

北秦岭早古生代两期变质作用:来自松树沟基性岩岩石学及锆石 U-Pb 年代学的记录

李 晔^{1,2}, 周汉文^{1,2,3*}, 钟增球^{1,2}, 向 华^{1,2}, 曾 雯³, 祁冬梅^{1,2}, 张 利¹

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学教育部长江三峡库区地质灾害研究中心, 湖北武汉 430074

摘要: 多期变质事件的识别, 可为复合造山带变质演化的研究提供重要证据。松树沟基性岩记录了早古生代的两期变质事件, 为研究北秦岭的演化提供了一个“窗口”。野外地质及岩相学研究表明, 松树沟榴闪岩呈透镜状分布, 从透镜体核部到边缘, 退变质程度逐渐增强, 逐渐向外围的斜长角闪片岩过渡。在强退变质带中的斜长角闪片岩和含石榴石残余的斜长角闪片岩中, 角闪石具有明显的生长环带, 核部为阳起石, 边缘为镁角闪石。这表明, 松树沟的变基性岩从麻粒岩相或角闪岩相退变到绿片岩相后又遭受了后期低角闪岩相变质。锆石 U-Pb 年代学研究也揭示了变基性岩记录了北秦岭早古生代的两期变质作用: 在经历 484 ± 4 Ma 最高变质级别为麻粒岩相的变质作用后, 退变至绿片岩相; 在 418 ± 5 Ma 又受到一期变质热作用, 使基性岩中的角闪石发生了环带的增生。

关键词: 北秦岭; 基性岩; 早古生代; 变质作用; 角闪石环带; 锆石 U-Pb 年代学; 岩石学; 矿物化学。

中图分类号: P588.34

文章编号: 1000-2383(2012)S1-0111-14

收稿日期: 2011-08-15

Two Eopaleozoic Metamorphic Events in North Qinling: Petrology and Zircon U-Pb Geochronology Evidences from Basic Rocks in the Songshugou Area

LI Ye^{1,2}, ZHOU Han-wen^{1,2,3*}, ZHONG Zeng-qiu^{1,2}, XIANG Hua^{1,2}, ZENG Wen³,
QI Dong-mei^{1,2}, ZHANG Li¹

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

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Three Gorges Research Center for Geo-hazard of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Recognition of multiple metamorphic events can provide essential evidences to constrain the evolution history of a polycyclic orogen. The basic rocks in the Songshugou area have recorded two metamorphic events in Eopaleozoic, which is an important “finger-print” to study the evolution of North Qinling. The field work and petrology research show that the Songshugou garnet amphibolites are distributed as lens, with increasing retrograde degree transiting to plagioclase amphibole schists towards the edge of the lens. Zoned amphiboles are widely developed in plagioclase amphibole schists and those bearing garnet relics from the highly retrograded belt, with compositions ranging from actinolite in cores to magnesiohornblende in rims, which suggests that metabasic rocks have initially retrograded from granulite to amphibolite to greenschist facies, and then been overprinted by later low amphibolite facies metamorphism. According to petrologic study, zircon U-Pb geochronology reveals that the metabasic rocks record two Eopaleozoic events, too: 1. After having been experienced granulite or amphibolite facies metamorphism at the age of 484 ± 4 Ma, metabasic rocks retrograded to greenschist facies; 2. The growth of amphibole zoning resulted from a later thermal event at the age of 418 ± 5 Ma.

Key words: North Qinling; basic rocks; Eopaleozoic; metamorphism; amphibole zone; zircon U-Pb geochronology; petrology; mineral chemistry.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 90814004, 40873044); 教育部重点科技项目 (No. 02027).

作者简介: 李晔 (1988—), 女, 在读硕士, 岩石学、矿物学、矿床学专业. E-mail: liye19880317@yahoo.com.cn

* 通讯作者: 周汉文, E-mail: hwzhou@cug.edu.cn

造山带是研究地球物质循环及板块构造演化的基本场所. 最新研究结果表明, 造山带的形成和演化具有比较复杂的过程, 可能包括了多期次的挤压和伸展作用, 往往保存了与大陆形成有关的重要构造事件的信息(Aitken and Betts, 2009). 其中, 经历多期变质作用的变质岩往往记录了活动造山带多阶段造山过程的痕迹(Basu Sarbadhikari and Bhowmik, 2008), 为研究造山演化提供了重要的证据. 然而, 由于造山作用的复杂性, 人们易将 2 次毫无相关的热事件相联系, 编制成一些毫无意义的 P - T - t 轨迹(Vernon, 1996; Basu Sarbadhikari and Bhowmik, 2008). 尤其是时间间隔较小的两期变质事件更容易被解释为同一期变质事件的不同阶段, 有碍于对构造演化模式作出正确的判断. 因此, 在研究经历了多期次变质作用的地块中, 区分变质期次和确定期次的变质年龄及温压条件尤为重要.

秦岭—大别—苏鲁造山带是世界上规模最大的高压—超高压变质带, 也是研究高压超高压变质作用的经典地区(Coleman and Wang, 1995; Zheng *et al.*, 2003; Liou *et al.*, 2004; 郑永飞, 2008; 吴元保, 2009). 已有研究成果揭示, 秦岭—大别—苏鲁是一个非常典型的多阶段复合造山带, 经历了早中古生代的陆壳俯冲碰撞、志留纪伸展和裂谷作用及边缘洋盆的形成、以及随后大规模的三叠纪陆壳岩石的高压—超高压变质作用和折返(张国伟等, 1996; 吴元保, 2009). 虽然近 20 年对该造山带已进行了大量的研究, 但对北秦岭古生代的变质事件和构造演化还一直存在争议(Xue *et al.*, 1996b; 张国伟等, 1996; Ratschbacher *et al.*, 2003, 2006; Dong *et al.*, 2011). 一方面, 含金刚石和柯石英包裹体的锆石微区 U-Pb 定年结果显示, 北秦岭秦岭群北缘的超高压变质发生在 500 Ma 左右(杨经绥等, 2002; Yang *et al.*, 2003). 秦岭群南缘的松树沟地区的高压麻粒岩、榴闪岩变质峰期年龄也在 480~518 Ma 之间(陈丹玲等, 2004; 苏犁等, 2004; 刘军锋和孙勇, 2005; 李洪英等, 2009; 张建新等, 2011), 且该区还存在大量同时期的岩浆活动(陈岳龙, 1999; 刘军锋, 2005; 陆松年等, 2006; 张宗清等, 2006). 另一方面, 陆松年等(2009)和时毓等(2009)分别在秦岭群变质岩中获得了 420.8 Ma 和 426 Ma 的变质年龄, 与桐柏地区秦岭群中麻粒岩的变质年龄一致(Zhai *et al.*, 1998; 向华等, 2009). 此外, 在北秦岭地区也发育有大量 420~450 Ma 的花岗岩(陈岳龙, 1999; 张宗清等,

2006; 闫全人等, 2007; 王涛等, 2009). 这些都说明了秦岭群除了在早古生代早期经历了一次变质与岩浆作用外, 在志留纪—泥盆纪还经历了另一期变质与岩浆作用. 然而这 2 次变质作用的关系还不明确, 由此演绎出的构造演化模式也不同.

基于详细的野外考察, 本文对松树沟榴闪岩及斜长角闪片岩进行了详细的岩相学和锆石 U-Pb 年代学研究. 研究表明, 榴闪岩不仅记录了高压岩石折返过程的退变质作用, 还记录了其折返到地壳后受到的另一期热事件, 为北秦岭早古生代演化的研究又提供了一个“窗口”.

1 地质背景与样品

北秦岭位于商丹缝合线以北, 洛南—栾川断裂带以南, 从北至南, 构造单元分别为宽坪群、二郎坪群、秦岭群及丹凤群. 宽坪群呈条带状分布于北秦岭最北部, 主要是一套绿片岩相—角闪岩相变质的大理岩和二云母片岩, 其原岩为一套拉斑玄武岩和杂砂岩的变火山—沉积岩系(路凤香等, 2006). 丹凤群和二郎坪群的主体为变火山岩, 伴有少量变碎屑沉积岩. 侵入火山岩的岩体年龄为 470~490 Ma 左右, 说明丹凤群和二郎坪群中的火山岩应早于 ~480 Ma 形成, 且可能形成于洋内弧环境(Xue *et al.*, 1996a; Ratschbacher *et al.*, 2003). 秦岭群主要由黑云母斜长片麻岩、钙硅酸盐岩和石墨大理岩组成, 记录有 ~1.0 Ga 中元古晋宁期的造山事件、约 0.8~0.7 Ga 的裂解事件及 ~400 Ma 的岛弧事件(路凤香等, 2006; Ratschbacher *et al.*, 2006). 在早古生代末, 秦岭群被大小不一的岩体侵入(王涛等, 2009), 发生了角闪岩相—麻粒岩相的区域变质作用(Ratschbacher *et al.*, 2003, 2006).

松树沟地区位于商丹缝合线以北, 出露超镁铁质岩体、高压麻粒岩及侵入秦岭群中的富水杂岩, 已被证明其形成与早古生代北秦岭的高压—超高压变质带及板块的深俯冲有关, 是研究北秦岭形成演化的重点区域(陈丹玲等, 2004; 苏犁等, 2004; 刘军锋和孙勇, 2005; 李洪英等, 2009). 超镁铁质岩体为北西—南东向展布的透镜状构造岩片, 主要由细粒糜棱纯橄岩、中粗粒纯橄岩、方辉橄榄岩及橄榄透辉岩等岩石类型组成(苏犁等, 2005). 超镁铁质岩体外围为斜长角闪岩, 两者呈压扁的同心环状被夹持在秦岭群中. 榴闪岩呈透镜体状分布在超镁铁质岩体周围的秦岭群斜长角闪岩中. 刘良等(1995)曾

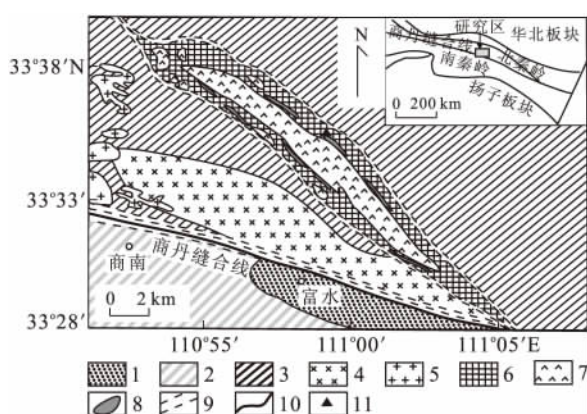


图1 北秦岭商南松树沟地区地质略图(据 Dong *et al.*, 2008 修改)

Fig. 1 Geological sketch map of the Songsugou area

1. 白垩系—第三系红色砂、砾岩; 2. 泥盆系变质砂岩、云母片岩夹大理岩; 3. 秦岭群; 4. 富水杂岩; 5. 花岗岩; 6. 镁铁质岩; 7. 超镁铁质岩; 8. 榴闪岩; 9. 韧性剪切带; 10. 断层; 11. 采样点

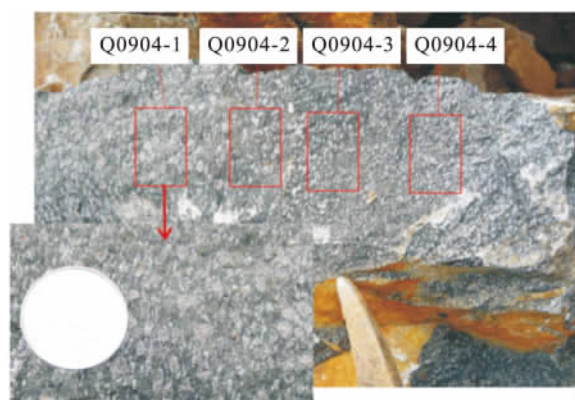


图2 榴闪岩的退变渐变过渡关系

Fig. 2 Retrogression of garnet amphibolite

在榴闪岩透镜体核部发现有高压基性麻粒岩,并通过矿物温压计得出峰期温压条件为 $828 \sim 887^\circ\text{C}$ 、 $1.40 \sim 1.58\text{ GPa}$ 。透镜体核部残存的高压麻粒岩与边部的榴闪岩、含榴斜长角闪岩呈渐变过渡状态。高压麻粒岩及榴闪岩的变质锆石 U-Pb 年龄集中在 $485 \sim 518\text{ Ma}$ 之间(陈丹玲等, 2004; 苏犁等, 2004; 刘军锋和孙勇, 2005; 李洪英等, 2009; 张建新等, 2011)。榴闪岩最初被认为是超基性岩体接触变质的产物(李曙光等, 1991),但随着野外观察的深入,已被普遍认为是区域变质的产物,并且其分布与离超镁铁质岩体的远近无关(刘良等, 1995; 陈丹玲等, 2004)。斜长角闪岩作为榴闪岩退变质的产物,角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 $420 \pm 30\text{ Ma}$ (Ratschbacher *et al.*, 2003)。

本文所研究的榴闪岩及斜长角闪片岩的采样点位于大松树沟栗树坪村西北 2.5 km 处的采石场

($33^\circ35'43.7''\text{N}$, $110^\circ57'57.4''\text{E}$)(图1),样品号分别为 Q0904 和 Q0907。斜长角闪片岩与前人所描述的斜长角闪岩为同一岩石,本文因其发育定向构造称其为斜长角闪片岩。榴闪岩呈透镜状分布于斜长角闪片岩中,与斜长角闪片岩呈渐变过渡关系。透镜体核部为榴闪岩,石榴石含量较多,呈等轴粒状,岩石无明显变形;向边部岩石变形逐渐增强,石榴石分解程度增加,呈眼球状;到最外面的斜长角闪片岩,石榴石完全分解(图2)。

2 岩相学特征

对同一块榴闪岩(Q0904)的不同部位进行了岩相学观察,从 Q0904-1 到 Q0904-4,退变程度逐渐增强(图2, 3),如 Q0904-1 保存了较多的石榴石变斑晶(含冠状体),到 Q0904-2 与 Q0904-3 石榴石的分解程度越来越强,直到 Q0904-4 中石榴石变斑晶完全分解,变为压扁拉长的长石及角闪石集合体构成的长英质透镜体。Q0904-4 与斜长角闪片岩(Q0907)的矿物组合与结构基本一致(图3c, 3d),且两者在野外为渐变过渡关系,说明榴闪岩(Q0904)与斜长角闪片岩(Q0907)为同一原岩不同程度的退变产物。

按照石榴石退变程度,榴闪岩与斜长角闪片岩内部有 3 种不同的矿物组合:(1)含石榴石变斑晶(含冠状体)的($\text{Gt} + \text{Am} + \text{Pl} + \text{Q} + \text{Ilm} + \text{Zo} \pm \text{Ap} \pm \text{Bi}$)(图3a);(2)长英质透镜体($\text{Am} + \text{Q} + \text{Pl} + \text{Ilm} \pm \text{Zo} \pm \text{Bi}$)(图3c),石榴石变斑晶(含冠状体)具港湾状,横切面从 $0.4\text{ cm} \times 0.3\text{ cm}$ 到 $0.2\text{ cm} \times 0.1\text{ cm}$ 变化,角闪石、斜长石及石英为其退变产物且呈冠状体产出,长英质透镜体的横切面面积从 $0.30\text{ cm} \times 0.15\text{ cm}$ 到 $0.2\text{ cm} \times 0.1\text{ cm}$ 左右,相对石榴石冠状体压扁拉长;(3)基质主要由粒状角闪石、石英、斜长石及榴石定向排列而成(图3b),在 Q0907 与 Q0904-4 中部分角闪石发育光性环带,核部颜色较浅,边部颜色较深。

此外,基质中的角闪石发育出溶结构(图4a),石榴石变斑晶(含冠状体)及长英质透镜体中的角闪石则无出溶现象。发育出溶的角闪石呈它形一半自形粒状,粒径一般 $100 \sim 600\text{ }\mu\text{m}$ 左右,偶见颗粒大者约 1 mm 。不同的切面上出溶片晶矿物表现出不同的形态,呈长短不一的点状或针状排列分布。在出溶呈针状分布的切面(宽度约 $4\text{ }\mu\text{m}$,长度约 $100 \sim 150\text{ }\mu\text{m}$),出溶较为密集,出溶方向与角闪石延长方

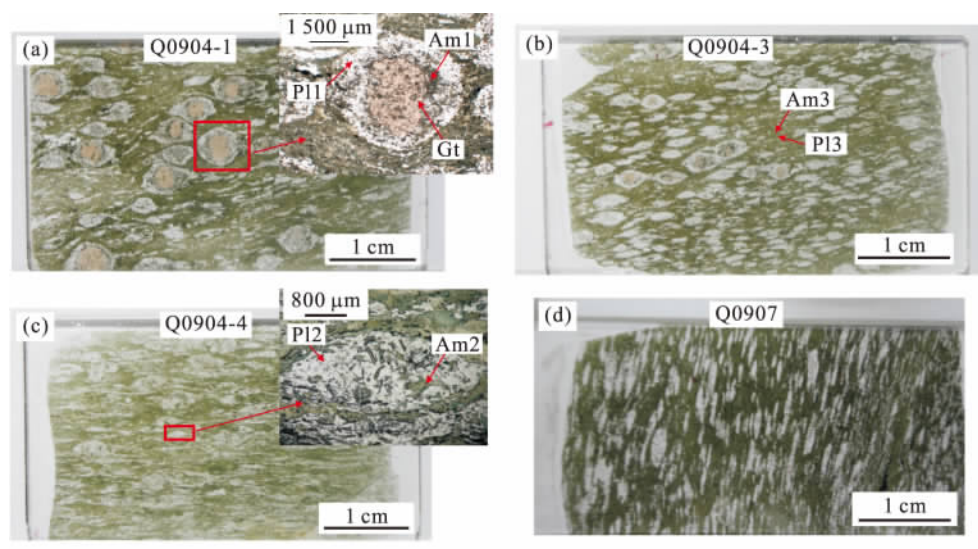


图 3 松树沟地区基性岩石榴石冠状体中的角闪石 (Am1) 及斜长石 (Pl1) (a), 基质中角闪石 (Am3) 及斜长石 (Pl3) (b), 长英质透镜体中角闪石 (Am2) 及斜长石 (Pl2) (c), 斜长角闪片岩的结构 (d)

Fig. 3 Amphiboles (Am1) and plagioclases (Pl1) in corona of garnet porphyroblast (a), Amphiboles (Am3) and plagioclase (Pl3) in matrix of garnet amphibolite (b), Amphiboles (Am2) and plagioclases (Pl2) in felsic lenses of garnet amphibolite (c), the structure of plagioclase amphibole schists (d)

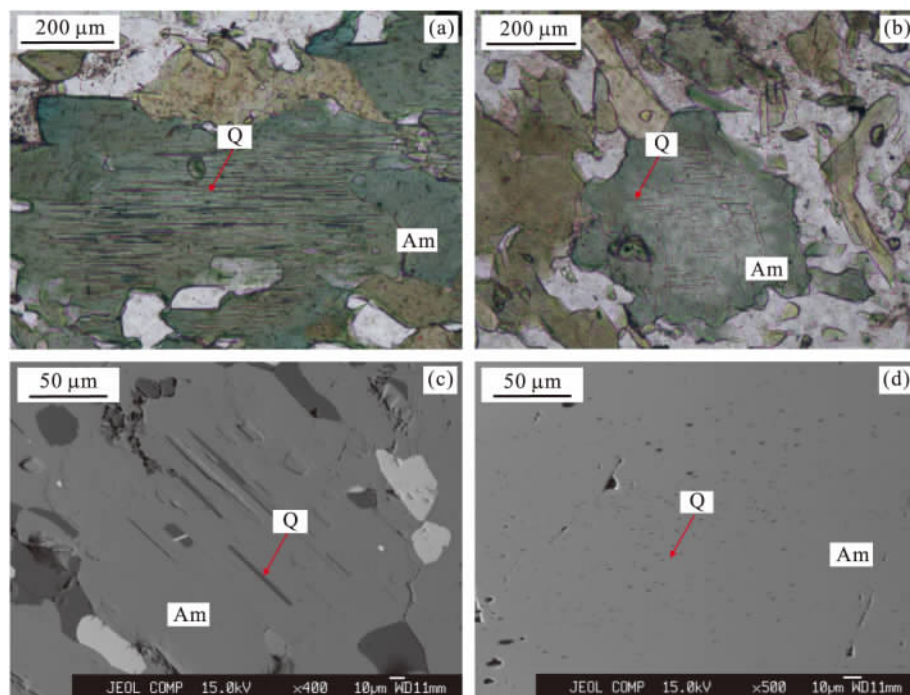


图 4 角闪石中针状石英出溶 (单偏光) (a); 环带角闪石核部发育石英出溶, 边部无出溶现象 (单偏光) (b); 角闪石中针状石英出溶 (BSE) (c) 以及角闪石近 (001) 面点状石英出溶 (BSE) (d)

Fig. 4 (a) Needle-like quartz exsolution in amphibole (plane polarized light); (b) Quartz exsolution only existing in the core, not being found in the mantle (plane polarized light); (c) Needle-like quartz exsolution in amphibole (BSE); (d) Spot-like quartz exsolution in amphibole (BSE)

Am. 角闪石; Q. 石英

向一致且消光角为 $12^{\circ} \sim 18^{\circ}$ 左右 (图 4a, 4c); 在平行面 (001) 上, 两组解理夹角为 56° 和 124° , 对称消光,

出溶呈点状分布 (图 4d). 以上 2 种出溶切面说明出溶可能沿解理发育且其方向与 c 轴平行. 环带角闪

表 1 松树沟地区基性岩代表性矿物电子探针成分分析结果(%)

Table 1 Representative minerals EMPA data for basic rocks in the Songshugou area

矿物名称	Gt	Gt	Am1	Am2	Am3	Am3	Am3	Pl1	Pl2	Pl3
点位	核部	边部				环带边部	环带核部			
名称			铁韭闪石	钙镁角闪石	镁角闪石	镁角闪石	阳起石	中长石	中长石	更长石
SiO ₂	36.87	36.96	40.72	43.72	46.79	44.49	52.48	57.61	58.87	61.56
Al ₂ O ₃	19.91	20.26	14.62	12.28	7.54	10.89	2.38	26.63	25.59	23.52
TiO ₂	0.17	0.13	1.03	0.56	0.33	0.43	0.05	0.02	0.05	0.04
FeO	28.53	31.58	20.17	17.50	19.47	18.65	15.91	0.18	0.12	0.19
Cr ₂ O ₃	0.00	0.01	0.00	0.05	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
MgO	1.49	1.47	7.10	9.21	10.47	9.24	13.97	0.04	0.02	0.02
MnO	3.91	1.08	0.19	0.26	0.24	0.25	0.22	0.00	0.00	0.00
CaO	8.51	8.27	11.79	12.52	12.12	12.47	12.84	9.22	8.34	5.83
Na ₂ O	0.00	0.00	1.83	1.29	0.99	1.18	0.26	6.24	6.84	8.25
K ₂ O	0.00	0.00	0.57	0.74	0.21	0.63	0.06	0.06	0.06	0.09
Total	99.40	99.75	98.02	98.12	98.15	98.23	98.16	99.99	99.89	99.49
Cation										
Si	2.98	2.98	6.13	6.49	6.90	6.61	7.60	2.58	2.63	2.75
Al	1.90	1.92	2.59	2.15	1.31	1.91	0.41	1.41	1.35	1.24
Ti	0.01	0.01	0.12	0.06	0.04	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00
Fe ³⁺	0.12	0.11	0.49	0.35	0.68	0.45	0.33	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
Mg	0.18	0.18	1.59	2.04	2.30	2.05	3.02	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	1.80	2.02	2.05	1.83	1.72	1.86	1.60	0.01	0.00	0.01
Mn	0.27	0.07	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00
Ca	0.74	0.71	1.90	1.99	1.92	1.98	1.99	0.44	0.40	0.28
Na	0.00	0.00	0.53	0.37	0.28	0.34	0.07	0.54	0.59	0.71
K	0.00	0.00	0.11	0.14	0.04	0.12	0.01	0.00	0.00	0.00
Al ^{IV}			1.87	1.51	1.10	1.39	0.40			
Na ^A			0.43	0.31	0.18	0.28	0.05			

注:具体 Am1、Am2、Am3、Pl1、Pl2 及 Pl3 的产状见文中矿物化学部分描述。

石的出溶结构只在核部发育,边部无出溶现象(图 4b)。

3 分析方法

矿物成分的电子探针分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,所用仪器型号为 JXA-8100,加速电压 15 kV,束流 20 nA,束斑 2 μ m。

锆石的单矿物分离在河北省廊坊区域地质矿产调查研究所进行。将样品洗净后,经烘干、粉碎、重磁分选后,在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用双目镜进行人工挑纯,将待测的锆石颗粒粘至环氧树脂样品座上,而后磨靶,使锆石剥露出来。锆石的阴极发光在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行,测试仪器为配备有 Ga-tan CL3+型 CL 探头的 Quanta 400 FEG 型热场发射扫描电镜,分析电压为 10 kV,电流为 240 μ A。

锆石 U-Pb 同位素定年在中国地质大学(武汉)

地质过程与矿产资源国家重点实验室利用 LA-ICP-MS 分析完成。激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, ICP-MS 为 Agilent 7500a。每个时间分辨分析数据包括大约 20~30 s 的空白信号和 50 s 的样品信号。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)是利用软件 ICP-MSDataCal(Liu *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2010)完成。详细的仪器操作条件和数据处理方法参照 Liu *et al.* (2008, 2010)。锆石样品的 U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄权重平均计算均采用 Isoplot/Ex_ver3(Ludwing, 2003)完成。

4 矿物化学

对榴闪岩中一个含较少包裹体的石榴石颗粒进行成分剖面分析(表 1),从核部到边部,铁铝榴石从 60.38%变化到 69.00%,钙铝榴石从 24.65%变化到 23.45%,镁铝榴石与锰铝榴石的含量较低,均在 5%左右。按照榴闪岩与其退变的斜长角闪片岩中的

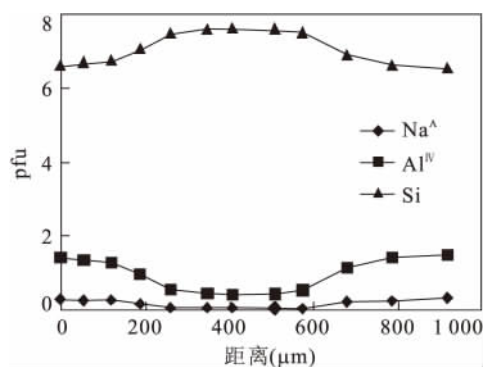


图 5 环带角闪石剖面成分变化图(pfu 指单位分子中的原子个数)

Fig. 5 Elements contents variation of amphi-bole zoning section (pfu refer to percent formula unit)

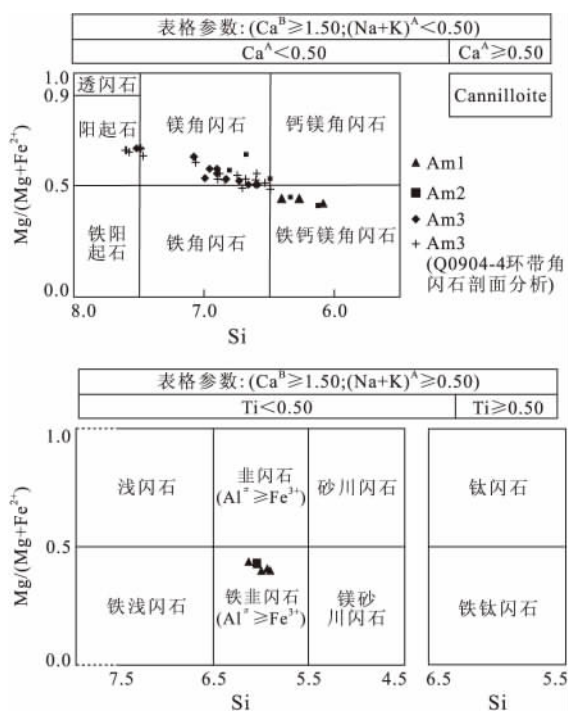


图 6 榴闪岩中角闪石产状成分分类图解(分类标准据 Leake *et al.*, 1997;横坐标表示单位 Si 分子中原子的个数)

Fig. 6 Classification of amphiboles of different attitudes

3 种矿物组合,将角闪石与斜长石分为 3 种产状.石榴石冠状体中的长石以中长石为主,个别为达拉长石(Pl1)(图 3a);随着石榴石的分解殆尽,长英质透镜体中的长石均为中长石(Pl2)(图 3c).基质中的斜长石主要为更长石(Pl3),牌号比前 2 种的要低(图 3b).石榴石冠状体中的角闪石各单位分子中的原子数 Si 为 5.91~6.41,Na^A 为 0.27~0.44,Al^{IV} 为 1.59~2.09,主要为铁韭闪石,个别为钙镁角闪石(Am1)(图 3a);随着石榴石的分解殆尽,长英质透镜体中的角闪石 Si 为 6.03~6.81,Na^A 为 0.09~

0.45,Al^{IV} 为 1.19~1.97,为钙镁角闪石—镁角闪石,个别为铁韭闪石(Am2)(图 3c);基质中无环带角闪石中各单位分子中的原子数 Si 为 6.60~7.52,Na^A 为 0.04~0.27,Al^{IV} 为 0.48~1.47,为铁钙镁角闪石—镁角闪石,极少数为阳起石(Am3)(图 3b).环带角闪石核部为阳起石,边部为镁角闪石,从核部到边部 Si 原子数从 7.60 降低至 6.61,Al 原子数从 0.41 增长至 1.91,Na 原子数从 0.07 增加到 0.34,Ti 原子数从 0.01 增长至 0.05,Ca 原子数基本无变化(图 5,表 1).榴闪岩中不同产状角闪石的成分分类见图 6.

5 锆石 U-Pb 定年

5.1 榴闪岩(Q0904-1)的分析结果

锆石呈它形一半自形,粒状—柱状,无色透明,粒径在 50~200 μm 之间,长宽比范围为 3:1~1:1.大部分锆石的 CL 图像显示锆石内部有弱分带现象(图 7a).共对 14 颗锆石进行了 16 个点的测试分析,Th/U 比值变化范围在 0.24~1.34 之间(表 2).除点 Q0904-13 与 Q0904-15 的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄明显偏低外(分别为 438 Ma 和 440 Ma),其余²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄集中在 472~500 Ma 之间且落在谐和线上(图 8a),加权平均年龄为 484±4 Ma.

5.2 斜长角闪片岩(Q0907)的分析结果

锆石它形一半自形,无色透明,粒径均在 100 μm 左右,长宽比在 2:1 左右.锆石的阴极发光

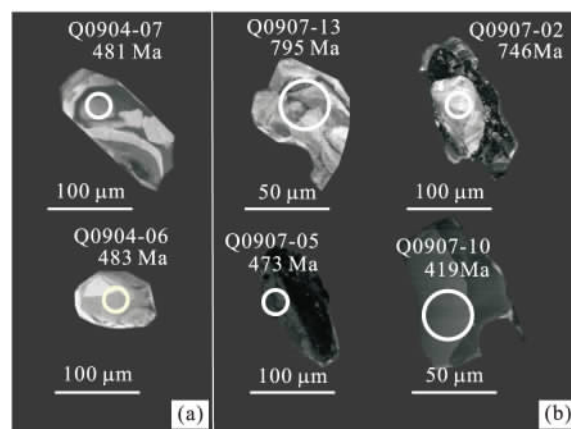


图 7 榴闪岩(Q0904-1)(a)及斜长角闪片岩(Q0907)(b)中特征锆石阴极发光图像

Fig. 7 CL images of representative zircons in garnet amphibolite (Q0904-1) (a) and plagioclase amphibole schists (Q0907) (b)

表 2 松树沟地区基性岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测试结果

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotope data for mafic rocks from Songshugou area

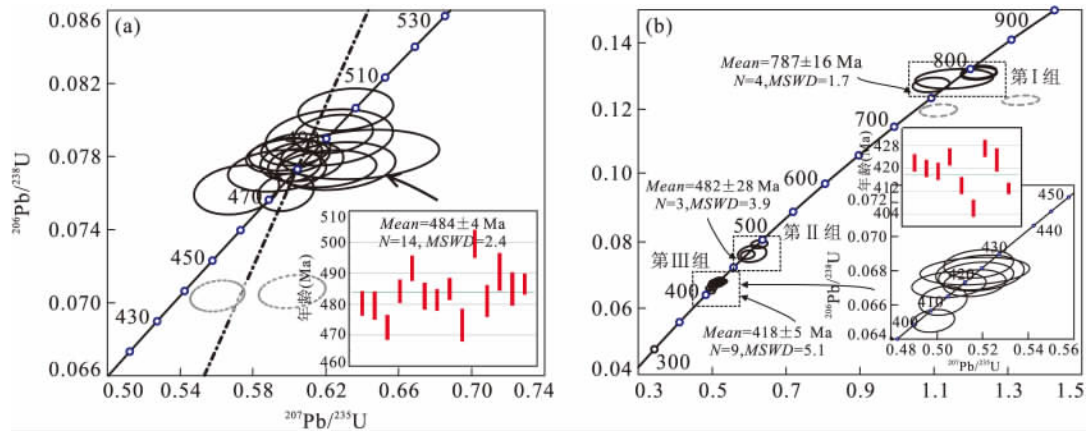


图 8 榴闪岩(Q0904-1)(a)和斜长角闪片岩(Q0907)(b)U-Pb 谐和年龄图

Fig. 8 Concordia U-Pb diagrams of zircons in garnet amphibolite (Q0904-1) (a) and plagioclase amphibole schist (Q0907) (b)

特征可大致分为 2 种:第 1 种锆石大多具有典型的核—幔—边 3 层结构;第 2 种锆石阴极发光强度较弱,呈微弱分带—无分带,为典型的变质增生锆石. 第 1 种锆石(如图 7b 中 Q0907-02)大多内部残核呈柱状,个别具有微弱的岩浆环带,宽度从 20~60 μm 不等,和重结晶锆石的特征较为一致(吴元保和郑永飞, 2004);幔部为一圈黑色圈层;边部为狭窄的变质增生边. 极少数锆石缺少核部结构,只发育幔部和边部(如图 7b 中 Q0907-05)或只发育核部,缺少幔部和边部结构(如图 7b 中 Q0907-13). 由于第 1 种锆石核部与边部宽度均较窄,只选择核部或边部较宽的颗粒进行分析. 共对 18 颗锆石进行了 18 个点的分析(表 2),从图 8b 可以看出分析数据的投点集中在 3 个区域. 其中位于第 1 种锆石核部的 6 个测试点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 729~795 Ma(图 8b),去除由于 Pb 丢失明显偏离谐和线的两点,获得加权平均年龄为 787 ± 16 Ma(第 I 组),个别点由于 Pb 丢失落在谐和线以下,接近原岩岩浆锆石的结晶年龄;位于第 1 种锆石变质增生边的 3 个测试点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 473 Ma、475 Ma 和 492 Ma(图 8b)(第 II 组),加权平均年龄为 482 ± 28 Ma,代表第一期变质事件的年龄;位于第 2 种锆石的 9 个测试点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 406~424 Ma 之间(图 8b)(第 III 组),均落在谐和线上,加权平均年龄为 418 ± 5 Ma,代表第二期变质事件的年龄.

6 讨论

6.1 两期变质事件——岩相学的记录

选择适当的矿物或者矿物组合对重建岩石所经

历的变质历史至关重要. 对于经历高级变质作用的岩石,石榴石由于其成分的多变性,且存在于较宽的压力和温度范围,是重建变质历史的理想矿物(Seth *et al.*, 2008). 刘良等(1995)对榴闪岩峰期的高压麻粒岩中的石榴石进行了成分分析,并利用石榴石—单斜辉石温度计计算出峰期温压为 828~887 $^{\circ}\text{C}$, 1.40~1.58 GPa. 本次研究中所见石榴石冠状体中的矿物组合及矿物化学成分与刘良等(1995)报道的角闪岩相的榴闪岩中的一致. 石榴石的成分环带不明显,可能与退变质过程中的再平衡有关. 随着石榴石的分解,Am1 变为 Am2, Na^{A} 、Ti 及 Al^{IV} 含量减少, Si 增加;Pl1 变为 Pl2, 牌号有所降低. 石榴石冠状体中角闪石、斜长石的成分及矿物组合的变化代表了一个降温过程. Q0907 及 Q0904-4 中部分长英质透镜体与黝帘石的共生,是石榴石冠状体退变最完全的产物. 此外,基质中环带角闪石的核部阳起石为从麻粒岩相峰期退变最完全的产物(见后解释),已到达绿片岩相,代表第一期变质事件的结束.

在中低温基性岩中,角闪石被认为是一种能记录变质演化历史的重要矿物. 理论上,变质岩中角闪石的成分会随着温度和压力的改变而发生相应的变化(Raase, 1974; Spear, 1981; Spear, 1993; Ernst and Liu, 1998),但温压变化期间,局部矿物相之间的不平衡常导致多种成分角闪石的共存,最常见的例子就是环带的生长(Spear, 1993; Schumacher, 2007). 不同期次、不同成分角闪石的共存常能记录多期变质事件,为研究变质历史的演化提供了方便. 松树沟基性岩中的基质由 Am3、Pl3 及副矿物定向排列而成. 部分角闪石具有环带增生现象,核部为阳起石而边部为普通角闪石. 角闪石的成分变化主要取决于全岩成分及变质条件(Spear, 1993);在绿

表 3 松树沟地区基性岩基质中角闪石 (AM3) 出溶成分恢复结果

Table 3 Amphibole composition prior to exsolution being restored in mafic rocks

点位	无环带角闪石				环带角闪石核部			
	2-2-2	出溶前	2-5-3	出溶前	2-2-1	出溶前	4-4-8	出溶前
出溶比例	1.61%		6.63%		1.94%		5.50%	
SiO ₂ (%)	44.74	45.48	45.24	48.28	45.66	46.53	52.48	54.64
Al ₂ O ₃ (%)	9.98	9.84	9.35	8.83	9.52	9.36	2.38	2.27
TiO ₂ (%)	0.61	0.60	0.55	0.52	0.54	0.53	0.05	0.05
FeO (%)	20.25	19.98	19.93	18.82	19.12	18.81	15.91	15.18
Cr ₂ O ₃ (%)	0.03	0.03	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00
MgO (%)	8.89	8.77	9.22	8.71	9.56	9.41	13.97	13.34
MnO (%)	0.26	0.25	0.23	0.22	0.20	0.20	0.22	0.21
CaO (%)	11.68	11.53	12.04	11.37	10.58	10.41	12.84	12.25
Na ₂ O (%)	1.43	1.41	1.19	1.13	1.16	1.14	0.26	0.25
K ₂ O (%)	0.34	0.33	0.29	0.27	0.36	0.35	0.06	0.06
Total (%)	98.21	98.23	98.04	98.15	96.70	96.76	98.16	98.24
Caution								
Si	6.66	6.76	6.73	7.11	6.83	6.95	7.60	7.88
Al	1.75	1.73	1.64	1.53	1.68	1.65	0.41	0.39
Ti	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.01	0.01
Fe ³⁺	0.57	0.43	0.57	0.23	0.48	0.36	0.33	0.00
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	1.97	1.94	2.04	1.91	2.13	2.09	3.02	2.87
Fe ²⁺	1.96	2.06	1.91	2.09	1.91	1.99	1.60	1.83
Mn	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Ca	1.86	1.84	1.92	1.80	1.70	1.67	1.99	1.89
Na	0.41	0.41	0.34	0.32	0.34	0.33	0.07	0.07
K	0.06	0.06	0.05	0.05	0.07	0.07	0.01	0.01

注:普通角闪石的密度为 3.1~3.3 g/cm³,透闪石—阳起石的密度为 3.02~3.44 g/cm³,石英的密度为 2.65 g/cm³(赵珊茸等, 2004)。取普通角闪石密度平均值为 3.2 g/cm³,取阳起石密度平均值为 3.23 g/cm³ 进行成分恢复计算。

片岩相时角闪石的成分主要取决于全岩的成分,但是随着变质级别的升高,温压条件的变化逐渐处于主导地位(Zenk and Schulz, 2004)。一般来说,从阳起石到普通角闪石,主要是以下 2 种元素对之间的替代发起主导作用:Na^AAl^{IV}=□-1Si^{IV}-1(浅闪石替换,□代表空位)及 Al^{IV}Al^{IV}=Mg^{M1-M3}-1Si^{IV}-1(契尔马克替换)(Grapes and Graham, 1978)。这 2 种替换反应随着温度的升高而发生(Ernst and Liu, 1998)。据电子探针成分分析数据,环带角闪石从核部到边部,Na^A、Al 及 Al^{IV}的含量均升高, Si 含量降低(图 5,表 1),核部到边部的成分变化说明 2 种替换均发挥了重要的作用。据 Ti 经验温度计(Gerya *et al.*, 1997),环带角闪石从核部的 415 °C 变化到边部的 681 °C,指示了从绿片岩相到角闪岩相的升温过程。杨勇等(1994)也曾报道过松树沟地区榴闪岩中角闪石的环带现象,认为环带的增生是俯冲过程中前进变质的产物。松树沟地区已报道的最高变质级别达到了高压麻粒岩相,且榴闪岩为高压麻粒岩的退变产物(刘良等, 1995),因此榴闪岩中保留俯冲时进变质信息的可能性不大。核部阳起石应是峰

期变质后退变的产物,而后又有增温事件的叠加而导致了角闪石环带的增生,记录了第二期变质事件。

基性岩基质中无环带角闪石,环带角闪石核部普遍发育石英出溶。理论上,出溶后基质与片晶化学成分之和应该等于出溶前矿物的化学成分(刘良等, 2009)。用软件 Photoshop 对出溶角闪石 BSE 图片进行处理,计算得到出溶石英片晶占角闪石的比例为 1.61%~6.63%。按照出溶的比例,对出溶前角闪石的成分进行恢复(表 3)。结果表明,环带角闪石核部为阳起石,出溶前亦为阳起石;无环带的镁角闪石出溶前则为铁角闪石—镁角闪石。石英出溶后,角闪石中 Si 含量下降,致使了 Al^{IV}、Ti 和 Na 含量的上升,因此角闪石的出溶可能与第二期变质作用有关,是升温事件的产物。

6.2 锆石 U-Pb 年龄及地质意义

斜长角闪片岩(Q0907)中的第 I 组年龄(787±16 Ma)代表原岩结晶年龄。榴闪岩(Q0904-1)中锆石 U-Pb 年龄(484±4 Ma)、斜长角闪片岩(Q0907)中第 II 组年龄(473~492 Ma)与前人在高压麻粒岩或榴闪岩中测得的锆石 U-Pb 年龄(485~518 Ma)

(陈丹玲等, 2004; 苏犁等, 2004; 刘军锋和孙勇, 2005; 李洪英等, 2009; 张建新等, 2011)在误差范围内一致,代表了~500 Ma 的高压麻粒岩相变质事件. 斜长角闪片岩(Q0907)中锆石的第Ⅲ组加权平均年龄(418 ± 5 Ma)与 Ratschbacher *et al.* (2003)测得榴闪岩中角闪石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄(420 ± 30 Ma)在误差范围内一致,代表了高压麻粒岩退变之后另一次热事件的时代,而角闪石的环带增生就可能与这次热事件有关.

北秦岭在早古生代经历了复杂的造山过程,至少存在两期变质事件,一期是以北秦岭北部官坡的榴辉岩(杨经绥等, 2002)及南部松树沟的高压麻粒岩(陈丹玲等, 2004)为代表的,在~500 Ma 发生的变质作用,同时伴随有大量岩浆活动(陈岳龙, 1999; 刘军锋, 2005; 陆松年等, 2006; 张宗清等, 2006);另一期变质事件发生在~430 Ma,南至丹凤群北至宽坪群,变质程度从角闪岩相—麻粒岩相(Zhai *et al.*, 1998; Sun *et al.*, 2002; Ratschbacher *et al.*, 2003),同时还发育 420~450 Ma 的岩浆活动(陈岳龙, 1999; 张宗清等, 2006; 闫全人等, 2007; 王涛等, 2009).

北秦岭北部的榴辉岩与南部的高压麻粒岩均形成于~500 Ma,说明此时曾发生板块之间的俯冲碰撞(Ratschbacher *et al.*, 2003; 陈丹玲等, 2004; Cheng *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2011b; 张建新等, 2011). 最新研究表明,榴辉岩的形成很可能与华北板块和北秦岭之间的碰撞闭合有关(杨经绥等, 2002; 陈丹玲和刘良, 2011; Wang *et al.*, 2011b; 张建新等, 2011),作为活动大陆一方的北秦岭可能会挤压增厚,因此北部的榴辉岩与南部的高压麻粒岩可能是同一构造事件的产物(张建新等, 2011).

本文所研究的斜长角闪片岩中的第Ⅲ组年龄记录了一期晚志留纪—早泥盆纪的变质事件. 此次事件在秦岭地区北秦岭构造单元普遍发育(Sun *et al.*, 2002; Ratschbacher *et al.*, 2003; 时毓等, 2009),同时还发育有大小不一的侵入体(Ratschbacher *et al.*, 2003; 王涛等, 2009). 此外,在桐柏的北秦岭构造单元地区也发育此次变质作用,且变质级别从南部秦岭群到北部宽坪群从麻粒岩相到角闪岩相逐渐降低(Zhai *et al.*, 1998),同样也伴生有晚志留纪—早泥盆纪的岩浆活动(Kroner *et al.*, 1993; Xue *et al.*, 1996a; Wang *et al.*, 2011a). 因此,上述两地区应在晚志留纪—早泥盆纪经历了同样的地质事件. 晚志留纪—早泥盆纪的变质事件可

能是另一次构造事件导致的(Ratschbacher *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2011b),也可能是~500 Ma 碰撞事件的延续(Xue *et al.*, 1996a; Zhai *et al.*, 1998). 本文所报道的角闪石中环带的增生是增温事件的产物,结合本文的锆石年龄(418 ± 5 Ma)及前人的角闪石的 Ar-Ar(420 ± 30 Ma)(Ratschbacher *et al.*, 2003)年龄,初步认为~420 Ma 的变质事件是在~500 Ma 的碰撞事件之后叠加的,两者可能分属不同的构造旋回,~420 Ma 的事件并非代表~500 Ma 事件的延续. 值得注意的是,此时桐柏地区在秦岭群还发育有麻粒岩(Kroner *et al.*, 1993),变质年龄分布在 418~440 Ma 之间(Liu *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2011a; Xiang *et al.*, 2011). 麻粒岩相的变质作用通常指示俯冲碰撞引起的地壳增厚,由于在~500 Ma 时北秦岭已与北部块体发生俯冲碰撞,晚志留纪—早泥盆纪的变质事件可能是由秦岭洋向北俯冲碰撞而导致的(Wang *et al.*, 2011a, 2011b).

7 结论

岩相学、矿物化学以及锆石年代学研究表明,松树沟地区基性岩在早古生代主要经历了两期变质事件:在经历了 480~518 Ma 的与碰撞相关的变质作用后,退变至绿片岩相;在 418 ± 5 Ma 又受到一期变质作用,使基性岩中的角闪石发生了环带的增生. 这两期变质作用可能分别由北秦岭与华北板块南缘俯冲碰撞以及北秦岭受到南部秦岭洋的俯冲相关.

References

- Aitken, A. R. A., Betts, P. G., 2009. Multi-scale integrated structural and aeromagnetic analysis to guide tectonic models; an example from the eastern Musgrave Province, Central Australia. *Tectonophysics*, 476 (3–4): 418–435. doi:10.1016/j.tecto.2009.07.007
- Basu Sarbadhikari, A., Bhowmik, S. K., 2008. Constraining the metamorphic evolution of a cryptic hot Mesoproterozoic orogen in the Central Indian tectonic zone, using *P-T* pseudosection modelling of mafic intrusions and host re-worked granulites. *Precambrian Research*, 162 (1–2): 128–149. doi:10.1016/j.precamres.2007.07.014
- Chen, D. L., Liu, L., 2011. New data on the chronology of eclogite and associated rock from Guanpo area, North Qinling orogeny and its constraint on nature of North Qinling HP-UHP eclogite terrane. *Earth Science Frontiers*, 18 (2):

- 158—169 (in Chinese with English abstract).
- Chen, D. L., Liu, L., Sun, Y., et al., 2004. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating for high-pressure basic granulite from North Qinling and its geological significance. *Chinese Sci. Bull.*, 49 (21): 2296—2304. doi: 10.1360/03wd0544
- Chen, Y. L., 1999. Geochemistry of granitoids from the eastern Tianshan Mountains and the Northern Qinling belt. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Cheng, H., Zhang, C., Vervoort, J. D., et al., 2011. Timing of eclogite facies metamorphism in the North Qinling by U-Pb and Lu-Hf geochronology. *Lithos*, 136—139: 46—59. doi: 10.1016/j.lithos.2011.06.003
- Coleman, R. G., Wang, X. M., 1995. Ultrahigh pressure metamorphism. Cambridge University Press, Cambridge.
- Dong, Y. P., Zhang, G. W., Hauzenberger, C., et al., 2011. Palaeozoic tectonics and evolutionary history of the Qinling orogen: evidence from geochemistry and geochronology of ophiolite and related volcanic rocks. *Lithos*, 122 (1—2): 39—56. doi: 10.1016/j.lithos.2010.11.011
- Ernst, W. G., Liu, J., 1998. Experimental phase-equilibrium study of Al- and Ti-contents of calcic amphibole in MORB: a semiquantitative thermobarometer. *American Mineralogist*, 83(9—10): 952—969.
- Gerya, T. V., Perchuk, L. L., Triboulet, C., et al., 1997. Petrology of the Tumanshet zonal metamorphic complex, eastern Sayan. *Petrology*, 5(6): 503—533.
- Grapes, R. H., Graham, C. M., 1978. The actinolite-hornblende series in metabasites and the so-called miscibility gap: a review. *Lithos*, 11 (2): 85—92. doi: 10.1016/0024-4937(78)90001-4
- Kroner, A., Zhang, G. W., Sun, Y., et al., 1993. Granulites in the Tongbai area, Qinling belt, China: geochemistry, petrology, single zircon geochronology, and implications for the tectonic evolution of eastern Asia. *Tectonics*, 12 (1): 245—255. doi: 10.1029/92TC01788
- Leake, B. E., Woolley, A. R., Arps, C. E. S., et al., 1997. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names. *The Canadian Mineralogist*, 35: 219—246. doi: 10.1180/minmag.1997.061.405.13
- Li, H. Y., Liu, J. F., Yang, L., 2009. Characteristics of zircons from a metamorphic contact zone of the Songshugou ultramafic pluton in North Qinling and their geological significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(3): 225—234 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. G., Chen, Y. Z., Zhang, G. W., et al., 1991. A 1 Ga B. P. Apline peridotite body emplaced into the Qinling Group: evidence for the existence of the Late Proterozoic plate tectonics in the North Qinling area. *Geological Review*, 37 (3): 235—242 (in Chinese with English abstract).
- Liou, J. G., Tsujimori, T., Zhang, R. Y., et al., 2004. Global UHP metamorphism and continental subduction/collision: the Himalayan model. *International Geology Review*, 46(1): 1—27. doi: 10.2747/0020-6814.1.1
- Liu, J. F., 2005. Geochemistry and chronology of ultramafites from the Songshugou area in Qinling (Dissertation). Northwest University, Xi'an (in Chinese).
- Liu, J. F., Sun, Y., 2005. New data on the “hot” emplacement age of ultramafic rocks from the Songshugou area in the eastern Qinling. *Geological Review*, 51(2): 189—192 (in Chinese with English abstract).
- Liu, L., Yang, J. X., Zhang, J. F., et al., 2009. Exsolution microstructures in ultrahigh-pressure rocks: progress, controversies and challenges. *Chinese Sci. Bull.*, 54(12): 1983—1995. doi: 10.1007/s11434-009-0204-5
- Liu, L., Zhou, D. W., Dong, Y. P., et al., 1995. High pressure metabasites and their retrograde metamorphic *P-T-t* path from Songshugou area, eastern Qinling Mountain. *Acta Petrologica Sinica*, 11(2): 127—136 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. C., Jahn, B. M., Hu, J., et al., 2011. Metamorphic patterns and SHRIMP zircon ages of medium-to-high grade rocks from the Tongbai orogen, Central China: implications for multiple accretion/collision processes prior to terminal continental collision. *Journal of Metamorphic Geology*, 29: 979—1002. doi: 10.1111/j.1525-1314.2011.00952.x
- Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z. C., et al., 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1—2): 537—571. doi: 10.1093/petrology/egp082
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257(1—2): 34—43. doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.08.004
- Lu, F. X., Zhang, B. R., Han, Y. W., et al., 2006. The three-dimensional lithospheric chemical structure in Qinling-Dabie-Sulu area. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Lu, S. N., Chen, Z. H., Xiang, Z. Q., et al., 2006. U-Pb ages of detrital zircons from the para-metamorphic rocks of

- the Qinling Group and their geological significance. *Earth Science Frontiers*, 13(6): 303–310 (in Chinese with English abstract).
- Lu, S. N., Yu, H. F., Li, H. K., et al., 2009. Precambrian geology in central orogen (from center to west). Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Ludwing, K. R., 2003. ISOPLOT 3: a geochronological tool-kit for micro soft excel. Berkeley Geochronology Centre Special Publication, 4: 25–32.
- Raase, P., 1974. Al and Ti contents of hornblende, indicators of pressure and temperature of regional metamorphism. *Contr. Mineral. and Petrol.*, 45(3): 231–236. doi:10.1007/BF00383440
- Ratschbacher, L., Franz, L., Enkelmann, E., et al., 2006. The Sino-Korean-Yangtze suture, the Huwan detachment, and the Paleozoic-Tertiary exhumation of (ultra) high-pressure rocks along the Tongbai-Xinxian-Dabie Mountains. In: Hacker, B. R., McClelland, W. C., Liou, J. G., eds., *Ultrahigh-pressure metamorphism: deep continental subduction*. *GSA Special Papers*, 45–75. doi:10.1130/2006.2403(03)
- Ratschbacher, L., Hacker, B. R., Calvert, A., et al., 2003. Tectonics of the Qinling (Central China): tectonostratigraphy, geochronology, and deformation history. *Tectonophysics*, 366 (1–2): 1–53. doi: 10.1016/S0040-1951(03)00053-2
- Schumacher, J. C., 2007. Metamorphic amphiboles: composition and coexistence. In: Hawthorne, F. C., Oberti, R., Ventura, G. D., eds., *Amphiboles: crystal chemistry, occurrence, and health issues*. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 67: 359–416. doi:10.2138/rmg.2007.67.10
- Seth, B., Jung, S., Gruner, B., 2008. Deciphering polymetamorphic episodes in high-grade metamorphic orogens: constraints from Pb/Sr, Sm/Nd and Lu/Hf garnet dating of low- to high-grade metasedimentary rocks from the Kaoko belt (Namibia). *Lithos*, 104 (1–4): 131–146. doi:10.1016/j.lithos.2007.12.003
- Shi, Y., Yu, J. H., Xu, X. S., et al., 2009. Geochronology and geochemistry of the Qinling Group in the eastern Qinling orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (10): 2651–2670 (in Chinese with English abstract).
- Spear, F. S., 1981. An experimental study of hornblende stability and compositional variability in amphibolite. *American Journal of Science*, 281(6): 697–734. doi: 10.2475/ajs.281.6.697
- Spear, F. S., 1993. Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths. Mineralogical Society of America Monograph Series, Washington, D. C., 1–799.
- Su, L., Song, S. G., Song, B., et al., 2004. SHRIMP zircon U-Pb ages of garnet pyroxenite and Fushui gabbroic complex in Songshugou region and constraints on tectonic evolution of Qinling orogenic belt. *Chinese Sci. Bull.*, 49(12): 1307–1310. doi:10.1360/03wd0194
- Su, L., Song, S. G., Zhou, D., 2005. Petrogenesis of Songshugou dunite body in the Qinling orogenic belt, Central China: constraints from geochemistry and melt inclusions. *Science in China (Ser. D)*, 48(8): 1146–1157. doi:10.1360/03yd0037
- Sun, W. D., Li, S. G., Sun, Y., et al., 2002. Mid-paleozoic collision in the North Qinling: Sm-Nd, Rb-Sr and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages and their tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21(1): 69–76. doi:10.1016/S1367-9120(02)00010-X
- Vernon, R. H., 1996. Problems with inferring P - T - t paths in low- P granulite facies rocks. *Journal of Metamorphic Geology*, 14(2): 143–153. doi:10.1046/j.1525-1314.1996.05814.x
- Wang, H., Wu, Y. B., Gao, S., et al., 2011a. Silurian granulite-facies metamorphism, and ceval magmatism and crustal growth in the Tongbai orogen, Central China. *Lithos*, 125 (1–2): 249–271. doi:10.1016/j.lithos.2011.02.010.
- Wang, H., Wu, Y. B., Gao, S., et al., 2011b. Eclogite origin and timings in the North Qinling terrane, and their bearing on the amalgamation of the South and North China blocks. *Journal of Metamorphic Geology*, 29 (9): 1019–1031. doi: 10.1111/j.1525-1314.2011.00955.x
- Wang, T., Wang, X. X., Tian, W., et al., 2009. North Qinling Paleozoic granite associations and their variation in space and time: implications for orogenic processes in the orogens of Central China. *Science in China (Ser. D)*, 52(9): 1359–1384. doi: 10.1007/s11430-009-0129-5
- Wu, Y. B., 2009. Multistage evolution of continental collision orogen: a case study for western Dabie orogen. *Chinese Sci. Bull.*, 54(15): 2568–2579. doi:10.1007/s11434-009-0410-1
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Sci. Bull.*, 49(15): 1554–1569. doi:10.1007/BF03184122
- Xiang, H., Zhang, L., Zhong, Z. Q., et al., 2009. Zircon U-Pb geochronology and metamorphism of mafic granulite from north Tongbai, Central China. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (2): 348–358 (in Chinese with English abstract).
- Xiang, H., Zhang, L., Zhong, Z. Q., et al., 2011. Ultrahigh-temperature metamorphism and anticlockwise P - T - t

- path of Paleozoic granulites from north Qinling-Tongbai orogen, Central China. *Gondwana Research*, 21(2-3): 559-576. doi:10.1016/j.gr.2011.07.002
- Xue, F., Kroner, A., Reischmann, T., et al., 1996a. Palaeozoic pre- and post-collision calc-alkaline magmatism in the Qinling orogenic belt, Central China, as documented by zircon ages on granitoid rocks. *Journal of the Geological Society*, 153(3): 409-417. doi:10.1144/gsjgs.153.3.0409
- Xue, F., Lerch, M. F., Kroner, A., et al., 1996b. Tectonic evolution of the east Qinling Mountains, China, in the Palaeozoic: a review and new tectonic model. *Tectonophysics*, 253(3-4): 271-284. doi:10.1016/0040-1951(95)00060-7
- Yan, Q. R., Chen, J. L., Wang, Z. Q., et al., 2008. Zircon U-Pb and geochemical analyses for leucocratic intrusive rocks in pillow lavas in the Danfeng Group, North Qinling Mountains, China. *Science in China (Ser. D)*, 51(2): 249-262. doi:10.1007/s11430-007-0144-3
- Yang, J. S., Xu, Z. Q., Dobrzinetskaya, L. F., et al., 2003. Discovery of metamorphic diamonds in Central China: an indication of a >4 000 km long zone of deep subduction resulting from multiple continental collisions. *Terra Nova*, 15(6): 370-379. doi:10.1046/j.1365-3121.2003.00511.x
- Yang, J. S., Xu, Z. Q., Pei, X. Z., et al., 2002. Discovery of diamond in North Qinling: evidence for a giant UHPM belt across Central China and recognition of Paleozoic and Mesozoic dual deep subduction between North China and Yangtze plates. *Acta Geologica Sinica*, 76(4): 484-495 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y., Chen, N. S., Lu, Q., et al., 1994. Characteristics of composition zoning of garnet and amphibole and metamorphic processes of garnet-amphibole rocks from Songshugou area, Shangnan, Shanxi Province. *Acta Petrologica Sinica*, 10(4): 401-412 (in Chinese with English abstract).
- Zenk, M., Schulz, B., 2004. Zoned Ca-amphiboles and related P-T evolution in metabasites from the classical Barrovian metamorphic zones in Scotland. *Mineralogical Magazine*, 68(5): 769-786. doi:10.1180/0026461046850218
- Zhai, X., Day, H. W., Hacker, B. R., et al., 1998. Paleozoic metamorphism in the Qinling orogen, Tongbai Mountains, Central China. *Geology*, 26(4): 371-374. doi:10.1180/0026461046850218
- Zhang, G. W., Meng, Q. R., Yu, Z. P., et al., 1996. Orogenesis and dynamics of the Qinling orogen. *Science in China (Ser. D)*, 39(3): 225-234.
- Zhang, J. X., Yu, S. Y., Meng, F. C., 2011. Polyphase early Paleozoic metamorphism in the northern Qinling orogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 1179-1190 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. Q., Zhang, G. W., Liu, D. Y., et al., 2006. Geochronology and geochemistry of ophiolites, granitoids and clastic rocks in Qinling orogen. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhao, S. R., Bian, Q. J., Ling, Q. C., 2004. Crystallography and mineralogical. Higher Education Press, Beijing (in Chinese).
- Zheng, Y. F., 2008. A perspective view on ultrahigh-pressure metamorphism and continental collision in the Dabie-Sulu orogenic belt. *Chinese Sci. Bull.*, 53(20): 3081-3104. doi:10.1007/s11434-008-0388-0
- Zheng, Y. F., Fu, B., Gong, B., et al., 2003. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: implications for geodynamics and fluid regime. *Earth-Science Reviews*, 62(1-2): 105-161. doi:10.1016/S0012-8252(02)00133-2

附中文参考文献

- 陈丹玲, 刘良, 2011. 北秦岭榴辉岩及相关岩石年代学的进一步确定及其对板片俯冲属性的约束. 地学前缘, 18(2): 158-169.
- 陈丹玲, 刘良, 孙勇, 等, 2004. 北秦岭松树沟高压基性麻粒岩锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义. 科学通报, 49(18): 1901-1908.
- 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.
- 李洪英, 刘军锋, 杨磊, 2009. 北秦岭松树沟超镁铁质岩体接触变质带中锆石特征及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 28(3): 225-234.
- 李曙光, 陈移之, 张国伟, 等, 1991. 一个距今 10 亿年侵位的阿尔卑斯型橄榄岩体: 北秦岭晚元古代板块构造体制的证据. 地质论评, 37(3): 235-242.
- 刘军锋, 2005. 秦岭松树沟超镁铁质岩体地球化学及年代学 (硕士学位论文). 西安: 西北大学.
- 刘军锋, 孙勇, 2005. 东秦岭松树沟超基性岩体“热”侵位时代新知. 地质论评, 51(2): 189-192.
- 刘良, 杨家喜, 章军锋, 等, 2009. 超高压岩石中矿物显微出溶结构研究进展、面临的问题与挑战. 科学通报, 54(10): 1387-1400.
- 刘良, 周鼎武, 董云鹏, 等, 1995. 东秦岭松树沟高压变质基性岩石及其退变质作用的 PTt 演化轨迹. 岩石学报, 11(2): 127-136.
- 陆松年, 陈志宏, 相振群, 等, 2006. 秦岭岩群副变质岩碎屑锆石年龄谱及其地质意义探讨. 地学前缘, 13(6):

- 303—310.
- 陆松年,于海峰,李怀坤,等,2009. 中央造山带(中—西部)前寒武纪地质. 北京:地质出版社.
- 路凤香,张本仁,韩吟文,等,2006. 秦岭—大别—苏鲁地区岩石圈三维化学结构特征. 北京:地质出版社.
- 时毓,于津海,徐夕生,等,2009. 秦岭造山带东段秦岭岩群的年代学和地球化学研究. 岩石学报, 25(10): 2651—2670.
- 苏犁,宋述光,宋彪,等,2004. 松树沟地区石榴辉石岩和富水杂岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其对秦岭造山带构造演化的制约. 科学通报, 49(12): 1209—1211.
- 苏犁,宋述光,周鼎武,2005. 秦岭造山带松树沟纯橄岩体成因:地球化学和岩浆包裹体的制约. 中国科学(D 辑), 35(1): 38—47.
- 王涛,王晓霞,田伟,等,2009. 北秦岭古生代花岗岩组合、岩浆时空演变及其对造山作用的启示. 中国科学(D 辑), 39(7): 949—971.
- 吴元保,2009. 大陆造山过程的多期演化:以西大别为例. 科学通报, 54(13): 1815—1825.
- 吴元保,郑永飞,2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报, 49(16): 1589—1604.
- 向华,张利,钟增球,等,2009. 北桐柏地区镁铁质麻粒岩锆石 U-Pb 年代学及变质作用. 岩石学报, 25(2): 348—358.
- 闫全人,陈隽璐,王宗起,等,2007. 北秦岭小王洞枕状熔岩中淡色侵入岩的地球化学特征、SHRIMP 年龄及地质意义. 中国科学(D 辑), 37(10): 1301—1313.
- 杨经绥,许志琴,裴先治,等,2002. 秦岭发现金刚石:横贯中国中部巨型超高压变质带新证据及古生代和中生代两期深俯冲作用的识别. 地质学报, 76(4): 484—495.
- 杨勇,陈能松,陆琦等,1994. 松树沟榴闪岩中的石榴石和角闪石成分环带特征及岩石变质过程. 岩石学报, 10(4): 401—412.
- 张国伟,孟庆任,于在平,等,1996. 秦岭造山带的造山过程及其动力学过程. 中国科学(D 辑), 26(3): 193—200.
- 张建新,于胜尧,孟凡聪,2011. 北秦岭造山带早古生代多期造山作用. 岩石学报, 27(4): 1179—1190.
- 张宗清,张国伟,刘敦一,等,2006. 秦岭造山带蛇绿岩、花岗岩和碎屑沉积岩同位素年代学和地球化学. 北京:地质出版社.
- 赵珊茸,边秋娟,凌其聪,2004. 结晶学及矿物学. 北京:高等教育出版社.
- 郑永飞,2008. 超高压变质与大陆碰撞研究进展:以大别—苏鲁造山带为例. 科学通报, 53(18): 2129—2152.