

甘肃敦煌红柳峡地区石榴石斜长角闪岩的变质特征、锆石 U-Pb 年龄及地质意义*

王忠梅^{1,2,3} 肖文交^{1,2} 韩春明^{1,2} 敖松坚^{1,2} 王洛娟^{1,3}

WANG ZhongMei^{1,2,3}, XIAO WenJiao^{1,2}, HAN ChunMing^{1,2}, AO SongJian^{1,2} and WANG LuoJuan^{1,3}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

2. 新疆矿产资源研究中心, 乌鲁木齐 830011

3. 中国科学院大学, 北京 100049

1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. Xinjiang Research Center for Mineral Resources, Urumqi 830011, China

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2012-10-31 收稿, 2013-03-20 改回.

Wang ZM, Xiao WJ, Han CM, Ao SJ and Wang LJ. 2013. Metamorphism, zircon U-Pb dating and tectonic implications of garnet amphibolites from Hongliuxia, Dunhuang, Gansu Province. Acta Petrologica Sinica, 29(5):1685–1697

Abstract The protolith of the Hongliuxia amphibolites is tholeiite formed in immature arc, and the typical mineral assemblages are garnet (Grt), amphibole (Amp), diopside (Di) and plagioclase (Pl). The coarse-grain garnet porphyroblasts usually display obvious zonings. Petrographic and mineral chemistry indicate that the amphibolites have undergone four successive stages: prograde, peak, isothermal decompression and isobaric cooling. The prograde metamorphic assemblages (M1) are the minerals preserved in garnet porphyroblasts (Grt I + Amp I + Pl I + Qtz), and the *P-T* metamorphic conditions are estimated to be 550°C to 600°C and 0.3 Gpa to 0.5 Gpa; the peak metamorphic assemblages (M2) are the mantle part of garnet and the minerals in the matrix (Grt II + Amp II + Di + Pl II + Qtz), *P-T* estimates give peak metamorphic conditions of 650°C to 780°C and 0.8 Gpa to 0.9 Gpa; the M3 stage is characterized by the Pl III + Amp III corona around garnet porphyroblasts, which infer an obvious decompression process, and the temperature of metamorphism is estimated to be 630°C to 700°C; the temperature of the M4 stage drop a lot, which is inferred from the breakdown of diopside to produce Amp IV + Pl IV. The estimated *P-T* conditions indicate a clockwise *P-T-t* path. The tectonic evolution history is: plate subduction cause high-temperature metamorphism, after that the crust tends to be thin, then the deep rock cool down to the normal geothermal gradient. The crystallization age of garnet-bearing amphibolite is 1611 ± 6Ma, which is contemporary to the breakup Columbia Supercontinent, so the Tarim Craton may connect with the breakup of Columbia Supercontinent.

Key words Garnet zonings; Reaction textures; Garnet-bearing amphibolites; Zircon U-Pb dating; Metamorphic evolution; Tarim Craton

摘要 甘肃敦煌红柳峡石榴石斜长角闪岩原岩为岛弧拉斑玄武岩, 形成于不成熟岛弧。其典型矿物组合为: 石榴石 (Grt)-角闪石 (Amp)-透辉石 (Di)-斜长石 (Pl), 其中较粗大的变斑晶石榴石中通常保存进变质生长环带。根据岩相学和矿物化学研究得出, 该区石榴石斜长角闪岩经历了四个变质演化阶段: 早期进变质阶段 (M1)、变质高峰期阶段 (M2)、近等温减压阶段 (M3) 和晚期降温退变质阶段 (M4)。M1 阶段以石榴石核部成分及其核部包体矿物组合石榴石 (Grt I) + 角闪石 (Amp I) + 斜长石 (Pl I) + 石英 (Qtz) 为特征, *P-T* 估算结果为 $T = 550 \sim 600^\circ\text{C}$, $P = 0.3 \sim 0.5\text{GPa}$; M2 阶段以变斑晶石榴石幔部成分 (Grt II) 及基质中的矿物组合角闪石 (Amp II) + 透辉石 (Di) + 斜长石 (+ Pl II) + 石英 (Qtz) 为特征, *P-T* 估算结果为 $T = 650 \sim 780^\circ\text{C}$, $P = 0.8 \sim 0.9\text{GPa}$; M3 阶段的代表性结构为石榴石边缘 (Grt III) 形成由绿色角闪石 (Amp III) 和斜长石 (Pl III) 组成

* 本文受国家自然科学基金项目 (41272107, 41230207, 41190072, 41202150, 41102132) 和国家科技支撑计划项目 (2011BAB06B04-1) 联合资助。

第一作者简介: 王忠梅, 女, 1986 年生, 博士生, 岩石学专业, E-mail: wangzm@mail.iggcas.ac.cn

的“白眼圈”,该阶段温度估算结果为 630 ~ 700°C,压力大幅降低;M4 阶段透辉石(Di)开始向角闪石(Amp IV)和斜长石(Pl IV)转化,该阶段压力变化不大,主要是温度的降低。温压估算结果表明,红柳峡石榴石斜长角闪岩完整记录了从早期升温升压的进变质到后来的近等温减压再到最后的降温退变质的一个顺时针的 PTt 演化轨迹,反映的构造演化历史为:板块俯冲到地壳深部遭受高温变质作用,然后该区出现拉张的构造体制,随之地壳减薄,但是原来处于地壳深部的岩石并未出现大幅度折返和抬升,而是仍然处于原来的深度,慢慢的冷却直至正常的地温梯度。锆石 U-Pb 定年结果表明,红柳峡石榴石斜长角闪岩原岩的结晶年龄为 $1611 \pm 6\text{Ma}$,该期年龄代表的构造事件与哥伦比亚超大陆的裂解事件一致,结合前人的研究成果我们推断,塔里木板块可能与哥伦比亚超大陆的裂解有联系,且当时位于塔里木东北缘的敦煌地块还是岛弧的构造环境,后来在中元古代塔里木运动中有一次板块俯冲碰撞事件,引起了一次高级变质作用(高角闪岩相),使当时的基性火山岩变质形成如今含有石榴石的斜长角闪岩。

关键词 石榴石环带;矿物反应;石榴石斜长角闪岩;锆石 U-Pb 定年;变质演化;塔里木克拉通

中图法分类号 P588.346; P597.3

1 引言

塔里木盆地是中国大陆面积最大的含油气沉积盆地,因此阐明塔里木克拉通基底性质及构造演化特征对认识塔里木盆地油气聚集分布规律有重要意义。塔里木盆地克拉通位于中国西部,它为环形山链所环绕,北缘为天山弧形山链,南缘为西昆仑-阿尔金弧形山链(周勇等和潘裕生,1998)。由于巨厚的沉积盖层及周边复杂的造山带,塔里木克拉通前寒武纪变质基底仅出露在很少的几个地区:(1)东北缘的库鲁克塔格地区;(2)东南缘的阿尔金-敦煌地区;(3)西南缘的铁克里克-西昆仑地区;(4)西北缘的阿克苏-柯坪地区(张建新等,2011)。东北缘的库鲁克塔格地区是新疆前寒武系出露最好的地区,也是中国早前寒武纪地体出露的主要地区之一,其出露的最老基底岩石主要为灰色片麻岩(TTG)和表壳岩,形成于太古宙-古元古代,其中表壳岩中通常伴随有斜长角闪岩夹层(或捕掇体)(Leake *et al.*, 1997; Hu *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2003; Luo *et al.*, 2008; Long *et al.*, 2012; Shu *et al.*, 2011; 郭召杰等, 2003; 张建新等, 2011)。此外,该区还广泛出露古元古代的变沉积岩,它们与下覆基底岩石呈不整合接触关系(郭召杰等, 2003; 高振家等, 1993)。

东南缘的阿尔金-敦煌地区同样广泛出露前寒武纪变质基底岩石,岩石类型与库鲁克塔格地区相近,可大致分为三类:第一类为太古宙的花岗片麻岩;第二类为变质中-基性火山岩,主要包括变质二辉岩和麻粒岩;第三类为一套具有“孔兹岩系”特征的变沉积岩(梅华林等, 1997; 于海峰等, 1998; Lu *et al.*, 2008)。表壳岩以火山岩和沉积岩为主,分别被定义为米兰群和敦煌群(Leake *et al.*, 1997; 张建新等, 2011)。过去几十年,地质学家们对阿尔金山的变质基底、构造格架及演化历史进行了广泛的研究,为正确认识塔里木克拉通的性质及构造演化提供了大量资料(车自成等, 1995; 郭召杰等, 1998; Wang *et al.*, 2003; 刘永顺等, 2009; 唐卓等, 2011; 张建新等, 2011)。相对而言,对于敦煌地区敦煌群的研究要薄弱很多,尽管前人对敦煌三危山、多坝沟、石包城、红柳峡等地的敦煌群进行了一些地球化学与年代学研究(梅

华林等, 1998; 于海峰等, 1998; 孟繁聪等, 2011),但是仅仅把敦煌地块看做独立的块体进行讨论,并未将其归到塔里木克拉通的构造演化历史中,本文以红柳峡地区敦煌群中斜长角闪岩的变质特征及年代学为主结合野外接触关系,试图将敦煌地块与塔里木克拉通联系到一起,共同探讨其构造演化。

2 地质背景

敦煌地块位于塔里木克拉通东部,北接北山造山带,南以阿尔金断裂与祁连山造山带分开,西北边界为且末-星峡断裂,整体呈三角状块体(图 1)。敦煌地块被划为克拉通的一部分,不作为造山带,主要是该地体保留了克拉通所特有的早前寒武纪变质基底的特点,而未受到早古生代造山作用的强烈叠加(陆松年等, 2006)。该地块中出露的早前寒武纪岩石主要为敦煌群,《甘肃省区域地质志》(甘肃省地质矿产局, 1989)自下而上将其划分为 A、B、C、D 四个岩组,研究区内所见相当于 A、B、C 三个岩组:A 岩组主要为条带状混合岩,其基体为黑云斜长片麻岩、斜长角闪岩,脉体为肉红色花岗质岩石,还可见少量大理岩透镜体;B 岩组主要为含石墨透闪石化白云质大理岩、二云石英片岩、石英岩、黑云斜长片麻岩夹斜长角闪岩、大理岩;C 岩组主要为条带状混合岩,以基体含角闪石为特征,脉体以灰白色花岗质为主,因混合岩化不均匀,还见有二云石英片岩、黑云斜长片麻岩、斜长角闪岩、大理岩(图 2、图 3)。前人研究认为红柳峡地区这一套岩石为中高级变质火山岩-沉积岩组合,其变质沉积组合与孔兹岩系相似(梅华林等, 1997, 1998; 于海峰等, 1998)。本次研究的样品为石榴石斜长角闪岩,此类岩石通常以小规模岩墙或透镜体的形式出现在黑云斜长片麻岩、石英岩或大理岩中。

3 样品分析方法

样品的粉碎工作在河北省地质调查局廊坊实验室完成。主量元素的测定在中国科学院地质与地球物理研究所固体矿产资源研究室采用 X-射线荧光光谱法(XRF)在 Shimadzu

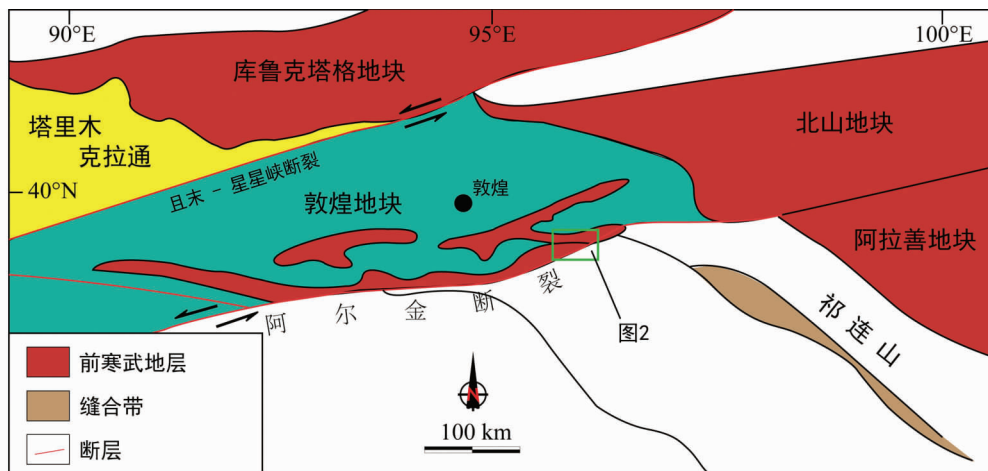


图1 敦煌及其邻区地质构造概图(据葛肖虹和刘俊来,2000 修改)

Fig.1 Geological sketch map of Dunhuang and adjacent area (after Ge and Liu, 2000)

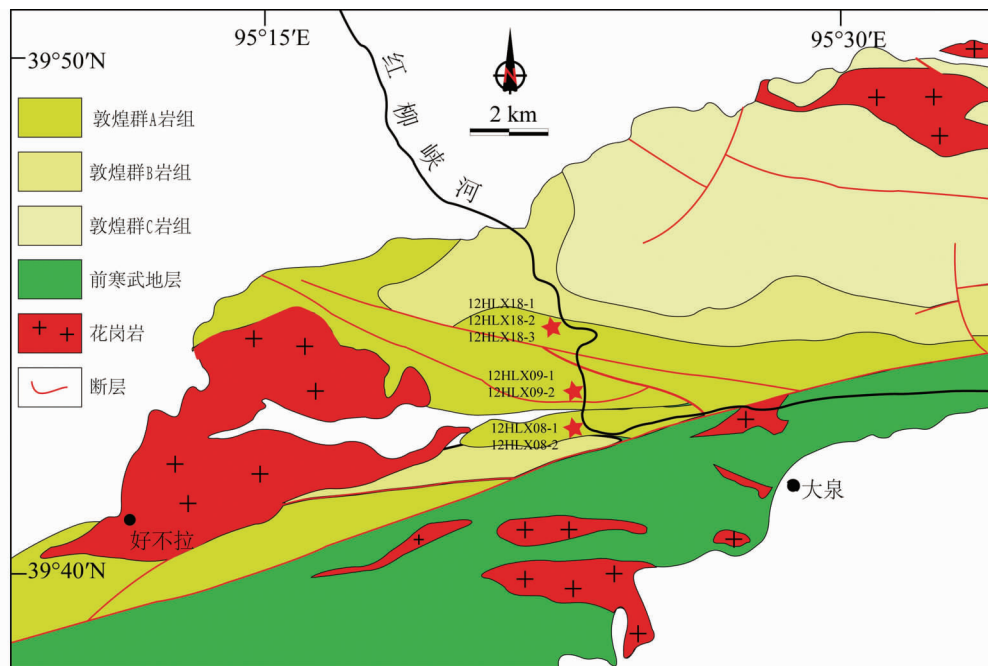


图2 红柳峡地区地质简图(据甘肃省革命委员会地质局,1973^①修改)

Fig.2 Geological map of Hongliuxia

XRF-1700/1500 上完成。微量、稀土元素的测定由中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室采用 ICP-MS 方法在 ICP-MS Agilent 7500a. 上完成。用作定年的锆石从大约 3kg 的新鲜岩石样品中分离获得,在定年之前首先进行锆石阴极发光(CL)内部结构研究,阴极发光是在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈国家重点实验室的阴极荧光仪上完成的。锆石的原位 U-Pb、Lu-Hf 同位素分析是在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈国家重点实验室

Neptune 多接收器电感耦合等离子体质谱仪 MC-ICP-MS 和 193nm 激光取样系统上进行的。测样束斑直径是 40 ~ 60 μm ,采用高纯 Ar 气为载气,用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST610 进行仪器最佳化,采用 91500 标准锆石外部校正法进行锆石原位 U-Pb 分析。详细的测试流程、技术参数和干扰校正参数和校正方法可参见 Xu *et al.* (2004)、Wu *et al.* (2006)和袁洪林(2003)的描述。矿物的氧化物含量分析在中国科学院地质

① 甘肃省革命委员会地质局,1973. 1 : 200000 别盖幅地质图

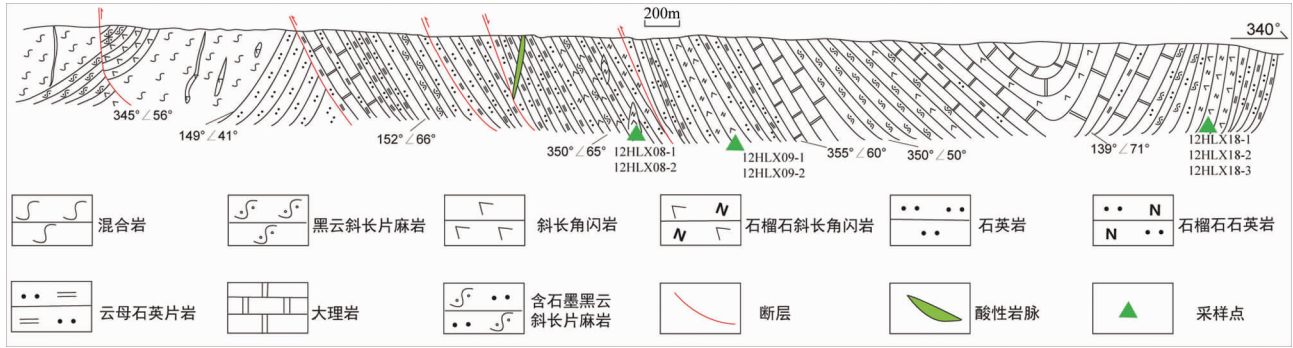


图3 红柳峡剖面图

Fig. 3 Profile map of Hongliuxia

与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室的日本 JEOL JXA-8100 型电子探针完成。仪器的工作电压为 15kV, 工作电流为 10nA, 束斑直径约为 $2\mu\text{m}$, 并利用天然矿物样品和 PAP 校正处理程序进行仪器标定和数据校正。

4 岩石学、地球化学特征、原岩恢复及大地构造环境

4.1 岩石学特征

石榴石斜长角闪岩夹在片麻岩、石英岩或大理岩中, 通常以透镜体或岩墙的形式出现 (图 4a), 岩石整体结构比较均匀, 局部出现片麻理化, 逐渐向角闪斜长片麻岩过渡。岩石中细粒不等粒粒状变晶结构, 块状构造。主要组成矿物为石榴石 (10% ~ 15%)、斜长石 (30% ~ 40%) 和角闪石 (35% ~ 40%), 此外还有少量透辉石、黑云母、石英等矿物。石榴石通常以半自形-自形的粒状变斑晶的形式出现, 粒度变化于 0.5 ~ 2.5mm 之间, 且以粗粒为主 (粒径多为 1 ~ 2mm), 其边部可见清晰的“白眼圈”结构 (图 4b, c), 该“白眼圈”是斜长石和角闪石形成的冠状体, 可能指示了石榴石的减压分解过程 (Harley, 1998), 变斑晶石榴石中通常发育有包体矿物, 且包体多分布于石榴石核部及幔部, 边部很少或基本不见包体 (图 4c)。包体以黑云母、斜长石和角闪石为主, 少量为石英、磷灰石、榍石等。基质中的他形细粒石榴石基本不含包体, 也不具核幔结构 (图 4d)。角闪石粒径在 1 ~ 3 mm 之间, 多数 < 2mm, 根据其颜色的变化可以大致分为两类: 一类为浅棕褐色角闪石, 另一类为绿色角闪石, 前者主要以短柱状、粒状出现在基质中, 颗粒相对较粗, 个别颗粒具有环带状干涉色, 可能是成分差异造成的 (图 4d), 后者则常出现在石榴石变斑晶中或石榴石冠状体中 (图 4c)。斜长石多为中长石-拉长石 ($An = 34.8 \sim 60.0$), 多以板状形式出现在基质中, 少数与角闪石一起构成变斑晶石榴石的反应边。

4.2 地球化学特征、原岩恢复及大地构造环境

研究样品的主量、微量元素含量见表 1。

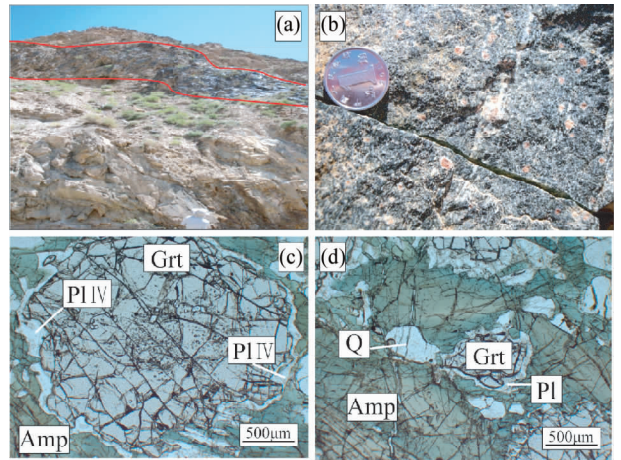


图4 石榴石斜长角闪岩的野外照片(a、b)和显微镜下照片(c、d)

Fig. 4 Field photos (a, b) and photomicrographs of garnet-bearing amphibolites (c, d)

全岩组分显示, 石榴石斜长角闪岩以 SiO_2 低 (46.1% ~ 49.3%), Al_2O_3 稳定 (13.9% ~ 15.9%), $\text{CaO} > \text{MgO}$, $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ 为特征 (表 1)。CIPW 标准矿物计算结果显示, 全部的分析样品都含有标准透辉石以及少量钛铁矿、磁铁矿和磷灰石, 大部分样品含有标准紫苏辉石和橄榄石, 只有一个分析样含有标准石英, 说明大部分斜长角闪岩是 SiO_2 不饱和的, 还有一个分析样含有标准霞石 (表 1), 可能是在变质过程中由 K、Na 的加入引起的 (Knoper and Condie, 1998)。用 MnO-TiO_2 判别图对角闪岩的原岩进行判别发现, 几乎所有分析点都落在正斜长角闪岩的区域内 (图 5a)。在 c-(al-alk)-100mg 三角图解中, 分析点明显沿着岩浆演化的趋势分布 (图 5b, Leake, 1964), 此外, Cr、Ni 与 mg 显著的正相关关系也可以说明分析样具有岩浆的性质。对于角闪质岩石来说, 主要微量元素的比值与原岩性质有关, 而红柳峡地区石榴石斜长角闪岩中 Sr/Ba 和 Cr/Ni 比值多大于 1, 进一步表明其原岩为正变质的基性岩。

红柳峡石榴石斜长角闪岩具有低的 TiO_2 含量 (0.65%

表 1 石榴石斜长角闪岩主量 (wt%) 和微量元素 ($\times 10^{-6}$) 特征Table 1 Major (wt%) and trace ($\times 10^{-6}$) elements data for garnet-bearing amphibolite

Sample	HLX08 -1	HLX08 -2	HLX09 -1	HLX09 -2	HLX11 -1	HLX18 -2	HLX18 -3	HLX20	Sample	HLX08 -1	HLX08 -2	HLX09 -1	HLX09 -2	HLX11 -1	HLX18 -2	HLX18 -3	HLX20
SiO ₂	46.13	47.47	47.55	48.82	48.63	49.14	48.33	49.31	Zn	70.8	63.2	65.6	43.4	71.8	75.9	62.1	79.1
TiO ₂	0.65	1.13	0.93	0.92	0.83	1.36	1.47	1.41	Ga	15.3	14.7	14.6	17.7	14.5	16	19.3	16.4
Al ₂ O ₃	15.87	14.85	14.29	13.97	14.23	14.66	14.31	14.56	Rb	44.2	60.7	22.6	57.9	11.5	26.9	10.8	18.5
Fe ₂ O ₃ ^T	10.78	14.51	13.34	13.37	12.45	13.23	13.86	13.35	Sr	168	119	77.1	132	125	348	371	334
MnO	0.1	0.28	0.18	0.21	0.2	0.2	0.2	0.2	Y	14.6	13.7	19.1	36.3	18	23.1	26.2	24
MgO	10.68	8.03	8.14	8.28	8.03	5.98	6.25	5.78	Zr	52.9	31.1	19.6	45.3	18.4	39.5	53.5	37
CaO	10.98	10.36	11.24	10.13	11.44	10.09	10.82	9.83	Nb	3.59	2.52	2.91	11.7	2.63	13	15.5	13.8
Na ₂ O	1.53	1.52	2.13	2.41	2.41	2.57	2.36	2.99	Mo	0.16	0.25	0.24	0.22	0.21	0.42	0.61	0.54
K ₂ O	1.1	0.47	0.57	0.45	0.34	1.33	1.05	1.23	Sn	0.66	0.86	0.49	1.99	0.55	0.86	0.96	0.87
P ₂ O ₅	0.19	0.12	0.08	0.07	0.07	0.21	0.23	0.22	Cs	1.76	2.2	0.56	1.37	0.44	0.29	0.16	0.15
LOI	1.34	0.78	0.96	0.78	0.76	0.66	0.54	0.6	Ba	140	281	82.2	87.4	58.5	427	197	306
TOTAL	99.34	99.51	99.41	99.41	99.4	99.42	99.42	99.48	La	6.7	5.42	3.45	46.5	3.26	17.3	18.1	17.7
Q	0	0.19	0	0	0	0	0	0	Ce	14	11.6	7.95	82.9	7.36	35.6	37.4	35.7
An	34.2	33.11	28.47	26.62	27.65	25.13	25.94	23.2	Pr	1.89	1.6	1.24	10.1	1.13	4.4	4.69	4.51
Ab	13.3	13.14	18.56	20.94	10.6	22.25	20.44	25.88	Nd	8.25	7.07	6.2	38.3	5.84	18.4	19.6	18.5
Or	6.69	2.85	3.46	2.73	3.24	8.05	6.35	7.43	Sm	2.05	2.06	1.99	7.00	1.92	3.96	4.24	3.99
Ne	0	0	0	0	1.73	0	0	0	Eu	0.92	0.72	0.71	1.95	0.65	1.35	1.52	1.43
Di	16.66	15.35	23.18	20.02	42.22	20.41	22.68	20.87	Gd	2.54	2.17	2.74	7.25	2.61	4.0	4.21	4.03
Hy	5.45	28.24	9.66	16.98	0	11.39	11.2	7.07	Tb	0.43	0.39	0.49	1.12	0.43	0.67	0.74	0.69
Ol	19.16	0	11.3	7.46	6.94	6.35	6.39	8.92	Dy	2.7	2.54	3.35	6.66	3.08	4.1	4.62	4.37
Il	1.27	2.2	1.81	1.79	2.89	2.64	2.86	2.74	Ho	0.52	0.48	0.67	1.22	0.66	0.82	0.9	0.88
Mt	2.81	4.64	3.38	3.31	4.28	3.28	3.59	3.37	Er	1.41	1.51	2.12	3.34	2.03	2.38	2.65	2.37
Ap	0.45	0.28	0.19	0.17	0.46	0.5	0.55	0.52	Tm	0.21	0.19	0.3	0.45	0.29	0.35	0.43	0.36
Σ	99.98	100.01	100.01	100.01	100.01	100	100.01	100	Yb	1.33	1.4	1.95	2.74	1.84	2.25	2.7	2.52
A/CNK	0.67	0.68	0.58	0.61	0.41	0.61	0.58	0.60	Lu	0.2	0.2	0.3	0.42	0.29	0.38	0.39	0.38
Be	0.42	0.54	0.33	3.29	0.27	0.6	0.34	0.53	Hf	1.53	1.02	0.77	1.27	0.72	1.34	1.59	1.28
Sc	39.2	29.8	43.4	19.0	43.7	39.8	41	39.3	Ta	0.56	0.16	0.21	0.59	0.25	0.84	0.88	0.89
V	238	213	297	88.2	283	281	314	286	Tl	0.19	0.47	0.14	0.24	0.1	0.17	0.068	0.2
Cr	287	461	127	71.6	222	66.6	57	59.2	Pb	1.49	3.23	2.88	8.62	2.57	2.17	1.64	2.83
Co	54.3	49.8	50.2	18.4	46.9	45	33.3	41	Th	1.34	1.15	0.26	6.27	0.25	1.95	2.05	1.99
Ni	173	169	99.8	36.1	104	53.6	40.6	48.9	U	0.3	0.26	0.21	1.31	0.097	0.44	0.54	0.45
Cu	38.3	72.2	99.2	37.6	81.2	81.5	195	57	(Ce/Yb) _N	10.59	8.27	4.09	30.29	3.99	15.81	13.87	14.14

~1.47%), 低的 Zr/P₂O₅ 比值 (0.02 ~ 0.05) 和 Nb/Y 比值 (0.15 ~ 0.59), 这些都是拉斑玄武岩的指示性特征 (Winchester and Floyd, 1976, 1977), 且在 AFM 图解中 (图 5c), 分析点全部落在拉斑玄武岩的范围内。

球粒陨石标准化的稀土配分图显示 (图 6a), 红柳峡石榴石斜长角闪岩的稀土配分可以明显的分为两类: 第一类 LREE 含量较高, 具有中等的 REE 分异 ((Ce/Yb)_N = 3.9 ~ 8.4, 表 1); 第二类 REE 总含量较低, 具有中等的 REE 分异 ((Ce/Yb)_N = 1.1 ~ 2.9, 表 1), 但是分异程度明显低于第一类, Nb 含量非常低, 具有不成熟岛弧玄武岩的典型特征, 这一结论和 MnO × 10-P₂O₅ × 10-TiO₂ 判别图及岛弧成熟度判别图 Rb/Zr-Nb 所获得的结果一致 (图 5d, e), 说明它们是由残余岩石圈的部分熔融形成的 (Brouxel *et al.*, 1989)。原始

地幔标准化蛛网图显示 (图 6b), 岩石富集 LILE (Rb、Ba、U、Pb 等), 亏损 HSFE (Nb、Ta、Zr、Hf 等), 此外, 所有分析样品都具有异常低的 Ce 浓度, 这些都是典型的镁铁质岛弧火山岩的特点 (Pearce, 1983; Knoper and Condie, 1988)。

由于角闪岩在变质过程中 SiO₂、Na₂O、K₂O 等活泼元素的含量可能会发生显著的变化, 而一些惰性元素, 如 Ti、P、Y、Nb、Zr 等则无变化或发生微弱的变化, 因此用不活泼元素的投影图解能更好的反映地质事实 (Winchester and Floyd, 1976; Volkova and Budanov, 1999)。用 Ta/Yb-Th/Yb 图解对其构造环境进行判别发现, 大多数分析点都落在活动大陆边缘的范围内, 并且所有数据整体构成板内玄武岩的演化趋势 (图 5f)。综上所述, 红柳峡石榴石斜长角闪岩原岩为岛弧拉斑玄武岩, 且其形成于不成熟的岛弧环境。

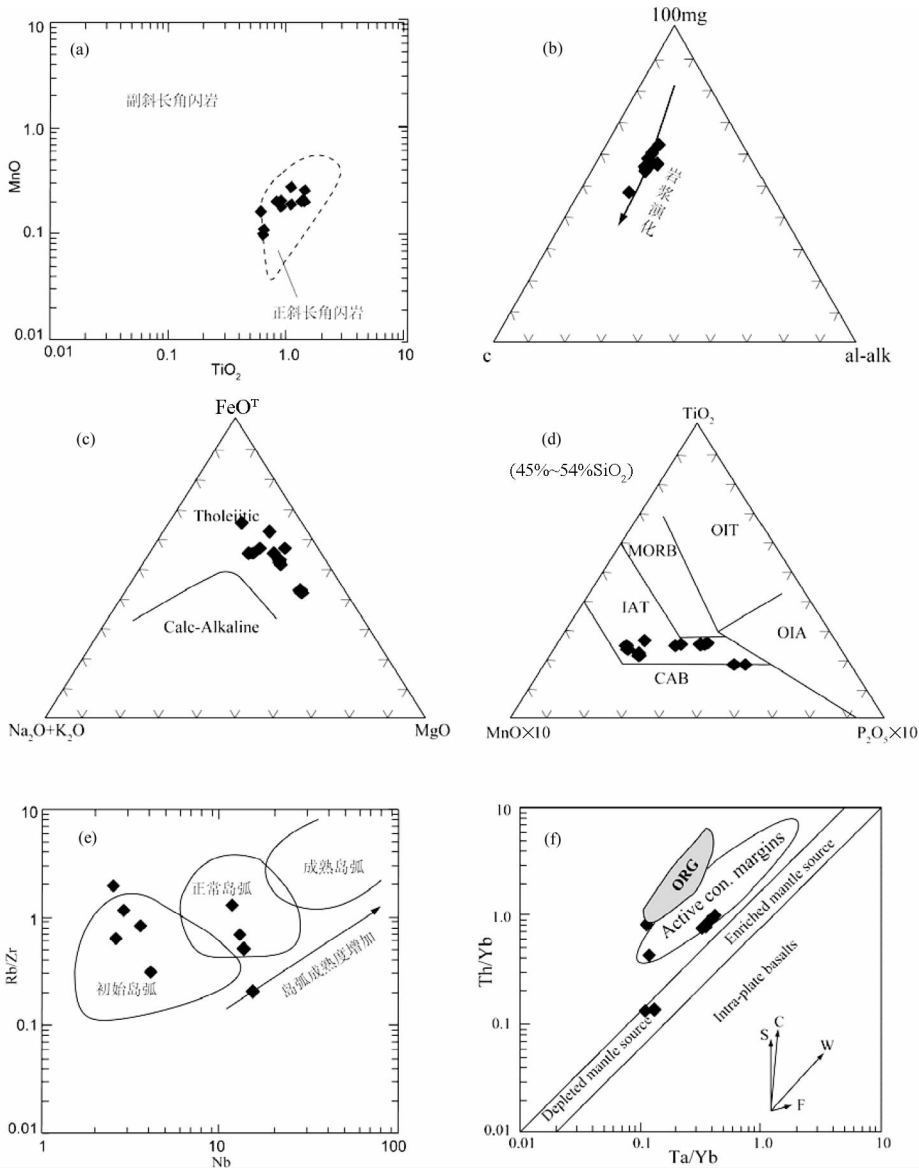


图5 红柳峡石榴石斜长角闪岩的岩石化学判别图

(a)- TiO_2 - MnO 判别图(据王仁民等,1987); (b)- c -(al-alk)- 100mg 判别图(据 Raith and Meisel,2001); (c)-AFM 判别图; (d)- $\text{MnO} \times 10$ - $\text{P}_2\text{O}_5 \times 10$ - TiO_2 判别图(据 Ellen,1983); (e)- Rb/Zr - Nb 判别图(据 Brown *et al.*,1984); (f)- Ta/Yb - Th/Yb 判别图(据 Raith and Meisel,2001)

Fig.5 Plots of garnet-bearing amphibolites from Hongliuxia

5 变质特征

5.1 矿物化学

主要矿物化学成分见表2。

石榴石 石榴石化学成分有一定的变化范围,端元组成为铁铝榴石(48.2%~53.0%),镁铝榴石(7.8%~15.3%),钙铝榴石(28.5%~33.4%),锰铝榴石(3.0%~8.4%)。从核部到幔部 MgO 含量明显升高,到边部又有略微降低的趋势, MgO 含量和 $\text{MgO}/(\text{MgO} + \text{FeO})$ 比值的最大值并未出现

在石榴石的最边缘位置;而 MnO 的含量则在核部最高,向外逐渐降低并在接近边部时达最低值,而后又有微弱的升高(图7),为典型的增温后又降温石榴石的环带特征(García-Casco *et al.*,2002),反映变斑晶石榴石是在温度升高的进变质作用阶段形成的。 CaO 的含量变化则比较微弱,但是相对较复杂,从核部到幔部有微弱的升高,到边部则显示出略微降低的趋势。

前人对石榴石环带的研究发现,随着岩石形成温度的升高,石榴石中 MgO 含量升高, MnO 含量降低;随着岩石形成压力的升高 CaO 含量升高(Enami,1998;Carswell *et al.*,2000;

表 2 石榴石斜长角闪岩中各种代表性矿物成分的电子探针分析结果 (wt%)

Table 2 Microprobe analyses for representative mineral compositions of garnet-bearing amphibolite (wt%)

矿物	Gr1C	Gr1R	Gr2C	Gr2R	Amp I	Amp II	Di1	Di2	Pl1	Pl2
SiO ₂	37.85	38.78	37.94	38.93	48.12	44.31	52.59	51.94	45.12	54.47
TiO ₂	0.12	0.05	0.14	0.06	0.4	0.52	0.04	0.08	0.02	0
Al ₂ O ₃	21.41	21.83	21.47	22.04	8.04	13	0.81	1.01	35.19	28.41
Cr ₂ O ₃	0.04	0	0.07	0.01	0.01	0.01	0.02	0	0	0.01
FeO	23.16	24.45	23.16	23.59	15.9	16.67	9.09	10.48	0.04	0.22
MnO	3.54	1.59	3.73	1.4	0.39	0.38	0.21	0.22	0.01	0.02
MgO	2.13	3.69	2.08	4	11.51	9.39	12.47	11.53	0	0
CaO	11.73	10.28	11.98	10.99	11.81	11.6	24.38	24.25	18.57	10.59
Na ₂ O	0.02	0	0.05	0	0.88	1.51	0.29	0.28	1.1	5.78
K ₂ O	0.01	0	0	0.01	0.19	0.4	0	0	0.03	0.06
Total	100	100.67	100.6	101.05	97.24	97.78	99.9	99.79	100.07	99.55
O 个数	12	12	12	12	23	23	6	6	8	8
Si	2.99	3.01	2.98	3	6.44	6.58	1.98	1.97	2.08	2.47
Ti	0.01	0	0.01	0	0.07	0.06	0	0	0	0
Al	1.99	2	1.99	2	2.44	2.27	0.04	0.05	1.91	1.52
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe ³⁺	0.01	0	0.01	0	0.49	0.52	0.04	0	0	0
Fe ²⁺	1.52	1.59	1.51	1.52	1.67	1.55	0.25	0.05	0	0
Mn	0.24	0.1	0.25	0.09	0.05	0.05	0.01	0.29	0	0
Mg	0.25	0.43	0.24	0.46	1.98	2.08	0.7	0.01	0	0
Ca	0.99	0.86	1.01	0.91	1.89	1.85	0.98	0.65	0.92	0.52
Na	0	0	0	0	0.4	0.08	0.02	0.02	0.1	0.51
K	0	0	0	0	0.09	15.48	0	0	0	0
Pyr	8.35	14.26	8.09	15.31						
Spe	7.89	3.5	8.24	3.04						
Gro	32.6	28.54	32.64	30.2						
Alm	50.71	53.00	50.14	50.62						

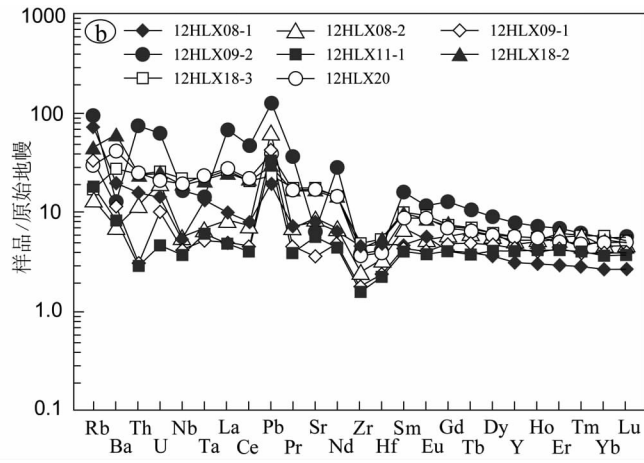
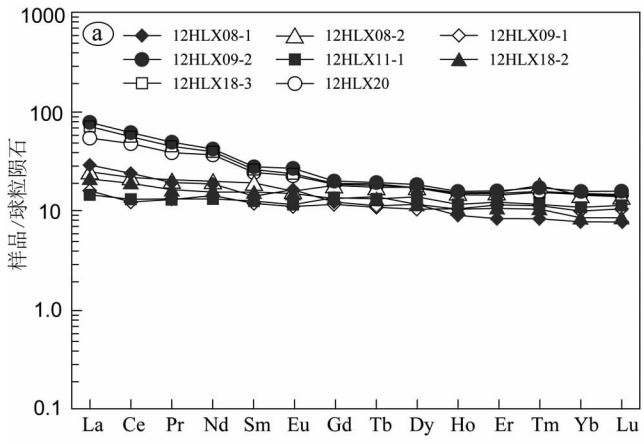


图 6 石榴石斜长角闪岩球粒陨石标准化稀土配分图(a)和原始地幔标准化蛛网图(b) (标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized rare earth element patterns and primitive mantle-normalized trace element spidergram for garnet-bearing amphibolites (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

García-Casco *et al.*, 2002)。红柳峡石榴石斜长角闪岩中石榴石变斑晶的 MgO、MnO 和 CaO 含量的变化特征表明,从石榴石的核部到边部温度在逐渐升高,在靠近最边缘的位置温度

略微降低。压力的变化与温度的变化有明显的差异,从核部到幔部压力逐渐增加达到最大值,然后又慢慢降低,到石榴石最边缘时达最小值,所以温度的最高点在时间上要稍落后

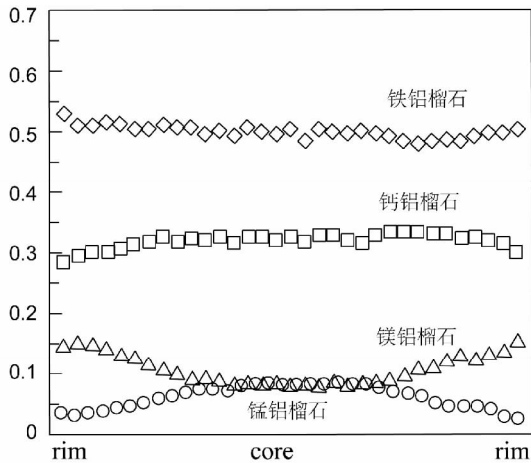


图7 石榴石斜长角闪岩中石榴石的成分剖面图

Fig. 7 Compositional profile of garnet in garnet-bearing amphibolite

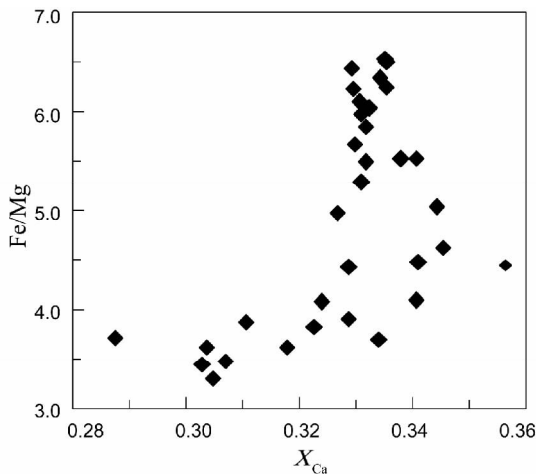


图8 石榴石斜长角闪岩中石榴石的 X_{Ca} -Fe/Mg 判别图

Fig. 8 Plot of Fe/Mg against X_{Ca} for garnet in garnet-bearing amphibolite

于压力的最高点。研究样品中石榴石的 X_{Ca} 和 Fe/Mg 比值具有明显的正相关性(图8),也可以说明石榴石压力的最大值($\max X_{Ca}$)和温度的最大值($\min Fe/Mg$)不是同时到达的(Carswell *et al.*, 2000)。

角闪石 石榴石斜长角闪岩中产出两类角闪石,一类是浅棕褐色角闪石,含量占角闪石总数的80%以上,主要产出在基质中,在角闪石分类图解中落在钙镁角闪石的区域内;另一类为绿色角闪石,产出于石榴石变斑晶、后成合晶和基质中,在角闪石分类图解中主要落在镁角闪石的区域内(图9a)。少数颗粒较粗大的角闪石,从中心到边缘颜色由浅褐色逐渐过渡到黄绿色,可能是成分差异造成的。在角闪石的Ti-Al^{IV}和Ti-Na+K与变质相关系图解中,绿色角闪石主要落在低角闪岩相区域,而浅棕褐色角闪石则主要落在高角闪岩

相区和高角闪岩相与麻粒岩相过渡的区域,且后者的形成压力在5kbar以上(图9b-d)。

辉石类矿物 主要产出于基质中,颗粒较小,半自形-他形柱状,具有典型的辉石式解理,据其矿物特征及成分判断,它们主要为透辉石(表2)。

长石类矿物 与角闪石一起构成石榴石冠状体的长石为中长石-拉长石($An = 39.1 \sim 60.0$,表2),基质中的长石为中长石($An = 33.2 \sim 42.3$,表2)。

5.2 变质演化及其PT条件

根据石榴石、角闪石、斜长石等矿物的成分特征及代表性矿物之间的反应关系,可以把红柳峡石榴石斜长角闪岩的变质演化划分为明显的四个阶段,各阶段的特征如下:

I. 早期进变质阶段(M1):以石榴石的核部成分及核部的包体矿物为特征,包体矿物集中在石榴石核部,分布非常密集且颗粒细小,主要为角闪石、斜长石和石英,它们在继续升温的过程中,由于峰期石榴石的包裹,限制它们的生长而保存在石榴石中,所以该阶段代表性的矿物组合为:Grt + Amp I + Pl I \pm Qtz,该矿物组合为典型的基性岩中低角闪岩相的矿物组合,相应的变质温压条件为: $T = 550 \sim 600^{\circ}C$, $P = 0.3 \sim 0.5Gpa$ (王仁民等,1989)。利用Grt-Amp温度计(Perchuk and Lavrent'yeva,1990)进行计算得出,该阶段的变质温度为:590~660 $^{\circ}C$ (表3)。造成这种差异的原因可能是,石榴石和角闪石在高角闪岩相的变质作用过程中发生再平衡的结果。

II. 变质高峰期阶段(M2):以变斑晶石榴石幔部成分及基质中的矿物为特征,基质中出现透辉石,主要矿物组合为:Grt + Amp II + Di + Pl II + Qtz,该矿物组合的出现说明已进入角闪麻粒岩相(卢良兆等,1996),与角闪石矿物成分投影结果相呼应。从石榴石的成分剖面也可以看出已达到峰期阶段(图7)。Grt + Cpx + Pl组合的出现表明变质的压力较高,用角闪石中Al含量压力计(Schmidt,1992)计算得出变质峰期压力为0.8~0.9Gpa。Grt-Amp温度计得出变质峰期的温度条件为650~780 $^{\circ}C$ (表3)。

III. 近等温减压变质阶段(M3):代表性结构为石榴石边缘形成由绿色角闪石和斜长石组成的“白眼圈”,它代表了以近等温减压为主的变质作用过程中矿物间的转化关系,该结构是石榴石在降压过程中水化形成的,发生的反应为:Grt + Qtz + H₂O \rightarrow Amp III + Pl III,且“白眼圈”中新生成的斜长石钙含量明显高于峰期阶段形成的斜长石(表2)。利用Pl-Amp温度计(Holland and Blundy,1994;Dale *et al.*,2000)得出变质温度为:630~700 $^{\circ}C$ (表3)。有些石榴石只残留很小的一部分,基本被角闪石和斜长石替代,但是仍保留石榴石假象。

IV. 晚期降温退变质阶段(M4):此阶段发生降温水化反应,单斜辉石开始向细粒他形的角闪石(Amp IV)和斜长石(Pl IV)转化,该阶段形成的角闪石明显不同于前三个阶段形成的角闪石,K₂O、Al₂O₃的含量明显较高。由于没有合适的

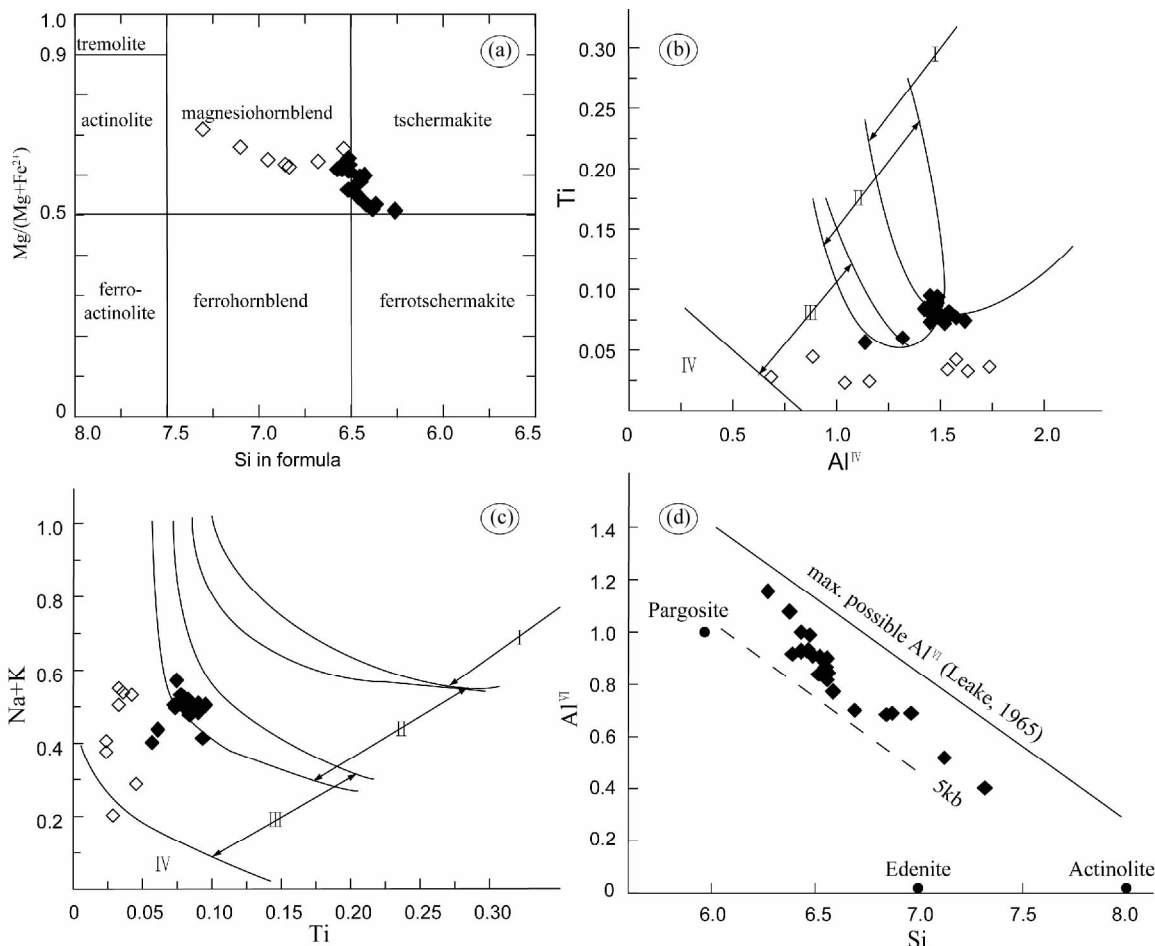


图9 石榴石斜长角闪岩中角闪石的成分特征

(a)-角闪石分类图(Leake *et al.*, 1997); (b)-角闪石的 Ti-Al^{IV} 与变质相关系图(据靳是琴, 1991); (c)-角闪石的 Ti-Na+K 与变质相关系图(据靳是琴, 1991); (d)-角闪石的 Al^{VI} 与 Si 关系图(据 Raase, 1974)。I-麻粒岩相; II-高角闪岩相; III-低角闪岩相; IV-绿片岩相; ◇-绿色角闪石; ◆-棕褐色角闪石

Fig.9 Compositional features of amphiboles from garnet-bearing amphibolite

表3 石榴石斜长角闪岩的温压计算结果

Table 3 Result of conventional thermobarometry of garnet-bearing amphibolite

阶段	温度计	温度(°C)	压力计	压力(GPa)
M1	Grt-Amp (Perchuk <i>et al.</i> , 1990)	590 ~ 660		
M2	Grt-Amp (Perchuk <i>et al.</i> , 1990)	650 ~ 780	角闪石中 Al 含量 (Schmidt, 1992)	0.8 ~ 0.9
M3	Pl-Amp (Holland and Blundy, 1994)	630 ~ 700		

温压计,不能得出具体的变质温度、压力。

根据不同变质阶段估算的 PT 结果,得出敦煌红柳峡地区石榴石斜长角闪岩的 PT 演化轨迹如图 10 所示。

6 锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素研究

锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素数据见表 4、表 5。

红柳峡石榴石斜长角闪岩中挑出的锆石透明,无色或淡黄色,具不规则形态。CL 图像显示有两种类型的锆石。第

一类锆石发育岩浆锆石特征的韵律环带,具有较窄的高亮蚀变边。第二类锆石结构较复杂,具有界限模糊的高亮部分和暗色部分,且高亮蚀变部分和暗色部分呈不规则的接触状态(图 11)。对 11 颗第一类型锆石核部的 12 个点进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分析,测试结果见表 4。所有分析点都集中分布在协和线上,加权平均年龄为 1611 ± 6Ma,代表岩石的结晶年龄(图 12)。所测锆石的 Th/U 比值介于 0.5 ~ 1.0 之间。由于高亮蚀变边太窄未对其进行测试。第二类锆石粒径较小,且结构复杂,未对其进行年龄测试。从两类锆

表4 石榴石斜长角闪岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 同位素分析结果

Table 4 LA ICP-MS analytical data of zircons of garnet-bearing amphibolite

测点号	Th U		Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)					协和度	
	($\times 10^{-6}$)			$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$		1σ
1	190	202	0.94	0.0989	0.0037	3.8881	0.1395	0.2852	0.0059	1603	69	1611	29	1618	30	99.5
2	428	409	1.05	0.0986	0.0043	3.8784	0.1616	0.2853	0.0067	1598	79	1609	34	1618	33	99.3
3	187	328	0.57	0.0991	0.0019	3.8840	0.0721	0.2843	0.0038	1607	36	1610	15	1613	19	99.8
4	156	172	0.91	0.1000	0.0036	3.9146	0.1336	0.2839	0.0057	1624	65	1617	28	1611	28	100.4
5	188	207	0.91	0.0993	0.0026	3.8991	0.0954	0.2848	0.0045	1611	47	1614	20	1616	22	99.8
6	158	361	0.44	0.0980	0.0029	3.8375	0.1064	0.2840	0.0048	1586	53	1601	22	1612	24	99.1
7	61	95	0.64	0.0996	0.0036	3.9003	0.1355	0.2839	0.0057	1618	66	1614	28	1611	29	100.2
8	186	244	0.76	0.1000	0.0033	3.9017	0.1225	0.2831	0.0053	1623	60	1614	25	1607	27	100.6
9	362	352	1.03	0.0995	0.0020	3.8987	0.0744	0.2841	0.0039	1615	37	1613	15	1612	19	100.1
10	202	388	0.52	0.0988	0.0027	3.8610	0.0987	0.2835	0.0046	1601	49	1606	21	1609	23	99.7
11	380	429	0.88	0.0989	0.0024	3.8810	0.0879	0.2846	0.0043	1604	44	1610	18	1614	21	99.6
12	147	178	0.83	0.0993	0.0027	3.8881	0.1019	0.2839	0.0047	1611	50	1611	21	1611	23	100.0

表5 石榴石斜长角闪岩锆石 LA-ICPMS Lu-Hf 同位素组成

Table 5 LA-ICPMS Lu-Hf isotopic data of zircons of garnet-bearing amphibolite

分析点	年龄 (Ma)	$\frac{^{176}\text{Yb}}{^{177}\text{Hf}}$	2σ	$\frac{^{176}\text{Lu}}{^{177}\text{Hf}}$	2σ	$\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}}$	2σ	$\frac{^{176}\text{Hf}}{^{177}\text{Hf}}$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM1}}(\text{Ma})$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ma})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
1	1603	0.037572	0.000364	0.001067	0.000012	0.281850	0.000016	0.282080	2.0	1976	2195	-0.97
2	1598	0.031295	0.000027	0.000902	0.000001	0.281886	0.000017	0.282078	3.5	1919	2103	-0.97
3	1607	0.052544	0.000196	0.001447	0.000005	0.281879	0.000015	0.282085	2.4	1957	2162	-0.96
4	1624	0.025656	0.000141	0.000729	0.000004	0.281841	0.000016	0.282079	2.0	1972	2193	-0.98
5	1611	0.029661	0.000785	0.000841	0.000023	0.281841	0.000016	0.282079	1.9	1978	2199	-0.97
6	1586	0.056942	0.000303	0.001571	0.000007	0.281881	0.000018	0.282089	2.3	1959	2167	-0.95
7	1618	0.040516	0.000841	0.001187	0.000024	0.281854	0.000016	0.282082	1.9	1977	2195	-0.96
8	1623	0.043148	0.000160	0.001187	0.000007	0.281886	0.000015	0.282086	2.9	1933	2129	-0.96
9	1615	0.052004	0.000456	0.001426	0.000015	0.281826	0.000016	0.282079	0.7	2029	2272	-0.96
10	1601	0.032130	0.000608	0.000887	0.000017	0.281848	0.000017	0.282074	2.2	1971	2184	-0.97
11	1604	0.051348	0.000236	0.001446	0.000008	0.281847	0.000016	0.282084	1.3	2000	2230	-0.96
12	1611	0.043907	0.000544	0.001358	0.000033	0.281834	0.000018	0.282079	1.1	2014	2249	-0.96

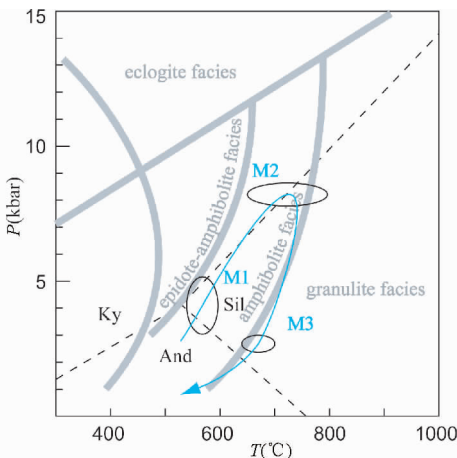
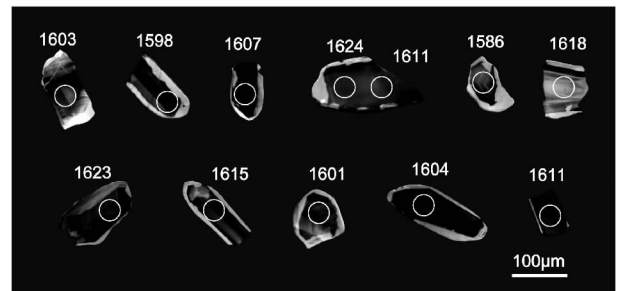
图10 石榴石斜长角闪岩的 P - T 演化轨迹Fig. 10 P - T path of garnet-bearing amphibolites

图11 石榴石斜长角闪岩中锆石 CL 图像

Fig. 11 Representative CL images of zircons from garnet-bearing amphibolite

石的结构形态推测,该区应该存在一期熔体参与的热事件。

12个测试点的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为正值(图13),位于0.7~3.5之间,两阶段模式年龄位于2.10~2.27Ga之间,远大于其形成年龄(大约1.61Ga),表明锆石来自古元古代地壳物质的

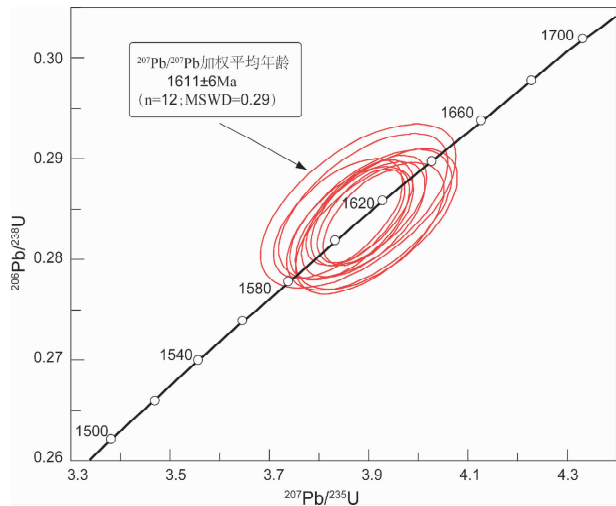
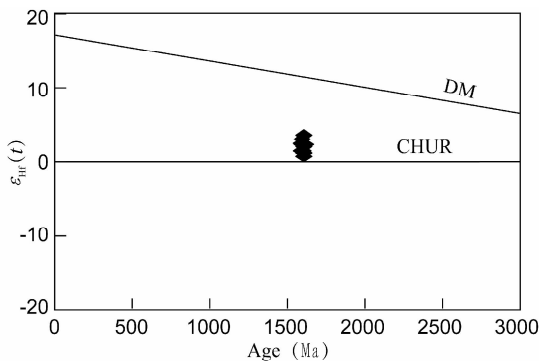


图 12 石榴石斜长角闪岩的锆石 U-Pb 年龄协和图

Fig. 12 U-Pb concordia diagram for zircons of the garnet-bearing amphibolite

图 13 石榴石斜长角闪岩 ϵ_{Hf} 与年龄相关图Fig. 13 Plot of ϵ_{Hf} values versus U-Pb ages of zircons from garnet-bearing amphibolite

再造。

7 讨论和结论

塔里木克拉通是指由“塔里木造山运动”所形成的一个统一的大陆块体,该地体前寒武纪地质历史最早可追溯到 3600Ma 以前,新太古代为地壳再造和初始地壳增生阶段,古元古代早期(2500 ~ 2300Ma)经历陆内裂解,晚期(1900Ma)则存在一次重要的热-构造运动,中-新元古代为古塔里木板块的形成阶段,即塔里木运动,该构造事件使塔里木完成了从相对活动到相对稳定状态的转变(陆松年等,2006;吴国干,2002)。

前人在研究塔里木盆地前寒武纪基底与超大陆的关系时发现,在塔北、塔东及其邻近地区广泛存在 1400 ~ 1600Ma 的年龄数据(陆松年和袁桂邦,2003;邬光辉等,2010),此期

年龄代表的构造事件与哥伦比亚超大陆的裂解时间一致(Rogers and Santosh,2002,2003),可能预示着塔北古地体与哥伦比亚超大陆有一定的联系,塔北局部地体可能为哥伦比亚超大陆的裂解产物(邬光辉等,2010)。

敦煌地块位于塔里木盆地的东北缘,广泛出露一套早前寒武纪岩石,为塔里木盆地的基底岩石,该地块主要由敦煌群组成,红柳峡地区出露的敦煌群主要为一套变质的表壳岩,其中出露有含有石榴石的斜长角闪岩,该类岩石的原岩为岛弧拉斑玄武岩,形成于不成熟的岛弧环境,且在其后的构造演化中经历了高角闪岩相的变质作用。本文得出该岩石中锆石结晶年龄为 $1611 \pm 6\text{Ma}$,故推断在中元古代早期该区有一次岩浆-热事件。研究中我们得出,红柳峡石榴石斜长角闪岩的 SiO_2 含量位于 45.1% ~ 49.3% 之间, Al_2O_3 在 12.9% ~ 15.9% 之间,全铁总含量在 10.8% ~ 14.5% 之间变化, Fe/Mg 比值变化于 0.8 ~ 1.8 之间,且 Cr、Ni 含量较低,以上元素含量特点说明岩石经历了显著的结晶分异作用,对于岛弧拉斑玄武岩而言,最合理的解释是,他们由地幔楔脱水熔融形成,随后经历了强烈的结晶分异作用(Tarney *et al.*, 1981),而通过变质作用研究我们得出,红柳峡石榴石斜长角闪岩完整记录了从早期升温升压的进变质到后来的近等温减压再到最后的降压退变质的一个顺时针的 P - T - t 演化轨迹,所以我们的研究结果反映的构造演化历史为:板块俯冲到地壳深部遭受高温变质作用,然后该区出现拉张的构造体制,随之地壳减薄,但是原来处于地壳深部的岩石并未出现大幅度折返和抬升,而是仍然处于原来的深度,慢慢的冷却直至正常的地温梯度。结合前人的研究成果,我们推断塔里木板块可能与哥伦比亚超大陆的裂解有联系,且当时位于塔里木东北缘的敦煌地块还是岛弧的构造环境,后来在中元古代塔里木运动中有一次板块俯冲碰撞事件,引起了一次高级变质作用(高角闪岩相),使当时的基性火山岩变质形成如今含有石榴石的斜长角闪岩。

致谢 在样品处理和测试分析过程中,得到了河北区域地质调查大队李林庆老师、中国科学院地质与地球物理研究所李献华老师、杨进辉老师、杨岳衡老师、李禾老师、王红月老师等的大力帮助;在成文过程中,得到了俞良军老师的指导和帮助;在此一并表示感谢。

谨以此文纪念从柏林先生逝世十周年!另,本文完稿时惊闻叶凯老师猝然去世,我们感到十分悲痛,深感失去了一个良师益友,仅以此文寄托我们的哀思和怀念之情,愿他一路走好!

References

- Brouxel M, Lecuyer C and Lapierre H. 1989. Diversity of magma types in a Lower Paleozoic island arc-marginal basin system (Eastern Klamath Mountains, California, U. S. A.). *Chemical Geology*, 77(3-4):

251–264

- Brown GC, Thorpe RS and Webb PC. 1984. The geochemical characteristics of granitoids in contrasting arcs and comments on magma sources. *Journal of the Geological Society*, 141 (3): 413–426
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Gansu Province. 1989. Regional Geology of Gansu Province. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Carswell DA, Wilson RN and Zhai M. 2000. Metamorphic evolution, mineral chemistry and thermobarometry of schists and orthogneisses hosting ultra-high pressure eclogites in the Dabieshan of central China. *Lithos*, 52(1–4): 121–155
- Che ZC, Liu L, Liu HF and Luo JH. 1995. Discovery and occurrence of the high-pressure metamorphic pelitic rocks in Altun. *Chinese Science Bulletin*, 40(14): 1298–1301 (in Chinese)
- Dale J, Holland T and Powell R. 2000. Hornblende-garnet-plagioclase thermobarometry: A natural assemblage calibration of the thermodynamics of hornblende. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 140(3): 353–362
- Ellen DM. 1983. MnO/TiO₂/P₂O₅: A minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 62(1): 53–62
- Enami M. 1998. Pressure-Temperature path of Sanbagawa prograde metamorphism deduced from grossular zoning of garnet. *Journal of Metamorphic Geology*, 16(1): 97–106
- García-Casco A, Torres-Roldán RL, Millán G *et al.* 2002. Oscillatory zoning in eclogitic garnet and amphibole, northern serpentinite melange, Cuba; A record of tectonic instability during subduction? *Journal of Metamorphic Geology*, 20(6): 581–598
- Gao ZJ, Chen JL, Lu SN *et al.* 1993. The Precambrian Geology in Northern Xinjiang. *Precambrian Geology No. 6*. Beijing: Geological Publishing House, 1–171 (in Chinese)
- Ge XH and Liu JL. 2000. Broken “Western China Craton”. *Acta Petrologica Sinica*, 16(1): 59–66 (in Chinese with English abstract)
- Guo ZJ, Zhang ZC and Wang JJ. 1998. The Sm-Nd isochron age and tectonic significance of the ophiolite belt in the northern margin of the Altun. *Chinese Science Bulletin*, 43(18): 981–984 (in Chinese)
- Guo ZJ, Zhang ZC, Liu SW and Li HM. 2003. U-Pb geochronological evidence for the Early Precambrian complex of the Tarim Craton, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 19(3): 537–542 (in Chinese with English abstract)
- Harley SL. 1998. Ultrahigh temperature granulite metamorphism (1050°C, 12kbar) and decompression in garnet (Mg70)-orthopyroxene-sillimanite gneisses from the Rauer Group, East Antarctica. *Journal of Metamorphic Geology*, 16(4): 541–562
- Holland T and Blundy J. 1994. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 116(4): 433–447
- Hu AQ, Jahn B, Zhang GX *et al.* 2000. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in northern Xinjiang; Nd isotopic evidence. Part I. Isotopic characterization of basement rocks. *Tectonophysics*, 328(1–2): 15–51
- Jin SQ. 1991. Compositional characteristics of the calcic amphibole from different regional metamorphic phase. *Chinese Science Bulletin*, 36(11): 851 (in Chinese)
- Knoper MW and Condie KC. 1988. Geochemistry and petrogenesis of Early Proterozoic amphibolites, west-central Colorado, U. S. A. *Chemical Geology*, 67(3–4): 209–225
- Leake BE. 1964. The chemical distinction between ortho- and para-amphibolites. *Journal of Petrology*, 5(2): 238–254
- Leake BE, Woolley AR, Arps CES *et al.* 1997. Nomenclature of amphiboles; Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. *American Mineralogist*, 82(9–10): 1019–1037
- Liu YS, Yu HF, Xin HT, Lu SN, Xiu QY and Li Q. 2009. Tectonic units division and Precambrian significant geological events in Altyn Tagh Mountain, China. *Geological Bulletin of China*, 28(10): 1430–1438 (in Chinese with English abstract)
- Long XP, Sun M, Yuan C *et al.* 2012. Zircon REE patterns and geochemical characteristics of Paleoproterozoic anatectic granite in the northern Tarim Craton, NW China; Implications for the reconstruction of the Columbia supercontinent. *Precambrian Research*, 222–223: 474–487
- Lu LZ, Xu XC and Liu FL. 1996. The Early Precambrian Khondalite Series in Northern China. Changchun: Changchun Publishing House, 1–276 (in Chinese)
- Lu SN and Yuan GB. 2003. Geochronology of Early Precambrian magmatic activities in Aketashitage, East Altyn Tagh. *Acta Geologica Sinica*, 77(1): 61–68 (in Chinese with English abstract)
- Lu SN, Yu HF and Li HK. 2006. Research on Precambrian Major Problems in China. Beijing: Geological Publishing House, 1–206 (in Chinese)
- Lu SN, Zhao GC, Wang HC and Hao GJ. 2008. Precambrian metamorphic basement and sedimentary cover of the North China Craton; A review. *Precambrian Research*, 160(1–2): 77–93
- Luo Y, Sun M, Zhao GC *et al.* 2008. A comparison of U-Pb and Hf isotopic compositions of detrital zircons from the North and South Liaohu groups; Constraints on the evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton. *Precambrian Research*, 163(3–4): 279–306
- Mei HL, Yu HF, Li Q and Zuo GC. 1997. Preliminary litho-tectonic framework of Early Precambrian rocks in Dunhuang-Beishan area, Gansu, West China. *Progress in Precambrian Research*, 20(4): 47–54 (in Chinese with English abstract)
- Mei HL, Yu HF, Lu SN, Li Q, Lin YX and Zuo YC. 1998. Archean tonalite in the Dunhuang, Gansu Province; Age from the U-Pb single zircon and Nd isotope. *Progress in Precambrian Research*, 21(2): 41–45 (in Chinese with English abstract)
- Pearce JA. 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: Hawkesworth CJ and Norry MJ (eds.). *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*. Cheshire: Shiva Publications, 230–249
- Perchuk LL and Lavrent'yeva IV. 1990. Garnet-orthopyroxene and garnet-amphibole geothermobarometry: Experimental data and thermodynamics. *International Geology Review*, 32(5): 486–507
- Raase P. 1974. Al and Ti contents of hornblende, indicators of pressure and temperature of regional metamorphism. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 45(3): 231–236
- Raith JG and Meisel T. 2001. Metabasites along the amphibolite-granulite facies transition in the Okiep copper district, South Africa. *South African Journal of Geology*, 104(1): 77–100
- Rogers JJW and Santosh M. 2002. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic Supercontinent. *Gondwana Research*, 5(1): 5–22
- Rogers JJW and Santosh M. 2003. Supercontinents in Earth History. *Gondwana Research*, 6(3): 357–368
- Schmidt MW. 1992. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure; An experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110(2–3): 304–310
- Shu LS, Deng XL, Zhu WB *et al.* 2011. Precambrian tectonic evolution of the Tarim Block, NW China: New geochronological insights from the Quruqtagh domain. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(5): 774–790
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313–345
- Tang Z, Ma ZP, Li XM and Sun JM. 2011. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of amphibolites in the southern margin of Altyn Tagh, China and its geological implication. *Geological Bulletin of China*, 31(1): 51–57 (in Chinese with English abstract)
- Tarney J, Saunders AD, Matthey DP *et al.* 1981. Geochemical aspects of back-arc spreading in the Scotia Sea and western Pacific and

- Discussion. *Philosophical Transactions of the Royal Society of A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 300(1454): 263-285
- Volkova NI and Budanov VI. 1999. Geochemical discrimination of metabasalt rocks of the Fan-Karategin transitional blueschist-greenschist belt, South Tianshan, Tajikistan; Seamount volcanism and accretionary tectonics. *Lithos*, 47(3-4): 201-216
- Wang RM, He GP, Chen ZZ, Zheng SY and Geng YS. 1987. *Discrimination Diagrams for Metamorphic Rocks*. Beijing: Geological Publishing House, 1-199 (in Chinese)
- Wang RM, Yu ZD and Fu GQ. 1989. *Metamorphic Rocks*. Beijing: Geological Publishing House, 1-239 (in Chinese)
- Wang YX, Mooney WD, Yuan XC and Coleman RG. 2003. The crustal structure from the Altai Mountains to the Altyn Tagh Fault, Northwest China. *Journal of Geophysical Research*, 108(B6): 2322-2337
- Winchester JA and Floyd PA. 1976. Geochemical magma type discrimination; Application to altered and metamorphosed basic igneous rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 28(3): 459-469
- Winchester JA and Floyd PA. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20: 325-343
- Wu FY, Yang YH, Xie LW *et al.* 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 234(1-2): 105-126
- Wu GG, Li HQ, Chu BJ, Xia B, Wang H and Bu GM. 2002. Geotectonic evolution and petroleum accumulation in East Tarim. *Geotectonic et Metallogenia*, 26(3): 229-234 (in Chinese with English abstract)
- Wu GH, Sun JH, Guo QY, Tang T, Chen ZY and Feng XJ. 2010. The distribution of detrital zircon U-Pb ages and its significance to Precambrian basement in Tarim Basin. *Acta Geoscientia Sinica*, 31(1): 65-72 (in Chinese with English abstract)
- Xu P, Wu FY, Xie LW *et al.* 2004. Hf isotopic compositions of the standard zircons for U-Pb dating. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1642-1648
- Yu HF, Mei HL and Li Q. 1998. The characteristics of Archean khondalite series in Dunhuang, Gansu Province. *Progress in Precambrian Research*, 21(1): 19-25 (in Chinese with English abstract)
- Yuan HL, Wu FY, Hao S, Liu XM, Xu P and Sun DY. 2003. Laser probe zircon U-Pb dating and REE composition analysis of the Cenozoic intrusions, NE China. *Chinese Science Bulletin*, 48(14): 1511-1610 (in Chinese)
- Zhang JX, Li HK, Meng FC, Xiang ZQ, Yu SY and Li JP. 2011. Polyphase tectonothermal events recorded in "metamorphic basement" from the Altyn Tagh, the southeastern margin of the Tarim basin, western China; Constraint from U-Pb zircon geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 7(1): 23-46 (in Chinese with English abstract)
- Zhou Y and Pan YS. 1998. Determination of the dextral slip of Mangya-Subei segment of Altyn fault. *Scientia Geologica Sinica*, 33(1): 9-16 (in Chinese with English abstract)
- 出版社, 1-171
- 葛肖虹, 刘俊来. 2000. 被肢解的“西域克拉通”. *岩石学报*, 16(1): 59-66
- 郭召杰, 张志诚, 王建君. 1998. 阿尔金山北缘蛇绿岩带的 Sm-Nd 等时线年龄及其大地构造意义. *科学通报*, 43(18): 981-984
- 郭召杰, 张志诚, 刘树文, 李惠民. 2003. 塔里木克拉通早前寒武纪基底层序与组合: 颗粒锆石 U-Pb 年龄新证据. *岩石学报*, 19(3): 537-542
- 靳是琴. 1991. 不同区域变质相中钙质角闪石的成分特征. *科学通报*, 36(11): 851
- 刘永顺, 于海峰, 辛后田, 陆松年, 修群业, 李铨. 2009. 阿尔金山地区构造单元划分和前寒武纪重要地质事件. *地质通报*, 28(10): 1430-1438
- 卢良兆, 徐学纯, 刘福来. 1996. 中国北方早前寒武纪孔兹岩系. 长春: 长春出版社, 1-276
- 陆松年, 袁桂邦. 2003. 阿尔金山阿克塔什塔格早前寒武纪岩浆活动的年代学证据. *地质学报*, 77(1): 61-68
- 陆松年, 于海峰, 李怀坤. 2006. 中国前寒武纪重大地质问题研究. 北京: 地质出版社, 1-206
- 梅华林, 于海峰, 李铨, 左国朝. 1997. 甘肃敦煌-北山早前寒武纪岩石组合-构造初步框架. 前寒武纪研究进展, 20(4): 47-54
- 梅华林, 于海峰, 陆松年, 李惠民, 李铨, 林源贤, 左义成. 1998. 甘肃敦煌太古宙英云闪长岩: 单颗粒锆石 U-Pb 年龄和 Nd 同位素. 前寒武纪研究进展, 21(2): 41-45
- 唐卓, 马中平, 李向民, 孙吉明. 2011. 阿尔金山南缘清水泉地区斜长角闪岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义. *地质通报*, 30(1): 51-57
- 王仁民, 贺高品, 陈珍珍, 郑松彦, 耿元生. 1987. 变质岩原岩图解判别法. 北京: 地质出版社, 1-199
- 王仁民, 游振东, 富公勤. 1989. 变质岩石学. 北京: 地质出版社
- 邬光辉, 孙建华, 郭群英, 唐涛, 陈志勇, 冯晓军. 2010. 塔里木盆地碎屑锆石年龄分布对前寒武纪基底的指示. *地球学报*, 31(1): 65-72
- 吴国干, 李华启, 初宝洁, 夏斌, 王核, 卜国民. 2002. 塔里木盆地东部大地构造演化与油气成藏. *大地构造与成矿学*, 26(3): 229-234
- 于海峰, 梅华林, 李铨. 1998. 甘肃敦煌地区太古宙孔兹岩系特征. 前寒武纪研究进展, 21(1): 19-25
- 袁洪林, 吴福元, 高山, 柳小明, 徐平, 孙德有. 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): 1511-1610
- 张建新, 李怀坤, 孟繁聪, 相振群, 于胜尧, 李金平. 2011. 塔里木盆地东南缘(阿尔金山)“变质基底”记录的多期构造热事件: 锆石 U-Pb 年代学的制约. *岩石学报*, 27(1): 23-46
- 周勇, 潘裕生. 1998. 茫崖-肃北段阿尔金山断裂右旋走滑运动的确定. *地质科学*, 33(1): 9-16

附中文参考文献

- 车自成, 刘良, 刘洪福, 罗金海. 1995. 阿尔金山地区高压变质泥质岩石的发现及其产出环境. *科学通报*, 40(14): 1298-1301
- 甘肃省地质矿产局. 1989. 甘肃省区域地质志. 北京: 地质出版社
- 高振家, 陈晋谦, 陆松年等. 1993. 新疆北部前寒武系. 北京: 地质