

喀喇昆仑断裂的形成时代：锆石 SHRIMP U-Pb 年龄的制约

李海兵 Franck Valli 刘敦一 许志琴 杨经绥 Nicolas Arnaud
Paul Tapponnier Robin Lacassin 陈松永 戚学祥

(国土资源部大陆动力学重点实验室, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 香港大学地球科学系, 香港; Institut de Physique du Globe de Paris, 75252 Paris CX05, France; 北京离子探针中心, 北京 100037; ISTEEM-U STL, Place Eugene Bataillon, 34095, Montpellier CX5, France. E-mail: lihaibing06@yahoo.com.cn)

摘要 喀喇昆仑断裂的形成时代对青藏高原形成演化、变形过程的研究具有重要意义。在断裂东南段阿伊拉日居山地区, 沿断裂出露具高温右旋剪切应变特征的糜棱岩和糜棱岩化片麻岩-花岗岩, 因此, 利用变形岩石中锆石的SHRIMP U-Pb年龄来制约断裂的形成时代和变形历史。变形岩石中同构造结晶锆石的U-Pb同位素年龄, 暗示了喀喇昆仑断裂的形成时代至少为距今约27 Ma以前, 比前人观点至少早约10 Ma; 大规模的高温右旋剪切活动至少在距今27~20 Ma期间, 并且伴随同构造淡色花岗岩的产生; 剪切变形过程中伴随大量热液流体作用时限至少在距今25~13 Ma期间。喀喇昆仑断裂的生长可能是由南东向北西扩展的过程, 是印度板块与欧亚大陆持续碰撞的结果。

关键词 韧性剪切带 锆石 SHRIMP U-Pb 测年 喀喇昆仑断裂 青藏高原

喀喇昆仑断裂带位于青藏高原西部, 是喜马拉雅山脉北部重要的右旋走滑断裂带, 断裂带大略呈NW-SE走向, 平行于喜马拉雅西部山脉, 其分布至少从冈仁波齐(神山)至帕米尔(图1), 长约1200 km。它的运动特征及时代的确定能够更好地去认识和理解欧亚大陆变形过程和大陆岩石圈流变学特征^[1,2], 对青藏高原形成演化、变形过程的研究具有重要意义。因此, 喀喇昆仑断裂已成为目前青藏高原研究的重点关注问题, 而其中断裂最早的活动时代已成研究的焦点。

由于喀喇昆仑断裂地处青藏高原西部高海拔、气候条件极其恶劣地区, 研究程度较低。据现有的零星研究, 对断裂带的形成时代有着初步的认识: Matte等人^[3]认为在11 Ma以来喀喇昆仑断裂发生了右旋剪切; Searle等人^[4]据同构造花岗岩U-Pb年龄为(18.0 ± 0.6) Ma, 认为此时喀喇昆仑断裂才形成并发生右旋剪切活动; Murphy等人^[5,6]认为断裂带的活动时代为13 Ma; Zhou等人^[7]认为在距今(6.88 ± 0.36)~(8.75 ± 0.25) Ma期间喀喇昆仑断裂发生了强烈走滑变形, 其初始活动时间应在6.8 Ma之前; Lacassin等人^[8]和Valli^[9]获得同构造淡色花岗岩中的锆石U-Pb年龄约

23~25 Ma, 并认为是喀喇昆仑断裂的最早活动时代; Phillips等人^[10]获得沿喀喇昆仑韧性剪切带中同构造淡色花岗岩脉的年龄为(15.68 ± 0.52)~(13.73 ± 0.28) Ma, 表明了该年龄为断裂带最早的活动时代。上述如此不一致的结果可能是由于不同的同位素测年方法(多种U-Pb法, ⁴⁰Ar/³⁹Ar法)的原因、不同的野外考察地区或反映的是断裂活动的不同阶段的原因所致。虽然关于年代学研究取得一些进展, 但仍然存在较大争议以及现有的研究主要相对集中在断裂带的北西段, 而东南部地区工作极其薄弱。本文是在喀喇昆仑断裂带的东南段阿伊拉日居山地区(图1)经过详细的岩石学、变形构造的研究基础上, 对喀喇昆仑韧性剪切带中同构造变形岩石进行锆石SHRIMP U-Pb定年研究, 从而制约喀喇昆仑断裂的形成时代以及变形历史, 并探讨其变形、演化过程。

1 喀喇昆仑断裂的基本地质特征

喀喇昆仑断裂, 在卫星影像及地貌上表现出一狭窄的NW-SE向负地形(图1), 强烈的活动构造痕迹尤为显著, 并在多处有温泉出露, 说明该断裂在第四纪仍活动^[8,11-14]。在断裂带的东南段阿伊拉日居山地

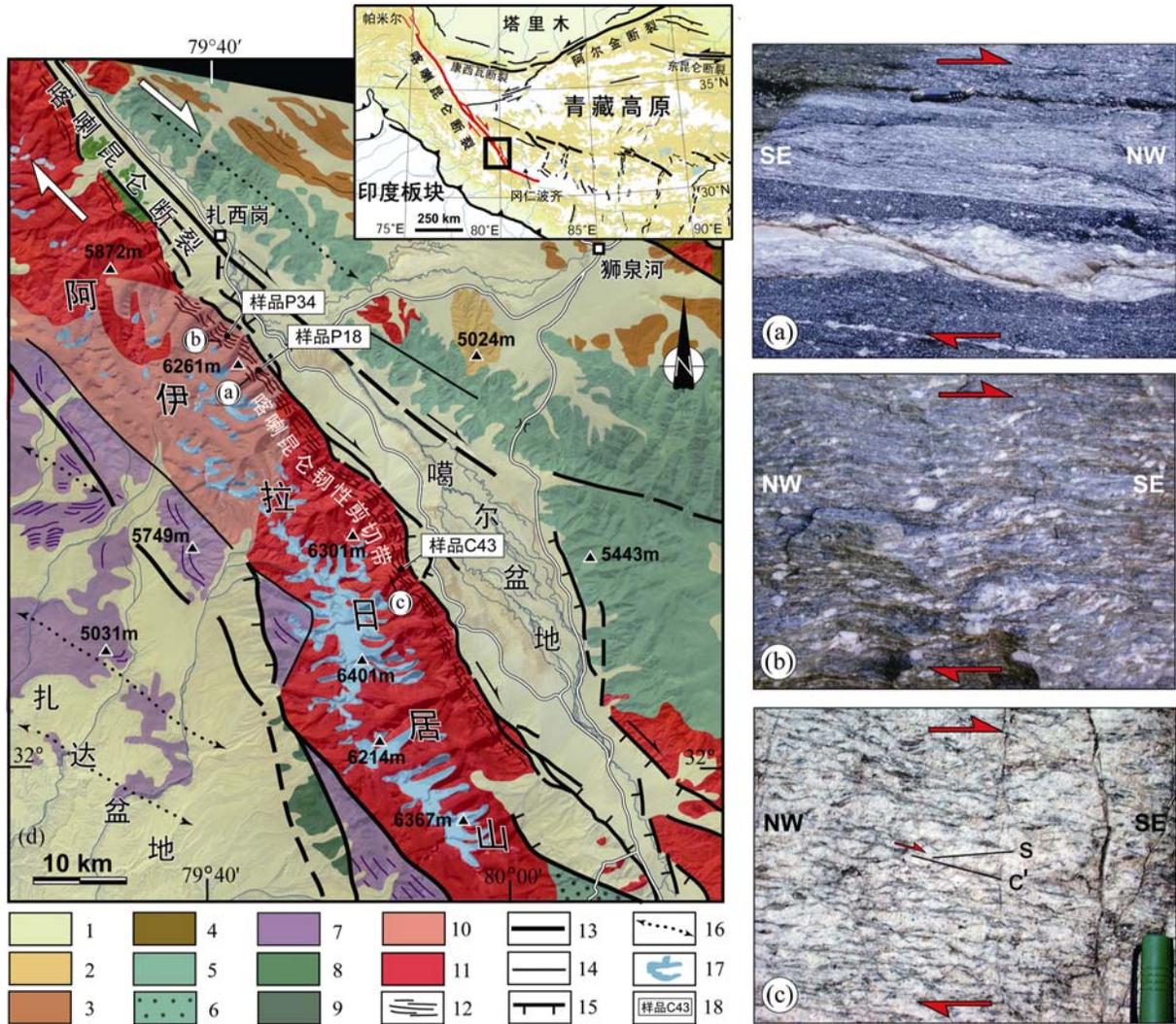


图 1 青藏高原西部狮泉河地区地质略图(d)及喀喇昆仑韧性剪切带中岩石特征(a)~(c)

地质略图据野外考察、卫星影像解译。浅色阴影为地形轮廓。1-第四纪沉积物；2-煤系砂岩，砾岩；3-新近纪淡红色陆相砾岩和砂岩；4-二叠纪砂岩、板岩和砾岩，含灰岩夹层；5-含火山岩的大陆和浅海沉积；6-绿片岩相杂砂岩(可能相当于白垩纪日喀则复理石沉积)；7-未分的古生代-中生代地层；8-由蛇纹岩-辉橄岩-放射虫硅质岩和二叠-三叠纪灰岩组成的走滑构造块体；9-蛇纹岩；10-混合岩和片麻岩；11-花岗岩(有时具叶理)；12-层理，劈理或叶理；13-活动断裂；14-其他断裂；15-具正滑分量的断裂；16-背斜褶皱轴；17-冰川；18-采样位置。右侧照片位置见左侧地质图中(a)~(c)。(a)具右旋剪切特征的淡色熔融物质脉体和片麻岩；(b)糜棱岩化片麻岩中的 σ 型旋转变形，指示右旋剪切指向；(c)淡色花岗质片麻岩中的S/C组构反映出右旋剪切特征

区(图 1)，喀喇昆仑断裂沿阿伊拉日居山东北边缘线形分布，并发育噶尔(拉分)盆地，其活动断裂沿着噶尔盆地的西部边缘斜向地切割了第四纪冲积扇和冰碛物 [15]，并呈现为强烈的右旋走滑特征，断裂面NE倾、近直立。在野外，阿伊拉日居山与其北部盆地的线性断裂关系以及一些断裂三角面、大规模线性山前塌陷一目了然 [16]。沿着这条活动断裂的西南侧，即主要由花岗岩、混合岩及花岗片麻岩组成的阿伊拉日居山体东北边缘发育喀喇昆仑韧性剪切带(图 1) [4,6-10,12,16]，剪

切带由糜棱岩和糜棱岩化岩石组成，它是喀喇昆仑断裂早期深部韧性变形的产物在后期走滑过程中被抬升到地表 [16]。

1.1 喀喇昆仑断裂及韧性剪切带

在靠近噶尔盆地一侧的阿伊拉日居山体中发育高温变形作用特征的花岗质糜棱岩以及糜棱岩化花岗片麻岩，普遍属角闪岩相变质作用，在剪切带的东北边缘，也就是沿着盆地西南边缘存在一套绿片岩相花岗质糜棱岩(厚约 30~50 m) [9,16]，与角闪岩相糜

棱岩和糜棱岩化岩石有着不同的变形特征,为不同阶段的变形结果,并存在后期韧性伸展变形构造,可能反映了韧性走滑剪切过程中后期伴随的隆升作用以及盆地的形成^[9,16]。剪切带变形岩石叶理面产状总体为走向 $140^{\circ}\sim 150^{\circ}$,倾向NE,倾角 $40^{\circ}\sim 70^{\circ}$,拉伸线理近水平,在剪切带中从NE向SW依次总体分布着绿片岩相花岗质糜棱岩、角闪岩相花岗质糜棱岩、糜棱岩化花岗片麻岩以及无变形或弱变形组构的花岗岩或淡色花岗岩,变形岩石中的S/C组构、剪切脉、不对称的碎斑体系等所有的旋转应变均指示了右旋剪切特征,表现出右旋韧性走滑剪切带的基本特征。脆性的活动走滑断裂位于韧性走滑剪切带的北东侧(见图1)。

1.2 剪切过程中的部分熔融作用——高温变形特征

沿剪切带在远离山根的区域,以淡色矿物质为主要成分的熔融物质贯穿于糜棱岩化片麻岩中(见图1(a)),有顺着片麻理和横穿切割片麻理组构的,有的并成为糜棱岩化片麻岩的内部分层,但均呈现出不同程度的、与糜棱岩化片麻岩一致的右旋剪切应变。强烈的剪切纹理与周围的片麻理平行。在同一地区,可以观察到几组淡色矿物质为主要成分的熔融物质组成的纹理,很明显它们是强烈剪切时期的变形纹理^[16]。尽管还能观察到一些混合岩化作用,但是这些淡色矿物质纹理的主要岩石来源很可能是位于西南方的熔融母岩体。并且由具右旋剪切痕迹的混合岩形成了山脉的核心(图1),在东南部的淡色花岗岩中仍有清晰的右旋剪切特征。这一野外关系表明强烈的右旋剪切过程中伴随熔融作用的产生,形成了同构造淡色花岗岩,以及糜棱岩化花岗质片麻岩和糜棱岩,反映了存在高温变形的右旋剪切作用特征^[9,16]。从显微构造特征来看,剪切带中中长石的核-幔构造表明是在大于 500°C 条件下的变形^[17,18];钾长石斑晶周围边界上生长的动态蠕英石构造,暗示着在中、高温条件下(500°C)的空间位错攀移^[17-21];以及长石明显的波状消光、膝折带等塑性变形也表明了高于 500°C 的变形特征^[20,22,23],这些暗示着剪切带存在中、高温条件下(500°C)的变形作用。

2 岩石样品及测年方法

样品采自阿伊拉日居山地区的喀喇昆仑韧性剪切带中(采样点位置见图1),样品P18为糜棱岩化片麻岩,岩石中石英含量约20%,长石含量约40%、白云母含量约20%,黑云母含量约15%,其他矿物含量

约5%;样品C43为糜棱岩化淡色花岗质片麻岩,其中石英含量约30%,长石含量约55%,白云母含量约10%、黑云母含量约3%,其他矿物含量约2%;样品P34为淡色花岗质糜棱岩,其中石英含量约40%,长石含量约30%,白云母含量约小于30%,其他矿物含量小于0.5%,基本不含黑云母。样品P34位于剪切带东北边部的糜棱岩带中,样品P18处在糜棱岩带西南侧的糜棱岩化片麻岩带中,样品C43处在远离糜棱岩带西南侧的糜棱岩化片麻岩带中,这三个样品基本代表了剪切带中不同部位和不同成分的变形岩石。

高温右旋剪切变形伴随熔融作用的产生,那么同构造熔融型淡色花岗岩以及糜棱岩化淡色花岗质片麻岩和糜棱岩的形成时代直接反映了早期喀喇昆仑断裂带的活动时代。因此,通过对其变形岩石(花岗质糜棱岩化片麻岩和糜棱岩)中的锆石SHRIMP U-Pb测年,来制约喀喇昆仑断裂带的变形时代。由于早期为高温($>500^{\circ}\text{C}$)剪切作用,而白云母、黑云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 体系的封闭温度为 $(390 \pm 45)^{\circ}\text{C}$ 和 $(320 \pm 40)^{\circ}\text{C}$ ^[24],因此,同构造生长的云母矿物的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法同位素定年所得到的年龄为断裂带中变形岩石的冷却年龄。所以,利用糜棱岩化(淡色)花岗质片麻岩及糜棱岩中的同构造生长锆石U-Pb同位素年代学研究来制约喀喇昆仑断裂右旋走滑作用的早期活动时代更为准确,尤其是对断裂带形成时代的制约。

样品P18, C43, P34经重液分离和磁选后挑选锆石,最后在双目显微镜下挑纯。将代表性的锆石与数粒标样TEM置于环氧树脂中,然后磨至约一半,使锆石内部暴露,进行SHRIMP U-Pb测年。测试前进行了显微镜下的透、反射光分析,以及进行了背散射图像和阴极发光图像的分析(图2),以确定锆石颗粒的晶体形态、内部结构以及标定测年点。锆石SHRIMP U-Pb分析是在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心SHRIMP上完成,有关测年流程、技术和参数见文献^[25]。

3 锆石特征及 SHRIMP U-Pb 测年结果

3.1 样品 P18

在样品P18中挑取了10颗具有代表性的锆石进行SHRIMP U-Pb测年(图2(a),表1)。这些锆石外形特征主要呈长柱状或短柱状,无色、透明,内见细小的包裹体及裂纹,基本都有一个浑圆状到棱形的核(图2(a)),仅两颗锆石(z8; z41)没有核-边构造(图2(a)),在它们中间部位3个测点(z8-1; z41-1, 2)的平均

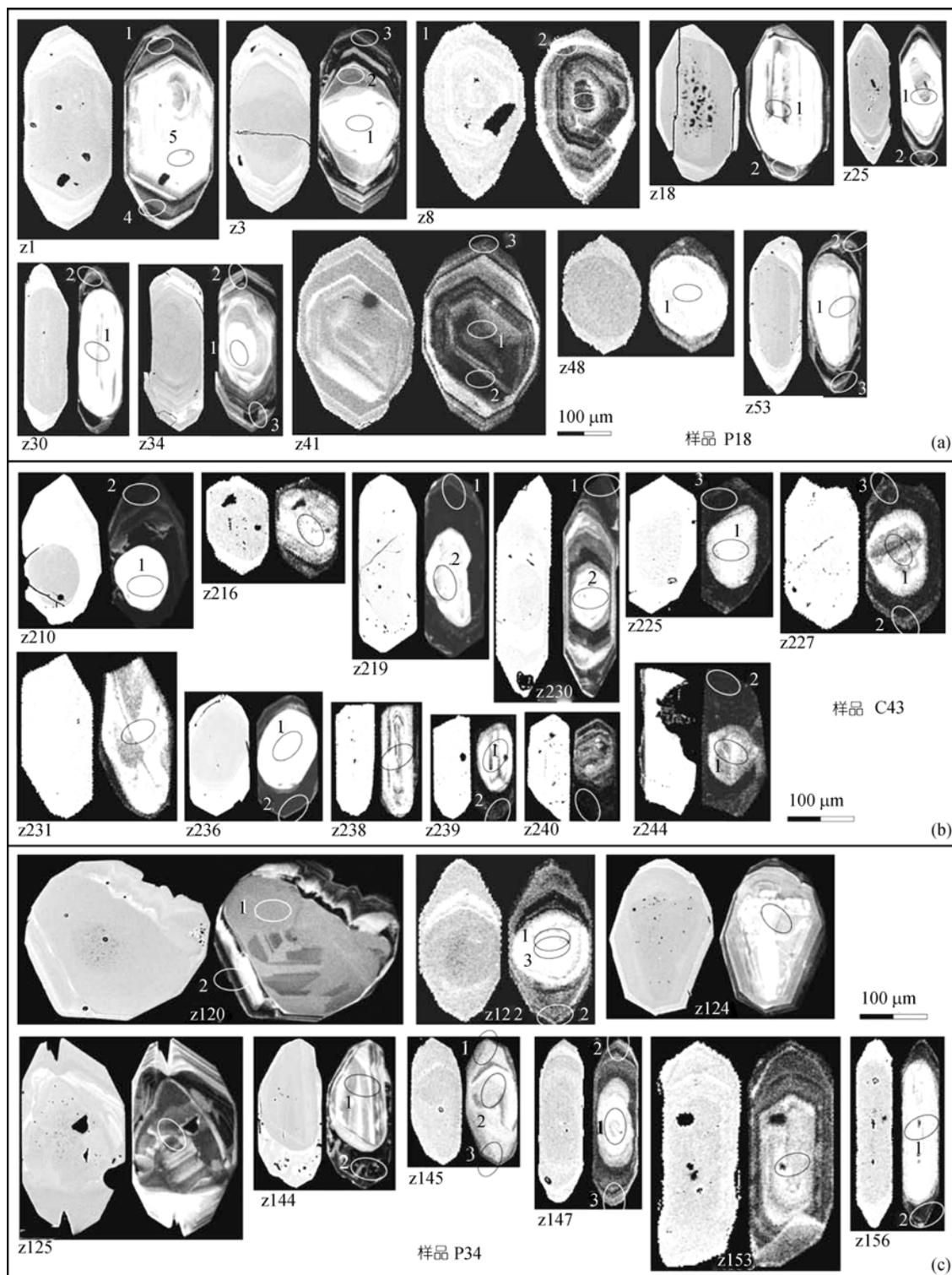


图 2 样品 P18, C43 及 P34 中锆石的背散射(每组影像的左侧图)和阴极发光图像(每组影像的右侧图)特征椭圆圈为 SHRIMP 测点的位置及离子束击打的有效区域

表1 喀喇昆仑断裂带中糜棱岩化片麻岩 P18, C43 和糜棱岩 P34 中锆石 SHRIMP U-Pb 同位素组成和年龄^{a)}

样品号	分析点	U /mg·g ⁻¹	Th /mg·g ⁻¹	Th/U	²⁰⁶ Pb* /mg·g ⁻¹	²⁰⁶ Pb _c %	²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U	± %	²⁰⁷ Pb* / ²³⁵ U	± %	²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U 年龄	±	²⁰⁷ Pb* / ²³⁵ U 年龄	±	²⁰⁷ Pb* / ²⁰⁶ Pb* 年龄	±	特征
P18	z1-1	2715	27	0.01	7	1.2	0.00307	7.0	0.0229	13.2	19.8	1.4	23	3.0			环带边缘
	z1-4	3171	49	0.02	11	0.8	0.00416	6.6	0.0255	11.4	26.8	1.8	25.5	2.9			环带边缘
	z1-5	210	114	0.56	9.4	-	0.05171	9.0	0.5064	21.0	325	29	416	72	958	380	环带核部
	z3-1	198	143	0.75	21	1.6	0.12095	6.9	1.1997	10.3	736	48	800	57	984	150	核部
	z3-2	2198	204	0.1	6	2.1	0.00315	8.4	0.0305	27.6	20.3	1.7	30.5	8.3			环带边缘
	z3-3	4883	240	0.05	15	1.4	0.00346	6.7	0.0251	11.3	22.2	1.5	25.2	2.8			环带边缘
	z8-1	2349	611	0.27	12	2.4	0.00559	6.9	0.0388	31.3	35.9	2.5	38.6	11.9			环带核部
	z8-2	1525	282	0.19	6	3.0	0.00424	7.3	0.0271	42.9	27.3	2.0	27.1	11.5			环带边缘
	z18-1	551	299	0.56	30	1.8	0.06328	6.6	0.5202	12.5	396	25	425	44	590	230	核部
	z18-2	1807	164	0.09	11	2.9	0.00697	6.8	0.0575	28.5	44.8	3.0	56.8	15.7			核部-边缘
	z25-1	869	310	0.37	53	0.9	0.07024	6.4	0.6103	7.5	438	27	484	29	709	79	核部
	z25-2	3139	510	0.17	10	2.6	0.00354	7.1	0.0306	13.2	22.8	1.6	30.6	4.0			环带边缘
	z30-1	365	179	0.51	22	1.3	0.07104	6.6	0.5746	10.2	442	28	461	38	555	170	核部
	z30-2	3722	503	0.14	12	3.1	0.00379	7.3	0.0283	46.4	24.4	1.8	28.4	13			边缘
	z34-1	381	98	0.27	10	3.5	0.02840	7.0	0.2156	41.6	181	13	198	75	415	900	核部
	z34-2	3292	1305	0.41	9	2.9	0.00327	6.7	0.0258	24.5	21.1	1.4	25.8	6.3			环带边缘
	z34-3	4762	853	0.19	16	3.0	0.00391	7.5	0.0281	33.8	25.2	1.9	28.1	9.4			环带边缘
	z41-1	2237	3026	1.4	10	2.7	0.00508	7.1	0.0319	26.1	32.7	2.3	31.9	8.2			环带核部
	z41-2	5857	1174	0.21	27	0.2	0.00541	6.5	0.0389	7.9	34.8	2.2	38.8	3.0			环带核部
	z41-3	2522	376	0.15	8.2	3.9	0.00362	7.9	0.0256	60.2	23.3	1.8	25.7	15.3			环带边缘
	z48-1	159	106	0.69	43	1.8	0.31625	6.9	4.8964	12.3	1771	106	1802	104	1837	180	核部
	z53-1	321	136	0.44	13	1.9	0.04658	6.7	0.3462	21.4	294	19	302	56	367	450	核部
	z53-2	2733	407	0.15	8	4.5	0.00336	7.0	0.0231	33.4	21.6	1.5	23.1	7.6			边缘
z53-3	5617	742	0.14	21	2.4	0.00426	6.9	0.0263	27.4	27.4	1.9	26.3	7.1			环带边缘	
C43	z210-1	478	86	0.19	42	12.6	0.10135	8.3	3.0387	9.0	622	49	1417	69	2962	54	核部
	z210-2	7392	17	0.00	15	1.4	0.00231	6.6	0.0149	16.6	14.9	1.0	15	2.5			环带边缘
	z216-1	541	219	0.42	150	1.2	0.32286	5.7	6.6488	5.8	1805	90	2066	51	2342	18	环带核部
	z219-1	19795	160	0.01	45	0.3	0.00267	6.4	0.0169	7.8	17.2	1.1	17	1.3			边缘
	z219-2	767	421	0.57	113	3.6	0.17101	6.5	2.3915	6.8	1018	61	1240	49	1650	42	核部
	z220-1	5787	307	0.05	14	1.4	0.00284	7.2	0.0184	19.3	18.3	1.3	18.5	3.5			环带边缘
	z220-2	555	99	0.18	13	-	0.02673	8.1	0.1942	16.5	170	14	180	27	315	320	核部
	z225-1	2000	155	0.08	70	9.8	0.04049	8.4	0.8485	9.0	256	21	624	42	2368	53	核部
	z225-3	13827	51	0.00	35	0.7	0.00293	6.8	0.0207	11.9	18.9	1.3	20.8	2.4			边缘
	z227-1	949	311	0.34	121	0.2	0.14816	6.5	1.4672	7.2	891	54	917	43	981	60	核部
	z227-2	16711	159	0.01	57	0.7	0.00392	6.7	0.0254	10.8	25.2	1.7	25.4	2.7			环带边缘
	z227-3	8724	67	0.01	20	0.8	0.00259	6.7	0.0148	21.2	16.7	1.1	14.9	3.1			环带边缘
	z231-1	679	188	0.29	45	0.3	0.07637	5.8	0.6048	8.2	474	27	480	31	554	120	核部
	z236-1	101	214	2.19	37	2.9	0.42231	6.8	9.1145	7.5	2271	130	2350	69	2419	54	核部
	z236-2	16522	113	0.01	49	0.4	0.00345	6.5	0.0224	8.1	22.2	1.4	22.5	1.8			边缘
	z238-1	1042	240	0.24	49	2.1	0.05463	2.9	0.4121	3.3	343	19	350	19	437	56	环带核部
	z239-1	712	203	0.29	166	1.8	0.27021	6.4	4.0398	6.7	1542	88	1642	55	1773	36	核部
	z239-2	9725	33	0.00	26	1.0	0.00311	6.6	0.0208	9.4	20.0	1.3	20.9	1.9			边缘
	z240	18440	335	0.02	35	0.4	0.00222	5.7	0.0135	7.4	14.3	0.8	13.6	1.1			边缘
	z244-1	1379	119	0.09	4	1.9	0.00337	6.2	0.0130	20.6	21.7	1.4	13.1	6.4			核部
z244-2	6795	15	0.00	12	0.3	0.00202	5.8	0.0116	10.4	13.0	0.8	11.7	2.0			边缘	

表 1(续)

样品号	分析点	U /mg·g ⁻¹	Th /mg·g ⁻¹	Th/U	²⁰⁶ Pb* /mg·g ⁻¹	²⁰⁶ Pb _c %	²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U	± %	²⁰⁷ Pb* / ²³⁵ U	± %	²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U 年龄	±	²⁰⁷ Pb* / ²³⁵ U 年龄	±	²⁰⁷ Pb* / ²⁰⁶ Pb* 年龄	±	特征
P34	z120-1	230	2	0.01	1	1.4	0.00324	9.3	-	-	20.9	2.2	-	-			重结晶核
	z120-2	2542	15	0.01	7	0.6	0.00311	6.0	0.0211	10.2	20.0	1.2	21.2	2.7			环带边缘
	z122-1	335	87	0.27	22	5.4	0.07681	5.8	0.9770	7.5	477	27	692	38	1509	89	核部
	z122-2	1776	54	0.03	6	0.2	0.00419	6.0	0.0228	9.6	26.9	1.6	22.9	4.4			环带边缘
	z122-3	270	85	0.33	22	6.9	0.09295	5.9	1.3688	7.6	573	32	876	45	1777	86	核部
	z124-1	254	106	0.43	41	0.9	0.18703	5.8	2.3562	6.4	1105	59	1229	45.9	1485	50	核部
	z125-1	1280	187	0.15	98	1.7	0.08843	6.3	0.9941	7.8	546	33	701	46.2	1325	87	重结晶核
	z144-1	641	120	0.19	63	0.6	0.11461	5.9	1.2030	6.6	700	39	802	36.5	1138	55	核部
	z144-2	5369	353	0.07	12	2.6	0.00243	6.4	0.0139	58.3	15.6	1.0	14	10.6			边缘
	z145-1	1063	106	0.1	48	0	0.05271	9.6	0.4146	10.8	331	31	352	32.2	546	110	环带边缘
	z145-2	496	165	0.34	54	1.9	0.12584	6.0	1.1972	7.3	764	43	799	40.8	942	85	环带核部
	z145-3	879	85	0.1	42	10.2	0.05032	6.8	0.5033	50.9	317	21	414	180	1047	1000	环带边缘
	z147-1	509	64	0.13	19	0.9	0.04277	5.9	0.3387	7.3	270	16	296	22.7	611	91	核部
	z147-2	1362	86	0.07	3	0.9	0.00283	6.7	0.0205	11.4	18.2	1.2	20.6	3.0			环带边缘
	z147-3	2057	121	0.06	7	1.1	0.00369	6.1	0.0222	11.7	23.8	1.5	22.3	6.7			环带边缘
	z153-1	446	196	0.45	21	3.0	0.05357	5.9	0.3864	16.7	336	20	332	55.5			核部
	z156-1	171	143	0.86	7	6.1	0.04560	6.2	0.3565	12.0	287	18	310	48	774	210	核部
z156-2	2479	106	0.04	9	1.5	0.00407	6.4	0.0260	10.7	26.2	1.7	26.1	4.3			环带边缘	

a) ²⁰⁶Pb_c: 普通铅比例; ²⁰⁶Pb*: 放射性成因铅含量; 年龄单位为 Ma

²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为(34.5 ± 1.9) Ma (表 1, 图 3(a)); 对 9 颗锆石的边缘进行了 13 个点(z1-1, 4; z3-2, 3; z8-2; z18-2; z25-2; z30-2; z34-2, 3; z41-3; z53-2, 3)的分析(图 2(a)), 其年龄为(27.4 ± 1.9)~(19.8 ± 1.4) Ma (表 1, 图 3(a)); 在 8 颗锆石中, 一个棱形和 7 个次圆形的核(z1-5; z3-1; z18-1; z25-1; z30-1; z34-1; z48-1; z53-1)(图 2(a))得到的年龄为 1.8 Ga~180 Ma (表 1, 图 3(b)), 其中 6 个谐和线上的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄分布在(438 ± 27)~(181 ± 13) Ma 之间(表 1, 图 3(b)).

3.2 样品 C43

在样品 C43 中挑取了具有代表性的 12 颗锆石进行 SHRIMP U-Pb 测年(图 2(b), 表 1). 这些锆石颗粒总体略小于样品 P18 中的锆石, 外形特征主要呈长柱状或短柱状, 无色、透明, 内见细小的包裹体及裂纹, 基本都具有圆形或棱形的核(图 2(b)). 10 个锆石边缘测点(z210-2; z219-1; z220-1; z225-3; z227-2, 3; z236-2; z239-2; z240; z244-2)的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为(25.2 ± 1.7)~(13.0 ± 0.8) Ma (表 1, 图 3(c)); 有一颗锆石的核部(z244-1)的年龄为(21.7 ± 1.4) Ma, 也在上述年龄范围之内. 另外, 10 个锆石核部测试点(z210-1; z216-1; z219-2; z220-2; z225-1; z227-1; z231-1; z236-1; z238-1; z239-1)的年龄跨度较大, 其范围为 3.0 Ga (²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb)至 170 Ma (²⁰⁶Pb/²³⁸U) (表 1, 图 3(d)).

3.3 样品 P34

在样品 P34 中挑取了 9 颗具有代表意义的锆石进行 SHRIMP U-Pb 测年(图 2(c), 表 1), 锆石外形特征主要呈长柱状、短柱状及次浑圆状, 无色、透明, 部分锆石的核和边缘都有环带构造(图 2(c)), 只是常常较为杂乱. 5 个锆石边缘(z120-2; z122-2; z147-2, 3; z156-2)的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为(26.9 ± 1.6)~(18.2 ± 1.2) Ma (表 1, 图 3(e)). 有一个锆石边缘的年龄(点 z144-2)最年轻为(15.6 ± 1.0) Ma (见表 1). 另外, 有一颗锆石核部(z120-1)没有得到可靠的 ²⁰⁷Pb/²³⁵U 年龄, 但是它的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为(20.9 ± 2.2) Ma (表 1). 3 个核部(z147-1, z153-1, z156-1)和 2 个边缘部分(z145-1, 3)的谐和年龄约为 300 Ma (表 1, 图 3(f)), 另 6 个核部测试点(z122-1, 3; z124; z125; z144-1; z145-2)的年龄(²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb)为 1.8~0.9 Ga.

4 讨论

4.1 锆石成因及年龄特征

() 样品 P18. 样品中的锆石大部分都存在一个深色的边缘区域包围一个浑圆状到棱形的核(图 2(a)), 其边缘反映出高 U 的特征^[26,27]. 大部分锆石的核和边缘显示出清晰的振荡环带, 其中两颗锆石(z8; z41)整体显示均一的振荡环带(图 2(a)), 并且

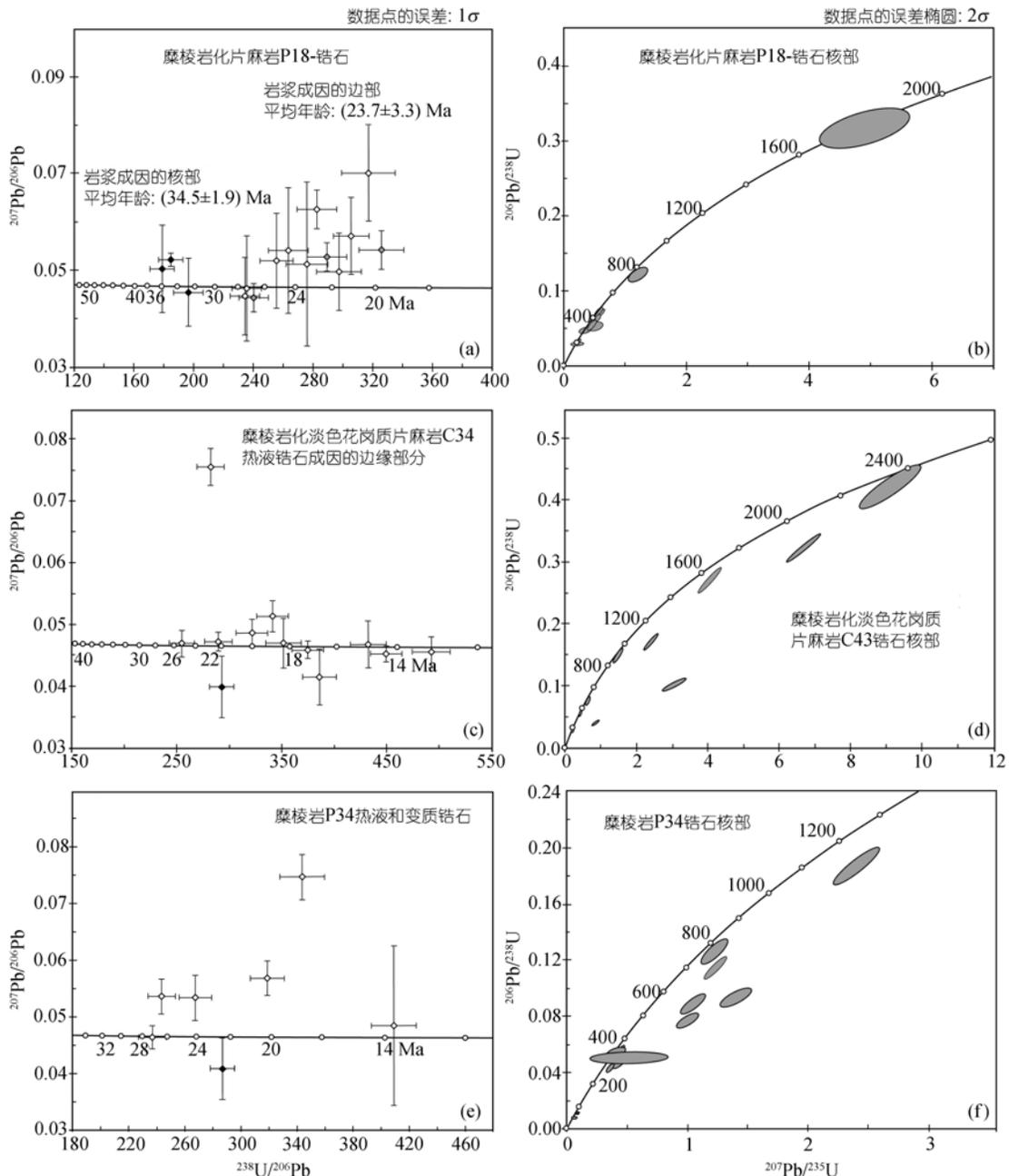


图3 喀喇昆仑断裂带中糜棱岩(P34)和糜棱岩化岩石(P18, C43)中的锆石 SHRIMP U-Pb 测年谱和曲线图

具有高Th/U比值(0.21~1.40)特征, 呈现出典型的岩浆成因 [27~29], 其平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为(34.5 ± 1.9) Ma (表1, 图3(a)), 表明新的岩浆成因锆石的结晶时代约为35 Ma, 它可能是早期地壳加厚导致的局部熔融, 也可能是在剪切过程中形成, 这还有待于进一步研究; 这些锆石的边缘中, 有8颗锆石10个点(z3-2; z8-2; z18-2; z25-2; z30-2; z34-2, 3; z41-3; z53-2, 3)的 Th/U 比值较高(0.10~0.41), 可能为岩浆成因, 其

年龄为(27.4 ± 1.9)~(20.3 ± 1.7) Ma (表1, 图3(a)), 另外, 有3个 Th/U 比值较低(0.01~0.05)点(z1-1, 4; z3-3)的年龄为(26.8 ± 1.8)~(19.8 ± 1.4) Ma, 可能代表的是变质成因的增生锆石年龄. 它们反映了剪切过程中的熔融作用和变质作用的年代; 这些锆石中的核, 它们的 Th/U 比值 > 0.1~0.2 (0.27~0.75), 结合阴极发光特征来看(图2(a)), 可能为岩浆成因, 因此, 它们的年龄 1.8~180 Ma 可能代表早期岩浆活动的时代.

() 样品 C43. 样品中的 12 颗锆石基本都具有浅色的圆形或棱形的核, 外部被很深的灰黑色边缘包围(图 2(b)), 这些灰黑色的边缘表明相对于核部具有较高的 U 含量 [26,27]. 部分锆石的核部和边缘具有明显的扇形或振荡环带现象. 10 个锆石边缘 (z210-2; z219-1; z220-1; z225-3; z227-2, 3; z236-2; z239-2; z240; z244-2) 的 Th/U 比值较低 (0.01~0.05), 以及根据阴极发光图像特征(图 2(b)), 它们反映出典型的变质成因(边缘部分), 另外, 它们具有相对于核部 U 含量特别富集 (6800~20000 $\mu\text{g/g}$) 的特征(表 1), 这可能暗示锆石边缘的结晶过程中具有变质流体的介入 [27], 因此, 这些锆石的边缘部分的年龄 (25.2 ± 1.7)~(13.0 ± 0.8) Ma (表 1, 图 3(c)) 可能反映的是热液活动过程中锆石生长(变质热液锆石)的年龄, 应该是在富含流体的韧性剪切过程中生长. 另外, 有一颗锆石 (Z244) 核部的年龄为 (21.7 ± 1.4) Ma, 它的 Th/U 比值为 0.09, 可能为变质成因, 是剪切过程中变质锆石的生长时代; 10 个锆石核部 (z210-1; z216-1; z219-2; z220-2; z225-1; z227-1; z231-1; z236-1; z238-1; z239-1) 的 Th/U 比值为 0.18~2.2, 可能为岩浆成因, 它们的年龄范围为 3.0 Ga~170 Ma (表 1, 图 3(d)), 反映的是早期岩浆成因锆石的残留.

() 样品 P34. 样品中大部分锆石的核和边缘都有环带构造(图 2(c)). 5 个锆石边缘 (z120-2; z122-2; z147-2, 3; z156-2) 的 Th/U 比值较小 (0.01~0.08), 并根据阴极发光图像特征(图 2(c)), 可看出它们反映为变质成因锆石特征, 这些锆石边缘部分 U 含量 (1400~5400 $\mu\text{g/g}$) 比具有岩浆特征的核部 (Th/U 比值 0.27~0.86) U 含量 (300~600 $\mu\text{g/g}$) 更值得注意和重视. 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 (26.9 ± 1.6)~(18.2 ± 1.2) Ma (表 1, 图 3(e)) 代表剪切过程中变质作用的年代; 有一颗锆石边缘的年龄 (点 z144-2) 最年轻为 (15.6 ± 1.0) Ma (见表 1), 从该颗粒的背散射图像(见图 2(c) 中 z144) 中可看出, 其边缘部分具有很多包裹体, 阴极发光图像上反映出明、暗区域不规则交替, 因此, 该年龄可能是稍后的变质作用的记录, 或者可能与放射性 Pb 的丢失有关; 另外, 有一颗具有较低 Th/U 比值 (0.01) 的锆石核部 (点 z120-1) 只得到了它的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 (20.9 ± 2.20) Ma (表 1), 这可能反映了一个较老的岩浆结晶的半固态状态下的重结晶作用 [26]; 其他点的 Th/U 比值较高 (0.1~0.86), 可能大部分为早期的岩浆成因, 所测试年龄反映的是继承锆石的年龄, 其中包括约为 300 Ma 的谐和年龄(表 1,

图 3(f)) 和锆石核部的 ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) 1.8~0.9 Ga 的年龄.

4.2 喀喇昆仑韧性剪切带的活动时代

具有典型岩浆成因特征的锆石年龄 27~20 Ma (样品 P18) 代表了高温 (>500) 变形过程中同构造部分熔融环境下锆石结晶的年龄, 该年龄也代表了糜棱岩化片麻岩的形成时代, 其平均年龄为 (23.7 ± 3.1) Ma (见图 3(a)). 具有变质成因特征的增生锆石年龄约为 27~20 Ma (样品 P18), 约 25~13 Ma (样品 C43) 以及约为 27~18 Ma (样品 P34) 代表的是变质作用的年代, 这一期的变质作用时代与剪切熔融作用的年代一致, 与喀喇昆仑断裂的右旋剪切活动有关, 它们是在第三纪的变形中表现出的再结晶. 而 3.0 Ga~170 Ma 的年龄反映的是继承锆石的年龄, 代表早期阶段的岩浆活动时代.

另外, 样品 P18 中岩浆锆石的 (34.5 ± 1.9) Ma 的年龄, 反映了阿伊拉日居山北东侧存在有约为 35 Ma 岩浆事件, 那么, 可能说明约为 27~20 Ma 时期的高温变形作用的温度将不超过锆石 U-Pb 体系的封闭温度 650~900 [12,30,31], 其变形温度可能为 >500~750 (或约为 850) 之间, 否则约为 35 Ma 的岩浆作用年龄将被重置. 从野外观测来看, 约为 35 Ma 岩浆作用可能由于是地壳加厚产生部分熔融, 它是否有可能代表最早的剪切熔融时代还值得进一步研究和讨论, 因为在青藏高原和喜马拉雅地区有地壳规模的逆冲作用产生的早渐新世花岗岩, 在帕米尔地区有 35 Ma 花岗岩脉 [32], 另外, Lacassin 等 [8] 对扎西岗地区糜棱岩化淡色花岗质片麻岩中的锆石进行了 ID-TIMS U-Pb 分析, 其上交点的年龄为 (1300 ± 100) Ma, 下交点的年龄为 (32 ± 3) Ma, 那么, 距今约为 35 Ma 前的岩浆作用似乎是沿喀喇昆仑剪切带局部剪切熔融的结果, 无论是否, 应该值得重视. 因此, 我们推测喀喇昆仑断裂最早的形成时代至少在距今约为 27 Ma 以前.

4.3 喀喇昆仑断裂的形成及区域构造意义

我们在阿伊拉日居山的东南部地区, 根据新的岩石、构造和年代学证据所得到的喀喇昆仑断裂开始发生右旋走滑剪切的年代要早于目前的研究 [3~6,10], 至少在距今 27 Ma 以前.

在阿伊拉日居山西北部约 200 km 的地区, 受剪切的 Tangze 花岗岩 (或称班公山花岗岩) 和有关的变形脉体的年龄为 (18 ± 0.6) Ma [4] 和 (15.6 ± 0.5)~(13.7 ± 0.2) Ma [10], 他们解释为韧性剪切作用发生在花岗

岩形成之后, 剪切作用的年代最早不超过约为 18 Ma, 然而, 在具S/C组构的花岗岩中, 长石的重结晶以及由亚颗粒旋转和颗粒边界移动产生的石英动态重结晶作用, 以及出现同构造云母等证据, 可能表明Tangze花岗岩是在变形过程中结晶形成^[33]. 结合我们的结果, 我们认为 18 Ma和约为 15.6~13.7 Ma是喀喇昆仑断裂后期强烈右旋走滑活动伴随同构造岩浆活动的时代.

在更远的西北部, Baltoro花岗岩结晶时代为 26~20 Ma^[34,35], 由于该花岗岩被喀喇昆仑断裂带切割, 因此解释为该年龄是断裂右旋走滑运动之前的岩浆活动^[4,12], 从卫星影像特征及地质图上来看, 该岩体空间展布呈弱“S”, 在喀喇昆仑断裂西侧约 100 km处, 岩体的南、北边缘走向约为N110°, 向东逐渐转变成平行于喀喇昆仑断裂(走向约为N142°), 在花岗岩侵入过程中, 沿着其南部接触带形成向南的逆冲构造^[36], 而岩体的东部边界, 沿喀喇昆仑断裂表现出右旋剪切特征的S/C构造^[36], 并伴随有石英、长石的重结晶作用. 似乎由于沿着南、北接触带的高温逆冲-剪切作用, 以及沿东部边界的右旋剪切, 造成同构造的Baltoro花岗岩侵入, 并产生“S”形花岗岩体, 这种反转逆冲构造与喀喇昆仑断裂相连, 其逆冲、右旋走滑作用一直持续到现在, 因而, Tangze岩体很可能是 26~17 Ma的同构造Baltoro花岗岩侵入后, 在喀喇昆仑断裂形成后再次活动的表现^[37], 沿着断裂带的变形变质事件约为 20~10 Ma^[38], 因此, 在Baltoro地区附近喀喇昆仑断裂早期活动至少在 20 Ma以前. 在Baltoro岩体和Tangze岩体之间被拉长的Siachen岩体的年龄为(15.9 ± 0.1)~(13.7 ± 0.3) Ma^[10]. 在喀喇昆仑断裂的西北端布伦口地区alkali同构造花岗岩的结晶时代为 20~18 Ma^[39].

另外, 我们得到了该地区剪切带中, 变形岩石的钾长石多阶段升温的⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄, 其高温阶段的年龄约为 21~15 Ma(另文), 它反映了剪切带形成时代的最小值 21 Ma.

上述不同的年龄分布在喀喇昆仑断裂的不同位置, 反映了不同区域的岩浆活动和构造活动时限, 其意义表明了喀喇昆仑断裂存在多期强烈的构造-岩浆活动, 或可能反映了不同地段断裂的不同活动时限, 或可看作是断裂生长的演化过程. 从分布特征来看, 喀喇昆仑断裂的最早的活动时代约为 27 Ma, 在断裂的东南段, 向西北段活动时代总体变年轻, 因此, 断

裂生长可能是由南东向北西扩展的过程, 与印度板块与欧亚大陆持续的斜向碰撞挤压有关. 并且, 在约为 27~20 Ma以后或更晚才可能存在青藏高原西部物质向东的大规模挤出作用.

5 结论

() 喀喇昆仑韧性剪切带最早的活动时代至少在距今约为 27 Ma 以前, 并且发生高温右旋剪切变形, 因此, 喀喇昆仑断裂的形成时代至少为距今约为 27 Ma 以前.

() 喀喇昆仑断裂发生大规模的高温右旋剪切活动至少在 27~20 Ma期间, 并且伴随淡色的同构造花岗岩的产生, 比前人通常认为的喀喇昆仑断裂在 18~11 Ma^[3-6,10]期间形成的观点要早约 10 Ma.

() 沿喀喇昆仑断裂温泉的线形分布, 表明沿断裂带存在着较强的热液作用. 变质成因和热液成因特征锆石的 U-Pb 同位素年龄(见图 3(c), (e)), 暗示着喀喇昆仑断裂走滑剪切变形过程中伴随大量热液流体作用的时限至少在 25~13 Ma 期间.

() 由于糜棱岩的快速冷却时代约为 12 Ma^[8,9], 因此, 喀喇昆仑断裂的连续变形作用从约为 27 Ma至少持续到约为 12 Ma, 而大量热液流体作用的时限与之近一致, 之后伴随阿伊拉日居山的快速隆升以及噶尔盆地开始形成.

() 喀喇昆仑断裂的生长可能是由南东向北西扩展的过程, 与印度板块与欧亚大陆持续的斜向碰撞挤压有关.

致谢 锆石 U-Pb SHRIMP 测年工作得到了北京离子探针中心宋彪、万俞生研究员的帮助, 在样品制作过程中陶华给予了帮助, 两位审稿人和特约编辑对本文提出了建设性的修改意见, 在此一并谨致谢忱.

参 考 文 献

- 1 Avouac J P, Tapponnier P. Kinematic model of active deformation in central Asia. *Geophys Res Lett*, 1993, 20 (10): 895—898
- 2 Wright T J, Parsons B, England P C, et al. InSAR observations of low slip rates on the major faults of Western Tibet. *Science*, 2004, 305: 236—239[DOI]
- 3 Matte P, Tapponnier P, Arnaud N, et al. Tectonics of Western Tibet, between the Tarim and the Indus. *Earth Planet Sci Lett*, 1996, 142: 311—330 [DOI]
- 4 Searle M P, Weinberg R F, Dunlap W J. Transpressional tectonics along the Karakoram fault zone, northern Ladakh: constraints on Tibetan extrusion. In: Holdsworth R E, Strachan R A, Dewey J F, eds. *Continental Transpressional and Transtensional Tectonics*.

- Geol Soc London Spec Pub, 1998, 135: 307—326
- 5 Murphy M A, Yin A, Kapp P, et al. Southward propagation of the Karakoram fault system, southwest Tibet: timing and magnitude of slip. *Geology*, 2000, 28: 451—454[DOI]
- 6 Murphy M A, Yin A, Kapp P, et al. Structural evolution of the Gurla Mandatha detachment system, southwest Tibet: implications for the eastward extent of the Karakoram fault system. *Geol Soc Am Bull*, 2002, 114: 428—447[DOI]
- 7 Zhou Y, Xu R H, Yan Y H, et al. Dating of the Karakorum Strike-slip Fault. *Acta Geol Sin*, 2001, 75(1): 10—18
- 8 Lacassin R, Valli F, Arnaud N, et al. Large-scale geometry, offset and kinematic evolution of the Karakoram fault, Tibet. *Earth Planet Sci Lett*, 2004, 219: 255—269[DOI]
- 9 Valli F. Décrochements Lithosphériques Dans l'Ouest du Plateau du Tibet: Géométrie, age, décalages cumulés et vitesse de glissement long-terme sur la Faille du Karakorum, Dissertation for the Doctoral Degree. Paris: Université Paris 7, 2005
- 10 Phillips R J, Parrish R R, Searle M P. Age constraints on ductile deformation and long-term slip rates along the Karakoram fault zone, Ladakh. *Earth Planet Sci Lett*, 2004, 226: 305—319[DOI]
- 11 Searle M P. *Geology and Tectonics of the Karakoram Mountains*, Map 2538. John Wiley and Sons, Chichester, 1991
- 12 Searle M P. Geological evidence against large-scale pre-Holocene offsets along the Karakoram fault: implications for the limited extrusion of the Tibetan Plateau. *Tectonics*, 1996, 15: 171—186[DOI]
- 13 Zhang Q S, Li B Y, Wang F B, et al. A discussion on the uplifting of the Karakorum-Kunlun mountains and its impact on environmental changes. In: Abstracts of international symposium on the Karakoram and Kunlun mountains, 1992. 95
- 14 尹集祥, 边千韬. 喀喇昆仑山-西昆仑山及邻区地质图. 北京: 科学出版社, 1995
- 15 Chevalier M L, Ryerson F J, Tapponnier P, et al. Slip-rate measurements on the Karakoram fault may imply secular variations in fault motion. *Science*, 2005, 307: 411—414[DOI]
- 16 李海兵, Valli F, 许志琴, 等. 喀喇昆仑断裂的变形特征及构造演化. *中国地质*, 2006, 33(2): 239—255
- 17 Gapais D. Les Orthogneiss: Structures, mécanismes de déformation et analyse cinématique, Mem Doc. CAESS, 1989, 28: 1—366
- 18 Leloup P H, Lacassin R, Tapponnier P, et al. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina. *Tectonophysics*, 1995, 251: 3—84[DOI]
- 19 Simpson C, Wintsch R P. Evidence for deformation-induced K-feldspar replacement by myrmekite. *J Metam Geol*, 1989, 7: 261—275
- 20 Passchier C W, Trouw R A J. *Microtectonics*. Berlin: Springer-Verlag, 1996. 1—289
- 21 Tsurumi J, Hosonuma H, Kanagawa K. Strain localization due to a positive feedback of deformation and myrmekite-forming reaction in granite and aplite mylonites along the Hatagawa Shear Zone of NE Japan. *J Struct Geol*, 2003, 25: 557—574[DOI]
- 22 Olesen N O. Plagioclase fabric development in a high-grade shear zone, Jotunheimen, Norway. *Tectonophysics*, 1987, 142: 291—308[DOI]
- 23 Gower J W, Simpson C. Phase boundary mobility in naturally deformed, highgrade quartzofeldspathic rocks: evidence for diffusional creep. *J Struct Geol*, 1992, 14 (3): 301—313[DOI]
- 24 Leloup P H, Arnaud N, Lacassin R, et al. New constraints on the structure, thermochronology and timing of the Ailao Shan-Red River shear zone. *J Geophys Res*, 2001, 106(B4): 6657—6671
- 25 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. *地质论评*, 2002, 48 (增刊): 26—30
- 26 Hanchar J M, Rudnick R L. Revealing hidden structures: The application of cathodoluminescence and back-scattered electron imaging to dating zircons from lower crust xenoliths. *Lithos*, 1995, 36: 289—303[DOI]
- 27 Rubatto D, Gebauer D. Use of Cathodoluminescence for U-Pb Zircon Dating by Ion Microprobe (SHRIMP): some examples from high-pressure rocks of the Western Alps. In: Pagel M, Barbin V, Blanc P, et al, eds. *Cathodoluminescence in Geosciences*, Berlin: Springer-Verlag, 1998. 373—400
- 28 Gebauer D. A P-T-t-path for an (ultra?) high-pressure ultramafic/mafic rock-association and its felsic country-rocks based on SHRIMP-dating of magmatic and metamorphic zircon domains; example: Alpe Arami (Central Swiss Alps). *Am Geophys Union*, 1996, 309—328
- 29 Vavra G, Gebauer D, Schmid R, et al. Multiple zircon growth and recrystallization during polyphase Late Carboniferous to Triassic metamorphism in granulites of the Ivrea Zone (Southern Alps): an ion microprobe (SHRIMP) study. *Contrib Mineral Petrol*, 1996, 122: 337—358[DOI]
- 30 Cherniak D J, Watson E B. Diffusion in Zircon. In: Hanchar J M, Hoskin P W O, eds. *ZIRCON*. Mineral Soc Am, 2003, 53: 113—143
- 31 Lee J, Williams I, Ellis D J. Pb, U and Th diffusion in natural zircon. *Nature*, 1997, 390: 159—163[DOI]
- 32 Fraser J E, Searle M P, Parrish R R, et al. Chronology of deformation, metamorphism, and magmatism in the southern Karakoram mountains. *Geol Soc Am Bull*, 2001, 113 (11): 1443—1455[DOI]
- 33 Weinberg R F, Searle M P. The Pangong Injection Complex, Indian Karakoram: A case of pervasive granite flow through hot viscous crust. *J Geol Soc London*, 1998, 155: 883—891
- 34 Parrish R R, Tirrul R. U-Pb age of the Baltoro granite, northwest Himalaya, and implications for monazite U-Pb systematics. *Geology*, 1989, 17: 1076—1079[DOI]
- 35 Schärer U, Harrison T M, Searle M P. Age, cooling history and origin of postcollisional leucogranites in the Karakoram batholith: a multi-system isotope study N Pakistan. *J Geol*, 1990, 98: 233—251
- 36 Searle M P, Crawford M B, Rex A J. Field relations, geochemistry, origin and emplacement of the Baltoro granite, central Karakoram, Transactions of the Royal Society of Edinburgh. *Earth Science*, 1992, 83: 519—538
- 37 Mahéo G, Pêcher A, Guillot S, et al. Exhumation of Neogene gneiss dome between two oblique crustal boundaries in south Karakoram (NW, Himalaya, Pakistan). In: Whitney D L, Teysier C, Siddoway C S, eds. *Gneiss Domes in Orogeny*. *Geol Soc Am Spec Pap*, 2004, 380: 141—154
- 38 Bhutani R, Pande K, Desai N. Age of the Karakoram fault activation: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological study of Shyok suture zone in northern Ladakh, India. *Curr Sci*, 2003, 84: 1454—1458
- 39 Arnaud N. Apports de la thermochronologie $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ sur feldspath potassique à la connaissance de la tectonique cénozoïque d'Asie, Dissertation for the Doctoral Degree. Clermont-Ferrand: Université Clermont-Ferrand, 1992