

阿尔泰造山带花岗岩时空演变、构造环境及地壳生长意义

——以中国阿尔泰为例

王涛¹, 童英¹, 李舫¹, 张建军¹, 史兴俊¹, 李锦轶¹, 韩宝福², 洪大卫¹

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要:阿尔泰造山带横跨中、俄、哈、蒙四国边界, 是中亚造山带主要组成部分, 发育大量的花岗岩等侵入体。本文研究总结这些岩体的时空演变、成因类型和构造环境, 并探讨其增生造山和地壳生长意义。依据锆石年龄, 这些岩体可大致分为早中古生代的 470~440 Ma(中晚奥陶世)和 425~360 Ma(晚志留世—晚泥盆世), 晚古生代的 355~318 Ma(早石炭世)和 290~270 Ma(早二叠世)以及早中生代 245~190 Ma(中晚三叠世—早侏罗世) 3 个阶段 5 个期次, 其中 425~360 Ma 花岗岩可进一步细分为 425~390 Ma 和 380~360 Ma 两个峰期。早中古生代(470~360 Ma)花岗岩体分布广泛, 主要为钙碱性 I 型, 多具不同程度变形, 其中 470~440 Ma 岩体变形极强(片麻岩体)。它们为同造山俯冲增生产物, 形成于活动陆缘俯冲(470~440 Ma), 继续俯冲—弧后盆地伸展(420~390 Ma)到聚合碰撞(380~360 Ma)的过程中。早石炭世岩体发育于造山带南部, 为不变形圆形或不规则状, 具典型碱性花岗岩特征, 为晚(后)造山产物。早二叠世岩体主要发育于阿尔泰造山带南部, 少量分布于造山带内部, 多为圆形, 不变形, 少量变形岩体集中在额尔齐斯构造带内, 成因类型以 I₁A 型为特点, 伴生有大量基性岩脉(体), 显示为后造山底侵伸展环境。早中生代岩体为不变形圆形或不规则状, 具有高分异 I 型和 S 型花岗岩特征, 伴有稀有金属矿产, 具有板内环境特点。花岗岩体同位素填图显示, 阿尔泰中部块体岩体具有较低的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值和老的 Nd 同位素模式年龄(1~1.3 Ga), 暗示存在古老地壳基底, 由北向南 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值增高, 模式年龄变年轻, 显示陆壳向南生长, 其中水平和垂向生长率分别为 18%~28% 和 7%~8%。中生代时期阿尔泰造山带保留水平增生结构, 没有发生大规模构造块体垂向叠覆。阿尔泰造山带经历了古陆缘构造演化, 奥陶纪—志留纪陆缘俯冲, 泥盆纪陆弧及陆缘边缘裂解, 弧后盆地形成, 晚泥盆世最终洋盆闭合及早石炭世各块体拼合的演化过程。该研究表明增生造山带中同样存在构造演化的阶段性, 中亚增生造山作用不仅具有弧前增生, 而且还存在陆缘裂解再拼合作用。

关键词:花岗岩; 锆石年代学; 同位素; 区域变形; 构造演化; 中亚造山带

中图分类号: P588.12⁺1; P54

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2010)06-0595-24

Spatial and temporal variations of granitoids in the Altay orogen and their implications for tectonic setting and crustal growth: perspectives from Chinese Altay

WANG Tao¹, TONG Ying¹, LI Shan¹, ZHANG Jian-jun¹, SHI Xing-jun¹, LI Jin-yi¹, HAN Bao-fu² and HONG Da-wei¹

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Key Laboratory of Orogenic Belt and Crustal Evolution, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The Altay orogen, which stretches across the boundary areas among China, Russia, Kazakhstan and Mongolia, is a major unit of the Central Asia Orogenic Belt. Numerous granitoid plutons occur in the orogen.

收稿日期: 2010-08-30; 修订日期: 2010-09-27

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助(973)项目(2001CB409800, 2007CB411307); 中国地质调查局资助项目(1212010611803, 1212010611817, 1212010811033); 国家自然科学基金项目(40702010); 中俄国际合作基金(40472101)

作者简介: 王涛(1959-), 男, 博士生导师, 从事花岗岩及构造地质研究, E-mail: taowang@cags.ac.cn.

This paper has summarized the spatial and temporal evolution of the plutons and discussed their tectonic setting and implications for crustal growth. According to zircon ages available, these plutons can be divided into three periods, namely early-middle Paleozoic, late Paleozoic and Mesozoic. The early-middle Paleozoic plutons can be subdivided into 470~440 Ma (middle-late Ordovician) and 425~360 Ma (late Ordovician-Late Devonian), the late Paleozoic into 355~318 Ma (early Carboniferous) and 290~270 Ma (early Permian), and the Mesozoic mainly into 245~190 Ma (middle-late Triassic-early Jurassic). The early-middle Paleozoic (470~360 Ma) plutons that occur widely are mainly of calc-alkaline I type subjected to various degrees of deformation, in which 470~440 Ma plutons occur as gneissic bodies. They were formed during syn-accretion orogenic processes, from the early active continental subduction (470~440 Ma) through continuous subduction/back-arc extension (420~380 Ma) to collision (380~360 Ma). The early Carboniferous plutons occur in the southern part of the orogen, and some of them are alkaline and show circular or irregular shape with insignificant deformation. They were emplaced in a late (or post) orogenic setting. The early Permian plutons mainly occur in the southern part of the orogen, with a few seen in the central part. They are mostly of circular shape and show very weak or no deformation except for a few deformed ones in the Ertix slip zone. The rock types are characterized by I and A types in association with mafic intrusions including dykes, displaying a post-orogenic extensional setting. The early Mesozoic plutons, showing circular or irregular shape without deformation, are characterized by high-differentiation I-type and S-type, associated with rare metal deposits. They were emplaced in an intercontinental setting. Nd isotopic mapping of the plutons indicates that $\epsilon\text{Nd}(t)$ values are lower (-4 to +2) in central Altay and higher (+1.4 to +6) in southern Altay; correspondingly, t_{DM} values decrease from 1.6~1.1 Ga in central Altay to 1.0~0.5 Ga in southern Altay. These results demonstrate that central Altay contains widespread old continental basement, whereas southern Altay comprises a significant proportion of juvenile crust, suggesting that the crust grew southward. The horizontal (lateral) and vertical crustal growth contributed ca. 18%~28% and 7%~8%, respectively, to the area of Chinese Altay. The authors' studies also suggest that the Altay orogen preserved original accretional crustal structures during Mesozoic, without large-scale vertical tectonic superposition. The Altay orogen experienced formation of an active continental margin, splitting of the margin to form a back-arc ocean and the final closing of the back-arc ocean. It is also held that the CAOBS underwent not only accretional processes but also back-arc opening and closure of microcontinent margins, which might have been a common process in the central Asian accretionary orogen.

Key words: granitoids; zircon geochronology; isotope; regional deformation; tectonic evolution; Central Asian Orogenic Belt

中亚造山带是全球最大的显生宙增生造山带 (Sengor *et al.*, 1993) 和陆壳生长区 (Jahn *et al.*, 2000a, 2000b; Pachett & Samson, 2003)。增生造山和陆壳生长一直是该造山带研究的重要内容,也是地球科学两大前沿课题。该造山带一个显著特点是发育巨量的、具有年轻幔源组分特点的花岗岩,它们是研究上述问题的重要对象。

阿尔泰造山带位于中国、蒙古、俄罗斯和哈萨克斯坦四国的交界处,是中亚造山带的重要组成部分,占据特殊的地位。其与整个中亚造山带一样发育大量的花岗岩。前人对中国阿尔泰花岗岩做了很多研究,积累了丰富资料(如邹天人等,1988;王中刚等,

1990,1998;刘伟,1990;肖序常等,1992;赵振华等,1993;何国琦等,1994;李华芹等,1998;王登红等,2002),并对其基本特征进行了初步总结(王登红等,2002)。这些花岗岩主体被认为主要形成于晚古生代,阿尔泰造山带也多被认为是晚古生代(海西)造山带。近年来,通过锆石年代学研究,中国阿尔泰造山带的花岗岩研究取得了重大进展,识别出众多早古生代和中生代花岗岩(如肖庆辉等,2009)。另外,中国地质调查局主持的亚洲国际地质编图项目为了解境外阿尔泰花岗岩的概况提供了基础材料。上述资料为系统、精确确定阿尔泰花岗岩形成演化序列,并探讨构造岩浆演化奠定了基础。本文系统总结这

些研究成果,给出一些新的年龄和地球化学测试结果,并通过与境外阿尔泰对比,试图建立整个阿尔泰造山带花岗岩年代学格架,确定成因演化、构造环境,探讨其增生造山和陆壳生长意义。

1 区域地质基本概况

阿尔泰造山带位于中亚造山带西南部,北邻西萨彦岭古岛弧带,南侧以额尔齐斯断裂与斋桑造山带、准噶尔地块和东准噶尔-南蒙古造山带相邻(图1)。该造山带基本组成单元在中国阿尔泰及邻区(蒙古)研究较为详细(如何国琦等,1994; Windley *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2003; 李锦轶, 2004; Xiao *et al.*, 2004; 李锦轶等, 2006a)。Windley等(2002)将中国阿尔泰造山带由北向南划分为6个块体(图1)。块体1主要包括中晚泥盆世的安山岩、英安岩以及晚泥盆世到早石炭世的页岩、粉砂岩、杂砂岩、砂岩、石灰岩。块体2位于西阿尔泰,主要包括哈巴河群(中奥陶世—志留纪),夹一部分变质程度较低的新元古代—早泥盆世的沉积岩、火山岩。块体3是中阿尔泰的主体部分,由角闪岩相的变质沉积岩、中奥陶世—志留纪的浊积岩以及一部分早古生代和可能为前寒武纪(新元古代)的高级变质沉积岩组成。块体2和块体3实际上可以并为一个块体,具有微陆块的性质(Hu *et al.*, 2000; Windley *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2003; Xiao *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2006)。块体4包括康布铁堡组和阿尔泰组(Windley *et al.*, 2002)。康布铁堡组主要由弧火山岩、火山碎屑岩以及很少的一部分基性火山岩和细碧岩组成,属晚志留世—早泥盆世(Chai *et al.*, 2008)。阿尔泰组变质程度较低,主要为一套浊流沉积和砂页岩,含有少量的玄武岩、酸性火山岩和石灰岩,其中化石显示为中泥盆世,它们被认为形成于弧前盆地(Windley *et al.*, 2002; Long *et al.*, 2007)。块体5也包括一些变质程度较高的片麻岩、片岩,新的锆石年代学研究表明其可能形成于石炭纪(刘锋等, 2008),而不是以前认为的前寒武基底(曲国胜等, 1991)。块体6基本上是由泥盆纪岛弧和少量奥陶纪石灰岩及石炭纪火山岩组成,属准噶尔块体北缘,额尔齐斯边界断裂带将其与块体5分开。额尔齐斯断裂带是中亚最大的一个走滑断层(Sengor *et al.*, 1993; 何国琦等, 1994; Briggs *et al.*, 2007),被认为是古生代俯冲带(何国琦等, 1994; Xiao *et al.*, 2004)。

总的看来,中国阿尔泰造山带以红山嘴-诺尔特断裂、康布铁堡-库尔特断裂和额尔齐斯断裂带为界,可以简单地归为北、中、南阿尔泰,即北、中、南3个块体(如何国琦等, 1994; Li *et al.*, 2003; Xiao *et al.*, 2004)。北阿尔泰块体(块体1)主要由中晚泥盆世火山岩(安山岩、英安岩等)和晚泥盆世—早石炭世火山-沉积岩组成。中阿尔泰即中部块体(块体2和3)主要为震旦纪—早古生代深变质岩系以及奥陶纪—二叠纪侵入岩,并可能有前寒武纪基底(Hu *et al.*, 2000),具有微陆块的特点(Li *et al.*, 2003; 李锦轶, 2004; 李锦轶等, 2006a; 李会军等, 2006)。南阿尔泰(块体4和5)由(元古宙?)片麻岩和古生代(志留纪—石炭纪)火山-沉积岩岩系组成,后者可解释为岛弧产物(Windley *et al.*, 2002; Xiao *et al.*, 2004)。之南,为阿尔泰造山带与准噶尔造山带(块体6)分界的额尔齐斯断裂带(或挤压带)(何国琦等, 1994)。上述构造单元向东均延入蒙古境内(Xiao *et al.*, 2004),其中,北阿尔泰构造单元向东延伸至蒙古后尖灭,与另一个单元接触,该单元由寒武纪浊积岩、奥陶纪—泥盆纪砂岩、泥岩、千枚岩及玄武岩、安山岩组成。上述构造单元向西,如何延伸至俄罗斯、哈萨克斯坦阿尔泰还有待于进一步研究。本文依据地质图大致将这些构造单元延伸至俄罗斯阿尔泰境内。

综合上述研究(如何国琦等, 1994; Windley *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2003; Xiao *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2006)认为阿尔泰造山带于晚前寒武世晚期到早古生代早期为稳定大陆边缘阶段,大致从晚寒武世开始发生俯冲、增生,其中,早古生代(奥陶纪—泥盆纪)为洋壳俯冲阶段;之后,可能发生碰撞造山作用,于中石炭世基本奠定了阿尔泰造山带的构造格局;而额尔齐斯以南即准噶尔造山带,在石炭纪可能仍有俯冲碰撞作用发生。

2 花岗岩时空演变——锆石年代学格架

有关地质图资料显示,阿尔泰显生宙花岗岩从寒武纪到侏罗纪均有发育。但是,寒武纪(500~490 Ma)花岗岩仅有一个岩体,发育于阿尔泰造山带东端的蒙古境内。该岩体时代和年龄还有待于进一步检验。

在已有研究基础上,本文进一步收集了境内外阿尔泰花岗岩的锆石年龄,初步建立了构造岩浆时序和年代学格架(表1、图1、图2)。阿尔泰花岗岩的

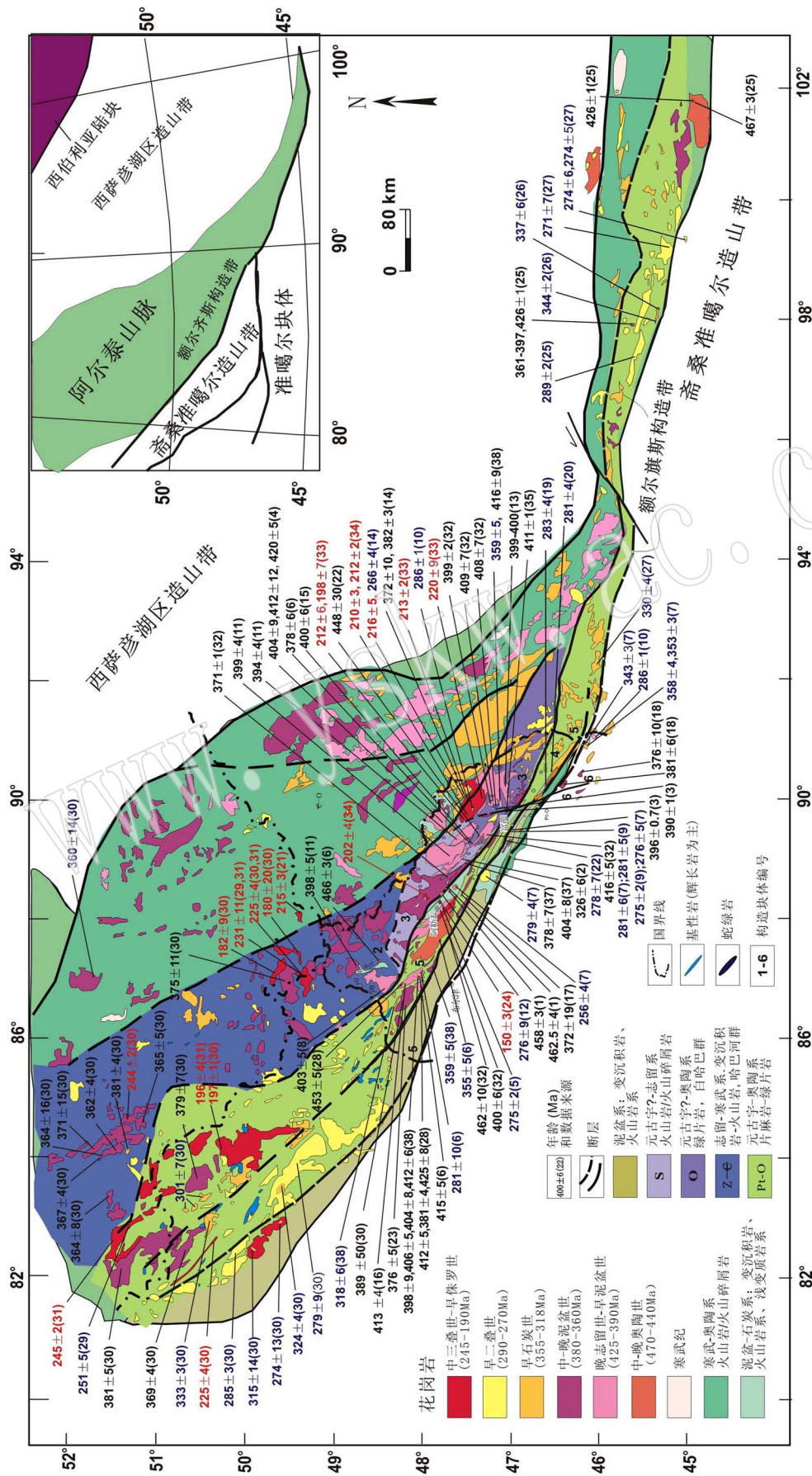


图 1 阿尔泰山花岗岩地质简图 [据邹天人等 (1988)、Wang 等 (2006)、任纪舜等 (2010) 修编, 数据来源详见表 1]

Fig. 1 Sketched map for granitoids in Altray orogen (After Zou Taimen *et al.*, 1988; Wang *et al.*, 2006; Ren jishun *et al.*, 2010), data sources from Table 1)

表 1 阿尔泰山花岗岩锆石年龄

Table 1 Zircon age data of granitoids in the Altay orogen

序号	岩体名称	构造位置	经纬度	岩性	年龄/Ma	误差	方法	年龄资料来源	图 1 中的编号
1	将军山	南阿尔泰		花岗岩	150	3	TIMS	Chen 和 Jahr(2002)	24
2		哈-俄阿尔泰		花岗岩	180	20	U-Pb	Vladimirov 等(2001)	30
3		哈-俄阿尔泰		花岗岩	182	9	U-Pb	Vladimirov 等(2001)	30
4		哈-俄阿尔泰		花岗岩	196	4	U-Pb	Vladimirov 等(2005)	31
5		哈-俄阿尔泰		花岗岩	197	1	U-Pb	Vladimirov 等(2001)	30
6	可可托海	中阿尔泰		伟晶岩	198	7	SHRIMP	Wang 等(2007)	33
7	尚可兰	中阿尔泰		碱长花岗岩	202	4	SHRIMP	Wang 等(2008)	34
8	阿拉尔	中阿尔泰		二云花岗岩	210	3	LA-ICP-MS	Wang 等(2008)	34
9	可可托海	中阿尔泰		伟晶岩	212	6	SHRIMP	Wang 等(2007)	33
10	阿拉尔	中阿尔泰		二云花岗岩	212	2	TIMS	Wang 等(2008)	34
11	可可托海伟晶岩	中阿尔泰		晚期脉	213	2	SHRIMP	Wang 等(2007)	33
12	Kalguty	北阿尔泰		花岗岩	215	3	SHRIMP	Annikova 等(2006)	21
13	哈腊苏铜矿区	南阿尔泰		蚀变石英闪长斑岩	216	5	SHRIMP	薛春纪等(2010)	14
14	可可托海伟晶岩	中阿尔泰		伟晶岩	220	9	SHRIMP	Wang 等(2007)	33
15		矿山阿尔泰		花岗岩	225	4	U-Pb	Vladimirov 等(2001)	30
16		哈-俄阿尔泰		花岗岩	225	4	U-Pb	Vladimirov 等(2005)	31
17		矿山阿尔泰		花岗岩	231	11	U-Pb	Vladimirov 等(1997)	29
18		哈-俄阿尔泰		花岗岩	231	11	U-Pb	Vladimirov 等(2005)	31
19		哈-俄阿尔泰		花岗岩	244	2	U-Pb	Vladimirov 等(2001)	30
20		哈-俄阿尔泰		花岗岩	245	7	U-Pb	Vladimirov 等(2005)	31
21		哈-俄阿尔泰		花岗岩	245	2	U-Pb	Vladimirov 等(2005)	31
22		哈-俄阿尔泰		花岗岩	251	5	U-Pb	Vladimirov 等(1997)	29
23	哈拉苏	南阿尔泰		黑云母花岗岩	256	4	LA-ICP-MS	童英(2006)	7
24	哈腊苏铜矿区	南阿尔泰		蚀变石英二长斑岩	266	4	LA-ICP-MS	薛春纪等(2010)	14
25	Gobi-Altai	蒙古阿尔泰		花岗岩	271	7	TIMS	Kozakov 等(2007)	27
26	Uench River	北阿尔泰东部		花岗岩	271	7	U-Pb	Kozakov 等(2007)	27
27	Tan-Altai	蒙古阿尔泰		花岗岩	274	5	TIMS	Kozakov 等(2007)	27
28	Tan-Altai(Khatai-khaikhan)	蒙古阿尔泰		花岗岩	274	6	TIMS	Kozakov 等(2007)	27
29	Uench River	北阿尔泰东部		花岗岩	274	5	U-Pb	Kozakov 等(2007)	27
30	Uench River	北阿尔泰东部		花岗岩	274	6	U-Pb	Kozakov 等(2007)	27
31		哈-俄阿尔泰		花岗岩	274	13	U-Pb	Vladimirov 等(2001)	30
32	富蕴	南阿尔泰		黑云母花岗岩	275	2	TIMS	童英等(2006b)	9
33	沙尔布拉克南	南阿尔泰		二云母花岗岩	275	2	SHRIMP	孙桂华等(2009)	5
34	布尔津南	南阿尔泰		斑状黑云母花岗岩	276	5	La-ICP-MS	童英(2006)	7
35	喇嘛昭(康布铁堡)	南阿尔泰		黑云母二长花岗岩	276	9	SHRIMP	王涛等(2005)	12
36	额尔齐斯挤压带	南阿尔泰		花岗岩	278	7	LA-ICP-MS	Briggs 等(2007)	22
37	锡泊渡	南阿尔泰		黑云母花岗岩	279	4	LA-ICP-MS	童英(2006)	7
38		哈-俄阿尔泰		花岗岩	279	9	U-Pb	Vladimirov 等(2001)	30
39	冲乎尔南	南阿尔泰		伟晶岩脉	281	10	LA-ICP-MS	孙敏等(2009)	6
40	阿尔泰	南阿尔泰		辉长岩	281	6	SHRIMP	童英(2006)	7
41	富蕴	南阿尔泰		黑云母花岗岩	281	5	TIMS	童英等(2006b)	9
42	玛因鄂博	南阿尔泰		花岗岩糜棱岩	281	4	SHRIMP	周刚等(2007a)	20
43	玛因鄂博	南阿尔泰		黑云母花岗岩	283	4	SHRIMP	周刚等(2007b)	19
44		哈-俄阿尔泰		花岗岩	285	3	U-Pb	Vladimirov 等(2001)	
45	塔克什肯口岸	南阿尔泰		正长岩	286	1	TIMS	童英等(2006c)	10
46	Tessel Block	蒙古阿尔泰		(变质)花岗岩闪长岩	289	2	SHRIMP	Helo 等(2006)	25
47		哈-俄阿尔泰		花岗岩	301	7	U-Pb	Vladimirov 等(2001)	30
48		哈-俄阿尔泰		花岗岩	315	14	U-Pb	Vladimirov 等(2001)	30
49	阿舍勒	南阿尔泰		花岗岩闪长岩	318	6	LA-ICP-MS	Yuan 等(2007)	38
50		哈-俄阿尔泰		花岗岩	324	4	U-Pb	Vladimirov 等(2001)	30
51		南阿尔泰		闪长质	326	6	SHRIMP	刘国仁等(2008)	2
52	Tan-Altai	蒙古阿尔泰		花岗岩	330	4	TIMS	Kozakov 等(2007)	27
53		哈-俄阿尔泰		花岗岩	333	3	U-Pb	Vladimirov 等(2001)	30
54	Unegt Uul	蒙古阿尔泰		淡色花岗岩	337	6	LA-ICP-MS	Hrdličková 等(2008)	26
55	布尔根	南阿尔泰		黑云母二长花岗岩	343	3	SHRIMP	童英(2006)	7
56	Chandman			淡色花岗岩	344	2	LA-ICP-MS	Hrdličková 等(2008)	26
57	布尔根	南阿尔泰		碱性花岗岩	353	3	SHRIMP	童英(2006)	7

续表 1-1

Continued Table 1-1

序号	岩体名称	构造位置	经纬度	岩性	年龄/Ma	误差	方法	年龄资料来源	图 1 中的编号
58	塔尔浪	南阿尔泰		片麻状二云母花岗岩	355	5	La-ICP-MS	孙敏等(2009)	6
59	布尔根	南阿尔泰		碱性花岗岩	358	4	SHRIMP	童英(2006)	7
60	塔尔浪	南阿尔泰		花岗闪长岩	359	5	LA-ICP-MS	Yuan 等(2007)	38
61		哈-俄阿尔泰		花岗岩	360	14	U-Pb	Vladimirov 等(2001)	30
62	Tessel Block	蒙古阿尔泰		片麻状花岗岩	361	1	Pb/Pb 蒸发法	Helo 等(2006)	25
63		哈-俄阿尔泰		花岗岩	362	4	U-Pb	Vladimirov 等(2001)	30
64		哈-俄阿尔泰		花岗岩	364	16	U-Pb	Vladimirov 等(2001)	30
65		哈-俄阿尔泰		花岗岩	364	8	U-Pb	Vladimirov 等(2001)	30
66		哈-俄阿尔泰		花岗岩	365	5	U-Pb	Vladimirov 等(2001)	30
67		哈-俄阿尔泰		花岗岩	367	4	U-Pb	Vladimirov 等(2001)	30
68		哈-俄阿尔泰		花岗岩	369	4	U-Pb	Vladimirov 等(2001)	30
69		哈-俄阿尔泰		花岗岩	371	15	U-Pb	Vladimirov 等(2001)	30
70	乌里奇	中阿尔泰		花岗岩	371	1	TIMS	Wang 等(2006)	32
71	哈腊苏铜矿区	南阿尔泰		花岗闪长斑岩	372	10	SHRIMP	薛春纪等(2010)	14
72	库尔堤	中阿尔泰		斜长花岗岩	372	19	SHRIMP	Zhang Haixiang 等(2003)	17
73		哈-俄阿尔泰		花岗岩	375	11	U-Pb	Vladimirov 等(2001)	30
74	哈巴河	南阿尔泰		辉绿岩脉	376	5	SHRIMP	Ca 等(2010)	23
75	喀腊萨依	南阿尔泰		二长闪长斑岩	376	10	SHRIMP	张招崇等(2006a)	18
76	可可托海西	中阿尔泰		片麻状黑云母花岗岩	378	6	La-ICP-MS	孙敏等(2009)	6
77	蒙库	中阿尔泰		英云闪长岩	378	7	SHRIMP	Xu 等(2010)	37
78		哈-俄阿尔泰		花岗岩	379	7	U-Pb	Vladimirov 等(2001)	30
79	希勒克特哈腊苏	南阿尔泰		花岗闪长斑岩	381	6	SHRIMP	张招崇等(2006a)	18
80	布尔津	南阿尔泰		糜棱岩	381	4	LA-ICP-MS	Sun Min 等(2008)	28
81		哈-俄阿尔泰		花岗岩	381	4	U-Pb	Vladimirov 等(20010)	30
82		哈-俄阿尔泰		花岗岩	381	5	U-Pb	Vladimirov 等(2001)	30
83	哈腊苏铜矿区	南阿尔泰		斑状花岗岩	382	3	La-ICP-MS	薛春纪等(2010)	14
84		哈-俄阿尔泰		花岗岩	389	50	U-Pb	Vladimirov 等(2001)	30
85				黑云母花岗岩	390	1	TIMS	刘建民等(2009)	3
86	琼库尔	中阿尔泰		黑云母花岗岩	394	4	LA-ICP-MS	童英等(2007)	11
87	可可托海	中阿尔泰		钾长花岗岩	396	0	TIMS	刘建民等(2009)	3
88	Tessel	蒙古阿尔泰		片麻状花岗岩	396	3	SHRIMP	Helo 等(2006)	25
89	Tessel	蒙古阿尔泰		片麻状花岗岩	397	3	SHRIMP	Helo 等(2006)	25
90	喀纳斯	中阿尔泰		黑云母二长花岗岩	398	5	LA-ICP-MS	童英等(2007)	11
91	哈巴河	南阿尔泰		二云母花岗岩	398	9	LA-ICP-MS	Yuan 等(2007)	38
92	琼库尔	中阿尔泰		片麻状花岗岩	399	4	LA-ICP-MS	童英等(2007)	11
93	青格里	中阿尔泰		花岗岩	399		TIMS	王中刚等(1998)	13
94	可可托海	中阿尔泰		片麻状花岗岩	399	2	TIMS	Wang 等(2006)	32
95	蒙库	中阿尔泰		斜长花岗岩	400	6	SHRIMP	杨富全等(2008)	15
96	阿维滩	南阿尔泰		片麻状花岗岩	400	6	SHRIMP	Wang 等(2006)	32
97	铁列克	中阿尔泰		黑云母花岗岩	403	5	LA-ICP-MS	童英等(2005)	8
98	诺尔特	北阿尔泰		花岗岩	404	9	Pb/Pb 蒸发法	楼法生(1997)	4
99	蒙库	中阿尔泰		黑云母花岗岩	404	8	SHRIMP	Xu 等(2010)	37
100	塔尔浪	南阿尔泰		花岗岩	404	8	LA-ICP-MS	Yuan 等(2007)	38
101	塔尔浪	南阿尔泰		花岗岩	406	5	LA-ICP-MS	Yuan 等(2007)	38
102	可可托海	中阿尔泰		辉长岩	408	7	SHRIMP	Wang 等(2006)	32
103	可可托海	中阿尔泰		花岗岩	409	7	SHRIMP	Wang 等(2006)	32
104	可可托海	中阿尔泰		闪长片麻岩	411	1	Pb/Pb 蒸发法	Windley 等(2002)	35
105	诺尔特	北阿尔泰		花岗岩	412	12	Pb/Pb 蒸发法	楼法生(1997)	4
106	布尔津	南阿尔泰		浅色花岗岩	412	5	LA-ICP-MS	Sun Min 等(2008)	28
107	塔尔浪	南阿尔泰		花岗闪长岩	412	6	LA-ICP-MS	Yuan 等(2007)	38
108	冲乎尔	中阿尔泰		花岗岩	413	4	SHRIMP	曾乔松等(2007)	16
109	冲乎尔南	南阿尔泰		片麻状黑云母花岗岩	415	5	La-ICP-MS	孙敏等(2009)	6
110	库尔堤	中阿尔泰		片麻状花岗岩	416	5	SHRIMP	Wang 等(2006)	32
111	富蕴	南阿尔泰		花岗闪长岩	416	9	LA-ICP-MS	Yuan 等(2007)	38
112	诺尔特	北阿尔泰		花岗岩	420	5	Pb/Pb 蒸发法	楼法生(1997)	4
113	布尔津	南阿尔泰		花岗岩	425	8	LA-ICP-MS	Sun Min 等(2008)	28

续表 1-2

Continued Table 1-2

序号	岩体名称	构造位置	经纬度	岩性	年龄/Ma 误差	方法	年龄资料来源	图 1 中的编号
114	Bayanaleg Hatuu			(变质)花岗岩质	426	1 SHRIMP	Helo 等(2006)	25
115	阿尔格达依	南阿尔泰		变辉长岩	439	17 SHRIMP	Wong 等(2010)	36
116	诺尔特	北阿尔泰		花岗岩	440	5 Pb/Pb 蒸发法	楼法生(1997)	4
117	额尔齐斯挤压带	南阿尔泰		花岗岩	448	30 LA-ICP-MS	Briggs 等(2007)	22
118	布尔津	南阿尔泰		花岗闪长岩	453	5 LA-ICP-MS	Sun Min 等(2008)	28
119	阿巴宫	南阿尔泰		片麻状二云母正长花岗岩	458	3 SHRIMP	刘锋等(2008)	1
120	切木尔切克	南阿尔泰		片麻状花岗岩	462	10 SHRIMP	Wang 等(2006)	32
121	阿巴宫	南阿尔泰		片麻状二云母正长花岗岩	463	4 SHRIMP	刘锋等(2008)	1
122	禾木	中阿尔泰		片麻状黑云母花岗岩	466	3 La-ICP-MS	孙敏等(2009)	6
123	Bayanaleg Hatuu			(变质)花岗岩质	467	3 SHRIMP	Helo 等(2006)	25

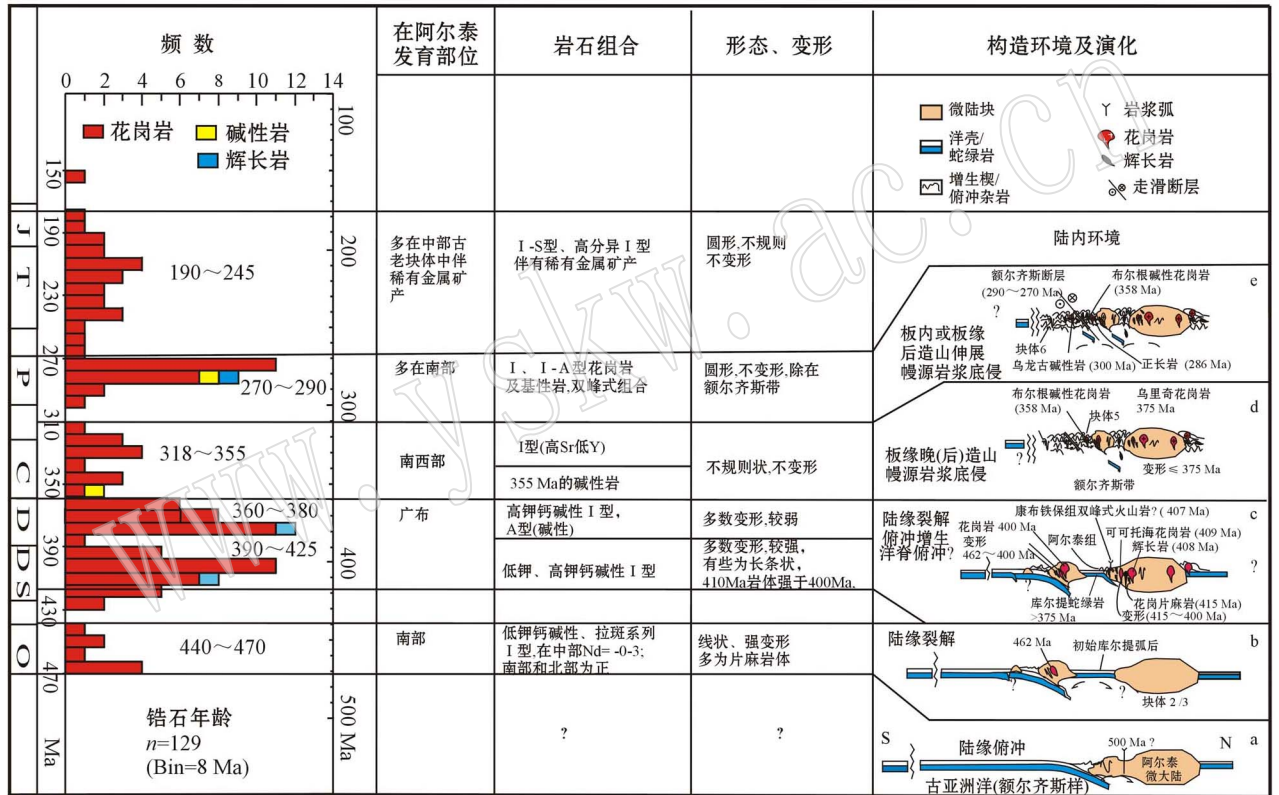


图 2 阿尔泰花岗岩锆石年龄、岩浆期次和特征以及构造环境演化综合示意图

Fig. 2 Integration map showing zircon ages, magmatic phases, petrological characteristics and tectonic settings of the granitoids in the Altay orogen

时代主要集中在奥陶纪—侏罗纪,可大致分为早中古生代、晚古生代和中生代等 3 个阶段,其中,每个阶段还可以细分为几个期次。

2.1 中晚奥陶世花岗岩(470~440 Ma)

目前,该期花岗岩主要发现于中国阿尔泰,有可靠锆石年龄的有 4 个岩体(Wang *et al.*, 2006; Sun Min *et al.*, 2008),出露于阿尔泰中部和南部,形态多为长条状,发育透入性条带状、片麻状构造,其结构具有岩浆流动向高温固态流动连续过渡的特点,

这是同构造岩体及同侵位变形特征。岩石类型主要为黑云母斜长质、英云闪长质、花岗闪长质片麻岩。有些岩体发育浅色和暗色相间的条带状构造,显示了混合片麻岩的特点;有些地带花岗岩与片麻岩界线模糊,可能说明该岩体与混合片麻岩有密切的关系,形成时间相近,成因可能有一定联系,如切木尔切克或塔尔浪-阿维滩岩体。

在境外,仅在蒙古阿尔泰东端一个岩体显示有 467 Ma 数据,该岩体被早志留世花岗岩(425 Ma)侵

入。

2.2 晚志留世—泥盆纪花岗岩(425~360 Ma)

该期花岗岩广泛发育于阿尔泰造山带,已经获得大量锆石年龄,显示几乎连续的长的演化历史,但经过年龄数据的仔细处理,以8 Ma为间隔,可以进一步区分出两期峰值,即早期(425~390 Ma)和晚期(380~360 Ma)。值得指出的是,尽管不同年龄来自不同的实验室,系统误差不很清楚,而且有些年龄的误差超过8 Ma,但是,考虑到钟摆效应,从统计结果看,仍然存在上述两个峰值,说明这是客观存在的,可能揭示了较为细微的构造岩浆演化特点。

425~390 Ma 岩体分布较广,在中国阿尔泰有几十个岩体,岩石类型主要为黑云母花岗闪长岩、二长花岗岩,发育不同程度的片麻状构造,有些呈现条带状片麻理,有些为石英和长石单矿物的定向片麻理。一些岩体(如可可托海岩体)发育面理、线理,呈现S-L组构。该时期还发育基性岩体,如可可托海辉长岩(408±6 Ma, Wang *et al.*, 2006),其呈小岩体或大包体产于可可托海花岗岩体中及西部边缘地带。从新提供的俄罗斯和蒙古阿尔泰地质图分析,阿尔泰造山带北部及东部分布有很多志留纪花岗岩,但是缺少可靠的同位素(锆石)年龄,还有待于进一步研究。

380~360 Ma 岩体主要发育于阿尔泰北部和中部,主要为黑云母花岗闪长岩、二长花岗岩,变形相对较弱。在俄罗斯阿尔泰山(山区阿尔泰),岩体的锆石 U-Pb 年龄和 Rb-Sr 等时线年龄在 380~360 Ma 之间(Vladimirov *et al.*, 1997; Plotnikov *et al.*, 2001; Kruk *et al.*, 2004),岩石类型为似斑状黑云母花岗岩、亚碱性和碱性(含钠闪石)花岗岩、二长花岗岩、石榴石电气石花岗岩和似斑状黑云母堇青石花岗岩等(韩宝福, 2008)。

2.3 早石炭世(碱性)花岗岩(355~318 Ma)

该期岩体发育于中国阿尔泰东南部,为典型的碱性花岗岩(如布尔根岩体,王中刚等,1990)和黑云母花岗岩。碱性花岗岩前人已获得众多年龄(如,253±18 Ma,全岩-矿物 Rb-Sr,王中刚,1989;316 Ma,全岩 Rb-Sr,刘家远等,1996)。笔者通过锆石 SHRIMP 和 LA-ICPMS 定年,获得 358±4 Ma(碱性花岗岩)、353±3 Ma(碱性花岗岩)和 343±3 Ma(黑云母二长花岗岩)(童英,2006)的年龄数据,属早石炭世。该时期碱性花岗岩的确定为探讨构造环境演化提供了主要依据。

另外,在阿尔泰南缘地段还发育少量 330~310 Ma 花岗岩,有些显示埃达克质特点(Yuan *et al.*, 2007)。在蒙古阿尔泰,发育不同的侵入岩组合,年龄集中在 350~330 Ma,主要为花岗闪长岩、斜长花岗岩、闪长岩(Yarmolyuk *et al.*, 2008)。

2.4 早二叠世花岗岩、基性岩(290~270 Ma)

该期侵入岩分布较广,主要分布在造山带南缘及额尔齐斯一带(中国阿尔泰块体 5、6)。个别岩体发育于造山带内部。多数岩体为圆形和不规则形态,无变形,仅额尔齐斯断裂带内的一些花岗岩显示有变形(童英等,2007;孙桂华等,2009)。此外,发育有大量同时代基性岩(脉)阿尔泰变辉长岩为 281±6 Ma(本文资料),哈拉通克超基性岩(287±6 Ma)(U-Pb)(Han *et al.*, 2004),似乎显示一种“双峰式”岩浆组合。

俄罗斯阿尔泰发育少量晚石炭世—二叠纪花岗岩类,其锆石年龄也多集中在 290~270 Ma 之间(Kozlov *et al.*, 1991; Vladimirov *et al.*, 2001)。

值得一提的是,早二叠世侵入岩在中亚造山带及邻区大量发育,如玄武岩大火成岩省和幔源岩浆侵入杂岩(如杨树锋等,2005;李锦轶等,2006b;童英等,2010a,2010b),阿尔泰早二叠世岩体是其中的表现。

2.5 早中生代花岗岩(245~190 Ma)

前人(Chen *et al.*, 2000)研究显示,一些 Rb-Sr 和 Ar-Ar 年龄也反映中国阿尔泰发育晚中生代花岗岩和成矿作用。但是,中国阿尔泰是否存在中生代花岗岩?由于没有锆石年代学的证据,一直存有疑问。笔者通过锆石定年,确定了3个早中生代三叠纪花岗岩体,如阿拉尔黑云母二长花岗岩(212±2 Ma 和 210±3 Ma)和尚可兰黑云母碱长花岗岩(202±4 Ma)。另外,长期以来著名的阿尔泰可可托海3号伟晶岩的年代学问题一直没有很好地得到解决,已经获得多达20余个 Rb-Sr、K-Ar 或 Ar-Ar 年龄,笔者进行了锆石(SHRIMP)定年研究,获得不同相带4个锆石 SHRIMP 年龄为 220±9 Ma、198±7 Ma、213±6 Ma 和 213±6 Ma(Wang *et al.*, 2007)。朱永峰等(Zhu *et al.*, 2006)也获得了相似的 Rb-Sr 等时线年龄。

通过与境外对比(韩宝福,2008;李舳等,2010),阿尔泰早中生代花岗岩的年龄集中在 196~245 Ma,大致可分为两期:245~228 Ma 和 225~196 Ma。245~228 Ma 侵入岩多出露在蒙俄哈阿尔泰地区,主要岩石类型为黑云母和二云母花岗闪长岩、二

长花岗岩及淡色花岗岩。这些岩石又被细晶质到伟晶质的白云母和白云母-电气石淡色花岗岩岩株和岩脉侵入。225~196 Ma 侵入岩分布较广,如中国阿尔泰,主要为黑云母(二云母)二长花岗岩、黑云母碱长花岗岩。在蒙古阿尔泰 Chigerte 和 Sagsai 地块中发育的淡色花岗岩的年龄为 225 ± 10 Ma (U-Pb, Demin *et al.*, 2001)。在俄罗斯阿尔泰,也发育淡色花岗岩(253~180 Ma, U-Pb, Vladimirov *et al.*, 2001, 2005),且发育有同期的碱性镁铁质岩脉(Pavlova *et al.*, 2008)。另外,阿尔泰造山带还发育极少量的侏罗纪花岗岩,如中国阿尔泰将军山岩体(152 Ma, Chen and Jahn, 2002)。

3 各期次花岗岩组合特征及成因类型

3.1 中晚奥陶世强片麻状侵入体(470~440 Ma)

该类花岗岩质岩石主要为(含角闪石)黑云母英

云闪长岩、花岗闪长岩,以切木尔切克岩体为代表(Wang *et al.*, 2006),以钠质为特点,这与泥盆纪花岗岩明显不同(见下)。铝饱和指数 $ACNK = Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)$ (克分子比值)变化于 1.06~1.2,为弱过铝质(图 3); $A/NK [Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O) = 1.5 \sim 2.1]$ 较高或过碱指数 $AKI [(Na_2O + K_2O) / Al_2O_3]$ 较低,为 0.33~0.57;里特曼指数(σ)较小(1.23~1.71),大大小于 3.0。可见,尽管在有些图解中这些样品接近碱性花岗岩或 A 型花岗岩,但该岩石属于钙碱性系列,在有关常量元素的图解中大都位于拉斑系列及钙碱性花岗岩区(图 3)。值得指出的是,该类花岗岩质岩石只是变形强烈,多数变质或者成分变化不是很大,一些活动性元素可能基本上保留了反映原始特征。

该类岩石稀土元素总量较高,配分曲线较平缓,钫略具异常。在原始地幔标准化的蜘蛛网图解中, Ba、Sr、P、Nb、Ti 为负异常, Rb、Th、K、La 为正异

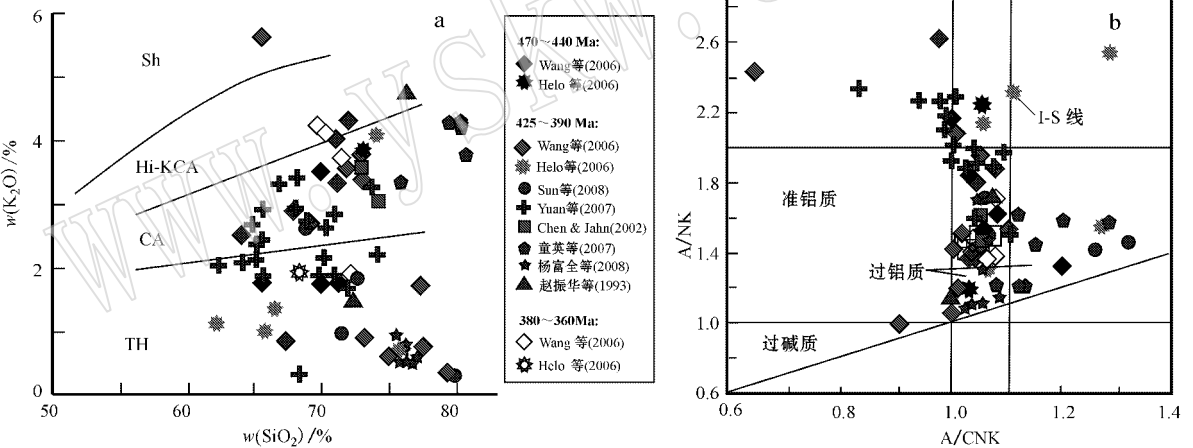


图 3 阿尔泰造山带早中古生代花岗岩的常量元素图解

(a) $K_2O - SiO_2$ 图解(据 Peccerillo 和 Taylor, 1976) (b) $A/NK - A/CNK$ 图解

Fig. 3 Major element diagrams for rock types of the early-middle Paleozoic granitoids in the Altay orogen

(a) $K_2O - SiO_2$ diagram(after Peccerillo and Taylor, 1976) (b) $A/NK - A/CNK$ diagram

常,表明这些花岗岩具有地壳熔体的特点,而源区残余相中含有斜长石、磷灰石和可能的黑云母(Ba 亏损)。另外,微粒包体不发育也说明了这一点。P、Nb、Ti 负异常也是很多岛弧花岗岩的特点。此外, Th 为正异常, Ta 略微负异常, Th/Ta 较高,又显示了俯冲带岩浆的特点(Roger and Hawkeswrth, 1989)。

晚奥陶世(470~440 Ma)强片麻状花岗岩的 $\epsilon Nd(t)$ 值稳定,变化于 $-1.2 \sim +0.5$ (图 4),模式年

龄 t_{DM} (单阶段)变化于较老(1.23~1.9 Ga),相对其他花岗岩似乎含有较多的壳源组分。

3.2 晚志留世—泥盆纪片麻状侵入岩(425~360 Ma)

早期(425~390 Ma)花岗岩主要岩石类型为黑云母英云闪长岩、花岗闪长岩和二长花岗岩,伴生闪长岩、辉长岩等基性岩,如中国阿尔泰 410~390 Ma 的可可托海-吐尔洪花岗岩、闪长岩-辉长岩组合。岩石类型以钙碱性系列为主,少量为高钾钙碱性

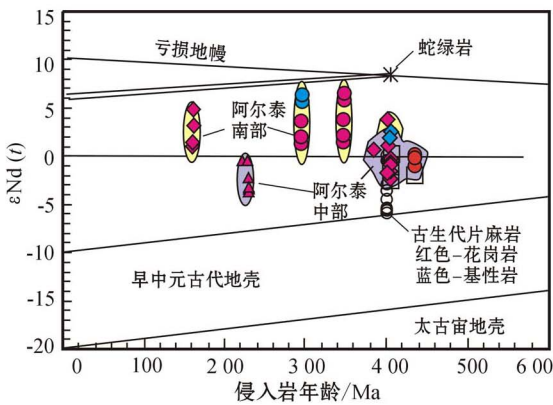


图4 阿尔泰造山带花岗岩的同位素特征

Fig. 4 Isotopic features of the granitoids in the Altay orogen

(图3), 总体 $K_2O < Na_2O$, $K_2O/Na_2O = 0.83 \sim 1.1$, 略高于晚奥陶世—早志留世强片麻状花岗岩, 但仍具有钠质花岗岩特点。铝饱和指数变化于 $0.92 \sim 1.2$, 为准铝质及过铝质(图3)。里特曼指数(σ)为 $1 \sim 1.8$ (小于 3.0), $A/NK = 1.4 \sim 2.8$, 属于钙碱性系列, 少量为高钾钙碱性(图3)。稀土元素配分型式平缓, LREE 略富集, $(La/Yb)_N$ 较高一些($3.8 \sim 9.4$)。 δEu 值略高($0.4 \sim 0.7$), 示弱铕负异常。Ce 略有亏损, 可能是岛弧花岗岩的特点。微量元素显示 Ba、Sr、P、Nd、Ti 负异常, Rb、Th、K、La、Nd 正异常, 似乎显示了一定的壳源特点。在 AFM 图解和 $\text{Log}[CaO/(K_2O + Na_2O)] - SiO_2$ 图解上, 显示了其来源于成熟度较低的地壳。该类花岗岩含有细粒闪长质包体, 其稀土元素配分型式与主岩石基本相同。

大部分基性岩石具有拉斑玄武岩成分特点, 如可可托海花岗岩中呈小岩体或包体产出的暗色辉石闪长岩, 其 $\sum REE$ 为 34×10^{-6} , 稀土元素配分曲线十分平缓, 无铕异常, 与花岗岩呈互补关系。辉长岩则显示右倾, 轻重稀土元素有分馏, 并具有显著的铕正异常。另外, 最显著的特点是富集 Sr、Rb、K 等大离子亲石元素(LILE)和 LREE, 贫 Ba、Th、Y 和高场强元素 Nb、Ta、Ti、Zr 和 Th, 相对 LILE 和 LREE 表现明显的负异常。

晚期($380 \sim 360$ Ma)花岗岩主要岩石类型为黑云母花岗闪长岩和二长花岗岩, 以钙碱性、高钾钙碱性 I 型为主, 发育少量 A 型(碱性)。未见有共生辉长岩。在俄罗斯阿尔泰, 晚泥盆世花岗岩出现亚碱性和碱性(含钠闪石)花岗岩、二长花岗岩、石榴石电气石花岗岩和似斑状黑云母堇青石花岗岩等, 显示钙碱性、钙碱性-碱性系列。

晚志留世—泥盆纪花岗岩($425 \sim 360$ Ma) $\epsilon Nd(t)$ 值变化范围较大($-2.5 \sim +4$), 多数大于 0, 有些达到 +4(图4), 显示有较多的年轻幔源组分。可可托海辉长岩 $\epsilon Nd(t)$ 值为 $+0.2 \sim +2.0$, t_{DM} 为 $1.14 \sim 1.23$ Ga。该期花岗岩 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 范围为 $18.082 \sim 18.921$, 平均值为 18.282 ; $^{207}Pb/^{204}Pb$ 范围为 $15.496 \sim 15.599$, 平均值为 15.530 ; $^{208}Pb/^{204}Pb$ 范围为 $37.721 \sim 38.187$, 平均值为 37.961 ; μ 值范围为 $8.10 \sim 8.24$, 平均值为 8.15 (童英等, 2006)。

3.3 早石炭世花岗岩(355~318 Ma)

在中国阿尔泰, 该期岩体以发育碱性花岗岩为特点(图5), 并组合有同期的黑云母花岗岩。碱性花岗岩含有暗色矿物钠铁闪石和霓石, 高硅($71.46\% \sim 77.07\%$)、富钾($4.41\% \sim 5.73\%$)、富钠($3.91\% \sim 5.65\%$), 贫铁、锰、镁($FeO^T = 0.3\% \sim 1.6\%$, $MnO = 0.03\% \sim 0.13\%$, $MgO = 0.05\% \sim 0.44\%$), 具有高的铁镁比值($FeO^T/MgO = 14.3 \sim 60.4$), 低磷($P_2O_5 = 0.06\%$)、钛。轻稀土元素富集, 重稀土元素亏损, 具有明显负铕异常, 微量元素表现出明显的 Ba、Sr、P、Ti 负异常, 不具有 Nb 异常。具有低的 Sr 初始值($I_{Sr} < 0.705$)和高的 $\epsilon Nd(t)$ 值($+1.6 \sim +6.3$)(图4)。该碱性花岗岩可能是由地幔岩浆底侵, 导致早期俯冲的洋壳或弧物质重熔, 同时加入一部分地幔物质, 经历了强烈的结晶分异作用之后形成的。

在蒙古阿尔泰南端, 发育不同的侵入岩组合($350 \sim 330$ Ma), 岩石类型为花岗闪长岩、斜长花岗岩、闪长岩, 构成闪长岩-二长岩-花岗闪长岩组合, 伴有玄武岩、安山岩、流纹岩, 具有安第斯型陆缘环境特点(Yarmolyuk *et al.*, 2008)。

3.4 早二叠世花岗质岩石(290~270 Ma)

中国阿尔泰造山带早二叠世花岗质岩石类型复杂, 主要为黑云母花岗闪长岩、二长花岗岩和正长石花岗岩, 并发育同期的基性岩。在地球化学特征上多数早二叠世花岗岩铝饱和指数 A/NK 大于 1($1.06 \sim 1.98$); A/CNK 值较为集中($0.76 \sim 1.35$), 可以分为 3 类(图5): ①拉斑玄系列, 高 A/NK , 以英云闪长岩为主; ②钙碱性-高钾钙碱性系列, 低 A/NK , 高 $ACNK$, 以二长花岗岩为主; ③高钾钙碱性-钾玄质系列, K_2O 含量达 $4.02\% \sim 6.31\%$, 低 A/NK , 低 $ACNK$, 以括塔克什肯口岸岩体和艾登布拉克岩体等铝质 A 型花岗岩为代表。

微量元素总体表现为低 Sr、P、Ti, 在微量元素原始地幔标准化蛛网图上, 富集大离子亲石元素, 而亏

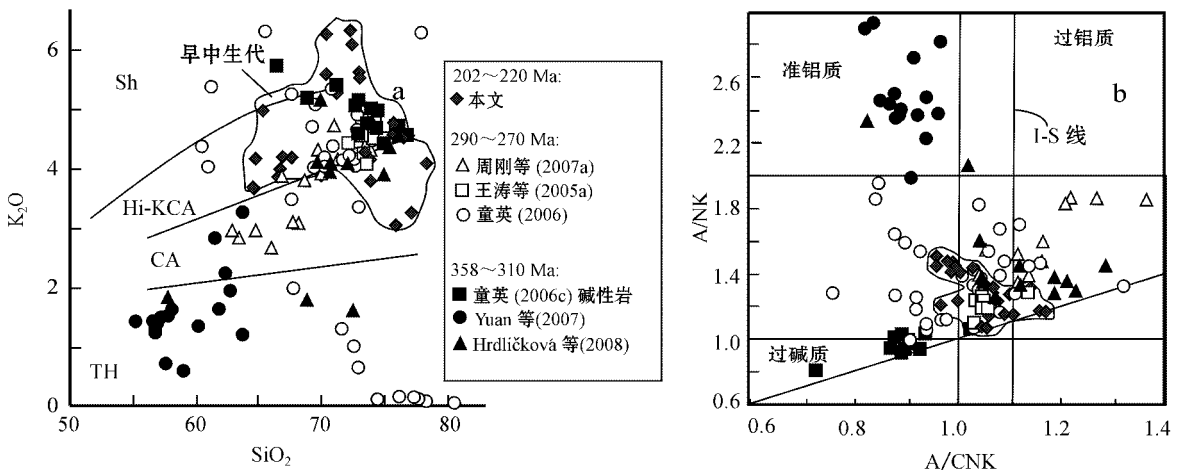


图 5 阿尔泰造山带晚古生代、中生代花岗岩的常量元素的岩石类型图解

(a) A/CNK - A/NK 图解 (b) K₂O - SiO₂ 图解 (据 Peccerillo and Taylor, 1976)

Fig. 5 Major element diagrams for rock types of the late Paleozoic and Mesozoic granitoids in the Altay orogen

(a) K₂O - SiO₂ diagram (after Peccerillo and Taylor, 1976) (b) A/CNK - A/NK diagram

损高场强元素 表现出明显的 Sr、P、Ti 负异常 表明它们可能经历了强烈的结晶分异。

阿尔泰造山带早二叠世花岗岩具有高(正) $\epsilon Nd(t)$ 值 (+1.3 ~ +8.3), 平均值为 4.2 (图 4)。其 $\epsilon Nd(t)$ 差别表现出明显的区域性。位于造山带中部的岩体 (如喇嘛昭岩体、大桥南岩体、大哈拉苏岩体) $\epsilon Nd(t)$ 值较小 (+1.3 ~ +2.9); 位于造山带南部的岩体 (如锡泊渡岩体、富蕴岩体、艾登布拉克岩体、布尔津岩体和塔克什肯口岸岩体) $\epsilon Nd(t)$ 值较大 (+2.5 ~ +8.3) 与同处造山带南缘的布尔根碱性花岗岩具有相似的特征。

阿尔泰早二叠世后造山花岗岩的 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 范围为 18.997 ~ 18.422, 平均值为 18.238, $^{207}Pb/^{204}Pb$ 范围为 15.460 ~ 15.599, 平均值为 15.522, $^{208}Pb/^{204}Pb$ 范围为 37.661 ~ 38.262, 平均值为 37.938, μ 值范围为 8.05 ~ 8.26, 平均值为 8.14。可见, 该期花岗岩的 ^{204}Pb 平均值略高于早中古生代花岗岩, 而 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{208}Pb/^{204}Pb$ 值以及 μ 值的平均值均略低于同造山花岗岩 (童英等 2006a)。

阿尔泰二叠纪基性岩以著名的克拉通克超基性岩体 (Han *et al.*, 2004) 和锡泊渡基性岩体为代表。这些岩石多数属拉斑玄武岩系列, 少量为钙碱性玄武岩系列, 以低 Ti、亏损 Nb、Ta 和强烈富集轻稀土元素和大离子亲石元素为特征, 具低的 Sr 初始值和高 $\epsilon Nd(t)$ 值 (+6.3 ~ +9.11) (图 4), 表明其来源于亏损的软流圈地幔, 但是其 $\delta^{18}O$ 值大于 6‰, 表

明有地壳物质的加入 (张招崇等 2003, 2006b)。另外, 基性岩脉体或小岩体, 在阿尔泰分布较广, 如阿尔泰市、乌恰沟、唐巴湖、阿拉哈克一带, 岩石类型为辉长辉绿岩、细粒辉长岩、中粒辉长岩、中粒-中粗粒辉长岩、橄榄辉长岩。在 R1 - R2 图解中, 基性岩样品有两个在橄榄辉长岩区, 与乌恰沟、阿拉哈克、唐巴湖基性岩分布区域大致相同。3 个地区的基性岩样点都分布在 'Fa-Di 上地幔岩浆演化趋势线' 附近。分异指数 Di 和固结指数 Si 表明, 这些基性岩的基性程度较高, 分异程度较小。不同岩石类型的基性岩稀土元素特征有一定差别, 总量均较高, 为 $247 \times 10^{-6} \sim 274 \times 10^{-6}$, 配分曲线呈轻稀土元素相对亏损、重稀土元素相对略微富集的左倾型, 有些近于平坦型, 几乎没有铈异常。Sr、K 富集, 细粒辉长岩的 Rb、Ba 较富集, 但 Th 亏损, 而辉绿辉长岩 Rb、Ba 较亏损。另外, Nb、Y、Yb、Sc 相对于洋中脊玄武岩丰度值有亏损。

在蒙古阿尔泰发育 320 ~ 290 Ma 的碱性花岗岩和基性岩, 构成双峰式组合 (Yarmolyuk *et al.*, 2008)。

3.5 早中生代花岗岩 (245 ~ 190 Ma)

中国阿尔泰山的早中生代花岗岩包括黑云母花岗岩、白云母花岗岩、二云母花岗岩等。有些花岗岩还含有石榴石、电气石或堇青石等, 与稀有金属矿床有关, 为 S 型花岗岩。俄罗斯阿尔泰山早中生代花岗岩类以花岗岩-淡色花岗岩为主 (韩宝福, 2008),

主要包括似斑状二云母花岗岩、白云母电气石花岗岩、似斑状角闪石黑云母花岗岩、黑云母花岗岩、角闪石黑云母正长岩、花岗正长岩,还有白岗岩、翁岗岩和含锂辉石花岗岩等(Kozlov *et al.*, 1991; Vladimirov *et al.*, 1997)。晚期岩石包括云英岩、翁岗岩化的细晶花岗岩-斑岩以及锂辉石细晶岩和花岗斑岩。稀有金属矿化主要出现在钦达加泰岩体、昆古尔贾林岩体和卡尔古特岩体等3个岩体中(Kozlov *et al.*, 1991; Ilyin *et al.*, 1994; Vladimirov *et al.*, 1997, 2001; Annikova *et al.*, 2006)。与这些中生代花岗岩体密切相关的成矿作用形成了一系列钼、钨、锂、铌等稀有金属矿床,其中以尤以卡尔古特矿床最具代表性。在俄罗斯、蒙古阿尔泰发育较多淡色花岗岩及同期的碱性镁铁质岩脉(Demin *et al.*, 2001; Pavlova *et al.*, 2008)。

中国阿尔泰早中生代花岗岩显示高钾钙碱性和钾玄质特点,多数为高分异的I型花岗岩和S型花岗岩特点。俄罗斯阿尔泰山与中国阿尔泰山的中生代花岗岩具有相似的地球化学和Sr-Nd同位素特点。同位素特征变化大,受构造单元性质控制。在中阿尔泰(相对老块体),该期花岗岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为负值(-4.2~-0.5)和较老的 t_{DM} 值(0.94~1.48 Ga)(赵振华等, 1993; Kozakov *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2009);在年轻的构造单元如南阿尔泰,则为正值。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值变化很大,高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值可能是岩浆-流体作用的结果,即幔源岩浆与地壳物质的混合(Potseluev *et al.*, 2006)。

阿尔泰早中生代花岗岩与稀有金属矿产有密切的成因联系。中国阿尔泰著名的3号伟晶岩一直没有找到相关的花岗岩。笔者通过锆石定年确定的具有S型特点的阿拉尔大花岗岩基,为花岗岩-伟晶岩密切关系提供了证据。总体看,与伟晶岩有关的花岗岩多为S型花岗岩(或高分异的I型花岗岩)。

4 花岗岩构造环境及其演变

一般而言,一个花岗岩体的构造环境判别极为困难或者几乎是不可能的,但是,一个巨型花岗岩带,特别是花岗岩带的演化及其地球化学特征的演变轨迹可以揭示构造环境及其演化。另外,对一个巨大的增生造山带而言,构造环境的判断和讨论应该限定在一定的时空范围。本文仅仅是以阿尔泰造山带为对象,以主造山期为时间参照,考虑同造山、晚造山和非造

山环境。在构造环境的判别上,综合考虑岩石组合、地球化学特征、构造型式和区划与地质背景。

4.1 早中生代花岗岩同造山俯冲增生环境判别

依据岩石组合、地球化学特征、构造型式和地质背景,上述晚奥陶世和泥盆纪花岗岩的形成可确定为同造山俯冲增生到碰撞环境。

4.1.1 岩石地球化学证据

以中国阿尔泰为例(Wang *et al.*, 2006; Yuan *et al.*, 2007),该期花岗岩为钙碱性I型,在主量元素构造环境判别图解中位于同造山(同碰撞)附近。在微量元素上,Rb和Ta的含量明显低于同碰撞花岗岩,故不具有典型的同碰撞花岗岩特点,而接近于火山弧或板内环境花岗岩;但Y、Nb含量又略高于弧花岗岩,而接近于板内环境。因此,在构造判别图中,它们似乎又偏向于后碰撞区域(图1)。不过,由于其Ta、Y并不高,显示了俯冲岛弧花岗岩特点。更重要的是,它们共生有闪长岩、辉长岩,其具有钙碱性岛弧岩浆特点。所以,从岩浆组合特征分析,该期岩浆应该形成于俯冲环境。

4.1.2 岩体构造型式及同侵位区域变形证据——460~400 Ma 区域变形鉴别

晚奥陶世—早志留世片麻状花岗岩体形态多为长条状、椭圆状,发育透入性岩浆面理和变形面理,包体也明显定向,显示经历了挤压变形,有些已经改造为片麻岩。特别指出的是,该强变形岩体(460 Ma)被泥盆纪花岗岩(410~400 Ma)侵入,后者变形相对较弱(这种关系无论是在地质图尺度还是在露头尺度都有表现),说明在泥盆纪花岗岩体侵位之前和之后发生了区域变形。

进一步分析,泥盆纪岩体普遍发育不同尺度变形。一类是长条状强变形岩体,如库尔提岩体;另一类是椭圆状变形岩体,如可可托海岩体。库尔提岩体发育于第3块体南东部,岩体长短轴比达4~6;岩石呈现条带状片麻状构造,表现为长英质矿物相对集中和暗色矿物相对集中的成分条带,长石、石英略微定向,黑云母和白云母平行片麻理强烈定向。该岩体锆石年龄为410 Ma,而其周围特别是顺其走向方向的椭圆状弱变形岩体锆石年龄为400 Ma。这表明,在410~400 Ma仍然发生了区域变形,说明这一时期侵位的岩体同样具有同构造特点。此外,360 Ma花岗岩体(大桥岩体)仍然发育片麻理,说明在该时期或略后仍然发生有一定规模的变形。这也可能是局部的变形,也可能表明在该时期仍然发生了区域变形。

因此,在 460~410~400~360 Ma 花岗岩体就位期间,发育区域变形。这为同构造岩体的确定提供了有力证据。如果它与俯冲有关(如上所述),那么,应该是俯冲早期的产物。

从俯冲开始的时间分析,从晚奥陶世的俯冲到泥盆纪,构造演化可能发展到了小块体的碰撞阶段。果真如此,泥盆纪晚期岩体的变形可能代表同碰撞区域变形阶段。由于之后的花岗岩再没有发生变形,这一推理是合理的。

4.1.3 地质背景的印证

越来越多的区域构造研究成果表明,阿尔泰造山带经历了长时期的造山作用(由北向南的递进俯冲增生),俯冲-碰撞主要发生于早古生代(如何国琦等,1994; Windley *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2003; Xiao *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2006)。而上述同造山花岗岩的确定为该时期的俯冲增生造山进一步提供了年代学限定。

从区域变质作用来看,主期变质发生于该时期。俄罗斯学者在中国阿尔泰造山带东延的蒙古阿尔泰造山带用锆石(TiMs)测得麻粒岩峰期区域变质年龄为 380 ± 2 Ma (Kozakov *et al.*, 2007); 中国阿尔泰也获得该时期主期变质年龄(Jiang *et al.*, 2010),由阿尔泰组石榴石-夕线石片麻岩中锆石边获得的年龄为 389 ± 2 Ma, 代表了变质作用的时代(Long *et al.*, 2007)。该变质与主期碰撞事件尤其是碰撞后期阶段的挤压抬升有关,因此,真正的俯冲作用应该在 460 Ma 左右。这也为上述 460 Ma 极强变形、400 Ma 强变形和 375 Ma 较强变形的花岗岩所证实。最近孙敏等(2009)提出,在 ~420 Ma 之后可能发生洋脊俯冲。另外,一些晚泥盆世花岗岩具有 A 型(碱性)花岗岩特征,是否揭示陆缘伸展裂解环境(李锦轶, 1991, 2004)也值得进一步研究。

4.2 早石炭世晚(后)造山花岗岩的确定及证据

对阿尔泰及邻区石炭纪花岗岩构造环境有不同认识。一种意见认为形成于后碰撞环境,依据之一是发育碱性花岗岩(Han *et al.*, 1997); 另一种意见认为,形成于俯冲环境,主要依据花岗岩具有埃达克质特点(Yuan *et al.*, 2007)。以下几个方面的特征显示,该期花岗岩可能形成于晚造山阶段或后碰撞环境。

4.2.1 地球化学证据

该期花岗岩一个主要特点是发育典型的碱性花岗岩。它们具有高 Rb、Nb、Y 含量,不同于弧花岗

岩,也不同于洋脊花岗岩,显示板内(WPG)区内或,或非造山区环境(R1-R2 图解)。一般而言,富碱侵入岩常产于裂谷、地堑、地幔上拱带的拉张环境。

4.2.2 构造证据

该期(碱性)花岗岩由若干个小岩体组成。岩体呈不规则圆形,未变形,与围岩界线截然,显示拉张环境下的被动定位特点。此外,钠铁闪石花岗岩发育典型的晶洞构造和显微文象结构,局部发育的细粒碱性花岗岩脉状可见细粒冷凝边,内部发育文象结构,石英长石低温共结,说明岩浆演化充分,显示了一种相对张性环境下结晶的特点。

4.2.3 区域地质背景印证

上述分析表明,阿尔泰造山带主要的区域(韧性)变形变质作用发生于 350 Ma 之前(峰期区域变质年龄为 390 Ma)。目前,还未见晚石炭世的区域变质变形作用,反映已经由早中古生代区域挤压变形发展到晚古生代相对稳定的伸展环境。区域上也没有发现 350~300 Ma 侵入岩和具有弧特点的火山岩。更为重要的是从岩浆演化的角度看,该时期,岩浆已经从钙碱性演化到碱性,说明早期俯冲碰撞的构造环境发生了变化,开始转入晚造山或后造山阶段。

另外,阿尔泰造山带南缘及东准噶尔带蛇绿岩的年龄大致集中在 500~370 Ma (刘伟, 1993; Xiao *et al.*, 2004),还未见报道有 350~300 Ma 的蛇绿岩,故没有 350~300 Ma 大洋生成和消减的证据。区域地层中原定的晚石炭世地层(被与布尔根碱性花岗岩同时代的布尔根黑云母二长花岗岩侵入,说明它们的形成及变形在 350 Ma 之前就已完成)为一套典型的陆相火山-沉积体系(朱志新等, 2005),也为额尔齐斯洋在早石炭世的消失提供了佐证。

综上所述,特别是考虑到早中古生代花岗岩的同造山俯冲增生环境和后期二叠纪可能的双峰式岩浆组合的后造山伸展环境(见下),在早石炭世,古生代造山作用可能接近尾声,转入了相对平静的晚造山或后造山演化阶段。

值得指出的是,在蒙古阿尔泰南端,依据区域地质背景及 350~330 Ma 侵入岩和火山岩组合揭示为安第斯型大陆边缘环境(Yarmolyuk *et al.*, 2008)。如果这一结论可信,可以认为,在中段(如中国阿尔泰)和西段(哈萨克斯坦阿尔泰)通过增生造山,大洋已经消失,大洋南迁(大致在塔里木地块北缘一带, Xiao *et al.*, 2010)。由此看出,在该地段阿尔泰造山带已经转入为后造山阶段,而在东端蒙古阿尔泰

造山带,还残留陆缘环境。

4.3 早二叠世后造山花岗岩的判别及其证据

阿尔泰造山带早二叠世构造环境有不同认识。以前研究者认为是非造山环境(邹天人等,1996)。近年来,一些研究者提出俯冲环境(陈汉林等,2006;肖文交等,2006)。从该造山带早二叠世花岗岩组合特征,特别是演变角度分析,同时考虑区域地质背景(Li,2006;李锦轶等,2006a,2009),其形成于晚造山阶段或后碰撞底侵伸展环境的可能性较大。

4.3.1 岩石组合及岩石地球化学证据

如上所述,该期花岗岩形成时间较短(290~270 Ma),多种成因类型共存,特别是发育A型花岗岩,伴生基性岩(脉)。这种岩石组合特点多指示伸展构造环境。

在主量元素上,多数花岗岩富碱,贫硅、铁,所以在主量元素的构造环境判别图解中位于造山后环境。在微量元素上,Y、Nb、Yb含量高于弧花岗岩,而Nd低于板内花岗岩。因此,在构造判别图中,它们位于板内或后碰撞区域。少量I型花岗岩和一些新鉴别出的片麻状火山岩具有弧岩浆特点(胡霏琴等,2008),也许可以解释为早期物质的重熔。

更为重要的是,在各类判别图解中,这些期次岩体比该区同造山花岗岩更偏向于造山后和板内环境区。这种同一区域花岗岩演变趋势对比所得出的构造环境的结论比单独依据图解界线确定的结果更为可靠。研究显示,后造山花岗岩特别是一些不具有典型A型花岗岩特点的黑云母花岗岩、二云母花岗岩的 δE_{U} 中等异常,分异并不强烈,说明形成于伸展环境的可能性更大。

Nd同位素研究表明(Wang *et al.*, 2009),从早古生代到晚古生代, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值变化非常明显,前者在0值附近,出现部分负值,但到晚古生代,则全为正值,并且值都很高,多大于5~6之间,接近北疆洋壳的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值。这表明更多的幔源物质的加入,显然与俯冲期的花岗岩形成环境有明显的区别。

4.3.2 岩体构造型式证据

该期岩体形态均为不规则圆形状(图1),几乎不鲜示岩浆面理和变形面理,包体也没有明显的定向,故没有边强中弱的主动侵位的应变型式,与同造山线性、长条状椭圆形花岗岩形成鲜明对比。而且岩体清楚地切割了区域变质岩的片麻理,并没有造成明显的变形弯曲,即不发育围岩接触变质变形带。所有这些拉张环境下的被动定位特征说明其是后构

造岩体。仅在额尔齐斯带内的一些岩体受到走滑变形影响(童英等,2006;Briggs *et al.*, 2007;孙桂华等,2009)。

4.3.3 岩浆组合及地质背景的印证

如上所述,阿尔泰造山带在晚石炭世应该进入了晚(后)造山阶段。所以,二叠纪时期应该为后造山环境。实际上,在中亚造山带,至少在南部一带,普遍发育290~260 Ma的碱性岩、基性岩和花岗岩以及时代大致相同的裂谷盆地,指示了大规模的幔源岩浆底侵伸展的环境。正是在这种伸展构造背景下,在中国阿尔泰发生了低压麻粒岩相变质作用(293 Ma,Wong *et al.*, 2010)。这是中亚造山带主期造山作用结束、新的板内岩浆作用开始及新的大陆裂解的标志。阿尔泰造山带该时期的花岗岩、基性岩只是这一大陆地壳伸展作用在阿尔泰造山带中的表现。

在蒙古阿尔泰南端,该时期双峰式岩浆组合认为是裂谷环境产物,具有多条裂谷带(Yarmolyuk *et al.*, 2008)。

4.4 中生代非造山花岗岩

上述阿尔泰造山带构造演化显示,二叠纪已经进入后造山构造环境。因此,阿尔泰中生代花岗岩为板内(陆内)环境产物。俄罗斯学者认为,阿尔泰山三叠纪花岗岩类与西伯利亚超级地幔柱有关的幔源含矿岩浆活动的时限基本一致,属于非造山花岗岩类,是这个地幔柱演化最后阶段的产物(Potseluev *et al.*, 2006)。另外,其是否受到亚洲大陆东缘和西南缘早中生代碰撞汇聚的远程效应的影响,值得进一步研究。

而该期花岗岩的自身特点也符合这一环境。该时期花岗岩大多数具有高分异I型花岗岩和A型花岗岩的特征,并有大型伟晶岩脉共生,显示相对伸展环境。岩体不变形,呈现不规则状,切割围岩构造,显示被动定位特点。

5 讨论

5.1 增生造山过程的构造岩浆演化模式

综合上述侵入岩的年代学、构造型式、地球化学特征研究,并结合其他方面的研究成果(如何国琦等,1994;Windley *et al.*, 2002;Li *et al.*, 2003;Xiao *et al.*, 2004),以中国阿尔泰为例,阿尔泰造山带的构造演化经历了奥陶纪—志留纪陆缘俯冲、泥

盆纪陆弧及陆缘边缘裂解、弧后盆地形成,晚泥盆世最终洋盆闭合,早石炭世开始转入晚或后造山阶段(图2, Wang *et al.*, 2006)。

(1) 在寒武纪—奥陶纪(500~470 Ma),在阿尔泰古陆块南缘发生俯冲,形成活动陆缘环境。在陆块北缘构造环境不清楚,可能还处于被动陆缘环境。

(2) 中晚奥陶世(470~440 Ma),随着南缘活动陆缘的发育,形成晚奥陶世—志留纪陆弧环境的花岗岩,具有陆源特点,并发生了强烈的构造岩浆事件,花岗岩特征,特别是区域变形特征,显示为陆缘俯冲造山。

(3) 晚志留世—晚泥盆世(425~360 Ma),俯冲增生加剧,随着南缘活动陆缘的发育,发生陆缘裂解,形成库尔提弧后盆地(许继峰等, 2001; Xu *et al.*, 2003)以及其他陆缘裂解如康布铁堡双峰式火山岩(何国琦等, 1990)。弧后洋盆向北俯冲消减,形成双陆弧环境。因此,该时期形成大量花岗岩岩体,并具有不同程度变形,显示了区域挤压汇聚环境。420~390 Ma和380~360 Ma两个岩浆峰期可能揭示了由俯冲增生到碰撞的过程。

(4) 早石炭世(355~318 Ma),碰撞拼合接近尾声,主造山期已近结束。约350 Ma的布尔根碱性花岗岩侵入到已褶皱的泥盆纪—早石炭世地层,标志着古生代主期造山作用基本结束。区域转入拉张背景,进入晚或后造山阶段。此时,额尔齐斯洋可能已闭合,在东部(蒙古)局部可能存在残留陆缘环境。中晚石炭世,区域可能一直处于相对平静期,未见区域变质变形,该时期的花岗岩目前报道也很少。

(5) 早二叠世(290~270 Ma),研究区大洋均已消失,在阿尔泰南缘及额尔齐斯带(薄弱带)发生强烈的底侵岩浆作用,导致酸性和基性岩浆活动和高温低压麻粒岩变质作用(Wang *et al.*, 2009),显示了区域幔源岩浆底侵的伸展构造环境。二叠纪岩体群总体不变形的特征表明,该时期没有发生强烈的区域性韧性变形,变形主要集中于额尔齐斯走滑构造带,该带中的略早的二叠纪岩体发生变形(童英等, 2007),是该时期大型走滑的反映(Briggs *et al.*, 2007; Stephanie *et al.*, 2007)。这个时期,中亚古亚洲洋已经大大缩减,仅仅在南部局部地区存在(Xiao *et al.*, 2010)。阿尔泰造山带早二叠世岩浆是否可能是其大洋俯冲的远程效应还有待于研究,但至少从阿尔泰造山带本身演化来看,该时期已经处于后造山阶段。

阿尔泰造山带在短期间内(290~270 Ma)发生种类多样的侵入岩和火山岩,且以碱性为特点,并共生(碱性)基性岩,有些可能为双峰式岩浆组合,显示了伸展环境。这均与塔里木巨量的玄武岩大火成岩省(杨树锋等, 2005)和天山等地含铜镍的基性超基性杂岩的发育(李锦轶等, 2006b)以及地幔柱活动的时间(300~270 Ma, Mao *et al.*, 2005; Borisenko *et al.*, 2006)一致,显示了早二叠世整个中亚造山带及邻区总体处于伸展状态,阿尔泰造山带岩浆作用是其中的一个表现。Vladimirov等(2008)提出阿尔泰造山带是在塔里木、西伯利亚地幔柱作用下的热剪切构造域,岩浆作用不能仅仅以板片断离和岩石圈拆沉揭示,而应该有地幔柱的作用。

之后,阿尔泰造山作用结束,进入板内阶段,在中生代发生板内岩浆作用。

一般认为,中亚增生造山带是通过连续增生造山作用形成的。该研究确定了构造岩浆演化旋回,特别是355 Ma的过碱性花岗岩的发现,为该期间造山构造岩浆的结束和另一次构造岩浆旋回的开始提供了关键证据,表明增生造山带中同样存在构造演化的阶段性。这是对深入认识增生造山作用具有新的启示意义。另外,该研究进一步表明,典型的中亚增生造山带中同样存在活动陆缘裂解再拼合的陆缘演化和造山过程。这为深入认识增生造山作用提供了一个典型实例,说明中亚增生造山作用不仅具有弧前增生,而且还存在陆缘裂解再拼合作用,这无疑将深化对增生造山作用的认识。

5.2 阿尔泰花岗岩物源分析

阿尔泰花岗岩Nd同位素特性显示(图4),阿尔泰花岗岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值大大高于古老(元古宙与太古代)地壳,也略高于地表古生代区域变质岩(Chen and Jahn, 2002),说明它们不可能主要来源于这些古老地壳,也不可能直接熔自古生代地壳。另外,它们的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值低于年轻的古生代洋壳物质,表明也不可能直接来自这些年轻的物质。一种解释是它们是上述地壳物质(老陆壳或较新的古生代区域变质岩)和年轻物质(洋壳、增生楔等)的混合产物。

如上所述,阿尔泰早中生代同造山花岗岩与基性岩、中基性岩同时、共存,表现有岩浆混合的岩相学和地球化学证据。如果这些基性岩是与俯冲有关的地幔楔熔融产物,它们可以代表新的基性岩浆端员,而古老的陆壳(在深部)和目前地表出露的古生代区域变质岩为地壳酸性单元,这两个端员混合

可能形成阿尔泰同造山花岗岩。

对于后造山花岗岩而言,这种年轻幔源物质来源有3种可能(王涛等,2008):后造山新底侵幔源物质(如基性岩浆),已增生的年轻地壳(包括洋壳、增生楔)再循环(再熔),前造山底侵的基性下地壳再熔。仅仅依靠地球化学手段来鉴别这3种情况有一定难度。通过地质背景研究,特别是对构造背景相同、岩石类型相似、时代不同(同造山和后造山)的花岗岩进行同位素对比或许可以提供一些线索。对阿尔泰后造山花岗岩而言,以下证据显示第1种可能性较大:①它们的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值高于同地区的同造山花岗岩(前者平均为+3,后者+0.0左右);②后造山基性岩体(脉)广泛发育,其 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值大大高于同造山基性岩,说明有大量亏损幔源新生物质加入到了地壳中。此外,幔源岩浆底侵是最常见的后造山岩浆活动的热源和物源(大量的基性岩脉提供了这一证据)。这种作用既可以提

供热源,同样也可以提供一些物源。

5.3 阿尔泰造山带组成与结构——花岗岩 Nd 同位素填图证据

阿尔泰造山带的组成结构,特别是是否存在古老基底还存有争议。以往认为中国阿尔泰造山带存在前寒武纪基底(17~8 Ga 或更晚期),并得到 Sm-Nd 年龄和 Nd 同位素模式年龄的支持(Hu *et al.*, 2000; 胡霁琴等,2002; 方同辉等,2002)。一些原古生代地层重新划分为元古宇。但是,Sm-Nd 年龄的地质涵义有时还不明朗,用模式年龄更难以判定其年龄。而近期的研究表明,一些确定为前寒武纪的片麻岩的锆石年龄均为早古生代,因此,对阿尔泰造山带是否存在古老基底提出了疑议(如 Long *et al.*, 2008; Sun *et al.*, 2008)。

笔者开展的 Nd 同位素填图为此问题的探讨提供了新依据(图 6、图 7, Wang *et al.*, 2009)。在空间

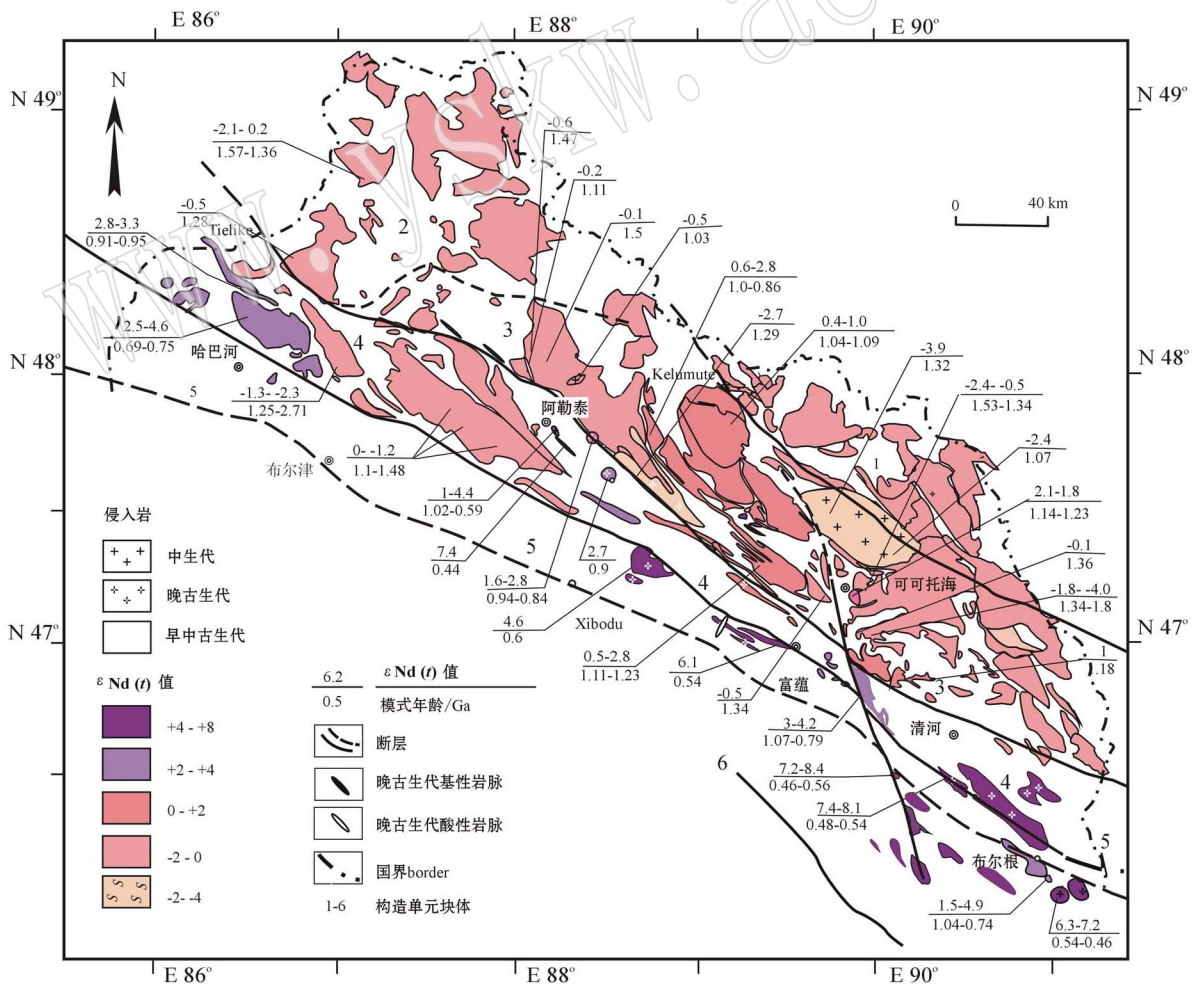


图 6 中国阿尔泰花岗岩 Nd 同位素填图(据 Wang 等, 2009)

Fig. 6 Nd isotopic map for the granitoids in Chinese Altay orogen(after Wang *et al.*, 2009)

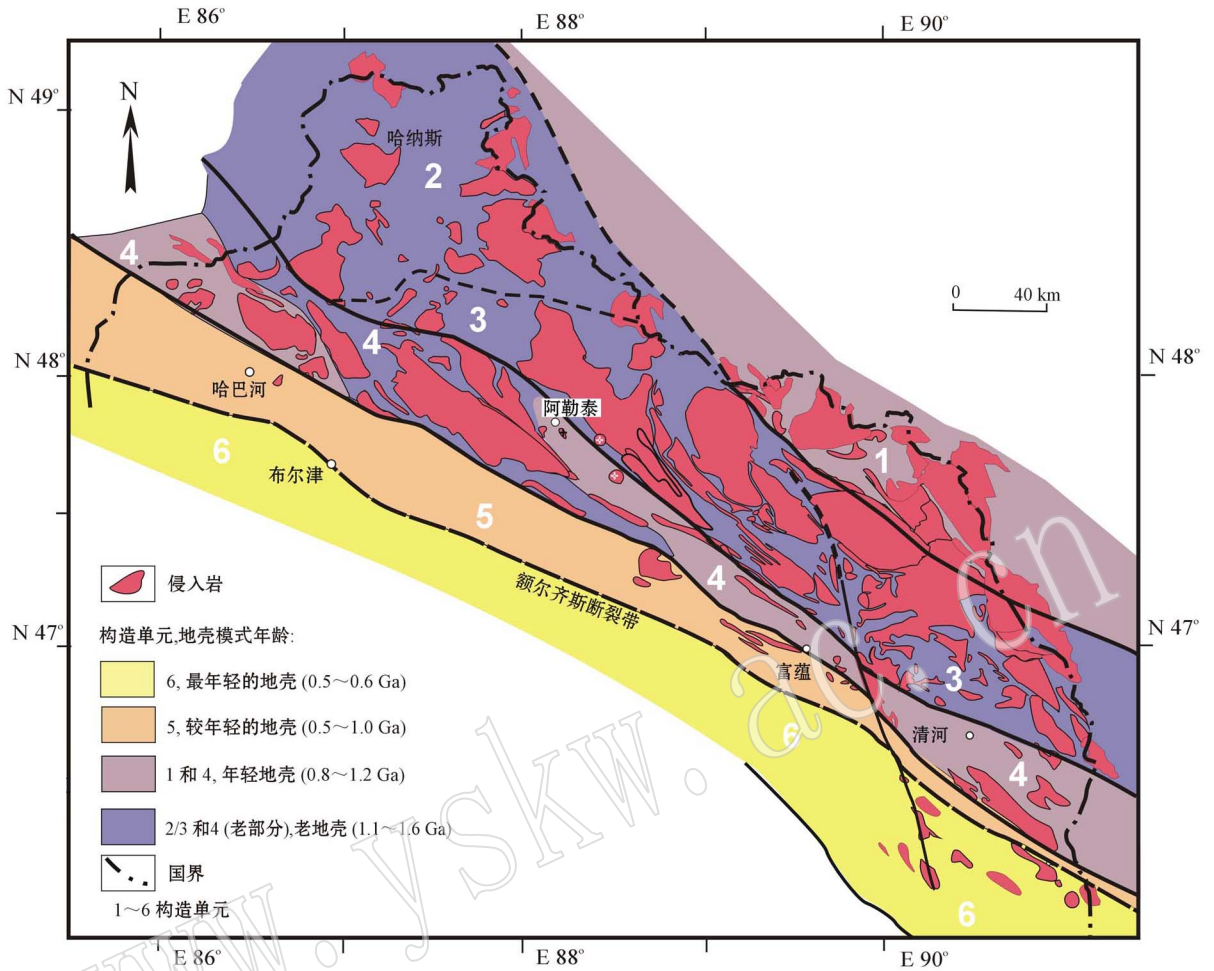


图7 中国阿尔泰花岗岩Nd模式年龄图(据Wang等, 2009)

Fig. 7 Crustal component texture of Chinese Altay orogen: evidence from Nd model ages of the granitoids (after Wang *et al.*, 2009)

上,中国阿尔泰造山带花岗岩的Nd同位素特征具有明显的区块性,中部(块体2和3)花岗岩具有低 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值和高 t_{DM} ,显示含有众多的陆壳物质;而南缘花岗岩具有高 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值和低 t_{DM} ,暗示以年轻(幔源)物质为主体。这种同位素特征的空间变化很好地刻画了阿尔泰造山带深部的物质组成结构,即中部老,南缘新。这与地表地层组成和构造单元划分相一致,即中部为(相对)古老地块,南缘为新增生地壳。如果几个岩体显示低 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值和高 t_{DM} 不足以说明有老的基底物质的话(可能是搬运来的沉积物源),那么成片的大量岩体具近似一致的低 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值和高 t_{DM} ,特别是周边显示年轻的物源基底(图6、图7),这应该说明在中部块体下部存在相对均匀的古老物质,即古老基底。这从一个侧面证实阿尔泰造山带存在古老的陆壳基底。这与上述早古生代同造

山花岗岩的陆缘环境也相吻合。

另外,值得注意的是,在同一构造块体中,无论是早古生代还是中生代花岗岩都具有大致相似的同位素特点,如位于中部块体的中生代花岗岩仍然显示低的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值和高 t_{DM} 特征,并遵循同位素的演化规律,而年轻块体(如4和5)的中生代花岗岩仍然保持高的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值和低 t_{DM} 特征。这种特征暗示,阿尔泰造山带构造单元(块体)在主期增生造山后没有发生垂向的相互叠置,构造单元之间仍然保持之前水平增生的结构。这可能是增生造山带的一种特征。

中亚增生造山带鉴别出大量增生地块和大量年轻物质加入地壳,被认为是中亚增生造山带形成的主要特点和基础。但近期,也有学者强调古老块体和物质再循环在该造山带形成发育中仍然起到重要作用(Kröner *et al.*, 2008)。因此,仔细鉴别古老块

体和年轻物质成为准确了解陆壳生长和增生造山带形成演化的关键问题之一。中国阿尔泰造山带精细刻画的地壳结构与生长特点,为该问题的探讨提供了实例。阿尔泰及周边的组成与结构是中亚造山带的一个缩影,很好地反映了整个年轻增生地块中夹持有残留的古老(元古宙)地块的结构特点。

5.4 阿尔泰造山带陆壳双向生长意义

大陆地壳生长时限和方式是地球科学研究中最基本的问题。中亚造山带大规模正 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值花岗岩揭示了显生宙的大规模陆壳生长(Jahn *et al.*, 2000a, 2000b; 洪大卫等, 2000; Hong *et al.*, 2004; Kovalenko *et al.*, 1996, 2004; 肖庆辉等, 2009), 对地壳生长主要发生于前寒武纪的认识是一个补充, 但其生长方式和生长量是需要深入探讨的问题。

(1) 水平生长

一般认为,同造山正 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值花岗岩最有可能与洋壳俯冲有关,揭示的是陆壳水平增生。阿尔泰造山带同造山(俯冲增生)花岗岩(470~390 Ma)具有较高的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值特征,不管何种成因,它们都表明有年轻物质参与花岗岩浆的形成,并最终加入到地壳中,造成地壳水平生长。这种与板块俯冲有关的正 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值花岗岩浆作用以及大陆的显生宙水平生长在世界其他造山带也普遍存在,如澳大利亚克兰造山带、美国西太平洋造山带。这种在板块边缘通过汇聚带岛弧拼贴和岩浆作用可造成地壳水平生长(如 Barr *et al.*, 1999)。

地幔端员常常假设具以下参数: $\epsilon\text{Nd}(400 \text{ Ma}) = +8$, $\omega(\text{Nd}) = 15 \times 10^{-6}$ (Jahn, 2000a, 2000b), 这恰恰与库尔提蛇绿岩给出的参数一致(Xu *et al.*, 2003); 以阿尔泰造山带 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值最高的副片麻岩为最年轻的地壳端员: $\epsilon\text{Nd}(400 \text{ Ma}) = -5$, $\omega(\text{Nd}) = 25 \times 10^{-6}$ (Chen and Jahn, 2002); 以 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值最低(负)的副片麻岩为最老的地壳端员: $\epsilon\text{Nd}(400 \text{ Ma}) = -17$ 和 $\omega(\text{Nd}) = 36 \times 10^{-6}$ (Hu *et al.*, 2000)。通过二元混合模拟计算,可以分别估算出花岗岩年轻组分的最小值和最大值,即平均约 50%~80% (46%~78%)。以中国同造山花岗岩为例,其总面积约为 13 400 km², 按 50%~80% 年轻组分计算,将有 6 700~11 000 km² 面积的物质加入到地壳,占造山带总面积的 18%~28% (Wang *et al.*, 2009)。这大致给出了水平生长量。

(2) 垂向生长

要确定显生宙后造山地壳垂向生长,特别是估

算生长量,就需要仔细鉴别花岗岩中年轻物质的来源。上述研究和分析表明,阿尔泰后造山花岗岩中的年轻幔源物质可能来源于新的幔源岩浆底侵,其中大量基性岩的发育表明有大量幔源新生物质加入到地壳,造成地壳的垂向生长。实际上,在中亚造山带发育大规模板块碰撞后的后造山正 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值花岗岩(很多地带占主体,如东西准噶尔地区, Han *et al.*, 1997; 韩宝福等, 1997, 1998)和东北地区(Wu *et al.*, 2000), 揭示了地壳垂向生长。

如果将上述假设的地幔端员和两个地壳端员换算到二叠纪(270 Ma), 同样可以估算出中国阿尔泰后造山花岗岩含有年轻物源的比例是 70%~90% (68%~88%)。该时期花岗岩面积约 2 482~3 191 km², 应该含有约 2 482~3 191 km² 的年轻物质, 占造山带面积的 7%~8% (Wang *et al.*, 2009)。这说明,后造山垂向生长量仅仅有 7%~8%, 这是由于研究区后造山花岗岩量较少。另外,这些年轻幔源组分可能只是进入上地壳中的一小部分,而绝大部分底侵于下地壳底部。如果考虑到这些底侵物质,则地壳垂向生长量更为巨大。这一研究为后碰撞或后造山陆壳的垂向生长提供了一个例证。

可见,阿尔泰造山带同造山水平生长和后造山垂向生长总地壳生长量约为 25%~36%, 与实际上增生造山带生长量(10%~30%, Condie, 2007)大致相同。

6 小结

(1) 123 个锆石年龄显示,阿尔泰花岗岩主要形成于早中古生代(470~440 Ma 和 425~360 Ma), 晚古生代(355~318 Ma 和 290~270 Ma) 以及早中生代(220~200 Ma), 其中 425~360 Ma 花岗岩最为发育,可以进一步细分为 425~290 Ma 和 380~360 Ma。

(2) 早中古生代花岗岩为同造山钙碱性 I 型, 形成于同造山俯冲增生, 岩浆峰期在 425~360 Ma, 结束于 355 Ma 的碱性岩。晚古生代晚石炭世、二叠纪为后造山 I、I-A、A 型花岗岩和基性岩(双峰式?)组合, 形成于后造山幔源岩浆底侵的热构造伸展环境。早中生代为非造山 I、S 型花岗岩, 伴有稀有金属矿产。岩体群变形特征显示阿尔泰造山带区域韧性变形峰期在 460~410~400 Ma, 阿尔泰主造山期为早中生代, 晚古生代(二叠纪)变形仅仅限于额尔齐

斯走滑剪切带中。

(3) 阿尔泰山带经历了奥陶纪—志留纪陆缘俯冲、泥盆纪陆弧及陆缘边缘裂解、弧后盆地形成,晚泥盆世最终洋盆闭合,早石炭世开始转入晚(或后)造山阶段。弧前连续增生被认为是中亚增生造山带的主要机制。研究表明,除了典型的弧前增生外,还存在陆缘裂解再拼合作用,这也是中亚造山带形成机制之一。

(4) 岩体 Nd 同位素填图显示,阿尔泰山中部可能存在古老基底。陆壳向南生长,水平和垂向生长率为 18%~28% 和 7%~8%,总生长率为 25%~36%,与全球增生造山带平均伸展率相当。

致谢 感谢江博明、王式洸、何国琦、肖文交、Victor Kozkov 教授的有益学术讨论和评审者的有益建议。

References

- Annikova I Y, Vladimirov A G, Vystavnoi S A, *et al.* 2006. U-Pb and $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ Dating and Sm-Nd and Pb-Pb isotopic study of the Kalguty Molybdenum-Tungsten ore-magmatic system [J]. *Southern Altai Petrologiya*, 14(1): 90~108 (in Russian).
- Barr S R, Temperley S and Tamey J. 1999. Lateral growth of the continental crust through deep level subduction-accretion: a re-evaluation of central Greek Rhodope [J]. *Lithos*, 46: 69~94.
- Borisenko A S, Sotnikov V I, Izokh A E, *et al.* 2006. Permo-Triassic mineralization in Asia and its relation to plume magmatism [J]. *Russian Geology and Geophysics (Geologiya i Geofizika)*, 47(1): 166~182.
- Briggs S M, Yin A, Manning C E, *et al.* 2007. Late Paleozoic tectonic history of the Ertix Fault in the Chinese Altai and its implications for the development of the Central Asian Orogenic System [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 119(7/8): 944~960.
- Cai K, Sun M, Yuan C, *et al.* 2010. Geochronological and geochemical study of mafic dykes from the northwest Chinese Altai: Implications for petrogenesis and tectonic evolution [J]. *Gondwana Res.*, 18(4): 638~652.
- Chai F M, Mao J W, Dong L H, *et al.* 2008. SHRIMP Zircon U-Pb Dating for metarhyolites of the Kangbutiebao formation at the Abagong iron deposit in the southern margin of the Altai, Xinjiang and its geological Significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(11): 1592~1601.
- Chen B and Jahn B M. 2002. Geochemical and isotopic studies of the sedimentary and granitic rocks of the Altai orogen of northwest China and their tectonic implications [J]. *Geol. Mag.*, 139(1): 1~13.
- Chen F, Li H, Wang D, *et al.* 2000. New chronological evidence for Yanshanian diagenetic mineralization in China's Altai orogenic belt [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 45: 108~114.
- Chen Hanlin, Yang Shufeng, Li Zilong, *et al.* 2006. Zircon SHRIMP U-Pb chronology of Fuyun basic granulite and its tectonic significance in Altaid orogenic belt [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(05): 1351~1358 (in Chinese with English abstract).
- Condie K C. 2007. Accretionary orogens in space and time [A]. Hatcher R D Jr, Carlson M P, McBride J H, *et al.* 4-D Framework of Continental Crust: Geological Society of America Memoir 200 [C]. 1~14, doi: 10.1130/2007.1200(09).
- Demin A N, Demin P A and Andreev V V. 2001. Early Mesozoic ore-bearing granitoids and their tectonic setting in the Mongolian Altai [A]. Postcollisional Evolution of Mobile Belts [C]. Irkutsk: Abstracts, International Conf. (VIA. N. Zavaritsky Memorial Workshop) (in Russian).
- Fang Tonghui, Wang Jingbin, Zhang Jinjiang, *et al.* 2002. Proterozoic basaltic magma intrusion event in the Altai, Xinjiang [J]. *Chinese Geology*, 29(1): 48~54 (in Chinese with English abstract).
- Han Baofu. 2008. A preliminary comparison of Mesozoic granitoids and rare metal deposits in Chinese and Russian Altai Mountains [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 655~660 (in Chinese with English abstract).
- Han Baofu, He Guoqi, Wang Shiguang, *et al.* 1998. Postcollisional mantle-derived magmatism and vertical growth of the continental crust in north Xinjiang [J]. *Geological Review*, 44(4): 396~406 (in Chinese with English abstract).
- Han Baofu, Ji Jianqing, Song Biao, *et al.* 2004. SHRIMP zircon U-Pb ages of Kalatongke No. 1 and Huangshandong Cu-Ni-bearing mafic-ultramafic complexes, North Xinjiang and geolocal implications [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(22): 2324~2328.
- Han B F, Wang S G, Jahn B M, *et al.* 1997. Depleted-mantle magma source for the Ulungur River A-type granites from north Xinjiang China: Geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence, and implication for Phanerozoic crustal growth [J]. *Chem. Geol.*, 138: 135~159.
- Han Baofu, Wang Shiguang, Jiang Boming, *et al.* 1997. The Nd isotope of Wulunguhe alkaline granite from Xinjiang and the significance to the Phanerozoic crust growth [J]. *Chinese Science Bulletin*, 17(42): 1829~1831 (in Chinese with English abstract).
- He Guoqi, Li Maosong, Liu D Q, *et al.* 1994. Paleozoic Crustal Evolution and Mineralization in Xinjiang of China [M]. Urumuqi: Xinjiang People's Publishing House, 1~437 (in Chinese).
- Helo C, Hegner E, Kröner A, *et al.* 2006. Geochemical signature of Paleozoic accretionary complexes of the Central Asian Orogenic Belt in South Mongolia—Constraints on arc environments and crustal growth [J]. *Chemical Geology*, 227: 236~257.
- Hong Dawei, Wang Shiguang, Xie Xilin, *et al.* 2000. Genesis of positive Nd(t) granitoids in the Da Hinggar-mongolia orogenic belt and continental crustal growth [J]. *Earth Science Frontiers*, 7(2): 441~456 (in Chinese with English abstract).
- Hong D W, Zhang J S, Wang T, *et al.* 2004. Continental crustal growth and the supercontinental cycle: evidence from the Central Asian orogenic belt [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 799~813.
- Hrdličková K, Bolormaa K, Buriánek D, *et al.* 2008. Petrology and

- age of metamorphosed rocks in tectonic slices inside the Palaeozoic sediments of the eastern Mongolian Altay, SW Mongolia[J]. *Journal of Geosciences*, 53 : 139~165.
- Hu A Q, Jahn B M, Zhang G X, *et al.* 2000. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in northern Xinjiang : Nd isotopic evidence, Part I. Isotopic characteristics of basement rocks[J]. *Tectonophysics*, 328 : 15~51.
- Hu Aiqin, Wei Gangjian, Zhang Jibin, *et al.* 2008. SHRIMP U-Pb ages for zircons of the amphibolites and tectonic evolution significance from the Wenquan domain in the West Tianshan Mountains, Xinjiang, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(12): 2 731 ~ 2 740(in Chinese with English abstract).
- Hu Aiqin, Zhang Guoxin, Zhang Qianfeng, *et al.* 2002. A review on ages of Precambrian metamorphic rocks from Altai orogen in Xinjiang, NW China[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 37(2): 129~142.
- Ilyin V A, Khalilov V A, Kozlov M S, *et al.* 1994. The age of the Alokhsikii stock of Gorny Altai according to U-Pb and Rb-Sr dating [J]. *Geologiya i Geofizika*, 35(1): 79~81 (in Russian with English abstract).
- Jahn B M, Wu F Y and Chen B. 2000a. Massive granitoid generation in central Asia : Nd isotopic evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic[J]. *Episodes*, 23 : 82~92.
- Jahn B M, Wu F Y and Hong D W. 2000b. Important crustal growth in the Phanerozoic : Isotopic evidence of granitoids from east-central Asia[J]. *Proc. Indian Acad. Sci.(Earth Planet Sci.)*, 109(1): 5~20.
- Jiang Y D, Sun M, Zhao G. C, *et al.* 2010. The ~390 Ma high-T metamorphism in the Chinese Altai : consequence of ridge-subduction ? [J]. Submitted to *American Journal of Sciences*(in review).
- Kozakov I K, Kovach V P, Bibikova E V, *et al.* 2007. Age and Sources of Granitoids in the Junction Zone of the Caledonides and Hercynides in Southwestern Mongolia : Geodynamic Implications [J]. *Petrology*, 15(2): 1 126~1 150.
- Kovalenko V I, Yarmolyuk V V, Kovach V P, *et al.* 1996. Sources of Phanerozoic granitoids in Central Asia : Sm-Nd isotope data[J]. *Geochem. Inter.*, 34 : 628~640.
- Kovalenko V I, Yarmolyuk V V, Kovach V P, *et al.* 2004. Isotope provinces, mechanisms of generation and sources of the continental crust in the Central Asian Mobile Belt : geological and isotopic evidence[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 605~627.
- Kozlov M S, Khalilov V A, Stasenko N V, *et al.* 1991. Jurassic leucogranite-granite formation of Alta[J]. *Geologiya i Geofizika*, 32(8): 44~53(in Russian with English abstract).
- Kröner A, Windley B F, Badarch G, *et al.* 2008. Accretionary growth and crust-formation in the Central Asian Orogenic Belt and comparison with the Arabian-Nubian shield[J]. *Geological Society American*, *Memoir* 200 : 181~209.
- Kruk N N, Vladimirov A G, Rudnev S N, *et al.* 2004. Internal structure, geodynamic setting, and U-Pb isotopic age of the Kubadru granitoid batholith (Gorny Altai) [J]. *Geologiya i Geofizika*, 45(6): 688~702(in Russian with English abstract).
- Li Huaqin, Xie Caifu, Chang Hailiang, *et al.* 1998. Study on Metallogenic Chronology of Nonferrous and Precious Metallic Ore Deposits in North Xinjiang, China[M]. Beijing : Geological Publishing House, 134~177(in Chinese).
- Li Huijun, He Guoqi, Wu Tairan, *et al.* 2006. Confirmation of Altai-Mongolia microcontinent and its implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(05): 1 369~1 379(in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi. 1991. Paleozoic evolution of plate tectonics in the eastern Junggar[A]. Xiao Xuchang and Tang Yaoqing. *Tectonic Evolution of Multiple Large Sutures in Central Asia*[C]. Beijing : Beijing Science and Technology Press, 92~108(in Chinese).
- Li Jinyi. 2004. Late Neoproterozoic and Paleozoic Tectonic framework and evolution of Eastern Xinjiang, NW China[J]. *Geological Review*, 50(3): 304~322(in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi. 2006. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions : closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(3/4): 207~224.
- Li Jinyi, He Guoqi, Xu Xin, *et al.* 2006a. Crustal Tectonic Framework of Northern Xinjiang and Adjacent Regions and Its Formation [J]. *Acta Geologica Sinica*, 60(1): 148~168(in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi, Wang Kezhao, Li Yaping, *et al.* 2006b. Geomorphological features, crustal composition and geological evolution of the Tianshan Mountains[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(8): 895~909 (in Chinese with English abstract).
- Li J Y, Xiao W J, Wang K Z, *et al.* 2003. Neoproterozoic-Paleozoic tectonostratigraphy, magmatic activities and tectonic evolution of eastern Xinjiang, NW China[A]. Mao J W, Goldfarb S, Wang X *et al.* *Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan*[C]. IAGOD Guidebook Series, 10 : 31~74.
- Li Jinyi, Zhang Jin, Yang Tiannan, *et al.* 2009. Crustal tectonic division and evolution of the Southern Part of the North Asian Orogenic region and its adjacent area[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 39(4): 584~605(in Chinese with English abstract).
- Li Shan, Wang Tao and Tong Ying. 2010. Spatial-temporal distribution and their tectonic settings of Early Mesozoic granitoids in the middle-south segment of Central Asia Orogenic System[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 642~662(in Chinese with English abstract).
- Liu Feng, Li Yanhe, Mao Jingwen, *et al.* 2008. SHRIMP U-Pb ages of the Abagong granites in the Altai orogen and their geological implications[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 29(6): 795~804(in Chinese with English abstract).
- Liu Guoren, Qin Jihua, Zhao Zhonghe, *et al.* 2008. SHRIMP U-Pb Ages of Zircon in the Gneiss of Erqisi tectonic belt in Altay, Xinjiang and their geological significance[J]. *Geoscience*, 22(2): 190~196(in Chinese with English abstract).
- Liu Jianmin, Chen Bolin, Dong Shuwen, *et al.* 2009. Ages of Pseudotachylite and its wall rocks from the Keketuohai-Ertai fault zone, Xinjiang, Northwest China[J]. *Geological Review*, 55(4): 581~589(in Chinese with English abstract).

- Liu Wei. 1990. Petrogenetic epoches and peculiarities of genetic types of granitoids in the Altai MTS. , Xinjiang Uygurautonomous Region [J]. *Geotectonica et Metallogenia* , 14(1):43~56(in Chinese with English abstract).
- Liu Wei. 1993. Isochron ages of magmatic rocks , crust movement and evolution of tectonic setting in Altai area , China[J]. *Xinjiang Earth Sciences* , (4):35~50(in Chinese).
- Long X P , Sun M , Yuan C , *et al.* 2007. U-Pb and Hf isotopic study of zircons from metasedimentary rocks in the Chinese Altai : implications for Early Paleozoic tectonic evolution[J]. *Tectonic* , 26 , TC5015. doi : 10. 1029/ 2007TC002128.
- Long X P , Sun M , Yuan C , *et al.* 2008. Early Paleozoic sedimentary record of the Chinese Altai : implications for its tectonic evolution [J]. *Sedimentary Geology* , 208 : 88~100.
- Lou Fasheng. 1997. Characteristics of Late Caledonian granites in the Nuorte area , Altai , China[J]. *Jiangxi Geology* , 11(3) : 60~66 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W , Goldfarb R J , Wang Y T , *et al.* 2005. Late Paleozoic base and precious metal deposits , East Tianshan , Xinjiang , China : Characteristics and geodynamic setting[J]. *Episodes* , 28(1) : 23~36.
- Patchett P J & Samson S D. 2003. Isotopic evolution and crustal growth history[A]. Rudnick. *Treatise of Geochemistry 3 , The Crust* [C]. Oxford : Elsevier-Pergamon , 321~348.
- Pavlova G G , Borisenko A S , Goverdovskii V A , *et al.* 2008. Permian-Triassic magmatism and Ag-Sb mineralization in southeastern Altai and northwestern Mongolia[J]. *Russian Geology and Geophysics* , 49 : 545~555.
- Peccerillo R and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area , northern Turkey[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.* , 58 : 63~81.
- Plotnikov A V , Titov A V , Kruk N N , *et al.* 2001. Middle Paleozoic age of metasomatism in the south Chuya complex in Gorny Altai[J]. *Geologiya i Geofizika* , 42(9) : 1 333~1 347(in Russian with English abstract).
- Potseluev A A , Babkin D I and Kotegov V I. 2006. The Kalguty complex deposit , the Gorny Altai : mineralogical and geochemical characteristics and fluid regime of ore formation[J]. *Geologiya Rudnykh Mestorozhdenii* , 48(5) : 439~459(in Russian).
- Qu Guosheng and Chong Meijing. 1991. Lead Isotope geology and insectoic implicatonic implications in Altaides , China[J]. *Geoscience* , 5(1) : 102~112(in Chinese with English abstract).
- Rogers G and Hawkesworth C J. 1989. A geochemical traverse across the North Chilean Andes : evidence for crust generation from the mantle wedge[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.* , 91 : 271~285.
- Sengor A M C , Natal 'in B A and Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature* , 364 : 299~307.
- Stephanie M B , Yin A , Craig E M *et al.* 2007. Late Paleozoic tectonic history of the Ertix Fault in the Chinese Altai and its implications for the development of the Central Asian Orogenic System[J]. *Geological Society of America Bulletin* , July/August : 944~960.
- Sun Guihua , Li Jinyi , Yang Tiannan , *et al.* 2009. Zircon SHRIMP U-Pb dating of two linear granite plutons in southern Altay Mountains and its tectonic implications[J]. *Geology in China* , 36(5) : 976~987(in Chinese with English abstract).
- Sun Min , Long Xiaoping , Cai Keda , *et al.* 2009. Early Paleozoic ridge subduction in the Chinese Altai : Insight from the abrupt change in zircon Hf isotopic compositions[J]. *Science in China(Series D : Earth Sciences)* , 39(7) : 935~948.
- Sun Min , Yuan Chao , Xiao WenJiao , *et al.* 2008. Zircon U-Pb and Hf isotopic study of gneissic rocks from the Chinese Altai : Progressive accretionary history in the early to middle Palaeozoic[J]. *Chemical Geology* , 247 : 352~383.
- Tong Ying. 2006. Geochronology , Origin of the Late Paleozoic granitoids from the Altai Orogen in China and their geological significance [D]. Beijing : Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese with English abstract).
- Tong Ying , Hong Dawei , Wang Tao , *et al.* 2010a. Spatial and temporal distribution of granitoids in the middle segment of the Sino-Mongolian border and its tectonic and metallogenic implication[J]. *Acta Geoscientica Sinica* , 31(3) : 395~415(in Chinese with English abstract).
- Tong Ying , Wang Tao , Hong Dawei , *et al.* 2005. Zircon U-Pb age of Tielike pluton in the western Altai orogen and its implication[J]. *Acta Geoscientia Sinica* 26 : 74~77(in Chinese with English abstract).
- Tong Ying , Wang Tao , Hong Dawei , *et al.* 2006a. Pb isotopic composition of granitoids from the Altay Orogen (China) : Evidence for Mantle-derived Origin and Continental growth[J]. *Acta Geologica Sinica* , 80(4) : 517~528(in Chinese with English abstract).
- Tong Ying , Wang Tao , Hong Dawei , *et al.* 2006b. TIMS U-Pb zircon ages of Fuyun post-orogenic linear granite plutons on the southern margin of Altay orogenic belt and their implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica* , 25(2) : 85~89(in Chinese with English abstract).
- Tong Ying , Wang Tao , Hong Dawei , *et al.* 2007. Ages and origin of the early Devonian granites from the north part of Chinese Altai Mountains and its tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica* , 23(8) : 1 933~1 944(in Chinese with English abstract).
- Tong Ying , Wang Tao , Hong Dawei , *et al.* 2010b. Spatial and temporal distribution of the Carboniferous-Permian granitoids in northern Xinjiang and its adjacent areas , and its tectonic significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica* , 29(6) : 619 ~641(in Chinese with English abstract).
- Tong Ying , Wang Tao , Kovach V P , *et al.* 2006c. Age and origin of the Takeshiken postorogenic alkali-rich intrusive rocks in southern Altai near the Mongolian border in China and its implications for continental growth [J]. *Acta Petrologica Sinica* , 22(5) : 1 267~1 278.
- Vladimirov A G , Kruk N N , Polyanskii O P , *et al.* 2005. Correlation of Hercynian deformations , sedimentation and magmatism in the Altai collisional system as reflecting plate- and plum-tectonics[A]. *Problem of tectonic of the Central Asia* [C]. Moscow : Geos. P , 1 277~1 308.
- Vladimirov A G , Kruk N N , Khromykh S V , *et al.* 2008. Permian

- magmatism and lithospheric deformation in the Altai caused by crustal and mantle thermal processes[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 49: 468~479.
- Vladimirov A G, Ponomareva A P, Shokalskii S P, *et al.* 1997. Late Paleozoic-early Mesozoic granitoid magmatism in Alta[J]. *Geologiya i Geofizika*, 38(4): 715~729 (in Russian with English abstract).
- Vladimirov A G, Kozlov M S, Shokalsky S P, *et al.* 2001. Major epochs of intrusive magmatism of KuznetskAlatau, Altai, and Kalba (from U-Pb isotope dates [J]. *Geologiya i Geofizika* (Russian Geology and Geophysics), 42(8): 1157~1178 (1089~1109).
- Wang Denghong, Chen Yuchuan, Xu Zhigang, *et al.* 2002. Minerogenetic Series and Regularity of Mineralization in the Altai Metallogenetic Province, China[M]. Beijing: Atomic Press, 1~498 (in Chinese).
- Wang Tao, Hong Dawei, Jahn Borming, *et al.* 2006. Timing, Petrogenesis, and Setting of Paleozoic Synorogenic intrusions from the Altai Mountains, Northwest China: implications for the tectonic evolution of an accretionary Orogen[J]. *Journal of Geology*, 114: 735~751.
- Wang Tao, Hong Dawei, Tong Ying, *et al.* 2005. Zircon U-Pb SHRIMP age and origin of post-orogenic Lamazhao granitic pluton from Altai orogen: its implications for vertical continental growth[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 640~650 (in Chinese with English abstract).
- Wang T, Jahn B M, Kovachet V P, *et al.* 2008. Mesozoic anorogenic granitic magmatism in the Altai Paleozoic accretionary orogen, NW China, and its Implications for crustal architecture and growth[A]. Abstract SE53~A010, AOGS 5th Annual General Meeting[C], Busan, Korea.
- Wang Tao, Jahn Borming, Kovachet V P, *et al.* 2009. Nd-Sr isotopic mapping of the Chinese Altai and implications for continental growth in the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Lithos*, 110(1/4): 359~372.
- Wang Tao, Li Wuping, Li Jinbao, *et al.* 2008. Increase of juvenile mantle-derived composition from syn-orogenic to post-orogenic granites of the east part of the eastern Tianshan (China) and implications for continental vertical growth: Sr and Nd isotopic evidence[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 762~772 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tao, Tong Ying, Jahn Borming, *et al.* 2007. SHRIMP U-Pb Zircon geochronology of the Altai No. 3 Pegmatite, NW China, and its implications for the origin and tectonic setting of the pegmatite [J]. *Ore Geology Reviews*, 32: 325~336.
- Wang Zhonggang. 1989. Trace Element Geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 82~96 (in Chinese).
- Wang Zhonggang and Zhao Zhenhua, 1990. Origin and Evolution of the Granitoids in Altai[M]. *Geoscience of Xinjiang* (No. 1), 69~77 (in Chinese).
- Wang Zhonggang, Zhao Zhenhua, Zou Tianren, *et al.* 1998. Geochemistry of Granitoids in Altai, Xinjiang[M]. Beijing: Science Press, 1~152 (in Chinese).
- Windley B F, Kröner A, Guo J H, *et al.* 2002. Neoproterozoic to palaeozoic geology of the Altai orogen, NW China: new zircon age data and tectonic evolution[J]. *The Journal of Geology*, 110: 719~737.
- Wong Kenny, Sun Min, Zhao Guochun, *et al.* 2010. Geochemical and geochronological studies of the Alegedayi ophiolitic complex and its implication for the evolution of the Chinese Alta[J]. *Gondwana Research*, 18: 438~454.
- Wu F Y, John B M, Wilde S A, *et al.* 2000. Phanerozoic continental crustal growth: U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China[J]. *Tectonophics*, 328: 89~113.
- Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Wang Tao, *et al.* 2009. Granitoids and Continent Growth of Key Orogen in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~528 (in Chinese).
- Xiao W, Windley B F, Badarch G, *et al.* 2004. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altai: implications for the growth of Central Asia[J]. *Journal of the Geological Society*, 161: 339~342.
- Xiao Wenjiao, Han Chunming, Yuan Chao, *et al.* 2006. Unique Carboniferous-Permian tectonic-metallogenic framework of Northern Xinjiang (NW China): Constraints for the tectonics of the southern Paleasian Domain[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(05): 1062~1076 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Wenjiao, Huang Baochun, Han Chunming, *et al.* 2010. A review of the western part of the Altai: A key to understanding the architecture of accretionary orogen[J]. *Gondwana Research*, 18: 253~273.
- Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, Feng Yimin, *et al.* 1992. Tectonic Evolution of the Northern Xinjiang and Its Adjacent Region, Xinjiang [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~171 (in Chinese).
- Xu Lingang, Mao Jingwen, Yang Fuquan, *et al.* 2010. Geology, geochemistry and age constraints on the Mengku skarn iron deposit in Xinjiang Altai, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(5): 423~440.
- Xu J F, Castillo P R, Chen F R, *et al.* 2003. Geochemistry of late Palaeozoic mafic igneous rocks from the Kuerti area, Xinjiang, northwest China: implications for back-arc mantle evolution[J]. *Chemical Geology*, 193: 137~154.
- Xu Jifeng, Chen Fanrong, Yu Xueyuan, *et al.* 2001. Kuerti ophiolite in Altai area of North Xinjiang: Magmatism of an ancient back-arc basin[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(3): 344~352 (in Chinese with English abstract).
- Xue Chunji, Zhao Zhanfeng, Wu Ganguo, *et al.* 2010. The multiperiodic superimposed porphyry copper mineralization in Central Asian Tectonic Region: A case study of geology, geochemistry and chronology of Halasu copper deposit, Southeastern Altai, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(2): 53~82 (in Chinese with English abstract).
- Yang Fuquan, Mao Jingwen, Yan Shenghao, *et al.* 2008. Geochronology, Geochemistry and Geological implications of the Mengku Syn-orogenic Plagiogranite Pluton in Altai, Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(4): 485~499 (in Chinese with English abstract).
- Yang Shufeng, Chen Hanlin, Ji Dengwu, *et al.* 2005. Geological process of early to middle Permian magmatism in tarim basin and its geodynamic significance[J]. *Geological Journal of China Universities*, 11(4): 504~511 (in Chinese with English abstract).
- Yarmolyuk V V, Kovalenko V I, Sal'nikova E B, *et al.* 2008. Geochronology of igneous rocks and formation of the Late Paleozoic South Mongolian active margin of the Siberian Continent Stratigraphy[J]. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 16(2): 162~

181.

- Yuan Chao, Sun Min, Xiao Wenjiao, *et al.* 2007. Accretionary orogenesis of the Chinese Altai: insights from Paleozoic granitoids [J]. *Chemical Geology*, 242: 22~39.
- Zeng Qiaosong, Chen Guanghao, Wang He, *et al.* 2007. Geochemical characteristic, SHRIMP zircon U-Pb dating and tectonic implication for granitoids in Chonghuier basin, Altai, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1921~1932 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Haixiang, Niu Hecai, Terada K, *et al.* 2003. Zircon SHRIMP U-Pb dating on plagiogranite from Kuerti ophiolite in Altai, North Xinjiang [J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(20): 2231~2235.
- Zhang Zhaochong, Yan Shenghao, Chen Bolin, *et al.* 2003. Geochemistry of the Kalatongke basic complex in Xinjiang and its constraints on genesis of the deposit [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(3): 217~224 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Yan Shenghao, Chen Bolin, *et al.* 2006a. SHRIMP U-Pb zircon dating of the eastern Junggar subduction granite, Xinjiang, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 51(13): 1565~1574 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Zhou Gang, Yan Shenghao, *et al.* 2006b. Platinum group element geochemistry of the Devonian arc-related picrites of the South Margin of the Altai Mountains in Xinjiang and its geological implications [J]. *Geoscience*, 20(4): 519~525 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhenhua, Wang Zhonggang, Zou Tianren, *et al.* 1993. The Ree, isotopic composition of O, Pb, S and petrogenesis of granitoids in the Altai region [A]. Tu Guangzhi. *Progress of Solids Earth Sciences in Northern Xinjiang, China* [C]. Beijing: Science Press, 239~266 (in Chinese).
- Zhou Gang, Zhang Zhaochong, Luo Shibin, *et al.* 2007a. Confirmation of high-temperature strongly peraluminous Mayin'elbo granites in the south margin of Altai, Xinjiang: age, geochemistry and tectonic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1909~1920 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Gang, Zhang Zhaochong, Wang Xinkun, *et al.* 2007b. Zircon U-Pb SHRIMP and ^{40}Ar - ^{39}Ar Dating of the granitic Mylonite in the Mayin'elbo fault belt of North Xinjiang and its geological significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(3): 359~369 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Y F, Zeng Y S and Gu L B. 2006. Geochemistry of the rare metal-bearing pegmatite No. 3 vein and related granites in the Keketuohai region, Altai Mountains, northwest China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27: 61~77.
- Zhu Zhixin, Li Shaozhen and Li Songling. 2005. The Characteristics of sedimentary system-continental facies volcano in later carboniferous Batamayi Group, Zhifang Region, East Junggar [J]. *Xinjiang Geology*, 23(1): 14~18 (in Chinese with English abstract).
- Zou Tianren, Cao Huizhi and Wu Boqing. 1988. Orogenic and anorogenic granitoids of the Altai Mountains, Xinjiang and their discrimination criteria [J]. *Acta Geologica Sinica*, 62(3): 229~243 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈汉林, 杨树锋, 厉子龙. 2006. 阿尔泰山带富碱基性麻粒岩年代学及其构造意义 [J]. *岩石学报*, 22(5): 1351~1358.
- 方同辉, 王京彬, 张进红, 等. 2002. 新疆阿尔泰元古代基性岩浆侵入事件 [J]. *中国地质*, 29(1): 48~54.
- 韩宝福. 2008. 中俄阿尔泰山中生代花岗岩与稀有金属矿床的初步对比分析 [J]. *岩石学报*, 24(4): 655~660.
- 韩宝福, 何国琦, 王式洗, 等. 1998. 新疆北部碰撞后幔源岩浆活动与陆壳纵向生长 [J]. *地质论评*, 44: 396~409.
- 韩宝福, 王式洗, 江博明, 等. 1997. 新疆乌伦古河碱性花岗岩 Nd 同位素特征及其对显生宙地壳伸展的意义 [J]. *科学通报*, 42(17): 1829~1831.
- 何国琦, 李茂松, 刘德权, 等. 1994. 中国新疆古生代地壳演化及成矿 [M]. 新疆人民出版社和香港文化教育出版社, 1~437.
- 洪大卫, 王式洗, 谢锡林, 等. 2000. 兴蒙造山带正 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长 [J]. *地学前缘*, 7(2): 441~456.
- 胡霏琴, 韦刚健, 张积斌, 等. 2008. 西天山温泉地区早古生代斜长角闪岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 24(12): 2731~2740.
- 胡霏琴, 张国新, 张前锋, 等. 2002. 阿尔泰山带变质岩系时代问题的讨论 [J]. *地质科学*, 37(2): 129~142.
- 李华芹, 谢才富, 常海亮, 等. 1998. 新疆北部有色金属矿床成矿作用年代学 [M]. 北京: 地质出版社, 46~176.
- 李会军, 何国琦, 吴泰然, 等. 2006. 阿尔泰-蒙古微大陆的确定及其意义 [J]. *岩石学报*, 22(05): 1369~1379.
- 李锦轶. 1991. 试论新疆东准噶尔古生代板块构造演化 [A]. 肖序常, 汤耀庆. 古中亚复合巨型缝合带南缘构造演化 [C]. 北京: 北京科学技术出版社, 92~108.
- 李锦轶. 2004. 新疆东部新元古代晚期至古生代的构造格局与构造演化 [J]. *地质论评*, 50(3): 304~322.
- 李锦轶, 何国琦, 徐新, 等. 2006a. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨 [J]. *地质学报*, 80(1): 148~168.
- 李锦轶, 宋彪, 王克卓, 等. 2006b. 东天山吐哈盆地南缘二叠纪幔源岩浆杂岩: 中亚地区陆壳垂向生长的地质记录 [J]. *地球学报*, 27(5): 424~446.
- 李锦轶, 张进, 杨天南, 等. 2009. 北亚造山带南部及其毗邻地区地壳构造分区与构造演化 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 39(4): 584~605.
- 李舫, 王涛, 董英. 2010. 中亚造山系中南段早中生代花岗岩类时空分布特征及构造环境 [J]. *岩石矿物学杂志*, 29(6): 642~662.
- 刘锋, 李延河, 毛景文, 等. 2008. 阿尔泰山带阿巴宫花岗岩体锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义 [J]. *地球学报*, 29(6): 795~804.
- 刘国仁, 秦纪华, 赵忠合, 等. 2008. 新疆阿尔泰额尔齐斯构造带片麻岩的锆石 U-Pb SHRIMP 定年及其地质意义 [J]. *现代地质*, 22(2): 190~196.
- 刘建民, 陈柏林, 董树文, 等. 2009. 新疆富蕴可可托海-二台断裂带中假玄武玻璃及其围岩的年代学研究 [J]. *地质论评*, 55(4):

- 581~589.
- 刘伟. 1990. 中国新疆阿尔泰山花岗岩的时代及成因类型特征[J]. 大地构造与成矿学, 14(1): 43~56.
- 刘伟. 1993. 新疆阿尔泰山地区岩浆岩类的等时线年龄、地壳构造运动以及构造环境的发展演化(新疆地质科学第4辑[M]). 地质出版社, 35~50.
- 楼法生. 1997. 阿尔泰诺尔特地区加里东晚期花岗岩特征[J]. 江西地质, 11(3): 60~66.
- 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[J]. 现代地质, 5(1): 102~112.
- 孙桂华, 李锦铁, 杨天南, 等. 2009. 阿尔泰山脉南部线性花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. 中国地质, 36(5): 976~987.
- 孙敏, 龙晓平, 蔡克大, 等. 2009. 阿尔泰早古生代末期洋中脊俯冲: 锆石 Hf 同位素组成突变的启示[J]. 中国科学, 39(7): 935~948.
- 童英. 2006. 阿尔泰造山带晚古生代花岗岩年代学、成因及其地质意义(博士学位论文)[D]. 北京: 中国地质科学院地质研究所.
- 童英, 洪大卫, 王涛, 等. 2010a. 中蒙边境中段花岗岩时空分布特征及构造和找矿意义[J]. 地球学报, 31(3): 395~415.
- 童英, 王涛, 洪大卫, 等. 2005. 阿尔泰造山带同造山铁里克花岗岩锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 地球学报, 26(增刊): 74~77.
- 童英, 王涛, 洪大卫, 等. 2006a. 阿尔泰造山带花岗岩 Pb 同位素组成: 幔源组分的佐证及其地壳生长意义[J]. 地质学报, 80(4): 517~528.
- 童英, 王涛, 洪大卫, 等. 2006b. 阿尔泰造山带南缘富蕴后造山线形花岗岩体锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 25(2): 85~89.
- 童英, 王涛, 洪大卫, 等. 2007. 中国阿尔泰北部山区早泥盆世花岗岩的年龄、成因及构造意义[J]. 岩石学报, 23(8): 1933~1944.
- 童英, 王涛, 洪大卫, 等. 2010b. 北疆及邻区石炭—二叠纪花岗岩时空分布特征及其构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 29(6): 619~641.
- 童英, 王涛, Kovach V P, 等. 2006c. 阿尔泰中蒙边界塔克什肯口岸后造山富碱侵入岩体的形成时代、成因及其地壳生长意义[J]. 岩石学报, 22(5): 1267~1278.
- 王登红, 陈毓川, 徐志刚, 等. 2002. 阿尔泰成矿省的成矿系列及成矿规律[M]. 北京: 原子能出版社, 1~498.
- 王涛, 洪大卫, 童英, 等. 2005. 中国阿尔泰造山带后造山喇嘛昭花岗岩体锆石 SHRIMP 年龄、成因及陆壳垂向生长意义[J]. 岩石学报, 21(3): 640~650.
- 王涛, 李伍平, 李金宝, 等. 2008. 东天山东段同造山—后造山花岗岩幔源组分的递增及陆壳垂向生长的意义——Sr、Nd 同位素证据[J]. 岩石学报, 24(4): 762~772.
- 王中刚. 1989. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 82~96.
- 王中刚, 赵振华. 1990. 阿尔泰山花岗岩类的成因与演化(新疆地质科学第1辑[M]). 北京: 地质出版社, 69~77.
- 王中刚, 赵振华, 邹天人, 等. 1998. 阿尔泰山花岗岩类地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1~152.
- 肖庆辉, 邓晋福, 王涛, 等. 2009. 中国典型造山带花岗岩与大陆地壳生长研究[M]. 北京: 地质出版社, 1~528.
- 肖文交, 韩春明, 袁超, 等. 2006. 新疆北部石炭纪—二叠纪独特的构造成矿作用: 古亚洲洋构造域南部大地构造演化的制约[J]. 岩石学报, 22(5): 1062~1076.
- 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 等. 1992. 新疆北部及其邻区大地构造[M]. 北京: 地质出版社, 1~171.
- 许继峰, 陈繁荣, 于学元, 等. 2001. 新疆北部阿尔泰山地区库尔提蛇绿岩: 古弧后盆地系统的产物[J]. 岩石矿物学杂志, 20(3): 344~352.
- 薛春纪, 赵战锋, 吴淦国, 等. 2010. 中亚构造域多期迭加斑岩铜矿化: 以阿尔泰东南缘哈腊苏铜矿床地质、地球化学和成岩成矿时代研究为例[J]. 地学前缘, 17(2): 53~82.
- 杨富全, 毛景文, 闫升好, 等. 2008. 新疆阿尔泰蒙库同造山斜长花岗岩年代学、地球化学及其地质意义[J]. 地质学报, 82(4): 485~499.
- 杨树锋, 陈汉林, 冀登武, 等. 2005. 塔里木盆地早—中二叠世岩浆作用过程及地球动力学意义[J]. 高校地质学报, 11(4): 504~511.
- 曾乔松, 陈广浩, 王核, 等. 2007. 阿尔泰冲乎尔盆地花岗岩类的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义[J]. 岩石学报, 23(8): 1921~1932.
- 张招崇, 闫升好, 陈柏林, 等. 2003. 新疆喀拉通克基性杂岩体的地球化学特征及其对矿床成因的约束[J]. 岩石矿物学杂志, 22(3): 217~224.
- 张招崇, 闫升好, 陈柏林, 等. 2006a. 新疆东准噶尔北部俯冲花岗岩的 SHRIMP U-Pb 锆石定年[J]. 科学通报, 55(13): 1565~1574.
- 张招崇, 周刚, 闫升好, 等. 2006b. 新疆阿尔泰山南缘泥盆纪弧型苦橄岩铂族元素地球化学特征及其地质意义[J]. 现代地质, 20(4): 519~525.
- 赵振华, 王中刚, 邹天人, 等. 1993. 阿尔泰山花岗岩类 REE 及 O、Pb、Sr、Nd 同位素组成及成岩模型[A]. 涂光炽. 新疆北部固体地球科学新进展[C]. 北京: 科学出版社, 239~266.
- 周刚, 张招崇, 罗世宾, 等. 2007a. 新疆阿尔泰山南缘玛因鄂博高温型强过铝花岗岩年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 23(8): 1909~1920.
- 周刚, 张招崇, 王新昆, 等. 2007b. 新疆玛因鄂博断裂带中花岗质糜棱岩锆石 U-Pb SHRIMP 和黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄及意义[J]. 地质学报, 81(3): 359~369.
- 朱志新, 李少贞, 李嵩龄. 2005. 东准噶尔纸房地区晚石炭世巴塔玛依内山组陆相火山—沉积体系特征[J]. 新疆地质, 23(1): 14~18.
- 邹天人, 曹惠志, 吴柏青. 1988. 新疆阿尔泰造山和非造山花岗岩及其判别标志[J]. 地质学报, 62(3): 229~243.