

doi:10.3799/dqkx.2010.089

# 札达盆地碎屑裂变径迹揭示的盆山耦合过程

孟艳宁<sup>1,2</sup>, 王国灿<sup>1,2\*</sup>, 张克信<sup>2,3</sup>, 王 岸<sup>1,2</sup>

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学生物与环境地质教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

**摘要:** 札达盆地是中新世 9.5 Ma 以来发育的新生代沉积盆地。沉积厚度、砾石成分和古流向分析显示札达盆地新生代沉积的物源主要来自盆地北部的阿伊拉日居山系。札达盆地系列样品碎屑锆石裂变径迹年龄结构显示存在两个明显的峰值年龄区间, 分别为 12.6~15.3 Ma(P1 峰值年龄)与 19.8~22.2 Ma(P2 峰值年龄)。锆石裂变径迹年龄的滞后时间(lag time)与沉积时代对比分析显示, P1 和 P2 峰值年龄为快速冷却事件的静态峰, 与北部阿伊拉日居地区基岩 U-Pb 年代研究揭示的热事件时间具有良好的可对比性。因此, 札达盆地碎屑裂变径迹年龄两个峰值年龄区间记录了源区阿伊拉日居的两次构造事件, 可能对应于喀喇昆仑断裂在中新世的两次强烈的构造活动。综合碎屑锆石、磷灰石裂变径迹年龄信息, 估算源区在 32.6~9.5 Ma 之间的平均冷却速率是 15.4 °C/Ma, 上新世末期—第四纪(3.6~1.4 Ma)之间再次发生了一次快速的隆升剥露事件。札达盆地新生代沉积地层碎屑裂变径迹热年代学结构与喀喇昆仑断裂东南段阿伊拉日居的热事件年龄格局吻合, 从碎屑裂变径迹年代学角度揭示了造山带地区的盆山耦合过程。

**关键词:** 札达盆地; 裂变径迹; 阿伊拉日居山; 喀喇昆仑断裂。

中图分类号: P542

文章编号: 1000-2383(2010)05-0747-12

收稿日期: 2010-05-31

## Coupling Process of Sedimentary Basin-Orogenic Belt Induced by Detrital Fission Track Ages of Zanda Basin

MENG Yan-ning<sup>1,2</sup>, WANG Guo-can<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Ke-xin<sup>2,3</sup>, WANG An<sup>1,2</sup>

1. State Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** Zanda basin, formed in 9.5 Ma, is a Cenozoic sedimentary basin which lies in the converging range between the Himalaya tectonic belt and Karakorum tectonic belt. The Neogene strata in the basin are integrated, continuous and horizontal, showing a steady tectonic condition since Miocene. Analysis of sedimentary section indicates that ancient flow direction is northwest to southeast, while the modern flow direction of river—Xiangquan River is southeast to northwest, opposite to the ancient flow direction. Analysis of sedimentary construction and the composition of gravel displays that the sedimentary source is Ayila Rijyu northwest of Zanda basin. P1, P2 peak ages of Zanda basin are 12.6—15.3 Ma and 19.8—22.2 Ma respectively, which is consistent with the thermal event age of Ayila Rijyu. P1, P2 are of static peak ages, reflecting the rapid cooling event such as normal faulting based on the DZFT research of lag time and depositional time by Bernet and Garver. It is found by thermal history analysis of zircon and apatite fission track that the cooling rate of source area is 15.4 °C/Ma at 32.6—9.5 Ma, and there was a rapid uplift and exhumation at the same time in the source region at 3.6—1.4 Ma reflected by zircon and apatite fission track ages. P1, P2 peak ages of modern river zircon samples of Karakurom belt are 10.5—10.8 Ma and 27.7—30.9 Ma respectively, showing the thermal events of Ayila Rijyu. Comparing the FT ages and depositional information of Zanda basin and orogenic belt, it is shown that Zanda basin is Cenozoic sedimentary basin determined by southeast of Karakorum fault; Zanda basin and Ayila Rijyu Mountain are a typical coupling process by identical FT thermochronology structure.

基金项目: 中国地质调查局项目(No. 1212010610103); 国家自然科学基金项目(Nos. 40902060, 40672137, 40921062).

作者简介: 孟艳宁(1984—), 女, 硕士, 主要从事构造地质学研究。\* 通讯作者: 王国灿, E-mail: wgcan@cug.edu.cn

**Key words:** Zanda basin; fission track; Ayila Rijyu Moutain; Karakorum fault.

## 0 引言

札达盆地位于青藏高原的西南隅,在南部的喜马拉雅山脉主脊和北部的阿伊拉日居山脉之间。札达盆地构造位置特殊,受“两体三带”(冈底斯地体、喜马拉雅地体、喀喇昆仑构造带、印度—雅江缝合带、藏南拆离系构造带)的发展演化影响。札达盆地东北向为阿伊拉日居山,阿伊拉日居山东北缘发育著名的北西向喀喇昆仑断裂。

对札达盆地的研究开始于 20 世纪 70 年代,先后有中国科学院青藏高原综考队、原地质部高原地质调查队、西藏地矿局和中国地质大学等专家学者(张青松等,1981;李炳元等,1983;钱方,1990,1999;郭铁鹰等,1991;夏代祥和刘世坤,1997;赵政章等,2001)对该地区进行了调查研究;河北地质调查研究院于 2002~2004 年对该区进行了 1:25 万区域地质调查<sup>①</sup>,对研究区的区域地层、构造、岩浆发育及演化历史作了全面系统阐述。2006 年前后发表了一系列有关札达盆地的研究成果(孟宪刚等,2004,2006;邵兆刚等,2005,2006;王津等,2006;朱大岗等,2006,2007),对研究区的地形地貌、沉积、构造、古生物、环境演化进行了描述,得出札达盆地与高喜马拉雅断块隆起存在盆—山耦合关系,藏南谷地基底断块的翘板式运动是形成盆地的主要控制因素。札达盆地上新世—早更新世的发展演化是多阶段的,表明喜马拉雅山的隆升是一个多阶段、不等速和非均变的复杂过程。4.4 Ma 象泉运动以后,札达盆地由河流相沉积向湖相沉积转变;新生代沉积地层中划分了两个角度不整合面,对应于盆地内两次新生代的构造运动。王世峰等(2008b)对札达盆地内新生代沉积给出了全面而系统的磁性地层学的时代约束,并探讨了盆地的控盆构造问题,揭示盆地内新生代地层的古地磁年龄为 9.5~2.6 Ma,且控盆构造为喀喇昆仑断裂。近年来围绕喀喇昆仑断裂也展开了一些专项研究,对与札达盆地发展关系密切的断裂东南端的构造变形、运动方式转换及岩浆热事件等的研究均取得了一系列成果(李海兵等,2006,2007; Franck *et al.*, 2008; Rolland *et al.*, 2009), Franck *et al.* (2008)通过对喀喇昆仑断裂西南部阿伊拉日居地区的 U-Pb 年代学研究揭示了该断裂新

生代的多期活动历史,即 35~32 Ma 古新世—渐新世的岩浆事件;25~22 Ma 渐新世—中新世的岩浆事件;22~14 Ma 中新世时期喀喇昆仑东南端剪切作用有关的热变质和流体交代的热事件;对喀喇昆仑东南段阿伊拉日居山地区同构造片麻岩—花岗岩的年代学研究认为喀喇昆仑断裂形成时代为 23~25 Ma,持续变形到约 12 Ma,之后阿伊拉日居山快速隆升(李海兵等,2006,2007)。上述已有磁性地层学和同构造年代学的研究表明,阿伊拉日居山的隆升剥蚀、岩浆活动与喀喇昆仑断裂的活动密切相关,因此,对阿伊拉日居山的隆升过程的限定将有助于分析喀喇昆仑断裂的活动历史。笔者在对札达盆地沉积充填特征研究的基础上,结合碎屑裂变径迹热年代学分析,揭示札达盆地的沉积充填演化与阿伊拉日居山的抬升剥露有关,从盆山耦合演化角度对阿伊拉日居山地区隆升剥露的热历史进行描述,进而探讨与喀喇昆仑断裂活动的关系。

## 1 地质背景

札达盆地是一个上叠于中生界印度板块北部被动陆缘碎屑沉积之上的新生代断陷盆地(图 1)。盆地呈 NW-SE 向延伸,长约 1 000 km,宽约 70 km,总面积为  $4 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,海拔在 4 000~4 500 m 之间,属高原地带。盆地的基底为侏罗系灰岩、砂岩和浅变质岩,盆地新近纪地层不整合在侏罗系之上。新近纪地层产状平缓,在地貌上形成典型的“塔林”风光。盆地南缘新近纪沉积厚度最大约 800 m,沉积连续。第四纪为一套砾岩沉积,不整合覆盖在新近纪沉积之上。

如图 1 所示,札达盆地的东北部为阿伊拉日居山脉,出露岩性为中生代的砂泥质混杂岩、中生代花岗岩;盆地的西南部出露有中生代的蛇绿混杂岩、砂岩、浅变质岩,元古代变质岩。朗钦藏布(象泉河)是盆地内的主要河流,现代河流由 SE 向 NW 流出盆地。盆地的西南部和东北部分别发育著名的藏南拆离系和喀喇昆仑断裂。张进江(2007)对北喜马拉雅地区研究认为,藏南拆离系活动时间为 24~12 Ma,12 Ma 之后未有活动的报道,和主中央逆冲断裂活动时间一致。其中喀喇昆仑断裂与雅鲁藏布江缝合带是冈底斯地体与喜马拉雅地体的分界线。

<sup>①</sup>中国地质调查局,2004. 西藏 1:25 万札达县幅区域地质调查报告.

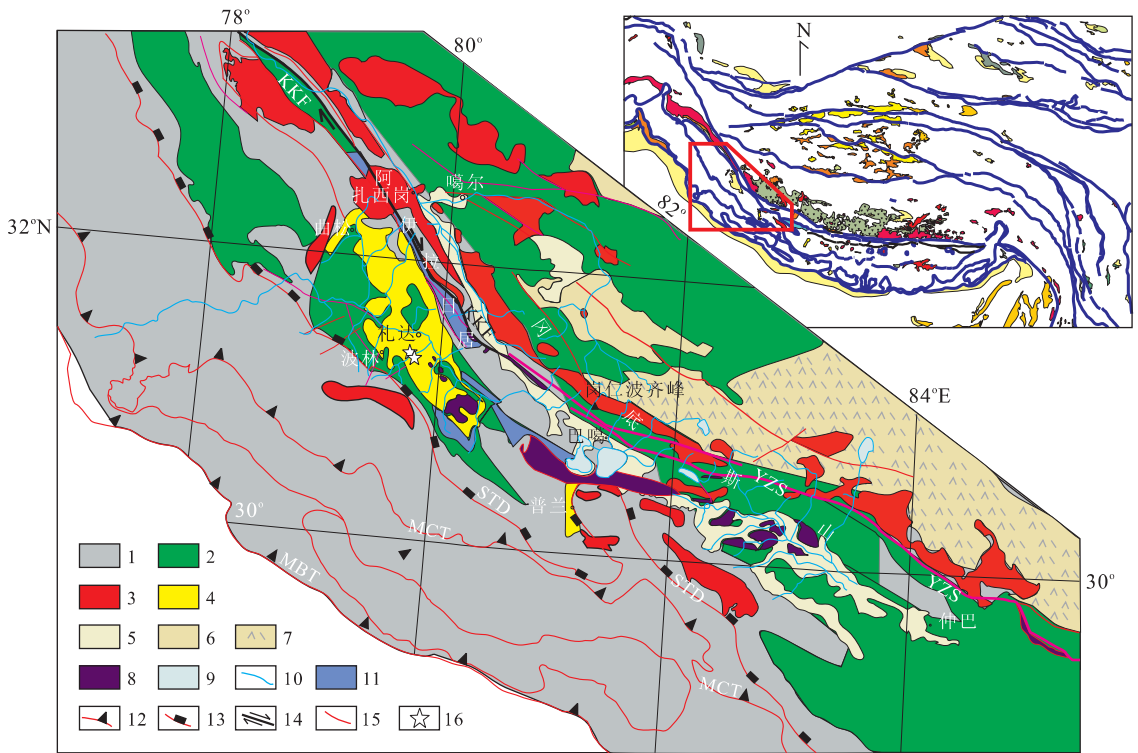


图 1 研究区地质构造简图及样品分布

Fig. 1 Sketch map showing geological tectonic and sample distribution of the research area

1. 前中生代地层; 2. 中生代砂岩、浅变质岩; 3. 新生代花岗岩; 4. 新近纪地层; 5. 第四系; 6. 古近纪地层; 7. 古近纪火山岩; 8. 蛇绿混杂岩; 9. 现代湖泊; 10. 现代水系; 11. 中生代混杂岩; 12. 逆冲断层; 13. 拆离断层; 14. 右行走滑断层; 15. 裂变径迹样品点; YZS. 雅鲁藏布江缝合带; KKF. 喀喇昆仑断裂; STD. 藏南拆离系; MCT. 主中央断裂; MBT. 主边界断裂

## 2 分析及样品分布

盆地沉积是蚀源区长期演化的综合产物, 纪录了源区一个较长期的剥蚀过程, 因此来自造山带的沉积物成为人们构筑造山带构造演化历史极为重要的研究对象. 裂变径迹是放射性元素 $^{238}\text{U}$ 裂变造成的矿物晶格电离损伤. 裂变径迹在岩石冷却时产生, 加温时“退火”消失, 再度冷却又重新产生. 这种“生灭可逆”的特殊性质记录了岩石被冷却、加温和冷却的过程(Naeser, 1979). 锆石的封闭温度采用 $(240 \pm 50)^\circ\text{C}$ , 磷灰石的封闭温度取 $(110 \pm 10)^\circ\text{C}$ (Hurford, 1986; Brandon *et al.*, 1998; 郑德文等, 2000; Bernet *et al.*, 2002; 王国灿, 2002). 碎屑裂变径迹方法的优点是可以量化地研究沉积盆地源区的抬升剥露及热演化史.

裂变径迹年龄测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成, 测试过程采用外探测器方法进行制样. 锆石样品用肽富龙制备, 磷灰石样品用环氧树脂粘制. 锆石样品是用氢氧化钾与氢氧化钠以 12.8 : 8.0 的质量比溶液为蚀刻

剂, 在  $228^\circ\text{C}$  条件下蚀刻. 锆石样品蚀刻时间为 19~31 h; 磷灰石样品是用 40% 的 5 mol/L 的  $\text{HNO}_3$  为蚀刻剂, 蚀刻 18~22 s. 然后将低铀含量的白云母紧贴在玻璃片上, 制成定年组件. 标准玻璃采用 CNL. 样品组件送中国原子能科学研究院进行热中子辐射, 其磷灰石热中子辐射剂量为  $8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ; 锆石为  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ . 白云母上的诱发裂变径迹用浓 HF 蚀刻 18 min. 径迹统计在 AUTOSCAN 系统中放大 1 000 倍下进行, 径迹年龄以国际通用高斯拟合软件 Binofit 处理, 进行二项式拟合, 同时完成频度分析及放射图绘制. 年龄计算采用 Zeta 法, 锆石 Zeta 值为  $117.13 \pm 1.31$ , 磷灰石 Zeta 值为  $103.49 \pm 5.56$ .

本文主要研究札达盆地内新生代沉积剖面中的碎屑裂变径迹样品, 揭示其源区的隆升、剥露历史及构造演化的热历史. 札达盆地从新近纪地层底部到第四纪砾岩层连续系统地采集了 8 件碎屑裂变径迹样品, 采集样品的剖面位置在札达县城西南 4 km 处, 其中新近纪托林组中从底到顶依次系统采集了 6 件, 第四系香孜组地层中采集了 2 件, 见图 1 和图 2, 样品地层年代和测试的峰值年龄见表 1.

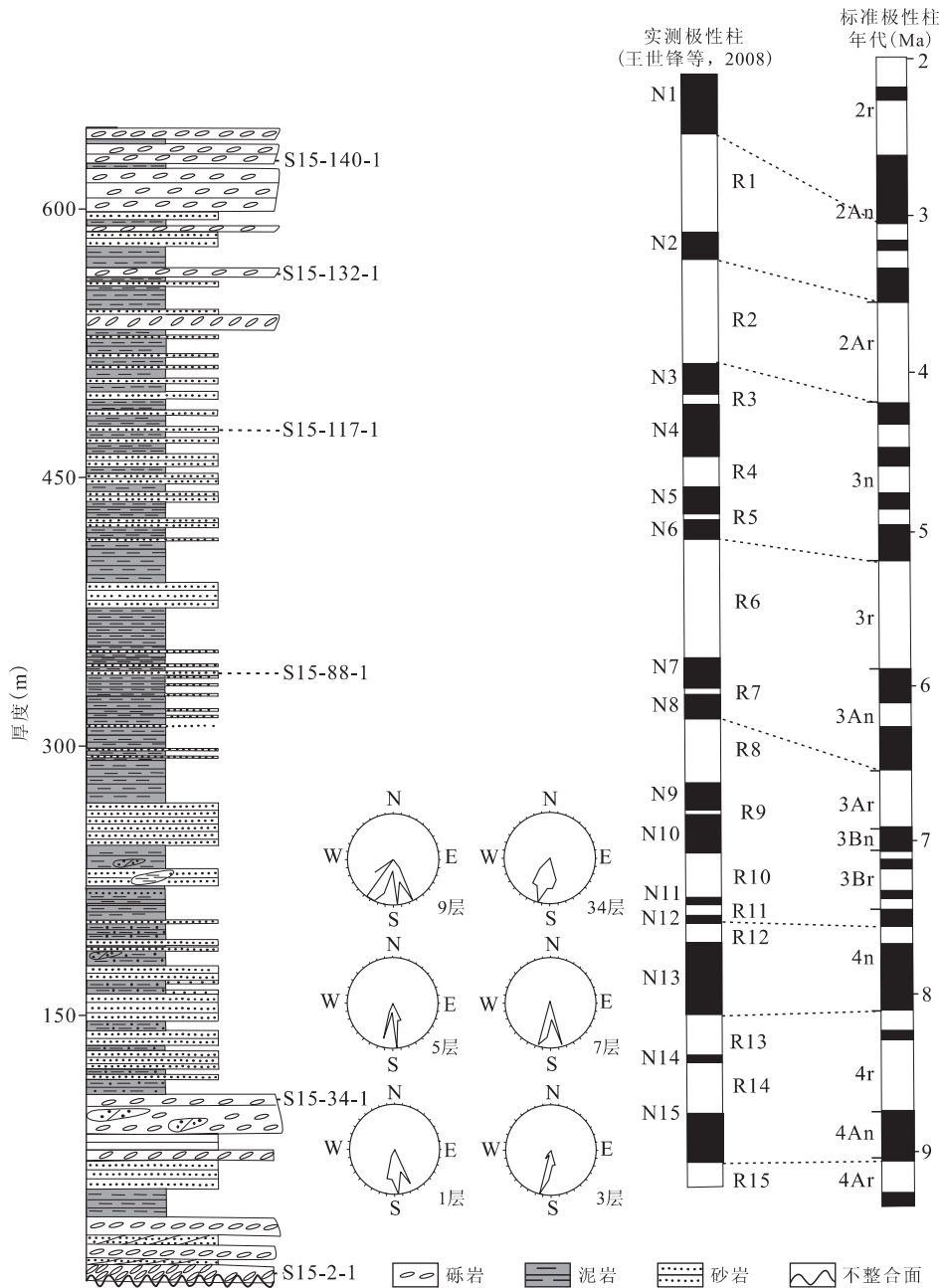


图 2 札达盆地新近纪地层沉积剖面磁性年龄、样品分布与砾石长轴定向

Fig. 2 Map showing depositional strata, magnetism ages, sample distribution and gravel long axial direction of Tertiary sedimentary section, Zanda basin

现将样品情况逐一介绍, S15-2-1 样品的地层主要为一套灰色厚层状砂岩, 夹灰色的薄层砾岩, 砂岩层中发育板状交错层理, 地层时代为 9.1 Ma; S15-34-1 样品的地层主要为一套灰色巨厚层状中—粗砾岩, 砾石磨圆差, 砾石层中夹有砂岩—粗砂岩的透镜体, 样品就是采自这些砂岩透镜体中, 地层时代为 8.2 Ma; S15-88-1 样品的地层主要为灰绿色松散中砂岩, 底部含有砾石, 地层时代为 5.8 Ma; S15-117-1 样品的地层下部为红褐色含砾粗砂岩渐变为灰绿色

长石石英细砂岩, 产腹足类化石, 上部为灰白色含砾粗砂岩渐变为灰绿色长石石英细砂岩, 夹薄层泥岩条带, 札达盆地新近纪地层不整合在侏罗系之上, 第三纪地层产状水平. 第三纪沉积在盆地的南缘厚度最大约 800 m, 地层时代为 4.0 Ma; S15-132-1 为灰色巨厚层状中砾岩, 夹土黄色泥岩透镜体, 地层时代为 3.6 Ma; S15-140-1 样品地层主要为一套灰褐色中厚层复成分中细砾岩, 基质为粗砂岩、粉砂岩, 地层时代为 2.8 Ma; 另外还有两个来自第四系香孜组

表 1 札达盆地碎屑锆石和磷灰石裂变径迹 (FT) 年龄测试结果  
Table 1 Detrital zircon and apatite fission track dating ages, Zanda basin

样品号	沉积年代 (Ma)	颗粒数 (N)	$\rho_d$ ( $10^5 \text{cm}^{-2}$ ) (Nd)	$P_s$ ( $10^6 \text{cm}^{-2}$ ) (Ns)	$P_i$ ( $10^6 \text{cm}^{-2}$ ) (Ni)	$U$ ( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )	$P(x^2)$ (%)	Plt age (Ma $\pm 1\sigma$ ) (%)	P2t age (Ma $\pm 1\sigma$ ) (%)	P3t age (Ma $\pm 1\sigma$ ) (%)	Central age (Ma $\pm 1\sigma$ ) (%)
<b>锆石裂变径迹</b>											
S15-2-1	9.1	50	4.031 (2 822)	5.02 (4 395)	3.42 (2 992)	338	0	17.8 $\pm$ 2.3 (2.5)	33.2 $\pm$ 1.4 (87.3)	67.1 $\pm$ 4.9 (10.3)	34.9 $\pm$ 1.6
S15-34-1	8.2	50	4.022 (2 815)	4.67 (4 195)	3.39 (3 044)	335	0	17.8 $\pm$ 2.3 (10.1)	29.5 $\pm$ 1.5 (63.9)	54.0 $\pm$ 5.0 (26)	32.5 $\pm$ 1.9
S15-88-1	5.8	51	4.012 (2 808)	2.02 (1 644)	2.66 (1 992)	264	0	15.3 $\pm$ 0.6 (92.2)		218 $\pm$ 35 (7.8)	18.3 $\pm$ 1.6
S15-117-1	4.0	50	4.002 (2 801)	4.35 (2 825)	3.20 (2 079)	319	0	14.9 $\pm$ 1.5 (8.9)	28.6 $\pm$ 1.1 (76.1)	209.3 $\pm$ 29 (15)	33.6 $\pm$ 2.9
S15-132-1	3.6	50	3.993 (2 795)	2.51 (2 308)	2.97 (2 723)	296	0	14.0 $\pm$ 1.1 (28.5)	22.2 $\pm$ 1.1 (69.6)	45.0 $\pm$ 14 (1.8)	19.7 $\pm$ 0.9
S15-140-1	2.8	51	3.983 (2 788)	2.10 (1 922)	2.72 (2 490)	272	0.1	13.9 $\pm$ 1.1 (42)	21.3 $\pm$ 1.2 (58)		17.9 $\pm$ 0.8
S12-16-1	Q	50	3.973 (2 781)	4.25 (4 154)	3.50 (3 421)	351	0		21.3 $\pm$ 1.2 (31.9)	33.0 $\pm$ 1.3 (68.1)	28.4 $\pm$ 1.2
S12-34-1	Q	50	3.963 (2 774)	3.67 (3 227)	5.88 (5 174)	591	0	12.6 $\pm$ 0.6 (64.4)	19.8 $\pm$ 1.0 (35.6)		14.7 $\pm$ 0.6
<b>磷灰石裂变径迹</b>											
S15-2-1	9.1	50	3.210 (3 443)	4.53 (994)	1.99 (4 369)	25	0	27.1 $\pm$ 2.5 (55.5)	47.6 $\pm$ 4.4 (40.1)	127.5 $\pm$ 24.5 (4.4)	38.0 $\pm$ 3.3
S15-34-1	8.2	44	3.295 (3 438)	3.25 (615)	1.36 (2 565)	16	0	33.0 $\pm$ 2.5 (93)		163.1 $\pm$ 21 (7)	37.5 $\pm$ 4.5
S15-88-1	5.8	15	3.244 (3 441)	2.99 (145)	1.39 (673)	17	10.4	31.6 $\pm$ 5.2 (72.9)	54.6 $\pm$ 17.4 (7.8)		36.9 $\pm$ 4.5
S15-117-1	4.0	50	3.261 (3 440)	5.24 (1 044)	2.56 (5 103)	31	0	24.1 $\pm$ 2.2 (61.2)	45.5 $\pm$ 4.5 (34.7)	185.7 $\pm$ 26 (4)	35 $\pm$ 3.9
S15-132-1	3.6	34	3.278 (3 439)	2.70 (391)	1.67 (2 425)	20	32.5	26.6 $\pm$ 3.2 (92.4)	39.4 $\pm$ 29 (7.6)		27.4 $\pm$ 2.2
S15-140-1	2.8	45	3.295 (3 438)	2.16 (508)	1.48 (3 483)	18	1.3	24.4 $\pm$ 1.8 (97.8)		168.0 $\pm$ 78 (2.2)	25.1 $\pm$ 1.9
S12-34-1	Q	25	2.956 (3 460)	4.81 (483)	5.27 (5 296)	71	4.0	7.8 $\pm$ 2.1 (7.6)	14.8 $\pm$ 1.1 (92.4)		14.3 $\pm$ 1.1

砾岩剖面中的样品, S12-16-1 地层底部为灰白色中粗砾层, 向上粒度减小, 中部可见中厚层粗砂岩, 上部为两层中砾岩层夹一层含砾粗砂; S12-34-1 样品地层为一套灰黄色中薄层砾岩与灰黄色粉砂岩、泥质粉砂岩。

### 3 札达盆地新生代沉积特征及物源分析

札达盆地新近纪地层不整合在侏罗系之上, 第三纪地层产状水平。第三纪沉积, 在盆地的南缘厚度最大约 800 m, 古地磁测年研究显示盆地第三纪沉积开始于 9.5 Ma (王世峰等, 2008b)。中新世地层札达组主体为一套河湖相沉积, 下部为多个河流相的

正粒序旋回。

粉砂岩和泥岩沉积构造发育有砾石的定向排列、大型板状斜层理、楔状层理和槽状交错层理, 为典型的河道沉积; 向上变细为砂岩、粉砂泥岩互层, 沉积构造发育爬升层理、槽状交错层理、楔状层理, 并在泥岩中出现了湖盆斜坡向的滑塌构造及树杆化石和哺乳动物化石; 再向上又出现了大段的砾岩层和砂岩、粉砂岩互层, 图 2 中的地层柱状简图描述了札达组地层的粒序变化。第四纪香孜组砾岩不整合于新近纪地层之上。

确定沉积物源对碎屑裂变径迹研究具有重要意义, 古流向的判定, 对确定沉积物源有指向性作用。前人研究盆地沉积时的古水流方向是由 NW 向 SE 流出盆地的 (周勇等, 2000)。笔者根据在札达县城西南



多几东沟实测沉积剖面的信息,从以下几个方面确定札达盆地中新世沉积物源为北部的阿伊拉日居山。

### 3.1 地层沉积厚度

野外实测剖面位于札达县城西南多几东沟地区,起点: E79.749 17°, N31.477 82°, 海拔: 3 634 m; 终点: E79.741 335°, N31.380 945°, 海拔: 4 341 m (图 1)。新近纪地层总厚度 631.5 m, 共分 142 层 (图 2)。

根据周勇等 (2000) 的研究资料, 在盆地西北部曲松附近, 地层厚 150~170 m, 向东南至札达县城一带, 地层厚 200~500 m, 说明地层厚度从 NW 向 SE 有明显的增厚趋势。王世锋等 (2008b) 测得盆地南缘的地层厚度最大达到 800 m 左右, 在札达县城西南 4 km 的多几东沟地区, 第三系总厚度为 631 m。上述资料表明盆地沉积厚度由北到南增大, 沉积中心在盆地的南端, 说明古水系是由北流向南, 沉积物源来自北部的阿伊拉日居地区。

### 3.2 砾石的定向

札达盆地内新近纪沉积地层中发育有大量的洪冲积砾岩层, 砾石扁平面具有很好的定向性。根据砾岩层 (第 1、3、5、7、9 和 34 层) 中砾石扁平面的产状统计, 做出的玫瑰花图 (图 2) 显示, 扁平状砾石总体倾向 SSE。

砾石由于其自身形态等方面的特点, 在一定情况下可以反映古水流的方向。对于叠瓦状排列的砾石, 古流向与迭瓦面的方向相反; 对于定向排列的长条状或扁平状砾石, 在不同的沉积环境下对古流向的指示具有不同的意义; 在河流、水道等沉积环境中, 砾石的

长轴方向代表古水流的方向, 而在海岸或湖岸等沉积环境中, 砾石的长轴方向与古水流方向垂直; 圆形或近圆形的砾石对古流向的指示意义不明显 (陈妍等, 2008)。分析研究区砾石定向的特点 (图 3), 砾石不具有叠瓦状排列的特征, 是河流或水道中的长条状排列的砾石, 砾石长轴方向代表古水流方向。

### 3.3 板状斜层理的定向

新近纪沉积地层的砂岩层中, 发育大量的板状斜层理 (图 4), 地层层系产状近水平, 前积纹层产状分别测得  $185^\circ \angle 15^\circ$  (第 2 层)、 $175^\circ \angle 35^\circ$  (第 6 层)、 $205^\circ \angle 15^\circ$  (第 10 层)、 $195^\circ \angle 10^\circ$  (第 12 层) 和  $200^\circ \angle 30^\circ$  (第 32 层), 板状斜层理前积纹层的倾向代表水流方向由此也可以判断出, 盆地内古流向为由 N 向 S 的流向。

### 3.4 砾石成分的特点

盆地东南端多几东沟地区的地层实测剖面中的砾石成分分析表明, 砾石主要为花岗岩和砂岩, 同时有少量的石英岩和变质岩, 并且层位向上花岗岩成分明显增多。前人对盆地南部的类似分析研究也表明, 砾岩层的砾石成分也主要为花岗岩和砂岩, 在地层柱中花岗岩砾石可达 70% (周勇等, 2000; 高雄, 2006), 变质岩和基性、超基性岩砾石组分很少。这种砾石成份特点说明札达盆地物源与北部的阿伊拉日居山脉地区密切相关, 因为沿阿伊拉日居山脉发育大量的中生代花岗岩和中生代的砂泥质沉积岩, 而盆地的西南部主要出露中生代的蛇绿混杂岩、砂岩、浅变质岩及元古代变质岩, 与札达盆地新生代沉积砾

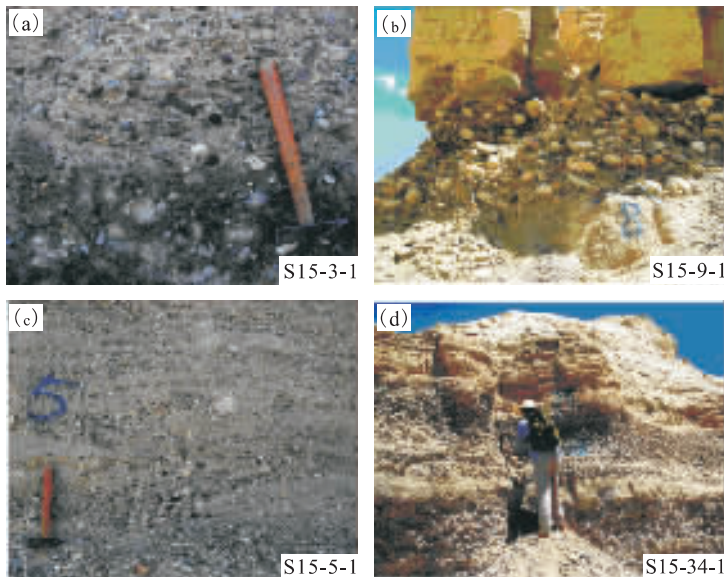


图 3 札达盆地砾石层砾石长轴形态

Fig. 3 Long axis configurations of gravel in gravel strata, Zanda basin

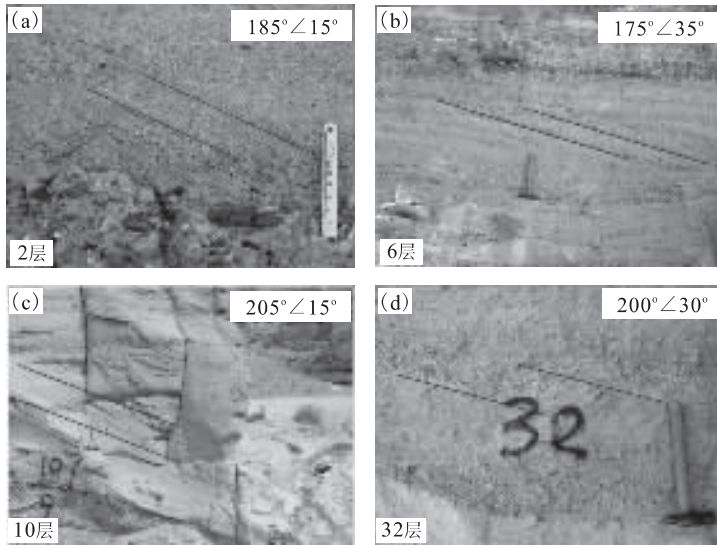


图 4 札达盆地新近纪沉积剖面中板状斜层理定向

Fig. 4 Map showing the tabular oblique bedding direction of Tertiary sedimentary section, Zanda basin

石成分结构不匹配. 也说明札达盆地新近系沉积的物源主要来自于盆地北部的阿伊拉日居山脉地区.

### 4 碎屑裂变径迹热年代学分析

#### 4.1 札达盆地碎屑锆石裂变径迹年龄分析

对盆地东南端多几东沟地区实测地层剖面砂岩的系列碎屑裂变径迹样品的测试结果显示, 所有的裂变径迹年龄均大于样品的沉积年龄. 裂变径迹的峰值年龄反映了源区的隆升、剥蚀过程和构造热事件. 并且所有碎屑锆石样品  $P(x^2)$  都小于 1%, 表明样品的裂变径迹年龄为多组分的.

札达盆地内综合 8 个样品的碎屑锆石裂变径迹年龄, 显示有 3 个峰值, P1: 12.6~15.3 Ma, P2: 19.8~22.2 Ma, P3: 28.6~33.2 Ma(表 1 和图 5a). 碎屑裂变径迹研究中滞后时间是一个重要的概念, 滞后时间(lag time)  $\Delta t: \Delta t = t_c - t_e$ , 式中  $t_c$  为矿物通过封闭温度等温面的年代;  $t_e$  为矿物被剥蚀的年代;  $t_d$  为矿物被沉积的年代; 其中  $t_e$  在矿物从剥蚀到沉积的年代地质历史尺度内可以忽略, 即是  $t_e \approx t_d$ . Bernet and Garver(2005)把滞后时间变化趋势分为了 3 种类型: (1)沿沉积剖面向上滞后时间减小, 且样品峰值年龄比对应沉积地层年龄减小得快, 即为移动峰, 代表了源区持续和加速剥蚀过程; (2)沉积剖面向上滞后时间稳定不变, 峰值年龄沿沉积剖面向上减小也呈移动峰, 代表了源区的恒定的剥蚀速率; (3)沿沉积剖面向上滞后时间增大, 反映源

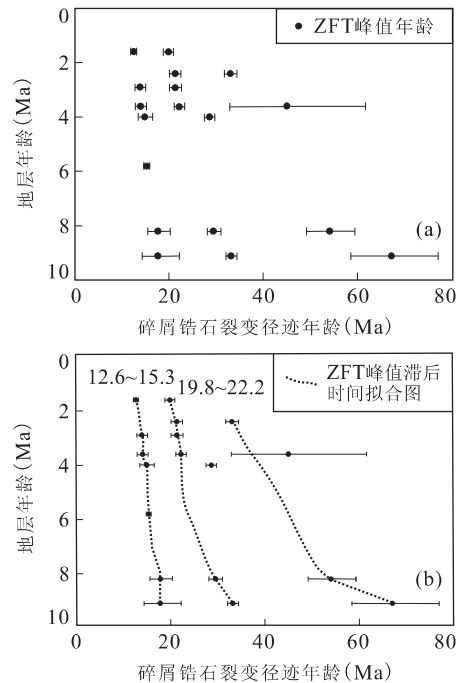


图 5 ZFT 年龄一样品沉积年龄分布(a)和滞后时间趋势(b)  
Fig. 5 Distribution of ZFT ages and depositional ages (a) and the trending of ZFT lag time (b)

区减速的剥蚀过程, 如果剖面上部, 峰值年龄不变呈静态峰, 反映的是源区地质历史上的一次快速阶段性剥露的冷却事件, 可能与正断层活动及岩浆热侵入的快速冷却有关. 图 5b 给出了裂变径迹年龄滞后时间趋势, 滞后时间总体随沉积地层年龄减小而增大, 但沉积年龄 5.8 Ma 以来的 5 件样品的 P1 峰值年龄基本稳定在 12.6~15.3 Ma 之间, 沉积年龄

3.6 Ma 以来的 4 件样品的 P2 峰值年龄基本稳定在 19.8~22.2 Ma 之间,即约 5.8 Ma 以来 P1 峰值 12.6~15.3 Ma 和 P2 峰值 19.8~22.2 Ma 表现为静态峰. 反映源区阿伊拉日居山地区在 12.6~15.3 Ma 和 19.8~22.2 Ma 之间存在由断裂活动引起的快速剥蚀或者岩浆侵入事件导致的快速冷却. 滞后时间和地层沉积年代的  $t_c = A + Bt_d$ , 其中  $A$  为参数,  $B$  为沉积年代和滞后时间的斜率, 是反映剥蚀源区演化的一个参数, 碎屑锆石 P1 峰值的滞后时间为 9.5~10.9 Ma,  $B = \text{沉积年龄} / \text{滞后时间} < 1$ , 反映的是造山带早期形成阶段, 断层性质转换或活动期.

图 5a 显示样品 P1、P2 峰值年龄均与地层的沉积年龄正相关, 即沉积年龄越小的地层, 对应的裂变径迹的峰值年龄也越小. 这也表明 12.6~15.3 Ma, 19.8~22.2 Ma 峰值年龄是喀喇昆仑断裂在阿伊拉日居山段的两次活动时间. 碎屑锆石裂变径迹年龄 P3 峰值 28.6~33.2 Ma, 反映阿伊拉日居山和喀喇昆仑断裂地区在此期间有一次热事件. 岩浆锆石的  $34.5 \pm 1.9$  Ma 的年龄, 反映了阿伊拉日居山北东侧存在约 35 Ma 岩浆事件(李海兵等, 2007; Franck *et al.*, 2008), 与沉积盆地中由下到上 33.2 Ma、29.5 Ma 和 28.6 Ma 的裂变径迹峰值年龄反映的地质信息吻合.

表 1 所示, 锆石裂变径迹样品中, 从 S15-132-1 (3.6 Ma) 开始相对较低层位, P1 峰值年龄和 P2 峰值年龄都开始出现年轻的组分, 表明源区加速的剥蚀过程, 这应该与 3 Ma 左右青藏高原整体的快速隆升相关, 隆升速度和幅度较大, 并达到了相当的海拔高度, 从而形成了季风带, 降雨增多, 剥蚀速度增大. 第四系样品 S12-16-1 的年龄组分相对偏老, 应该考虑是有源区阿伊拉日居地区中再循环物质的加入.

#### 4.2 札达盆地碎屑磷灰石裂变径迹年龄分析

碎屑磷灰石裂变径迹年龄均大于样品的沉积年龄. 裂变径迹的峰值年龄反映了源区的隆升、剥蚀过程和构造热事件, 并且所有碎屑磷灰石样品  $P(x^2)$  都小于 1%, 表明样品的裂变径迹年龄为多组分的.

札达盆地内碎屑磷灰石裂变径迹也有 3 个峰值: P1: 7.8~14.8 Ma; P2: 24.1~27.1 Ma; P3: 31.6~33.0 Ma (表 1 和图 6), 其中 P3 峰值年龄 31.6~33.0 Ma 对应于锆石的 P3 峰值年龄 28.6~33.2 Ma, 说明源区在该年龄阶段经历了一次构造岩浆热事件. 碎屑磷灰石的裂变径迹年龄与碎屑锆石的裂变径迹年龄大体可对比, 但磷灰石的裂变径迹峰值年龄并不一定都比锆石的裂变径迹年龄小,

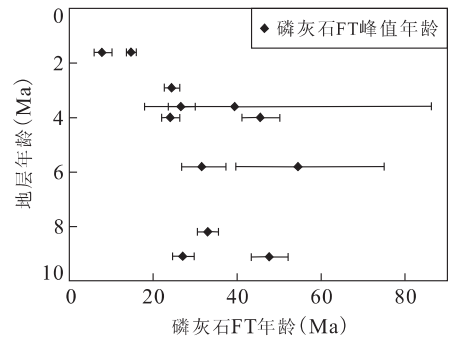


图 6 AFT 年龄—样品沉积年龄分布

Fig. 6 Distribution of AFT ages and depositional ages

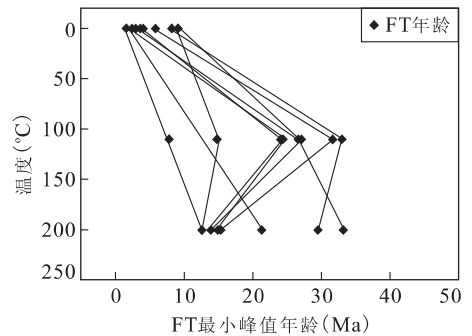


图 7 源区阿伊拉日居山地区 FT 热历史

Fig. 7 Thermal history of Ayila Rijyu region

原因可能是源区的热事件在锆石封闭温度和磷灰石封闭温度之间是一个快速冷却的过程, 或者源区不同部位块体的冷却历史不同.

图 7 是根据锆石、磷灰石的裂变径迹年龄及相应的退火温度, 模拟阿伊拉日居山地区的 FT 热历史. 据前面分析, 认为札达盆地的沉积物源均来自北面的阿伊拉日居山地区, 源区经历了快速的冷却过程, 冷却速度  $21.0 \sim 8.3$  °C/Ma, 平均  $15.4$  °C/Ma. 地温梯度取  $35.0$  °C/km. 33.2~14.8 Ma 通过锆石、磷灰石封闭温度之间时是快速的, 剥蚀速度达  $1.19 \sim 0.94$  mm/a.

## 5 盆山耦合及相关讨论

(1) 札达盆地为 NNW-SSE 走向, 笔者从地层沉积构造、砾石成分、地层厚度等方面证明札达盆地新近纪沉积的物源来自盆地的北部, 即阿伊拉日居山. 但有研究者认为西南侧的喜马拉雅山也是札达盆地新近纪沉积的重要物源(高雄, 2006; 朱大岗等, 2006). 若考虑西南部喜马拉雅山物源的提供, 则碎屑裂变径迹年龄必然有喜马拉雅山地区由藏南拆离



系活动引起的隆升剥露和岩浆事件的冷却过程记录。有关研究表明藏南拆离系的活动时间主要为 22~14 Ma, 在 13 Ma 之后强烈活动信息很少 (Zhang and Guo, 2007)。前人对喀喇昆仑断裂进行了大量的研究, Matte *et al.* (1996) 认为 11 Ma 以来喀喇昆仑断裂发生了右旋剪切; Searle *et al.* (1998) 根据同构造花岗岩 U-Pb 年龄为 (18.0±0.6) Ma, 认为是断裂右旋活动的开始时间; Murphy *et al.* (2000, 2002) 认为断裂活动时代为 13 Ma; Zhou *et al.* (2001) 则认为 (6.88±0.36)~(8.75±0.25) Ma 发生了强烈走滑变形, 活动时间应该在 6.8 Ma 之前; Phillips *et al.* (1991) 沿断裂发育的同构造花岗岩脉年龄认为, (15.68±0.52)~(13.73±0.28) Ma 是断裂活动的最早时间; Franck *et al.* (2008) 及李海兵等 (2006, 2007) 对喀喇昆仑东南端阿伊拉日居地区的研究认为, 喀喇昆仑断裂东南端阿伊拉日居地区在 32~35 Ma 有岩浆活动, 磁性地层学的资料显示在 37 Ma 青藏高原东北柴达木盆地发生了快速隆升和剥蚀事件 (Pei *et al.*, 2009)。同位素方面的资料显示在 25~22 Ma 右旋剪切开始强烈活动, 并伴有同构造花岗岩, 李海兵等 (2006, 2007) 及 Franck *et al.* (2008) 认为 27 Ma 是右旋剪切活动的开始, 22.0~13.7 Ma 发生了大规模的热变质和流体交待作用; 张克信等 (2008) 和 Wang *et al.* (2009) 也指出在 13~8 Ma 和 5 Ma 青藏高原地区分别有两次重大隆升期; Pei *et al.* (2009) 研究指出在其东北部柴达木盆地 38 Ma 左右也有一次快速隆升事件。上述差异是由于研究方法的不同及考察喀喇昆仑断裂的部位不同所致。笔者在认真总结分析前人的研究成果的基础上, 结合札达盆地碎屑裂变径迹年龄反映的信息, 表 2 中归纳给出了喀喇昆仑断裂东南端阿伊拉日居山地区存在着 3 次热事件。这 3 次热事件的年龄是从相关已发表文献中得出的结论, 碎屑裂变径迹年龄是根据 ZFT 和 AFT 年龄综合得出的。札达盆地中碎屑裂变径迹年龄与沉积源区的热事件年龄基本吻合。笔者从物源, 沉积盆地 FT 年龄结构和源区热事件对比 (表 2) 等方面考虑, 认为盆地沉积物源主要受西北缘阿伊拉日居山地区的影响, 盆地的 FT 峰值年龄反映的是喀喇昆仑断裂活动、热事件信息。

(2) 盆地的成因类型有挤压盆地 (王维亮等, 2004; 张进江, 2007)、地堑盆地 (郭铁鹰等, 1991)、半地堑盆地 (Wang *et al.*, 2008a; 王世锋等, 2008b) 和挤压伸展盆地 (翘板式盆地) (孟宪刚等, 2004; 邵兆

表 2 研究区盆山耦合热事件对比

Table 2 Coupling thermal event of sedimentary basin and its source mountain

札达盆地沉积碎屑 (FT 峰值年龄) (Ma)	源区阿伊拉日居山地区 (热事件年龄) (Ma)
12.6~15.3	13.7~15.8
19.8~22.2	22~25
28.6~33.2	32~35

刚等, 2006)。王世锋等 (2008b) 综合磁性地层学与热年代学数据, 认为 12~10 Ma 以来, 喀喇昆仑断裂开始走滑伸展, 为断裂脆性走滑活动的开始时间, 同时札达盆沉积地层开始于 9.5 Ma 的形成是断裂发展到一定阶段的产物, 认为札达盆地是受喀喇昆仑断裂控制的半地堑盆地。本文从盆地碎屑裂变径迹年龄方面, 进一步证明了札达盆地的发育演化受喀喇昆仑断裂东南段的发展演化的控制。

札达盆地位于“两体三带” (冈底斯地体、喜马拉雅地体、喀喇昆仑构造带、印度—雅江缝合带和藏南拆离系构造带) 的构造位置。盆地的发育过程必然与相关构造带的活动有关。盆地的形态是 NNW-SSE 方向, 新生代沉积时盆地北西高南东低, 后期喀喇昆仑右行走滑和藏南拆离系向北拆离以及雅江缝合带南北挤压共同作用于盆地的南东端, 使得盆地南东端抬升, 盆底地势反转, 象泉河向北西流出盆地。

## 6 结论

(1) 锆石裂变径迹滞后时间与沉积时代对比分析显示, P1、P2 峰值年龄中 12.6~15.3 Ma 与 19.8~22.2 Ma 时期为快速冷却事件的静态峰, 反映源区的构造带断层发育活动的时间。

(2) 碎屑锆石的裂变径迹年龄 P3 峰值为 28.6~33.2 Ma, 对应的磷灰石的峰值年龄为 31.6~33 Ma, 阿伊拉日居山、喀喇昆仑地区有一次热事件。阿伊拉日居山北东侧存在有约为 32~35 Ma 岩浆事件, 此次岩浆事件与沉积盆地中由下到上 33.2 Ma、29.5 Ma 和 28.6 Ma 的裂变径迹峰值年龄反映的地质信息吻合。

(3) 锆石、磷灰石裂变径迹年龄结构, 显示该区在 3 Ma 左右发生了一次快速的隆升剥露事件。推测为该时期阿伊拉日居山和喜马拉雅山隆升速度和幅度较大, 已经达到了相当的海拔高度, 从而形成了季风带, 降雨增多, 剥蚀速度增大。这一结论与高原剧烈隆升发生在 3 Ma 左右一致。

(4) 锆石、磷灰石 FT 热历史拟合分析, 源区 32.6~9.5 Ma 之间的冷却速率是 15.4 °C/Ma; 33.2~14.8 Ma 通过锆石、磷灰石封闭温度之间时是快速的, 剥蚀速度达 1.19~0.94 mm/a.

(5) 对比造山带与盆地的 FT 年龄结构及盆地沉积信息, 札达盆地是受喀喇昆仑断裂东南端断层活动影响, 发育的一个新生代沉积盆地. 札达盆地 FT 热年代结构与喀喇昆仑东南端阿伊拉日居山地区的热事件年龄结构吻合, 从热年代学角度很好地揭示了盆山耦合过程.

## References

- Bernet, M., Brandon, T. M., Garver, J. I., et al., 2002. Determining the zircon fission-track closure temperature; a zero-damage model for fission-track annealing in zircon. *Abstracts with Programs—Geological Society of America*, 34(5): 18.
- Bernet, M., Garver, J. I., 2005. Fission-track analysis of detrital zircon. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58(1): 205–237. doi: 10.2138/rmg.2005.58.8
- Brandon, M. T., Roden-Tice, M. K., Garver, J. I., 1998. Late Cenozoic exhumation of the Cascadia accretionary wedge in the Olympic Mountains, Northwest Washington State. *Geological Society of America*, 110(8): 985–1009. doi: 10.1130/0016-7606(1998)110<0985:LCEOTC>2.3.CO
- Chen, Y., Chen, S. Y., Zhang, P. F., et al., 2008. Discussion on research methods of paleocurrent direction. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 15(1): 37–40 (in Chinese with English abstract).
- Franck, V., Philippe, H. L., Jean-Louis, P., et al., 2008. New U-Th/Pb constraints on timing of shearing and long-term slip-rate on the Karakorum fault. *Tectonics*, 27: 1–33.
- Gao, X., 2006. The environment and evolution of Zhada basin, Tibet (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing, 46–52 (in Chinese).
- Guo, T. Y., Liang, D. Y., Zhang, Y. Z., et al., 1991. Ali, Tibet, geology. China University of Geosciences Press, Wuhan, 103–104 (in Chinese).
- Hurford, A. J., 1986. Cooling and uplift patterns in the Lepontine Alps, South Central Switzerland and an age of vertical movement on the Insubric fault line. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(4): 413–427. doi: 10.1007/BF00374424
- Li, B. Y., Wang, F. B., Zhang, Q. S., et al., 1983. Quaternary geology of Tibet. Science Press, Beijing, 15–40 (in Chinese).
- Li, H. B., Franck, V., Xu, Z. Q., et al., 2006. Deformation and tectonic evolution of the Karakorum fault, western Tibet. *Chinese Geology*, 33(2): 239–255 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. B., Franck, V., Liu, D. Y., et al., 2007. Forming age of Karakorum; age constrains of zircon SHRIMP U-Pb. *Chinese Science Bulletin*, 52(4): 438–447 (in Chinese).
- Matte, P., Tapponnier, P., Arnaud, N., et al., 1996. Tectonics of western Tibet, between the Tarim and the Indus. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 142: 311–330.
- Meng, X. G., Zhu, D. G., Shao, Z. G., et al., 2004. Discovery of rhinoceros fossils in the Pliocene in the Zanda basin, Ngari, Tibet. *Geological Bulletin of China*, 23(5): 609–612 (in Chinese with English abstract).
- Meng, X. G., Zhu, D. G., Shao, Z. G., et al., 2006. The basic characteristics and evolution of the geological structures in the Zhada basin, Ali, Tibet. *Earth Science Frontiers*, 13(4): 160–167 (in Chinese with English abstract).
- Murphy, M. A., Yin, A., Kapp, P., et al., 2000. Southward propagation of the Karakoram fault system, Southwest Tibet; timing and magnitude of slip. *Geology*, 28(5): 451–454. doi: 10.1130/0091-7613(2000)28<451:SPOTKF>2.0.CO;2
- Murphy, M. A., Yin, A., Kapp, P., et al., 2002. Structural evolution of the Gurla Mandhata detachment system, Southwest Tibet; implications for the eastward extent of the Karakoram fault system. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 114: 428–447.
- Naeser, C. W., 1979. Thermal history of sedimentary basins; fission-track dating of subsurface rocks. In: Scholle, P. A., Schluger, P. R., ed., *Aspect of diagenesis*. *SEPM Spec. Publ.*, 26: 109–112.
- Pei, J. L., Sun, Z. M., Wang, X. S., et al., 2009. Evidence for Tibetan plateau uplift in Qaidam basin before Eocene-Oligocene boundary and its climatic implications. *Journal of Earth Science*, 20(2): 430–437. doi: 10.1007/s12583-009-0035-y
- Phillips, R. J., Parrish, R. R., Searle, M. P., 1991. Age constraints on ductile deformation and long-term slip rates along the Karakoram Mountains Map 2538. John Wiley and Sons, Chichester.
- Qian, F., 1990. Paleomagnetic methods used in Tibet since the Pliocene Ali, a preliminary study of horizontal movement. In: Li, G. C., ed., *Himalayan tectonic evolution of the lithosphere—Tibet geophysical proceedings*. Geological Publishing House, Beijing, 198–206 (in Chinese).
- Qian, F., 1999. Study on magnetostratigraphy in Qinghai-Tibetan plateau in Late Cenozoic. *Journal of Geomechanics*

- ics, 5(4): 22—34 (in Chinese with English abstract).
- Rolland, Y., Mahéo, G., Pécher, A., et al., 2009. Syn-kinematic emplacement of the Pangong metamorphic and magmatic complex along the Karakorum fault (N Ladakh). *Journal of Asian Earth Sciences*, 34: 10—25. doi: 10.1016/j.jseae.2008.03.009
- Searle, M. P., Weinberg, R. F., Dunlap, W. J., 1998. Transpressional tectonics along the Karakoram fault zone, northern Ladakh; constraints on Tibetan extrusion. *Geol. Soc. London Spec. Pub.*, 135: 307—326. doi: 10.1144/GSL.SP.1998.135.01.20
- Shao, Z. G., Meng, X. G., Zhu, D. G., et al., 2005. Active faults in the Zhada basin of the Ngari area, Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 24(7): 625—629 (in Chinese with English abstract).
- Shao, Z. G., Meng, X. G., Yang, C. B., et al., 2006. Formation mechanism of seesaw type in Zanda basin, Ngari, Xizang (Tibet). *Geological Review*, 52(2): 215—218 (in Chinese with English abstract).
- Wang, A., Wang, G. C., Zhang, K. X., et al., 2009. Late Neogene mountain building of eastern Kunlun orogen; constrained by DEM analysis. *Journal of Earth Science*, 20(2): 391—400. doi: 10.1007/s12583-009-0032-1
- Wang, G. C., 2002. A new approach to determine the exhumation history of the sediment provenance: detrital zircon and apatite fission-track thermochronology. *Geological Science and Technology Information*, 21(4): 35—40 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Zhu, D. G., Meng, X. G., et al., 2006. Features of the change in Pliocene depositional environment at the Guge Formation section in the Zanda basin, Tibet. *Geology in China*, 33(5): 1005—1012 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. F., Blisniuk, P., Kempf, O., et al., 2008a. The basin-range system along the south segment of Karakorum fault zone, Tibet. *Int. Geol. Rev.*, 50(2): 121—134. doi: 10.2747/0020-6814.50.2.121
- Wang, S. F., Zhang, W. L., Fang, X. M., et al., 2008b. Magnetic characteristics and tectonic significance of Zanda basin, Tibet. *Chinese Science Bulletin*, 53(6): 676—683 (in Chinese).
- Wang, W. L., Zhang, J. J., Zhang, B., 2004. Structural and sedimentary features in Zanda basin of Tibet. *Acta Scientiarum Naturalium*, 40(6): 872—878 (in Chinese with English abstract).
- Xia, D. X., Liu, S. K., 1997. Tibet Autonomous Region lithostratigraphy. China University of Geosciences Press, Wuhan, 239—240 (in Chinese).
- Zhang, J. J., 2007. A review on the extensional structures in the northern Himalaya and southern Tibet. *Geological Bulletin of China*, 26(6): 639—649 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. J., Guo, L., 2007. Structure and geochronology of the southern Xainza-Dinggye rift and its relationship to the South Tibetan detachment system. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29: 722—736. doi: 10.1016/j.jseae.2006.05.003
- Zhang, K. X., Wang, G. C., Cao, K., et al., 2008. Main uplift events of Tibet in Cenozoic; sedimentary response and thermochronology record. *Science in China (Ser. D)*, 38(12): 1575—1588 (in Chinese).
- Zhang, Q. S., Wang, F. B., Ji, H. X., et al., 1981. Pliocene strata of Zanda basin, Tibet. *Journal of Stratigraphy*, 5(3): 216—220 (in Chinese).
- Zhao, Z. Z., Li, Y. T., Ye, H. F., et al., 2001. Qinghai-Tibet plateau formation. Science Press, Beijing, 177—322 (in Chinese).
- Zheng, D. W., Zhang, P. Z., Wan, J. L., et al., 2000. Detrital grain thermochronology—a potential method for research on coupling process between basin and mountain. *Seismology and Geology*, 22(B12): 25—36 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y., Ding, L., Deng, W. M., et al., 2000. Tectonic cyclothem in the Zanda basin and its significance. *Chinese Journal of Geology*, 35(3): 305—315 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y., Xu, R. H., Yan, Y. H., et al., 2001. Dating of the Karakorum strike-slip fault. *Acta Geologica Sinica*, 75(1): 10—18.
- Zhu, D. G., Meng, X. G., Shao, Z. G., et al., 2006. The formation and evolution of Zhada basin in Tibet and the uplift of the Himalayas. *Acta Geoscientica Sinica*, 27(3): 193—200 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D. G., Meng, X. G., Shao, Z. G., et al., 2007. Evolution of the paleovegetation, paleoenvironment and paleoclimate during Pliocene-Early Pleistocene in Zhada basin, Ali, Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 81(3): 295—307 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 陈妍, 陈世悦, 张鹏飞, 等, 2008. 古流向的研究方法探讨. 断块油气田, 15(1): 37—40.
- 高雄, 2006. 西藏札达盆地形成环境及其发展演化(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学, 46—52.
- 郭铁鹰, 梁定益, 张宜智, 等, 1991. 西藏阿里地质. 武汉: 中国地质大学出版社, 103—104.

- 李炳元,王富葆,张青松,等,1983. 西藏第四纪地质. 北京:科学出版社,15—40.
- 李海兵,Franck, V.,许志琴,等,2006. 喀喇昆仑断裂的变形特征及构造演化. 中国地质,33(2): 239—255.
- 李海兵,Franck, V.,刘敦一,等,2007. 喀喇昆仑断裂的形成时代: 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄的制约. 科学通报,52(4): 438—447.
- 孟宪刚,朱大岗,邵兆刚,等,2004. 西藏阿里札达盆地上新统中犀类化石的发现及意义. 地质通报,23(5): 609—612.
- 孟宪刚,朱大岗,邵兆刚,等,2006. 西藏阿里札达盆地地质构造的基本特征及其演化. 地学前缘,13(4): 160—167.
- 钱方,1990. 用古地磁方法对西藏阿里上新世以来水平运动的初步研究. 见:李兴岑编,喜马拉雅岩石圈构造演化—西藏地球物理论文集. 北京:地质出版社,198—206.
- 钱方,1999. 青藏高原晚新生代磁性地层研究. 地质力学学报,5(4): 22—34.
- 邵兆刚,孟宪刚,朱大岗,等,2005. 西藏阿里地区札达沉积盆地活动构造. 地质通报,24(7): 625—629.
- 邵兆刚,孟宪刚,杨朝斌,等,2006. 西藏阿里札达盆地的“翘板式”形成机制. 地质论评,52(2): 215—218.
- 王国灿,2002. 沉积物源区剥露历史分析的一种新途径——碎屑锆石和磷灰石裂变径迹热年代学. 地质科技情报,21(4): 35—40.
- 王津,朱大岗,孟宪刚,等,2006. 西藏札达盆地古格组剖面沉积环境演化特征. 中国地质,33(5): 1005—1012.
- 王世锋,张伟林,方小敏,等,2008b. 藏西南札达盆地磁性地层学特征及其构造意义. 科学通报,53(6): 676—683.
- 王维亮,张进江,张波,2004. 西藏札达盆地构造与沉积特征. 北京大学学报(自然科学报),40(6): 872—878.
- 夏代祥,刘世坤,1997. 西藏自治区岩石地层. 武汉:中国地质大学出版社,239—240.
- 张进江,2007. 北喜马拉雅及藏南伸展构造综述. 地质通报,26(6): 639—649.
- 张克信,王国灿,曹凯,等,2008. 青藏高原新生代主要隆升事件: 沉积响应与热年代学记录. 中国科学(D 辑),38(12): 1575—1588.
- 张青松,王富葆,计宏祥,等,1981. 西藏札达盆地的上新世地层. 地层学杂志,5(3): 216—220.
- 赵政章,李永铁,叶和飞,等,2001. 青藏高原地层. 北京:科学出版社,177—322.
- 郑德文,张培震,万景林,等,2000. 碎屑颗粒热年代学——一种揭示盆山耦合过程的年代学方法. 地震地质,22(B12): 25—36.
- 周勇,丁林,邓万明,等,2000. 札达盆地构造旋回层及其地质意义. 地质科学,35(3): 305—315.
- 朱大岗,孟宪刚,邵兆刚,等,2006. 西藏札达盆地形成演化与喜马拉雅山隆升. 地球学报,27(3): 193—200.
- 朱大岗,孟宪刚,邵兆刚,等,2007. 西藏阿里札达盆地上新世—早更新世的古植被、古环境与古气候演化. 地质学报,81(3): 295—307.