

doi:10.3799/dqkx.2013.023

新疆库米什地区晚石炭世一早二叠世花岗岩年代学、地球化学及其地质意义

陈超¹, 吕新彪^{1,2*}, 曹晓峰¹, 吴春明², 朱江¹

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地质调查研究院, 湖北武汉 430074

摘要: 南天山东缘库米什地区花岗岩广泛出露, 沿库米什断裂形成 NWW 向花岗岩带。该地区发现有忠宝和桑树园子矽卡岩型白钨矿床, 矿化与二云母花岗岩关系密切。锆石 U-Pb LA-ICP-MS 定年分别获得忠宝岩体年龄为 296 ± 4 Ma, 桑树园子岩体年龄为 293 ± 3 Ma, 形成时代为晚石炭世一早二叠世。两岩体总体具有高 SiO_2 (72.51%~74.84%, 70.68%~74.14%), $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$, 铝饱和 ($A/\text{CNK} = 1.11 \sim 1.48, 1.05 \sim 1.11$), 可见原生白云母矿物等特征, 反映了同碰撞 S 型花岗岩的特点。样品总体富集 LILE 元素、亏损 HFSE 元素, 稀土元素表现为轻稀土富集、重稀土亏损的“右倾”型特征, 具中等的负 Eu 异常。综合岩体的 I_{Sr} 值 (0.7076~0.7088 和 0.7065~0.7077)、负的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (-6.3~-7.1 和 -4.7~-5.1)、岩体单阶段模式年龄 (T_{DM}) 值 (1.59~1.8 Ga 和 1.50~1.56 Ga) 及古老的继承锆石年龄 (2.5~0.8 Ga) 分析认为, 忠宝及桑树园子岩体为库米什地区星星峡群变泥质岩云母类矿物脱水部分熔融的产物, 并可能混有杂砂岩成分, 而南天山东部存在古老基底。本次研究显示南天山洋东部(库米什地区)于晚石炭世一早二叠世最终闭合, 早中二叠世 A 型花岗岩及基性岩浆活动的出现表明该地区进入板内伸展阶段。富钨的星星峡群是本地区钨矿化可能的矿源层, 早二叠世挤压向伸展的转换阶段为南天山东部钨矿有利的成矿构造体制, 经历多旋回构造重熔的星星峡群在早二叠世造山过程的再次“重熔”作用致使成矿元素最终富集成矿。

关键词: 南天山库米什二; 云母花岗岩; 地质年代学; 地球化学; 构造背景; 钨矿。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2013)02-0218-15

收稿日期: 2012-04-15

Geochronology, Geochemistry and Geological Significance of Late Carboniferous-Early Permian Granites in Kumishi Area, Xinjiang

CHEN Chao¹, LÜ Xin-biao^{1,2*}, CAO Xiao-feng¹, WU Chun-ming², ZHU Jiang¹

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Granitoids are widely distributed in east part of south Tianshan orogen, forming a NWW orientated granite belt along Kumishi fault. Zhongbao and Sangshuyuanzi skarn-type tungsten deposits have been discovered in this region and the mineralization is closely related to two-mica granites. LA-ICP-MS U-Pb zircon dating yields the ages of Zhongbao and Sangshuyuanzi granites of 296 ± 4 Ma and 293 ± 3 Ma, respectively, which belong to Late Carboniferous-Early Permian. Both of the granites are peraluminous ($A/\text{CNK} = 1.11 - 1.48, 1.05 - 1.11$) with high contents of SiO_2 (72.51% - 74.84%, 70.68% - 74.14%) and primary muscovites, which show the characteristics of syn-collision S-type granites. The samples are characterized with enriched LILE, LREE and loss of HFSE, with HREE showing moderate negative Eu anomalies. I_{Sr} values of two granites range from 0.7076 to 0.7088 and 0.7065 to 0.7077; $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values range from -6.3 to -7.1 and -4.7 to -5.1; Nd single-stage model ages (T_{DM}) range from 1.59 to 1.8 Ga and 1.50 to 1.56 Ga, and the old inherited zircon ages range from 2.5 to 0.8 Ga. The above data indicate that the two granites are derived from partial melting of metapelites of Xingxingxia group and might contain mix greywacke ingredients, suggesting that there exists Precambrian basement in the eastern part of South Tianshan.

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划重点项目 (No. 2007BA25B04)。

作者简介: 陈超 (1984-), 男, 在读博士研究生, 矿产普查与勘探专业。E-mail: chencao_02103103@163.com

* **通讯作者:** 吕新彪, E-mail: lvxb_01@163.com

Based on this research and previous studies as well, we are convinced that South Tianshan ocean finally closed in Late Carboniferous-Early Permian and the appearance of A-type granites and mafic magmatism means that the south Tianshan orogenic belt enters the post-orogenic stage. Tungsten-rich Xingxingxia Group is the possible source of regional tungsten mineralization and the conversion stage from syn-collision to post-collision is the advantageous matallotectonic system. Xingxingxia Group that had experienced the polycycle tectonism remelted again in orogenic processes in Early Permian, resulting in the final concentration of ore-forming elements.

Key words: South Tianshan orogen; two-mica granites; geochemistry; tectonic setting; tungsten deposits.

中亚造山带是前寒武纪古老陆块、古生代岛弧、蛇绿岩套残片等地体组成的复合型增生造山带,以其复杂的构造演化而成为学者研究的热点地区(Jahn *et al.*, 2000; Xiao *et al.*, 2009, 2010; Gao *et al.*, 2011). 南天山造山带位于中亚造山带中南部,伊犁—中天山板块和塔里木板块之间,是南天山洋盆在俯冲消减闭合过程中,两侧陆块及增生杂岩等拼接碰撞形成的碰撞造山带,对南天山古洋盆演化过程的认识是了解古亚洲洋及中亚造山带构造演化的关键之一(何国琦等, 2001; 姜常义等, 2001; 高俊等, 2006; 李曰俊等, 2009). 近年来众多学者对南天山造山带研究已取得了诸多成果,由于研究区域及对象不同,在若干问题上仍有争议,其焦点主要集中在碰撞时间上. 部分学者认为碰撞发生在早泥盆世(董云鹏等, 2005; 杨经绥等, 2011)或晚石炭世(姜常义等, 1999; 高俊等, 2006; 朱志新等, 2008; 黄岗等, 2011; 黄河等, 2011); 亦有学者认为碰撞发生在晚二叠世—早三叠世(Brookfield, 2000; Zhang *et al.*, 2007).

相对于西南天山地区,南天山东部(库米什及其以东地区)花岗岩研究程度相对较低,对岩浆源区探讨及成因机制研究相对薄弱. 库米什地区花岗岩呈串珠状沿 NWW 向分布,已有研究表明该地区花岗岩成因与南天山洋晚古生代向北俯冲—碰撞闭合关系密切(姜常义等, 1999, 2001; 杨天南等, 2006; 杨天南和王小平, 2006),这些岩体在反映南天山东部地壳组成和约束造山带构造演化方面具有独特的指示作用. 库米什及其周边地区忠宝、桑树园子、库米什镇及其以西的包尔图—和硕一带发现多处矽卡岩型钨矿化并与本地区花岗岩关系密切;区域地球化学特征显示伊犁—中天山南缘 NWW 向花岗岩带具有与花岗岩套合良好的钨异常. 对南天山东部库米什地区成矿花岗岩的成因及年代学研究,无疑能为南天山造山带构造演化、地壳组成特点及钨矿成矿背景研究提供有益的信息.

1 地质背景及岩相学特征

研究区位于南天山造山带东部库米什地区(图 1),为东、西天山分界区域,属中天山地块南缘增生带. 中天山地块北缘出露干沟蛇绿岩,与中一下奥陶统细碧角斑岩、杂砂岩呈构造接触,代表北天山洋早古生代板块缝合带. 南面出露榆树沟—铜花山—硫磺山蛇绿混杂岩,向南逆冲于中泥盆碎屑岩、碳酸盐岩地层上,为南天山北缘古生代板块缝合带东段的重要组成部分(肖序常等, 1992). 区内发育最老地层为中元古界星星峡群,主要岩性组合为斜长角闪岩、片麻岩、混合岩和各种副变质片岩(刘树文等, 2004; 李秋根等, 2005). 志留系和中一下泥盆统岩石分布广泛,主要为形成于活动陆缘钙碱系列特征的中酸性火山岩及陆缘碎屑岩经后期区域变质作用形成的各类斜长片岩、石英片岩、钙质片岩及大理岩. 下石炭统主要为残留海盆环境下沉积的富含浅水相生物化石碳酸盐岩建造,二叠系全区基本缺失. 受南天山洋构造活动影响,库米什地区形成以早古生代和晚古生代花岗岩为主的多期次岩浆侵入,区内花岗岩呈岩基、岩株或岩枝状沿库米什背斜轴部及两翼侵位,构成长 360 km、宽 15 km 的 NWW 向花岗岩带,岩性主要为淡白色斜长花岗岩、红色斑状花岗岩、灰白色二云母二长花岗岩、钾长花岗岩等,早古生代花岗岩受后期构造应力作用影响普遍发生了构造变形(杨天南等, 2006; 杨天南和王小平, 2006).

忠宝岩体位于库米什侵入岩带东部,岩体侵入于下泥盆统阿尔彼什麦布拉克下亚组地层中,呈岩株产出,主要岩性为二云母二长花岗岩及钾长花岗岩(图 2). 与钨矿化有关的岩性为二云母二长花岗岩,主要组成矿物为石英、斜长石、微斜长石、白云母、黑云母等矿物. 斜长石呈板条状,部分具环带状构造,内环多被绢云母、石英所替代,含量在 20%~30%之间. 微斜长石呈他形不规则状,格子双晶发育明显,含量 15%~35%. 黑云母呈鳞片状,少数被绿泥石化,含量在 5%~10%之间. 白云母与黑云母粒

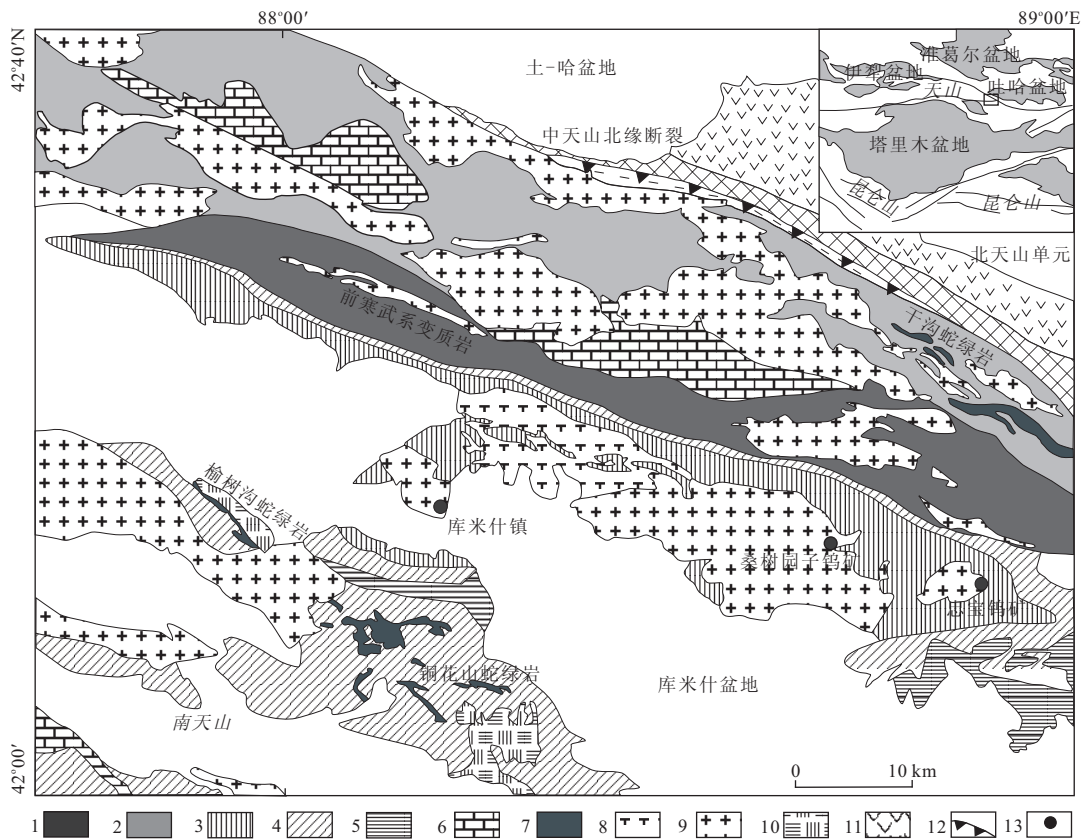


图 1 库米什地区区域地质简图(据杨天南和王小平,2006 修改)

Fig. 1 Regional geology of Kumishi area

- 1. 长城系星星峡群; 2. 早古生界地层; 3. 下泥盆统阿尔彼什麦组下亚组; 4. 下泥盆统阿尔彼什麦组上亚组; 5. 中泥盆统; 6. 石炭系; 7. 蛇绿岩; 8. 早古生代变形花岗岩; 9. 晚古生代未变形花岗岩; 10. 辉长岩; 11. 北天山单元; 12. 逆冲断层; 13. 钨矿点

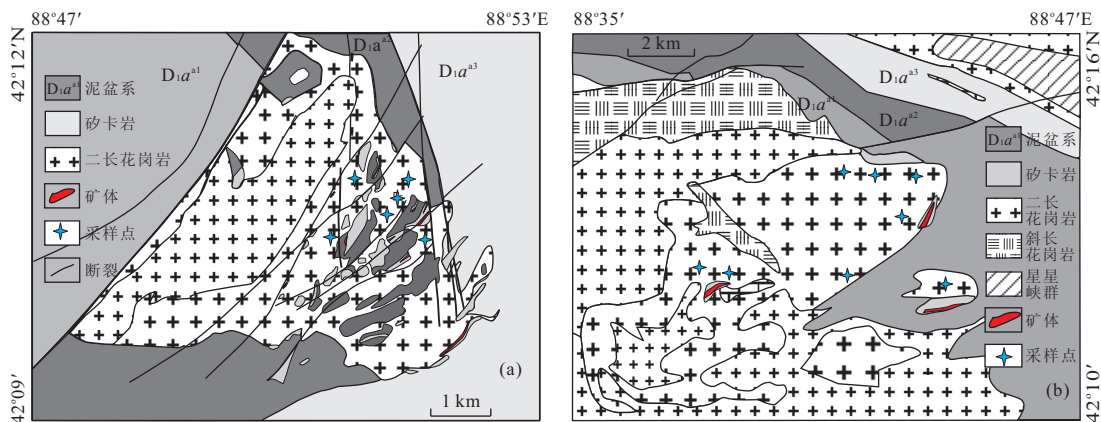


图 2 忠宝矿区(a)和桑树园子矿区(b)地质简

Fig. 2 Geological map of ore deposits in Zhongbao (a) and Shangshuyuanzi areas (b)

度相近,含量在 5%~15%之间。副矿物有锆石、磷灰石、榍石、绿帘石等。桑树园子岩体位于忠宝岩体以西,岩性组合亦为二云母二长花岗岩及钾长花岗岩。与钨矿化有关的二云母二长花岗岩分布于矿区中部及西南部。岩体形态不规则,岩石呈灰白色,中细粒半自形粒状结构,块状构造。主要矿物为斜长

石、微斜长石、石英,次要矿物成分为白云母、黑云母等,另有少量副矿物磷灰石。斜长石呈他形或半自形板条状,可见泥化、绢云母化,含量在 30%~35%。微斜长石呈他形不规则状,分布于斜长石和石英间,含量在 20%~25%。白云母与黑云母粒度相近,含量在 5%~10%之间。

本次研究样品分别采自忠宝矿区和桑树园子矿区与矽卡岩型钨矿化关系密切的二云母二长花岗岩. 选取镜下鉴定未发生明显蚀变的样品, 分别对岩体样品进行岩石地球化学、同位素地球化学及锆石 U-Pb LA-ICP-MS 年代学研究.

2 测试方法

岩石化学分析项目为样品的常量、微量以及稀土元素组成, 所有样品测试项目均由湖北省地质矿产开发局实验测试中心完成, 检测环境温度 10~24 °C, 湿度 30%~65%. 主量元素分析仪器为荷兰产 PW2440 波长色散 X 荧光光谱仪, 分析精度优于 1%, 其中 FeO 含量采用重铬酸钾滴定法测定, 微量元素和稀土元素分析仪器为法国 JY38S 等离子体原子发射光谱, 分析精度优于 3%.

花岗岩锆石年代学研究样品挑样及制靶由河北省廊坊区域地质矿产调查研究所实验室完成. 首先将锆石样品置于环氧树脂中进行抛光, 使锆石核心出露再进行阴极发光显微照像. 同时结合反射光和透射光, 观察锆石结晶形态、颜色、内部包裹体、透明度、裂隙等, 挑选出细长柱状、包裹体数量较少、具有明显的岩浆震荡环带的自形岩浆锆石晶体. 锆石原位微区测试在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)激光剥蚀等离子体质谱(LA-ICP-MS)仪器上完成, 激光束斑直径为 32 μm . 实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气, 以 SRM610 作为外标, ^{29}Si 作为内标, 详细分析流程和原理参照袁洪林等(2003)所报道的进行. 将实验获得的数据进行同位素比值的校正, 以扣除普通 Pb 的影响. 所给定的同位素比值和年龄的误差(标准偏差)在 1 σ 水平, 运用刘勇胜的 ICP-MS-DataCal (V3.0) 进行数据处理及年龄校正.

Sr-Nd-Pb 同位素样品由中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)热电离同位素质谱仪测定. Nd 和 Sr 同位素质谱校正分别用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 和 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$, 样品 GBW04411 和标准溶液 La Jolla 的测定值分别为 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512740\pm 8$ 和 0.511842 ± 10 , 标准样品 NBS987 的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 测定值为 0.71024 ± 3 . Pb 同位素分馏校正采用 $^{205}\text{Tl}/^{203}\text{Tl}=2.3875$. 在样品测量期间, 标准样品 NBS981 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值给出 0.91460 ± 2 . 文中 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 的计算参数采用 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}=0.512638$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}=$

0.1967 , 由于样品 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 均大于 0.1 , 小于 0.145 , 表明其 Sm-Nd 体系未发生再分异和在平衡作用 (Arndt and Goldstein, 1987), 故均计算样品单阶段模式年龄 (T_{DM}). 计算采用 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}=0.51315$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}=0.2137$.

3 测试结果

3.1 岩石地球化学特征

忠宝及桑树园子样品岩石地球化学分析结果见表 1, 忠宝岩石样品具有高 SiO_2 含量 (72.51%~74.84%)、低钛 ($\text{TiO}_2=0.11\%\sim 0.15\%$)、低钙 ($\text{CaO}=0.88\%\sim 1.15\%$)、低镁 ($\text{MgO}=0.39\%\sim 0.49\%$)、贫铁 ($\text{FeO}_t=1.32\%\sim 2.21\%$) 等特征; 全碱含量较高 ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=6.02\%\sim 8.56\%$), $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 $1.07\sim 1.43$, 岩石里特曼指数为 $1.13\sim 2.48$, 在 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图解中样品均落入高钾钙碱性系列的范围. 铝饱和指数 (A/CNK) 为 $1.11\sim 1.48$, 在 $A/\text{NK-A}/\text{CNK}$ 图解上样品全部落在过铝质岩石区(图略), 铝饱和指数与 SiO_2 含量具有明显的正相关关系, 暗示岩体发生结晶分异作用. 岩体主量元素具有强过铝质 S 型花岗岩的一般特征, 该类花岗岩多形成于碰撞造山晚期环境.

样品具较低的稀土元素总量 ($\sum\text{REE}=82.4\times 10^{-6}\sim 100.8\times 10^{-6}$), 应为继承了其源岩的稀土元素特点. 样品 LREE/HREE 比值为 $11.1\sim 14.4$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 $20.55\sim 27.74$, 并具中等的 Eu 负异常 ($\delta\text{Eu}=0.51\sim 0.68$), 在岩石球粒陨石标准化的稀土元素配分曲线上表现为右倾型(图 3b), 显示了明显的轻重稀土分馏作用, 暗示了富重稀土元素矿物的结晶分离作用(如石榴石). 在原始地幔标准化微量元素蛛网图中(图 3a), 花岗岩相对于原始地幔显示强不相容元素相对富集, 而弱不相容元素相对亏损, 曲线呈明显右倾特征. 其中 Ba、Sr、Nb、Ti 呈明显的负异常. Nb、Ti 负异常通常是壳源型岩浆活动的标志. Sr、Ba 在花岗岩浆体系中受斜长石分离结晶作用的控制, 因而 Sr、Ba 负异常及中等的负 Eu 异常表明岩浆源区发生了斜长结晶分离作用.

桑树园子岩体样品 SiO_2 含量在 $70.68\%\sim 74.14\%$ 之间, 同样具有低钛 ($\text{TiO}_2=0.09\%\sim 0.17\%$)、低钙 ($\text{CaO}=1.15\%\sim 1.46\%$)、低镁 ($\text{MgO}=0.19\%\sim 0.37\%$)、贫铁 ($\text{FeO}_t=0.81\%\sim 1.55\%$) 等特征; 全碱含量 ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) 为

表 1 岩体主量(%)及微量元素(10^{-6})化学分析结果Table 1 Major element (%) and trace element (10^{-6}) compositions of granites

岩性 样号	忠宝二云母二长花岗岩						桑树园子二云母二长花岗岩							
	ZBI-1	ZBI-2	ZBI-3	ZBI-4	ZBI-5	ZBI-6	SSY-1	SSY-2	SSY-3	SSY-4	SSY-5	SSY-6	SSY-7	SSY-8
SiO ₂	72.51	72.86	73.64	73.04	74.84	74.43	72.10	73.16	70.68	74.14	73.61	73.02	73.66	73.74
MgO	0.44	0.49	0.39	0.48	0.46	0.41	0.33	0.28	0.37	0.19	0.26	0.31	0.26	0.21
Al ₂ O ₃	14.80	14.98	14.66	15.08	14.98	14.61	14.58	14.24	15.47	14.32	14.33	14.39	14.24	14.51
Na ₂ O	3.70	3.42	3.50	3.39	2.91	3.10	3.34	3.45	3.49	3.05	3.51	3.48	3.56	3.24
P ₂ O ₅	0.18	0.20	0.22	0.19	0.17	0.18	0.09	0.08	0.09	0.05	0.07	0.07	0.06	0.14
K ₂ O	4.86	4.88	4.64	4.77	3.11	3.64	5.09	4.74	5.65	5.23	4.82	4.76	4.59	5.09
CaO	1.04	1.09	0.88	1.05	1.06	1.15	1.46	1.43	1.41	1.15	1.40	1.45	1.46	1.34
TiO ₂	0.14	0.15	0.12	0.14	0.11	0.11	0.14	0.12	0.17	0.09	0.12	0.14	0.11	0.10
MnO	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05	0.04	0.06	0.02	0.05	0.05	0.04	0.03
Fe ₂ O ₃	1.24	1.34	1.10	1.26	0.29	0.11	0.74	0.32	0.40	0.37	0.27	0.39	0.44	0.21
FeO	0.88	0.98	0.88	0.85	1.06	1.24	0.87	0.92	1.23	0.50	0.88	1.07	0.78	0.62
H ₂ O	0.18	0.53	0.32	0.46	0.85	0.92	0.95	0.95	0.74	0.66	0.45	0.59	0.55	0.59
Li	57.4	121.0	89.2	68.3	112.3	76.5	31.7	29.2	48.2	25.7	23.9	40.5	34.6	28.5
W	31.10	15.70	10.50	20.60	18.50	27.30	7.75	8.63	9.38	10.80	8.01	9.20	6.12	8.90
Rb	245	276	292	255	273	256	261	241	303	253	248	249	236	248
Zr	90.76	136.00	98.33	200.00	74.10	90.20	133.00	103.00	137.00	49.90	90.90	108.00	92.70	79.90
Cl	342.0	478.0	523.0	421.0	396.0	406.0	301.0	309.0	150.0	53.4	62.5	77.6	65.2	83.3
Ba	311.0	318.0	81.2	231.0	356.0	389.0	480.0	454.0	522.0	353.0	468.0	444.0	480.0	397.0
Sr	65.79	68.30	26.58	51.47	112.00	138.00	148.00	148.00	157.00	124.00	151.00	151.00	152.00	136.00
Hf	3.30	4.32	3.46	5.76	3.18	3.02	5.20	4.60	6.00	1.80	3.00	4.80	4.20	3.90
Sn	7.80	7.70	8.30	6.50	9.20	10.10	4.36	4.72	6.02	9.13	4.10	4.80	3.78	6.38
Nb	19.41	19.74	19.82	8.39	12.30	11.30	33.30	18.90	22.50	18.90	14.90	15.30	13.30	16.10
Ta	3.66	3.75	4.08	3.14	2.88	3.18	3.13	2.05	2.40	1.83	1.69	1.62	1.35	1.70
U	2.02	1.55	2.36	0.96	1.66	1.79	3.23	2.83	4.40	1.72	1.89	2.99	2.49	2.19
Th	9.66	12.05	8.68	9.47	8.17	11.90	23.50	21.80	30.10	11.00	12.10	19.70	18.00	16.80
F	590	480	610	530	470	620	500	479	543	450	437	450	415	488
La	19.7	24.9	21.2	21.8	19.6	23.2	29.5	24.3	35.9	14.3	26.3	27.8	24.8	27.6
Ce	36.4	44.7	39.3	38.6	34.4	40.2	47.9	43.3	65.1	25.5	45.0	51.4	43.3	47.6
Pr	3.80	4.80	4.40	4.10	3.86	4.40	5.72	4.61	6.79	2.84	4.97	5.34	4.80	5.23
Nd	13.5	16.3	15.6	14.1	13.6	15.0	18.2	14.6	22.1	8.9	15.2	16.8	14.9	16.5
Sm	2.70	3.10	3.20	2.50	2.74	2.94	3.58	2.91	4.29	1.77	2.92	3.34	2.84	3.28
Eu	0.51	0.49	0.32	0.56	0.51	0.55	0.56	0.52	0.68	0.40	0.57	0.59	0.56	0.55
Gd	2.30	2.60	2.80	2.50	2.26	2.39	3.32	2.59	3.70	1.88	2.84	3.06	2.71	3.41
Tb	0.31	0.40	0.46	0.35	0.33	0.35	0.51	0.41	0.62	0.35	0.47	0.51	0.48	0.63
Dy	1.60	1.70	2.20	1.70	1.57	1.57	2.66	2.11	3.35	2.10	2.63	2.71	2.35	3.61
Ho	0.26	0.28	0.36	0.26	0.26	0.26	0.59	0.46	0.80	0.54	0.63	0.61	0.55	0.88
Er	0.61	0.67	0.78	0.70	0.64	0.62	1.43	1.14	1.96	1.42	1.64	1.59	1.41	2.35
Tm	0.08	0.11	0.11	0.11	0.10	0.09	0.24	0.19	0.34	0.26	0.28	0.29	0.25	0.41
Yb	0.57	0.67	0.74	0.70	0.62	0.60	1.55	1.31	2.29	1.80	1.92	1.84	1.67	2.82
Lu	0.09	0.11	0.10	0.10	0.09	0.09	0.24	0.20	0.36	0.27	0.31	0.29	0.26	0.43
Y	9.70	11.60	14.60	17.20	7.25	7.25	15.00	15.60	23.80	15.10	17.70	19.90	15.90	28.50
ΣREE	82.43	100.83	91.57	88.08	80.58	92.26	116.00	98.65	148.28	62.33	105.68	116.17	100.88	115.30
LREE	76.61	94.29	84.02	81.66	74.71	86.29	105.46	90.24	134.86	53.71	94.96	105.27	91.20	100.76
HREE	5.82	6.54	7.55	6.42	5.86	5.97	10.54	8.41	13.42	8.62	10.72	10.90	9.68	14.54
LREE/HREE	13.16	14.42	11.13	12.72	12.73	14.44	10.01	10.73	10.05	6.23	8.86	9.66	9.42	6.93
(La/Yb) _N	24.79	26.66	20.55	22.34	22.68	27.74	13.65	13.31	11.25	0.70	9.83	10.84	10.65	7.02
δEu	0.61	0.51	0.32	0.68	0.61	0.62	0.49	0.57	0.51	0.67	0.60	0.55	0.61	0.50

8.15%~9.14%, K₂O/Na₂O 比值为 1.29~1.71, 岩石里特曼指数为 2.16~3.00, 属于高钾钙碱性系列岩石, 铝饱和指数 A/CNK 值为 1.05~1.11, 略

低于忠宝岩体样品, 亦表现出过铝质 S 型花岗岩特征. 样品同样具有较低的稀土元素总量 (ΣREE = 62.3×10⁻⁶~148.3×10⁻⁶), LREE/HREE 比值

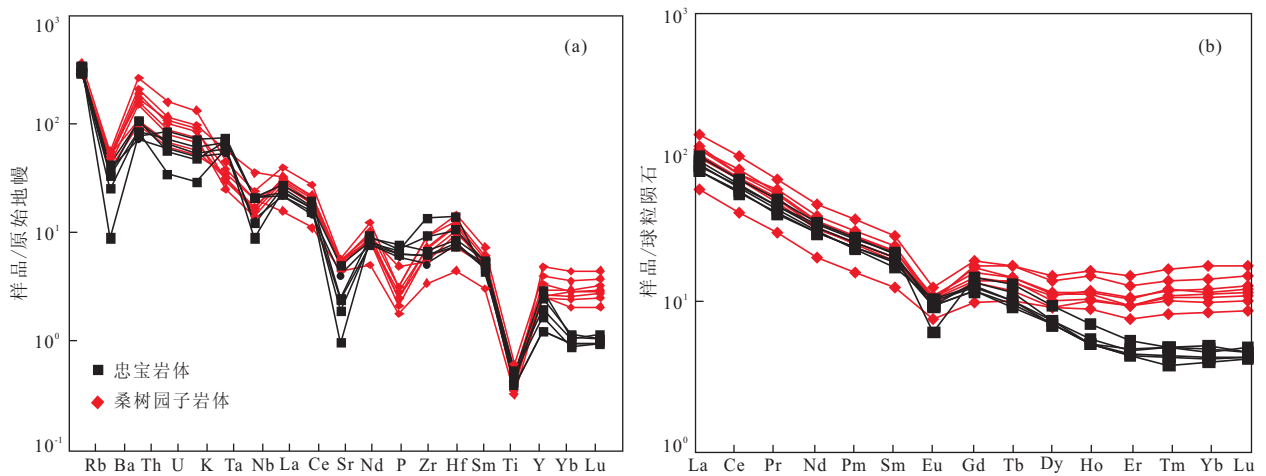


图3 微量元素原始地幔标准化(a)及稀土元素球粒陨石标准化图解(b)

Fig. 3 Primitive mantle-normalized trace element (a) and chondrite-normalized REE diagram (b)

为 6.93~10.73, $(La/Yb)_N$ 值为 7.02~13.65, 轻重稀土分馏作用较忠宝岩体相对较弱, 重稀土含量略高于忠宝岩体(图 3b). 具有中等的负 Eu 异常 ($\delta Eu=0.49\sim0.67$). 在原始地幔标准化微量元素蛛网图中, 样品富集 K、Rb、Th、U 等 LILE 元素, 亏损 Ta、Nb、Ti 等 HFSE 元素, 同样具有壳源花岗岩的特点.

3.2 锆石 U-Pb 年龄

忠宝岩体锆石呈长柱状、无色透明至浅黄色自形晶, 部分可见核部继承锆石. 阴极发光图像显示大部分锆石震荡环带清晰, 具典型的岩浆锆石特征, 少量锆石环带不明显, 颜色较深, 并具有较高的 Th、U 含量. 锆石 Th/U 比值大部分大于 0.4 (个别继承锆石点除外). LA-ICP-MS 数据见表 2. 所得年龄数据可分为多个阶段, 获得的最老核部继承锆石 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄为 2571 Ma, 该年龄值老于中天山地区已有的锆石年龄及 Nd 模式年龄值, 暗示中天山可能存在残留的太古代地壳物质. 此外 1771~2209 Ma 及 750~855 Ma 的核部锆石年龄表明源区物质中存在早元古代及新元古代地壳物质. 少量锆石点年龄在 400 Ma 左右, 该类锆石岩浆环带不明显, 具有重熔锆石特征(吴元保和郑永飞, 2004), 可能反映了南天山洋早泥盆世陆缘弧岩浆活动在源区中的记录(杨天南和王小平, 2006). 震荡环带较为清晰的锆石边部年龄为 283~303 Ma(图 4), 计算其加权平均年龄为 296 ± 4 Ma(图 5a, 前寒武纪年龄点未在图中表示), 表明花岗岩的形成年龄为晚石炭世一早二叠世.

桑树园子岩体锆石多数为浅褐色, 次为无色, 透

明度较高, 颗粒以长柱状和短柱状为主, 阴极发光图像可见特征的岩浆锆石环带. 所测锆石 Th/U 比值在 0.55~1.02 之间(14 号、17 号点除外), 均大于 0.4, 显示其为岩浆锆石成因. LA-ICP-MS 数据见表 2, 一个核部锆石 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄为 1077 Ma, 同样显示中天山存在残留的前寒武纪地壳物质. 410 Ma 年龄数据与忠宝岩体获得的晚志留世一早泥盆世继承锆石年龄类似, 可能反映了该时期的岩浆活动在源区中的记录. 388 Ma、310 Ma、254 Ma 年龄数据谐和度较差, 可能为混合年龄而无地质意义. 12 个震荡环带较为清晰的锆石边部年龄在 282~299 Ma 之间(图 4), 计算锆石加权平均年龄为 293 ± 3 Ma(图 5b), 属晚石炭世一早二叠世, 代表岩浆的侵入年龄.

3.3 Sr-Nd-Pb 同位素测试结果

全岩样品 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素组成分析结果见表 3. 以 296 Ma 年龄值计算, 忠宝岩体的 $^{87}Sr/^{86}Sr(i)$ 值介于 0.7076~0.7088 之间, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值为 -6.3~-7.1, 另 $^{87}Rb/^{86}Sr$ - $^{87}Sr/^{86}Sr$ 等时线获得 $^{87}Sr/^{86}Sr(i)$ 值为 0.70918, 等时线年龄为 289 ± 2.8 Ma, 与锆石年龄较为一致. Nd 亏损地幔单阶段模式年龄值 (T_{DM}) 在 1.495~1.81 Ga 范围内. 以 293 Ma 年龄值计算, 桑树园子岩体 $^{87}Sr/^{86}Sr(i)$ 值介于 0.7065~0.7077 之间, Nd 亏损地幔单阶段模式年龄值集中于 1.509~1.561 Ga, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值在 -4.7~-5.1 之间. 岩体上述特征值均反映了壳源花岗岩的特点, 而忠宝岩体 T_{DM} 值及岩体中存在古老碎屑锆石则表明花岗岩源区存在前寒武纪基底物质.

表 2 忠宝和桑树园子岩体锆石 U-Pb LA-ICP-MS 测试结果
Table 2 Zircon LA-ICP-MS U-Pb data of Zhongbao and Shangshuyuanzi granites

岩体	测试点	Th(10 ⁻⁶)	U(10 ⁻⁶)	Th/U	U-Th-Pb 同位素比值										年龄 (Ma)		
					²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ	
忠宝	Al-01	90	219	0.41	0.383 9	0.023 6	0.045 8	0.000 8	0.013 9	0.000 7	330	9	291	5	288	6	
	Al-02	89	128	0.57	0.340 8	0.010 4	0.048 1	0.000 5	0.018 2	0.000 8	297	8	303	3	321	16	
	Al-03	104	230	0.45	0.348 7	0.012 6	0.046 4	0.000 5	0.015 1	0.000 5	303	9	293	3	302	6	
	Al-04	187	328	0.57	0.340 8	0.010 4	0.048 1	0.000 5	0.018 2	0.000 8	296	8	299	5	305	6	
	Al-05	72	75	0.96	0.454 2	0.029 3	0.060 9	0.001 0	0.019 6	0.000 6	380	6	381	6	393	9	
	Al-06	247	492	0.50	0.471 4	0.037 7	0.066 1	0.000 7	0.018 5	0.000 4	391	9	397	4	371	6	
	Al-07	104	230	0.45	0.348 7	0.012 6	0.046 4	0.000 5	0.015 1	0.000 5	303	9	297	3	299	6	
	Al-08	128	140	0.91	2.079 8	0.046 0	0.194 4	0.001 2	0.374 4	0.058 3	1 142	15	1 144	8	1 146	22	
	Al-09	163	330	0.49	1.316 1	0.041 5	0.142 3	0.002 7	0.042 6	0.001 4	853	18	855	15	843	26	
	Al-10	129	201	0.64	0.363 8	0.011 8	0.052 6	0.000 7	0.018 0	0.000 6	315	9	302	4	313	8	
	Al-11	106	148	0.72	4.897 6	0.092 5	0.316 1	0.002 3	0.394 2	0.090 4	1 801	16	1 771	11	1 750	15	
	Al-12	244	428	0.57	0.340 8	0.010 4	0.048 1	0.000 5	0.018 2	0.000 8	298	8	301	3	311	6	
	Al-13	95	191	0.50	1.044 4	0.058 1	0.123 4	0.002 5	0.038 2	0.001 5	726	29	750	14	758	19	
	Al-14	91	226	0.40	0.484 6	0.016 3	0.064 3	0.000 6	0.018 5	0.000 4	401	8	401	4	404	9	
	Al-15	188	250	0.75	1.219 3	0.044 2	0.132 3	0.001 8	0.039 6	0.001 3	809	20	801	10	786	15	
	Al-16	83	185	0.45	0.362 6	0.019 8	0.044 9	0.000 7	0.014 0	0.000 4	314	8	283	7	281	9	
	Al-17	94	276	0.34	14.867 2	0.257 2	0.490 1	0.005 5	0.652 3	0.145 9	2 806	16	2 571	23	2 753	21	
	Al-18	91	193	0.47	0.349 2	0.013 1	0.047 5	0.000 5	0.014 9	0.000 5	298	7	295	5	299	6	
	Al-19	91	165	0.55	8.773 2	0.163 5	0.408 9	0.003 1	0.118 2	0.002 4	2 314	16	2 209	13	2 259	24	
	Al-20	93	209	0.44	0.348 7	0.012 6	0.046 4	0.000 5	0.015 1	0.000 5	302	9	292	3	303	8	
Al-21	112	208	0.54	0.363 8	0.011 8	0.052 6	0.000 7	0.018 0	0.000 6	315	9	330	4	360	12		
桑树园子	SSY-1	100	134	0.75	0.338 5	0.012 5	0.047 1	0.000 7	0.014 1	0.000 4	296	9	297	4	283	9	
	SSY-2	81	112	0.72	0.373 7	0.018 9	0.046 6	0.000 6	0.016 1	0.000 6	322	14	293	4	323	12	
	SSY-3	108	137	0.79	0.323 3	0.010 4	0.046 6	0.000 6	0.013 6	0.000 4	284	8	293	4	274	8	
	SSY-4	640	820	0.78	0.347 3	0.012 4	0.047 1	0.000 5	0.014 5	0.000 4	303	9	297	3	292	8	
	SSY-5	260	278	0.94	0.364 0	0.011 5	0.046 8	0.000 6	0.014 5	0.000 4	315	7	295	4	291	8	
	SSY-6	110	146	0.75	0.453 2	0.019 3	0.049 3	0.000 5	0.017 1	0.000 6	380	14	310	3	343	12	
	SSY-7	724	927	0.78	0.318 8	0.012 3	0.046 8	0.000 6	0.013 6	0.000 4	281	9	295	4	272	8	
	SSY-8	120	117	1.03	0.295 7	0.010 7	0.046 7	0.000 5	0.013 7	0.000 5	263	8	294	3	274	9	
	SSY-9	63	93	0.68	0.322 6	0.012 8	0.047 0	0.000 6	0.014 6	0.000 4	284	10	296	4	294	9	
	SSY-10	108	151	0.72	0.339 2	0.012 8	0.046 8	0.000 6	0.015 4	0.000 4	297	9	295	4	309	8	
	SSY-11	87	119	0.73	0.313 8	0.011 4	0.044 7	0.000 5	0.014 4	0.000 4	277	9	282	3	289	8	
	SSY-12	256	277	0.92	0.519 1	0.023 5	0.065 7	0.000 9	0.020 5	0.000 7	425	16	410	6	410	13	
	SSY-13	106	124	0.85	0.336 0	0.011 5	0.041 5	0.000 5	0.013 3	0.000 4	294	9	285	3	288	8	
	SSY-14	57	149	0.38	2.188 7	0.102 8	0.181 8	0.005 1	0.078 0	0.003 6	1 177	33	1 077	28	1 519	68	
	SSY-15	294	537	0.55	0.337 3	0.015 6	0.047 5	0.000 6	0.014 6	0.000 6	295	12	299	4	293	12	
	SSY-16	140	139	1.01	0.377 3	0.012 0	0.040 2	0.000 9	0.012 8	0.000 4	325	9	254	5	256	8	
	SSY-17	73	327	0.22	0.425 1	0.019 0	0.062 0	0.000 9	0.021 5	0.001 1	360	14	388	6	431	22	
	SSY-18	115	188	0.61	0.505 5	0.027 1	0.072 2	0.001 2	0.020 1	0.000 8	415	18	449	7	402	16	

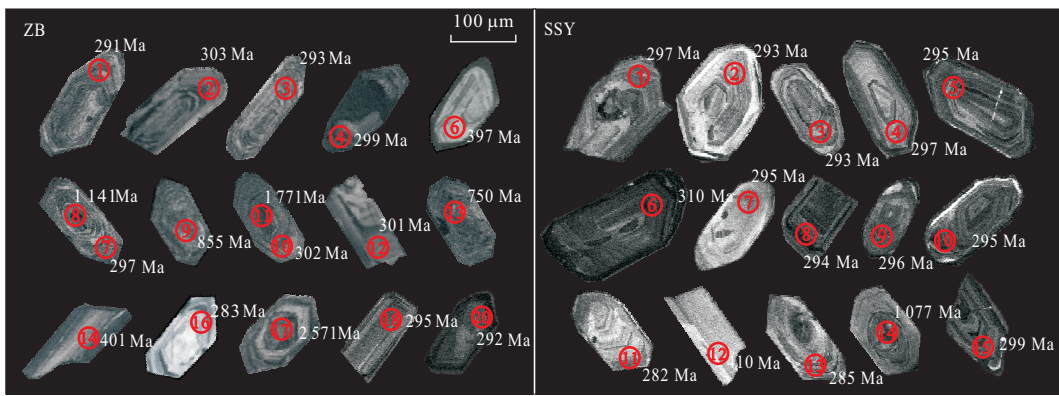


图 4 忠宝、桑树园子岩体锆石阴极发光图像

Fig. 4 CL image of zircons from Zhongbao and Shangshuyuanzi granites

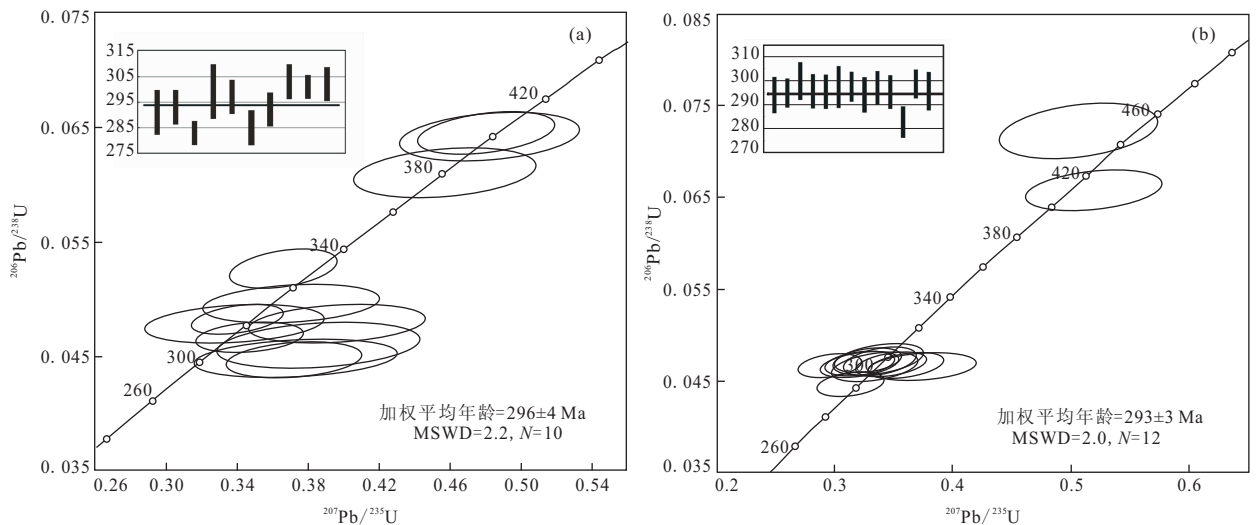


图 5 忠宝(a)、桑树园子(b)岩体锆石 U-Pb 年龄谐和曲线

Fig. 5 Concordia diagram of U-Pb data for zircons of Zhongbao (a) and Shangshuyuanzi (b) granites

表 3 忠宝、桑树园子岩体 Sr-Nd 同位素测试结果

Table 3 Sr-Nd isotope composition of Zhongbao and Shangshuyuanzi granites

样品号	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	I(Sr)	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	I(Nd)	ε _{Nd} (t)	T _{DM} (Ma)
ZB-1	6.525	0.736 289	0.708 8	0.126 1	0.512 159	0.511 916	-6.7	1 723
ZB-2	15.471	0.772 732	0.707 6	0.129 3	0.512 147	0.511 898	-7.1	1 810
ZB-3	7.836	0.741 456	0.708 5	0.111 8	0.512 150	0.511 935	-6.3	1 495
ZB-4	5.678	0.732 198	0.708 3	0.119 8	0.512 136	0.511 905	-6.9	1 646
SSY-1	4.967	0.727 818	0.707 1	0.123 9	0.512 262	0.512 018	-4.7	1 509
SSY-2	4.586	0.726 478	0.707 4	0.125 6	0.512 248	0.512 005	-5.0	1 561
SSY-3	5.436	0.730 355	0.707 7	0.122 3	0.512 235	0.511 994	-5.1	1 527
SSY-4	5.747	0.730 421	0.706 5	0.125 3	0.512 251	0.512 004	-4.9	1 551

T_{DM} 的计算公式如下: $T_{DM} = 1/\lambda \ln[1 + \frac{[(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_s - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{DM}]}{[(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_s - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{DM}]}$; 式中下标 s 和 DM 分别代表现今样品测定值和亏损地幔值; 式中 $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{DM} = 0.213 57$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{DM} = 0.513 215$ (Miller and OpNions, 1985); t 代表样品结晶年龄; $\lambda = 6.54 \times 10^{-12} \text{ a}^{-1}$.

样品 Pb 同位素测试结果及计算后的初始铅同位素比值见表 4. 计算得到忠宝岩体长石 Pb 同位素 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i 比值为 18.017~18.416, ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i

比值为 37.664~38.07, ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i 比值为 15.610~15.633. 桑树园子岩体长石 Pb 同位素 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i 比值为 18.458~19.006, ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i

表 4 忠宝、桑树园子岩体长石 Pb 同位素测试结果

Table 4 Pb isotope compositions of Zhongbao and Shangshuyuanzi granites feldspar

样品名称	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	Pb(10^{-6})	Th(10^{-6})	U(10^{-6})	$(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$	$(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$	$(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$
ZB-1	18.671	15.636	38.504	24.4	9.7	2.0	18.386	15.621	38.072
ZB-2	18.526	15.629	38.497	22.8	12.1	1.6	18.293	15.617	37.924
ZB-3	18.753	15.651	38.399	24.1	8.7	2.4	18.416	15.633	38.008
ZB-4	18.199	15.619	38.232	18.0	9.5	1.0	18.017	15.610	37.664
SSY-1	19.073	15.666	38.680	19.8	8.2	1.7	18.784	15.651	38.231
SSY-2	19.310	15.663	39.150	21.6	12.1	1.9	19.006	15.648	38.534
SSY-3	18.877	15.641	38.975	27.7	19.7	3.0	18.505	15.621	38.200
SSY-4	18.796	15.637	39.071	25.3	18.0	2.5	18.458	15.619	38.297

比值为 38.231~38.534, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$ 比值为 15.619~15.651. 在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 及 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解上(图略), 样品点大部分落于上地壳下方的造山带区域, 略低于上地壳演化线, 铅同位素组成具有混源的特征, 暗示岩体源区并非单一的上地壳变沉积岩组分. 由于源区无幔源物质的加入, 推测可能混有变火成岩或杂砂岩组分, 导致岩体样品铅同位素组成较上地壳略有降低.

4 讨论

4.1 花岗岩类型及源区组成

岩石地球化学特征显示忠宝岩体和桑树园子岩体具有高 SiO_2 (72.51%~74.84%, 70.68%~74.14%), $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$, 铝饱和 ($A/\text{CNK} = 1.11 \sim 1.48, 1.05 \sim 1.11$), 可见原生白云母矿物等特征, 样品具中等负 Eu 异常, 微量元素原始地幔标准化曲线清晰地显示 K、Rb、U、Th 正异常以及 Ba、Sr、Ti 和 Nb 的负异常. 此外本地区未发现同时期中基性侵入岩活动及对应的火山岩产出, 花岗岩形成过程中没有可察觉的地幔物质的加入. 上述特征显示忠宝岩体及桑树园子岩体为起源于沉积源岩的过铝质 S 型花岗岩. Sylvester (1998) 依据最新脱水熔融实验的成果, 建议用 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值来判断过铝花岗岩源岩, 泥质岩熔融形成的过铝花岗岩 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值一般小于 0.3%, 砂屑岩熔融生成的过铝花岗岩 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值一般大于 0.3%. 忠宝岩体 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 0.28~0.32 (平均 0.28), 桑树园子岩体 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 0.26~0.34 (平均 0.29), 大部分值均小于 0.3 (个别样品高于 0.3). 根据 Douce and Johnston (1991), Douce and Beard (1995) 在高温高压下脱水熔融实验结果, 忠宝及桑树园子岩体样品点大部分落于变泥质岩或变泥质岩与变杂砂岩

的重合位置, 极少部分样品落入变杂砂岩的区域(图 6). 在 Sylvester (1998) 的 Rb/Sr-Rb/Ba 图解中(图 7), 忠宝岩体样品主要落入泥质岩源区区域(ZB-6 号样品除外), 而桑树园子岩体样品更多的落于泥质岩与砂屑岩的交界线附近. 上述图解显示两岩体源岩成分以变泥质岩为主, 并可能不同程度地混有杂砂岩组分.

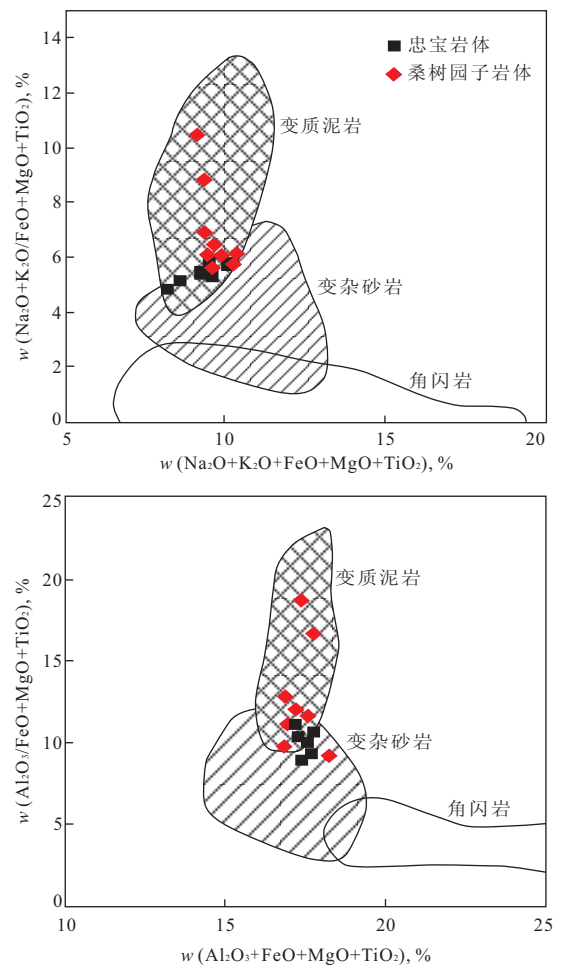


图 6 岩体氧化物源区判定图解(据 Patino Douce, 1999)

Fig. 6 Oxide discrimination diagrams of granite source

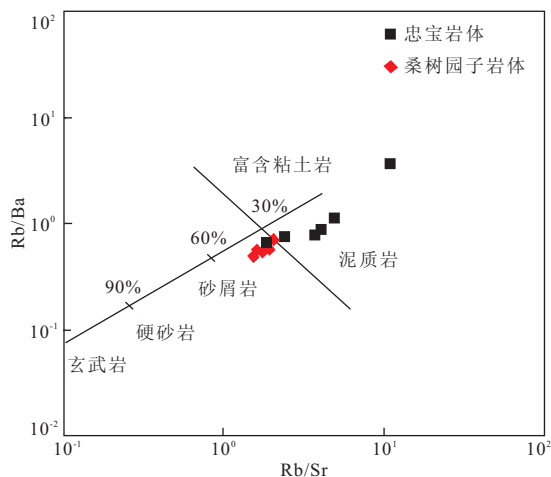


图 7 岩体 Rb/Sr-Rb/Ba 源区判定图解(据 Sylvester, 1998)
Fig. 7 Rb/Sr-Rb/Ba discrimination diagrams of granite source

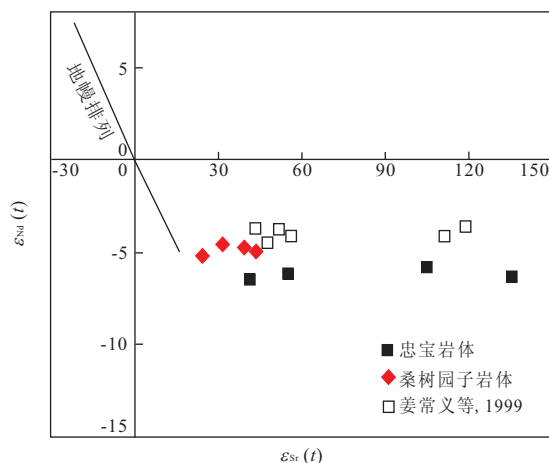


图 8 岩体 $\epsilon_{Nd}(t)-\epsilon_{Sr}(t)$ 图解

Fig. 8 $\epsilon_{Nd}(t)-\epsilon_{Sr}(t)$ diagram of granites

在 $\epsilon_{Nd}(t)-\epsilon_{Sr}(t)$ 图解上(图 8), 样品点近平行地展布于地幔排列线右下方的壳源区, 无指向地幔源区的趋势, 显示岩体源于陆壳物质的深熔作用, 无地幔物质加入. 两岩体 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(i)$ 值同样显示了壳源的特点, 但略低于过铝质花岗岩平均 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(i)$ 值, 如前所述, 这可能是花岗岩沉积岩成熟度相对偏低或混有非泥质成分所致, 而同时获得大量位于不同年龄段的古老继承锆石年龄(0.8~2.5 Ga), 同样表明其源区具有多组分的特点(不排除岩浆在上升过程中混染了围岩物质). 忠宝和桑树园子岩体出露于伊犁—中天山微板块南缘库米什以东地区, 库米什以北干沟一带出露有星星峡群前寒武纪变质岩系, 主要岩性为斜长角闪岩、片麻岩、片岩、混合岩等. 其中混合岩、斜长角闪岩多属正变质岩(胡霏琴等, 1997), 而不适合作为岩体的源岩. 李秋根等(2005)对中天山东段各类黑云母片岩、黑云母石英片岩和片麻岩等变质泥质岩的研究后指出, 星星峡群变质泥质岩沉积于中元古代大陆岛弧体系下的弧后盆地构造背景, 沉积物成熟度偏低, 这一特征符合前述岩体 Sr、Pb 同位素组成的特点, 而库米什地区变沉积岩偏低的稀土元素总量及配分曲线形式与忠宝及桑树园子岩体具有明显的相似性. 在 $\epsilon_{Nd}(t)-t$ 图解上(图 9), 忠宝及桑树园子岩体与东天山基底更具亲缘性, 两岩体 T_{DM} 值同样位于星星群基底岩石的形成年龄之间.

上述分析表明, 忠宝岩体及桑树园子岩体为变沉积岩部分熔融形成的 S 型花岗岩, 库米什地区星星峡群变质泥岩为其主要源岩成分并不同程度地混有杂砂岩组分, 而岩体中获得的新元古代及早古生代碎屑

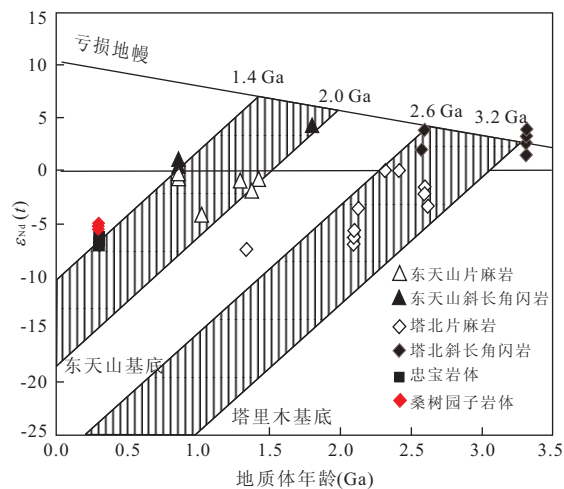


图 9 岩体 $\epsilon_{Nd}(t)-t$ 图解

Fig. 9 $\epsilon_{Nd}(t)-t$ diagram of granites

锆石则应是岩浆上升过程中所捕获围岩所致.

4.2 花岗岩源区温压条件

有关过铝质花岗岩成因问题的认识尚存在一定分歧, 问题的关键是过铝花岗岩是加厚的陆壳底部部分熔融的产物还是中上地壳泥质岩部分熔融的产物(邓晋福等, 1994, 1995; 张宏飞等, 2005; 张旗等, 2006; 高利娥等, 2009, 2011). 花岗岩形成的初始温压条件是制约其形成的环境的重要因素. 锆石饱和温度计算是当前获得岩浆初始温度的主要方法之一. 忠宝及桑树园子岩体锆石中存在古老的继承锆石, 表明花岗岩的源区 Zr 是饱和的, 锆石饱和温度大致可以代表岩浆源区的初始温度(高晓英和郑永飞, 2011). 根据 Watson and Harrison(1983)熔体锆石饱和温度的公式, 计算获得忠宝岩体和桑树园子岩体的起源温度区间分别为 744~818 °C (平均

769 °C)、701~772 °C(平均 746 °C)。

对于花岗岩起源深度及形成压力的判断,除通过实验岩石学正演外,目前可用的方法之一是通过相关微量元素的含量及比值进行间接推断。Sr、Ba 在花岗岩浆体系中受斜长石分离结晶作用的控制,两岩体样品 Sr、Ba 负异常及中等的负 Eu 异常表明岩浆源区发生了斜长石结晶分离作用,因而源区压力应低于斜长石不稳定限(~0.8 GPa)。张旗等(2006)指出岩体贫 Sr 和 Yb 指示其形成于下地壳深度,忠宝岩体具有偏低的 Y、Yb 含量,但这存在两种可能,一种可能是岩浆源区残余相中存在富集上述元素的石榴子石,但是由于石榴子石相出现的压力条件明显高于斜长石的稳定限而予以排除;另外岩浆分异过程中石榴子石的分离结晶也可以造成 HFSE 的分异和亏损,这符合忠宝岩体样品 HREE 发生分异的特点。此外,忠宝岩体具有明显偏低的 Nb/Ta 比值(2.8~5.3),实验表明由于 Nb、Ta 分配系数的差异,源区发生角闪石残留可致使 Nb/Ta 比值偏低(Foley *et al.*, 2002),但这多发生在下地壳部分熔融产生的 I 型花岗岩中,对于含 W 和 Sn 花岗岩,由于 Nb 易与 F 结合形成络合物运移, Nb/Ta 比值偏低可能是 Nb 进入了富 F 流体,并造成高场强元素分异的结果,因而排除源岩为富角闪石的可能。从岩体与基底的 Nd 同位素特征对比来看,若岩体形成于双倍加厚地壳底部,由于南天山洋由南向北俯冲闭合,塔里木板块将叠加与中天山地块之下,此时发生的下地壳部分熔融应与塔里木基底 Nd 同位素特征演化一致,这显然与忠宝及桑树园子岩体 Nd 同位素特征不符(图 9)。Huang and Wyllie (1973)对二云母花岗岩进行的熔融实验显示,该类花岗岩源区深度为 20~40 km,在足够水供给条件下,由泥质岩部分熔融形成。在不同矿物脱水熔融的温度-压力关系图解中,前述限定的温压范围内黑云母的脱水熔融最有可能是忠宝及桑树园子岩体形成的主要机制(图 10)。

综合上述分析认为,忠宝及桑树园子岩体源岩为库米什地区星星峡群黑云母片岩、黑云母石英片岩等含云母类变沉积岩在较浅的地壳部位(低于 0.8 GPa)、一定温度条件下(700~800 °C)由黑云母脱水诱发源区部分熔融作用的产物,由于区域上未见同时期幔源岩浆活动,推测该类花岗岩的热源应为地壳 K、U、Th 放射性蜕变作用提供,而非地幔物质上涌的结果。

4.3 大地构造意义

南天山东段伊犁—中天山地块以南库米什地区

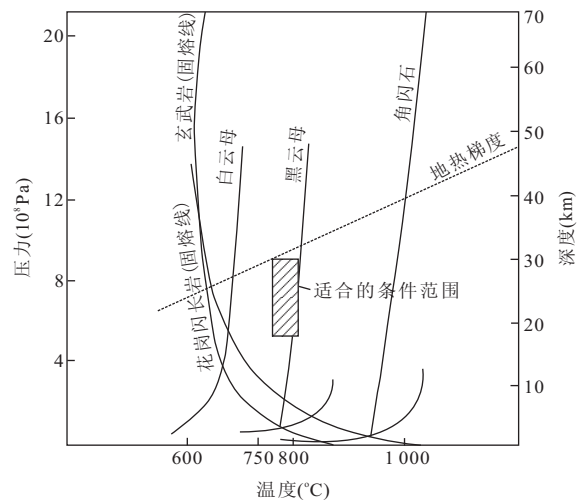


图 10 不同矿物脱水熔融的温度压力关系

Fig. 10 Temperature and pressure relations of mineral dehydration melting

沿 NWW 方向发育有一系列晚古生代花岗岩,呈岩基或岩株状产出,强过铝质二云母二长花岗岩为其主要岩性之一。含白云母过铝质 S 型花岗岩一般形成于碰撞造山的晚阶段(Barbarin, 1999),在 Rb/30-Hf-Ta \times 3 构造环境判别图中,忠宝及桑树园子岩石样品大多落入同碰撞花岗岩和碰撞后花岗岩范围内。在 Batchelor 的花岗岩 R₁-R₂ 构造环境判别图解中,样品多落入同碰撞花岗岩内(图略)。上述构造判别图解结果与前人对含白云母过铝花岗岩的形成环境认识是一致的,即忠宝和桑树园子二云母花岗岩形成于晚石炭世—早二叠世塔里木板块与伊犁—中天山地块同碰撞(晚期)造山环境。研究认为,南天山洋自奥陶纪形成,经历了晚志留世—早泥盆世的洋壳俯冲阶段形成中天山南缘陆缘岩浆弧,至早—中石炭世进入板块碰撞阶段并形成陆缘残余洋盆,前人已有大量报道,本文不再重述(肖序常等,1992;何国琦等,2001;姜常义等,2001;高俊等,2006)。

黄河等(2011)根据西南天山晚石炭世—早二叠世不同类型花岗岩地球化学特征总结了南天山在晚石炭世—早二叠世自板块碰撞地壳增厚—岩石圈底部拆沉—岩石圈减薄软流圈物质上涌的演化模式,与此对应的是 I 型、S 型和 A 型花岗岩的产出。结合姜常义等(1999)及本次研究表明,南天山东部该阶段花岗岩同样具有上述类型组合,由晚石炭世—早二叠世依次为闪长岩—斑状花岗岩—二云母花岗岩—碱长花岗岩,李金阳等(2011)亦报道了南天山东部早二叠世基性岩浆活动,反映了地壳碰撞增厚至后期岩石圈伸展的连续过程。综合前人研究,对南天

山东部库米什地区演化过程推断如下:塔里木板块和伊犁—中天山微板块在晚石炭世发生碰撞,并可能在后期由于地壳加厚发生岩石圈底部的拆沉作用,幔源岩浆上侵导致下地壳物质发生部分熔融形成I型花岗岩。同时,地壳浅部的部分元古代变泥质沉积岩(夹少量杂砂岩)在放射性物质蜕变带来的热源作用下发生部分熔融形成碰撞晚期S型花岗岩(忠宝、桑树园子岩体)。此后拆沉作用导致岩石圈减薄,软流圈上移至地壳底部,形成A型花岗岩及基性岩浆活动,南天山地区自此进入后造山阶段。

4.4 花岗岩与成矿的关系

区域地球化学异常显示,库米什地区钨异常呈串珠状沿中天山地块南缘分布,与花岗岩体套合良好。本地区忠宝、桑树园子南山、库米什镇及其以西的包尔图—和硕一带发现多处与花岗岩有关的矽卡岩型钨矿床(点)。测试获得忠宝岩体钨含量($10.5 \sim 31.1$) $\times 10^{-6}$ (平均 22.0×10^{-6}),桑树园子岩体钨含量($6.12 \sim 10.80$) $\times 10^{-6}$ (平均 8.60×10^{-6}),而岩体围岩下泥盆统阿尔彼什麦布拉克组钨含量平均值为 2.2×10^{-6} (陈超,2010),钨矿化物质来源应主要来自深部岩体。前文已述本地区星星峡群变泥质岩为成矿岩体可能的岩浆源区。关于星星峡群成矿元素丰度的报道目前尚未多见,仅胡霁琴等(2006)指出巴伦台地区星星峡群花岗质片麻岩钨含量高达 94×10^{-6} ,而星星峡地区及巴伦台地区星星峡群普遍具有大于地壳平均丰度的锡含量($2.87 \sim 3.53 \times 10^{-6}$),表明星星峡群可能是富钨锡的“矿源层”。此外,星星峡群自古元古代—晚石炭世多旋回的构造重熔事件(胡霁琴等,2006)为钨的进一步富集提供了条件。忠宝、桑树园子岩体形成于晚石炭世一早二叠世碰撞造山晚期挤压—伸展的转换阶段,富钨的星星峡群变泥质岩发生部分熔融作用形成含钨岩浆或流体。由于挤压阶段一般没有合适的空间提供岩浆或流体的运移通道,所以碰撞初期形成规模矿化的可能性较小。在挤压和伸展的转换阶段,上覆压力减小会促使深部物质的减压重熔或流体的二次沸腾过程,而促使岩浆向浅层次侵位和分异演化,同时会释放大流量流体,矿区较为发育的断裂及褶皱构造则提供成矿所需的空间。因此,早二叠世挤压向伸展的转化阶段是南天山东部钨矿有利的成矿构造体制。富钨的星星峡群经过造山过程的“重熔”作用,成矿元素被进一步再分配而富集成矿。而位于库米什以南的南山锡矿成因则认为与早中二叠世后碰撞伸展环境下碱性花岗岩有关(张子敏等,2001),同属与南

天山板块碰撞有关的成矿事件,显示了该地区良好的钨(锡)成矿条件。

5 结论

(1)南天山东部库米什地区忠宝及桑树园子二云母二长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分别为 296 ± 4 Ma, 293 ± 3 Ma,表明岩体侵位时代为晚石炭—早二叠世。(2)忠宝及桑树园子岩体为库米什地区星星峡群变泥质岩云母类矿物脱水部分熔融的产物,并不同程度混有杂砂岩组分。古老的残余锆石年龄及花岗岩 Nd 模式年龄表明南天山东部可能存在古老基底。(3)花岗岩地球化学及年代学研究支持南天山洋东部在晚石炭世一早二叠世最终闭合这一认识,早一中二叠世南天山东部进入板内伸展环境。(4)富钨的星星峡群是本地区钨矿化可能的矿源层,早二叠世挤压向伸展的转化阶段是南天山东部钨矿有利的成矿构造体制,经历多旋回构造重熔的星星峡群在早二叠世造山过程的再次“重熔”作用致使成矿元素最终富集成矿。

致谢:本文在写作过程中与曹晓峰博士进行了有益的讨论,玛依拉硕士在 Sr-Nd-Pb 同位素测试工作中提供了无私的帮助,匿名审稿人为本文提出了宝贵的修改意见,在此一并表示衷心的感谢。

References

- Arndt, N. T., Goldstein, S. L., 1987. Use and Abuse of Crust-Formation Ages. *Geology*, 15 (10): 893 - 895. doi:10.1130/0091-7613(1987)15<893:UAAOCA>2.0.CO;2
- Barbarin, B., 1999. A Review of the Relationships between Granitoid Types, Their Origins and Their Geodynamic Environments. *Lithos*, 46 (3): 605 - 626. doi:10.1016/S0024-4937(98)00085-1
- Brookfield, M. E., 2000. Geological Development and Phanerozoic Crustal Accretion in the Western Segment of the Southern TienShan (Kyrgyzstan, Uzbekistan and Tajikistan). *Tectonophysics*, 328(1-2): 1-14. doi:10.1016/S0040-1951(00)00175-X
- Chen, C., 2010. Geological Characteristics and Genesis of Zhongbao Tungsten Deposit and Prediction of Its Surrounding Prospecting Objects, Tuokexun, Xinjiang Prov (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Deng, J. F., Zhao, H. L., Lai, S. C., et al., 1994. Generation

- of Muscovite/Two-Mica Granite and Intracontinental Subduction. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 19(2): 139—147 (in Chinese with English abstract).
- Deng, J. F., Zhao, H. L., Mo, X. X., et al., 1995. Intracontinental Subduction of the Yangtze Continent and Continent Reducing-Inferred from Muscovite (Two-Mica) Granites. *Geological Journal of Universities*, 1(1): 50—57 (in Chinese with English abstract).
- Dong, Y. P., Zhou, D. W., Zhang, G. W., et al., 2005. Tectonic Setting of the Wuwamen Ophiolite at the Southern Margin of Middle Tianshan Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 37—44 (in Chinese with English abstract).
- Douce, A. E. P., Beard, J. S., 1995. Dehydration Melting of Biotite Gneiss and Quartz Amphibolite from 3 to 15 Kbar. *J. Petrol.*, 36: 707—738.
- Douce, A. E. P., Johnston, A. D., 1991. Phase Equilibria and Melt Productivity in the Pelitic System: Implications for the Origin of Peraluminous Granoids and Aluminous Granulites. *Cotrib. Mineral. Etrol.*, 107(2): 202—218.
- Foley, S., Tiepolo, M., Vannucci, R., 2002. Growth of Earth Continental Crust Controlled by Melting of Amphibolites in Subduction Zones. *Nature*, 417: 837—840. doi: 10.1038/nature00799
- Gao, J., Long, L. L., Qian, Q., et al., 2006. Southern Tianshan: A Late Paleozoic or a Triassic Orogen? *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1049—1061 (in Chinese with English abstract).
- Gao, J., Klemm, R., Qian, Q., et al., 2011. The Collision between the Yili and Tarim Blocks of the Southwestern Altaids: Geochemical and Age Constraints of a Leucogranite Dike Cross Cutting the HPLT Metamorphic Belt in the Chinese Tianshan Orogen. *Tectonophysics*, 499(1—4): 118—131. doi:10.1016/j.tecto.2011.01.001
- Gao, L. E., Zeng, L. S., Liu, J., et al., 2009. Early Oligocene Na-Rich Peraluminous Leucogranites in the Yardoi Gneiss Dome, Southern Tibet: Formation Mechanism and Tectonic Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9): 2289—2302 (in Chinese with English abstract).
- Gao, L. E., Zeng, L. S., Xie, K. J., 2011. Eocene High-Grade Metamorphism and Crustal Anatexis in North Himalayan Gneiss Domes, Southern Tibet. *Chinese Science Bulletin*, 56(36): 3078—3090 (in Chinese with English abstract).
- Gao, X. Y., Zheng, Y. F., 2011. On the Zr-in-Rutile and Ti-in-Zircon Geothermometers. *Acta Petrologica Sinica*, 27(2): 417—432 (in Chinese with English abstract).
- He, G. Q., Li, M. S., Han, B. F., 2001. Geotectonic Research of South-West Tianshan and Its West Adjacent Area, China. *Xinjiang Geology*, 19(1): 7—11 (in Chinese with English abstract).
- Hu, A. Q., Wang, Z. G., Tu, G. Z., et al., 1997. Geological Evolution and Diagenetic Mineralization Regularity of Northern Xinjiang. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Hu, A. Q., Zhang, G. X., Chen, Y. B., et al., 2006. Isotope Geochronology and Geochemistry for Major Geological Events of Continental Crust Evolution of Xinjiang, China. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Huang, G., Wang, X. L., Zhang, W. F., et al., 2011. Zircon LA-ICP-MS U-Pb Age and Geochemistry of Two-Mica Granite in Kumishi Area in Eastern Part of Southern Tianshan Mountains. *Xinjiang Geology*, 29(3): 263—269 (in Chinese with English abstract).
- Huang, H., Zhang, Z. C., Zhang, D. Y., et al., 2011. Petrogenesis of Late Carboniferous to Early Permian Granitoid Plutons in the Chinese South Tianshan: Implications for Crustal Accretion. *Acta Geologica Sinica*, 85(8): 1305—1333 (in Chinese with English abstract).
- Huang, W. L., Wyllie, P. J., 1973. Muscovite Dehydration and Melting in Deep Crust and Subducted Oceanic Sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 18(1): 133—136. doi: 10.1016/0012-821X(73)90045-9
- Jahn, B. M., Griffin, W. L., Windley, B., 2000. Continental Growth in the Phanerozoic: Evidence from Central Asia. *Tectonophysics*, 328(1—2): 7—10. doi:10.1016/S0040-1951(00)00174-8
- Jiang, C. Y., Mu, Y. M., Bai, K. Y., et al., 1999. Chronology, Petrology, Geochemistry and Tectonic Environment of Granitoids in the Southern Tianshan Mountain, Western China. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 298—308 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, C. Y., Wu, W. K., Li, L. C., et al., 2001. Phanerozoic Tectonic Evolution of South Tianshan Orogenic Belt. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Li, J. Y., Yang, J. S., Xu, X. Z., et al., 2011. Characteristics and Genesis of Ultrabasic and Basic Rocks in the Kuzi Mountain on the Eastern Margin of Southern Tianshan, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 38(4): 890—908 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q. G., Liu, S. W., Han, B. F., et al., 2005. The Constraints of the Source Area and the Role of the Ancient Weathering from the Geochemical Characteristics of Xingxingxia Group Metapelites in East Part of Middle Tianshan. *Science in China (Series D)*, 35(3): 225—234 (in Chinese with English abstract).

- Li, Y. J., Yang, H. J., Zhao, Y., et al., 2009. Tectonic Frame Work and Evolution of South Tianshan, NW China. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(1): 94—104 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. W., Guo, Z. J., Zhang, Z. C., et al., 2004. The Characteristic of East Part of Middle Tianshan Precambrian Metamorphic Blocks: Constraints from Geochronology and Nd Isotopic Geochemistry. *Science in China (Series D)*, 34(5): 395—403 (in Chinese with English abstract).
- Patino Douce, A. E., 1999. What do Experiments Tell Us about the Relative Contributions of Crust and Mantle to the Origin of Granitic Magma? In: Castro, A., Fernandez, C., Vigneresse, T. L., eds., *Understanding Granites: Intergrating New and Classical Techniques*. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.*, 168: 55—75. doi: 10.1007/s00410-009-0465-7
- Sylvester, P. J., 1998. Post-Collisional Strongly Peraluminous Granites. *Lithos*, 45(1-4): 29—44. doi: 10.1016/S0024-4937(98)00024-3
- Watson, E. B., Harrison, T. M., 1983. Zircon Saturation Revisited: Temperature and Composition Effect in Avariety of Crustal Magmas Types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295—304. doi: 10.1016/0012-821X(83)90211-X
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., 2004. The Zircon Minerageny Research and Its Constraints on Interpretation of U-Pb Age. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589—1604 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, W. J., Windley, B. F., Yuan, C., et al., 2009. Paleozoic Multiple Subduction-Accretion Processes of the Southern Altaids. *American Journal of Science*, 309(3): 221—270. doi: 10.2475/03.2009.02
- Xiao, W. J., Huang, B. C., Han, C. M., et al., 2010. A Review of the Western Part of the Altaids; A Key to Understanding the Architecture of Accretionary Orogens. *Gondwana Research*, 18(2-3): 253—273. doi: 10.1016/j.gr.2010.01.007
- Xiao, X. C., Tang, Y. Q., Feng, Y. M., et al., 1992. Tectonic Evolution of Northern Xinjiang and Its Adjacent Regions. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Yang, T. N., Wang, X. P., 2006. Geochronology, Petrochemistry and Tectonic Implications of Early Devonian Pluton in Kumux Area, Xinjiang. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(5): 401—411 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. S., Xu, X. Z., Li, T. F., et al., 2011. U-Pb Ages of Zircon from Ophiolite and Related Rocks in the Kumishi Region at the Southern Margin of Middle Tianshan, Xinjiang: Evidence of Early Paleozoic Oceanic Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 27(1): 77—95 (in Chinese with English abstract).
- Yang, T. N., Li, J. Y., Sun, G. H., et al., 2006. Earlier Devonian Active Continental Arc in Central: Evidence of Geochemical Analyses and Zircon SHRIMP Dating on Mylonitized Granitic Rock. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 41—48 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, H. L., Wu, F. Y., Gao, S., et al., 2003. Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating and Rare Earth Element Component Analysis of Cenozoic Intrusion from North East China. *Chinese Science Bulletin*, 48(14): 1511—1520 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. F., Nigel, H., Randall, P., et al., 2005. Geochemistry of North Himalayan Leucogranites: Regional Comparison, Petrogenesis and Tectonic Implications. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(3): 275—288 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. F., Ai, Y. L., Li, X. P., et al., 2007. Triassic Collision of Western Tianshan Orogenic Belt, China: Evidence from SHRIMP U-Pb Dating of Zircon from HP/HP Eclogitic Rocks. *Lithos*, 96(1-2): 266—280. doi: 10.1016/j.lithos.2006.09.012
- Zhang, Q., Wang, Y., Li, C. D., et al., 2006. Granite Classification on the Basis of Sr and Yb Contents and Its Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2249—2269 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. M., Ma, H. F., Cai, G. Q., 2001. The Main Characteristics of Geological Tectonic Evolution of Kumishi Basin. *Xinjiang Geology*, 19(1): 49—53 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Z. X., Li, J. Y., Dong, L. H., et al., 2008. The Age Determination of Late Carboniferous Intrusions in Mangqisu Region and Its Constraints to the Closure of Oceanic Basin in South Tianshan, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 24(12): 2761—2766 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈超, 2010. 新疆忠宝钨矿地质特征、成因研究及外围预测 (硕士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 邓晋福, 赵海玲, 赖绍聪, 等, 1994. 白云母/二云母花岗岩形成与陆内俯冲作用. *地球科学——中国地质大学学报*, 19(2): 139—147.
- 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等, 1995. 扬子大陆的陆内俯冲与大

- 陆的缩小——由白云母(二云母)花岗岩推导. 高校地质学报, 1(1):50—57.
- 董云鹏,周鼎武,张国伟,等,2005. 中天山南缘乌瓦门蛇绿岩形成构造环境. 岩石学报, 21(1):37—44.
- 高俊,龙灵利,钱青,等,2006. 南天山晚古生代还是三叠纪碰撞造山带? 岩石学报, 22(5):1049—1061.
- 高利娥,曾令森,刘静,等,2009. 藏南也拉香波早渐新世富钠过铝质淡色花岗岩的成因机制及其构造动力学意义. 岩石学报, 25(9):2289—2302.
- 高利娥,曾令森,谢克家,2011. 北喜马拉雅片麻岩穹窿始新世高级变质和深熔作用的厘定. 科学通报, 56(36):3078—3090.
- 高晓英,郑永飞,2011. 金红石 Zr 和锆石 Ti 含量地质温度计. 岩石学报, 27(2):417—432.
- 何国琦,李茂松,韩宝福,等,2001. 中国西南天山及邻区大地构造研究. 新疆地质, 19(1):7—11.
- 胡霭琴,王中刚,涂光炽,等,1997. 新疆北部地质演化及成岩成矿规律. 北京:科学出版社.
- 胡霭琴,张国新,陈义兵,等,2006. 中国新疆地壳演化主要地质事件年代学和地球化学. 北京:地质出版社.
- 黄岗,王新录,张文峰,等,2011. 库米什地区二云母花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及岩石地球化学特征. 新疆地质, 29(3):263—269.
- 黄河,张招崇,张东阳,等,2011. 中国南天山晚石炭世—早二叠世花岗质侵入岩的岩石成因与地壳增生. 地质学报, 85(8):1305—1333.
- 姜常义,穆艳梅,白开寅,等,1999. 南天山花岗岩类的年代学、岩石学、地球化学及其构造环境. 岩石学报, 15(2):298—308.
- 姜常义,吴文奎,李良辰,等,2001. 南天山东段显生宙构造演化. 北京:地质出版社.
- 李金阳,杨经绥,徐向珍,等,2011. 新疆南天山东段库兹山基性超基性岩特征和成因探讨. 中国地质, 38(4):890—908.
- 李秋根,刘树文,韩宝福,等,2005. 中天山东段星星峡群变质泥质岩的地球化学特征及其对物源区和古风化作用的制约. 中国科学(D辑), 35(3):225—234.
- 李曰俊,杨海军,赵岩,等,2009. 南天山区域大地构造与演化. 大地构造与成矿学, 33(1):94—104.
- 刘树文,郭召杰,张志诚,等,2004. 中天山东段前寒武纪变质地块的性质:地质年代学和钐同位素地球化学的约束. 中国科学(D辑), 34(5):395—403.
- 吴元保,郑永飞,2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报, 49(16):1589—1604.
- 肖序常,汤耀庆,冯益民,等,1992. 新疆北部及其邻区大地构造. 北京:北京科学技术出版社.
- 杨经绥,徐向珍,李天福,等,2011. 新疆中天山南缘库米什地区蛇绿岩的锆石 U-Pb 同位素定年:早古生代洋盆的证据. 岩石学报, 27(1):77—95.
- 杨天南,李锦轶,孙桂华,等,2006. 中天山早泥盆世陆弧来自花岗质糜棱岩地球化学及 SHRIMP U-Pb 定年的证据. 岩石学报, 22(1):41—48.
- 杨天南,王小平,2006. 新疆库米什早泥盆世侵入岩时代、地球化学及大地构造意义. 岩石矿物学杂志, 25(5):401—411.
- 袁洪林,吴福元,高山,等,2003. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析. 科学通报, 48(14):1511—1520.
- 张宏飞, Nigel, H., Randall, P., 等,2005. 北喜马拉雅淡色花岗岩地球化学:区域对比、岩石成因及其构造意. 地球科学——中国地质大学学报, 30(3):275—288.
- 张旗,王焰,李承东,等,2006. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义. 岩石学报, 22(9):2249—2269.
- 张子敏,马汉峰,蔡根庆,2001. 南天山独山锡矿床的成矿特征及成矿模式. 新疆地质, 19(1):49—53.
- 朱志新,李锦轶,董连慧,等,2008. 新疆南天山盲起苏晚石炭世侵入岩的确定及对南天山洋盆闭合时限的限定. 岩石学报, 24(12):2761—2766.