁连加里东造山带从挤压—伸展转换时期的沉积记录。

一个完整的碰撞造山过程包含三个相互联系的阶段<sup>[50]</sup>:(1)碰撞引起的横向缩短和陆内俯冲导致地壳加厚、地表隆升及地壳根和岩石圈根的形成;(2)地壳根(山根)的榴辉岩相变质作用;(3)地壳根或岩石圈地幔的拆沉作用/造山带的伸展塌陷和莫霍面再平衡(山根的毁坏)<sup>[51]</sup>。

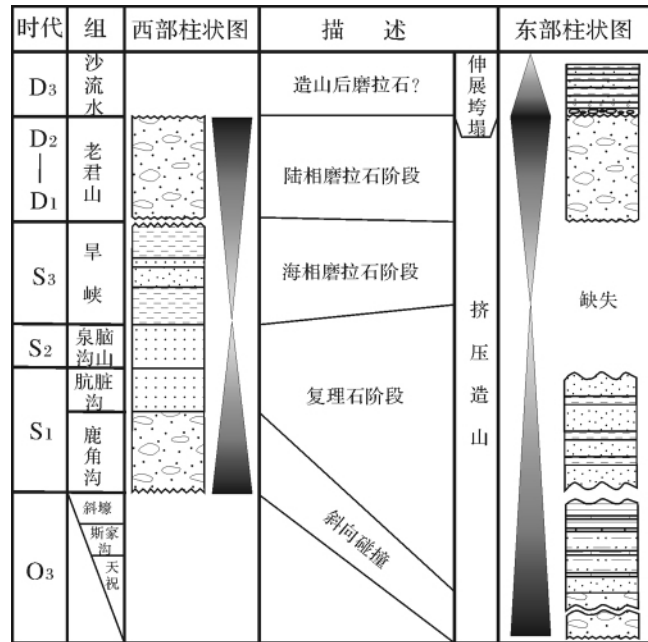


图 12 北祁连造山带造山作用与前陆盆地演化

Fig. 12 The orogeny and evolution of foreland basin of the North Qilian Orogenic Belt

前陆盆地主要形成于挤压造山的动力学背景之下<sup>[52]</sup>,主要对应于造山过程的前两个阶段,其构造演化也可划分为三个阶段:A 早期演化阶段,造山带主体位于海平面之下,逆冲载荷导致地壳的挠曲,此时沉积处于滞后状态,因而前陆盆地接受深水沉积;B



出露于地表的造山带达到平衡状态,风化剥蚀虽强,沉积载荷致使前陆盆地横向演化,水深逐渐变浅;C前陆盆地被沉积物填满<sup>[53]</sup>。第一阶段可称为复理石阶段,以深水浊流沉积为主;第二阶段可称为海相磨拉石阶段,以浅海—滨海沉积为主;第三阶段被称为陆相磨拉石阶段,以陆相沉积为主。由下向上表现出沉积物粒度变粗、水体变浅的进积序列<sup>[54]</sup>。

研究认为沙流水组为北祁连加里东造山带从挤压—伸展转换时期的沉积记录的认识主要基于以下两点:

第一,北祁连造山带东、西两段的碰撞过程虽然不同步,但同造山盆地内上奥陶统一—中下泥盆统表现出明显的从复理石—磨拉石转换的沉积特征<sup>[5, 55]</sup>。

造山带东段:上奥陶统可分为天祝组/古浪组、斯家沟组和斜壕组。天祝组/古浪组以紫红色、黄绿色砂砾岩、砂岩、粉砂岩,底部见厚达百米的砾岩,砾石欠磨圆、分选;斯家沟组以灰绿色薄层粉砂岩、泥质粉砂岩、泥岩夹薄层灰岩为主;斜壕组为黑色页岩为主,夹薄层灰岩。志留系仅发育下志留统肮脏沟组,中、上志留统缺失。肮脏沟组岩性为灰绿色薄—中厚层砂岩,可见完整或不完整的鲍马序列,为典型的复理石相深水浊流沉积,岩层发生褶皱弯曲。泥盆系分为中、下泥盆统老君山组和上泥盆统沙流水组。老君山组在平面上呈扇状分布,沉积相为山麓相冲积扇,是北祁连造山带强烈隆升时期的陆相磨拉石建造。岩性为紫红色块状砾岩,砾石欠磨圆、分选,砾石成分包括花岗岩、玄武岩、火山碎屑岩、石英岩和大理岩等造山带物源。砾岩底面多见冲刷面、局部砾石呈叠瓦状排列,砾岩、砂砾岩、砂岩主要发育块状层理,砂岩中可见平行层理和槽状交错层理,顶部砂岩局部见丘状交错层理。古流方向以东北 $15^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 为主。

造山带西段:上奥陶统主要为巨厚层的碳酸盐岩、火山岩和火山碎屑岩。志留系发育完全,划分为下志留统鹿角沟组和肮脏沟组,中志留统泉脑沟山组,上志留统旱峡组。鹿角沟组以灰绿色中—厚层砾岩、砂砾岩为主,砾石欠磨圆、分选。肮脏沟组岩性类似于东段,为典型的复理石相深水浊流沉积,但岩层平直,未发生褶皱弯曲。中志留统泉脑沟山组下段为灰绿色中—厚层细砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩。该段为不完整的鲍马序列组成的浊流沉积。上段为灰色中厚层灰岩、泥灰岩夹灰绿色中厚层细砂岩、粉砂岩及泥岩,砂岩中发育浪成波痕和交错层理。表明泉脑沟山组上段为浅海相沉积到近岸临滨沉积,反映一个

海退的过程,沉积环境逐渐由浅海变为滨海环境。旱峡组主要为紫红色中—厚层砂、泥岩,内含丰富的浪成波痕和交错层理、潮汐层理、泥裂等浅水沉积构造,代表浅海、滨海潮坪环境的背景沉积,反映进一步的海退过程。西段泥盆系主要发育中下泥盆统老君山组,岩性特征类似于东段,为山麓相山前盆地或山间盆地的冲积扇沉积。

综上所述,北祁连造山带东段上奥陶统一—中、下泥盆统和西段下志留统一—中、下泥盆统的沉积物表现出粒度变细再变粗、水体变深再变浅的进积序列,呈现出从碰撞挤压(上奥陶统天祝组和下志留统鹿角沟组)—海相复理石(上奥陶统斯家沟组和斜壕组)—中下志留统肮脏沟组和泉脑沟山组)—海相磨拉石(上志留统旱峡组)—陆相磨拉石(中、下泥盆统老君山组)的前陆盆地沉积序列。而上泥盆统沙流水组主要发育于造山带东段,底部为一套砾石层,向上以灰白色含砾粗砂岩、中砂岩和细砂岩与红色粉砂岩、泥质粉砂岩、泥岩互层为主,其中灰白色砂岩粒度向上逐渐变细,红色泥质粉砂岩转变为泥岩。砂岩中具浪成波痕和浪成交错层理、泥裂等浅水沉积构造,粉砂岩、页岩中主要为水平层理,沉积相研究属湖泊相沉积,并夹有湖相震积岩和风暴岩事件沉积<sup>[7, 8]</sup>。与老君山组相比,沙流水组内部岩性由下向上则表现出粒度变细、水体加深的退积序列,直至以平行不整合与石炭纪海相碳酸盐岩地层接触<sup>[56]</sup>,总体反映了一个从大规模海退转向海进的沉积演化序列(图12)。

第二,火山岩石学研究表明,祁连山东段同碰撞花岗岩侵位年龄在 $(454 \pm 5) \sim (446 \pm 1) \text{ Ma}$ <sup>[37]</sup>,西段同碰撞花岗岩侵位年龄在 $(444 \pm 17) \text{ Ma}$ 左右<sup>[57]</sup>,显示“东早西晚”的碰撞顺序。北祁连地区反映加厚的下地壳成因的埃达克岩形成时间在 $450 \sim 430 \text{ Ma}$ <sup>[58]</sup>,与柴北缘大陆型榴辉岩变质时间 $(457 \sim 420 \text{ Ma})$ <sup>[59, 60, 61, 62]</sup>比较一致,如此一方面反映了由于柴达木—中祁连与阿拉善之间的碰撞造山使地壳加厚,发生榴辉岩相变质作用,另一方面似乎反映了柴达木板块陆壳发生榴辉岩相变质时已经下插到了北祁连地区,随后折返回柴北缘一带,是否如此?尚需进一步考证。然而上述岩浆、变质事件发生的顺序完全可与碰撞造山过程的前两个阶段对比,而与第三阶段相对应的伸展垮塌作用,则主要反映在北祁连造山带大量的碰撞后花岗岩浆作用上,如形成于 $383 \text{ Ma}$ 左右的黄羊河岩体<sup>[33]</sup>,其形成时代属于晚泥盆世。

上述沉积学及岩石学特征表明,晚奥陶世—早中

泥盆世是北祁连造山带碰撞造山时期,晚泥盆世是造山带强烈挤压之后转向伸展垮塌的时期,而上泥盆统沙流水组是北祁连加里东期造山带由挤压向伸展转换的沉积记录。

因此,结合已有研究,可总结北祁连加里东造山过程如下:

北祁连造山带由于“东早西晚”的“斜向碰撞、不规则边缘碰撞”作用,造成前陆盆地发育也出现东部早于西部的特征。晚奥陶世早期,中祁连地块与华北板块首先在东部武威一带发生碰撞,形成上奥陶统天祝组和古浪组砾岩。随着中祁连地块向华北板块挤压,两个板块的碰接部位岩石圈挠曲下沉,形成前陆盆地,但由于沉积物供给滞后,盆地主要接受深水浊流沉积,形成上奥陶统斯家沟组、斜壕组和下志留统肮脏沟组。早志留世初期,中祁连地块与华北板块在西部肃南一带也发生碰撞,形成鹿角沟组砾岩,随后接受下志留统肮脏沟组和中志留统泉脑沟山组复理石沉积。晚志留世,随着造山带向华北板块推进,造山带露出水面,风化、剥蚀作用加强,沉积物供给增多,水体逐渐变浅,形成上志留统旱峡组海相磨拉石沉积。泥盆纪早期,由于“东早西晚”的“斜向碰撞、不规则边缘碰撞”作用,北祁连造山带沿走向快速不均一隆升,导致“东强西弱”的造山作用<sup>[30]</sup>,造山带东部向华北板块腹地侵进的程度远大于西部,造成东部前陆盆地内早期的沉积物部分被移出盆地,因而在造山带东部缺失中、上志留统。同时,前陆盆地被迅速充填,形成巨厚的陆相磨拉石建造——中、下泥盆统老君山组。此时造山带隆升达到最大高度。晚泥盆世,由于造山带东段隆起高于西段,因而伸展垮塌作用开始于东段,在造山带东段形成沙流水组,以角度不整合覆盖于前期形成的地层之上,而西段可能由于隆起幅度较小,因而伸展垮塌作用较弱,仅在靠近东段的局部地区形成上泥盆统碎屑沉积。自此,自晚奥陶世开始的加里东期造山活动结束,中祁连地块与华北板块缝合在一起,来自秦岭海域的海水侵入本区,形成下石炭统碳酸盐沉积。

## 5 结论

(1) 北祁连造山带东段靖远一带上泥盆统沙流水组碎屑岩源岩是卷入造山带的北祁连岛弧、中祁连地块、俯冲杂岩带中的酸性岩石和基性岩石及少量花岗岩,源岩在沉积前经历了中等强度的化学风化作用(CIA: 74~81),沉积搬运过程还有少量来自华北板

块的、经过沉积分选和再循环的物质加入。

(2) 北祁连造山带上奥陶统一中、下泥盆统沉积演化特征及区域岩石学研究证明:晚奥陶世—早中泥盆世是北祁连造山带碰撞造山时期,而晚泥盆世是造山带强烈挤压之后转向伸展垮塌的时期,上泥盆统沙流水组则是北祁连加里东期造山带由挤压向伸展转换的沉积记录。

## 参考文献(References)

- 1 Yang J H, Du Y S, Cawood P A, *et al.* Silurian collisional suturing onto the southern margin of the North China craton: Detrital zircon geochronology constraints from the Qilian Orogen[J]. *Sedimentary Geology*, 2009, 220: 95-104
- 2 闫臻,肖文交,刘传周,等.祁连山老君山砾岩的碎屑组成和源区大地构造背景[J].地质通报,2006,25(1-2):83-98 [Yan Zhen, Xiao Wenjiao, Liu Chuanzhou, *et al.* Detrital composition of the Laojunshan conglomerate in the Qilian Mountains, Northwest China and tectonic settings of its source regions[J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(1-2): 83-98]
- 3 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 [Feng Yimin, He Shiping. *Tectonics and Orogenesis of Qilian Mountains* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 1-135]
- 4 甘肃省地质矿产局.甘肃省岩石地层[M].武汉:中国地质大学出版社,1997:1-314 [Geological Bureau of Gansu Province. *Lithostratigraphy of Gansu Province* [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997: 1-314]
- 5 杜远生,朱杰,韩欣,等.从弧后盆地到前陆盆地—北祁连造山带奥陶纪—泥盆纪的沉积盆地和构造演化[J].地质通报,2004,23(9-10):911-917 [Du Yuansheng, Zhu Jie, Han Xin, *et al.* From the back-arc basin to foreland basin—Ordovician—Devonian sedimentary basin and tectonic evolution in the North Qilian orogenic belt[J]. *Geological Bulletin of China* 2004 23(9-10): 911-917]
- 6 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 [Zuo Guochao, Wu Hanquan. A bisubduction-collision orogenic model of Early-Paleozoic in the middle part of North Qilian area [J]. *Advance in Earth Sciences*, 1997, 12(4): 315-323]
- 7 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 [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(6): 1185-1193
- 8 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[J].矿物岩石,2001,21(3):69-73 [Du Yuansheng, Zhou Daohua, Gong Shuyun, *et al.* Tempestite and its paleogeographical significance of Devonian in Jingyuan and Jingtai Counties, Gansu Province [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2001, 21(3): 69-73]
- 9 顾雪祥,刘建明, Oskar Schulz, 等.江南造山带雪峰隆起区元古宙

- 浊积岩沉积构造背景的地球化学制约[J]. 地球化学, 2003, 32(5): 406-426 [Gu Xuexiang, Liu Jianming, Oskar Schulz, *et al.* Geochemical constraints on the tectonic setting of the Proterozoic turbidites in the Xuefeng Uplift region of the Jiangnan Orogenic Belt [J]. *Geochemica*, 2003, 32(5): 406-426]
- 10 Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution [M]. Oxford: Blackwell, 1985: 1-312
- 11 Fedo C M, Nesbitt H W. Unravelling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance [J]. *Geology*, 1995, 23: 921-924
- 12 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 [J]. *Sedimentary Geology*, 1992, 77: 51-76
- 13 Nesbitt H W M, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. *Nature*, 1982, 299: 715-717
- 14 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 [J]. *Sedimentology*, 1998, 45: 635-655
- 15 Akarish A I M, El-Gohary A M. Petrography and geochemistry of lower Paleozoic sandstones, East Sinai, Egypt: Implications for provenance and tectonic setting [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2008, 52: 43-54
- 16 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 [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 43: 375-388
- 17 McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K, *et al.* Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics [J]. *Geological Society of America Special Paper*, 1993, 284: 21-40
- 18 Lambek 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 [J]. *Precambrian Research*, 2008, 166: 185-203
- 19 Asiedu D K, Suzuki S, Nogami K, *et al.* Geochemistry of lower Cretaceous sediments, inner zone of southwest Japan: constraints on provenance and tectonic environment [J]. *Journal of Geochemistry*, 2000, 34: 155-173
- 20 Cullers R L, Podkovyrov V N. Geochemistry of the Mesoproterozoic Lakhanda shales in southeastern Yakutia, Russia: implications for mineralogical and provenance control, and recycling [J]. *Precambrian Research*, 2000, 104: 77-93
- 21 Long X P, Sun M, Yuan C, *et al.* Early Paleozoic sedimentary record of the Chinese Altai: Implications for its tectonic evolution [J]. *Sedimentary Geology*, 2008: 88-100
- 22 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 [J]. *地球化学*, 2007, 36(1): 11-26 [Xu Deru, Ma Chi, Nonna B C, *et al.* Petrological, mineralogical and geochemical characteristics of Ordovician volcanic-clastic sedimentary rocks in Bangxi area, Northwest Hainan Island, South China: Implication for provenance and tectonic setting [J]. *Geochemica*, 2007, 36(1): 11-26]
- 23 Floyd P A, Leveridge B E. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho Basin, South Cornwall: Framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstone [J]. *Journal of Geology Society London*, 1987, 144(4): 531-542
- 24 Bhatia M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstone [J]. *Journal of Geology*, 1983, 91(6): 611-627
- 25 Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywacke and tectonic of sedimentary basins [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1986, 92: 181-193
- 26 张建新, 许志琴, 陈文, 等. 北祁连中段俯冲—增生杂岩/火山弧的时代探讨 [J]. *岩石矿物杂志*, 1997, 16(2): 112-119 [Zhang Jianxin, Xu Zhiqin, Chen Wen, *et al.* A tentative discussion on the ages of the subduction-accretionary complex/volcanic arcs in the middle sector of North Qilian Mountain [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1997, 16(2): 112-119]
- 27 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: 1-153 [Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi. Origin of Marine Volcanic Rocks in North Qilian Mountains [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 1-153]
- 28 Du Y S, Zhu J, Gu S Z, *et al.* Sedimentary geochemistry of the Cambrian-Ordovician cherts: Implication on archipelagic ocean of North Qilian orogenic belt [J]. *Science in China: Series D*, 2007, 50(11): 1628-1644
- 29 Song S G, Niu Y, Zhang L F, *et al.* Tectonic evolution of early Paleozoic HP metamorphic rocks in the North Qilian Mountains, NW China: New perspectives [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 35: 334-353
- 30 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 [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2010, 53(3): 356-367
- 31 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 [J]. *地学前缘*, 2004, 11(4): 469-479 [Qi Xuexiang, Zhang Jianxin, Li Haibing, *et al.* Geochronology of the dextral strike ductile shear zone in south margin of the Northern Qilian Mountains and its geological significance [J]. *Earth Sciences Frontiers*, 2004, 11(4): 469-479]
- 32 Xu Z Q, Zhang J X, Li H B. Architecture and orogeny of the northern Qilian orogenic belt, NW China [J]. *Journal of the Geological Society of China (Taiwan)*, 2000, 43(1): 125-141
- 33 吴才来, 杨经绥, 杨宏仪, 等. 北祁连东部两类 I 型花岗岩定年及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 2004, 20(3): 425-432 [Wu Cailai, Yang Jingsui, Yang Hongyi, *et al.* Dating of two I types of granite from North Qilian, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(3): 425-432]
- 34 陈隽路, 李好斌, 王洪亮, 等. 秦祁结合部位王家岔石英闪长岩体

- 锆石 LA-ICPMS 定年及地质意义 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2007, 37(3): 423-431 [Chen Junlu, Li Haobin, Wang Hongliang, *et al.* LA-ICPMS Zircon U-Pb Dating of a quartz diorite pluton from Wangjiacha, the Junction Area between the Qinling and Qilian orogenic belts and its tectonic significance [J]. Journal of Jilin University: Earth Sciences Edition, 2007, 37(3): 423-431]
- 35 何世平, 王洪亮, 陈隽路, 等. 中祁连马街山岩群内基性岩墙群锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及其构造意义 [J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2008, 33(1): 35-45 [He Shiping, Wang Hongliang, Chen Junlu, *et al.* LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of basic dikes within Maxianshan Rock Group in the Central Qilian Mountains and its tectonic implications [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2008, 33(1): 35-45]
- 36 裴先治, 孙仁奇, 丁仁平, 等. 陇东地区阎家店闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其地质意义 [J]. 中国地质, 2007, 34(1): 8-16 [Pei Xianzhi, Sun Erqi, Ding Sanping, *et al.* LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Yanjiadian diorite in the eastern Qilian Mountains and its geological significance [J]. Geology in China, 2007, 34(1): 8-16]
- 37 雍桐, 肖文交, 袁超, 等. 中祁连东段古生代花岗岩的年代学、地球化学特征及其大地构造意义 [J]. 岩石学报, 2008, 24(4): 855-866 [Yong Yong, Xiao Wenjiao, Yuan Chao, *et al.* Geochronology and geochemistry of Paleozoic granitic plutons from the eastern Central Qilian and their tectonic implication [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(4): 855-866]
- 38 方国庆, 刘德良. 复理石杂砂岩的化学组成与板块构造 [J]. 沉积与特提斯地质, 2000, 20(3): 105-112 [Fang Guoqing, Liu Deliang. Geochemical composition and tectonic settings of flysch greywacke [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2000, 20(3): 105-112]
- 39 万渝生, 许志琴, 杨经绥, 等. 祁连造山带及临区前寒武纪深变质基底的时代与组成 [J]. 地球学报, 2003, 24(4): 319-324 [Wan Yusheng, Xu Zhiqin, Yang Jingsui, *et al.* Ages and composition of the Precambrian high-grade basement of the Qilian terrane and its adjacent areas [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2003, 24(4): 319-324]
- 40 Smith A D. The geochemistry and age of ophiolitic strata of the Xinglongshan Group: implication for the amalgamation of the Central Qilian belt [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2006, 28: 133-142
- 41 Tseng C Y, Yang H Y, Wan Y S, *et al.* Finding of Neoproterozoic (~775 Ma) magmatism recorded in metamorphic complexes from the North Qilian orogeny: Evidence from SHRIMP zircon U-Pb dating [J]. Chinese Sciences Bulletin, 2006, 51: 575-581
- 42 Xu W C, Zhang H F, Liu X M. U-Pb zircon dating constraints on formation time of Qilian high-grade metamorphic rock and its tectonic implications [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52, 531-538
- 43 Tung K A, Yang H J, Yang H Y, *et al.* SHRIMP U-Pb geochronology of the zircons from the Precambrian basement of the Qilian Block and its geological significances [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52: 2687-2701
- 44 许志琴, 徐慧芬, 张建新, 等. 北祁连走廊南山加里东俯冲杂岩增生地体动力学 [J]. 地质学报, 1994, 68(1): 1-15 [Xu Zhiqin, Xu Huifen, Zhang Jianxin, *et al.* The Zoulangnanshan Caledonian subductive complex in the Northern Qilian Mountains and its dynamics [J]. Acta Geologica Sinica, 1994, 68(1): 1-15]
- 45 宋述光. 北祁连俯冲杂岩带的构造演化 [J]. 地球科学进展, 1997, 12(4): 351-365 [Song Shuguang. Tectonic evolution of subductive complex belts in the North Qilian Mountains [J]. Advance in Earth Sciences, 1997, 12(4): 351-365]
- 46 史仁灯, 杨经绥, 吴才来, 等. 北祁连玉石沟蛇绿岩形成于晚震旦世 SHRIMP 年龄证据 [J]. 地质学报, 2004, 78(5): 649-657 [Shi Rendeng, Yang Jingsui, Wu Cailai, *et al.* First SHRIMP dating for the formation of the Late Sinian Yushigou Ophiolite, North Qilian Mountains [J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(5): 649-657]
- 47 Tseng C Y, Yang H J, Yang H Y, *et al.* The Dongcaohe ophiolite from the North Qilian Mountains: A fossil oceanic crust of the Paleozoic Qilian ocean [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52, 2390-2401
- 48 Xiao W J, Brian F W, Yong Y, *et al.* Early Paleozoic to Devonian multiple-accretionary model for the Qilian Shan, NW China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2008, doi: 10.1016/j.jseaes.2008.10.001
- 49 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同造山过程的沉积响应 [J]. 古地理学报, 2002, 4(4): 1-8 [Du Yuansheng, Zhang Zhe, Zhou Daohua, *et al.* Silurian and Devonian Palaeogeography of Northern Qilian-Hexi corridor and its sedimentary response to synorogenesis of North Qilian Orogenic Belt [J]. Journal of Paleogeography, 2002, 4(4): 1-8]
- 50 Leech M L. Arrested orogenic development: eclogitization, delamination, and tectonic collapse [J]. Earth Planet Science Letter, 2001, 185(1-2), 149-159
- 51 Ma C Q, Yang K G, Ming H L, *et al.* The timing of tectonic transition from compression to extension in Dabieshan: evidence from Mesozoic granites [J]. Science in China: Series D, 2004, 47(5): 453-462.
- 52 DeCelles P, Giles K. Foreland basin systems [J]. Basin Research, 1996, 8: 105-123
- 53 李曰俊, 邝国敦, 吴浩若, 等. 钦州前陆盆地——关于钦州残余海槽的新认识 [J]. 广西地质, 1993, 6(4): 13-18 [Li Yuejun, Kuang Guodun, Wu Haoruo, *et al.* Qinzhou foreland basin: new understandings about the Qinzhou residual trough [J]. Guangxi Geology, 1993, 6(4): 13-18]
- 54 Sinclair H D. Flysch to molasse transition in peripheral foreland basins: The role of the passive margin versus slab breakoff [J]. Geology, 1997, 25: 1123-1126
- 55 Du Y S, Wang J S, Han X, *et al.* From flysch to molasse: sedimentary and tectonic evolution of Late Caledonian-Early Hercynian Foreland Basin in North Qilian Mountains [J]. Journal of China University of Geosciences, 2003, 14(1): 1-7
- 56 阎存凤, 袁剑英, 赵应成. 北祁连东部石炭纪岩相古地理 [J]. 沉积学报, 2008, 26(2): 193-201 [Yan Cunfeng, Yuan Jianying, Zhao Yingcheng. Lithofacies paleogeography of the Carboniferous in the East of North Qilian Mountains [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(2): 193-201]
- 57 苏建平, 胡能高, 张海峰, 等. 中祁连西段黑沟梁子花岗岩的锆石

- U-Pb 同位素年龄及成因 [J]. 现代地质, 2004, 18(1): 70-74 [Su Jianping, Hu Nenggao, Zhang Haifeng, *et al.* U-Pb zircon dating and genesis of the Heigouliangzi granitic intrusion in the western segment of the Middle Qilian Mountains [J]. Geoscience, 2004, 18(1): 70-74]
- 58 Tseng C Y, Yang H J, Yang H Y, *et al.* Continuity of the North Qilian and North Qinling orogenic belts, Central Orogenic System of China: Evidence from newly discovered Paleozoic adakitic rocks [J]. Gondwana Research 2009, doi: 10.1016/j.gr.2009.04.003
- 59 Yang J S, Liu F L, Wu C L, *et al.* Two ultrahigh pressure metamorphic events recognized in the central orogenic belt of China: evidence from the U-Pb dating of coesite-bearing zircons [J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77: 463-477
- 60 孟繁聪, 张建新, 杨经绥. 柴北缘锡铁山榴辉岩的地球化学特征 [J]. 岩石学报, 2003, 19(3): 435-442 [Meng Fancong, Zhang Jianxin, Yang Jingsui. Geochemical characteristics of eclogites in Xi-tieshan area, North Qaidam of northwest China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19(3): 435-442]
- 61 Song S G, Zhang L F, Niu Y, *et al.* Evolution from oceanic subduction to continental collision: A case study of the Northern Tibetan Plateau inferred from geochemical and geochronological data [J]. Journal of Petrology, 2006, 47: 435-455
- 62 Zhang J X, Mattinson C G, Meng F, *et al.* Polyphase tectonothermal history recorded in granulitized gneisses from the North Qaidam HP/UHP metamorphic terrane, western China: evidence from zircon U-Pb geochronology [J]. Geological Society of America Bulletin, 2008, 120: 32-749

## Geochemistry and Provenance of the Upper Devonian Shaliushui Formation in Jingyuan County, Gansu Province

XU Ya-jun<sup>1, 2</sup> DU Yuan-sheng<sup>1, 2</sup> YANG Jiang-hai<sup>2</sup> CHEN Jia-cai<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Biology and Environment Geology of Education Ministry, Wuhan 430074;

2. Faculty of Earth Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074;

3. 103 Geological Team, Guizhou Province Bureau of Geology and Mineral Exploration, Tongren, Guizhou 554300)

**Abstract** Sedimentary geochemistry of detrital rocks from the upper Devonian Shaliushui Formation in Jingyuan, Gansu suggest that sandstone contain higher SiO<sub>2</sub> and plagioclase content than mudstone; Mudstone, however, occupy higher feric mineral and mineral K-bearing than sandstone. All samples are depleted in Nb, Ta and Sr elements. Some of sandstones are enriched with Zr and Hf elements, with strong negative Eu anomalies, and others are depleted in Zr and Hf without negative Eu anomalies. All mudstones display enrichment of Ni and Cr elements, with strong negative Eu anomalies. Characteristics of samples from the Shaliushui Formation show that rocks in the source consist of the basic and acidic rocks with ancient sediments recycled from passive continental margin. And source underwent middle intense chemical weathering (CIA: 74 ~ 81). Tectonic setting discriminations suggest that rocks in the source were mainly formed in the continental arc and active continental margin, with minor the oceanic arc and passive continental margin. Evidences combining tectonic discriminations and comparisons with potential provenances revealed that sediments in the Shaliushui Formation were derived mainly from the North Qilian Continental arc and the Central Qilian Block, with minor the North Qilian subducted complex and North China Plate. Integrated in the sedimentary evolution from the upper Ordovician to Lower and Middle Devonian and igneous rocks, the North Qilian Orogenic Belt completed the transfer from compression to extension during the Late Devonian, which indicate that the upper Devonian Shaliushui Formation is the sedimentary record of this process.

**Key words** Shaliushui Formation; sedimentary geochemistry; provenance; Gansu province; the North Qilian Orogenic Belt

附表1 甘肃靖远沙流水组碎屑岩地球化学数据

Table 1 Geochemical data of clastic rocks from the Shaliushui Formation in Jingyuan county, Gansu province

岩性 样品	泥质岩										砂岩						PAAS
	shl-17-1	shl-20-1	shl-22-1	shl-24-1	shl-39	shl-42	shl-44	shl-46	shl-48	shl-49	shl-51	shl-28-2	shl-30-1	shl-33	shl-35	shl-45-1	
SiO <sub>2</sub>	62.97	56.02	39.01	51.39	48.85	59.71	59.43	58.22	61.99	59.12	59.44	62	39.15	84.37	75.43	59.93	62.8
TiO <sub>2</sub>	0.64	0.65	0.47	0.57	0.55	0.52	0.61	0.55	0.49	0.66	0.64	0.64	0.32	0.1	0.74	0.8	1.00
Na <sub>2</sub> O	0.16	0.19	0.14	0.15	0.18	0.14	0.16	0.16	0.13	0.17	0.16	0.15	0.16	0.28	0.13	0.14	1.20
MgO	2.49	4.07	2.49	2.78	2.7	2.37	3.05	2.58	2.59	3.44	2.95	3.17	1.66	1.14	2.67	2.11	2.20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.54	16.93	9	10	10.59	8.4	11.02	9.71	9.07	11.98	10.14	10.7	6.16	6.22	10.42	6.98	18.9
MnO	0.12	0.04	0.34	0.14	0.08	0.09	0.07	0.07	0.1	0.06	0.07	0.07	0.36	0.03	0.04	0.11	0.11
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.12	0.12	0.08	0.12	0.09	0.1	0.11	0.11	0.08	0.12	0.11	0.12	0.07	0.03	0.16	0.15	0.16
K <sub>2</sub> O	2.18	4.59	2.3	2.42	2.79	2.05	2.75	2.49	2.04	2.94	2.53	2.48	1.4	1.12	1.81	1.53	3.70
CaO	8.51	2.3	21.88	13.58	14.82	11.55	8.37	11.09	9.99	7.23	9.32	6.79	26.19	2.07	1.84	13.34	1.30
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> T	4.06	8.72	4.90	5.07	4.35	3.25	4.61	3.89	2.87	5.09	4.35	5.11	2.40	1.40	2.45	2.77	6.5
H <sub>2</sub> O +	2.68	4.82	2.7	2.68	3.02	2.45	3.12	2.74	2.83	3.48	2.98	3.16	2.04	1.74	3.25	2.14	-
CO <sub>2</sub>	6.86	1.71	16.71	11.15	11.94	9.35	6.67	8.36	7.76	5.67	7.26	5.67	20.1	1.43	1.11	9.95	-
Total	100.3	100.2	100.0	100.1	100.0	100.0	100.0	100.0	99.9	100.0	100.0	100.1	100.0	99.9	100.0	100.0	-
Sc	10.86	17.96	9.34	11.59	10.63	9.08	10.80	10.28	8.80	13.03	10.68	11.80	6.62	3.17	12.69	9.78	16.00
V	72.72	131.34	63.25	70.70	58.61	53.47	58.78	60.15	45.82	68.98	57.29	71.57	42.20	24.40	57.79	52.40	-
Cr	70.80	96.71	52.62	64.22	59.48	51.04	60.68	56.95	49.65	71.87	64.37	65.87	34.31	13.49	66.40	65.01	110.00
Co	11.46	17.73	11.05	13.30	12.98	11.04	12.52	11.79	10.27	15.20	12.05	12.26	7.84	2.52	8.25	9.74	-
Ni	24.91	48.14	25.27	30.44	29.25	24.96	27.44	27.36	22.27	34.19	27.57	31.35	15.78	6.51	22.30	22.30	55.00
Ga	11.61	25.34	12.11	13.50	13.13	11.41	13.44	13.52	10.88	15.73	12.15	14.75	7.50	6.13	10.28	9.06	20.00
Rb	77.69	187.71	85.95	95.10	99.94	75.85	94.51	94.33	70.06	113.51	89.30	94.24	47.09	30.64	53.88	58.72	160.00
Sr	68.36	88.21	156.74	100.40	128.64	108.26	108.25	122.76	89.36	100.33	102.43	91.30	157.93	29.46	34.53	98.74	200.00
Y	30.95	27.65	26.41	30.10	24.54	27.64	21.13	24.79	24.66	26.13	24.63	24.88	18.29	7.51	22.45	39.01	27.00
Zr	300.12	115.97	103.75	191.66	129.70	215.14	180.86	162.35	196.78	211.62	313.83	193.08	85.05	49.40	309.24	815.27	210.00
Nb	11.66	13.94	8.52	11.23	10.40	10.07	10.79	10.65	8.89	12.41	10.97	11.91	5.47	2.25	11.55	13.47	19.00
Cs	6.03	15.66	6.94	7.48	7.29	5.44	7.11	6.55	4.69	8.63	6.44	7.10	3.06	1.18	2.99	3.67	-
Ba	248.69	423.47	273.28	299.35	299.86	243.16	282.35	290.13	320.84	353.07	245.53	316.63	179.53	109.62	175.91	249.14	650.00
Hf	8.31	3.32	2.86	4.93	3.55	5.72	4.95	4.28	5.13	5.58	8.18	5.23	2.15	1.22	8.34	21.22	5.00
Ta	0.99	1.12	0.70	0.88	0.85	0.83	0.89	0.83	0.72	1.00	0.88	0.96	0.47	0.23	1.03	1.11	1.28
Pb	18.43	27.20	18.37	26.24	21.27	16.57	17.97	20.29	8.88	23.78	19.30	13.64	11.26	3.13	7.03	18.15	20.00
Th	15.99	17.19	9.78	12.57	11.87	10.93	12.23	11.21	9.39	14.37	14.17	12.94	5.35	3.40	20.32	22.02	14.60
U	2.44	8.42	2.78	4.02	2.34	2.53	2.39	2.62	1.68	2.63	2.51	3.61	6.65	0.97	3.96	5.37	3.10
La	37.33	47.98	36.50	39.63	32.62	31.99	31.45	33.40	26.43	35.32	31.55	35.53	19.04	18.41	33.20	43.28	38.20
Ce	69.97	89.72	68.21	72.88	54.73	57.95	56.11	58.47	48.81	65.05	58.37	63.84	36.96	33.85	61.72	83.55	79.60
Pr	8.51	10.64	7.78	8.46	7.17	7.47	6.77	7.36	6.08	8.07	7.29	7.74	4.06	3.52	7.16	10.27	8.83
Nd	31.44	38.08	28.64	31.34	26.69	28.30	25.07	27.45	23.01	30.23	27.02	29.37	14.97	12.25	25.57	38.34	33.90
Sm	6.33	6.86	5.54	6.09	5.57	5.82	4.85	5.65	4.91	6.14	5.33	5.61	3.12	2.19	4.87	7.81	5.55
Eu	1.16	1.42	1.14	1.22	1.02	1.18	0.94	1.11	1.01	1.20	0.98	1.10	0.71	0.49	0.84	1.34	1.08
Gd	5.54	5.86	5.02	5.62	4.91	5.13	4.14	4.96	4.39	5.36	4.67	4.97	3.04	1.80	4.18	6.80	4.66
Tb	0.88	0.87	0.77	0.86	0.74	0.82	0.65	0.74	0.70	0.80	0.72	0.74	0.48	0.25	0.66	1.08	0.77
Dy	5.46	5.23	4.62	5.24	4.36	4.81	3.85	4.47	4.22	4.61	4.46	4.46	3.04	1.42	4.02	6.78	4.68
Ho	1.11	1.05	0.92	1.09	0.88	0.96	0.78	0.91	0.85	0.96	0.85	0.94	0.63	0.26	0.84	1.40	0.99
Er	3.24	3.03	2.60	2.97	2.52	2.74	2.22	2.47	2.35	2.60	2.46	2.65	1.71	0.72	2.33	3.99	2.85
Tm	0.55	0.50	0.43	0.52	0.40	0.43	0.36	0.41	0.38	0.41	0.42	0.44	0.27	0.12	0.38	0.66	0.41
Yb	3.33	3.13	2.52	3.12	2.49	2.82	2.28	2.58	2.39	2.68	2.65	2.62	1.64	0.75	2.44	4.21	2.82
Lu	0.48	0.45	0.37	0.45	0.38	0.41	0.35	0.38	0.36	0.41	0.41	0.40	0.26	0.11	0.36	0.64	0.43
CIA	77	75	75	76	75	76	76	75	77	76	76	77	75	74	81	77	69.00
ICV	1.37	1.34	1.58	1.49	1.38	1.41	1.40	1.38	1.33	1.42	1.46	1.47	1.49	0.99	1.14	1.53	0.85
La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	7.57	10.37	9.77	8.59	8.84	7.67	9.32	8.74	7.48	8.92	8.05	9.17	7.86	16.69	9.19	6.95	9.72
Eu/Eu*	0.59	0.67	0.65	0.62	0.58	0.64	0.62	0.63	0.65	0.63	0.59	0.63	0.70	0.74	0.56	0.55	0.63
ΣREE	175.33	214.83	165.07	179.48	144.50	150.80	139.83	150.37	125.88	163.85	147.20	160.40	89.92	76.13	148.58	210.16	185.00