

甘肃敦煌观音沟地区变质作用初步研究*

彭涛 王浩 陈泓旭 孟洁 卢俊生 王国栋 吴春明**

PENG Tao, WANG Hao, CHEN HongXu, MENG Jie, LU JunSheng, WANG GuoDong and WU ChunMing**

中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049

College of Earth Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2013-07-15 收稿, 2013-09-30 改回.

Peng T, Wang H, Chen HX, Meng J, Lu JS, Wang GD and Wu CM. 2014. Preliminary report on the metamorphic evolution of the Guanyingou amphibolites, Dunhuang Metamorphic Complex, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 30(2): 503–511

Abstract Exposed in the Guanyingou area, Mt. Sanweishan, Dunhuang, NW China, the garnet-bearing amphibolites record different metamorphic mineral assemblages formed during three metamorphic stages. The prograde assemblage (M_1), enclosed in garnet porphyroblast, is consisted of hornblende, plagioclase and quartz and the P - T conditions were estimated to be 550 ~ 575°C/5.2 ~ 5.7 kbar (epidote amphibolite facies). The metamorphic peak assemblage (M_2) is composed mainly of garnet and hornblende, plagioclase, quartz and locally clinopyroxene in the matrix, with P - T conditions estimated to be of > 670°C and > 11.9 kbar (amphibolite facies). The retrograde assemblage (M_3) is the so-called “white-eye socket” symplectite rimming garnet porphyroblast, consisted mainly of hornblende, plagioclase and quartz, and were formed at about 590 ~ 640°C/4.3 ~ 5.9 kbar (amphibolite facies). Micropetrographic investigation and thermobarometric computation show that the amphibolites experienced clockwise, west-Alpine type P - T paths including near isothermal decomposition (ITD) segments, suggesting that the terrane involved in a collisional orogenic process, possibly in the Devonian.

Key words Amphibolite; Geothermometer; Geobarometer; Metamorphic P - T path; Dunhuang Metamorphic Complex

摘要 敦煌东南三危山观音沟地区, 出露有石榴斜长角闪片麻岩, 岩石中保存了三个阶段的变质矿物组合。进变质阶段的矿物组合(M_1)以石榴子石变斑晶中的包裹体矿物组合($Hbl_1 + Pl_1 + Qtz_1$)为代表, 形成条件约为 550 ~ 575°C/5.2 ~ 5.7 kbar (绿帘角闪岩相)。变质高峰期矿物组合(M_2)主要由石榴子石变斑晶和基质矿物($Hbl_2 + Pl_2 + Qtz_2 \pm Cpx_2$)组成, 形成温度 > 670°C, 压力 > 11.9 kbar (角闪岩相)。退变质阶段矿物组合(M_3)为后成合晶矿物组合($Hbl_3 + Pl_3 + Qtz_3$), 形成条件约为 590 ~ 640°C/4.3 ~ 5.9 kbar (角闪岩相)。观音沟石榴斜长角闪片麻岩记录了包含进变质、变质高峰、退变质过程的造山过程“西阿尔卑斯”型 P - T 轨迹, 其中退变质阶段具有明显的近等温降压特征。变质作用 P - T 轨迹指示本地区可能经历了俯冲-碰撞-快速抬升的造山过程。结合年代学资料, 该期造山事件可能发生于泥盆纪。

关键词 斜长角闪片麻岩; 矿物温度计; 矿物压力计; 变质作用 P - T 轨迹; 敦煌变质杂岩

中图法分类号 P588.345

1 引言

塔里木克拉通北接天山山脉、南临西昆仑山脉、东南临阿尔金山脉、东端临祁连山脉。在中国三大古老克拉通(华

北、华南、塔里木)中, 塔里木克拉通(图 1)基底形成方面的地质研究程度是最弱的, 部分原因是其基底岩石出露太少。塔里木克拉通腹地被沙漠掩盖, 古老变质基底主要出露于塔里木盆地边缘, 即盆地东北缘的库鲁克塔格地区(Shu *et al.*, 2011)、盆地东南缘的阿尔金山-敦煌地区、盆地西南缘的铁

* 本文受国家自然科学基金项目(41372199, 41225007)资助。

第一作者简介: 彭涛, 男, 1990 年生, 硕士生, 变质地质学专业, E-mail: pengtao13@mails.ucas.ac.cn

** 通讯作者: 吴春明, 男, 1967 年生, 博士, 教授, 变质地质学专业, E-mail: wucm@ucas.ac.cn

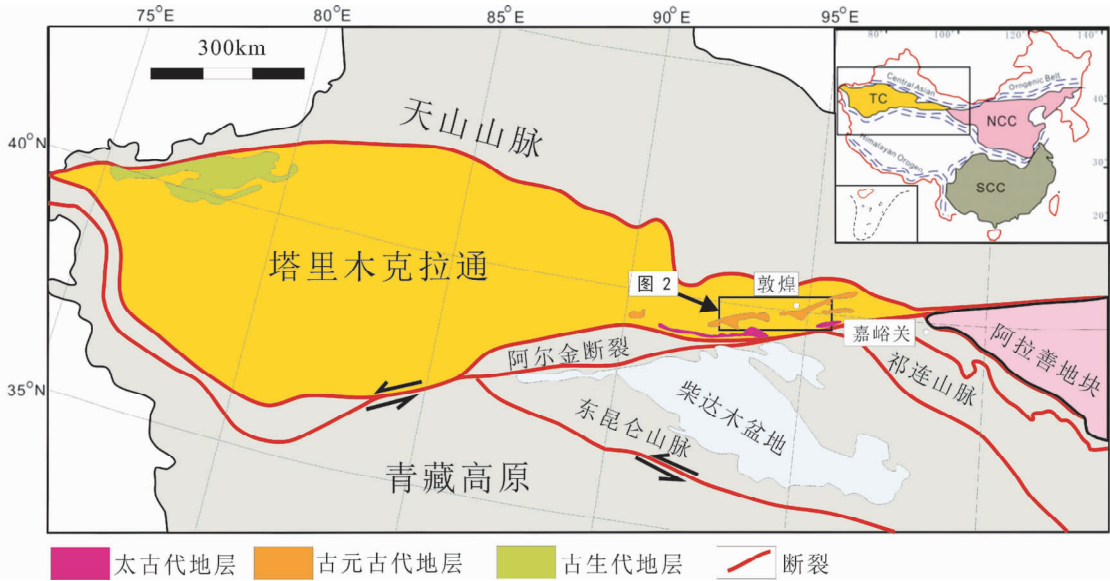


图1 敦煌地块及其邻区大地构造位置图(据 Zhang *et al.*, 2013, 有删改)

Fig. 1 The geological sketch map showing tectonic location of the Dunhuang Block and its adjacent regions (simplified after Zhang *et al.*, 2013)

克里克-西昆仑地区、盆地西北缘的阿克苏-柯坪地区(张建新等, 2011)。在阿尔金山东端阿克塔什塔格地区古老花岗岩麻岩中发现了 3.61Ga 的继承锆石,这是塔里木克拉通存在始太古代基底的重要证据(李惠民等, 2001)。此外,阿克塔什塔格地区还发现有 ~2.6Ga 的花岗质片麻岩(辛后田等, 2011)。塔里木克拉通可能经历了 Columbia 超大陆和 Rodinia 超大陆聚合事件,以及 Rodinia 超大陆的裂解事件(Shu *et al.*, 2011)。

敦煌地块的大地构造归属,目前还不明确。一些学者认为敦煌地块是塔里木克拉通的结晶基底,也有学者认为敦煌地块的早前寒武纪地质演化史与华北克拉通类似(Zhang *et al.*, 2013)。鉴于该区广布发育变质反应结构的变质岩石,因此是适宜于从变质演化的角度,深入解剖其地质演化过程,为探讨其大地构造归属提供科学依据。

2 区域地质背景

敦煌变质杂岩出露于塔里木盆地东南缘(图1),被新生代区域性断裂分割为几个离散的变质地质体。敦煌地区出露的古老变质杂岩,1938 年最初被孙健初命名为“敦煌群”,是经受强烈构造变形-变质作用改造的复杂岩石单元组合。区内灰色片麻岩类广泛出露,占该区变质岩石出露面积的一半以上。区内出露有变质碎屑岩、变质泥质岩、变质泥灰岩、变质碳酸盐岩、变质基性火山岩、变质花岗岩类等变质岩石(陆松年, 2002)。除个别地区副变质岩类较大面积出露外,其他地区的副变质岩类(包括孔兹岩系)呈条带状或透镜体状,断续分布于灰色片麻岩中(许敬龙等, 1997; 梅华林等,

1997; 于海峰等, 1998)。

目前已有有一些年代学数据表明,敦煌地区大面积出露的变质岩石,是形成于前寒武纪期间的古老岩石。例如,李志琛(1994)测得红柳峡一带斜长角闪岩全岩 Sm-Nd 等时线年龄 3.49 ~ 2.94Ga,红柳峡鹰嘴山掉石沟一带斜长角闪岩全岩 Sm-Nd 等时线年龄 2.95Ga。王忠梅等(2013)测得红柳峡河谷石榴斜长角闪岩原岩结晶年龄约为 1.61Ga。许敬龙等(1997)测得鸣沙山斜长角闪岩 Sm-Nd 等时线年龄介于 1.83 ~ 1.71Ga 之间。在石包城水峡口包裹有斜长角闪岩等变质岩的 TTG 片麻岩体中,梅华林等(1998)测得了 2.67Ga 的岩浆锆石 U-Pb 年龄,Zhang *et al.* (2013)获得了约 2.55Ga 的岩浆锆石 U-Pb 年龄,赵燕等(2013)测得了约 2.56 ~ 2.51Ga 的岩浆锆石 U-Pb 年龄。

根据变质锆石或锆石变质增生边的 U-Pb 定年,发现敦煌变质杂岩区(图2)存在明显的多期变质-热事件。例如,榆林窟附近高压基性麻粒岩中变质锆石 U-Pb 年龄约为 0.44 ~ 0.43Ga (Zong *et al.*, 2012),多坝沟地区含榴黑云斜长片麻岩中锆石变质增生边 U-Pb 年龄介于 0.46 ~ 0.42Ga 之间(孟繁聪等, 2011),石包城水峡口含榴斜长角闪岩中变质锆石 U-Pb 年龄约为 1.81Ga (赵燕等, 2013) 或 1.85 ~ 1.82Ga (Zhang *et al.*, 2013)。这些定年资料表明,敦煌变质杂岩区很可能经历了几个不同时期的变质事件。果真如此的话,这些变质事件的特征、*P-T* 演化、大地构造意义,需要深入研究和明确。

目前,敦煌地块变质作用研究的报道(Zong *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2012, 2013; 王忠梅等, 2013)还很少,变质作用研究也很不系统。三危山地区尚无变质作用研究的报道。

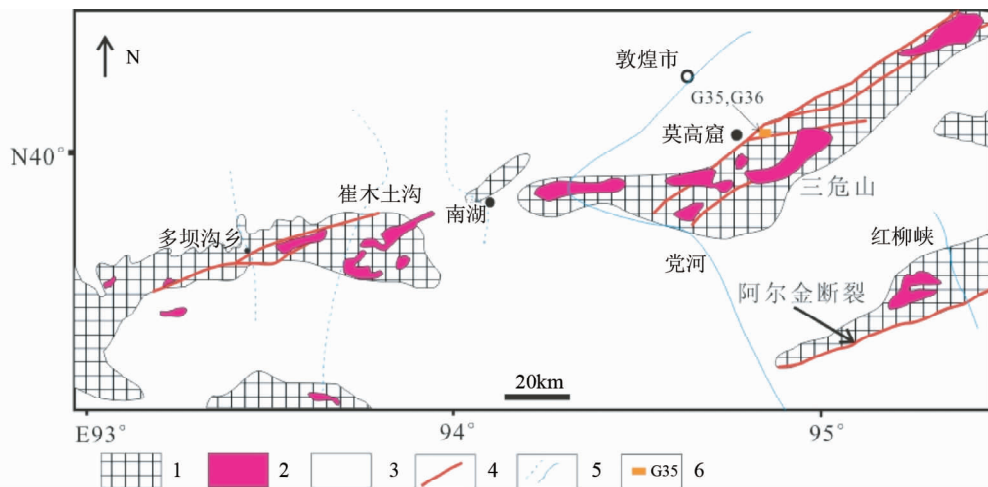


图2 敦煌地区地质简图(据甘肃省地质矿产局,1989)

1-前寒武纪变质地质体;2-侵入岩体;3-第四系;4-断裂;5-水系;6-采样点及编号

Fig.2 Simplified geological map of the Dunhuang Block (modified after BGMRC, 1989)

1-Precambrian rocks; 2-intrusive bodies; 3-Quaternary; 4-faults; 5-drainage; 6-sample location

最近发现三危山观音沟地区的石榴斜长角闪片麻岩中,含有丰富的变质反应结构。本文根据变质反应结构、矿物化学成分分析、温度与压力计算,反演了其变质作用 $P-T$ 轨迹。

3 岩相学特征

在三危山观音沟地区,出露有 TTG 片麻岩、斜长角闪片麻岩、变泥质片麻岩,以及未变形花岗岩类。大部分变质岩石有不同程度的蚀变、风化,只有部分石榴斜长角闪片麻岩比较新鲜,含有变质反应结构,适宜于变质作用演化研究。本文采用 Whitney and Evans(2010)推荐的矿物代码。

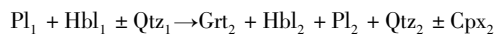
代表性石榴斜长角闪片麻岩样品(G35、G36),采自三危山观音沟沟口的花岗岩体中(图3a)。石榴斜长角闪片麻岩整体表现为似层状或透镜状,宽度约5~8m,夹持于花岗岩体中。

样品 G35 岩石显示片麻状构造,斑状变晶结构。变斑晶为石榴子石(12%),颗粒大小不一,大的可达8~10mm,小的为1~2mm,外缘多发育显著的“白眼圈”结构。基质主要为角闪石(60%)、斜长石(15%),石英(7%),以及少量微斜长石(<1%)。此外,还可见有榍石等副矿物(<5%)。部分角闪石颗粒表现出解理弯曲(有的甚至呈直角)的特征,为后期韧性变形的结果。石英多呈细粒状充填于角闪石和斜长石颗粒之间。岩石中可见三期矿物组合(图3b):(1)早期矿物组合(M_1)由石榴子石核部包裹体矿物($Pl_1 + Qtz_1$)组成,为进变质阶段矿物组合;(2)变质高峰期矿物组合(M_2)主要由石榴子石和基质矿物($Grt_2 + Hbl_2 + Pl_2 + Qtz_2$)组成;(3)退变质阶段矿物组合(M_3)是围绕石榴子石变斑晶产出的“白眼圈”状后成合晶,即 $Hbl_3 + Pl_3 + Qtz_3$ 构成的细粒交生体。

样品 G36 岩石显示片麻状构造,斑状变晶结构。变斑晶为石榴子石(15%),颗粒较大,多大于5mm,有的甚至超过1cm。部分石榴子石变斑晶周围发育“白眼圈”结构。基质主要为角闪石(52%)、单斜辉石(8%)和斜长石(18%)。石英含量较少(5%),多呈细粒状充填于角闪石、辉石和斜长石颗粒之间。此外还可见有钾长石(<2%)以及榍石等副矿物(<1%)。岩石中可见三期矿物组合(图3c):(1)早期矿物组合(M_1)由石榴子石内部包裹体矿物($Pl_1 + Hbl_1 + Qtz_1$)组成;(2)变质高峰期矿物组合(M_2)主要由石榴子石和基质矿物($Grt_2 + Hbl_2 + Pl_2 + Qtz_2 \pm Cpx_2$)组成;(3)退变质阶段矿物组合(M_3)为 $Hbl_3 + Pl_3 + Qtz_3$ 构成的交生状后成合晶。

根据上述各阶段矿物组合推测不同变质阶段发生的变质反应如下。

进变质矿物组合(M_1)转变为峰期矿物组合(M_2):



变质高峰期(M_2)到退变质阶段(M_3):



4 矿物化学成分

在中国地质科学院矿产资源研究所矿物学与微束分析实验室,利用电子探针仪 JXA-8230 测试获得矿物成分。工作条件:测试电压 15kV,测试电流 20mA。电子束斑直径一般采用5 μ m。对于石榴子石内部包裹体,采用直径为1 μ m的束斑进行测试。本文共计测试2个探针片,78个探针点。每个矿物颗粒一般测试2~3个探针点。同一样品中,测试了相同变质阶段同种矿物的不同颗粒,这些颗粒分布于视域的不同方位。在显微视域中未见到完整基质矿物组合的情况下,则在视域外的基质中找到相应的矿物进行测试。对于

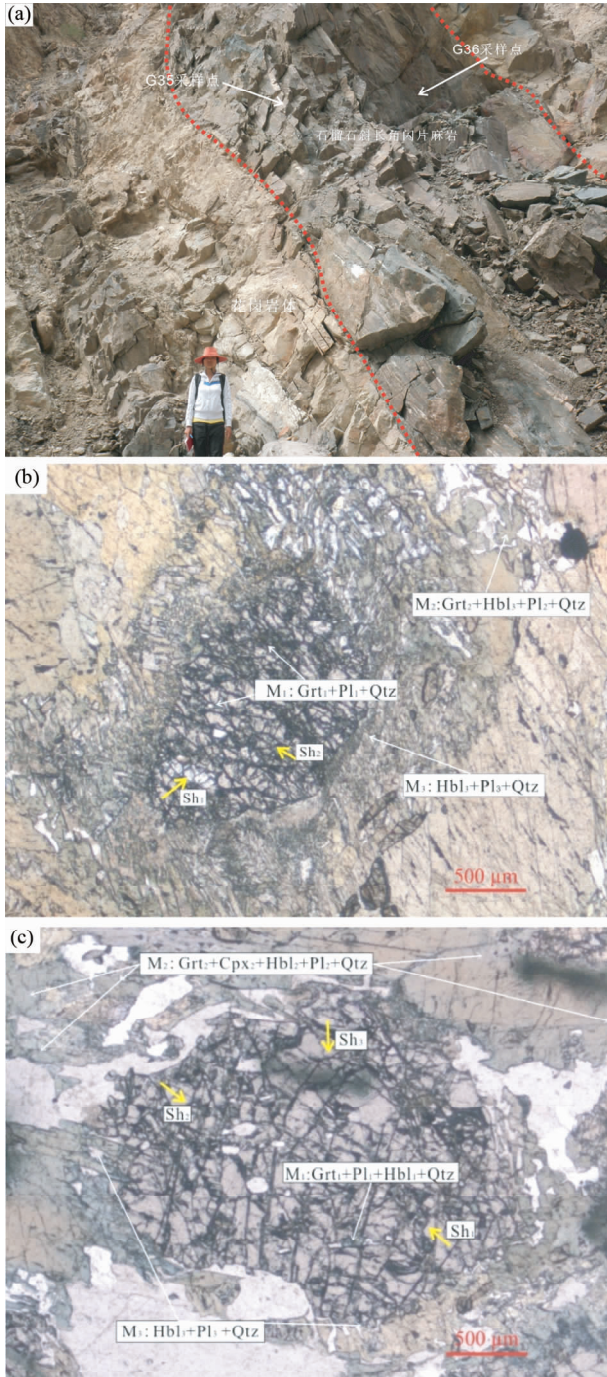


图3 观音沟石榴斜长角闪片麻岩采样位置(a)及显微岩相照片(b,c)

(a)-G35、G36 采样点；(b)-样品 G35 显微岩相；(c)-样品 G36 显微岩相。M₁-进变质阶段矿物组合；M₂-变质高峰期矿物组合；M₃-退变质阶段矿物组合；Sh_{1,3}-石榴子石边部矿物成分分析短线

Fig. 3 Outcrop of samples (a) and micro-photos of amphibolites (b, c)

(a)-Outcrop of Samples G35 and G36; (b)-micro-photo of amphibolite Sample G35; (c)-micro-photo of amphibolite Sample G36. M₁-prograde metamorphic mineral assemblages included in garnet porphyroblast; M₂-petamorphic peak mineral assemblages; M₃-retrograde metamorphic mineral assemblages; Sh_{1,3}-short lines with arrows, showing EMP analytical points within the inner edge of garnet

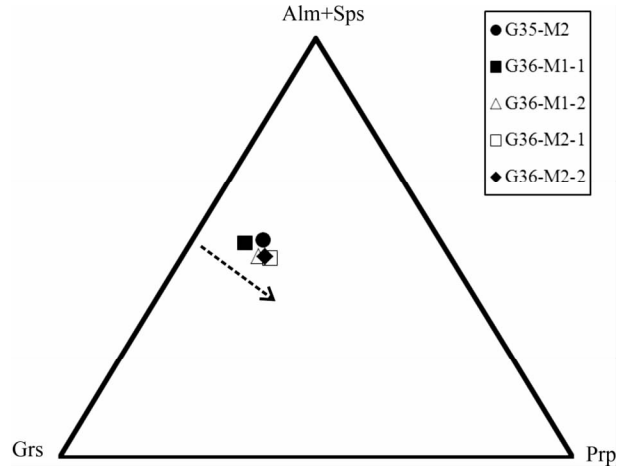


图4 石榴子石成分变化特征

Fig. 4 Change of chemical compositions of the garnets

较小的包裹体矿物或后成合晶矿物,有时只能测试1个探针点,此时尽量选择多个颗粒进行测试。主要变质矿物的代表性电子探针分析数据见表1、表2。石榴子石和单斜辉石的Fe³⁺离子数根据 Droop (1987)的电价平衡法计算,角闪石的Fe³⁺离子数根据 Holland and Blundy (1994)的方法计算。测试发现,同一样品相同阶段的矿物组合中,同种矿物化学成分基本均一,反映不同变质阶段的矿物组合各自近于达到并保持了热力学平衡。具体矿物化学成分特征简述如下。

石榴子石 石榴子石变斑晶基本不存在化学成分环带。靠近包裹体矿物的石榴子石比石榴子石变斑晶边部的Al含量略低。石榴子石在两个样品G35、G36中的成分基本一致,其组成可描述为 Alm_{0.46-0.48} Pyr_{0.11-0.17} Gros_{0.34-0.38} Sps_{0.01-0.04}, Fe[#] [= Fe²⁺ / (Fe²⁺ + Mg)] = 0.73 ~ 0.82。两个样品中的石榴子石基本没有化学成分环带。样品G36中的石榴子石,从核部向边部,Mn含量略有升高,同时Fe及Ca含量略有降低(图4),但是变化幅度基本可以忽略不计。

角闪石 样品G35中仅见到M2和M3阶段的角闪石,样品G36中在M1、M2、M3三个变质阶段都出现角闪石(图5)。两个样品中所有阶段角闪石的Ti⁴⁺离子数一般<0.1。样品G35中,从M2到M3阶段,角闪石中Ca²⁺离子数几乎不变,Mg²⁺离子数从2.77降到2.08,Fe²⁺离子数从1.26升到1.76。样品G36中,从M1→M2→M3阶段,角闪石中Ca²⁺离子数几乎不变,Mg²⁺离子数的变化明显(1.01~1.60→2.54~2.67→2.05~2.26),相应地Fe²⁺离子数变化亦明显(2.31~2.65→1.41~1.45→1.55~1.75)。根据 Leake *et al.* (1997)的角闪石分类计算方法,G36中M1阶段的角闪石属于铁契尔马克质普通角闪石,基质M₂中角闪石属于契尔马克质普通角闪石,后成合晶M₃中角闪石属于契尔马克角闪石分子。

斜长石 斜长石在样品G35的M₁、M₂阶段出现,在样品G36的M₁、M₂、M₃阶段均出现,成分为奥长石-中长石。随

表 1 观音沟斜长角闪片麻岩 (G36) 中矿物成分的电子探针测试数据 (wt%)

Table 1 Representative chemical mineral compositions of plagioclase-amphibole gneiss (G36) in Guanyingou (wt%)

G36	进变质矿物组合 (M ₁)				变质高峰期矿物组合 (M ₂)								退变质矿物组合 (M ₃)			
	视域		视域		视域 1				视域 2				视域 1		视域 2	
	Hbl	Pl	Hbl	Pl	Grt	Cpx	Hbl	Pl	Grt	Hbl	Cpx	Pl	Hbl	Pl	Hbl	Pl
SiO ₂	40.92	63.56	42.81	63.22	38.28	51.78	42.96	61.29	38.25	44.29	52.22	62.99	41.43	59.32	41.03	59.84
TiO ₂	0.20	0.06	0.52	0.01	0.06	0.09	0.76	0.02	0.08	0.57	0.09	0.01	0.33	0.02	0.29	0.03
Al ₂ O ₃	15.02	22.53	13.49	22.6	22.35	2.24	13.76	24.35	22.52	12.29	2.34	23.18	15.32	25.25	15.64	25.58
FeO ^T	23.36	0.45	20.34	0.42	22.45	6.41	13.20	0.11	22.53	13.12	6.62	0.17	14.51	0.18	15.75	0.24
MnO	0.22	0.01	0.14	0.00	0.41	0.06	0.09	0.01	0.31	0.07	0.06	0.01	0.08	0.01	0.11	0.02
MgO	4.44	0.00	7.12	0.00	4.38	13.88	11.45	0.01	4.14	12.10	13.89	0.01	10.12	0.01	9.11	0.00
CaO	11.34	3.03	11.51	3.63	12.44	23.59	11.48	5.31	12.74	11.65	23.15	3.81	11.52	6.59	11.66	6.39
Na ₂ O	1.41	9.85	1.59	9.29	0.11	0.70	1.69	8.49	0.07	1.55	0.91	9.27	1.80	7.74	1.73	7.71
K ₂ O	0.53	0.05	0.40	0.06	0.01	0.01	0.81	0.06	0.01	0.68	0.01	0.08	0.76	0.07	0.91	0.19
ZnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.02	0.04	0.02	0.03	0.03	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.07	0.00	0.07	0.01
NiO	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01
Total	97.44	99.55	97.94	99.27	100.52	98.80	96.25	99.66	100.67	96.34	99.32	99.56	95.95	99.21	96.31	100.02
Si	6.27	2.82	6.44	2.81	2.95	1.93	6.39	2.73	2.94	6.56	1.94	2.80	6.22	2.66	6.19	2.67
Ti	0.02	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.09	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.04	0.00	0.03	0.00
Al	2.71	1.18	2.39	1.19	2.03	0.10	2.41	1.28	2.04	2.14	0.10	1.21	2.71	1.34	2.78	1.34
Fe ²⁺	2.65	0.00	2.31	0.00	1.36	0.11	1.45	0.00	1.38	1.41	0.12	0.00	1.55	0.00	1.75	0.00
Fe ³⁺	0.34	0.02	0.25	0.02	0.09	0.08	0.20	0.00	0.07	0.21	0.09	0.01	0.27	0.01	0.24	0.01
Mn	0.03	0.00	0.02	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
Mg	1.01	0.00	1.60	0.00	0.50	0.77	2.54	0.00	0.48	2.67	0.77	0.00	2.26	0.00	2.05	0.00
Ca	1.86	0.14	1.85	0.17	1.03	0.94	1.83	0.25	1.05	1.85	0.92	0.18	1.85	0.32	1.88	0.30
Na	0.42	0.85	0.46	0.80	0.02	0.05	0.49	0.73	0.01	0.44	0.07	0.80	0.52	0.67	0.51	0.67
K	0.10	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00	0.15	0.00	0.18	0.01
Zn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ni	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	15.44	5.01	15.46	5.00	8.00	4.00	15.55	5.00	8.00	15.49	4.00	5.00	15.59	5.01	15.61	5.00

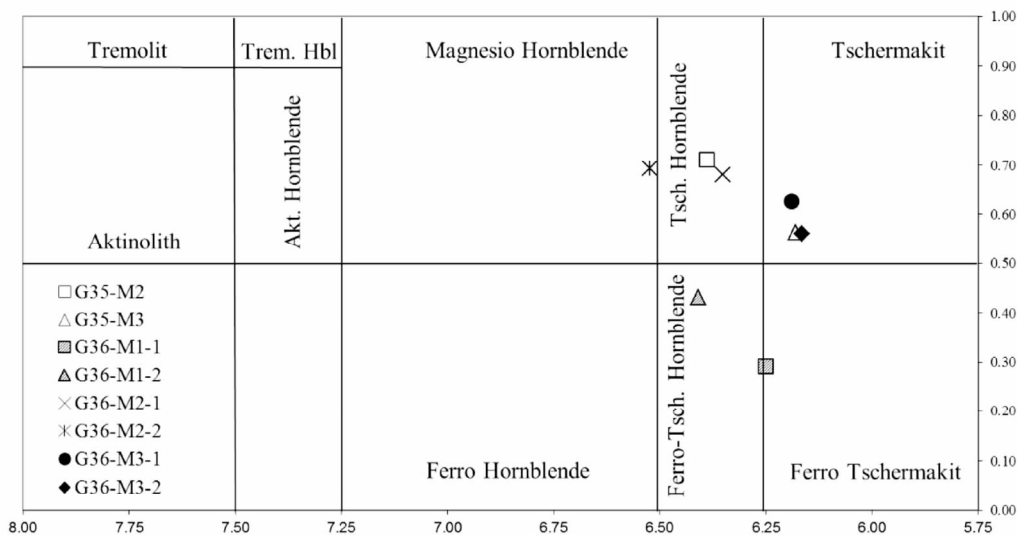


图 5 角闪石成分变化特征

Fig. 5 Change of chemical compositions of the hornblendes

表2 观音沟斜长角闪片麻岩(G35)中矿物成分的电子探针测试数据(wt%)

Table 2 Representative chemical mineral compositions of plagioclase-amphibole gneiss (G35) in Guanyingou (wt%)

G35	变质高峰期矿物组合(M ₂)			退变质矿物组合(M ₃)	
	Gr _t	Hbl	Pl	Hbl	Pl
SiO ₂	37.84	42.98	59.55	40.82	57.03
TiO ₂	0.07	1.07	0.02	0.34	0.01
Al ₂ O ₃	22.25	13.19	24.99	15.28	27.17
FeO ^T	22.88	11.30	0.18	15.54	0.31
MnO	1.79	0.08	0.01	0.12	0.01
MgO	3.41	12.48	0.00	9.18	0.02
CaO	12.02	11.77	6.23	11.57	6.97
Na ₂ O	0.11	1.64	7.82	1.89	6.37
K ₂ O	0.01	0.82	0.08	0.76	0.86
ZnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr ₂ O ₃	0.01	0.03	0.02	0.04	0.01
NiO	0.01	0.03	0.00	0.01	0.01
Total	100.40	95.39	98.90	95.55	98.77
Si	2.94	6.41	2.68	6.20	2.58
Ti	0.00	0.12	0.00	0.04	0.00
Al	2.04	2.32	1.33	2.74	1.45
Fe ²⁺	1.39	1.26	0.00	1.76	0.00
Fe ³⁺	0.09	0.15	0.01	0.22	0.01
Mn	0.12	0.01	0.00	0.02	0.00
Mg	0.39	2.77	0.00	2.08	0.00
Ca	1.00	1.88	0.30	1.88	0.34
Na	0.02	0.47	0.68	0.56	0.56
K	0.00	0.16	0.00	0.15	0.05
Zn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ni	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	8.00	15.55	5.00	15.64	5.00

着进变质、变质高峰、退变质阶段的演化,斜长石成分变得越富Ca(图6)。样品G35中,斜长石中钙长石分子(An)从M₁的30%,增长到M₂阶段的34%(中长石)。样品G36中,斜长石中钙长石分子,从M₁阶段的14%~17%,增长到M₂阶段的18%~25%,再增长到M₃阶段的30%~32%。

单斜辉石 样品G36中见有单斜辉石,以基质矿物形式出现,化学成分均一,属于透辉石(图7)。部分辉石边部已退变为角闪石,但在不同视域内单斜辉石的残余成分未见有明显差别(表1)。说明退变质主要发生在单斜辉石外围,对内部的成分影响不大。

5 变质作用P-T轨迹

针对不同阶段矿物组合,采用合适的矿物温度计和压力计分别估算岩石在进变质、变质高峰期、退变质阶段所经历的温度和压力条件。角闪石-斜长石(-石英)温度计(Holland and Blundy, 1994)和石榴子石-角闪石-斜长石-石英(GHPQ)

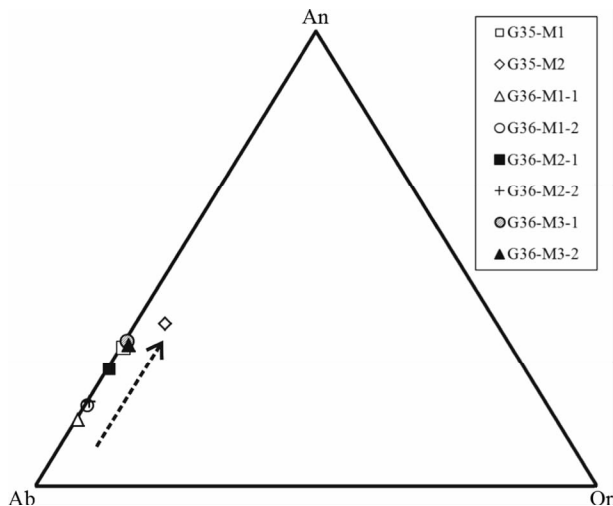


图6 斜长石成分变化特征

Fig. 6 Change of chemical compositions of the plagioclases

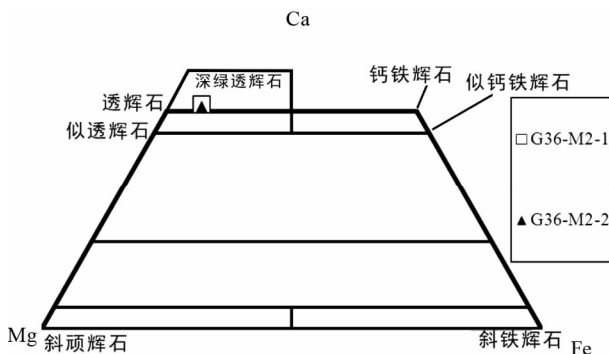


图7 单斜辉石成分变化特征

Fig. 7 Change of chemical compositions of the clinopyroxenes

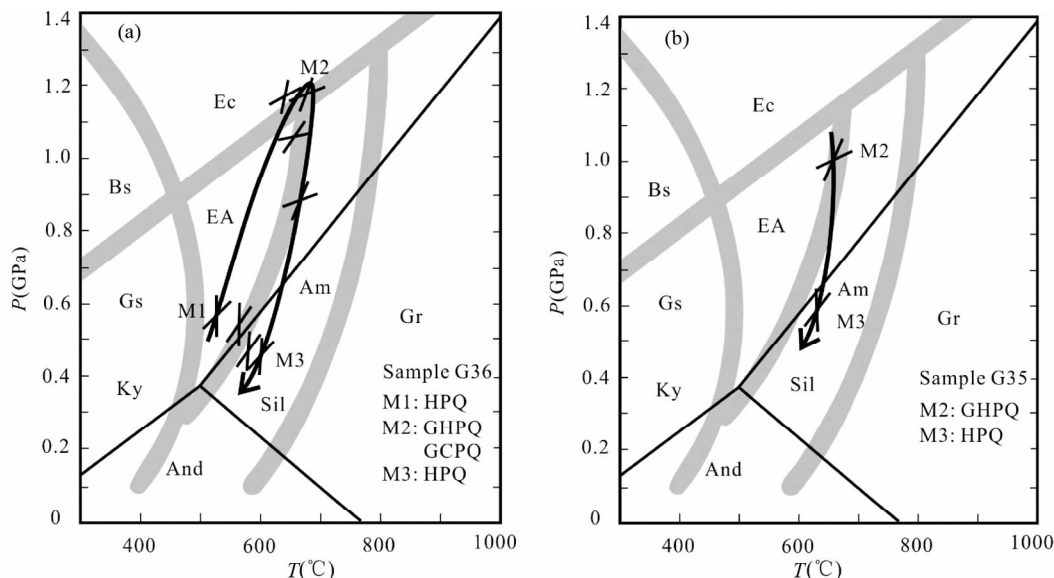
压力计(Dale *et al.*, 2000)的误差相对较小,平均偏差分别为 $\pm 40^{\circ}\text{C}$ 和 $\pm 1.1\text{kbar}$ 。石榴子石-单斜辉石温度计(Krogh, 1988)偶然误差为 $\pm 70^{\circ}\text{C}$,石榴子石-单斜辉石-斜长石-石英(GCPQ)压力计(Mukhopadhyay *et al.*, 1992)的误差详。角闪石-斜长石-石英(HPQ)压力计(Bhadra and Bhattacharya, 2007)的偶然误差为 $\pm 2.2\text{kbar}$ 。本文对石榴斜长角闪片麻岩高峰期矿物组合(M₂)采用角闪石-斜长石温度计和GHPQ压力计、石榴子石-单斜辉石温度计和GCPQ压力计,估算其变质高峰期温度和压力。对进变质矿物组合(M₁)、退变质矿物组合(M₃),采用角闪石-斜长石(-石英)温度计、HPQ压力计,估算其温度和压力数值。计算结果见表3。

样品G35中早期包裹体矿物缺少符合计算条件的斜长石,因此无法计算出压力。计算得到变质高峰期(M₂)的P-T条件为 $666^{\circ}\text{C}/10.5\text{kbar}$,退变质阶段(M₃)的P-T条件为 $636^{\circ}\text{C}/5.9\text{kbar}$ 。

样品G36中进变质阶段(M₁)的P-T条件为 $552\sim 575^{\circ}\text{C}/5.2\sim 5.7\text{kbar}$,变质高峰期(M₂)的P-T条件为 $632\sim 669^{\circ}\text{C}/8.9\sim 11.9\text{kbar}$,退变质阶段(M₃)的P-T条件为 $586\sim$

表3 观音沟斜长角闪片麻岩不同变质阶段矿物组合 $P-T$ 计算结果Table 3 $P-T$ estimates for the different metamorphic stages of plagioclase-amphibole gneisses in Guanyingou area

样品号	视域	早期包裹体 (M_1)	变质高峰组合 (M_2)	后成合晶 (M_3)
G35			666°C/10.5kbar (GHPQ)	636°C/5.9kbar (HPQ)
G36	视域 1	552°C/5.7kbar (HPQ)	669°C/11.9kbar (GHPQ) 661°C/8.9kbar (GCPQ)	600°C/4.3kbar (HPQ)
	视域 2	575°C/5.2kbar (HPQ)	632°C/11.8kbar (GHPQ) 664°C/10.6kbar (GCPQ)	586°C/4.3kbar (HPQ)

图8 观音沟斜长角闪片麻岩记录的变质作用 $P-T$ 轨迹

(a)-G36; (b)-G35. 变质相 (Spear, 1995) 代码: BS-蓝片岩相; GS-绿片岩相; EA-绿帘角闪岩相; Am-角闪岩相; Ec-榴辉岩相; Gr-麻粒岩相; 图中 Al_2SiO_5 矿物相变线据 Holdaway and Mukhopadhyay (1993)

Fig. 8 $P-T$ paths of the plagioclase-amphibole gneisses in Guanyingou

(a)-Sample G36; (b)-Sample G35. Metamorphic facies (Spear, 1995) symbols: BS-blueschist facies; GS-greenschist facies; EA-epidote amphibolite facies; Am-amphibolite facies; Ec-eclogite facies; Gr-granulite facies; The Al_2SiO_5 phase transitions are after Holdaway and Mukhopadhyay (1993)

600°C/4.3kbar。与这两个样品邻近的变质片麻岩中,发现有蓝晶石。本文计算出的斜长角闪片麻岩变质高峰期 $P-T$ 条件与蓝晶石的稳定域相符合。总地看来,进变质阶段属于绿帘角闪岩相,变质高峰期和退变质阶段属于角闪岩相(图8)。

这两个样品(G35、G36)采自同一个地点,但是所得的变质高峰期 $P-T$ 条件却有差异,甚至同一个样品(G36)两个不同视域变质高峰期 $P-T$ 条件也有差异,其原因可能在于如下方面:(1)薄片可能没有切过石榴子石正中心,导致所测试的石榴子石边部成分(变质高峰期形成)并不能代表真正的变质高峰期;(2)由于石榴子石变斑晶分解的程度不同,导致所采用的石榴子石边部成分有一定差异;(3)两个样品中变质高峰期的矿物成分有一定差异。

综合看来,G36 记录了较完整的变质作用 $P-T$ 轨迹(图8a),G35 记录了退变质阶段的 $P-T$ 轨迹(图8b)。

敦煌地区变质作用演化 $P-T$ 轨迹对于研究其大地构造归属具有重要意义。一般认为(Spear, 1995),陆壳碰撞带的变质作用 $P-T$ 轨迹为后期近等温降压的顺时针型,岛弧和活动大陆边缘则表现出逆时针的 $P-T$ 轨迹。

Ernst (1988)在总结全球蓝片岩地体变质作用 $P-T$ 轨迹时,把此种顺时针 $P-T$ 轨迹划分为两大类,即西阿尔卑斯型(western-Alpine type)和弗朗西斯科型(Franciscan-type)。前者表现出前期热松弛和退变质阶段等温降压(near isothermal decompression, ITD)的特征,而后者则是退变质阶段的 $P-T$ 轨迹基本接近原路折返,退变质阶段 $P-T$ 轨迹形状与进变质阶段近于平行。近等温降压(ITD)型 $P-T$ 轨迹一般是达到压力极大值(对应于最深处)之后,变质地质体迅速折返上升,同时快速剥蚀而减薄,或同时因拉张而构造减薄,造成压力的迅速降低的缘故(卢良兆等,2004)。观音沟石榴斜长角闪片麻岩类 $P-T$ 轨迹就属于典型的西阿尔卑斯型。

6 讨论与初步结论

在本文研究样品以东约 400m 处的含榴角闪黑云斜长片麻岩中,孟繁聪等(2011)发现其中锆石具有核-边结构,并根据激光探针等离子体剥蚀法(LA-MC-ICP-MS)测得其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 变质年龄介于 0.42 ~ 0.51Ga 之间,加权平均年龄为 0.44Ga。因此可以说,三危山观音沟地区变质作用发生于早古生代期间(奥陶纪-志留纪?)。当然,还需要更多的年代学资料,才能肯定变质作用的具体地质时代。

同样在敦煌变质杂岩区,在石包城水峡口石榴斜长角闪岩中,分别测得了 1.81Ga (赵燕等,2013)和 1.85Ga (Zhang *et al.*, 2012, 2013) 的变质锆石年龄。在阿尔金断裂以北、石包城-好布拉一线出露的基性麻粒岩及长英质片麻岩中,也测得了 1.85 ~ 1.82Ga 的变质年龄 (Zhang *et al.*, 2013)。孟繁聪等(2011)测得多坝沟含榴黑云斜长片麻岩中变质锆石 U-Pb 年龄介于 0.46 ~ 0.42Ga 之间。Zong *et al.* (2012) 在榆林窟附近发育白眼圈后成合晶的高压基性麻粒岩中,测得变质锆石 U-Pb 年龄约为 0.44 ~ 0.43Ga。

由此看来,敦煌变质杂岩区也许经历了不止一期的变质事件。如果的确是这样的话,由此带来的问题是,该地区变质岩石是否都记录了这几期变质事件? 每一期变质事件的特征如何? 其地球动力学背景又是什么? 这些问题都是至为重要的科学问题,深入研究方能回答。

本文研究的敦煌三危山观音沟的石榴斜长角闪片麻岩,经历了奥陶纪-泥盆纪时期(?)的变质事件,记录了顺时针的变质作用 P - T 轨迹,进变质、变质高峰、退变质阶段分别记录了 550 ~ 575°C/5.2 ~ 5.7kbar, 630 ~ 670°C/8.9 ~ 11.9kbar, 590 ~ 600°C/4.3 ~ 5.9kbar 的 P - T 条件。退变质阶段为典型的近等温降压(ITD)型 P - T 轨迹,代表陆壳碰撞过程结束后变质地质体快速折返抬升的地质过程,具有俯冲-碰撞-快速抬升的造山带完整造山旋回变质作用的特点。

孟繁聪等(2011)在观音沟地区测出了 ~0.44Ga 的变质事件年龄。岩相特征未显示多期变质事件叠加的现象,因此该地点未显示保留有元古宙以前变质事件的迹象。果真如此的话,该地区变质事件似乎是由与中亚造山带基本同期的造山事件引起的,或者可能是该期造山事件对早期变质事件的叠加比较彻底(?)。从观音沟地区来看,敦煌地块似乎应该归属于塔里木板块而不是华北板块。当然,这个结果还需更深入的研究才能检验。

致谢 感谢张建新研究员和石永红教授提出的宝贵修改建议。

References

Bhadra S and Bhattacharya A. 2007. The barometer tremolite +

- tschermakite + 2albite = 2pargasite + 8quartz: Constraints from experimental data at unit silica activity, with application to garnet-free natural assemblages. *American Mineralogist*, 92(4): 491 - 502
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Gansu Province (BGMRG). 1989. Regional Geology of Gansu Province. Beijing: Geological Publishing House (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
- Droop GTR. 1987. A general equation for estimating Fe^{3+} concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine*, 25: 431 - 435
- Ernst WG. 1988. Tectonic history of subduction zones inferred from retrograde blueschist P - T paths. *Geology*, 16(12): 1081 - 1084
- Holdaway MJ and Mukhopadhyay B. 1993. A re-evaluation of the stability relations of andalusite: Thermochemical data and phase diagram for the aluminosilicates. *American Mineralogist*, 78(3-4): 298 - 315
- Holland TJB and Blundy JD. 1994. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 116(4): 433 - 447
- Krogh EJ. 1988. The garnet-clinopyroxene Fe-Mg geothermometer-a reinterpretation of existing experimental data. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 99(1): 44 - 48
- 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. *Canadian Mineralogist*, 35(1): 219 - 246
- Li HM, Lu SN, Zheng JK *et al.* 2001. Dating of 3.6Ga zircons in granite-gneiss from the eastern Altyn mountains and its geological significance. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(4): 259 - 262 (in Chinese with English abstract)
- Li ZC. 1994. New speculation of the age of the metamorphic rock series of the Dunhuang Massif. *Regional Geology of China*, 3(2): 131 - 134 (in Chinese with English abstract)
- Lu LZ, Lin Q and Liu ZJ. 2004. Petrogenesis. Changchun: Jilin University Press, 301 - 304 (in Chinese)
- Lu SN. 2002. Preliminary Study of Precambrian Geology in the North Tibet-Qinghai Plateau. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Mei HL, Yu HF and Li Q. 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 *et al.* 1998. Archean tonalite in the Dunhuang, Gansu Province: Age from the U-Pb zircon and Nd isotope. *Progress in Precambrian Research*, 21(1): 41 - 45 (in Chinese with English abstract)
- Meng FC, Zhang JX, Xiang ZQ, Yu SY and Li JP. 2011. Evolution and formation of the Dunhuang Group in NE Tarim basin, NW China: Evidence from detrital-zircon geochronology and Hf isotope. *Acta Petrologica Sinica*, 27(1): 59 - 76 (in Chinese with English abstract)
- Mukhopadhyay A, Bhattacharya A and Mohanty L. 1992. Geobarometers involving clinopyroxene, garnet, plagioclase, ilmenite, rutile, sphene and quartz: Estimation of pressure in quartz-absent assemblages. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110(2-3): 346 - 354
- 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
- Spear FS. 1995. *Metamorphic Phase Equilibria and Metamorphic Pressure-Temperature-Time Paths*. 2nd Edition. Washington: Mineralogical Society of America Monograph
- 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 (in Chinese with English abstract)
- Whitney DL and Evans BW. 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185 - 187
- Xin HT, Liu YS, Luo ZH *et al.* 2013. The growth of Archean continental crust in Aqtashitagh area of Southeast Tarim, China; Constrains from petrochemistry and chronology about Milan Group and TTG-gneiss. *Earth Science Frontiers*, 20(1): 240 - 259 (in Chinese with English abstract)
- Xu JL, Meng YC, Zhang JS *et al.* 1997. New progress of research of Dunhuang Series. *Acta Geologica Gansu*, 6 (Suppl.): 1 - 5 (in Chinese with English abstract)
- 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)
- Zhang JX, Yu SY and Meng FC. 2011. Ployphase Early Paleozoic metamorphism in the northern Qinling orogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 1179 - 1190 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JX, Gong JH and Yu SY. 2012. 1. 85Ga HP granulite-facies metamorphism in the Dunhuang block of the Tarim Craton, NW China; Evidence from U-Pb zircon dating of mafic granulites. *Journal of the Geological Society, London*, 169(5): 511 - 514
- Zhang JX, Yu SY, Gong JH *et al.* 2013. The latest Neoproterozoic-Paleoproterozoic evolution of the Dunhuang block, eastern Tarim craton, northwestern China; Evidence from zircon U-Pb dating and Hf isotopic analyses. *Precambrian Research*, 226(1): 21 - 42
- Zhao Y, Diwu CR, Sun Y, Zhu T and Wang HL. 2013. Zircon geochronology and Lu-Hf isotope compositions for Precambrian rocks of the Dunhuang complex in Shuixiakou area, Gansu Province. *Acta Petrologica Sinica*, 29(5): 1698 - 1712 (in Chinese with English abstract)
- Zong KQ, Zhang ZM, He ZY *et al.* 2012. Early Palaeozoic high-pressure granulites from the Dunhuang block, northeastern Tarim Craton: Constraints on continental collision in the southern Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Metamorphic Geology*, 30(8): 753 - 768
- 李惠民, 陆松年, 郑健康等. 2001. 阿尔金山东端花岗岩片麻岩中 3.6Ga 锆石的地质意义. *矿物岩石地球化学通报*, 20(4): 259 - 262
- 李志琛. 1994. 敦煌地块变质岩系时代新认识. *中国区域地质*, 3(2): 131 - 134
- 卢良兆, 林强, 刘昭君. 2004. 成因岩石学. 长春: 吉林大学出版社, 301 - 304
- 陆松年. 2002. 青藏高原北部前寒武纪地质初探. 北京: 地质出版社
- 梅华林, 于海峰等. 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, 陆松年等. 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(1): 41 - 45
- 孟繁聪, 张建新, 相振群, 于胜尧, 李金平. 2011. 塔里木盆地东北缘敦煌群的形成和演化: 锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素证据. *岩石学报*, 27(1): 59 - 76
- 王忠梅, 肖文交, 韩春明, 敖松坚, 王洛娟. 2013. 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. *岩石学报*, 29(5): 1685 - 1697
- 辛后田, 罗照华, 刘永顺等. 2011. 塔里木盆地东南缘阿克塔什塔格地区新太古代陆壳增生米兰岩群和 TTG 片麻岩的地球化学及年代学约束. *地学前缘*, 20(1): 240 - 259
- 许敬龙, 孟易辰, 张建树等. 1997. 敦煌群研究新进展. *甘肃地质学报*, 6(增刊): 1 - 5
- 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
- 张建新, 于胜尧, 孟繁聪. 2011. 北秦岭造山带的早古生代多期变质作用. *岩石学报*, 27(4): 1179 - 1190
- 赵燕, 第五春荣, 孙勇, 朱涛, 王洪亮. 2013. 甘肃敦煌水峡口地区前寒武纪岩石的锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及其地质意义. *岩石学报*, 29(5): 1698 - 1712

附中文参考文献

甘肃省地质矿产局. 1989. 甘肃省区域地质志. 北京: 地质出版社