

中天山东段澄江期片麻状花岗岩特征和成因 ——以天湖东岩体为例*

张遵忠 顾连兴** 杨浩 吴昌志 王银喜 闵茂中

Zhang ZunZhong, Gu LianXing, Yang Hao, Wu ChangZhi, Wang YinXi and Min MaoZhong

内生金属矿床成矿机制国家重点实验室(南京大学), 南京大学地球科学系, 南京 210093

State Key Laboratory of Mineral Deposit Research, Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2003-04-14 收稿, 2003-11-25 改回。

Zhang ZZ, Gu LX, Yang H, Wu CZ, Wang YX and Min MZ. 2004. Characteristics and genesis of the Chengjiangian gneissic granites in the east section of the Middle Tianshan Mountain areas: Taking the Tianhudong granite as an example. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3):595–608

Abstract Taking the Tianhudong granite as an example, this paper investigates characteristics and genesis of the Chengjiangian gneissic granites in the Middle Tianshan Mountain areas. Studies in petrography, petrochemistry, rare earth elements, trace elements and isotopes indicate that the Tianhudong granite, with a Rb-Sr isochron age of 707.7 ± 4.9 Ma, was formed by essentially in situ transformation of metamorphosed island arc calc-alkaline volcanic-sedimentary rocks. Dynamics and heat might have been derived by delamination of the Tianshan lithosphere which had subducted beneath the Tarim continent. In the course of tectonic conversion from compression to extension at late- or post-orogenic stage, underplating and intraplating induced by delamination triggered dewatering and partial melting of crustal rocks. The resultant melts and fluids ascent and transformed the metamorphic rocks at higher levels into gneissic granites. Ductile shear zones that were formed after peak metamorphism might have provided pathways for upward transport of melts and fluids.

Key words Gneissic granite, Underplating, Intraplating, Ductile shear, Tianhudong, Tianshan Mountains, Xinjiang

摘要 本文以天湖东岩体为例,探讨中天山澄江期片麻状花岗岩的特征及其形成机制。岩相学、岩石化学、稀土元素、微量元素和同位素研究表明,天湖东岩体是岛弧钙碱性火山—沉积岩系经原地改造的产物,其 Rb-Sr 等时线年龄为 707.7 ± 4.9 Ma。花岗岩形成作用的动力、热力来源可能与向塔里木大陆俯冲的天山岩石圈的折沉有关。在造山过程晚期-期后的挤压向拉张转变过程中,折沉导致的底侵和内侵引发了地壳岩石的脱水和熔融,所产生的熔体-流体上升并将较浅层次的变质岩改造为片麻状花岗岩。变质峰期以后形成的韧性剪切带为熔体-流体的运移提供了通道。

关键词 片麻状花岗岩;底侵;内侵;韧性剪切;天湖东;天山;新疆

中图分类号 P588.121

et al., 1975; Miller, 1983; Allègre *et al.*, 1984; Sandiford *et al.*, 1991; Oyinloye, 1998; Jung *et al.*, 1999)。与区域变质岩的野外地质关系表明,相当一部分片麻状花岗岩是由变质岩原岩改造而成。以往曾把这类产在变质岩地区的片麻状

1 引言

片麻状花岗岩广泛分布于世界各地的古老造山带(胡受奚等,1988; Burrett, 1972; Chappell and White, 1974; Bickle

* 本文为国家重点基础研究发展规划项目(编号:2001CB409802)成果。

第一作者简介:张遵忠,1968年8月生,博士研究生,矿床学专业, E-mail: njuzzz@sohu.com

** 通讯作者:顾连兴,1944年9月生,教授,博士生导师, E-mail: lxgu@nju.edu.cn

花岗岩笼统地归属同造山花岗岩 (Marmo, 1971), 并认为是造山挤压环境下的产物 (England and Thompson, 1984, 1986; Patiño Dounce et al., 1990)。

1986~1990 年间顾连兴和杨浩等在胡受奚教授的指导下, 对天湖东岩体作了大量野外和室内工作, 并作为杨浩博士论文一部分对成果作了初步总结。2001 年和 2002 年, 顾连兴教授和张遵忠等对此岩体作了野外和室内补充工作, 在此基础上, 作者等撰写此文, 旨在探讨这类片麻状花岗岩的特征、成因和形成地质环境。

2 地质背景

天山东部在沙泉子断裂和红柳河断裂之间的狭长变质带(即所谓中天山), 前人称为中天山结晶轴(中国科学院地质研究所, 1959)或中天山结晶带(胡冰等, 1964)。近年来众多学者的研究对中天山提出了不同见解。Sun Shu 等人(1991)将之称为那拉提-星星峡前弧, 认为该带是从西伯利亚克拉通中撕裂出的碎片, 胡受奚等(1990)则视之为塔里木古陆北缘加里东造山带中的前寒武系中间地块。沿此带分

布的片岩、片麻岩、大理岩和石英岩等绿片岩相至角闪岩相岩石, 分属中元古界星星峡群、卡瓦布拉克群和晚元古界天湖群, 分别与华北地台的长城群、蓟县群和青白口群或华南的四堡群、板溪群和莲沱组相当(高振家等, 1985; 罗发祚, 1989; 顾连兴等, 1990; 胡嵩琴, 2001)。胡嵩琴(2001)的研究表明, 这套变质岩的原岩属于岛弧钙碱性火山-沉积岩系。

中天山变质岩系中有大量片麻状花岗岩顺层展布(图 1)。片麻状花岗岩可以分为两类: 第一类以平顶山和星星峡山两个岩体为代表, 岩石中含有眼球状钾长石巨斑晶(可达 5~7 cm), 其时代已被定作雪峰期(顾连兴等, 1990); 第二类岩体长石斑晶较小 (< 2 cm), 在中天山更广泛地分布。这些片麻状花岗岩, 以往曾被笼统地称为同造山花岗岩, 并被视为造山过程挤压环境的产物 (Marmo, 1971)。近年来, 对这些花岗岩的研究虽有深化(新疆区调队, 1985; 顾连兴, 1990; 陈岳龙和王中刚, 1993; 陈岳龙, 1999), 但迄今为止, 其特征和成因尚未充分阐明。本文将以天湖东岩体为实例, 在研究其特征的基础上探讨中天山第二类片麻状花岗岩的成因和成岩地质环境。

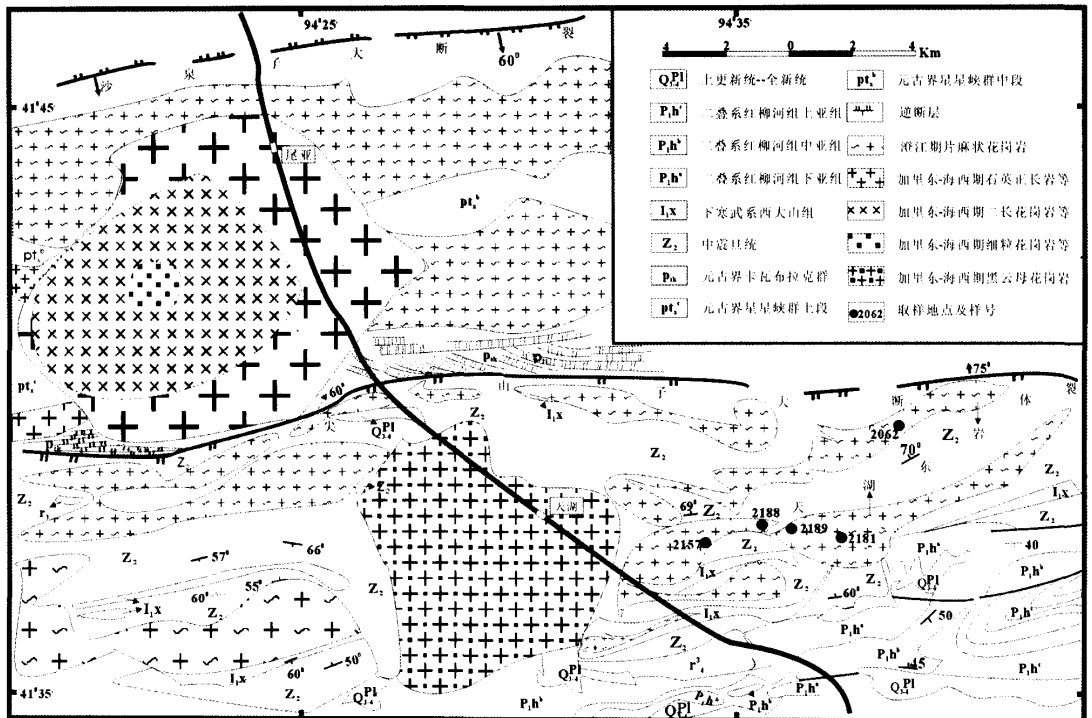


图 1 中天山天湖-尾亚一带花岗岩类分布图 (据新疆地矿局区域地质测量大队 1966 资料修改)

Fig. 1 Distribution of the granitoids in the Tianhu-Weiya area of the Middle Tianshan Mountains.

3 岩体地质特征

中天山天湖-尾亚一带(图1)片麻状花岗岩均顺层侵入,其中以天湖车站东约5 km处(94°34'N, 41°38'E)的天湖东岩体为典型。该岩体形态呈长条状,单个岩体宽多为几十米至几百米,延长可达几公里乃至二、三十公里。地质图(图1)上所标示的岩体实际上均为被斜长角闪岩、变粒岩、片麻岩、混合片麻岩和混合岩所分隔的岩体群。岩体与硅铝质围岩之间多为渐变关系,而与斜长角闪岩等镁铁质围岩之间则常有清晰的界线。岩体片麻理清晰,岩性变化也较大,并普遍可见原岩残留体和残影体。有时可见钾长石变斑晶。这些特征表明,天湖东岩体是由变质岩经原地改造而成的花岗岩。

4 岩石学、矿物学特征

天湖东岩体岩性主要为二长花岗岩。岩石一般为中粒等粒结构,局部存在钾长石斑晶。暗色矿物以黑云母为主,局部含一定数量角闪石。它们与中天山雪峰期片麻状-眼球状花岗岩的区别是,其片麻理仅由黑云母等暗色矿物的定向排列所显示,长英质矿物的定向排列并不显著;同时其钾长石斑晶的粒径通常小于2 cm,不像在雪峰期岩体中那样通常为3~5 cm,大者可达20 cm。岩体中主要造岩矿物的特征如下:

石英 含量20%~35%,多呈他形粒状,粒径1~3 mm,沿长石粒间分布,常具亚颗粒(Best, 1982)和波状消光。部分颗粒由边界呈锯齿状的小颗粒镶嵌而成,明显地显示出同构造变形和重结晶特征(Spry, 1969; 胡玲等,1998)。

钾长石 含量10%~30%,多为粒径3~5 mm的半自形晶,斑晶钾长石粒径可超过1 cm,有些斑晶本身变形并不显著,而其内可包裹有强烈变形的细粒石英和云母等矿物,表明这些斑晶是由构造后变晶生长形成的变斑晶。部分变斑晶两端圆化而呈似眼球状,并与岩石片麻理同向排列,表明其生长受原岩片麻理所控制。显微镜下格子双晶发育,蠕英结构亦常见。蠕英结构可能是在构造应力作用下钾长石摩尔体积缩小,其中SiO₂出溶的产物(何绍勋等,1996)。

天湖东岩体四个钾长石样品的X-射线衍射分析表明,其三斜度、有序度和t1位置的占位率分别为 $\Delta > 0.85$, $\delta > 0.74$, $t1(0) > 0.90$ (表1),表明它们均为最大微斜长石。X-射线衍射(表1)和电子探针(表2)分析表明,天湖东岩体的钾长石中Ab含量均低于15%。这些特征与华南改造型花岗岩的钾长石特征(徐克勤等,1984)相一致。

斜长石 含量30%~40%,粒径多2~4 mm。主要为中长石(表2),聚片双晶发育,并受不同程度钾长石化和绢云母化。部分斜长石表面洁净,低角突起,测得其An为2~6,属典型的钠长石。同钾长石一样,有些中长石本身缺乏变形

痕迹,而其内可包有强烈变形的石英颗粒,因而也是原岩中变晶生长的产物。钠长石通常缺乏变形,因而可能是由后期熔体结晶或流体交代而形成。

表1 钾长石结构状态X-射线衍射分析结果

Table 1 X-ray diffraction analyses for structural patterns of potassium feldspars

样号	Δ	δ	t1(0)	Ab(%)
2062	0.89	0.79	0.93	0.00
2181	0.88	0.91	0.94	11.60
2184	0.94	0.96	0.97	4.20
2188	0.91	0.96	0.94	4.20

注:由南京大学地球科学系中心实验室测定

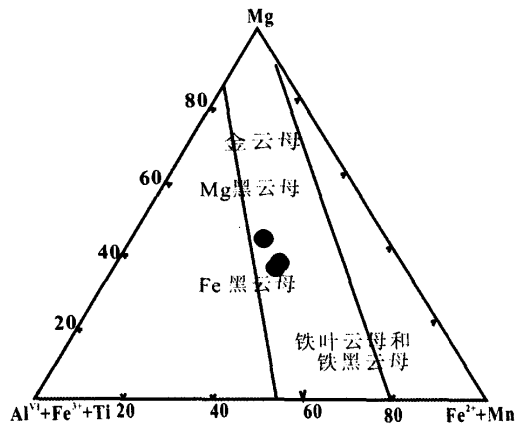


图2 天湖东岩体黑云母 $Mg^{2+} - (Fe^{3+} + Al^{3+} + Ti^{4+}) - (Fe^{2+} + Mn^{2+})$ 图解(仿徐克勤,1984)

Fig.2 Plots of biotite in the $Mg^{2+} - (Fe^{3+} + Al^{3+} + Ti^{4+}) - (Fe^{2+} + Mn^{2+})$ diagram for the Tianhudong granite

黑云母 含量1%~7%,常定向排列并呈团斑状分布,并受不同程度的绿泥石化。波状消光和膝折构造常见,部分颗粒具“云母鱼”构造。电子探针分析(表2)表明,天湖东岩体黑云母的镁含量较高,MF为0.49~0.59,远大于华南改造型花岗岩的上限0.38(徐克勤,1984)。在 $Mg^{2+} - (Fe^{3+} + Al^{3+} + Ti^{4+}) - (Fe^{2+} + Mn^{2+})$ 图解(图2)中落入铁-镁质黑云母区,这与东秦岭地区加里东改造型花岗岩的特征(胡受奚等,1988)相一致。黑云母 $FeO^*(Total)/MgO$ 值为1.48~2.21,这与 Abdel等(1994)报导的钙碱性岩浆岩中 $FeO^*(Total)/MgO$ 平均值1.76相一致。黑云母单位晶胞中Ti为0.13~0.48, Al^{VI} 为0.69~1.23,分别平均为0.26, 0.91(表2),表明天湖东岩体原岩变质温度500~650°C,变质程度为绿片岩相到低-中角闪岩相(Schreurs *et al.*, 1985),与野外所见事实相符。

表2 天湖东岩体矿物电子探针分析结果

Table 2 Electron microprobe analyses of minerals for the Tianhudong gneissic granite

样品	矿物	氧化物(wt.%)										Total	矿物组成(%)			Al ^{VI}	Ti	MF
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O		Or	An	Ab			
2157	钾长石	64.09	n. d.	18.66	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	16.19	98.94	100					
	斜长石	58.41	n. d.	26.33	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	8.26	6.21	0.14	99.35	0.53	42.13	57.34			
	斜长石	57.76	n. d.	26.70	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	9.09	6.11	0.18	99.84	1.12	44.50	54.38			
2062	白云母	44.75	n. d.	34.79	2.49	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	11.16	93.19						
2188	白云母	46.78	n. d.	33.47	3.32	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	11.42	94.99						
	钾长石	64.62	n. d.	18.98	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	15.45	99.05	100					
	黑云母	37.33	1.7	21.52	17.49	3.59	n. d.	14.00	n. d.	n. d.	2.14	97.75				1.23	0.19	0.59
	黑云母	36.28	4.1	16.65	16.88	3.74	n. d.	9.15	2.9	n. d.	7.33	97.06				0.69	0.48	0.49
	黑云母	38.69	1.2	17.69	18.43	2.44	n. d.	10.25	n. d.	n. d.	7.38	96.03				1.22	0.13	0.50

注:样品由南京大学内生金属矿床成矿机制国家重点实验室测定。电子探针仪型号为 JEOL-JXA-8800M 型,定量分析工作条件为加速电压 15KV, 探针电流 10nA, 束斑直径 < 1 μ m, 均采用美国国家标准局矿物标样。白云母中 FeO 表示全铁,黑云母中全铁的计算参照郑巧荣 (1983), n. d. 为未检出

白云母 含量 0~5%, 常分布于长石和石英粒间, 或呈斜长石和黑云母的交代产物。在成分上显著地贫铁富铝 (表 2), 尤其是 TiO₂ 含量均远远低于判别岩浆岩中原生和次生白云母的经验值 0.55% (Anderson, *et al.*, 1981)。因此, 这种白云母主要为变质交代成因。

锆石 色调较深, 透明度较差, 在 Pupin (1980) 的晶形分类中主要为 S6, S7, S8, 部分为 S9, S10, 长、宽比为 2~3, {211} 锥面及 {110} 柱面均较发育。Vavra (1990) 认为, 锆石中微量元素置换 Zr 是引起锥面形态变化的主要因素, Wang and Kienast (1999) 最近研究也指出, 锥面形态主要与不完全类质元素 (U, Th, Y 等) 有关, 而柱面形态主要与 Hf 等完全类质元素有关, Th, U, Y 趋于在 {101} 锥面上 (相对 {211} 面), 而 Hf 则趋于 {110} 柱面上 (相对 {100} 面)。锆石的地球化学表明, S 型花岗岩 (如造山带的浅色花岗岩) 中的锆石总是富 U 的 (Wang, 1989), 在较低温度下形成的锆石相对较高的温度下形成的锆石总具有富 Hf 的特征 (Wang and Kienast, 1999), 因而可以推测 S 型花岗岩在较低温度下, 其 {101} 锥面比 {211} 锥面以及 {110} 柱面比 {100} 柱面更加发育。天湖东岩体锆石类型复杂多样, 主要呈 {211} 锥面, {101} 锥面次之, {110} 柱面较之 {100} 柱面要发育, 这或许表明, 一方面其成岩的复杂性及物质来源多样性, 另一方面其成岩温度并不高, 演化程度低于造山带浅色花岗岩。

天湖东岩体的围岩片麻岩、混合片麻岩和变粒岩具有明显的韧性剪切特征, 长石的碎斑结构、变形双晶, 石英的拉长构造、亚颗粒、动态重结晶以及云母的膝折、云母鱼等常见。进入花岗岩内部后, 这些结构虽然大部分因强烈改造而已消失, 但可在某些长石变斑晶内所包裹的矿物中少量地残留下来。因此, 韧性剪切对于原岩向花岗岩的转变起过重要作用。花岗岩中新生矿物的变形结构, 则表明花岗岩形成之后又受到过构造变形。

5 地球化学特征

与矿物学特征类似, 天湖东这类原地改造型岩体的地球化学特征同样受控于两种机制, 其一是对原岩特征的继承, 其二是花岗岩形成过程中外来熔体-流体的加入。因原岩成分在空间上变化较大, 被改造的强度和外来物质加入的数量也因地而异, 故同一岩体在不同地段岩性有一定变化。作者等在采样时充分考虑了岩性的这种不均匀性, 努力使所采样品对整个岩体具有代表性, 并在此基础上对岩体地球化学特征进行初步研究。

5.1 主量元素地球化学特征

由表 3 可知, 天湖东岩体的 SiO₂ 为 69.51%~74.92%, ALK (Na₂O + K₂O) 为 6.30~8.48%, 铝饱和指数 A/NKC [Al₂O₃ / (Na₂O + K₂O + CaO) 摩尔比值] 为 1.09~1.11, 接近 S-型与 I-型 (Chappell and White, 1974), 或华南同熔型与改造型 (徐克勤等, 1984) 花岗岩的边界值 1.1, 并接近 Wyborn 等 (1981) 所划分的成熟型 S-型花岗岩的数值。在 (Al - Na - K) - Ca - (Mg + Fe²⁺) 三角图解中 (图 3), 投影点集中在黑云母-斜长石-角闪石矿物组合和黑云母-堇青石-斜长石矿物组合边界附近, 表明此岩体比起原岩以火成岩为主的东秦岭加里东 S-型花岗岩 (胡受奚, 1989) 来更富铝而贫钙, 而比起以沉积物为主要原岩的华南 S-型花岗岩 (徐克勤等, 1984) 来更富钙而贫铝, 这些数值特征表明, 天湖东片麻状花岗岩的原岩中火成物质和沉积物都占重要比例, 但其中火成物质含量可能要低于东秦岭改造型花岗岩而高于华南改造型花岗岩。

表3 天湖东岩体主量元素含量(%)及CIPW标准矿物

Table 3 Major element contents (%) and CIPW norms for the Tianhudong gneissic granite

样品	2062	2157	2181	2188	2189
SiO ₂	72.46	74.92	72.83	69.83	69.51
TiO ₂	0.19	0.08	0.13	0.21	0.3
Al ₂ O ₃	13.88	13.41	14.49	15.54	14.74
Fe ₂ O ₃	0.63	0.17	0.34	0.46	1.11
FeO	1.23	0.95	1.4	2.02	2.03
MnO	0.05	0.03	0.04	0.04	0.06
MgO	0.31	0.36	0.46	0.72	1.11
CaO	1.65	1.11	2.15	3.62	2.86
Na ₂ O	3.08	2.96	2.99	3.18	3.02
K ₂ O	3.69	5.52	3.85	3.12	4.52
P ₂ O ₅	0.16	0.10	0.13	0.16	0.11
LOI	1.84	0.63	0.96	1.28	0.93
Total	99.17	100.24	99.77	100.18	100.30
ALK	6.77	8.48	6.84	6.30	7.54
CaO/Na ₂ O	0.54	0.38	0.72	1.14	0.95
A/NKC	1.09	1.11	1.09	1.08	1.10
Q	37.30	33.36	35.20	29.93	26.28
C	2.20	0.75	1.78	0.68	0.00
Or	22.37	32.78	23.05	18.66	26.90
Ab	26.68	25.11	25.57	27.18	25.69
An	7.43	4.94	10.03	17.22	13.35
Di	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24
DiWo	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12
DiEn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06
DiFs	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
HyEn	0.79	0.90	1.16	1.82	2.73
HyFs	1.55	1.53	2.17	3.09	2.38
Mt	0.94	0.25	0.50	0.67	1.62
Il	0.37	0.15	0.25	0.40	0.57
Ap	0.36	0.22	0.29	0.35	0.24
Total	99.99	99.99	100.00	100.00	100.00

注：由南京大学现代分析中心作 XRF 分析。烧失量近似代表挥发份总量。

图(4)是天湖东岩体的哈克图解,显示全岩各氧化物对共同横坐标 SiO₂ 的变异。它总体上呈线性关系,特别是全铁随 SiO₂ 增加而线性降低,呈典型的钙碱性岩系的特征(因早期有磁铁矿析出)。从图 4 中还可以看出,除全碱含量随 SiO₂ 增加外,其它各氧化物都出现不同程度的降低,表明天湖东岩体的原岩在形成过程中可能发生了镁铁质矿物、斜长石、榍石以及磷灰石等矿物的分离结晶,并受到了壳源物质的混染。

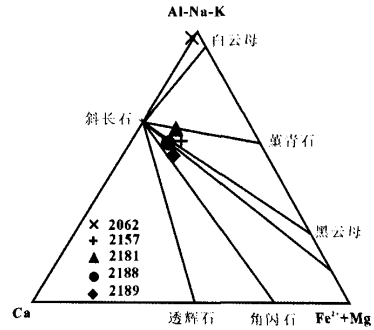


图3 天湖东岩体岩石化学成分 (Al - Na - K) - Ca - (Mg + Fe²⁺)图(仿徐克勤,1984)

Fig.3 Plots of chemical compositions in the (Al - Na - K) - Ca - (Mg + Fe²⁺) diagram for the Tianhudong gneissic granite (After Xu Keqin, 1984)

5.2 微量元素地球化学

天湖东岩体微量元素含量列于表4。为对比起见,还将天湖东岩体、东秦岭以及华南加里东早期花岗岩微量元素含量及若干元素对的比值列于表5。

从表 4 中可以看出,天湖东岩体较华南改造型花岗岩明显地贫 Rb、Cs、Nb、Ta 等亲花岗岩元素而富 Sr 等基性场元素。K/Rb、Rb/Sr 等元素对的比值相似于华南同熔型花岗岩,而比起东秦岭加里东改造型花岗岩来相对地富铷而贫钽。挥发份元素 F/Cl 比值上更相似于华南改造型花岗岩,而与东秦岭花岗岩明显不同。

在微量元素球粒陨石标准化蛛网图(图 5)上可以看出,天湖东岩体的特征是流体活动性元素(fluid-mobile elements, Pearce, 1996) Rb、K、La、Ce、U、Th 等显著富集,而 Ti、Sr、Nb 和 Ba 显著地亏损。流体活动性元素的富集与中天山地区变质原岩主要是岛弧钙碱性火山岩的认识一致,并与这些原岩在形成过程中由俯冲洋壳所释出的水携带流体活动性元素进入其上地幔源区有关(Tatsumi and Eggins, 1995; Winter, 2001)。与之相反,Nb 和 Ti 的强烈亏损是因为这两个元素属于相对的流体不活动元素(fluid-immobile elements),或者在岛弧火山岩浆形成过程中发生了磁铁矿和榍石的分离结晶。榍石的分离结晶还可体现在 Nb/Ta 与 Ta 的负相关关系上(Eby et al., 1998, 见本文表 4)。P 亏损表明起源于适度亏损的地幔,而 Sr 含量亏损表明岛弧岩浆在演化过程中可能经历了斜长石的分离结晶。当然,岛弧岩浆活动过程中陆壳物质的同化混染(该岩体 Nb/U 比值 2.09 ~ 3.31,充分说明岛弧岩浆活动过程中陆壳物质同化混染的存在,Taylor and McLennan, 1985)、岛弧岩系中所夹的沉积岩组分,以及片麻状花岗岩形成过程中深部来源熔体-流体的叠加和淋滤等诸多因素,对于某些元素的富集或亏损也起过一定作用。

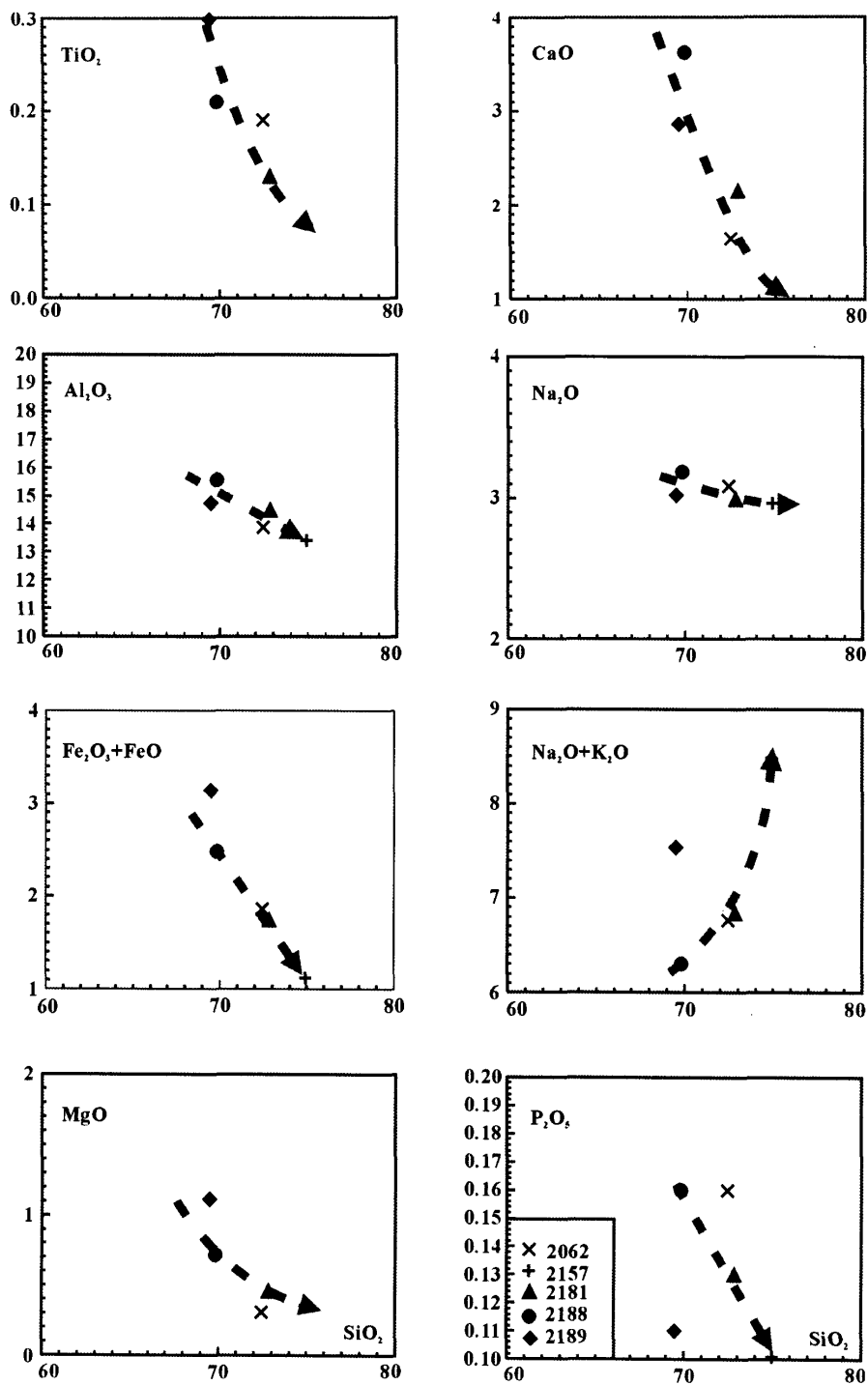


图4 天湖东岩体哈克图解

Fig. 4 Harker diagram for the Tianhudong gneissic granite

表4 天湖东岩体微量元素含量表($\mu\text{g/g}$)Table 4 Trace element contents($\mu\text{g/g}$) for the Tianhudong gneissic granite

样品	2062	2157	2181	2188	2189	平均	SCI	EQ
U	2.70	3.70	3.20	3.40	7.20	4.04		
Rb	128.00	138.00	143.00	96.00	204.00	141.80	152.30	84.52
Th	11.50	20.00	9.00	10.30	13.50	12.86		
Sr	351.00	221.00	452.00	589.00	110.00	344.60	158.80	502.00
Y	12.45	18.56	18.71	12.18	20.63	16.51		
Zr	126.94	109.96	103.32	154.98	101.84	119.41	164.80	
Hf	2.89	2.89	1.87	4.08	2.64	2.87		
Nb	8.95	11.32	6.92	7.2	15.03	9.88	16.10	15.00
Ta	1.06	0.98	0.69	0.43	2.28	1.09	7.20	9.00
Cu	2.00	4.00	4.00	5.00	4.00	3.80	26.34	7.50
Zn	26.00	13.00	20.00	31.00	27.00	23.40	99.76	79.00
Pb	32.00	42.00	33.00	32.00	34.00	34.60	56.13	
V	23.00	7.00	17.00	24.00	13.00	16.80	59.80	39.00
Cr	4.00	3.00	5.00	7.00	4.00	4.60	66.67	79.00
Ni	1.00	5.00	5.00	5.00	5.00	4.20	19.06	7.50
Co	1.00	8.00	9.00	9.00	8.00	7.00	16.62	8.00
Ba	1083.00	828.00	1088.00	1230.00	227.00	891.20	782.00	530.00
Sn	2.00	2.40	0.80	3.00	0.90	1.82	5.16	
W	0.80	0.60	0.30	1.20	0.30	0.64	1.85	
Mo	0.20	0.70	0.90	1.50	1.80	1.02	0.20	
F	660.00	222.00	666.00	526.00	297.00	474.20		320.00
Cl	60.00	21.00	31.00	57.00	8.00	35.40		38.00
Mn	348.00	195.00	345.00	361.00	336.00	317.00		360.00
Ti	1552.00	859.00	1192.00	1951.00	2784.00	1667.60		1893.00
Sc	2.89	2.67	2.77	3.24	1.73	2.66		
Cs	6.00	3.00	5.00	5.00	3.00	4.40	10.90	
K	30619.15	45804.26	31946.81	25889.36	37506.38			
K/Rb	239.21	331.91	223.40	269.68	183.85			
Rb/Sr	0.36	0.62	0.32	0.16	1.85			
F/Cl	11.00	10.57	21.48	9.23	37.13			

注:F, Cl, Cs—湿化学法;其余样品由南京大学现代分析中心作X-射线荧光分析(XRF)。

SCI 华南早加里东改造型花岗岩平均值(刘英俊等,1984); EQ 东秦岭加里东改造型花岗岩平均值(胡受奚等,1988)

表5 天湖东岩体、东秦岭以及华南花岗岩微量元素含量($\mu\text{g/g}$)及元素对比值表Table 5 Trace element contents ($\mu\text{g/g}$) and ratios of granites from the Tianhudong, Esatern Qinling and Southern China

元素	SCI	SC2	EQ	ET	元素对	SCG	SCT	EQ		ET
Rb	152.30	282.00	85.40	141.80	K/Rb	67	240	224	261	249.61
Cs	10.90	15.80	6.80	4.40						
Nb	16.10	19.00	13.00	9.88	Rb/Sr	11.70	0.40	0.18	1.19	0.66
Ta	7.20	12.00	9.00	1.09						
Sr	158.80	98.30	499.00	344.60	F/Cl	> 10	< 10	6.50	0.78	17.88

注:SCI 华南早加里东改造型花岗岩平均值;SC2 华南晚加里东改造型花岗岩平均值;EQ 东秦岭加里东改造型花岗岩平均值;

SCG 华南改造型花岗岩平均值; SCT 华南同熔型花岗岩平均值;ET 天湖东岩体。ET:本文,其它数字引自胡受奚(1989)

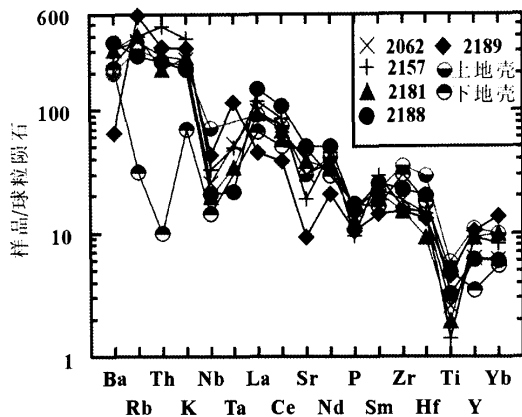


图5 天湖东岩体微量元素球粒陨石、上地壳和下地壳标准化曲线

球粒陨石值取自 Thompson (1982), 上地壳平均值取自 Taylor (1981), 下部地壳平均值取自 Weaver 等(1984)

Fig. 5 Chondrite-normalized patterns of trace element for the Tianhudong granite

为对比研究, 图5中也标出了上地壳 (Taylor *et al.*, 1981) 和下地壳 (Weaver *et al.*, 1984) 微量元素平均含量对于球粒陨石的标准化曲线。从图中可以看出, 天湖东岩体微量元素蛛网图与下部地壳显著有别而与上地壳相近。这也与钙碱性火山岩系的地球化学特征 (Wilson, 1989) 相一致。

5.3 稀土元素地球化学

由表6和图6可知, 天湖东岩体稀土总量为 147.22 ~ 387.71 ppm, 轻/重稀土比值为 5.02 ~ 19.32; La_N/Yb_N 、 La_N/Sm_N 、 Gd_N/Yb_N 分别为 3.28 ~ 25.11, 3.17 ~ 5.91, 0.73 ~ 2.08; δEu 为 0.39 ~ 1.13, 平均 0.64, 其球粒陨石标准化后的配分曲线均右倾, 表现出轻稀土富集, 轻、重稀土较强烈分馏, Eu 适度亏损的特征。稀土元素的这些特征与东秦岭加里东改造型花岗岩 (胡受奚等, 1988) 和国内外许多钙碱性火山-侵入岩 (Cullers and Graf, 1984; Gu Lianxing *et al.*, 1999) 相类, 而不同于华南改造型花岗岩燕翼式配分曲线和强烈铈亏损的特征 (图6)。天湖东岩体的稀土元素可能主要继承了其原岩钙碱性火山岩 (胡霁琴等, 2001) 的特征。但是, 如图(7)所示, 随着 Rb/Sr 比值的增加 (图7-A, B, E) 和 K/Rb 比值的降低 (图7-C, D, F), LREE 含量降低, HREE 含量升高, LREE/HREE 比值降低。同样, 随着 Rb/Sr 比值的升高和 K/Rb 比值的降低铈亏损显著加强 (图7-G, H)。这些趋势可能取决于两种因素。首先, 原岩钙碱性火山岩在岩浆演化过程中可能发生独居石、褐帘石、榍石和磷灰石等相对富含 LREE 的矿物 (Miller *et al.*, 1982; Henderson, 1984) 以及斜长石的分离结晶作用, 这与主量元素地球化学特征得出的结论相一致。其次, 可能是因为来自深部的最低温熔体和流

体对原岩的改造作用。理论和实验研究表明, 最低温熔体往往以贫钙和较低的 ΣREE 、LREE 和 LREE/HREE 比值为特征 (Webb *et al.*, 1985; Ponader and Brown, 1989; 李福春等, 2003)。

表6 天湖东岩体全岩稀土元素分析数据 ($\mu g/g$) 和有关参数

Table 6 Whole rock analyses (in $\mu g/g$) and some parameters of rare earth elements for the Tianhudong granite

样号	2062	2157	2181	2188	2189
La	32.29	38.70	30.81	48.76	14.64
Ce	63.75	73.23	58.63	93.35	32.78
Pr	6.01	7.23	5.55	8.37	3.27
Nd	23.63	28.58	21.23	31.65	12.90
Sm	4.64	5.88	4.34	5.19	2.91
Eu	0.76	0.69	0.79	1.64	0.45
LREE	131.09	154.31	121.35	188.97	66.94
Gd	3.13	4.52	3.33	3.38	2.71
Tb	0.55	0.72	0.62	0.51	0.52
Dy	2.43	3.50	3.22	2.35	3.05
Ho	0.50	0.72	0.70	0.50	0.76
Er	1.34	1.85	2.15	1.33	2.35
Tm	0.25	0.28	0.39	0.19	0.44
Yb	1.35	1.81	2.20	1.31	3.01
Lu	0.20	0.27	0.34	0.21	0.50
HREE	9.73	13.66	12.96	9.78	13.34
ΣREE	271.91	322.28	255.66	387.71	147.22
L/H	13.47	11.30	9.36	19.32	5.02
La_N/Sm_N	4.37	4.14	4.47	5.91	3.17
La_N/Yb_N	16.14	14.46	9.43	25.11	3.28
Gd_N/Yb_N	1.87	2.02	1.22	2.08	0.73
δEu	0.58	0.39	0.61	1.13	0.48

注: 由南京大学内生金属矿床成矿作用机制国家重点实验室 JY38S 型仪器作 ICP/AES 分析

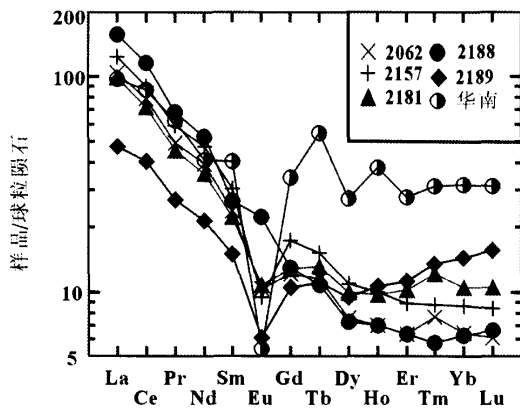


图6 天湖东岩体稀土元素球粒陨石标准化曲线

球粒陨石数据取自 Boynton (1984), 华南稀土元素值取自 (刘英俊, 1984)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns for the Tianhudong granite

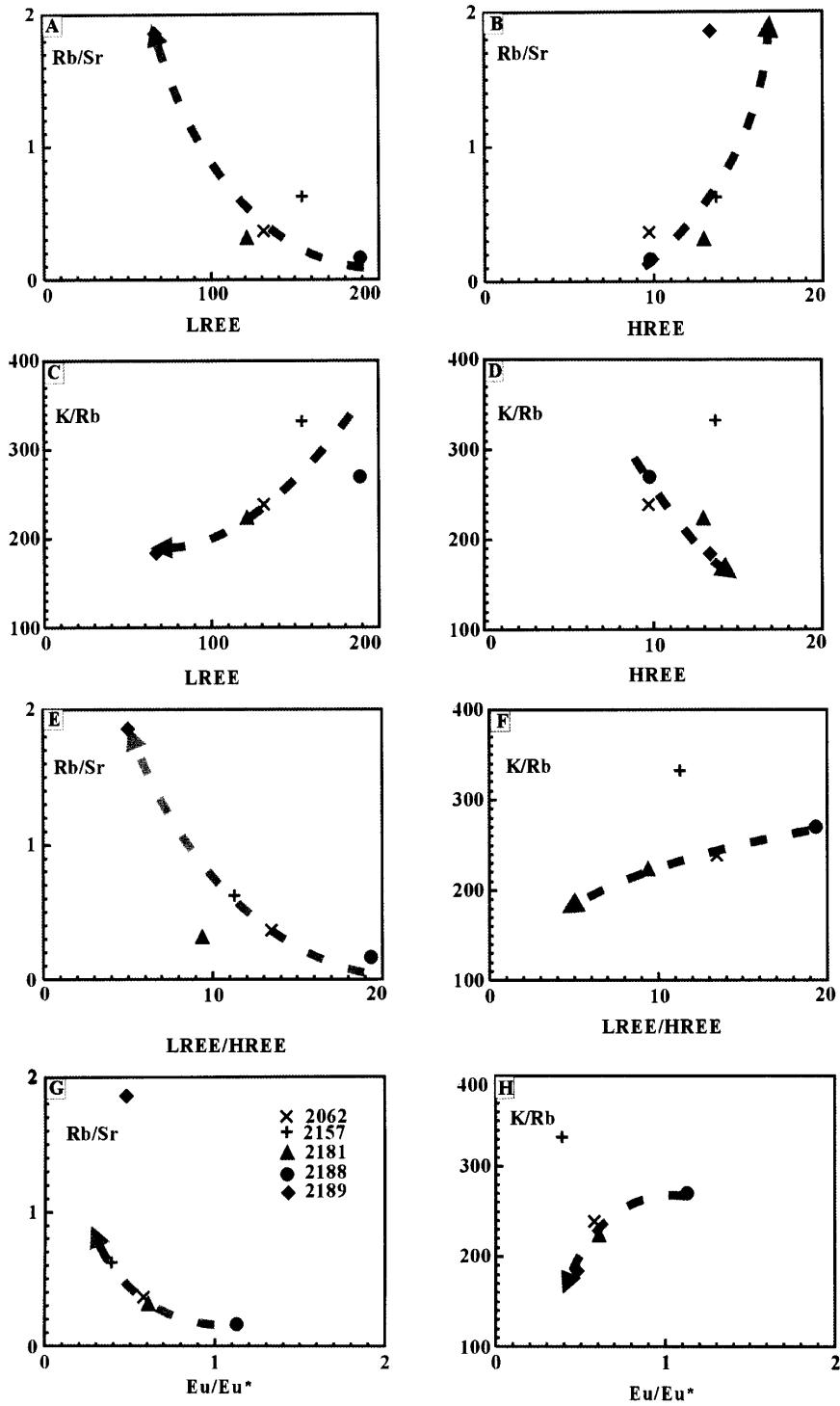


图7 微量元素比值与稀土元素关系图

Fig. 7 Diagram for some trace element ratios versus rare earth elements

从主量、微量元素以及稀土元素特征来看,天湖东岩体主要继承了其原岩钙碱性火山岩的特征,来自深部的熔体和流体对原岩的改造亦起了一定的作用。这种改造主要表现在熔体和流体对原岩不同程度的交代以及有利于原岩发生不同程度的部分熔融。样品 2189 Rb/Sr、K/Rb 比值(表 4、6)与其它样品显著有别,充分表明这种交代的不均一性及熔融程度的不等性。但无论是交代还是熔融,其程度都很低,并未从根本上改变天湖东岩体原岩钙碱性火山岩的特征。

5.4 同位素地球化学

5.4.1 Rb-Sr 同位素地球化学

众所周知,所测样品同时性、Sr 同位素初始比值的均一性、Rb-Sr 同位素数据的线性相关、以及同位素体系的封闭性,是 Rb-Sr 同位素等时线年龄是否具有地质意义的基本要求(Faure, 1986; Zheng, 1989)。

Faure(1986)通过严格的理论推导,提出了区分混合线和等时线的基本方法。如果样品 Rb-Sr 同位素数据点的线性分布与混合作用有关,而体系的 Sr 同位素初始比值实际上并未达到均一化,那么($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)₀将与 1/Sr 呈线性关系。反之,如果两者不存在明显的线性相关关系,即($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)₀在误差范围内为一条与 1/Sr 变化无关的水平直线,则意味着体系的 Sr 同位素初始比值已经达到了均一化、Rb-Sr 分析数据所构成的是一条等时线。

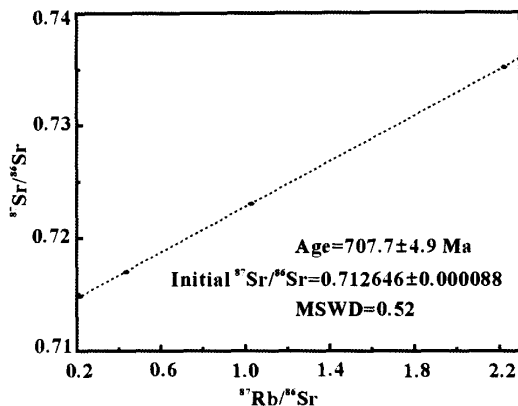


图 8 天湖东岩体 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 图解

注: 年龄计算中 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 及 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的误差分别为 1% 和 0.005%

Fig. 8 Diagram of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ for the Tianhudong granite

根据以上原则,首先将 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 测定数据对于 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ (表 7) 用 York 方程(York, 1969) 进行等时线拟合(95% 置信水平),剔除离散程度较大的 2189 和 2181 样品(这种离散特征反映了原岩及其改造作用的不均一性)后,获得的等时线初始比值为($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i = 0.71269 ± 0.00035, 年龄为 709

Ma (ISOPLOT/Ex rev. 2.49 计算值)。据此年龄反算各个样品的($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)₀值,除原 2062 样品数据不符合要求外,其它数据均落入($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)₀误差范围内且与 1/Sr 变化无关,说明这些样品锶同位素初始比值已经达到均一化。考虑到原 2157, 2188 数据及重新测定的 2062-2, 2157-2, 2188-2 (2062-2, 2157-2, 2188-2 分别为样品 2062, 2157, 2188 重新测定值)数据均符合要求,故取 2062-2 值、2157 与 2157-2 平均值(简称 2157 均)、2188 与 2188-2 平均值(简称 2188 均)以及 apatite 值等四个数据(表 7) 在 ISOPLOT/Ex rev. 2.49 专用软件进行拟合(Ludwig, 2001), 获得该岩体的年龄 707.7 ± 4.9 Ma (± 2σ), 锶同位素初始比值为 0.712646 ± 0.000088, MSWD = 0.52 (图 8)。天湖东岩体的锶同位素初始比值显著地高于东秦岭加里东改造型花岗岩(胡受奚等, 1988) 而与华南改造型(徐克勤等, 1984) 花岗岩相接近。

表 7 天湖东岩体 Rb-Sr 同位素数据

Table 7 Rb-Sr isotope analyses for the Tianhudong granite

样品	Rb	Sr	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) ₀	$\epsilon_{\text{Sr}}(t)$
2181	146.7	358.9	1.165	0.722238 ± 28	0.710457	96.37
2189	234.0	100.0	6.670	0.735030 ± 22	0.667663	-511.78
apatite	6.800	321.0	0.2158	0.714857 ± 18	0.712677	127.92
2062	132.8	330.1	1.147	0.724705 ± 32	0.713120	134.21
2062-2	128.7	326.4	1.028	0.723045 ± 21	0.712662	127.70
2157	138.5	188.5	2.096	0.733748 ± 21	0.712578	126.51
2157-2	143.6	191.5	2.357	0.736519 ± 19	0.712713	128.43
2157 均	141.1	190.0	2.227	0.735134 ± 20	0.712641	127.41
2188	97.57	576.7	0.4818	0.717430 ± 25	0.712564	126.31
2188-2	102.3	582.8	0.3904	0.716581 ± 25	0.712638	127.36
2188 均	99.94	579.8	0.4361	0.717006 ± 25	0.712601	126.84

注: (1) Apatite 为磷灰石, 其余均为全岩; (2) 计算所用参数如下: ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_{UR} = 0.7045, ($^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$)_{UR} = 0.0816 (Faure, 1986), t = 707.7 Ma; (3) 由南京大学现代分析中心同位素质谱室测定, 测试方法见 Yang Jiedong 等(1986)

除了 2189 样品外, 其余样品 $\epsilon_{\text{Sr}}(t) > 0$ 。结合王银喜等(1991)测得的该岩体的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-7.8 ~ -7.5), 可以推测天湖东岩体的原岩中包括了相当数量的壳源组份。这些壳源组份可以是板块俯冲时带入地幔的陆壳物质, 也可以是钙碱性岩浆上升过程中同化地壳产物(Faure, 1986), 还可以是火山岩系中所夹杂的沉积岩系。同时, 花岗岩形成过程中来自深部的壳源熔体-流体也可以有一定的贡献。

5.4.2 氧同位素地球化学

从表 8 中可知, 天湖东岩体和 $\delta^{18}\text{O}$ 值全岩变化较大, 为 11.95 ~ 14.49(‰); 石英 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 16.70(‰)。考虑到石

英氧同位素组成不易受后期地质作用的影响, 并且其 $\delta^{18}\text{O}$ 一般比全岩高 1 ~ 2‰ (Taylor, 1980)。因此, 天湖东岩体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值应为 14.7 ~ 15.7‰, 属于 Taylor (1978) 所称的高 $\delta^{18}\text{O}$ 花岗岩。如此高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值可能与原岩中存在一定数量的碎屑或化学沉积物夹层有关 (Taylor, 1978)。

表 8 天湖东岩体全岩及石英氧同位素分析结果 (SMOW)

Table 8 Oxygen isotope analyses of quartz and whole rock samples from the Tianhudong granite (SMOW)

样号	岩性	$\delta^{18}\text{O}$
2062 - a	全岩	14.49
2062 - b	全岩	11.95
2188	石英	16.70

注: 由南京大学现代分析中心同位素质谱室测定

6 讨论及结论

野外地质关系表明, 天湖东岩体是中天山中晚元古宙变质岩经原地改造的产物, 因此继承了其原岩岛弧钙碱性火山-沉积岩系的种种岩石学、矿物学和地球化学特征。从上述的黑云母成分、岩石化学、微量元素和稀土元素来看, 天湖东岩体的特征介于华南和东秦岭两个地区的改造型花岗岩之间。这种差异可能主要取决于原岩的成分差异。华南改造型花岗岩的原岩主要是加里东期的冒地槽沉积物, 这些沉积物具有较高的成分成熟度 (徐克勤等, 1984; 胡受奚等, 1988), 而东秦岭的加里东改造型花岗岩太古界原岩主要为基性、同熔型中酸性火山岩和成熟度较低的碎屑沉积物 (胡受奚等, 1988)。与两者均有差异的是, 在中天山地区成分复杂的火山-沉积岩系中, 作为天湖东岩体二长花岗岩原岩的, 可能主要是其中的长英质组分及碎屑沉积岩。从此岩体较高的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ (0.38 ~ 0.95) 比值看来, 原岩中泥质沉积岩所占比例较小, 这是因为泥质岩改造而成的花岗岩通常显示较低的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值 (< 0.3, Sylvester, 1998; Vielzeuf *et al.*, 1994)。从改造型花岗岩成分对于原 (源) 岩的继承性出发, 胡受奚等 (1988; 1989) 曾论述过同熔型-改造型分类系统 (徐克勤等, 1984) 相对于 I 型 - S 型分类系统 (Chappell and White, 1974) 的优越性。

天湖东岩体的原岩经历过绿片岩相至角闪岩相的变质作用, 除了这些岩石本身在变质过程中可能局部发生过部分熔融, 形成少量长英质脉体外, 实施改造的熔体-流体可能主要来自更深处由角闪岩相向麻粒岩相过渡的部位。在此岩体西北大约 30 公里的尾亚花岗岩杂岩体西侧, 目前已发现有麻粒岩相岩石出露 (董富荣等, 1996)。

以往曾把这类产在变质岩地区的片麻状花岗岩笼统地归属同造山花岗岩 (Marmo, 1971), 并认为花岗岩及伴生的变质岩均是造山挤压环境的产物。然而, 大量研究表明, 许多造山带的变质作用和深熔作用都与拉张环境有关 (Burg &

Chen, 1984; Royden & Burchfiel, 1987; Ratschbacher *et al.*, 1989; Zeitler & Chamberlain, 1991; Harris & Massey, 1994; Díez Balda *et al.*, 1995; Inger, 1994; Zen, 1995), 即使作为同造山深熔花岗岩经典实例的欧洲海西和澳洲拉克兰岩带, 近年来也被认为是拉张环境的产物 (Castro, 2000; Collins (2002) ①), 甚至高喜马拉雅的淡色花岗岩, 也有人认为形成于拉张环境 (Inger, 1994; Harris and Massey, 1994)。对于天湖东这类原地改造的片麻状花岗岩而言, 因其成岩过程的能量和物质部分地来自更深层次的深熔作用, 故拉张比起挤压来显然也是更为有利的成岩环境。这是因为, 在同造山时期较高挤压应力条件下, 深部源岩的含水矿物脱水和部分熔融均受到抑制, 分散于源岩中的极少量熔体也难以分凝, 所产生的熔体-流体也因地壳的极差渗透性而难以上升并对上层围岩进行充填和改造, 因此难以在较上部层位中形成原地改造型花岗岩。相反地, 在造山过程的挤压幕间隙期, 或造山晚期的挤压-拉张转折期, 深层次地壳因减压和含水矿物脱水而发生大规模部分熔融, 所形成的熔体和流体也因壳内张性环境而极易聚集、上升并改造上部层位的变质岩而形成片麻状花岗岩。同时拉张期浅层流体 (陈衍景, 1996) 的局部活动, 对原岩的改造也会起到促进作用。鉴于天湖东岩体形成时其原岩已发生了强烈的变形, 因此该岩体最有可能形成于澄江运动造山晚期的挤压-拉张构造转折环境。

造成中天山澄江运动晚期-期后拉张环境和形成片麻状花岗岩的动力、热力来源, 归根结蒂, 可能与当时正向塔里木大陆俯冲的天山岩石圈的折沉有关。折沉导致地幔上涌、减压分熔和玄武质岩浆底侵 (Davis, 1995; Barboza *et al.*, 1999; Handy *et al.*, 1999)。上涌地幔的拱张力和底侵岩浆的侧向漫流都可使上方岩石圈处于张性环境。在适宜条件下, 幔源玄武岩浆可直达地壳内部并侧向漫流而形成内侵 (intraplating, Pitcher, 1993, Gu Lianxing *et al.*, 1999)。底侵玄武岩浆在减压或进一步受热时可发生部分熔融而产生中酸性岩浆, 受底侵体加热的下地壳也会发生熔融而产生中酸性岩浆 (Clarke, 1992), 这些不同成因的中酸性岩浆上升到壳内较浅层次后均可发生侧向漫流而形成内侵。内侵岩浆加热上方地壳岩石, 使之发生麻粒岩相变质和部分熔融, 并释放出大量熔体-流体。在构造挤压-拉张转折期地壳渗透性已经增强的环境下, 所释出的熔体-流体沿遍在性裂隙往上运移并改造较浅层次的变质岩, 于是形成天湖东那种片麻状花岗岩。倘使适宜的条件能使深处部分熔融产物得以聚集成为一定规模的岩浆库, 然后上升并定位, 则可形成具有岩浆侵位特征的块状花岗岩 (Brown, 1994)。这类通常与围岩呈不整合接触的改造型花岗岩以星星峡镇后山岩体为典型 (其特征和成因作者等将专文论述)。总之, 底侵和内侵是造山带挤压-拉张转折期地壳垂向增生的重要方式, 而片麻状花岗岩则是这种垂向增生的产物。

① Collins W J. 2002. 南京大学地球科学系科学报告摘要。

天湖东岩体围岩中存在大量韧性剪切变形构造,岩体内部未变形的长石变斑晶中常包有强烈变形的原岩矿物。这些特征表明在天湖东花岗岩形成之前,其原岩曾受到过强烈的韧性剪切。韧性剪切可发生于多种构造环境(许志琴等, 1992),而天湖东岩体原岩的韧性剪切则应当是造山晚期构造挤压-拉张转折期的产物。这是因为,在本区高达角闪岩相的变质岩系中,形成于造山挤压阶段,即进变质阶段的韧性剪切很可能已在峰期变质过程中因强烈重结晶而被清除(Spry, 1969; Marshall and Gilligan, 1993)。在中天山岛弧于晚元古代与塔里木大陆发生碰撞的过程中,星星峡群、卡瓦布拉克群和天湖群钙碱性火山-沉积岩系发生强烈变形和变质。在变质峰期以后挤压-伸展转折环境中,这些变质岩在底侵和内侵岩浆侧向漫流水平力矩及其热力和流体的作用下,完全可能发生韧性剪切。韧性剪切后的岩石不仅裂隙增多,渗透性加大,为流体运移提供了通道(Boulter, 1987; Gu Lianxing, 1994; Brown *et al.*, 1999; 陈衍景, 1996),而且岩石的强烈细粒化使系统自由能升高,更容易被注入的熔体-流体改造,因而促进了改造型花岗岩的形成。

总之,天湖东片麻状花岗岩是一种原地改造型花岗岩,这种花岗岩在成份上主要继承了原岩的特征,后期熔体和流体的改造并未使之发生根本上的改变。这类花岗岩形成于造山过程的挤压-拉张转折期,其成因与深源岩浆的底侵和内侵有密切联系,围岩的韧性剪切加速了花岗岩形成作用的进行。然而,因为这类岩体中同时含有被变质原岩和来自深部的组分,其岩性具有一定的不均一性,所以如何对这类岩体科学地进行地球化学研究,尚待进一步探讨。

致谢 本系严正富副教授和新疆地矿局王金珠工程师参加了早期的野外工作,胡受奚教授对早期的工作作了精心指导,作者等于此谨致谢忱。

References

- Abdel FM, Abdel R. 1994. Nature of biotite from alkaline, calc-alkaline, and peraluminous magmas. *J. Petrol.*, 35(2): 525-541
- Allègre CJ, and 35 others. 1984. Structure and evolution of the Himalaya-Tibet orogenic belt. *Nature*, 307:17-22
- Barboza SA, Bergantz GW, Brown M. 1999. Regional granulite facies metamorphism in the Ivrea zone: Is the Mafic Complex the smoking gun or a red herring? *Geology*, 27: 447-450
- Best MG. 1982. *Igneous and Metamorphic petrology*. W. H. Freeman and Company, New York, 1-63
- Bickle MJ, Hawkesworth CJ, England PC, Athey D. 1975. A preliminary thermal model for regional metamorphism in the Eastern Alps. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 26:13-28
- Boulter, CA., 1987, The golden Mile, Kalgoolie: A giant gold deposit localized in ductile shear zone by structurally induced infiltration of an auriferous metamorphic fluid, *Econ. Geol.*, 82: 1661-1678
- Boynton WV. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: Henderson P. (ed.), *Rare earth element geochemistry*. Elsevier, 63-114
- Brown, M., 1994, The generation, segregation, ascent and emplacement of granitic magma: the migmatite to crustally-derived granite connection in thickened orogens. *Earth-Sciences Reviews*. 36(1): 83-132
- Brown M, Solar GS. 1999. The mechanism of ascent and emplacement of granite magma during transpression: a syntectonic granite paradigm. *Tectonophysics*, 312: 1-33
- Burg JP, Chen GM. 1984. Tectonics and structural zonation of southern Tibet, China. *Nature*, 311: 219-223
- Burrett CF. 1972. Plate tectonics and the Hercynian orogen. *Nature*, 239:155-157
- Castro A, Corretg LG, El-Biad C, El-Hmidi H, Fernandez C, Patiño D. 2000. Experimental constraints on Hercynian anatexis in the Iberian Massif, Spain. *J. Petrol.*, 41: 1471-1488
- Chappell BW, White A J R. 1974. Two contrasting granite types. *Pacific. Geol.*, 8:173-174
- Chen YJ. 1996. Fluidization model for intracontinental collision and its metallogenic significance: theoretical inference and evidences from gold deposits, the eastern Qinling Mountains. *Earth Science Frontiers*, 3(3-4):282-289 (in Chinese)
- Chen YL, Wang ZZ. 1993. Geochemistry of granites from eastern Tianshan Mountains, Xinjiang. *Geochemistry*, 3: 288-302 (in Chinese)
- Chen YL. 1999. *Geochemistry of granitoids from the Eastern Tianshan and the Northern Qinling belt*. Beijing: Geological Publishing House, 1-141 (in Chinese)
- Clarke DB., 1992, *Granitoid Rocks*. Chapman & Hall. London. 1-283
- Collins W J. 1996. S- and I-type granites of the eastern Lachlan fold belt: products of three-component mixing. *Transaction of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences*, 88: 171-179
- Cullers, RL., and Graf, JL., 1984, Rare Earth elements in igneous rocks of the continental crust: intermediate and silicic rocks. In: Henderson, P. (ed.), *Rare Earth Element Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier Science: 275-316
- Davis JH, Blanckenburg F. 1995. Slab breakout: A model of lithosphere detachment and its test in the magmatism and deformation of collisional orogens. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 129: 85-102
- Díez Balda MA, Martínez Catalán JR, Ayarza Arribas P. 1995. Syn-collisional extensional collapse parallel to the orogenic trend in a domain of steep tectonics: the Salamanca Detachment Zone (Central Iberian Zone, Spain). *Journal of Structural Geology*, 17: 163-182
- Dong FR, Li SL, Feng XC. 1996. Low-pressure granulite facies in Weiyia area of east Tianshan, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 14(2):151-158 (in Chinese)
- Eby GN, Woolley A, Din V, Platt G. 1998. Geochemistry and petrogenesis of nepheline syenites: Kasungu-Chipala, Ilomba, and Ulindi nepheline syenite intrusions, North Nyasa, alkaline province, Malawi. *J. Petrol.*, 39:1405-1424
- England PC, Thompson AB. 1984. Pressure-temperature-time paths of regional metamorphism. I. Heat transfer during the evolution of regions of thickened continental crust. *J. Petrol.*, 25:894-928
- England PC, Thompson AB. 1986. Some thermal and tectonic models for crustal melting in continental collision zones. In: Coward M P, Rice A C. (eds) *Collision Tectonics*. Geological Society, London, Special Publication., 19:83-94
- Faure G. 1986. *Principles of Isotope Geology* (2nd.). New York: John Wiley and Sons, 1-589
- Gao ZJ, Peng CW. 1985. The Precambrian of Tianshan, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 3(2):14-25 (in Chinese)
- Gu LX, Yang H, Yan ZF, Liao JJ, Wang JZ. 1990. Rb-Sr geochronology and the tectonic evolution of the east section of the Middle Tianshan Mountains. *Journal of Guilin College of Geology*, 10: 49-55 (in Chinese)
- Gu LX, McClay KR. 1994. Pressure solution of sulphides in some massive sulphide zinc-lead deposits of western Canada: ore-forming

- materials. *Chinese Journal of Geochemistry*, 13(2):132-139
- Gu LX, Hu SX, Chu Q, Yu CS, Xiao XJ. 1999. Pre-collision granites and post-collision intrusive assemblage of the Kelameili-Harlik orogenic belt. *Acta Geologica Sinica (English edition)*, 73(3):316-329
- Handy MR, Franz L, Heller F, Janott B, Zurriggen R. 1999. Multistage accretion and exhumation of the continental crust (ivrea-crustal section, Italy and Switzerland). *Tectonics*, 18: 1154-1177
- Harris N, Massey J. 1994. Decompression and anatexis of Himalayan metapelites. *Tectonics*, 13: 1537-1546
- Henderson, P., 1984, General geochemical properties and abundances of the rare earth elements. In: P. Henderson (ed.), *Rare Earth Element Geochemistry*, Amsterdam; Elsevier Science Publishers. 1-32
- He SX, Duan JR, Liu JX, Zhang ZR. 1996. Ductile shear zone structure and metallogene. *Geological Press*, 1-174 (in Chinese)
- Hu AQ, Zhang GX, Chen YB, Zhang QF. 2001. A model of division of the continental crust basement in the Xinjiang-based on studies of isotope geochronology and geochemistry. *Xinjiang Geology*, 19(1): 12-19 (in Chinese)
- Hu B, Wang JB, Gao ZJ, Lu Q, Fang XT. 1964. Several problems of tectonic evolution in Xinjiang. *Acta Geologica Sinica*. 44(2):156-170
- Hu L. 1998. An Introduction to Microtextures. *Geological Publishing House*. 1-158 (in Chinese)
- Hu SX, Ling QL *et al.*, 1988. The geology and metallogeny of the amalgamation zone between ancient North China and South China plate (Taking Qinling Tongbai as an example). *Publishing House of Nanjing University*, 1-588 (in Chinese)
- Hu SX, Guo JC. 1989. A comparison between the autochthonous and parautochthonous transformation type granitoids in East Qinling and South China Caledonian Fold Belts. *Acta Petrologica Sinica*, 1: 50-58 (in Chinese)
- Hu SX, Guo JC, Gu LX. 1990. Geology of the Caledonian orogenic belt and its importance to the framework of East Tianshan (E 85-95°). *Geoscience of Xinjiang*, *Geological Press*, Beijing, 1: 32-45 (in Chinese)
- Inger S. 1994. Magma genesis associated with extension in orogenic belts: examples from the Himalayan and Tibet. *Tectonophysics*, 238: 183-197
- Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences. 1959. *Tectonic of Outline of China*. *Science Press*, 1-320 (in Chinese)
- Jung S, Hoernes S, Masberg P, Hoffer E. 1999. The petrogenesis of some migmatites and granites (central Damara orogen, Namibia): evidence for disequilibrium melting, wall rock contamination and crystal fractionation. *J. Petrol.*, 40:1241-1269
- Le Bas MJ, Le Maitre RW, Streckeisen A and Zanettin B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *J. Petrol.*, 27(3): 745-750
- Li FC., Zhu JC., Zhang LS, Rao B, Zhang PH. 2003. Experimental study on formation and evolution of F-rich granitic melt. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1): 125-130 (in Chinese)
- Liu YJ, Zhang RJ, Sun CY, Ma DS, Qiao SG, Chen J. 1984. In: Xu Kejin and Tu Guangchi (eds.), *Geology of granites and Their Metallogenetic Relations*. Proceedings of the International Symposium Held at Nanjing University, Nanjing, China. October 26-30, 1982, Beijing: Science Press, 1984, 511-525
- Ludwig KR. 2001. User's manual for Isoplot/Ex rev. 2.49: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. *Berkeley Geochronology Center Special Publication*, No. 1a., 1-56
- Luo FZ. 1989. On percarbrian in Mid-Tianshan uplift (metamorphic) zone. *Xinjiang Geology*, 7(4):23-34 (in Chinese)
- Marmo, V., 1971, *Granite Petrology and the Granite Problem*. Elsevier Publishing Company. 1-244
- Marshall B, Gilligan LB. 1993. Remobilization, syn-tectonic processes and massive sulphide deposits. *Ore Geology Reviews*, 8: 39-64
- Miller CF, Mittlefehldt DW. 1982. Depletion of light rare-earth elements in felsic magmas. *Geology*, 10:129-133
- Miller R. 1983. The Pan-African Damara orogen of South west Africa/Namibia. *Geol. Soc. South Africa Spec. Publ.*, 11:431-515
- Oyinloye AO. 1998. Geology, geochemistry and origin of the banded and granite gneisses in the basement complex of the Ilesha area, southwestern Nigeria. *Journal of African Earth Sciences*, 26(4): 633-641
- Patiño Douce AE, Johnston AD, Rice JM. 1990. Anatexis and metamorphism in tectonically thickened continental crust exemplified by the Sevier hinterland, Western North America. *Earth and Planet Science Letters*, 97:290-315
- Pearce J. 1996. Sources and settings of granitic rocks. *Episodes*, 19(4): 120-125
- Pitcher WS, 1993, The nature and origin of granites. *Blackie Academic & Professional*, London. 1-321
- Ponader, C. W. and Brown, G. E., 1989. Rare earth elements in silicate glass/melt systems, II. Interaction of La, Gd and Yb with halogens. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53: 2905-2914
- Pupin J P. 1980. Zircon and granite petrology. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 73, 207-220
- Ratschbacher I, Frisch W, Neubauer F, Schmid SM, Neugebauer J. 1989. Extension in compressional orogenic belts: the eastern Alps. *Geology*, 17: 404-407
- Robert RA. 1995. Radiogenic isotope in granitic systems: studies of melting and mixing at the source. In: Brown M and Piccoli P M (eds.). *The origin of granites and related rocks - Third Hutton Symposium Abstract*, U. S. Geological Survey Circular, 1129: 38-39
- Royden L, Burchfiel BC. 1987. Thin-skinned N-S extension within the convergent Himalayan region: gravitational collapse of a Miocene topographic front. In: Coward M P, Dewey J F, Hancock P L. (eds) *Continental Extensional Tectonics*. *Geological Society, London Special Publication*, 28: 611-619
- Sandiford M, Powell R. 1991. Some remarks on high-temperature-low-pressure metamorphism in convergent orogens. *J. Metamorph. Geol.*, 9:333-340
- Schreurs J. 1985. Prograde metamorphism of metapelites, garnet-biotite thermometry and prograde changes of biotite chemistry in high-grade rocks of west Uusimaa, southwest Finland. *Lithos*, 18:69-80
- Spry A. 1969. *Metamorphic textures*. Pergamon Press, 1-350
- Sun S, Li JL, Lin JL. 1991. Indosinides in China and the Consumption of Eastern Paleotethys, *Controversies in Modern Geology*. Beijing: Science Press, 363-384
- Sylvester PJ. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. *Lithos*, 45:29-44
- Tatsumi Y and Eggins S, 1995, *Subduction Zone Magmatism*. *Blackwell Science*, 1-211
- Taylor HP. 1978. Oxygen and hydrogen isotope studies of plutonic granitic rocks. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 38: 177-210
- Taylor HP. 1980. The effect of assimilation of country rocks by magmas on $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ systematics in igneous rocks. *Earth. Sci. Planet. Lett.*, 47: 243-254
- Taylor SR, McLennan S M. 1981. The composition and evolution of the continental crust: rare earth element evidence from sedimentary rocks. *Phil. Trans R. Soc. London*, A301: 381-399
- Taylor, S. R. and McLennan, S. M., 1985, *The continental crust: its composition and evolution*. *Blackwell Scientific Publications*, 312pp
- Vielzeuf D, Montel J M. 1994. Partial melting of metagreywackes: I. Fluid-absent experiments and phase relationships. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 117:375-393

- Wang X. 1989. Typologie et geochemie du zircon: une approche nouvelle appliquee a la genese des granites. These Univ Nice, pp309
- Wang X, Kienast J R. 1999. Morphology and geochemistry of zircon: a case study on zircon from the microgranitoid enclaves. Science in China, Series D, 42:544-552
- Wang YX, Li HM, Tao XC, Yao H, Gu LX, Guo JC. 1991. A study of Nd, Sr and O isotopes and the crustal growth age of granites in eastern segment of Middle East Tianshan Belt, China. Acta Petrologica Sinica, 3:19-26 (in Chinese with English abstract)
- Weaver BL, Tarney J. 1984. Empirical approach to estimating the composition of the continental crust. Nature, 310: 575
- Webb, P. C., Tindle, A. G., Barritt, S. D., Brown, G. C. and Miller, J. F., 1995. Radiothermal granites of the United Kingdom: comparison of fractionation patterns and variation of heat production for selected granites. In: High Heat Production (HHP) granites, Hydrothermal Circulation and Ore Genesis. Inst. Min. Metall., London, 409-424
- Wilson M. 1989. Igneous petrogenesis. London, Unwin Hyman.
- Winter JD, 2001, An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. New Jersey: Prince-Hall Inc. 1-697
- Wyborn D, Chappell B W, Johnston R M. 1981. Three S-type volcanic sites from the Lachlan fold belt, southeast Australia. Geochim. et Cosmochim. Acta, 51: 1591-1597
- Xu-Keqin, Sun Nai, Wang Dezi, Hu Shouxi, Liu Yingjun and Ji Shouyuan. 1984. Petrogenesis of the granites and their metallogenetic relations in South China. In: Xu Keqin and Tu Guangchi (eds.), Geology of Granites and Their Metallogenetic Relations. Proceedings of the International Symposium Held at Nanjing University, Nanjing, China. October 26-30, 1982, Beijing: Science Press, 1984, 1-20 (in Chinese)
- Xu Zhiqin, Hou Liwei, Wang Zongxi et al., 1992, Orogenic processes of the Songpan-ganzi orogenic belt of China. Beijing: Geological Publishing House. 1-190 (in Chinese)
- Yang JD, Wang YX. 1986. Rb-Sr dating on the Cambrian-Ordovician interval. In: Chen Junyan (eds). Aspects of Cambrian-Ordovician boundary in Dayangeha, China. Beijing: China Prospect House, 72-78
- York D. 1969. Least-squares fitting of a straight line correlated errors. Earth. Planet. Sci. Lett., 5:320-324
- Zeitler PK, Chamberlain CP. 1991. Petrogenetic and tectonic significance of young leucogranites from the northernwest Himalayan, Pakistan. Tectonics, 10: 729-741
- Zen EA. 1995. Crustal magma generation and low-pressure high-temperature regional metamorphism in an extensional environment. Possible application to the Lachlan belt, Australia. American Journal of Science, 265: 851-874
- Zheng QR. 1983. Calculation of the Fe^{3+} and Fe^{2+} contents in silicate and Ti-Fe oxide minerals from EPMA date. Acta Mineralogica Sinica, (1):55-62 (in Chinese with English abstract)
- Zheng YF. 1989. Influences of the nature of the initial Rb-Sr system on isochron validity. Chem. Geol., 80:1-16
- 附中文参考文献**
- 陈岳龙, 王中刚. 1993. 新疆东天山花岗岩类的地球化学特征. 地球化学, (3):288-302
- 陈岳龙. 1999. 东天山, 北秦岭花岗岩类地球化学. 北京:地质出版社, 1-141
- 陈衍景. 1996. 陆内碰撞体制的流体作用模式及与成矿的关系—理论推导和东秦岭金矿床的研究结果. 地学前缘, 3(3-4):282-289
- 董富荣, 李嵩龄, 冯新昌. 1996. 新疆东天山尾亚地区低压麻粒岩相的特征. 新疆地质, 14(2):151-158
- 高振家, 彭昌文. 1985. 新疆天山前寒武系. 新疆地质, 3(2):14-25
- 顾连兴, 杨浩, 陶仙聪, 严正富, 李惠民, 王金珠, 刘彦东. 1990. 中山东段花岗岩类铷-锶年代学及构造演化. 桂林冶金地质学院学报, 10(1): 49-55
- 何绍勋, 段嘉瑞, 刘继顺, 张曾荣. 1996. 韧性剪切带与成矿. 北京:地质出版社, 1-174
- 胡嵩琴, 张国新, 陈义兵, 张先锋. 2001. 新疆大陆基底分区模式和主要地质事件的划分. 新疆地质, 19(1): 12-19
- 胡冰, 王景斌, 高振家, 陆青, 方孝悌. 1964. 新疆大地构造的几个问题. 地质学报, 44(2):156-170
- 胡玲. 1998. 显微构造地质学概论. 地质出版社, 1-158
- 胡受奚, 林潜龙等著. 1988. 华北与华南古板块拼合带地质和成矿(以东秦岭-桐柏为例). 南京大学出版社, 1-558
- 胡受奚, 郭继春. 1989. 东秦岭与华南加里东褶皱带原地-半原地改造型花岗岩特征. 岩石学报, 5(1):49-58
- 胡受奚, 郭继春, 顾连兴. 1990. 加里东造山带在东天山($E 85^{\circ}-95^{\circ}$)构造格架中的重要地位及其地质特征. 新疆地质科学, 第1辑, 地质出版社: 32-45
- 李福春, 朱金初, 张林松, 饶冰, 张佩华. 2003. 富氟花岗岩熔体形成和演化的实验研究. 19(1): 125-130
- 刘英俊, 张景荣, 孙承铨, 马东升, 乔思光, 陈俊. 1984. 华南花岗岩类中微量元素的地球化学特征. 花岗岩类地质和成矿关系学术讨论会论文, 南京:江苏科学技术出版社, 511-525
- 罗发祥. 1989. 对中天山隆起(变质)带前寒武系的探讨. 新疆地质, 7(4):23-34
- 王银喜, 李惠民, 陶仙聪, 杨浩, 顾连兴, 郭继春. 1991. 中天山东段花岗岩类钨-铷同位素及地壳形成年龄. 岩石学报, 7(3):19-26
- 新疆区调队. 1985. 天山花岗岩地质. 地质出版社: 1-247
- 徐克勤, 孙鼎, 王德滋等. 1984. 华南花岗岩成岩与成矿. 见:徐克勤, 涂光炽主编. 花岗岩地质与成矿关系. 南京:江苏科学技术出版社, 1-20
- 许志琴, 侯立伟, 王宗秀, 傅小芳, 黄明华, 1992, 中国松潘-甘孜造山带的造山过程. 北京:地质出版社. 1-190
- 郑巧荣. 1983. 由电子探针分析值计算 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} . 矿物学报, (1):55-62
- 中国科学院地质研究所. 1959. 中国大地构造纲要. 北京:科学出版社, 1-320