

北羌塘托纳木地区上白垩统阿布山组沉积特征、 物源分析及其构造意义

杜林涛, 李亚林

中国地质大学(北京)地球科学与资源院, 北京 100083

摘 要: 羌塘—拉萨碰撞造山作用是青藏高原中生代最为重要的构造事件, 羌塘盆地内晚白垩世阿布山组是羌塘—拉萨碰撞造山作用的沉积记录。托纳木地区发育了北羌塘坳陷少有的晚白垩世阿布山组沉积, 然而对其形成构造背景和动力学机制尚不清楚。本文通过对托纳木地区阿布山组沉积环境、物源区详细表明, 该地区阿布山组下部以冲积扇环境为主, 中上部为辫状河环境。砾石成分、古水流、砂岩岩石学、砂岩重矿物、碎屑锆石 U-Pb 定年等物源综合分析显示中央隆起带和盆地内部均为阿布山组提供物源, 结合邻区阿布山组对比, 认为研究区物源来自盆地内西南方向下伏沉积、晚三叠世那底冈日组火山岩以及盆地基底, 阿布山组沉积受盆地内构造控制。托纳木地区阿布山组物源区特征反映了北羌塘晚白垩世地体内部的逆冲事件, 与羌塘—拉萨地体碰撞有关。

关键词: 晚白垩世; 羌塘盆地; 沉积; 物源; 构造意义

中图分类号: P548; P512.2 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2021.062801

Sedimentary Characteristics, Provenance Analysis and Tectonic Significance of the Late Cretaceous Abushan Formation in Tonamu Area, Northern Qiangtang

DU Lin-tao, LI Ya-lin

College of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083

Abstract: The Qiangtang–Lhasa collisional orogeny is the most important Mesozoic tectonic event in the Tibetan Plateau. The Late Cretaceous Abushan Formation in the Qiangtang Basin serves as the sedimentary record of the Qiangtang–Lhasa collision orogeny. There is a rare Late Cretaceous Abushan Formation deposit in northern Qiangtang Depression in Tonamu area. However, the tectonic setting and dynamic mechanism of its formation remain unclear. In this paper, the sedimentary environment and provenance of Abushan Formation in Tonamu area are shown in detail. The comprehensive analysis of the provenance, including the composition of gravel, paleocurrences, sandstone petrology, heavy minerals of sandstone and U-Pb dating of detrital zircons, shows that the central uplift belt and the interior of the basin all provided the provenance of the Abushan Formation. Combined with the comparison of the Abushan Formation in the adjacent areas, it is considered that the provenance of the study area came from the underlying sediments in the southwest of the basin, the volcanic rocks of the Late Triassic Nadiganri Formation and the basement of the basin. Sediments of Abushan Formation are controlled by intra-basin structures. The provenance characteristics of the Abushan Formation in the Tonamu area reflect the thrust event in the Late Cretaceous terrane of the northern Qiangtang and were related to the collision of Qiangtang–Lhasa Terrane.

Key words: Late Cretaceous; Qiangtang Basin; sedimentary; provenance; tectonic significance

本文由科技部“第二次青藏高原综合科学考察研究”项目(编号: 2019QZKK0803)和国家重点研发项目(编号: 2017YFC0601405; 2018YFE0204204)联合资助。

收稿日期: 2021-05-21; 改回日期: 2021-06-20; 网络首发日期: 2021-06-29。责任编辑: 闫立娟。

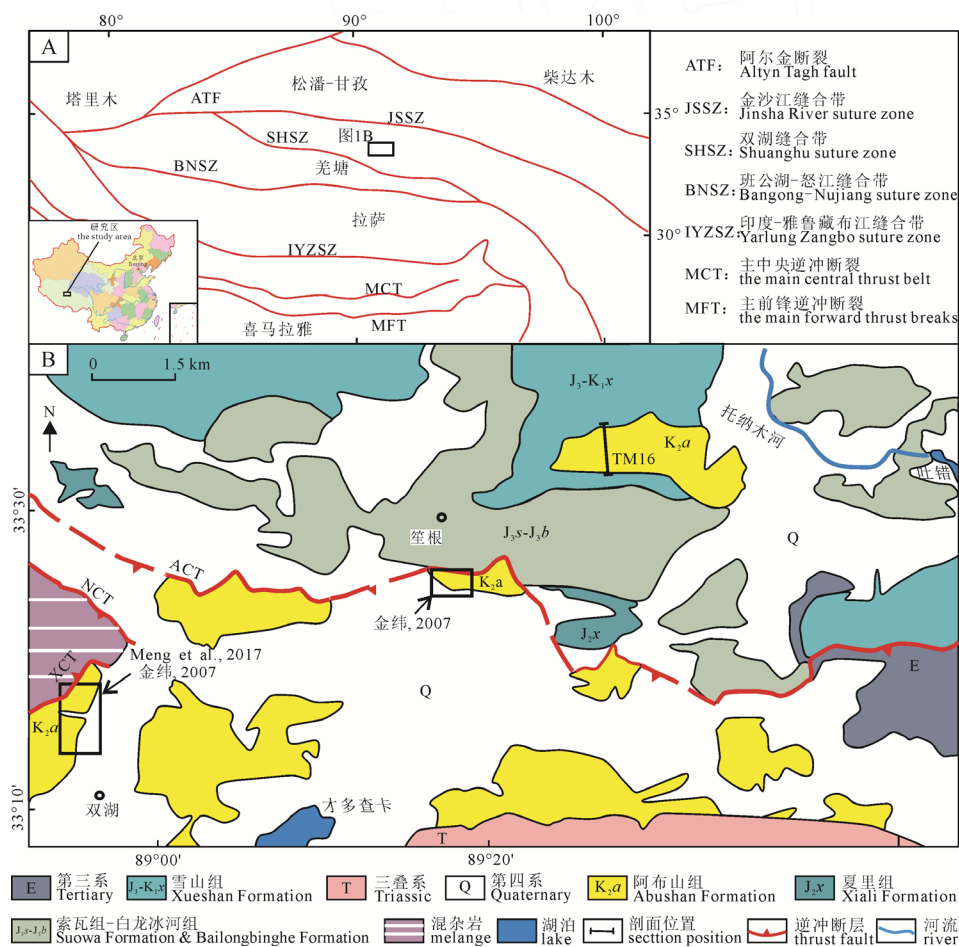
第一作者简介: 杜林涛, 男, 1988 年生。博士研究生。主要从事含油气盆地与构造分析方面的研究。E-mail: lintao@cugb.edu.cn。

与碰撞有关的陆源碎屑岩是连接盆地与造山带的“纽带”，盆地内碎屑沉积的环境、物源区可有效揭示盆地构造背景(刘少峰和张国伟, 2005)。羌塘—拉萨碰撞造山作用是青藏高原中生代最为重要的构造事件(Li et al., 2013; Li et al., 2015a), 羌塘—拉萨碰撞后羌塘盆地在晚白垩世沉积了一套陆相粗碎屑磨拉石沉积——阿布山组, 并且角度不整合于下伏海相地层之上(Wu et al., 2015), 其沉积演化对认识羌塘—拉萨碰撞造山过程以及青藏高原早期演化具有重要意义。然而, 目前对阿布山组沉积时代的研究主要用来约束构造事件发生的时间(Li and Wang, 2010; 赵珍等, 2020), 对阿布山组沉积环境和物源区仅开展零星研究(金纬, 2007; Ma et al., 2017; 王志龙等, 2017), 对阿布山组沉积演化、构造背景及与羌塘—拉萨碰撞的关系还不清楚。本文通过对羌塘盆地北部阿布山组进行详细的沉积学、砾石成分、古水流、重矿物、碎屑锆石 U-Pb 年代学分析, 并对比前人在笙根地区、双湖地区阿布山组的沉积、物源研究结果(金纬, 2007; Meng et al., 2017), 探讨晚白垩世沉积作用及其与区域构造演

化的关系。

1 区域地质概况

青藏高原从北向南依次由松潘—甘孜、金沙江缝合带、羌塘、班公湖—怒江缝合带、拉萨、喜马拉雅地体组成(Yin and Harrison, 2000; Li et al., 2015a)(图 1A)。羌塘盆地位于青藏高原中部, 金沙江—班公湖—怒江缝合带之间, 中央隆起带将羌塘盆地分为南、北羌塘次级坳陷(吴珍汉等, 2021)。盆地基底由下元古界结晶基底与中元古界褶皱基底两部分组成, 前者岩性主要由石英片岩、角闪岩、大理岩组成, 后者岩性主要由变质砂岩、片岩夹变质砾石组成(黄继钧, 2001)。中央隆起带主要由蓝片岩变质带、蛇绿混杂岩、古生代—三叠纪低变质地层、古生代—早中生代花岗岩以及少量晚三叠世那底冈日组火山岩组成(Kapp et al., 2003; Zhang et al., 2006; 李才等, 2007; Li et al., 2015; Zhang et al., 2016)。北羌塘坳陷以侏罗纪—三叠纪沉积为主以及少量新生代沉积; 晚三叠世为海陆过渡相沉积, 同时还发育那底冈日组火山岩, 其主要沿北羌塘南缘、中央隆



ACT—阿木错逆冲断层; NCT—中央隆起带北缘逆冲断层; XCT—肖茶卡—双湖逆冲断层。

ACT—Amco thrust fault; NCT—thrust fault on the northern margin of the central uplift zone; XCT—Xiaochaka-Shuanghu thrust fault.

图 1 双湖—托纳木地区地质图及剖面位置

Fig. 1 Geological map and section location of Shuanghu-Tonamu area

起带北侧,呈带状展布,火山岩年龄主要集中在 205–223 Ma(李才等, 2007; 王剑等, 2008; 付修根等, 2010; 李学仁, 2019); 侏罗系发育较为齐全, 自下而上包括早中侏罗世雀莫错组(J_{1-2q}), 中侏罗世布曲组(J_2b)、夏里组(J_2x), 晚侏罗世索瓦组(J_3s)、白龙冰河组(J_3b), 晚侏罗世一早白垩世雪山组($J_3.K_{1x}$)。

阿布山组(K_2a)主要在托纳木及以南地区零星分布(金伟, 2007; 李亚林, 2011)(图 2–5)。吴瑞忠等(1986)最早将其定名为上白垩统阿布山群, 指不整合于侏罗系之上、以中厚层状杂色复成分砾岩、含砾砂岩和岩屑砂岩为主的河流-湖泊相沉积, 厚度 >1200 m; 西藏自治区地质矿产局将该套地层降“群”为“组”称之为阿布山组(西藏自治区地质矿产局, 1993)。此后, 大量地质调查表明, 阿布山组不仅分布在羌塘地体南部, 而且在北部也有发育(潘桂棠等, 2013), 其分布及与侏罗系不整合关系也得到地震反射资料的证实(赵政璋, 2000; 潘桂棠等, 2013; 吴珍汉等, 2014)。羌塘盆地晚白垩世断层活动以逆冲推覆构造运动为主要特征(Kapp et al., 2005; 吴珍汉等, 2014), 并且主要以大型北倾的逆冲断裂为主(Wu et al., 2015)。吴珍汉等(2014)通过地表构造特征以及地震资料反演认为南羌塘阿布山组受双湖—肖茶卡逆冲推覆构造(XST)与色林错逆冲推覆构造的前锋逆冲断层(NST)联合控制, 北羌塘阿布山组受多格错仁逆冲推覆构造(DCT)、龙尾错逆冲推覆构造(LCT)以及中央隆起带北缘逆冲推覆构造反向逆冲断层(NCT)等多条逆冲断层控制。

2 沉积序列特征与沉积环境分析

根据所测剖面的岩性、粒度、沉积构造、砾砂比例和垂向序列, 本文将托纳木地区阿布山组(TM16, 图 2)分为上、下两段。

下段厚度约 110 m, 底部与晚侏罗—一早白垩世雪山组呈角度不整合接触。岩性主要由紫红色砾岩、紫红色岩屑粗砂岩组成, 以砾岩为主。砾岩为中厚层, 厚度 0.8~3 m 之间, 砾石磨圆较好, 分选中等, 块状构造, 颗粒支撑, 杂基为砂质(图 3A), 说明砾石经历相对较长、水动力较强的搬运过程。砂岩为岩屑砂岩, 以紫红色含砾粗砂岩、中粗砂岩为主, 砂岩颗粒分选磨圆较差, 钙质胶结, 砂岩层发育大量平行层理(图 3B), 厚度 0.3~1 m 之间。垂向上由砾岩向上过度为多个砂砾岩互层(图 3C)的沉积序列组成, 粒度整体上向上变细, 砂岩比例增加, 砾岩层与砂岩层厚度比 3:1。厚层、块状的砾岩表明为快速堆积下的冲积扇扇根沉积; 砂砾岩互层、每个沉积序列为砾岩-砂岩组合特征、砂岩比例增加以及砂岩层内发育大量的平行层理表明水动力条件较强并

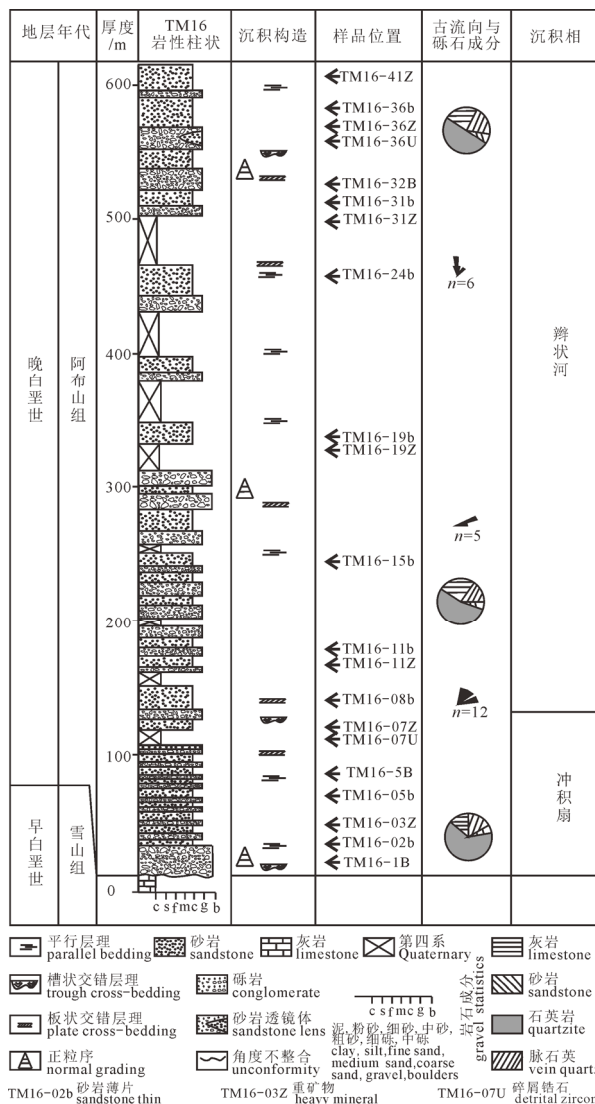


图 2 托纳木地区阿布山组 TM16 剖面综合柱状图
Fig. 2 Comprehensive columnar section of TM16 profile of Abushan Formation in Tonamu area

且稳定, 代表了冲积扇扇中环境的辫状河道沉积。

上段厚度约 540 m, 由紫红色砾岩、砂岩组成, 砾岩层与砂岩层厚度比 2:3, 底部为中砾岩, 向上变为细砾岩为主, 砾石成分主要为灰岩、砂岩、粉砂岩、脉石英、石英岩, 偶含泥砾(图 3F)。砂岩主要为紫红色岩屑砂岩, 含部分灰绿色岩屑石英砂岩, 在砂岩层的顶部发育薄层粉砂岩, 厚度 0.2~0.6 m 之间, 其中岩屑石英砂岩发育在该段的中部, 岩屑砂岩在整段均有发育。砂岩层单层厚度较下段变厚, 通常为 2~4~5 m 厚, 砾岩层变薄。砂岩层发育槽状交错层理、板状交错层理、平行层理。垂向上由多个砂砾岩互层的沉积序列组成(图 3E), 粒度整体上先变细再变粗。综合岩性、粒度、沉积构造、砾砂比例和垂向序列等特征, 本研究认为该段主要发育辫状河环境, 砂岩层顶部的薄层粉砂岩可能为河漫沉积的产物。紫红色砾岩到紫红色岩屑砂岩再到灰绿色岩屑石英砂岩的岩石组合类型以及粗-细-粗的

粒度变化,表明研究区阿布山组由水动力变化较快、沉积物快速堆积的冲积扇环境向水动力条件较强且逐渐稳定的辫状河环境再到水动力条件强且稳定的辫状河环境过度,同时也体现该时期构造活动由强烈到趋于稳定状态变化的变化过程。研究区阿布山组与笙根地区、双湖地区阿布山组(金纬,2007)对比缺失顶部湖泊环境(图4)。

3 物源区分析方法及结果

3.1 砾石成分分析

砾石内砾石成分是确定物源区的最直接证据。对研究剖面自下而上3个砾石统计点(图2)进行砾石成分统计,每个统计点统计在1 m×1 m范围内随机统计100颗砾石。砾石成分主要为脉石英、砂岩、石英岩、灰岩,其中脉石英占64%、石英岩17%、砂岩14%、灰岩5%,整个剖面砾石成分没有变化,含量略微不同(表1)。此外在剖面的中上部砾岩层还

发育了分选、磨圆较差的泥砾,是同期洪泛沉积的细粒物质固结不久后,受河道迁移影响,被水流破坏再沉积形成的。

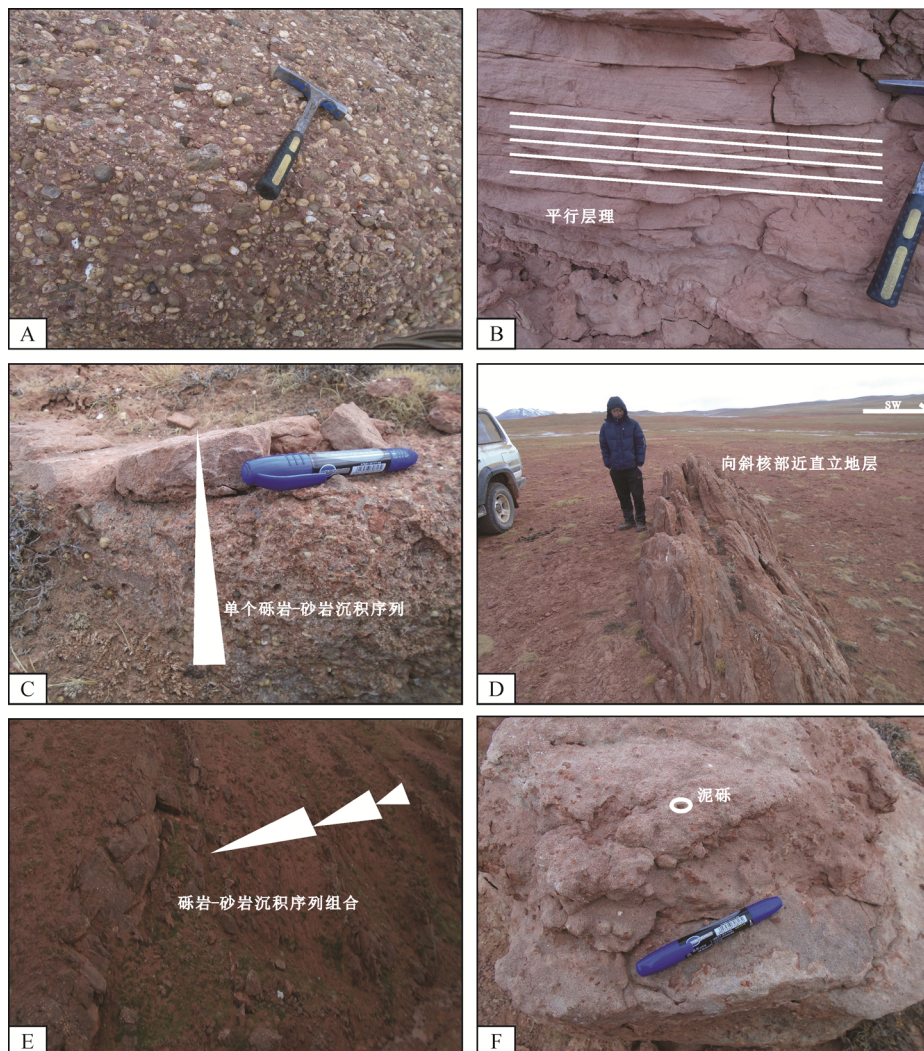
3.2 古水流分析

古水流原始数据是通过砂岩交错层理、地层产状的测量获得,通过Stereonet软件(Allmendinger et al., 2011; Cardozo and Allmendinger, 2013)校正而获得最终结果。采集数据的位置地层无倒转。

表1 羌塘盆地托纳木地区阿布山组砾岩层内砾石成分统计结果

Table 1 Statistics of gravel composition in conglomerate beds of Abushan Formation in Tonamu area, Qiangtang Basin

采样位置	编号	灰岩/个	砂岩/个	脉石英/个	石英岩/个
底部	TM16-1B	5	13	67	15
下部	TM16-2B	8	19	53	20
上部	TM16-3B	2	10	72	16



A—底部砾岩; B—P平行层理; C—下段砂砾岩沉积序列; D—剖面顶部向斜核部近直立地层; E—上段砂砾岩沉积序列组合; F—泥砾。
A—bottom conglomerate; B—channel migration; C—sedimentary sequence of sandstone conglomerate in the lower section; D—near-vertical strata at the synclinal core of the top section; E—upper member of the conglomerate sedimentary sequence combination; F—boulder clay.

图3 托纳木地区阿布山组 TM16 剖面砂岩照片

Fig. 3 Sandstone photo of TM16 section of Abushan Formation in Tuonamu area

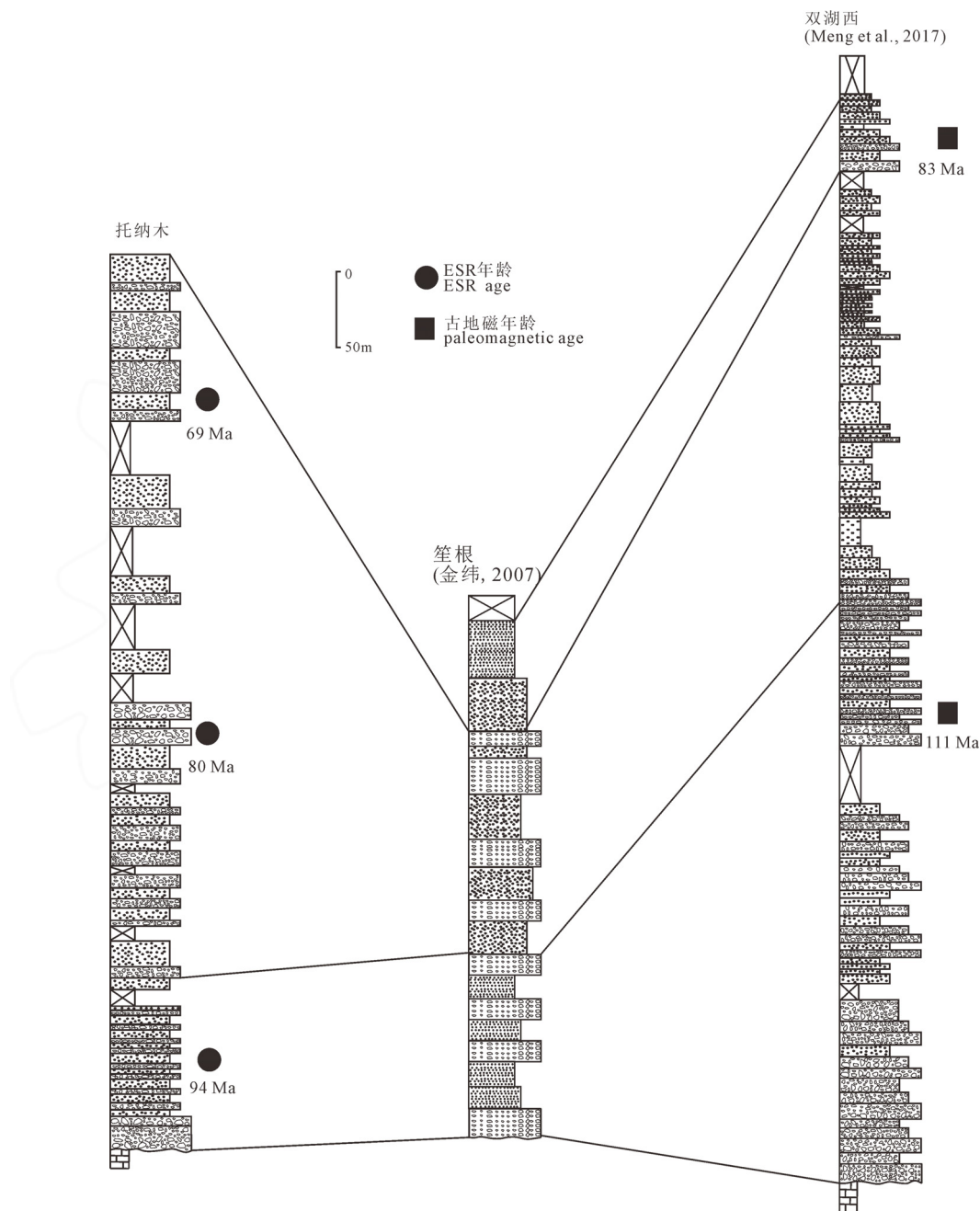


图 4 羌塘盆地双湖—托纳木地区阿布山组地层对比(图例同图 2)

Fig. 4 Stratigraphic correlation of Abushan Formation in Shuanghu–Tonamu area, Qiangtang Basin (legends are same as Fig. 2)

自下而上测量收集 3 个古水流数据点(图 2), 18 组数据, 古水流方向变化区间为 $300^{\circ}\sim 75^{\circ}$, 优势古水流方向为北东方向, 说明物源区来自盆地西南方向。

3.3 砂岩岩石学分析

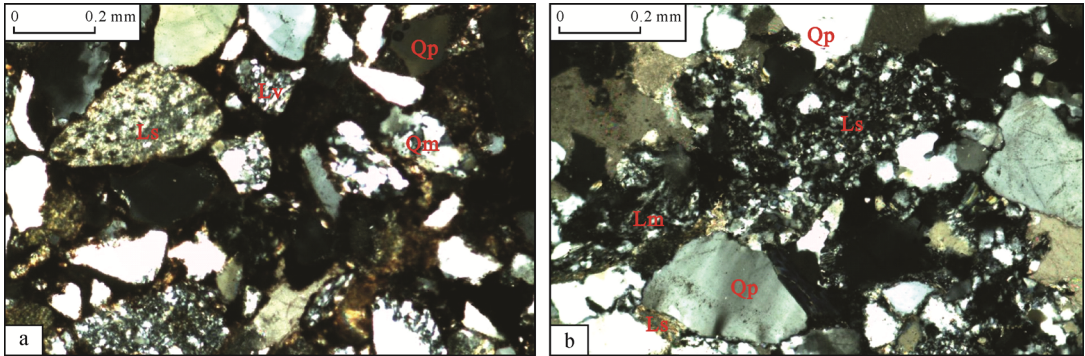
砂岩碎屑组分不仅反映了母岩的性质, 也反映了大地构造的条件(王成善和李祥辉, 2003)。采用最常见的 Gazzi-Dickinson 法进行砂岩的碎屑颗粒统计(表 2)并进行投图(Dickinson, 1985; Ingersoll et al., 1985), 绘制 Qt-F-L、Qm-FLt、Qp-Lv-Ls 和 Qm-P-K 等四个三角图解。托纳木地区砂岩碎屑成分(表 3)以石英和岩屑为主, 石英主要为单晶石英, 部分单晶石英具波状消光, 含少量多晶石英, 其中多晶石英主要为脉石英、燧石、石英岩, 岩屑以火山岩为

主, 其次为沉积岩、变质岩(图 5)。砂岩碎屑颗粒分选中等-较差, 棱角状-次圆状, 钙质胶结为主。该剖面砂岩碎屑组分统计结果显示为 $Qt:F:L=2138:148:1532$ 和 $Qm:F:Lt=1679:148:1991$ 。在 QtFL 图解中, 9 件样品均落入再旋回造山带中(图 2),

表 2 砂岩颗粒统计分类			
Table 2 Statistical classification of sandstone particles			
代号	定义	代号	定义
Qm	单晶石英	K	碱性长石
Qp	多晶石英(包括燧石)	Qt	石英总量($Qt=Qm+Qp$)
Lv	火山/变火山岩屑	F	长石($F=P+K$)
Ls	沉积/变沉积岩屑	L	不稳定岩屑($L=Lv+Ls$)
P	斜长石	Lt	岩屑总量($Lt=L+Qp$)

表 3 羌塘盆地阿布山组砂岩碎屑统计结果
Table 3 Statistics of sandstone detritus of Abushan Formation in Qiangtang Basin

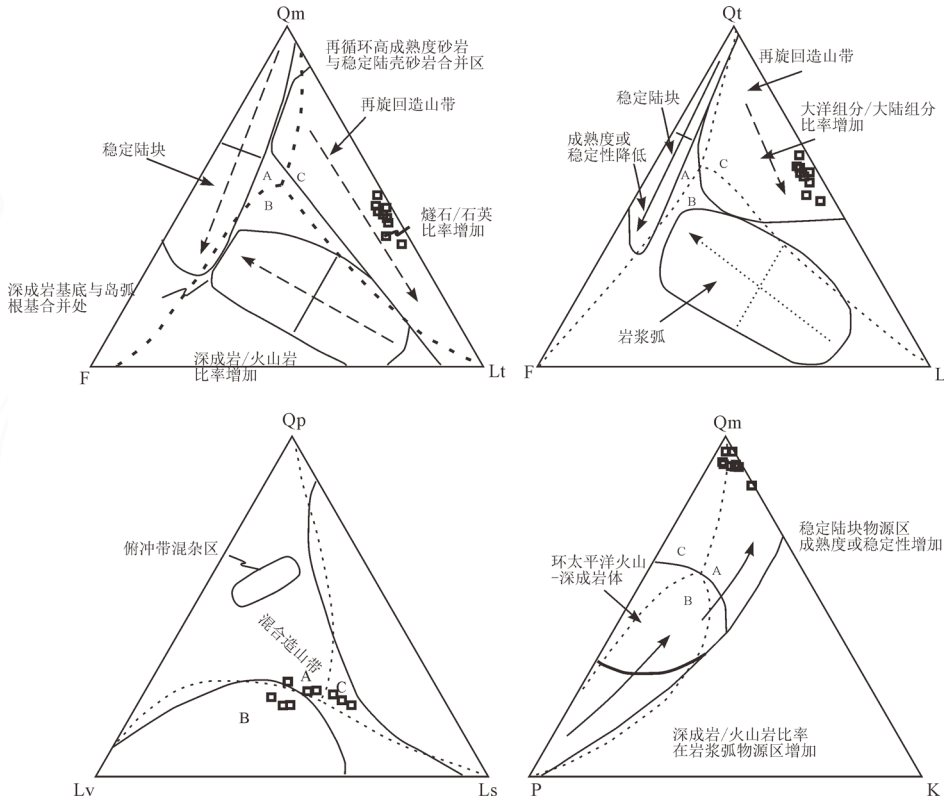
剖面	样品号	岩性	Qm	Qp	Qt	K	P	F	Lv	Ls	Lt
TM16	TM16-02	岩屑砂岩	151	53	204	12	3	15	58	142	253
	TM16-05	岩屑砂岩	168	54	222	5	10	15	69	74	197
	TM16-08	岩屑砂岩	142	46	188	22	2	24	50	110	206
	TM16-11	岩屑砂岩	183	58	241	13	4	17	69	105	232
	TM16-15	岩屑石英砂岩	218	53	271	13	8	21	57	112	222
	TM16-19	岩屑石英砂岩	202	51	253	14	6	20	93	79	223
	TM16-24	岩屑砂岩	192	43	235	4	5	9	81	86	210
	TM16-31	岩屑砂岩	191	48	239	5	11	16	93	92	233
	TM16-36	岩屑砂岩	232	53	285	8	3	11	69	95	217



a—岩屑砂岩; b—岩屑石英砂岩。
a—lithic sandstone; b—lithic quartz sandstone.

图 5 托纳木地区阿布山组砂岩显微照片

Fig. 5 Microphotograph of the Abushan Formation in Tuonamu area



A—稳定克拉通; B—岩浆岩物源区; C—再旋回造山带。

A—stable craton; B—source area of magmatic rocks; C—cyclic orogenic belt.

图 6 羌塘盆地托纳木地区阿布山组砂岩碎屑统计三角图解(底图据 Dickinson, 1985)

Fig. 6 Statistical triangular diagram of sandstone detritus of Abshan Formation in Tuonamu area, Qiangtang Basin (after Dickinson, 1985)

表 4 重矿物相关指数描述
Table 4 Heavy mineral correlation index description

指数	重矿物组合	重矿物指数
ATi	磷灰石-电气石	$100 \times \text{磷灰石} / (\text{磷灰石} + \text{电气石})$
GZi	石榴石-锆石	$100 \times \text{石榴石} / (\text{石榴石} + \text{锆石})$
MZi	独居石-锆石	$100 \times \text{独居石} / (\text{独居石} + \text{锆石})$
RuZi	金红石-锆石	$100 \times \text{金红石} / (\text{金红石} + \text{锆石})$
ZTR	锆石-电气石-金红石	$\text{锆石} + \text{电气石} + \text{金红石}$

Qm:F:Lt 三角图解样品均落入再旋回造山带中,
Qm:P:K 三角图解表明样品来自大陆块物源区,
Qp:Lv:Ls 三角图解样品表明物源为混合造山带(图 6)。

3.4 砂岩重矿物分析方法及结果

重矿物组合与指数是物源变化极为敏感的指

示剂, 利用重矿物组合稳定性、空间分布等特点可以判断物源区的母岩类型与来源方向(Morton and Hallsworth, 1994, 2007; 王成善和李祥辉, 2003)。重矿物指数的计算根据 Morton and Hallsworth(1994)的定义进行统计计算(表 4)。ZTR 指数能够在一定程度上反映碎屑物质的搬运距离, 通常用来判断沉积区域与源区的距离; ATi 指数常用来指示物源区中的火山岩及风化程度; GZi 和 MZi 指数常用来讨论物源区深成岩的比例(曾庆高等, 2009)。

TM16 剖面 7 件样品均含锆石、金红石、电气石、磷灰石、石榴子石、锐钛矿、白钛石, 4 件样品含有辉石, 1 件样品(TM16-11)含尖晶石, 其中锆石、石榴子石含量最高, 锆石以滚圆次滚圆粒状为主,

表 5 羌塘盆地托纳木地区阿布山组重矿物百分含量与重矿物指数
Table 5 Percentage content and index of heavy minerals of Abushan Formation in Tonamu area, Qiangtang Basin

层位	锆石	金红石	电气石	磷灰石	石榴子石	锐钛矿	白钛石	辉石	铬尖晶石	磁铁矿	ZTR	Rzi	Gzi	Ati
TM16-03	50.5	6.4	3.5	5.4	29.8	0.4	3.3	0.6	0.0	0.0	62.6	11.3	37.1	60.7
TM16-07	41.3	4.7	6.5	4.5	39.0	0.2	3.6	0.0	0.0	0.0	54.6	10.2	48.5	41.1
TM16-11	25.3	3.5	2.3	3.6	49.2	1.4	6.6	1.9	5.8	0.0	33.4	12.1	65.9	60.8
TM16-19	23.8	2.7	4.0	1.9	53.8	1.7	1.8	2.0	0.0	1.6	31.6	10.1	69.3	32.6
TM16-31	51.5	5.6	4.8	0.2	26.4	1.9	7.3	0.0	0.0	2.3	68.5	9.9	33.9	4.6
TM16-36	8.9	1.9	1.0	1.0	78.0	0.2	1.7	0.0	0.0	2.4	12.3	17.6	89.8	51.2
TM16-41	34.3	3.9	6.4	2.1	44.9	1.3	2.9	4.3	0.0	0.0	45.9	10.2	56.7	24.7

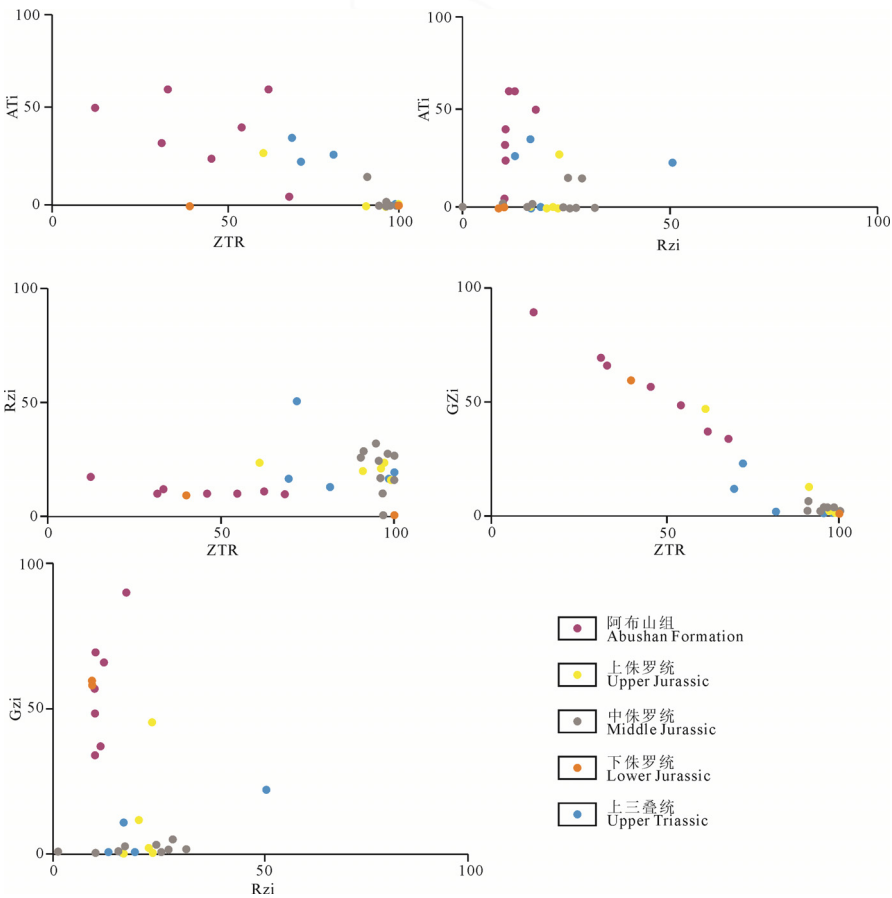


图 7 羌塘盆地托纳木地区阿布山组与潜在源区重矿物指数对比(潜在源区数据来自 Zhang et al., 2006)
Fig. 7 Comparison of heavy mineral indexes between Abushan Formation and potential source area in Tonamu area, Qiangtang Basin (data of potential sources after Zhang et al., 2006)

棱角次棱角柱状次之,石榴子石为粒状(表 5)。TM16 剖面重矿物指数, MZi 指数为 0, ZTR 指数平均为 36.6, 最小为 7.9, 最大为 57.8。ATi 指数平均为 39.4, 最小为 4.6, 最大为 60.8。GZi 指数平均为 57.3, 最小为 33.9, 最大为 69.3。RZi 指数平均为 11.6, 最小为 9.9, 最大为 17.6。此外, 该剖面样品 TM16-11 含尖晶石, 含量为 5.8%(图 7)。

3.5 碎屑锆石 U-Pb 年代学

本研究采集 2 件碎屑锆石样品, 分别位于剖面下、上部, LA-ICP-MS 定年, 碎屑锆石 U-Pb 年代学和微量元素含量分析测试工作在中国科学院青藏高原研究所大陆碰撞与高原隆升重点实验室激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)上完成, 碎屑锆石 U-Pb 年龄结果见附表 1。样品 TM16-07 位于剖面下部, 测试 80 点, 最年轻锆石(154 ± 2 Ma, 206–253 Ma 锆石区间(8 个, 10%), 356–538 Ma 锆石区间(7 个, 10%), 545–984 Ma 锆石区间(34 个, 42.5%), 1008–1537 Ma 锆石区间(12 个, 15%), 1692–248 Ma 锆石区间(10 个, 12.5%), 2518–3417 Ma 锆石区间(7 个, 8.8%)。样品 TM16-36 位于剖面上部, 测试 80 点, 154–156 Ma 锆石区间(3 个, 3.8%), 208–223 Ma 锆石区间(5 个, 6.3%), 271–284 Ma 锆石区间(3 个, 3.8%), 338–51 Ma 锆石区间(7 个, 8.8%), 549–999 Ma 锆石区间(41 个, 51.3%), 1088–1370 Ma 锆石区间(3 个, 3.8%), 1730–2471 Ma 锆石区间(7 个, 8.8%), 2562–3559 Ma 锆石区间(11 个, 13.8%)。

4 讨论

4.1 地层沉积时代

北羌塘坳陷托纳木地区红层砂岩中 3 件样品的 ESR 年龄值分别为 69 Ma、80.4 Ma 和 94.9 Ma 均为晚白垩世年龄范围(金纬, 2007; 李亚林, 2011)。盆地沉降埋藏史研究表明托纳木地区在 100–70 Ma 之间处于沉降埋深阶段(Zhang et al., 2019), 阿布山组在此背景下沉积, 并且, 沉降时间与 ESR 测年所限定的地层时代也较为一致。上述分析表明托纳木地区阿布山组(TM16 剖面)为晚白垩世沉积。

该套红层被部分学者划归为新生代喷纳湖组(赵珍等, 2020), 但是, 钱信禹(2020)对北羌塘半岛湖地区喷纳湖组碎屑锆石 U-Pb 年龄研究结果表明该区含 107 Ma、62 Ma、60 Ma 碎屑锆石年龄(钱信禹, 2020), 托纳木地区红层最年轻碎屑锆石 U-Pb 年龄为 154 Ma, 从碎屑锆石年龄数据对比来看本研究地层与喷纳湖组存在一定差别。本研究地层沉积环境与喷纳湖组(吴珍汉等, 2007)相比缺少湖相碳酸盐岩沉积。喷纳湖组与阿布山组相比, 变形程度较

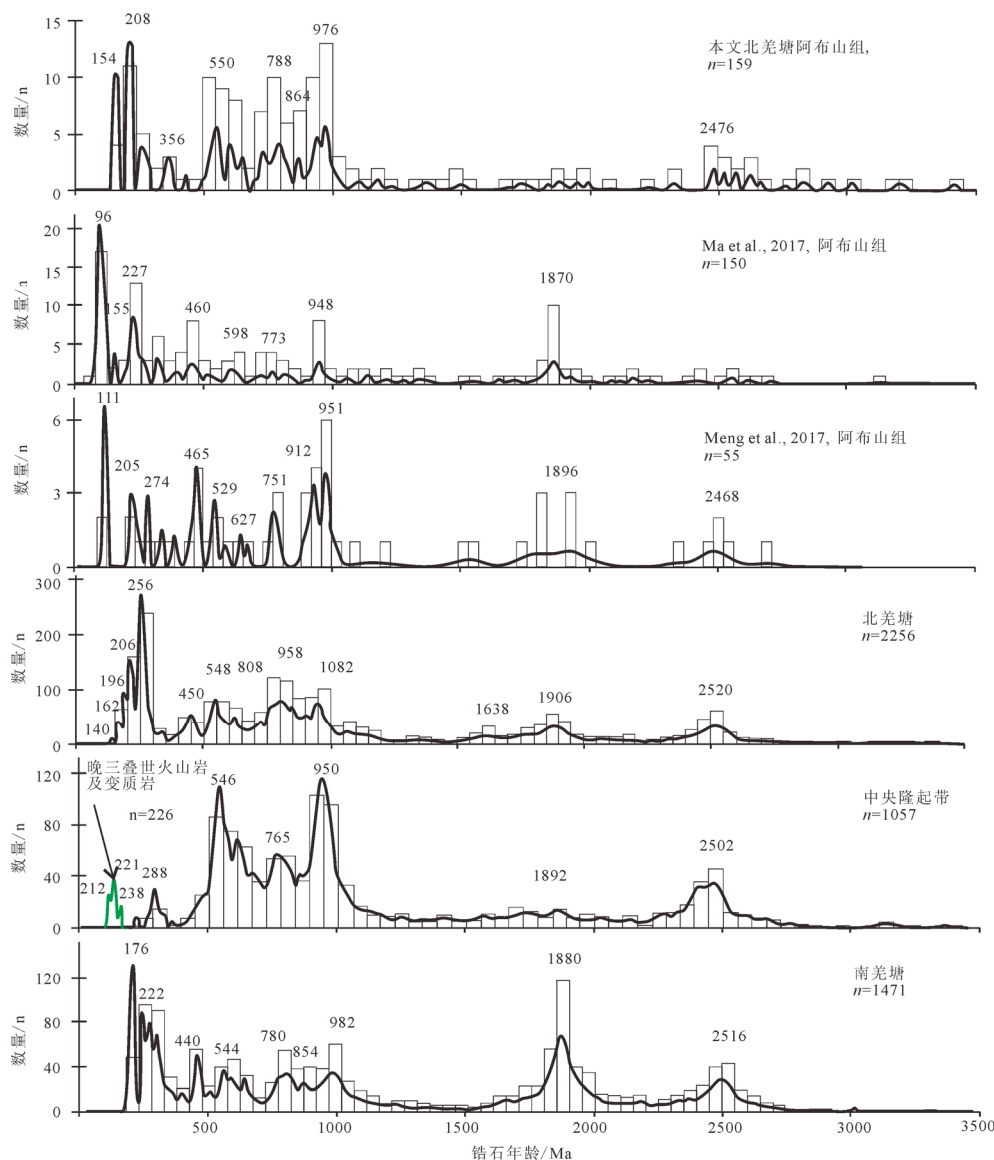
弱(岳龙等, 2006), 研究区地层顶部出现向斜构造(图 3D), 说明该地层受到后期的挤压作用, 构造变形较强。碎屑锆石 U-Pb 年龄、构造变形、沉积环境均表明本研究地层与新生代喷纳湖组存在一定差别。

4.2 物源分析

研究区阿布山组古流向变化区间 300° – 75° , 并且以 0° – 75° 为主(图 2), 表明物源主要来自研究区的西南方向。碎屑岩组分统计结果显示阿布山组砂岩以岩屑砂岩为主含, 少量岩屑石英砂岩, 石英颗粒以单晶石英为主, 岩屑主要为火山岩、变质岩岩屑, 其次为沉积岩岩屑, 碎屑成分很可能来自下伏沉积地层以及中央隆起带变质岩(Zhang et al., 2006)。砂岩颗粒以次棱角状为主, 其次为次圆状, 分选较差, 结构成熟度较低, 以上均表明碎屑颗粒经历了中近距离的搬运, 这与砂岩碎屑组分三角图解表明物源主要为再旋回造山带大陆物源一致。

研究区邻近的西南方向筓根地区以及双湖西地区同期沉积的地层内砾石成分以脉石英、变质石英岩、花岗岩、片岩、片麻岩、火山岩、灰岩、粉砂岩为主(金纬, 2007), 而本研究阿布山组砾石成分缺少中央隆起带内的花岗岩、片岩、火山岩等特征岩性, 并且研究区阿布山组古水流表明物源来自其西南方向, 但是与其邻近的西南方向同期沉积的砾石成分却差别如此之大, 以上说明中央隆起带未对研究区提供直接的物源, 侧面反映出两者之间可能有断层存在, 该断层阻碍中央隆起带为研究区阿布山组直接提供物源。

从重矿物组合及各种相关指数的构成特征来看, 北羌塘托纳木地区阿布山组物源存在多种成因的岩石类型, 但含量有差别, 以沉积岩、变质岩(角闪岩或麻粒岩)为主, 含部分火山岩(基性-超基性岩)。MZi 指数为 0 表明, 该地区无酸性深成侵入岩的物源。ATi 指数的变化几乎不影响 RZi 指数的变化, RZi 指数在整个剖面较为稳定, 说明该地区具稳定的酸性岩浆岩或者沉积岩源区的输入。通常碎屑岩中的铬尖晶石的存在表明含有基性-超基性火山岩源区的输入, 对于本文, 母岩可能为中央隆起带内蛇绿岩(Zhang et al., 2016), 但是考虑到北羌塘中生代砂岩中也存在大量铬尖晶石重矿物(Zhang et al., 2006), 单一的重矿物也无法区别是单一来源还是两者都有; ATi-ZTR、ATi-RZi 重矿物指数图解表明研究区阿布山组与北羌塘晚三叠世地层具类似的变化趋势(图 7), RZi-ZTR、GZi-ZTR 以及 GZi-RZi 重矿物指数图解表明阿布山组与北羌塘晚三叠世地层具类似的变化趋势(图 7), 重矿物指数对比表明阿布山组物源更可能来自北羌塘内下伏沉积地层。



碎屑锆石数据来源: 北羌塘拗陷(Gehrels et al., 2011; Wang et al., 2018; Zhang et al., 2019; 钱信禹, 2020); 中央隆起带(Dong et al., 2011; Pullen et al., 2011; Zhao et al., 2014; Fan et al., 2016); 南羌塘拗陷(Gehrels et al., 2011; Ma et al., 2017, 2018); 中央隆起带岩浆岩、变质岩(Pullen et al., 2011; Zhai et al., 2013)。

Detrital zircon data source: North Qiangtang Depression (Gehrels et al., 2011; Wang et al., 2018; Zhang et al., 2019; QIAN, 2020); Central Uplift Belt (Dong et al., 2011; Pullen et al., 2011; Zhao et al., 2014; Fan et al., 2016); South Qiangtang Depression (Gehrels et al., 2011; Ma et al., 2017, 2018); magmatic rocks and metamorphic rocks in the Central Uplift Zone (Pullen et al., 2011; Zhai et al., 2013).

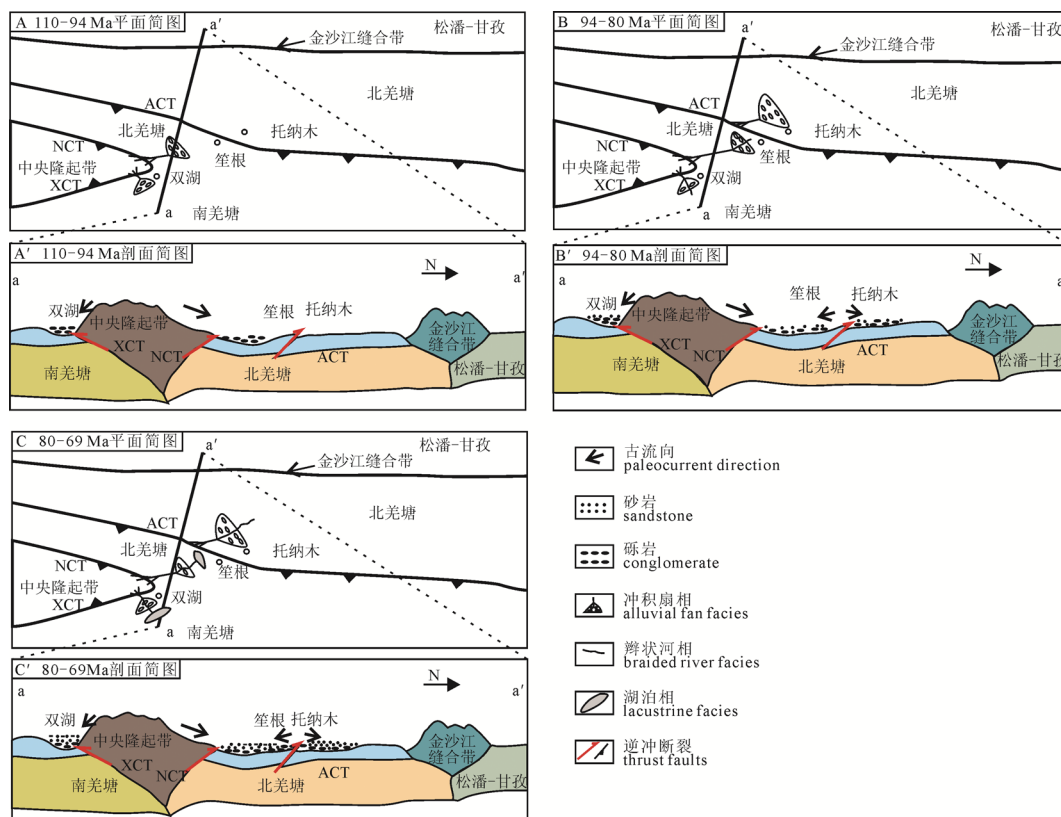
图8 羌塘盆地托纳木地区阿布山组锆石 U-Pb 年龄与潜在物源区对比

Fig. 8 Comparison of zircon U-Pb ages and potential provenance of the Abshan Formation in Tuonamu area, Qiangtang Basin

托纳木地区阿布山组 2 件碎屑锆石 U-Pb 年龄均以前寒武纪年龄为主, 其中以新元古代的锆石年龄(544 Ma–1.0 Ga)所占比例最高, 其次为中—古元古代; 总体来看, 研究区阿布山组两件样品具 154 Ma、208 Ma、356 Ma、550 Ma、790 Ma、976 Ma、2480 Ma 峰值(图 8)。北羌塘碎屑锆石年龄谱图与本研究阿布山组碎屑锆石 U-Pb 年龄峰值接近一一对应(图 8)。此外, 208 Ma 峰值年龄与北羌塘内那底冈日组火山岩年龄(205–223 Ma)较为一致(图 8)。对比中央隆起带碎屑锆石年龄谱图、高压变质岩以及火山岩 U-Pb 年龄, 中央隆起带缺失 154 Ma 典型峰值, 其余峰值年龄较为一致(图 8)。对比南羌塘碎屑锆石

年龄谱图(图 8), 南羌塘缺失 154 Ma 典型峰值年龄, 本研究阿布山组缺失南羌塘 1880 Ma 典型峰值年龄, 其余峰值年龄较为一致, 考虑到古水流反映的物源来自西南方向, 而其西南方向的中央隆起带在 90–55 Ma 之间处于快速隆升剥露阶段(Qian et al., 2020), 因此南羌塘碎屑物质不可能为研究区提供物源。此外, 本研究阿布山组碎屑锆石 U-Pb 年龄与南羌塘双湖西(Meng et al., 2017)以及毕洛错地区(Ma et al., 2017)(图 8)相比, 缺少白垩纪年龄, 表明南、北羌塘阿布山组物源区存在一定的差异性。

综上, 本文认为研究区物源来自盆地内西南方



ACT—阿木错逆冲断层; NCT—中央隆起带北缘逆冲断层; XCT—肖茶卡—双湖逆冲断层。

ACT—Amco thrust fault; NCT—thrust fault on the northern margin of the central uplift zone; XCT—Xiaochaka—Shuanghu thrust fault.

图9 双湖—托纳木地区阿布山组沉积演化模式图

Fig. 9 Sedimentary evolution model of Abushan Formation in Shuanghu-Tonamu area

向下伏沉积、晚三叠世那底冈日组火山岩以及盆地基底。

4.3 构造意义

羌塘盆地晚白垩世阿布山组内高钾钙碱性特征的火山岩成因被解释为班公湖—怒江洋壳的板片脱离(100–95 Ma)(Li et al., 2015b; Liu et al., 2017; He et al., 2018)以及羌塘—拉萨碰撞后岩石圈拆沉作用(80–75 Ma)(白志达等, 2009; Li et al., 2013; Chen et al., 2017)所导致的。研究区内构造热年代学数据表明, 在 110–80 Ma 存在一期快速抬升冷却事件, 并将其解释为羌塘—拉萨碰撞造山作用的结果(王立成和魏玉帅, 2013; Zhang et al., 2019), 表明晚白垩世阿布山组沉积于羌塘—拉萨碰撞造山背景之下。

研究区阿布山组与其西南侧笙根地区以及双湖地区阿布山组之间的物源区差异, 表明研究区与后两者之间很可能存在断层活动, 并阻碍中央隆起带直接向研究区提供物源, 考虑到托纳木地区与双湖、笙根地区之间发育阿木错逆冲断层(ACT)(吴珍汉等, 2014, 2016; 赵珍等, 2020)。在中央隆起带, 已发表的热年代学数据表明该区域初始冷却发生于($\sim 150 \pm 10$) Ma, 快速冷却发生在 120–70 Ma(Zhao et al., 2017); 而北羌塘南部托纳木地区在 110–80 Ma 发生快速冷却剥露(王立成和魏玉帅, 2013)。

以上表明, 区域上羌塘地体从中央隆起带到北羌塘逐渐冷却的趋势。物源区分析表明北羌塘笙根地区(金伟, 2007)、南羌塘双湖西地区阿布山组(111–83 Ma)(Meng et al., 2017)的物源来自中央隆起带, 而托纳木地区物源来自其西南方向的盆地内部, 并且托纳木地区阿布山组沉积时间晚于中央隆起带附近红层沉积, 这一事实也为羌塘地体从中央隆起带到北羌塘逐渐冷却的特点提供证据。因此, 本文认为区域上是自南向北活动的逆冲断层控制北羌塘南部的阿布山组沉积。低温热年代学数据表明 80 Ma 以后研究区处于冷却剥露停滞状态, 构造环境稳定(王立成和魏玉帅, 2013; Zhang et al., 2019), 表明阿木错逆冲断层在 80 Ma 以后不再活动, 但是通过物源区分析, 研究区西南方向的隆起区仍旧阻挡中央隆起带向托纳木地区提供物源。阿木错逆冲断层被认为最早活动于古近纪, 但是该断层活动时代是通过上下地层时代来限定的(吴珍汉等, 2014; 赵珍等, 2020), 本文将该套地层厘定为晚白垩世阿布山组而不是新生代纳纳湖组, 因此, 本文认为阿木错逆冲断层活动于晚白垩世。

综合研究区及邻区阿布山组沉积时限、沉积环境、物源区分析结果以及低温热年代学结果, 本文认为晚白垩世存在三个演化阶段(图 9): 在 100–

94 Ma 之间, 托纳木地区处于快速隆升剥露阶段, 地表无沉积记录, 但是在中央隆起带南北两侧(双湖、笙根地区)存在粗碎屑砾岩沉积(图 9A, A'); 在 94–80 Ma 之间, 研究区仍旧处于快速抬升冷却状态, 但是相对阶段—冷却抬升作用减弱, 研究区开始接受来自其西南方向的物源, 沉积了以砾岩为主的粗碎屑物质, 对应于本研究阿布山组下部的冲积扇环境(图 9B, B'); 在 80–69 Ma 之间, 研究区冷却抬升处于停滞状态, 构造环境较为稳定, 依旧接受来自其西南方向的物源, 沉积了以砂岩为主的相对细粒的物质, 对应于本研究阿布山组中上部的辫状河环境(图 9C, C')。

5 结论

通过对托纳木地区晚白垩世阿布山组进行沉积环境、物源区分析以及与邻区对比分析, 本文得到以下结论: 北羌塘托纳木地区晚白垩世阿布山组形成于冲积扇-辫状河环境, 物源区来自其西南方向的北羌塘内下伏沉积地层及晚三叠世那底冈日组火山岩和基底岩系, 其沉积过程受到晚白垩世活动断层阿木错逆冲带控制。北羌塘托纳木地区白垩纪以来经历了快速隆升剥露阶段(100–94.9 Ma), 无沉积记录; 在 94.9–80 Ma 之间, 冷却抬升作用减弱, 开始接受来自其西南方向的物源, 形成阿布山组下部的冲积扇环境以砾岩为主的粗碎屑物质, 80–69 Ma 之间研究区冷却抬升处于停滞状态, 沉积了中上部的辫状河环境以砂岩为主的相对细粒沉积。

Acknowledgements:

This study was supported by Ministry of Science and Technology of the People's Republic of China (No. 2019QZKK0803), and National Key Research and Development Program of China (Nos. 2017YFC0601405 and 2018YFE0204204).

本文附有增强材料(附表 1), 请通过本文网络版阅读或下载。

参考文献:

- 白志达, 徐德斌, 陈梦军, 孙立新. 2009. 西藏安多地区粗面岩的特征及其锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. 地质通报, 28(9): 1229-1235.
- 曾庆高, 李祥辉, 夏斌, 徐文礼, 尼玛次仁, 普琼, 李君. 2009. 西藏仁布地区上三叠统重矿物组合与物源分析[J]. 地质通报, 28(01): 38-44.
- 付修根, 王剑, 陈文彬, 冯兴雷. 2010. 羌塘盆地那底冈日组火山岩地层时代及构造背景[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 37(6): 605-615.
- 黄继钧. 2001. 羌塘盆地基底构造特征[J]. 地质学报, 75(3):

333-337.

- 金伟. 2007. 青藏高原腹地晚白至-古近纪高原隆升的沉积响应与油气后期保存[D]. 成都: 成都理工大学.
- 李才, 翟庆国, 陈文, 董永胜, 于介江. 2007. 青藏高原龙木错-双湖板块缝合带闭合的年代学证据——来自果干加年山蛇绿岩与流纹岩 Ar-Ar 和 SHRIMP 年龄制约[J]. 岩石学报, 23(5): 911-918.
- 李学仁. 2019. 羌塘盆地那底冈日组火山-沉积岩石学特征及构造属性研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 李亚林. 2011. 羌塘盆地托纳木地区石油地质特征与资源潜力[M]. 北京: 地质出版社.
- 刘少峰, 张国伟. 2005. 盆山关系研究的基本思路、内容和方法[J]. 地学前缘, 12(03): 101-111.
- 潘桂棠, 王立全, 张万平, 王保弟. 2013. 青藏高原及邻区大地构造图及说明书[M]. 北京: 地质出版社: 207.
- 钱信禹. 2020. 北羌塘盆地与中央隆起带晚三叠世以来剥露历史的低温热年代学约束[D]. 北京: 中国地质大学.
- 王成善, 李祥辉. 2003. 沉积盆地分析原理与方法[M]. 北京: 高等教育出版社.
- 王剑, 付修根, 陈文西, 谭富文, 汪正江, 卓皆文. 2008. 北羌塘沃若山地区火山岩年代学及区域地球化学对比——对晚三叠世火山-沉积事件的启示[J]. 中国科学: 地球科学, 38(1): 35-45.
- 王立成, 魏玉帅. 2013. 西藏羌塘盆地白垩纪中期构造事件的磷灰石裂变径迹证据[J]. 岩石学报, 29(03): 1039-1047.
- 王志龙, 胡西冲, 石晓龙, 黄强太, 郑浩, 师胜梅. 2017. 西藏窝若巴勒-白龙地区阿布山组沉积岩石、地球化学特征及碎屑锆石对物源信息的指示意义[J]. 地质通报, 36(07): 1188-1203.
- 吴瑞忠, 胡承祖, 王成善, 张懋功, 高德荣, 兰伯龙, 张哨楠, 陈德全, 王全海. 1986. 藏北羌塘地区地层系统[C]//青藏高原地质文集. 北京: 地质出版社..
- 吴珍汉, 高锐, 卢占武, 叶培盛, 陆露, 殷裁云. 2014. 羌塘盆地结构构造与油气勘探方向[J]. 地质学报, 88(6): 1130-1144.
- 吴珍汉, 刘志伟, 赵珍, 季长军, 叶培盛. 2016. 羌塘盆地隆鄂尼—昂达尔错古油藏逆冲推覆构造隆升[J]. 地质学报, 90(4): 615-627.
- 吴珍汉, 宋洋, 赵珍. 2021. 北羌塘凹陷重力地震联合反演预测深部油藏[J]. 地球学报, 42(01): 1-8.
- 吴珍汉, 赵逊, 叶培盛, 吴中海, 胡道功, 周春景. 2007. 根据湖相沉积碳氧同位素估算青藏高原古海拔高度[J]. 地质学报, 81(9): 1277-1288.
- 西藏自治区地质矿产局. 1993. 西藏自治区区域地质[M]. 北京: 地质出版社: 195-224.
- 岳龙, 牟世勇, 曾昌兴, 易成兴. 2006. 藏北羌塘丁固-加措地区康托组的时代[J]. 地质通报, 25(1-2): 229-232.
- 赵珍, 吴珍汉, 杨易卓, 季长军. 2020. 羌塘中部陆相红层时代的 U-Pb 年龄约束[J]. 地质论评, 24(5): 249-263.
- 赵政璋, 李永铁, 叶和飞, 张景文. 2000. 青藏高原大地构造特征及盆地演化[M]. 北京: 科学技术出版社: 208-220.

References:

- ALLMENDINGER R W, CARDOZO N, FISHER D M. 2011. Structural geology algorithms: Vectors and tensors[M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- BAI Zhi-da, XU De-bin, CHEN Meng-jun, SUN Li-xin. 2009. Characteristics and zircon SHRIMP U-Pb dating of the Amdo trachyte, Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 28(9): 1229-1235(in Chinese with English abstract).
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Xizang Autonomous Region. 1993. Regional Geology of Xizang autonomous region[M]. Beijing: Geological Publishing House: 195-224(in Chinese).
- CARDOZO N, ALLMENDINGER R W. 2013. Spherical projections with OSXStereonet[J]. Computers & Geosciences, 51(1): 193-205.
- CHEN Sheng-sheng, FAN Wei-ming, SHI Ren-deng, GONG Xiao-han, WU Kang. 2017. Removal of deep lithosphere in ancient continental collisional orogens: A case study from central Tibet, China[J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 18(3): 1225-1243.
- DICKINSON W R. 1985. Interpreting Provenance Relations from Detrital Modes of Sandstones[C]//Provenance of Arenites: 333-361.
- DONG Chun-yan, LI Cai, WAN Yu-sheng, WANG Wei, WU Yan-wang, XIE Hang-qiang, LIU Duin-yi. 2011. Detrital zircon age model of Ordovician Wenquan quartzite south of Lungmuco-Shuanghu Suture in the Qiangtang area, Tibet: Constraint on tectonic affinity and source regions[J]. Science China-Earth Sciences, 54(7): 1034-1042.
- FAN Jian-jun, LI Cai, WANG Ming, XIE Chao-ming, XU Wei. 2016. Features, provenance, and tectonic significance of Carboniferous-Permian glacial marine diamictites in the Southern Qiangtang-Baoshan block, Tibetan Plateau[J]. Gondwana Research, 28(4): 1530-1542.
- FU Xiu-gen, WANG Jian, CHEN Wen-bin, FENG Xing-lei. 2010. Age and tectonic implications of the Late Triassic Nadi Kangri volcanic rocks in the Qiangtang basin, northern Tibet, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 37(6): 605-615(in Chinese with English abstract).
- GEHRELS G, KAPP P, DECELLES P, PULLEN A, BLAKEY R, WEISLOGEL A, DING L, GUYN J, MARTIN A, MCQUARRIE N. 2011. Detrital zircon geochronology of pre-Tertiary strata in the Tibetan-Himalayan orogen[J]. Tectonics, 30(5): TC5016.
- HE Hai-yang, LI Ya-lin, WANG Cheng-shan, ZHOU A, QIAN Xin-yu, ZHANG Jia-wei, DU Lin-tao, BI Wen-jun. 2018. Late Cretaceous (ca.95 Ma) magnesian andesites in the Biluoco area, southern Qiangtang subterranean, central Tibet: Petrogenetic and tectonic implications[J]. Lithos, 302-303: 389-404.
- HUANG Ji-jun. 2001. Structural characteristics of the basement of the QiangtangBasin[J]. Acta Geologica Sinica, 75(3): 333-337(in Chinese with English abstract).
- INGERSOLL R V, BULLARD T F, FORD R L, PICKLE J D. 1985. The effect of grain size on detrital modes: a test of the Gazzi-Dickinson point-counting method-reply[J]. Journal of Sedimentary Research, 54(1): 103-116.
- JIN Wei. 2007. Research on sedimentary response to uplifting of Tibetan plateau hinterland and oil-gas reservoir evolution during the Late Cretaceous-Paleogene period (Dissertation)[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese with English abstract).
- KAPP P, MURPHY M A, YIN A, HARRISON T M, DING L, GUO J. 2003. Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of the Shiquanhe area of western Tibet[J]. Tectonics, 22(4): 1029, doi: 10.1029/2001TC001332.
- KAPP P, YIN An, HARRISON T M, DING L. 2005. Cretaceous-Tertiary shortening, basin development, and volcanism in central Tibet[J]. Geological Society of America Bulletin, 117(7): 865-878.
- LI Cai, ZHAI Qing-guo, CHEN Wen, DONG Yong-sheng, YU Jie-jiang. 2007. Geochronology evidence of the closure of Longmu Co-Shuanghu suture, Qinghai-Tibet plateau: Ar-Ar and zircon SHRIMP geochronology from ophiolite and rhyolite in Guoganjianian[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(5): 911-918(in Chinese with English abstract).
- LI Guang-ming, LI Jin-xiang, ZHAO Jun-xing, QIN Ke-zhang, CAO Ming-jian, EVANS N J. 2015. Petrogenesis and tectonic setting of Triassic granitoids in the Qiangtang terrane, central Tibet: Evidence from U-Pb ages, petrochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 105: 443-455.
- LI Xue-ren. 2019. Volcanic-sedimentary petrological characteristics and tectonic attributions of nadigangri formation in qiangtang basin[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- LI Ya-lin, HE Juan, WANG Cheng-shan, HAN Zhong-peng, MA Peng-fei, XU Ming, DU Kai-yuan. 2015b. Cretaceous volcanic rocks in south Qiangtang Terrane: Products of northward subduction of the Bangong-Nujiang Ocean?[J]. Journal of Asia Earth Sciences, 104: 69-83..
- LI Ya-lin, HE Juan, WANG Cheng-shan, SANTOSH M, DAI Jin-gen, ZHANG Yu-xiu. 2013. Late Cretaceous K-rich magmatism in central Tibet: Evidence for early elevation of the Tibetan plateau?[J]. Lithos, 160: 1-13.
- LI Ya-lin, WANG Cheng-shan, DAI Jin-gen, XU Gan-qin, HOU Yun-ling, LI Xiao-han. 2015a. Propagation of the deformation and growth of the Tibetan-Himalayan orogen: A review[J]. Earth-Science Reviews, 143: 36-61.
- LI Ya-lin, WANG Cheng-shan. 2010. Tectonic event during Cretaceous in Qiangtang basin and its implications for hydrocarbon

- accumulation[J]. *Petroleum Science*, 7(4): 466-471.
- LI Ya-lin. 2011. *Petroleum geological characteristics and resource potential in Tonam area of Qiangtang Basin*[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- LIU De-liang, SHI Ren-deng, DING Lin, ZOU Hai-bo. 2017. Late Cretaceous transition from subduction to collision along the Bangong-Nujiang Tethys: New volcanic constraints from central Tibet[J]. *Lithos*, 296-299: 452-470.
- LIU Shao-feng, ZHANG Guo-wei. 2005. Fundamental ideas, contents and methods in study of basin and mountain relationship[J]. *Earth Science Frontiers*, 12(3): 101-111(in Chinese with English abstract).
- MA An-lin, HU Xiu-mian, GARZANTI E, HAN Zhong, LAI Wen. 2017. Sedimentary and tectonic evolution of the southern Qiangtang basin: Implications for the Lhasa-Qiangtang collision timing[J]. *Journal of Geophysical Research*, 123(9): 7338-7342.
- MA An-lin, HU Xiu-mian, PAUL K, HAN Zhong, LAI Wen, BOUDAGHER F M. 2018. The disappearance of a late jurassic remnant sea in the southern qiangtang block (shamuluo formation, najiangco area): implications for the tectonic uplift of central tibet[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 506: 30-47.
- MENG Jun, ZHAO Xi-xi, WANG Cheng-shan, LIU Hao, LI Ya-lin, HAN Zhong-peng, LIU Tao, WANG Meng. 2017. Palaeomagnetism and detrital zircon U-Pb geochronology of Cretaceous redbeds from central Tibet and tectonic implications[J]. *Geological Journal*, 53(5): 17715-17717.
- MORTON A C, HALLSWORTH C. 1994. Identifying Provenance-Specific Features of Detrital Heavy Mineral Assemblages in Sandstones[J]. *Sedimentary Geology*, 90(3-4): 241-256.
- MORTON A C, HALLSWORTH C. 2007. Stability of detrital heavy minerals during burial diagenesis[C]//MANGE M, WRIGHT D K (Eds.), *Heavy Minerals in Use. Developments in Sedimentology*, 58: 215-245.
- PAN Gui-tang, WANG Li-quan, ZHANG Wan-ping, WANG Bai-di. 2013. *Instructions for the tectonic map of the Tibet Plateau and its adjacent areas*[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- PULLEN A, KAPP P, GEHRELS G E, DING Lin, ZHANG Qi. 2011. Metamorphic rocks in central Tibet: Lateral variations and implications for crustal structure[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 123(3-4): 585-600.
- QIAN Xin-yu, LI Ya-lin, DAI Jin-gen, WANG Cheng-shan, HAN Zhong-peng, ZHANG Jia-wei, LI Han-ao. 2020. Apatite and zircon (U-Th)/He thermochronological evidence for Mesozoic exhumation of the Central Tibetan Mountain Range[J]. *Geological Journal*, 56(1): 599-611.
- QIAN Xin-yu. 2020. Low-temperature thermochronological constraints on the exhumation history of the North Qiangtang Basin and the central uplift since the Late Triassic[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- WANG Cheng-shan, LI Xiang-hui. 2003. *Sedimentary basin: From principles to analyses*[M]. Beijing: Higher Education Press(in Chinese).
- WANG Jian, FU Xiu-gen, CHEN Wen-xi, TAN Fu-wen, WANG Zheng-jiang, ZHUO Kai-wen. 2008. Chronology and geochemistry of the volcanic rocks in Woruomountain region, northern Qiangtang depression: implications to the Late Triassic volcanic-sedimentary events[J]. *Science in China: Series D*, 38(1): 33-43(in Chinese with English abstract).
- WANG Li-cheng, WEI Yu-shuai. 2013. Apatite fission track thermochronology evidence for the Mid-Cretaceous tectonic event in the Qiangtang Basin, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(3): 1039-1047(in Chinese with English abstract).
- WANG Zhi-long, HU Xi-chong, SHI Xiao-long, HUANG Qiang-tai, ZHENG Hao, SHI Sheng-mei. 2017. Sedimentary rocks and geochemical characteristics as well as detrital zircon of Abushan Formation in Woruobale and Bailong area, Tibet, and their indicating significance for provenance information[J]. *Geological Bulletin of China*, 36(07): 1188-1203(in Chinese with English abstract).
- WANG Zhong-wei, WANG Jian, FU Xiu-gen, FENG Xing-lei, WANG Dong, SONG Chun-yan, CHEN Wen-bin, ZENG Sheng-qiang, YU Fei. 2018. Provenance and tectonic setting of the Quemoco sandstones in the North Qiangtang Basin, North Tibet: Evidence from geochemistry and detrital zircon geochronology[J]. *Geological Journal*, 53(4): 1465-1481.
- WU Rui-zhong, HU Cheng-zu, WANG Cheng-shan, ZHANG Mao-gong, GAO De-rong, LAN Bo-rong, ZHANG Shao-nan, CHEN De-quan, WANG Quan-hai. 1986. *The stratigraphical system of Qiangtang district in Northern Xizang (Tibet)*[C]//*Contribution to the geology of the Qianghai-Xizang (Tibet) plateau*. Beijing: Geological Publishing House: 1-32(in Chinese).
- WU Zhen-han, BAROSH P J, YE Pei-sheng, HU Dao-gong. 2015. Late cretaceous tectonic framework of the tibetan plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 114(DEC.15PT.4): 693-703.
- WU Zhen-han, GAO Rui, LU Zhan-wu, YE Pei-sheng, LU Lu, YIN Cai-yun. 2014. structures of the qiangtang basin and its significance to oil gas exploration[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(6): 1130-1144(in Chinese with English abstract).
- WU Zhen-han, LIU Zhi-wei, ZHAO Zhen, JI Chang-jun, YE Pei-sheng. 2016. Thrust and Uplift of the Lung'erni Angdarco Paleo Oil Reservoirs in the Qiangtang Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 9 (4): 615-627(in Chinese with English abstract).
- WU Zhen-han, SONG Yang, ZHAO Zhen. 2021. Seismic-gravity Inverse Modeling and Deep Oil-reservoir Prediction of Northern Qiangtang Depression[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 42(01): 1-8(in Chinese with English abstract).

- WU Zhen-han, ZHAO Xun, YE Pei-sheng, WU Zhong-hai, HU Dao-gong, ZHOU Chun-jing. 2007. Paleo-elevation of the Tibetan Plateau inferred from carbon and oxygen isotopes of lacustrine deposits[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(9): 1277-1288(in Chinese with English abstract).
- YIN An, HARRISON T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(28): 211-280.
- YUE Long, MOU Shi-yong, ZENG Chang-xing, YI Cheng-xing. 2006. Age of the Kangtog Formation in the Dinggo-Gyaco area, Qiangtang, northern Tibet, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(1-2): 229-232(in Chinese with English abstract).
- ZENG Qing-gao, LI Xiang-hui, XIA Bin, XU Wen-li, NIMA Ci-ren, PU Qiong, LI Jun. 2009. Heavy mineral assemblages and provenance analysis of the Upper Triassic in Renbu area, southern Tibet[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(01): 38-44(in Chinese with English abstract).
- ZHAI Qing-guo, JAHN B M, WANG Jun, SU Li, MO Xuan-xue, WANG Kuo-lung, TANG Suo-han, LEE Hao-yang. 2013. The Carboniferous ophiolite in the middle of the Qiangtang terrane, Northern Tibet: SHRIMP U-Pb dating, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic characteristics[J]. *Lithos*, 168-169: 186-199.
- ZHANG Jia-wei, SINCLAIR H D, LI Ya-lin, WANG Cheng-shan, PERSANO C, QIAN Xin-yu, HAN Zhong-peng, YAO Xiang, DUAN Yao-yao. 2019. Subsidence and exhumation of the Mesozoic Qiangtang Basin: Implications for the growth of the Tibetan plateau[J]. *Basin Research*, 31(4): 754-781.
- ZHANG Kai-jun, ZHANG Yu-xiu, XIA Bang-dong, HE You-bin. 2006. Temporal Variations of Mesozoic Sandstone Compositions in the Qiangtang Block, Northern Tibet (China): Implications for Provenance and Tectonic Setting[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 8(12): 1035-1048.
- ZHANG Xiu-zheng, DONG Yong-sheng, WANG Qiang, DAN Wei, ZHANG Chun-fu, DENG Ming-rong, XU Wang, XIA Xiao-ping, ZENG Ji-peng, LIANG He. 2016. Carboniferous and Permian evolutionary records for the Paleo-Tethys Ocean constrained by newly discovered Xiangtaohu ophiolites from central Qiangtang, central Tibet[J]. *Tectonics*, 35(7): 1670-1686.
- ZHAO Zhen, WU Zhen-han, YANG Yi-zhuo, JI Chang-jun. 2020. Establishing the chronostratigraphic framework of the continental red beds in Central Qiangtang Basin: Constrained by zircon U-Pb ages[J]. *Geological Review*, 24(5): 249-263(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Zheng-zhang, LI Yong-tie, YE He-fei, ZHANG Jing-wen. 2000. Tectonic Characteristics and Basin Evolution of the Tibetan Plateau[M]. Beijing: Science & Technology Press: 208-220(in Chinese).
- ZHAO Zhong-bao, BONS P D, WANG Gen-hou, LIU Yan, ZHENG Yi-long. 2014. Origin and pre-Cenozoic evolution of the south Qiangtang basement, Central Tibet[J]. *Tectonophysics*, 623: 52-66.
- ZHAO Zhong-bao, BONS P D, STÜBNER K, WANG Gen-hou. 2017. Early Cretaceous exhumation of the Qiangtang Terrane during collision with the Lhasa Terrane, Central Tibet[J]. *Terra Nova*, 29: 382-391.