

阿尔泰地区青河县西南片麻岩中锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义*

胡霭琴 韦刚健 邓文峰 陈林丽

HU AiQin, WEI GangJian, DENG WenFeng and CHEN LinLi

中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室, 广州 510640

Key Laboratory of Isotope Geochronology and Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2005-10-24 收稿, 2005-12-07 改回.

Hu AQ, Wei GJ, Deng WF and Chen LL. 2006. SHRIMP zircon U-Pb dating and its significance for gneisses from the southwest area to Qinghe County in the Altai, China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 1-10

Abstract Formation age of metamorphic rocks occurred in Altai orogen of China has been questioned up to now, especially, since most part of metamorphic rocks were designated to be Paleo Proterozoic to Meso-Proterozoic metamorphic rocks by the geoscientific survey team of China-Kazakstan. Qinghe gneiss studied in this paper occurs in the southwest area to Qinghe County and locates in Erqishi shearing zone. Geochemical characteristics and Nd-Sr isotopic compositions of gneisses show formation in island arc setting. SHRIMP U-Pb analyses for zircons from an andesitic gneiss yield a precise age of $281 \pm 3(2\sigma)$ Ma, representing formation age of the gneiss. Any older zircons or related Precambrian ages from the Qinghe gneiss have been never found in this study, consequently this result does not support opinion about formation of Qinghe gneiss in Precambrian. Combined with characteristics of cathodoluminescence images of zircons from this gneiss, it is indicated that metamorphism and magmatism could be happened during period of 293 ± 6 Ma ~ 271 ± 5 Ma. The available data confirm the time limit of a significant geological thermal event in the Altai Orogen during the early Permian. To combine zircon U-Pb SHRIMP age of Qinghe gneiss and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of hornblende and biotite from Erqishi shearing zone, important kinetic events, including tectonics, metamorphism and fast cooling or rapid uplifting in Altai orogen during late Paleozoic were revealed. This precise and credible zircon SHRIMP age of the Qinghe gneiss possibly provides a primary evidence for study on time limit of closure of Paleo-Asia Ocean and continental thrust during the late Paleozoic.

Key words Altai of China, Qinghe County, Gneiss, SHRIMP zircon U-Pb age

摘要 有关阿尔泰造山带中变质岩形成时代问题, 目前仍有争议。特别是中国-哈萨克斯坦联合地质科学考察队将其绝大部分均划为古元古-中元古代变质岩系后, 更引起诸多地质学家的关注。本文研究的青河片麻岩出露在青河县西南地区, 在构造上处于额尔齐斯剪切带。青河片麻岩的元素地球化学和 Nd-Sr 同位素组成特征表明其原岩形成于岛弧构造环境。应用精确的 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年, 获得该变质岩系中英安质片麻岩中锆石的年龄为 $281 \pm 3(2\sigma)$ Ma, 代表其片麻岩的形成年龄。研究中未发现有任何前寒武纪古老锆石或相关的年龄信息, 因此研究结果不支持该区变质岩为“前寒武纪”的观点。结合片麻岩中锆石阴极发光图像特征, 说明该地区的变质作用和岩浆作用的时间范围在 293 ± 6 Ma ~ 271 ± 5 Ma 期间。因此, 该项研究结果确定了阿尔泰造山带发生在二叠纪早期一次重要地质热事件的可靠时限。额尔齐斯构造剪切带中青河片麻岩的锆石 U-Pb 年龄, 以及各种变质岩中角闪石和黑云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄, 记录了阿尔泰造山带晚古生代时期一次重要的构造、变质作用、快速隆升的动力学过程, 为研究晚古生代古亚洲洋的闭合或大陆的回返时限提供了初步的证据。

关键词 中国阿尔泰; 青河县; 片麻岩; SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄

中图法分类号 P597.3; P588.345

* 国家重点基础研究发展规划项目“中亚造山与成矿研究”(编号:2001CB409805)、国家自然科学基金项目(40173026)和中国科学院广州地球化学研究所创新项目(A15-041107)资助成果。

第一作者简介: 胡霭琴, 女, 1940年生, 研究员, 同位素年代学和地球化学, E-mail: huaq@gig.ac.cn

1 背景资料和研究目的

关于阿尔泰造山带中变质岩系的形成时代,目前仍是一个有争议的问题。中国-哈萨克斯坦联合地质科研队在1990~1994年间对阿尔泰地区的研究中,将我国阿尔泰造山带中大部份变质岩均划为古-中元古界克木齐群和新元古代富蕴群(图1;李天德等,1996;2001),而主张这套变质岩系是古生代变质地层的观点仍然提出了大量的论证,如:庄育勋(1994a, b)将这套变质岩看作区域热动力变质作用产物,划为泥盆和石炭纪地层;Windley BF(1998)也持有同样的观点。近来,厉子龙等(2004)通过详细的岩相学和矿物学研究,证实了阿尔泰地区乌恰沟有基性麻粒岩存在,位于额尔齐斯构造带中。由于中国-哈萨克斯坦联合地质科研队的研究成果(包括1/50万地质图)是我国“八五”期间国家科技

攻关项目的一项重要研究成果,目前得到广泛的应用,特别是一些近期出版的论著中被大量引用(陈毓川等,1996;王京彬等,1998)。按李天德等(1996)的划分,阿尔泰造山带中的前寒武纪地层主要出露在三个地区,即阿勒泰至布尔津一线、富蕴西南和乌恰沟地区,以及石人桥一带、青河县城西南等地区。划分地层的时代的依据中,包含了大量长石 Pb 同位素的二阶段模式年龄的 t_1 年龄(曲国胜等,1991)、Nd 模式年龄(胡霭琴等,1991, 国家三〇五项目研究报告,正式发表见胡霭琴等,1997),以及 Sm-Nd 等时线年龄(胡霭琴等,1994 年国家三〇五项目研究报告,正式发表数据见胡霭琴等,2002)。由于长石 Pb 同位素二阶段模式年龄和 Nd 模式年龄均是由设定的地壳演化特定模式出发,计算出的理论上的“地壳增生”时间,并不是目前存在的地质体的形成年龄,只具有探讨地壳的演化或岩石的物质源区特征的意义等,是不能作为划分地质体侵位或地层时代的依据的。

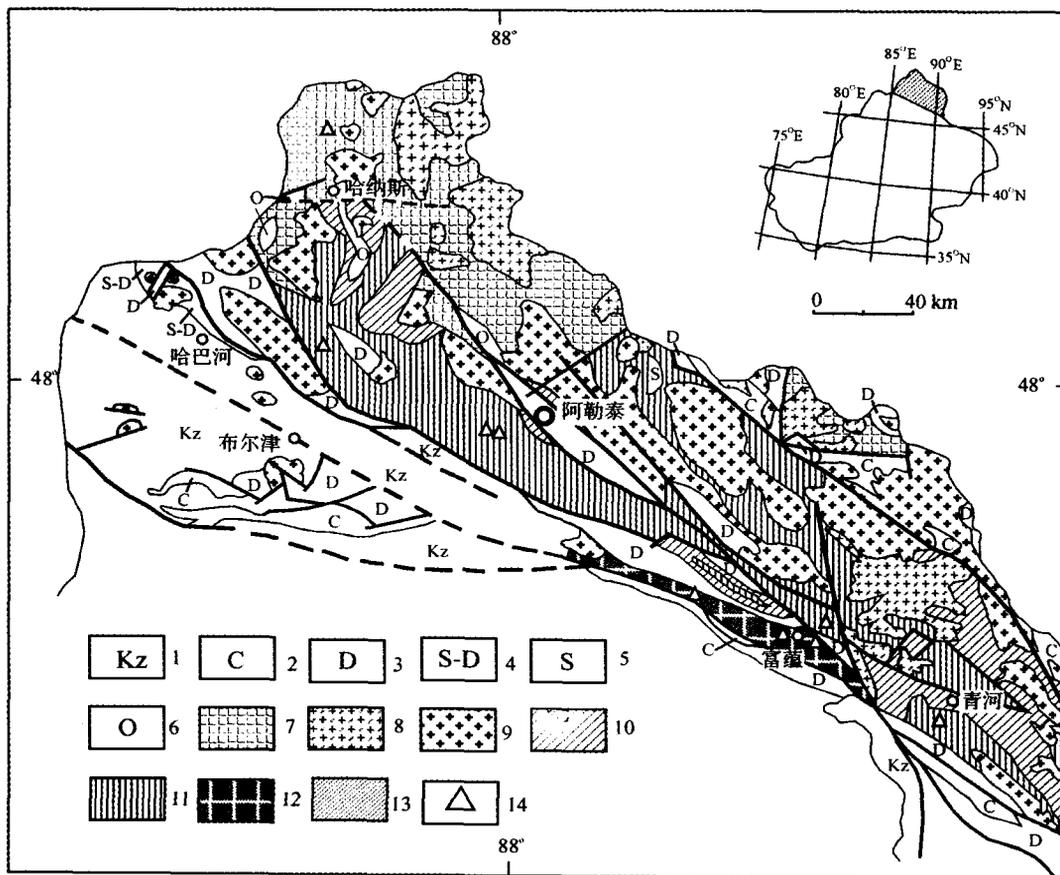


图1 阿尔泰地区地质略图,图中示出的前寒武纪部分,是依据李天德等(1996)的划分(胡霭琴等,2002)

1-新生界;2-石炭系(碎屑岩、火山岩);3-泥盆系(火山岩、碎屑岩);4-志留-泥盆系(碎屑岩);5-志留系(碎屑岩);6-奥陶系(火山岩、碎屑岩);7-寒武-奥陶系(碎屑岩);8-早古生代花岗岩;9-晚古生代花岗岩;10-新元古界富蕴群;11-古-中元古界克木齐群;12-克木齐群+富蕴群(李天德等(1996)将其划为古-中元古界,但年龄数据显示,该地区也有新元古代变质岩系存在,目前还不能确切划分两者的界线);13-研究区位置;14-主要样品采集范围

Fig.1 Geological sketch of Altai showing the distribution of Precambrian metamorphic rocks, based on Li TD *et al.* (1996) (Hu AQ *et al.*, 2002)

李天德等(1996)将青河县西南地区出露的大面积变质岩划为古-中元古代克木齐群,并以大青格里河中游出露的岩石作为代表性岩石剖面,描述如下:下部为片麻岩、混合岩、变粒岩和斜长角闪片岩,上部为云母片岩和变粒岩,未见底,视厚度3000m。这套变质岩时代的确定,主要是以阿热勒托别东北地区的片麻岩和混合岩中4个组份锆石的U-Pb上交点年龄($1375 \pm 24\text{Ma}$)作为同位素年代学的依据(图1),以下对该年龄数据是否具有确定的地质意义进行分析。

现将获得上述年龄结果的4个组份锆石的数据点(一个片麻岩中3个组份锆石和另一个混合岩中1个组份锆石)放于U-Pb年龄谱和图中(图2),可以看到所有锆石数据点均分布在近下交点的位置。若用ISOPLOT程序计算片麻岩中三个组份锆石,得到的上、下交点年龄分别为 $1430 \pm 102\text{Ma}$ 和 $367 \pm 28\text{Ma}$ 。按U-Pb同位素年代学对数据的基本规则分析(Faure G., 1986),只有下交点年龄($t_2 = 367 \pm 28\text{Ma}$)有明确的地质意义,它代表该片麻岩和混合岩的形成年龄,而上交点年龄并无确定的年龄意义。也就是说,将其上交点年龄作为地层时代的依据是不可靠的,所以青河县城西南地区的“克木齐群”变质岩是否为前寒武纪地质体(或地层),目前并未给出回答。李天德等(1996)还对玛因鄂博断裂北、阿勒泰西南、可可塔勒矿区北、卓勒萨依分水岭南、乌恰沟,以及富蕴县城以西额尔齐斯河北岸等地区的花岗岩、混合岩和片麻岩中的8份锆石进行了U-Pb年龄测定,均未给出可靠的前寒武纪年龄结果,一些混合岩、片麻岩,以及花岗岩中的锆石,得到的是三组U-Pb同位素比值近于一致的年龄,分别为380、350、325和300Ma等,与张湘炳等(1996)在阿尔泰地区作过大量的同位素年代学研究结果类似。在阿尔泰地区,除了在富蕴西乌恰沟发现有蓟县纪微古植物化石外,仅在富蕴县城西的石榴石片麻岩中得到可参考的前寒武纪的锆石

U-Pb年龄(胡霭琴等,2002),Windley BF *et al.* (2002)近来应用Pb蒸发方法对处于额尔齐斯构造带的富蕴地区的流纹英安岩、花岗质片麻岩和英云闪长质片麻岩的定年研究中,得到了年龄主要在505Ma和411~415Ma,仅发现了少数锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值年龄在660~920Ma之间,称为捕获晶,其它地区尚未获得可靠的前寒武纪年龄的资料。

另一方面看,主张阿尔泰造山带变质岩形成于古生代的观点,比如庄育勋(1991,1994a,b),庄育勋等(1992,1993)曾多次发表了有关“中国阿尔泰造山带进变质构造、阿尔泰造山带花岗岩片麻岩穹窿的形成与演化,以及阿尔泰造山带变质作用PTSt演化和热-构造-片麻岩穹窿形成机制”等,但是同样也缺乏可靠的同位素年龄数据的支持,因为持这些观点的学者列举的年龄数据是早期研究中获得的K-Ar年龄和不大可靠的Rb-Sr等时线年龄(庄育勋,1994a,b),因此对该区变质岩的形成时代进行再次的定年研究是非常重要的。

基于上述的分析,我们在青河县西南地区作了详细的野外地质考察和采样,应用SHRIMP技术重新测定了青河县城西南地区片麻岩中锆石的U-Pb年龄。提出对该区变质岩时代的新认识。由于该研究区的片麻岩位于额尔齐斯构造剪切带中,目前该构造带变质岩的时代问题不但对地层时代划分有直接的关系,也对研究阿尔泰造山带的构造演化具有重要意义。

2 研究区的地质简况

研究区位于1:20万二台幅地质图西北部分青格里河以西地段,以及向北延伸至德柳-青河幅的青河县城一带(图3)。区内出露的主要地层为中-上奥陶统哈巴群的上亚群,与其西南侧的下泥盆统玛因鄂博组呈断裂接触关系。岩浆岩主要为晚古生代的黑云母花岗岩,相当于中-哈队将区内出露的变质岩划为古-中元古代克木齐群的地段(李天德等,1996,2001)。

奥陶系哈巴群上亚群主要由砂岩、片岩和粉砂岩组成,下部有大理岩、角闪片岩,而中上部则有细砾岩及圆砾岩的透镜体或薄层,为浅海复理式建造。本亚群与下伏地层接触关系未见出露,与上覆地层关系不明,仅与泥盆系下统玛因鄂博组为断层接触。区域变质与接触变质作用均较强,而变质极轻微的各种岩层与变质较深的变质岩组之间呈逐渐过渡关系,未发现任何生物化石。

从大地构造格局上看,该研究区正位于额尔齐斯构造剪切带上,变质岩十分发育,结晶片岩、片麻岩、贯入岩、混合岩等占主要成分,还有少量黑云母化岩石。结晶片岩有含石榴石黑云母石英片岩、二云母石英片岩、白云母石英片岩、方柱石黑云母石英片岩、电气石白云母长石石英片岩、黑云母石英片岩、黑云母斜长石石英片岩、长石黑云母石英片岩及二云母钠长石片岩。片麻岩的成分变化较大,多为灰、浅灰色,具有带状及眼球构造,有条带状混合岩、层状混合岩(贯

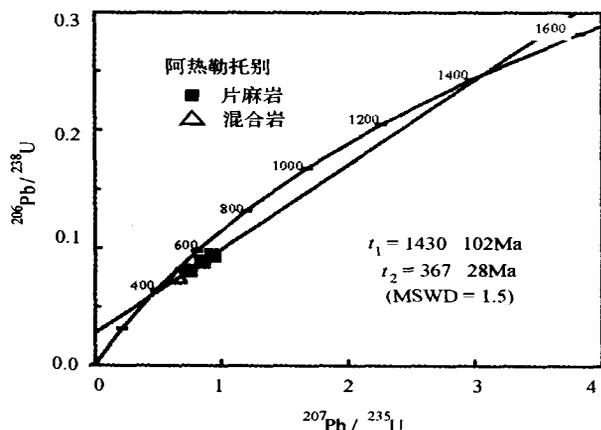


图2 青河县西南阿热勒托别变质岩中锆石U-Pb谱和图(据李天德等,1996)

Fig. 2 Zircon U-Pb Concordia diagram for metamorphic rocks from Areletuobie to the southwest of Qinghe County (from Li TD *et al.*, 1996)

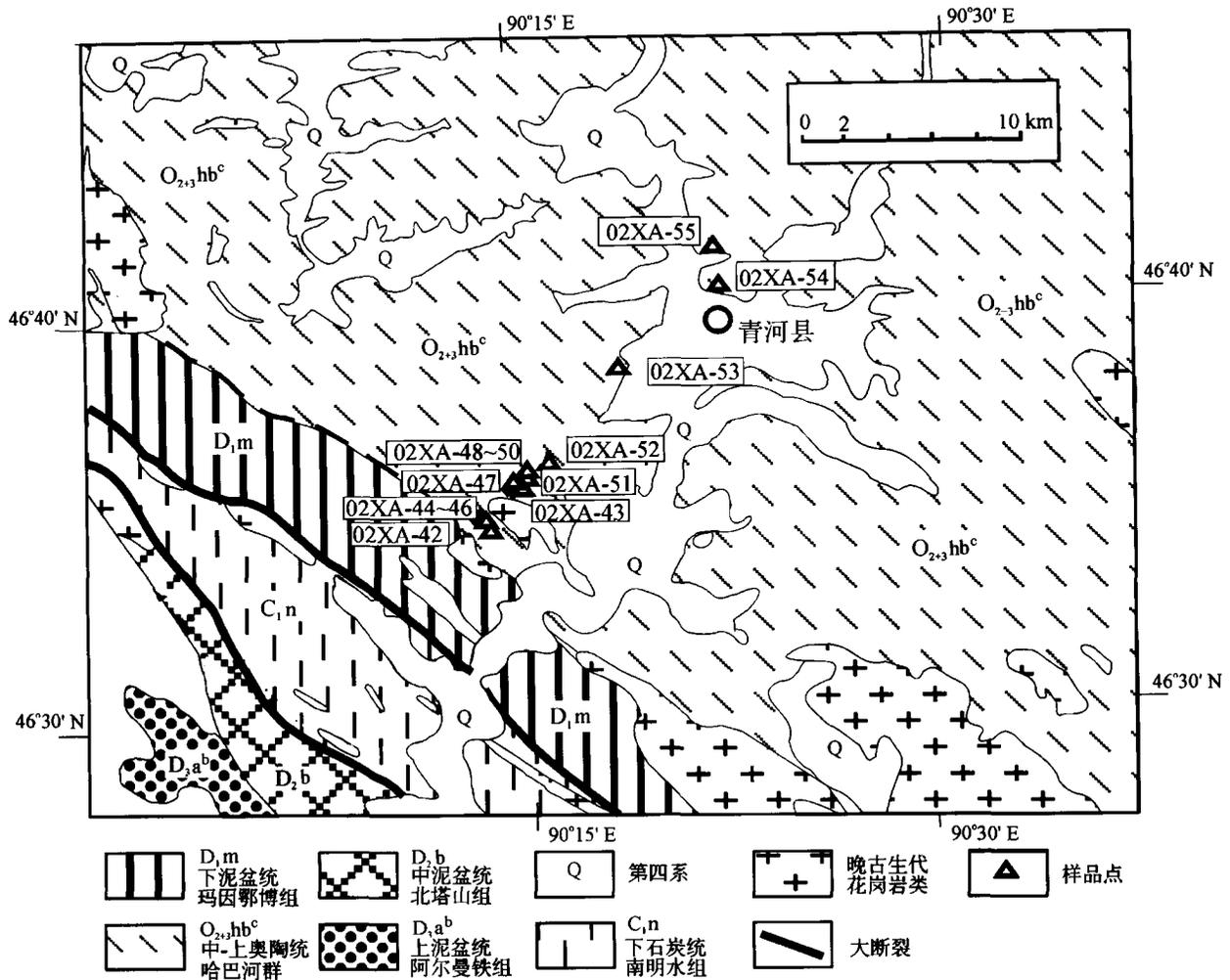


图3 研究区地质简图(据 1: 20 万二台幅和德柳-青河幅)图中表示出采样的地域范围

Fig. 3 Geological sketch of study area after 1: 200000 Ertai and Deliu-Qinghe geological map showing sampling locations

入片岩)、云染岩(雾迷岩)、均质混合岩等,之间界线均不太明显,呈互层和过渡关系。此外,钾交代作用、角闪石被黑云母交代作用、黑云母或角闪石被绿泥石交代作用和硅化作用普遍存在。

沿新开辟的自阿勒泰至青河县城的公路,可以观察到新鲜的岩石剖面。该区片麻岩与奥陶纪的含红柱石片岩(热变质岩)之间为逐渐过渡,没有明显的界线,而且深灰色片麻岩和具斑晶的花岗岩之间也没有明显的界线。因而从岩石地质产状看,变质岩与该区的花岗岩的时代大体相同。研究者在 46°35'06.2"N, 90°14'41.9"E 至 46°41'47.9"N, 90°21'56.4"E 范围内采集比较有代表性的各种类型的片麻岩样品(图 3)。由于该研究区古生代花岗岩非常发育,采取研究用的岩石化学和用于测定年龄样品时,尽可能远离花岗岩体,选用颜色较深且片麻状构造发育,不含钾长石斑晶的灰色片麻岩作为研究对象,以避免古生代花岗岩的影响。以下讨论中将该研究区的片麻岩简称为青河片麻岩。

3 青河片麻岩的元素和同位素地球化学特征

3.1 主量和微量元素特征

青河片麻岩的主量和微量元素分析在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室,应用 XRF 方法(Rigaku ZSX100e)完成主量元素分析,误差 < 1%,微量元素应用 ICP-MS 分析(PE ELAN 6000)完成,误差 5% ~ 10%,分析结果列于表 1。应用主量元素计算的 DF 值,以及利用 K-A 关系图(见图 4 下说明)判断变质岩的原岩特征(表 1 和图 4)。综合两种判别结果,可以看出,青河县西南地区的变质岩有正变质岩,也有副变质岩。正变质岩的成分相当于安山岩、英安岩至流纹岩(或闪长岩质、花岗闪长岩质至花岗岩)质岩石,副变质岩在 K-A 图中落在泥质粉砂质沉积岩范围内。片麻岩的 REE 总含量在 $155 \times 10^{-6} \sim 234 \times 10^{-6}$,具有中等程度的 LREE 富集($(La/Sm)_N = 1.8 \sim 3$),构成向右倾斜的 REE 分布曲线,均具有弱至中等程度的 Eu 负

表 1 青河片麻岩类岩石的主量(%)和微量元素(10^{-6})分析结果Table 1 Major(%) and trace element(10^{-6}) compositions of Qinghe gneisses

样品号	青河西南片麻岩						
	02XA-42a	02XA-42b	02XA-43a	02XA-43b	02XA-45a	02XA-47a	02XA-51a
SiO ₂	59.75	55.24	73.84	64.50	62.26	50.49	64.47
TiO ₂	1.56	1.39	0.31	0.74	0.84	1.09	0.68
Al ₂ O ₃	15.15	19.39	13.18	15.53	16.74	19.39	15.52
TFe ₂ O ₃	7.33	7.31	2.87	6.48	7.78	10.58	6.19
FeO	0	0	0	0	0	0	0
MnO	0.14	0.14	0.05	0.11	0.11	0.20	0.13
MgO	4.37	3.78	1.49	2.99	3.70	3.72	2.82
CaO	4.95	4.17	1.38	2.77	1.49	7.43	3.10
Na ₂ O	3.13	4.40	3.83	3.05	2.33	1.13	3.37
K ₂ O	2.58	3.40	1.81	2.77	2.75	3.01	2.64
P ₂ O ₅	0.43	0.40	0.07	0.17	0.16	0.12	0.11
LOI	0.76	0.84	0.59	0.67	0.93	1.98	0.66
Total	100.15	100.45	99.43	99.77	99.09	99.13	99.69
DF*	-0.05	3.35	-0.11	-0.64	-3.04	—	0.19
K-A 图判别	正	正	正	正	负	负	正
Cs	8.70		9.12		7.50		
Sc	16.66		9.44		18.7		
Ti	9628		1962		4891		
V	123.4		34.21		126.0		
Cr	149.4		22.5		139.1		
Mn	1052		429.2		830		
Co	20.87		5.63		19.65		
Ni	94.6		10.10		84.9		
Cu	16.27		19.21		29.7		
Zn	95.2		15.69		95.5		
Ga	17.77		14.90		20.7		
Ge	2.465		2.18		2.51		
Rb	86.9		63.86		117.9		
Sr	644		106.5		155.6		
Y	39.44		50.8		27.50		
Zr	147.8		150.0		163.5		
Hf	3.624		5.17		4.63		
Nb	17.60		8.27		12.16		
Ta	1.129		0.53		0.729		
Ba	288.2		204.0		267.3		
Pb	8.35		8.64		14.59		
Th	2.089		19.78		10.84		
U	3.16		2.749		3.03		
La	30.55		44.28		29.3		
Ce	82.4		91.36		60.9		
Pr	12.54		11.48		7.75		
Nd	50.78		42.4		29.8		
Sm	10.26		9.01		6.00		
Eu	2.66		1.224		1.309		
Gd	8.65		9.05		5.59		
Tb	1.365		1.508		0.884		
Dy	7.50		8.77		5.15		
Ho	1.468		1.928		1.048		
Er	4.16		5.55		3.07		
Tm	0.649		0.877		0.467		
Yb	4.668		5.95		3.0		
Lu	0.694		0.929		0.502		

分析者: 主量元素为胡霁琴和刘颖, 微量元素为涂湘林和胡光黔

* DF = $10.44 - 0.21\text{SiO}_2 - 0.32\text{TFe}_2\text{O}_3 - 0.98\text{MgO} + 0.55\text{CaO} + 1.46\text{Na}_2\text{O} + 0.54\text{K}_2\text{O}$ (重量百分比含量)

K-A 图判别见图 4 注释

亏损 ($Eu/Eu^* = 0.87 \sim 0.42$) (图 5a)。用于锆石定年的寄主片麻岩 (02XA-42) 取样位置为北纬 $46^{\circ}34'57.5''$, 东经 $90^{\circ}14'41.9''$ 。岩石为灰至暗灰色, 具有中粗粒结构、片麻状构造。主要矿物成分为黑云母和斜长石, 少量石英, 岩石较新鲜, 少量蚀变矿物为绿泥石, 绢云母, 副矿物主要是锆石和磷灰石。主量元素特征显示该片麻岩为英安岩组份的正片麻岩, 其 SiO_2 含量在 60% ~ 55% 之间, Al_2O_3 为 15% ~ 19%, 总 $Fe_2O_3 \approx 7\%$, CaO 4% ~ 5%, $MgO \approx 4\%$, $Na_2O > K_2O$ 。岩石的颜色随黑云母的含量增加而变深, 其 Al_2O_3 含量也增加。该片麻岩的 REE 含量中等 ($\approx 218 \times 10^{-6}$), 具有轻微的 LREE 富集 ($La_N/Sm_N = 1.8$), 略向右倾斜 ($La_N/Yb_N = 4.3$) 和微弱的 Eu 负异常 ($Eu/Eu^* = 0.87$)。在微量元素蛛网图中三个片麻岩的 Nb, Ti, Ba, P, Sr 均相对亏损, 并有明显的负异常 (图 5b)。以上特征表明片麻岩的原岩形成于岛弧构造环境。

3.2 Nd-Sr 同位素同位素组特征

Sm, Nd, Rb, Sr 元素和 Nd, Sr 同位素比值在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室分别应用 ICP-MS (PE ELAN 6000) 和 GV IsoProbe 多接收等离子质谱计分析。分析方法详见韦刚健等 (2002) 和梁细荣等 (2003), 数据见表 2。

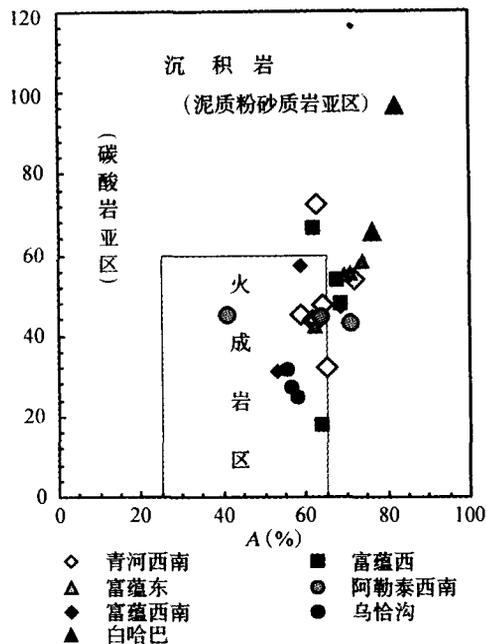


图 4 青河片麻岩类岩石 K-A 相关图解
其中, $A = Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)$, $K = K_2O / (Na_2O + K_2O)$ (均为元素氧化物的百分比含量)
Fig. 4 K-A diagram for Qinghe gneisses

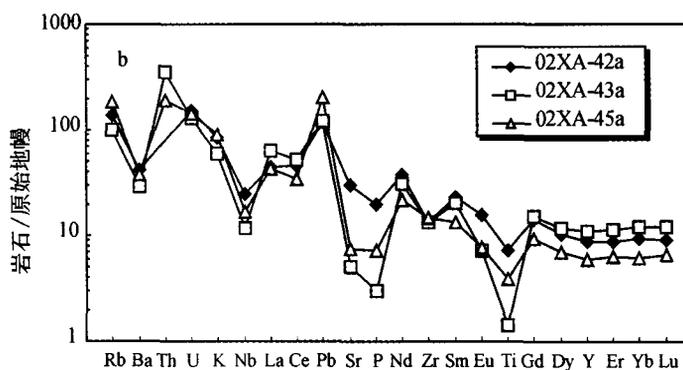
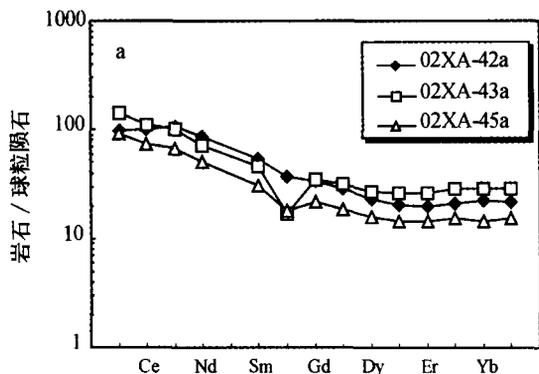


图 5 青河片麻岩类岩石的球粒陨石标准化 REE 分布曲线 (a) 和原始地幔标准化微量元素蛛网图 (b)
Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and PM-normative spidergrams (b) for Qinghe gneisses

表 2 青河片麻岩的 Nd-Sr 同位素同位素组成

Table 2 Nd-Sr isotopic compositions for Qinghe gneisses

样品号	Rb (10^{-6})	Sr (10^{-6})	$\frac{87Rb}{86Sr}$	$\frac{87Sr}{86Sr}$	2σ	I_{Sr}	Sm (10^{-6})	Nd (10^{-6})	$\frac{147Sm}{144Nd}$	$\frac{143Nd}{144Nd}$	2σ	$\epsilon_{Nd}(0)$	$f_{Sm/Nd}$	$\epsilon_{Nd}(t)$	t_{DM} (Ga)
02XA-42	86.87	643.9	0.398	0.706133	11	0.7045	10.26	50.78	0.1222	0.512680	9	0.81	-0.38	3.49	0.78
02XA-43	63.86	106.5	1.771	0.715228	16	0.7081	9.011	42.4	0.1285	0.512550	9	-1.72	-0.35	0.72	1.07
02XA-45	117.9	155.6	2.238	0.719929	16	0.7110	6.001	29.84	0.1216	0.512405	12	-4.55	-0.38	-1.86	1.23

分析人: 梁细荣, 刘颖

计算 t_{DM} 值中使用: $^{143}Nd/^{147}Sm = 0.2137$, $^{143}Nd/^{144}Nd = 0.51315$; 计算 $\epsilon_{Nd}(t)$ 时, $t = 0.28Ga$

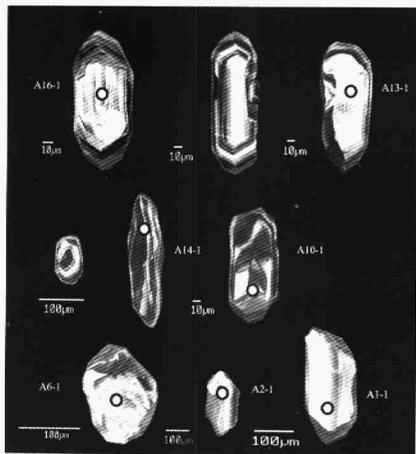


图6 片麻岩中锆石的阴极发光图象

Fig. 6 Cathodoluminescence images of zircons from the gneiss

由表2看到青河片麻岩的 $f_{\text{Sm-Nd}}$ 比值在0.35~0.38之间,表明其为正常大陆地壳岩石。3个片麻岩的 $e_{\text{Nd}}(t)$ 和 I_{sr} 值均有较大的变化范围, $e_{\text{Nd}}(t)$ 变化于+3.49至-1.86之间, I_{sr} 值在0.7045~0.7110之间,若将它们放在 $e_{\text{Nd}}(t)$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 相关图中,3个片麻岩分布在二端元组份的混合的曲线上(略),表明其原岩组份受到不同程度大陆地壳的污染。另外,3个片麻岩的Nd模式年龄(t_{DM})分别为0.78、1.07和1.23Ma,同样显示出岩石中有不同比例的古老地壳成分,这些均与其元素特征相一致。

4 片麻岩的SHRIMP锆石U-Pb定年结果和讨论

4.1 分析方法

锆石SHRIMP U-Pb分析在北京离子探针中心SHRIMP II上完成,锆石的阴极发光图像在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室(JXA-8100)完成。用SHRIMP进行U-Th-Pb分析的原理和流程参考Compton W *et al.* (1992)、Williams IS *et al.* (1987)、刘敦一等(2003)。使用的实验条件是一次离子流强度约为7.5nV,加速电压约10kV,样品靶上的离子束斑直径约25~30 μm ,质量分辨率约5000(1%峰高)。应用澳大利亚国家地调局标准锆石TEM(417Ma)作元素间的分馏校正,应用澳大利亚国立大学地学院(RSES)的标准锆石SL13(年龄572Ma;U含量

238×10^{-6})标定所测锆石的U、Th、Pb含量。数据处理采用Ludwig SQUID 1.0及ISOPLLOT程序(Ludwig KR, 1999, 2001)。数据列于表2,单次测量数据点的误差为1 σ 。本研究采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,其加权平均值具95%的置信度。

4.2 片麻岩中锆石特征

用于测定U-Pb年龄的锆石为微带粉红色、透明、双锥柱状晶体, $\{100\} + \{111\}$ 晶面发育,锆石的长轴方向一般在100~200 μm ,长短轴之比(2~3):1。图6为锆石的阴极发光图象。在作年代学研究中,作者尽了最大努力,企图在测定靶中多找出一些具有较好结晶环带的锆石晶体,结果在50粒锆石中仅有2~3粒具有较好的环带,其中一粒锆石作了年龄测定(A16-1),另一粒在其右侧(图6)。片麻岩中的锆石多数具有不清晰环带结构,图6中的2粒具有较好环带的锆石,也并不具有正常的岩浆锆石特有的十分对称环带结构。

4.3 锆石SHRIMP U-Pb定年结果和讨论

表3列出了片麻岩中16个锆石测点的结果,锆石的Th/U比值变化范围在0.08~2.08之间,U含量变化范围多数在 118×10^{-6} ~ 387×10^{-6} 。一个锆石测点(A4-1)的U含量最低(56×10^{-6})。三个测点的U含量较高,其中二个为 568×10^{-6} (A15-1)和 678×10^{-6} (A14-1),另一个测点(A10-1)的U含量高达 1029×10^{-6} 。虽然锆石测点的Th/U比值和U含量差异较大,但是它们与 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄大小无明显关系。由表3看到,A10-1和A11-1测点具有低的Th/U比值(0.08和0.46),给出最高的年龄值 $292 \pm 5\text{Ma}$ 和 $293 \pm 6\text{Ma}$,但是另外一个低Th/U比值的测点(A2-1),却给出16个测点中最低的一个年龄值($271 \pm 5\text{Ma}$),还有一个低Th/U比值(0.38)的锆石测点给出的年龄为 $279 \pm 5\text{Ma}$ (A14-1)。也就是说具有低或较低Th/U比值的锆石给出了全部锆石测点的年龄变化范围。将图6与表3相对照,锆石的结构特征,即在阴极发光图象中显示的环带结构是否清晰,与其U含量、Th/U比值,以及年龄大小也没有明显关系。二个低Th/U比值的锆石(A2-1和A10-1)和最高U含量(1029×10^{-6})的锆石(A10-1)环带结构不明显,它们分别对应着16个测点中的最低和最高年龄值。具有相对清晰环带结构的锆石,以A16-1为代表,给出的年龄 $280 \pm 7\text{Ma}$,接近于所有锆石测点的权重平均年龄。通过上述分析可以看出,锆石结构特征以及其U含量、Th/U比值高低均与其年龄大小没有十分明显的关系。

将测定点放在Wetherill谱和曲线图中(图7),去除了一个误差较大的测定点(A13-1)后,15个测点均分布在谱和线上或其附近,给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围为 $271 \pm 5\text{Ma}$ ~ $293 \pm 6\text{Ma}$,其权重平均年龄为 $281 \pm 3(2\sigma)\text{Ma}$ (MSWD = 1.2),相当于二叠纪早期。如果将环带结构不明显、高U含量的锆石看作变质作用的产物,而具有清晰环带结构的锆石代表岩浆

表3 青河片麻岩中锆石 SHRIMP U-Pb 分析结果

Table 3 SHRIMP U-Pb data of zircons from Qinghe gneiss

点号	$^{206}\text{Pb}_e$ (%)	U ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	$^{206}\text{Pb}^*$ ($\times 10^{-6}$)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 (Ma)	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄 (Ma)	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{206}\text{Pb}^*}$ $\pm \%$	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}}$ $\pm \%$	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$ $\pm \%$	$\pm \%$		
A1-1	3.03	213	444	2.15	8.3	276.2	5.9	124	344	0.0485	14.6	0.29	14.8	0.0438	2.2
A2-1	3.13	286	23	0.08	10.9	270.6	5.4	-179	300	0.0428	12.0	0.25	12.2	0.0429	2.0
A3-1	2.56	286	311	1.12	11.2	279.5	6.6	248	212	0.0512	9.2	0.31	9.5	0.0443	2.4
A4-1	10.72	56	70	1.28	2.4	275.9	10.0	-677	1895	0.0354	68.6	0.21	68.7	0.0437	3.7
A5-1	4.37	140	185	1.36	5.6	278.6	6.8	328	370	0.0530	16.3	0.32	16.5	0.0442	2.5
A6-1	5.47	140	72	0.54	5.6	280.8	6.6	-137	546	0.0435	22.1	0.27	22.2	0.0445	2.4
A7-1	4.25	222	156	0.73	8.8	279.7	5.8	-221	388	0.0421	15.4	0.26	15.6	0.0443	2.1
A8-1	2.20	256	246	0.99	10.3	289.3	5.8	254	249	0.0513	10.8	0.32	11.0	0.0459	2.1
A9-1	3.00	269	317	1.22	10.9	288.2	5.8	85	277	0.0477	11.7	0.30	11.8	0.0457	2.1
A10-1	0.65	1029	86	0.09	41.1	291.3	5.2	306	58	0.0525	2.5	0.33	3.1	0.0462	1.8
A11-1	2.01	375	173	0.48	15.3	292.7	6.3	160	192	0.0492	8.2	0.32	8.5	0.0465	2.2
A12-1	2.51	387	496	1.32	15.0	278.0	5.3	22	205	0.0465	8.5	0.28	8.8	0.0441	2.0
A13-1	29.33	188	45	0.25	7.3	204.1	48.1							0.0322	23.9
A14-1	1.11	678	258	0.39	26.1	279.3	5.1	178	105	0.0496	4.5	0.30	4.9	0.0443	1.9
A15-1	1.29	568	586	1.07	21.7	276.8	5.1	203	102	0.0502	4.4	0.30	4.8	0.0439	1.9
A16-1	6.12	118	95	0.83	4.8	279.5	6.9	-225	652	0.0420	25.9	0.26	26.0	0.0443	2.5

表中所示误差均为 1σ ; Pb_e 和 Pb^* 分别为普通 Pb 和放射性成因 Pb; 标准校正的误差为 1.6%; 普通铅校正应用 ^{204}Pb 实测值;

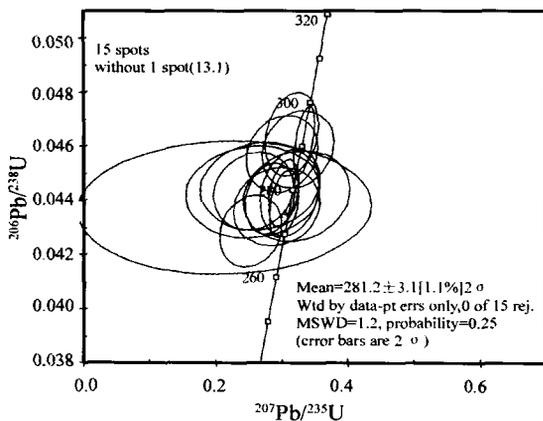


图7 片麻岩中锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 7 U-Pb concordia diagram for zircons from gneiss

形成的锆石, 该片麻岩中锆石 U-Pb 年龄测定的结果反映出该区的变质作用与岩浆活动形成锆石记录的时间范围是相互交错的, 前后大体经历了近 20Ma, 其高峰期应该是 $281 \pm 3\text{Ma}$ 。近年来的研究表明, 锆石的结构以及锆石的生长过程非常复杂, 有的锆石反映了复杂的源区过程, 或是认为岩浆锆石也可以不具有环带构造等。前面的研究指出, 青河片麻岩的 Nd-Sr 同位素组成特征说明其原岩中含有不同比例的古老大陆壳的成分, 但是, 片麻岩中锆石的 15 个测点给出了

十分一致的年龄结果, 并未反映出其源区的复杂物质特征, 而且反映了岩石经受了强烈的变质作用, 可以推断即使原岩中含有古老的锆石, 但在晚古生代强烈的构造动力中锆石重新建立了 U-Pb 同位素体系, 并开始重新记时, 从这方面看, 该年龄更能代表阿尔泰山带在晚古生代时期的一次重要的地质热事件。该年龄结果与同构造带上的富蕴地区呈东、西向分布的片麻岩中角闪石和黑云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄分别为 275Ma 和 270Ma (胡鸾琴等, 1997) 是非常谐调的, 记录了阿造山带晚古生代时期一次快速构造隆升的热历史。

近年来一些学者在阿尔泰山带又获得一些新的年代学研究结果, 提出了一些新的观点。Laurent-Charvet C *et al.* (2003) 基于哈萨克斯坦地区阿尔泰山带变质岩中黑云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄结果, 认为额尔齐斯 NW-SE 向的剪切带发生在 280 ~ 290Ma, 据阿尔泰山地区富蕴至青河一带变质岩中的黑云母和白云母和角闪石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄 (260 ~ 245Ma), 提出继剪切作用后在挤压褶皱作用中产生的变质作用带形成于 245Ma (Laurent-Charvet C *et al.*, 2003)。Sengör AMC *et al.* (1993) 认为剪切带的位移可以达到 2000 km, 并主张主要的事件发生在晚二叠纪 (Sengör AMC *et al.*, 1993)。Xiao WJ *et al.* (2004) 提出南阿尔泰山带 (蒙古阿尔泰山带-中国阿尔泰山-东准噶尔) 是在元古宙至二叠纪期间, 由自北向南不断的增生和碰撞-会聚过程中形成的 (Xiao WJ *et al.*, 2004)。本研究中的青河片麻岩正处于额尔齐斯剪切带范围

内,该片麻岩中 15 个锆石测点的 U-Pb 年龄($281 \pm 3\text{Ma}$)精确的记录了该期重要地质热事件发生的时间,而该构造带中各种变质岩中角闪石和黑云母相近似的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄,反映了继后发生的快速隆升冷却的地质动力学过程,有可能与晚古生代古亚洲洋的闭合或大陆的回返有关,值得进一步探讨。

5 结论

基于对青河县西南地区片麻岩中锆石 U-Pb SHRIMP 定年,并结合其元素地球化学和 Nd、Sr 同位素组成等研究,得到以下初步结论:

(1) 青河县西南地区出露的正、副变质岩主要有片麻岩、混合岩、各种片岩等。正变质岩的成分相当于安山岩、英安岩至流纹岩(或闪长岩质、花岗闪长岩质至花岗岩)质岩石,副变质岩原岩成分为泥质粉砂质沉积岩。主量和微量元素,以及 Nd-Sr 同位素特征显示其原岩可能形成于岛弧构造环境。

(2) 应用 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年,获得了青河县西南地区变质岩中英安岩质正片麻岩的形成年龄为 $281 \pm 3(2\sigma)\text{Ma}$ ($\text{MSWD} = 1.2$)。锆石的阴极发光图象特征表明,多数锆石的形成与变质作用有关,少数具有岩浆锆石特征,且 U 含量和 Th/U 比值变化很大,但是均与年龄结果没有关系。因此,该片麻岩中锆石 U-Pb 年龄测定结果反映出该区的变质作用与岩浆活动发生的时间范围大体相同,前后经历了大约 20Ma,其高峰期应该是 $281 \pm 3\text{Ma}$ 。研究中没有发现任何前寒武纪古老锆石或相关的年龄信息。因此,研究结果不支持该区变质岩为“前寒武纪地层”的观点。

(3) 额尔齐斯构造剪切带中青河片麻岩的锆石 U-Pb 年龄,以及各种变质岩中角闪石和黑云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄,记录了阿尔泰山带晚古生代时期一次重要的构造挤压-变质作用-快速构造隆升的动力学过程,有可能与晚古生代古亚洲洋的闭合或大陆的回返有关,值得进一步探讨。

致谢 本研究中锆石 U-Pb SHRIMP 分析中得到中国地质科学院北京离子探针分析中心刘敦一、宋彪等大力支持与帮助;元素分析得到中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室热情帮助和合作,在此一并致以衷心的感谢。

References

Chen YC and Ye QT. 1996. Ore-Forming Conditions and Metallogenic Prognosis of the Ashele Copper-Zinc Metallogenic Belt, Xinjiang, China. Beijing: Geological Publishing House, 5-17 (in Chinese)
Compton W, Williams IS, Kirschvink JL et al. 1992. Zircon U-Pb ages of early Cambrian time scale. J. Geol. Soc., 149: 171-184
Faure G. 1986. Principles of Isotope Geology. Second edition, John

Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore
Hu AQ, Wang ZG and Tu GZ. 1997. Geological evolution and diagenetic and metallogenetic regularity in northern Xinjiang. Beijing: Science Press. 9-105 (in Chinese)
Hu AQ, Zhang GX, Zhang QF, Li TD and Zhang JB. 2002. A review on ages of Precambrian metamorphic rocks from Altai orogen in Xinjiang, NW China. Chinese Journal of Geology, 37(2): 129-142 (in Chinese with English abstract)
Laurent-Charvet S, Charvet J, Monié P and Shu L. 2003. Late Paleozoic strike-slip shear zones in eastern central Asia (NW China): New structural and geochronological data. Tectonics, 22, doi 10.1029/2001TC901047
Li TD and Polyangsiyi BH. 2001. Tectonics and crustal evolution of Altai in China and Kazakhstan. Xingjiang Geology, 19(1): 27-32 (in Chinese with English abstract)
Li TD, Qi ZM, Wu BQ, Xiao SL, Zhao CL, Беспаяв ХА, Полеянский НВ, Дьячков В А, Ганженко ГД, Евтушенко НП and Евтушенко ОП. 1996. New impovement of comparative study of geology and mineralization of Altai between China and Kazakhstan. In: Chinese Geological Society(ed). Thesis Volume of the Symposium of the 8th Five-Year Plan of Geoscience for Contribution to 30th IGC. Beijing: Metallurgical Industrial Press, 256-259 (in Chinese with English abstract)
Li ZL, Chen HL, Yang SF, Xiao WJ and Tainosho Y. 2004. Discovery of mafic granulites from the Altay orogenic belt: Evidence from mineralogical study. Acta Petrologica Sinica, 20(6): 1445-1455 (in Chinese with English abstract)
Liang XR, Wei GJ, Li XH and Liu Y. 2003. Precise measurement of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and Sm/Nd ratios using multiple-collectors inductively coupled plasma-mass spectrometry (MC-ICPMS). Geochimica, 32(1): 91-96 (in Chinese with English abstract)
Liu DY, Jian P, Zhang Q, Zhang FQ, Shi GH, Shi YR, Zhang LQ and Tao H. 2003. SHRIMP dating of adakites in the Tulingkai ophiolite, Inner Mongolia: Evidence for the early Paleozoic subduction. Acta Geologica Sinica, 77(3): 318-327 (in Chinese with English abstract)
Ludwig KR. 1999. Using Isoplot/EX, version 2, a geochronological Toolkit for Microsoft Excell. Berkeley Geochronological Center Special Publication 1a, 47
Ludwig KR. 2001. Squid 1.02: A user manual. Berkeley Geochronological Center Special Publication, 2: 19
Melnikov A, Travin A, Plotnikov A, Smirnova L and Theunissen K. 1998. Kinematics and Ar/Ar geochronology of the Irtysh Shear zone in the NE Kazakhstan. In: Jahn BM and Hong DW (eds.), IGCP 420, Int. Union of Geol. Sci., Ottawa, Ont., Canada, 60
Qu GS and Chong MY. 1991. Pb isotopic geology and its implications for tectonics of Altai Orogen. Geoscience, 5(1): 100-110 (in Chinese with English abstract)
Sengör AMC, Natal' in BA and Burtman VS. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia. Nature, 364: 299-307
Wang JB, Qin KZ, Wu ZL, Hu JH and Deng JN. 1998. Volcanic-Exhalative-Sedimentary Lead-Zinc Deposits in the Southern Margin of the Altai, Xinjiang. Beijing: Geological Publishing House, 1-10 (in Chinese)
Wei GJ, Liang XR, Li XH and Liu Y. 2002. Precise measurement of Sr isotopic composition of liquid and solid base using (LP)MC-ICPMS. Geochimica, 31(3): 295-299 (in Chinese with English abstract)
Williams IS and Claesson S. 1987. Isotope evidence for the Precambrian province and Caledonian metamorphism of high grade paragneiss from the Save Nappes, Scandinavian Caledonides, I. Ion microprobe zircon U-Th-Pb. Contrib. Mineral. Petrol., 97: 205-217
Windley BF, Guo JH, Li YY and Zhang C. 1998. Terranes and tectonic evolution of the Chinese Altai. Abstracts in IGCP-420 workshop. Urumqi, Xinjiang, China
Windley BF, Kröner A, Guo J, Qu G, Li Y and Zhang C. 2002. Neoproterozoic to Paleozoic geology of the Altai orogen, NW China;

- New zircon age data and tectonic evolution. *Journal of Geology*, 110: 719 - 739
- Xiao WJ, Windley BF, Badarch G, Sun S, Li J, Qin KZ and Wang ZH. 2004. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altaids: implications for the lateral growth of Central Asia. *Journal of the Geological Society, London*, 161, 339 - 342
- Zhang XB, Sui JX, Li ZC, Liu W, Yang XY and Liu SS. 1996. Study on tectonic evolution and mineralization series in the Eerqisi tectonic zone. Beijing: Science Press, 139 - 162 (in Chinese)
- Zhuang YX and Chen B. 1992. Formation and evolution of progressive metamorphism structure domes in the Chinese Altaids. *Bulletin of the Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences*, 25: 37 - 52 (in Chinese)
- Zhuang YX and Chen B. 1993. The formation and evolution of migmatitic granite-gneiss domes in Altaids, China. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 12 (2): 115 - 125 (in Chinese with English abstract)
- Zhuang YX. 1991. The microstructure criteria of inclusion in porphyroblasts establishing the progressive metamorphism evolution of Altay Hercynide. *Journal of Changchun University of Earth Science*, 21(1): 17 - 24 (in Chinese with English abstract)
- Zhuang YX. 1994a. Tectonothermal Evolution in Space and Time and Orogenic Process of Altaids, China. Changchun: Jilin Science and Technology Publishing House. 10 - 36 (in Chinese)
- Zhuang YX. 1994b. The pressure-temperature-space-time evolution of metamorphism and development mechanism of the thermal-structure-gneiss domes in the Chinese Altaids. *Acta Geologica Sinica*, 68(1): 35 - 47 (in Chinese with English abstract)
- 造及地壳演化. *新疆地质*, 19(1): 27 - 32
- 李天德, 祁志明, 吴柏青等. 1996. 中国和哈萨克斯坦阿尔泰地质及成矿研究的新进展. 见: 中国地质学会编, 献给三十届国际地质大会“八五”地质科技重要成果学术交流会议论文集. 北京: 冶金工业出版社, 256 - 259
- 厉子龙, 陈汉林, 杨树锋, 肖文交, Tainosho Y. 2004. 阿尔泰基性麻粒岩的发现: 来自矿物学的证据. *岩石学报*, 20(6): 1445 - 1455
- 梁细荣, 韦刚健, 李献华, 刘颖. 2003. 利用 MC-ICPMS 精确测定 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和 Sm/Nd 比值. *地球化学*, 32(1): 91 - 96
- 刘敦一, 简平, 张旗, 张福勤, 石玉若, 施光海, 张履桥, 陶华. 2003. 内蒙古林凯蛇绿岩中埃达克岩 SHRIMP 测年: 早古生代洋壳消减的证据. *地质学报*, 77(3): 318 - 327
- 曲国胜, 崇美英. 1991. 阿尔泰造山带的铅同位素地质及其构造意义. *现代地质*, 5(1): 100 - 110
- 王京彬, 秦克章, 吴志亮, 等. 1998. 阿尔泰山南缘火山喷流沉积型铅锌矿床. 北京: 地质出版社, 1 - 5
- 韦刚健, 梁细荣, 李献华, 刘颖. 2002. (LP) MC-ICPMS 方法精确测定液体和固体样品的 Sr 同位素组成. *地球化学*, 31(3): 295 - 299
- 张湘炳, 隋静霞, 李志纯, 刘伟, 杨新岳, 刘顺生, 黄怀勇. 1996. 额尔齐斯构造带构造演化与成矿系列. 北京: 科学出版社, 139 - 162
- 庄育勋, 陈斌. 1992. 中国阿尔泰造山带进变质构造穹窿的形成演化. *中国地质科学院地质研究所刊*, 25: 37 - 52
- 庄育勋, 陈斌. 1993. 阿尔泰造山带花岗岩片麻岩穹窿的形成与演化. *岩石矿物学杂志*, 12(2): 115 - 125
- 庄育勋. 1991. 递增变质作用中变斑晶形成的时间标志: 兼论阿尔泰地区变质带形成顺序. *长春地质学院学报*, 21(1): 17 - 24
- 庄育勋. 1994a. 中国阿尔泰造山带热动力时空演化和造山过程. 吉林: 吉林科学技术出版社, 10 - 36
- 庄育勋. 1994b. 中国阿尔泰造山带变质作用 PTSt 演化和热-构造-片麻岩穹窿形成机制. *地质学报*, 68(1): 35 - 47

附中文参考文献

- 陈毓川, 叶庆同等. 1996. 阿舍勒铜锌成矿带成矿条件和成矿预测. 北京: 地质出版社, 5 - 17
- 胡鸾琴, 王中刚, 涂光炽等. 1997. 新疆北部地质演化及其成岩成矿规律. 北京: 科学出版社, 9 - 105
- 胡鸾琴, 张国新, 张前锋, 李天德, 张积斌. 2002. 阿尔泰造山带变质岩系时代问题的讨论. *地质科学*, 37(2): 129 - 142
- 李天德, B. H. 波里扬斯基. 2001. 中国和哈萨克斯坦阿尔泰大地构