

喂子坪秦岭杂岩麻粒岩相变沉积岩的变质作用 p - T 演化及其构造意义

刘学锋, 苟龙龙, 田智博, 周峰, 马柳婷

(大陆动力学国家重点实验室, 西北大学地质学系, 陕西西安 710069)

摘要: 秦岭杂岩位于秦岭造山带北秦岭构造带, 是研究秦岭造山带早古生代构造演化的重要岩石构造单元。喂子坪地区发育有典型的秦岭杂岩, 其中的混合岩是由变沉积岩经历了强烈的深熔作用形成的。本研究对其进行了岩相学、变质相平衡模拟和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究, 以深入揭示它们的变质温压演化特征, 进而阐明它们指示的构造意义。混合岩的中色体由含石榴子石角闪黑云斜长片麻岩和含石榴子石黑云角闪斜长片麻岩组成。含石榴子石角闪黑云斜长片麻岩只记录了峰期变质矿物组合, 为镁铁闪石+石榴子石+斜长石+石英+黑云母+钛铁矿+熔体, 而含石榴子石黑云角闪斜长片麻岩记录了3个变质演化阶段, 分别是早期进变质阶段(M1): 黑云母+斜长石+石英; 峰期变质阶段(M2): 镁铁闪石+石榴子石+斜长石+石英+黑云母+钛铁矿+熔体; 退变质阶段(M3): 普通角闪石+斜长石+黑云母+石英+熔体。全岩成分视剖面图模拟计算显示含石榴子石角闪黑云斜长片麻岩和含石榴子石黑云角闪斜长片麻岩压力峰期的变质温压条件分别为 790~810°C/990~1 040 MPa 和 840~862°C/1 000~1 190 MPa。含石榴子石黑云角闪斜长片麻岩3组局部矿物组合域成分视剖面图模拟计算得到压力峰期后变质阶段的温压条件为 735~814°C/400~810 MPa、721~794°C/430~700 MPa、740~810°C/470~780 MPa。因此, 本研究揭示了喂子坪地区秦岭杂岩片麻岩记录了近等温降压的 p - T 轨迹。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年得到含石榴子石角闪黑云斜长片麻岩和2个浅色体样品中的变质锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄分别为 383.2±7.0 Ma、400±3.6 Ma 和 406.7±7.8 Ma。结合已发表的数据, 喂子坪地区变沉积岩麻粒岩相峰期变质作用和强烈的混合岩化作用的时代约为 410~390 Ma, 而约 380 Ma 的年龄可能代表退变质冷却到固相线的时代。片麻岩近等温降压的变质演化轨迹指示喂子坪地区秦岭杂岩的变沉积岩在下地壳经历了麻粒岩相变质作用和随后的快速抬升, 与碰撞造山引起的地壳增厚和随后的地壳伸展有关。

关键词: 秦岭造山带; 秦岭杂岩; 深熔作用; 相平衡模拟; 近等温降压 p - T 轨迹

中图分类号: P588.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2024)02-0274-30

Metamorphic p - T evolution and tectonic implications of granulite-facies meta-sedimentary rocks in the Weiziping from the Qinling Complex

LIU Xue-feng, GOU Long-long, TIAN Zhi-bo, ZHOU Feng and MA Ye-ting

(State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: The Qinling Complex is a major tectonic unit in the Northern of the Qinling Orogenic Belt, which is the key to understand the tectonic evolution of the Qinling Orogenic Belt during the early Paleozoic. The migmatites of the Qinling Complex in the Weiziping area, were formed by strong anatexis of meta-sedimentary rocks. In this paper, a combined study of petrology, zircon U-Pb dating and phase equilibrium modeling was carried out on these

收稿日期: 2023-12-23; 接受日期: 2024-02-10; 编辑: 尹淑萍; 英文审校: 王丹

基金项目: 国家自然科学基金项目(42172059); 西北大学大陆动力学国家重点实验室项目(SKLCD-04, 22LCD16)

作者简介: 刘学锋(1998-), 女, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: 2253606405@qq.com; 通讯作者: 苟龙龙(1984-), 男, 博士, 教授, 研究方向为变质地质学, E-mail: LLgou@nwu.edu.cn。

rocks, in order to better constrain their metamorphic p - T evolution, and tectonic implications. The mesosomes are composed of garnet-bearing hornblende-biotite-plagioclase gneiss, as well as garnet-bearing biotite-hornblende-plagioclase gneiss. The garnet-bearing hornblende-biotite-plagioclase gneiss records only peak mineral assemblage of cummingtonite + garnet + plagioclase + biotite + quartz + ilmenite + melt. However, the garnet-bearing biotite-hornblende-plagioclase gneiss displays three metamorphic mineral assemblages, including biotite + plagioclase + quartz (prograde metamorphic stage, M1), cummingtonite + garnet + plagioclase + biotite + quartz + ilmenite + melt (peak metamorphic stage, M2), and hornblende + biotite + plagioclase + quartz + melt (retrograde metamorphic stage, M3). Phase equilibrium modelling constrained the peak p - T conditions of the garnet-bearing hornblende-biotite-plagioclase gneiss and the garnet-bearing biotite-hornblende-plagioclase gneiss to be 790~810°C/990~1 040 MPa, and 840~862°C/1 000~1 190 MPa, respectively. In addition, the retrograde metamorphic p - T conditions were constrained to be 735~814°C/400~810 MPa, 721~794°C/430~700 MPa, and 740~810°C/470~780 MPa, using p - T pseudosections calculated with local effective composition, for the garnet-bearing biotite-hornblende-plagioclase gneiss. As a result, the meta-sedimentary rocks from the Qinling Complex in the Weiziping area underwent a nearly isothermal decompression p - T path. LA-ICP-MS zircon U-Pb analyses obtain the weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of 383.2±7.0 Ma, 400±3.6 Ma, and 406.7±7.8 Ma for metamorphic zircons from garnet-bearing hornblende-biotite-plagioclase gneiss and two leucosome samples, respectively. Integrated with previously published data, the timing of peak metamorphism and strong migmatization of the meta-sedimentary rocks in the Weiziping area is constrained to be ca. 410~390 Ma, whereas the age of ca. 380 Ma may represent the timing of retrograde cooling to the solidus. The nearly isothermal decompression path indicates that the granulite-facies meta-sedimentary rocks in the Weiziping area underwent rapid exhumation, which is interpreted to be resulted from the crustal thickening associated with continental collision and subsequent extension.

Key words: Qinling Orogenic Belt; Qinling Complex; anatexis; phase equilibrium modelling; ITD p - T path

Fund support: National Natural Science Foundation of China (42172059); State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University (SKLCD-04, 22LCD16)

秦岭造山带位于中国中部,是中央造山带的重要组成部分,经历了多期构造演化过程,记录了华北板块和华南板块的聚合构造演化过程 (Mattauer *et al.*, 1985; 张国伟等, 1995a, 1995b, 2001; Zheng *et al.*, 2003; Dong *et al.*, 2011a, 2011b, 2014; Bader *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2015a; Dong and Santosh, 2016), 伴随有多期变质作用和岩浆作用 (Qin *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2011a, 2013; Liu *et al.*, 2011, 2016; 刘良等, 2013; Zhang *et al.*, 2013)。秦岭杂岩被认为是秦岭造山带核部最古老的岩石构造单元 (张国伟等, 2001; Diwu *et al.*, 2014)。前人的研究显示秦岭杂岩记录了两期麻粒岩相变质作用事件, 分别为约 510~480 Ma 和 455~390 Ma (Zhai *et al.*, 1998; 陈丹玲等, 2004; Wang *et al.*, 2011b; 张建新等, 2011; Xiang *et al.*, 2012, 2014; Liu *et al.*, 2014; Wu *et al.*, 2014; Mao *et al.*, 2017)。目前学者们提出了不同的构造模型来分析 455~390 Ma 时期的麻粒岩相变质事件, 主要

有 3 种观点: ① Liu 等 (2011) 认为秦岭大陆弧和二 郎坪洋内弧在志留纪-泥盆纪与中朝克拉通发生碰撞; ② 在志留纪形成于商丹洋向北秦岭构造带下俯冲作用有关的大陆边缘弧环境 (Wang *et al.*, 2011b; Wu and Zheng, 2013; Wu *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2014; Dong *et al.*, 2018); ③ Xiang 等 (2012, 2014) 认为形成于志留纪商丹洋洋脊俯冲和大陆碰撞环境。因此, 秦岭杂岩志留纪-早泥盆世高温变质作用的研究对认识秦岭造山带构造演化过程具有重要的意义。

西秦岭天水地区秦岭杂岩经历麻粒岩相变质作用的时代约为 430~420 Ma, 退变质时代约为 400~390 Ma (毛小红等, 2017; 郭祺等, 2022), 其中石榴夕线黑云片麻岩麻粒岩相峰期变质温压条件为 793~803°C/880~950 MPa 和 820°C/1020 MPa, 记录了顺时针变质演化轨迹, 并以近等温降压为特点, 这与典型大陆碰撞造山带形成的麻粒岩相似 (Zhang *et al.*, 2015b, 2017), 因此, 西秦岭天水地区秦岭杂

岩麻粒岩相变质作用可能与陆-陆碰撞造山作用有关(毛小红等, 2018; 郭祺等, 2022)。喂子坪地区秦岭杂岩中变沉积岩同样经历了麻粒岩相变质作用,其时代大约为 410~390 Ma (Tang *et al.*, 2015; Sun *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2020), 岩石学和变质相平衡模拟揭示它们峰期变质温压条件为 745~820°C/850~970 MPa, 结合传统温压计计算结果得到顺时针变质 p - T 轨迹, 进变质阶段具有压力降低而温度升高的特点, 指示地壳增厚之后的热弛豫过程导致了部分熔融 (Zhao *et al.*, 2020)。尽管喂子坪地区的秦岭杂岩与西秦岭天水地区的麻粒岩相变质作用时代接近, 然而, 目前的工作并没有揭示出喂子坪地区麻粒岩相变沉积岩具有与碰撞造山有关的近等温降压的变质演化轨迹, 极大地限制了对该时期秦岭造山带秦岭杂岩变质演化区域对比, 以及北秦岭构造带的构造背景和地球动力学过程的认识。因此, 需要对喂子坪地区秦岭杂岩中的麻粒岩相变质岩进行更深入的研究, 进而准确刻画它们的变质 p - T 轨迹, 这对认识秦岭杂岩在该时期的麻粒岩相变质或深熔作用的成因具有重要的意义。

本研究选择喂子坪地区秦岭杂岩中经历了强烈深熔作用的变沉积岩为研究对象, 在野外观察的基础上, 对混合岩中的中色体, 即含石榴子石角闪黑云斜长片麻岩与含石榴子石黑云角闪斜长片麻岩, 展开了详细的岩相学、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学、相平衡模拟以及矿物化学分析和研究, 进而准确限定了它们的变质 p - T 演化轨迹并且揭示了变质年龄的地质意义。这些研究结果对阐明北秦岭构造带古生代的构造演化过程和地球动力学具有重要的意义。

1 区域地质背景

秦岭造山带位于中国大陆中部, 东西两侧分别与桐柏-大别造山带和祁连-昆仑造山带接壤, 同时也是分割中国大陆南北的造山带 (张国伟等, 1995a, 1995b, 2001)。秦岭造山带是由华北板块和华南板块汇聚后经历长期复杂的演化过程而形成的, 由南向北依次被划分为华南板块北缘、南秦岭构造带、北秦岭构造带以及华北板块南缘 (张国伟等, 1995a, 1995b, 2001; Meng and Zhang, 1999; Sun *et al.*, 2002; Dong *et al.*, 2011a) (图 1a)。北秦岭构造带又由北向南划分为宽坪岩群、二郎坪群、秦岭杂

岩和丹凤群 (张国伟等, 1995a; Dong *et al.*, 2011a)。

宽坪岩群在北秦岭构造带的最北边, 洛南-栾川断裂 (LLF) 将其与华北板块南缘分隔开, 由变沉积单元及蛇绿岩单元两部分组成 (Dong and Santosh, 2016)。变沉积单元由云母石英片岩、石英岩和大理岩组成, 并经历了绿片岩相到低角闪岩相变质作用 (Xue *et al.*, 1996a; Zhai *et al.*, 1998; Ratschbacher *et al.*, 2003; Liu *et al.*, 2011; Tian *et al.*, 2024)。蛇绿岩单元由绿片岩和角闪岩组成 (第五春荣等, 2010; Dong *et al.*, 2014)。张宗清等 (1994) 最早对其中的基性火山岩进行了全岩 Sm-Nd 同位素等时线年代学研究, 得到了 986 ± 169 Ma 和 $1\,142\pm18$ Ma 的年龄, 认为宽坪岩群形成于中元古代到新元古代。其中变碎屑岩的碎屑锆石 U-Pb 年代学分析得到了 530~500 Ma 的年龄, 指示原岩的最大沉积年龄应晚于约 500 Ma (第五春荣等, 2010; Zhu *et al.*, 2011; 高胜等, 2015; 杨敏等, 2016; Cao *et al.*, 2016), 而 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究得到变基性火山岩的原岩形成年龄为 943 ± 6 Ma (第五春荣等, 2010) 和 $1\,445\pm60$ Ma (Dong *et al.*, 2014)。因此, 第五春荣等 (2010) 认为宽坪杂岩中的变沉积岩与变火成岩的原岩并不是一个连续的沉积序列, 而是由形成于不同时代和构造单元的岩石混杂堆积而成。Liu 等 (2011) 通过 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年对桐柏山地区的含石榴子石角闪岩中的变质锆石进行研究, 得到 442 ± 6 Ma 和 415 ± 5 Ma 的变质年龄; Zhai 等 (1998) 对桐柏山地区角闪岩样品中的角闪石进行了 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年, 得到的变质年龄为 434 ± 2 Ma。

二郎坪群自西向东分布于秦岭杂岩和宽坪岩群之间, 主体是一套火山沉积序列, 主要由变碎屑岩、碳酸盐岩和蛇绿岩套组成 (Dong *et al.*, 2011a)。蛇绿岩套主要由枕状和块状玄武岩、超镁铁质岩及少量含放射虫燧石夹层组成。其中玄武岩显示出 E-MORB 的地球化学特征, 表明其原岩可能形成于弧后盆地 (Kröner *et al.*, 1993; Zhang *et al.*, 1996; Sun *et al.*, 1996; Dong *et al.*, 2011b, 2011c) 或洋内弧环境 (Okay *et al.*, 1993; Xue *et al.*, 1996b; Ratschbacher *et al.*, 2003, 2006; Hacher *et al.*, 2004)。根据放射虫燧石中含有的牙形石类和放射虫类化石 (王学仁等, 1995) 及 475~463 Ma 的火山岩锆石 U-Pb 年龄 (赵姣等, 2012) 认为二郎坪群形成于早中奥陶世。Wang 等 (2016) 和 Hu 等 (2019) 对侵入二郎坪群中的花岗岩进行锆石定年分析, 得

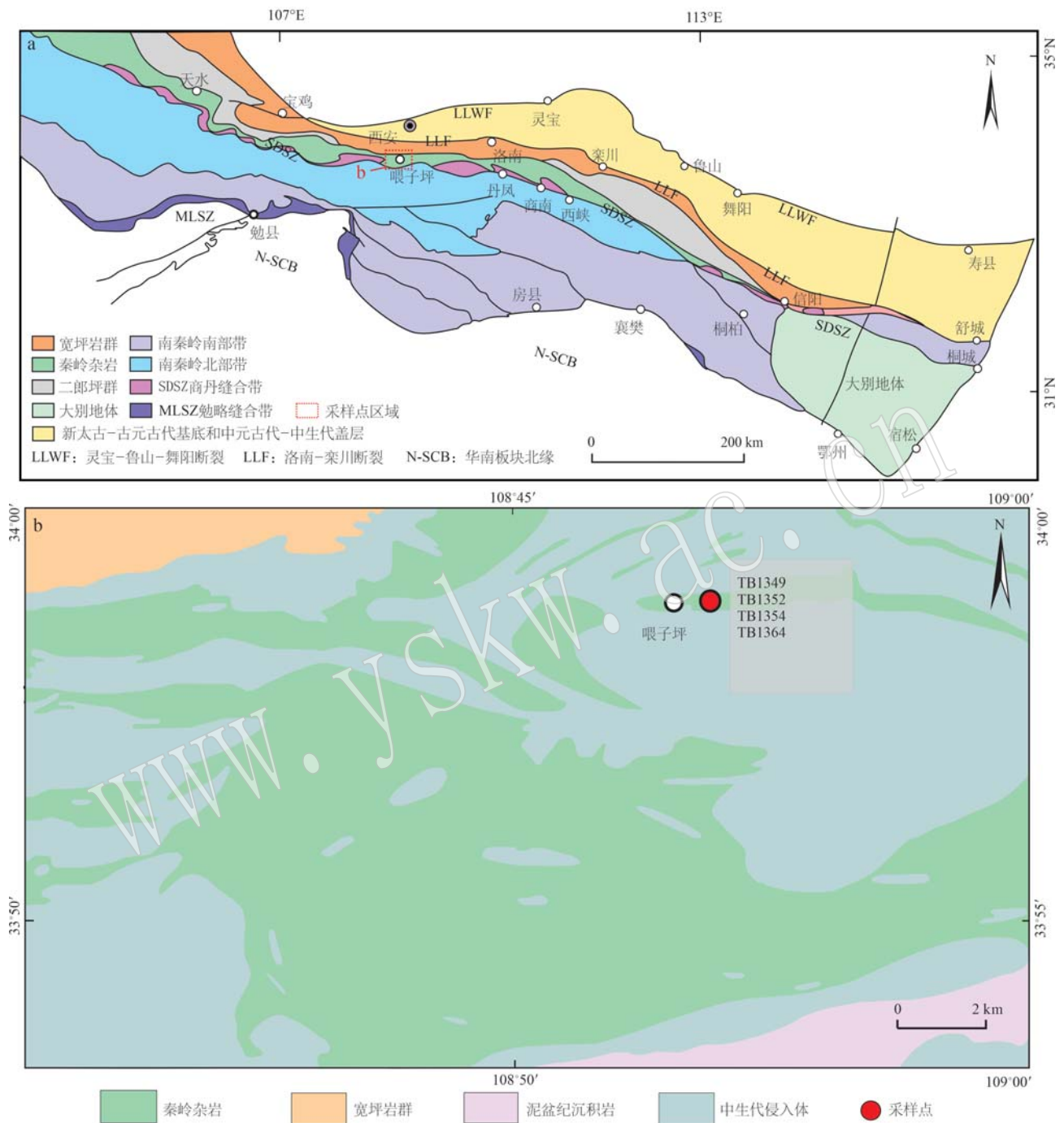


图1 秦岭造山带地质构造简图(a, 据 Dong *et al.*, 2011a)和喂子坪地区地质构造简图(b, 据 Diwu *et al.*, 2014)

Fig. 1 Geological structure diagram of the Qinling Orogenic Belt (a, after Dong *et al.*, 2011a) and geological structure diagram showing the Qinling Complex in the Weiziping area (b, after Diwu *et al.*, 2014)

出的岩浆结晶年龄为 470~440 Ma。Liu 等(2011)对二郎坪群中的角闪岩样品进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析, 得到其变质年龄为 440 ± 3 Ma 和 394 ± 5 Ma, 分别解释为其发生角闪岩相和绿片岩相变质作用的时期; Zhai 等(1998)对角闪岩中的角闪石进行

了 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年分析, 得到 405 ± 5 Ma 的年龄, 认为其代表退变质阶段冷却年龄。

秦岭杂岩是北秦岭构造带重要的岩石构造单元, 其主体经历了角闪岩相到麻粒岩相变质。秦岭杂岩主要由大理岩、角闪岩和片麻岩组成, 部分地区

出露有麻粒岩和高压-超高压榴辉岩 (Ratschbacher *et al.*, 2003; 刘良等, 2013)。根据张宗清等 (1994) 早期对陕西丹凤和河南西峡地区的副片麻岩锆石 U-Pb 定年分析, 得到了约 2.0 Ga 的年龄, 认为秦岭杂岩形成于古元古代。杨力等 (2010) 对丹凤-西峡地区的片麻岩进行岩浆成因锆石 U-Pb 年代学分析, 得到约 1 600~1 400 Ma 和约 950~850 Ma 的年龄, 认为北秦岭地体前寒武纪基底岩石在中元古代和新元古代早期经历了 2 期主要的岩浆活动; 时毓等 (2009) 对东秦岭地区变质岩进行详细的锆石 U-Pb 定年, 结果显示正变质岩的原岩形成时代为 971~843 Ma, 形成于新元古代早期。Shi 等 (2018) 通过对变沉积岩碎屑锆石 U-Pb 分析, 得到的年龄范围为 1 182~1 158 Ma、957~955 Ma、917~840 Ma, 指示这些变沉积岩的原岩主体物质来自于中元古代和新元古代的物源区。秦岭杂岩记录了两期麻粒岩相变质作用, 分别为 506~485 Ma 发生的高压麻粒岩相变质作用 (陈丹玲等, 2004; 张建新等, 2011) 和 455~390 Ma 发生的中压麻粒岩相变质作用 (Liu *et al.*, 2011, 2014; Zhao *et al.*, 2020)。榴辉岩的峰期变质年龄分布在 500~484 Ma, 其 2 期退变作用的年代分别为约 450 Ma 和约 420 Ma (刘良等, 2009, 2013; 张建新等, 2011; Wang *et al.*, 2011b; Cheng *et al.*, 2012)。

2 分析方法

全岩主量元素分析在澳实分析检测 (广州) 有限公司通过荧光光谱仪 (XRF) 分析完成, 仪器型号为 PW2424。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学分析是在武汉上谱分析科技有限责任公司进行。锆石分析的频率和激光束斑分别为 5 Hz 和 24 μm , 分别使用玻璃标准物质 NIST610 和锆石标准 91500 作外标进行同位素和微量元素分馏校正。对分析数据的离线处理采用软件 ICPMSDataCal (Liu *et al.*, 2008, 2010) 完成。

矿物化学分析实验是通过仪器 JEOL JXA-8230 在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成的。分析条件为电流 10 nA, 加速电压 15 kV, 分析束斑 2 μm , 采用 SPI 公司提供的矿物标样进行校正。

本文中矿物缩写符号均根据 Whitney 和 Evans (2010), Grt: 石榴子石; Pl: 斜长石; Qz: 石英; Bt: 黑云母; Hbl: 普通角闪石; Cum: 镁铁闪石; Ilm: 钛铁矿; Opx: 斜方辉石; Rt: 金红石; Kfs: 钾长石;

Ms: 白云母; Mag: 磁铁矿; Ky: 蓝晶石; Liq: 熔体。

3 岩相学与矿物化学

研究区域位于北秦岭构造带的喂子坪地区 (图 1), 研究对象为秦岭杂岩中经历了强烈深熔作用的变沉积岩 (图 2)。在野外露头上可以观察到宽窄有变化的浅色体, 这些浅色体顺着中色体片麻理的方向定向排列 (图 2a、2b), 也可观察到褶皱变形 (图 2a), 在中色体中也可以观察到细小的浅色体脉 (图 2a~2c), 这些透入性发育的浅色体脉指示岩石发生了原位部分熔融以及混合岩是由深熔作用形成的。在野外可以在中色体上观察到石榴子石变斑晶 (图 2a), 石榴子石变斑晶颗粒较大, 经仔细观察发现有少数石榴子石变斑晶发育由斜长石所组成的“白眼圈”结构; 中色体样品为灰黑色, 具有斑状变晶结构, 片麻状或条带状构造 (图 2a~2c)。在室内岩相学观察的基础上, 共选择了 4 个样品进行岩石学及年代学研究, 其中中色体样品 2 个, 分别是含石榴子石角闪黑云斜长片麻岩样品 TB1349 和含石榴子石黑云角闪斜长片麻岩样品 TB1352 (图 3), 浅色体样品 2 个, 分别是 TB1354 和 TB1364。

3.1 样品 TB1349

样品 TB1349 为含石榴子石角闪黑云斜长片麻岩, 主要矿物有黑云母 (30%)、角闪石 (10%)、斜长石 (30%)、石榴子石 (10%) 和石英 (20%) (图 3a、3b), 副矿物有钛铁矿和锆石等。样品中的角闪石在单偏光下呈浅绿色, 不具有明显多色性, 与普通角闪石具有明显的区别 (图 3a), 石榴子石变斑晶相对较大, 包裹体有黑云母和石英 (图 3b)。在基质中, 黑云母呈现定向排列, 部分围绕石榴子石变斑晶生长, 与石英、斜长石和镁铁闪石平衡共生 (图 3a、3b)。

石榴子石主要成分为铁铝榴石 ($X_{\text{Alm}} = 0.62 \sim 0.64$) 和镁铝榴石 ($X_{\text{Py}} = 0.21 \sim 0.26$), 而钙铝榴石 ($X_{\text{Grs}} = 0.08 \sim 0.12$) 和锰铝榴石 ($X_{\text{Sps}} = 0.03 \sim 0.04$) 的含量较低。石榴子石变斑晶成分剖面分析显示, 铁铝榴石和锰铝榴石成分由核到边具微弱的上升趋势, 而镁铝榴石成分由核到边为下降趋势, 钙铝榴石成分基本保持不变, 具有扩散成分环带的特点 (图 4a)。这种扩散环带被认为是石榴子石边部与黑云母之间的 Fe-Mg 离子在变质峰期后降温冷却过程中交换形成的 (Spear, 1995)。样品中黑云母的 Ti 含量和 X_{Mg} 分别为 0.11~0.19 和 0.57~0.69。斜长

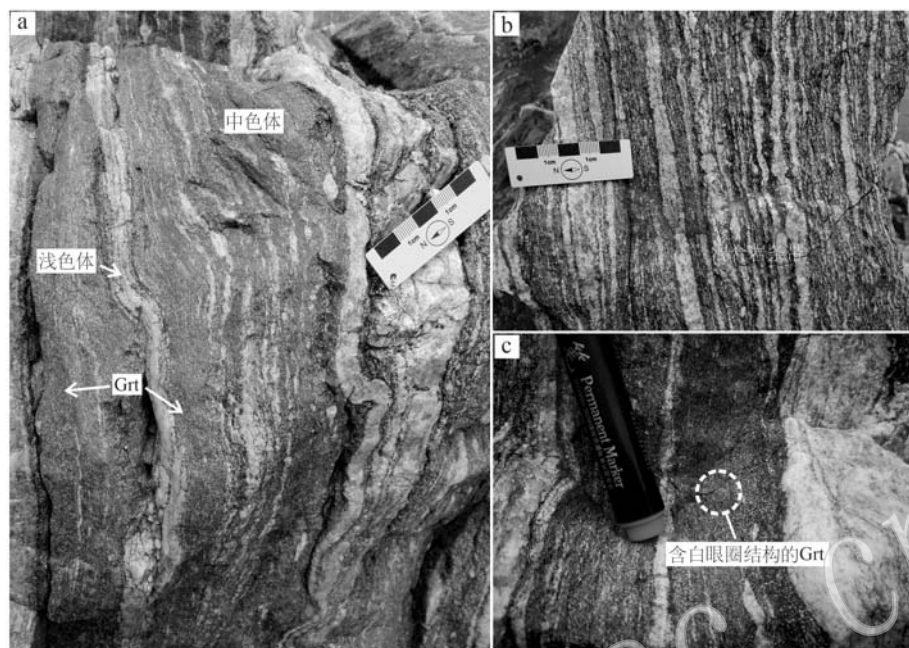


图2 喂子坪地区秦岭杂岩混合岩野外露头照片

Fig. 2 Field photographs of migmatite from the Qinling Complex in the Weiziping area

a—条带状混合岩中的中色体和浅色体以及石榴子石变斑晶; b—条带状混合岩; c—具斜长石冠状体结构的石榴子石变斑晶
a—mesosome and leucosome of the banded migmatite, and garnet porphyroblasts in the mesosome; b—banded migmatite; c—a garnet porphyroblast with plagioclase corona

石的成分较均一,其 X_{Al} 的变化范围为 0.39~0.43 (表1)。角闪石属于镁铁闪石(图5a)(Leake *et al.*, 1997)。

3.2 样品 TB1352

样品 TB1352 为含石榴子石黑云角闪斜长片麻岩,主要矿物有普通角闪石(15%)、镁铁闪石(10%)、黑云母(15%)、斜长石(30%)、石英(20%)和石榴子石(10%)(图3c~3i),副矿物有锆石、钛铁矿等。镁铁闪石与普通角闪石有明显的反应结构(图3d、3e),指示两种角闪石具有先后生长的关系,根据此反应结构可以判断镁铁闪石与普通角闪石相比是在较早期生长的。石榴子石变斑晶边部常常被斜长石所包围,显示典型的白眼圈结构(图3f~3i)。较自形的石榴子石变斑晶颗粒中含有斜长石、石英、黑云母包裹体(图3i)。部分石榴子石变斑晶颗粒边部由于被黑云母和斜长石等矿物交代,呈港湾状(图3i),同时可以观察到部分石榴子石变斑晶颗粒边部被斜长石交代,并在斜长石颗粒中有石榴子石残晶,出现后成的黑云母、普通角闪石和石英(图3g~3i)。此外,一些石榴子石变斑晶只保留了假象结构,已完全反应形成了黑云母、普通角闪石、石英等矿物(图

3h)。以上这些反应结构均指示石榴子石的分解和晚期黑云母、普通角闪石、石英等矿物的生长。斜长石具有2种类型,分别是:①基质中与石榴子石、黑云母、铁镁闪石、石英等平衡共生的斜长石(图3c);②石榴子石变斑晶外围斜长石冠状体(图3f~3i)。黑云母分为3种类型:①基质中与石榴子石、斜长石、铁镁闪石、石英等平衡共生的黑云母;②早期形成并包裹在石榴子石颗粒中的黑云母;③石榴子石周围后成合晶中的黑云母。根据以上反应结构和矿物包裹关系,可以将含石榴子石黑云角闪斜长片麻岩样品 TB1352 的变质演化划分为3个阶段,早期进变质阶段 M1: Bt+Pl+Qz; 峰期变质阶段 M2: Cum+Bt+Grt+Pl+Ilm+Qz+Liq; 退变质阶段 M3: Hbl+Bt+Pl+Qz+Liq。

样品 TB1352 中石榴子石变斑晶显示由铁铝榴石($X_{\text{Alm}} = 0.62 \sim 0.66$), 镁铝榴石($X_{\text{Py}} = 0.18 \sim 0.24$), 钙铝榴石($X_{\text{Grs}} = 0.11 \sim 0.12$)和少量锰铝榴石($X_{\text{Sps}} = 0.03 \sim 0.05$)组成。石榴子石主量成分剖面(A-B)分析显示由核到边,铁铝榴石呈微弱的上升趋势,镁铝榴石呈微弱的下降趋势,钙铝榴石基本保持不变,锰铝榴石一边呈轻微的上升趋势,同样为

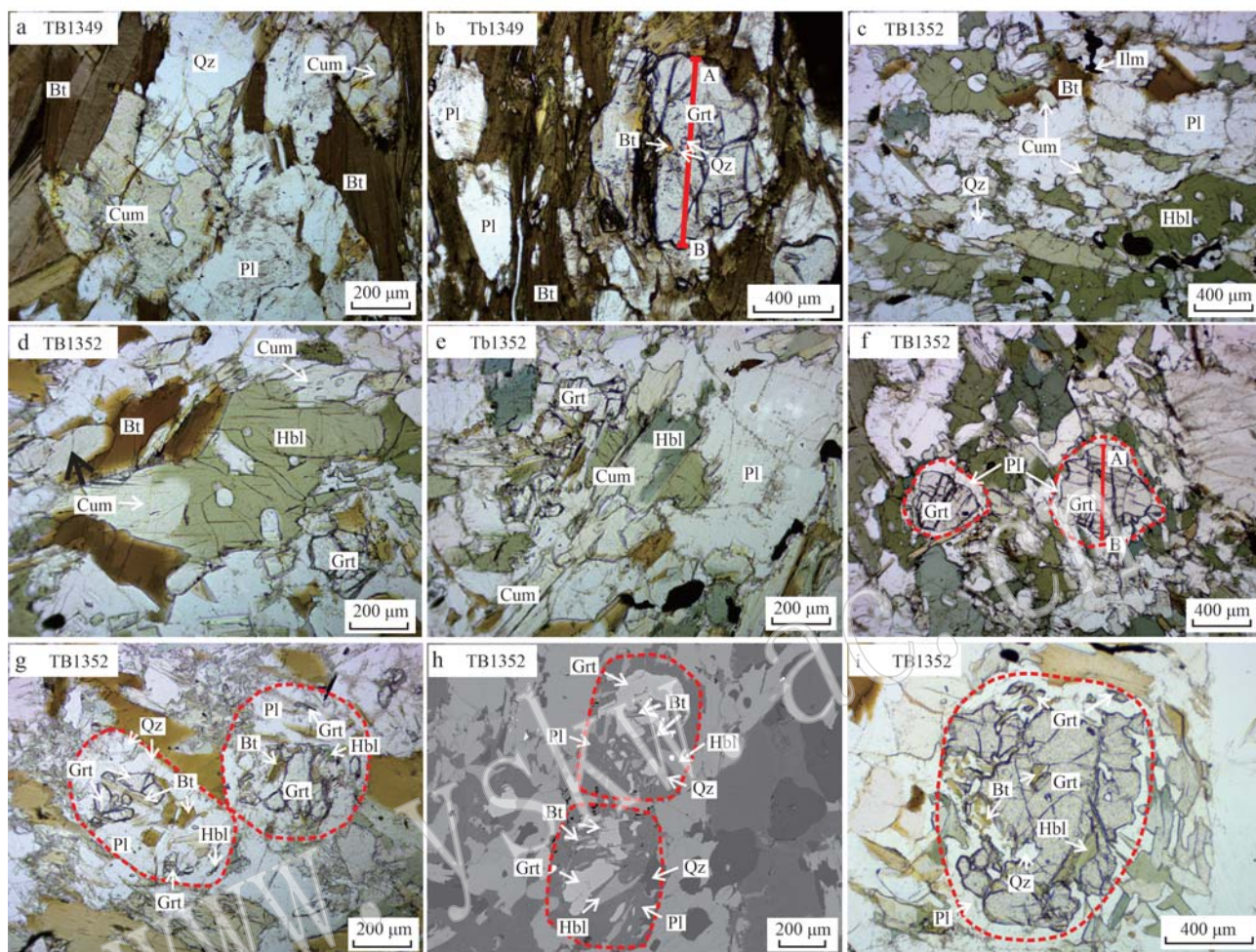


图 3 含石榴子石角闪黑云斜长片麻岩样品 TB1349 与含石榴子石黑云角闪斜长片麻岩样品 TB1352 显微岩相学照片

Fig. 3 Photomicrographs of garnet-bearing hornblende-biotite-plagioclase gneiss (sample TB1349) and garnet-bearing biotite-hornblende-plagioclase gneiss (sample TB1352)

a—样品 TB1349 基质中的黑云母、铁镁闪石、斜长石和石英 (单偏光); b—样品 TB1349 基质中石榴子石变斑晶、黑云母、斜长石、石英及石榴子石中的黑云母和石英矿物包裹体 (单偏光); c—样品 TB1352 基质中的黑云母、斜长石、铁镁闪石、石英、普通角闪石和钛铁矿 (单偏光); d、e—样品 TB1352 中普通角闪石与铁镁闪石的反应关系 (单偏光); f—样品 TB1352 中石榴子石变斑晶及周围生长的斜长石所构成的冠状体结构 (单偏光); g—样品 TB1352 石榴子石变斑晶被分解之后少量石榴子石残晶 (单偏光); h—石榴子石颗粒被分解形成新矿物反应结构 (背散射图像); i—石榴子石周围由黑云母、普通角闪石、斜长石和石英组成的后成合晶 (单偏光)

a—biotite, cummingtonite, plagioclase and quartz in the matrix of sample TB1349 (plane-polarized light); b—garnet porphyroblast, biotite, plagioclase and quartz in the matrix and mineral inclusions of biotite and quartz in garnet of sample TB1349 (plane-polarized light); c—biotite, plagioclase, cummingtonite, quartz, hornblende and ilmenite in the matrix of sample TB1352 (plane-polarized light); d, e—reaction texture between hornblende and cummingtonite of sample TB1352 (plane-polarized light); f—garnet porphyroblasts with plagioclase corona in sample TB1352 (plane-polarized light); g—garnet relics in sample TB1352 (plane-polarized light); h—garnet relics and symplectite containing plagioclase, hornblende, quartz and biotite (back-scattered electron image); i—garnet relics and symplectite containing plagioclase, hornblende, quartz and biotite (plane-polarized light)

扩散环带的特点 (图 4b), 与含石榴子石角闪黑云斜长片麻岩样品 TB1349 的石榴子石剖面的趋势基本一致。基质中黑云母 Ti 含量在 0.10~0.16, X_{Mg} 在 0.53~0.55 之间 (表 2), 石榴子石后成合晶中的黑云母 Ti 含量为 0.06~0.13, X_{Mg} 在 0.49~0.59 之间 (表 3)。样品 TB1352 基质中的斜长石的 X_{An} 为 0.37~0.45 (表 2), 而石榴子石变斑晶周围所生长的

冠状体斜长石具有较高的钙含量, 其 X_{An} 为 0.42~0.51 (表 3)。根据矿物化学分析, 该样品中的普通角闪石为镁角闪石, 而铁镁闪石为镁闪石 (图 5a、5b) (Leake *et al.*, 1997)。

3.3 浅色体样品

样品 TB1354 是从条带状混合岩中采集的浅色体, 主要由石英 (50%)、斜长石 (47%)、少量黑云母

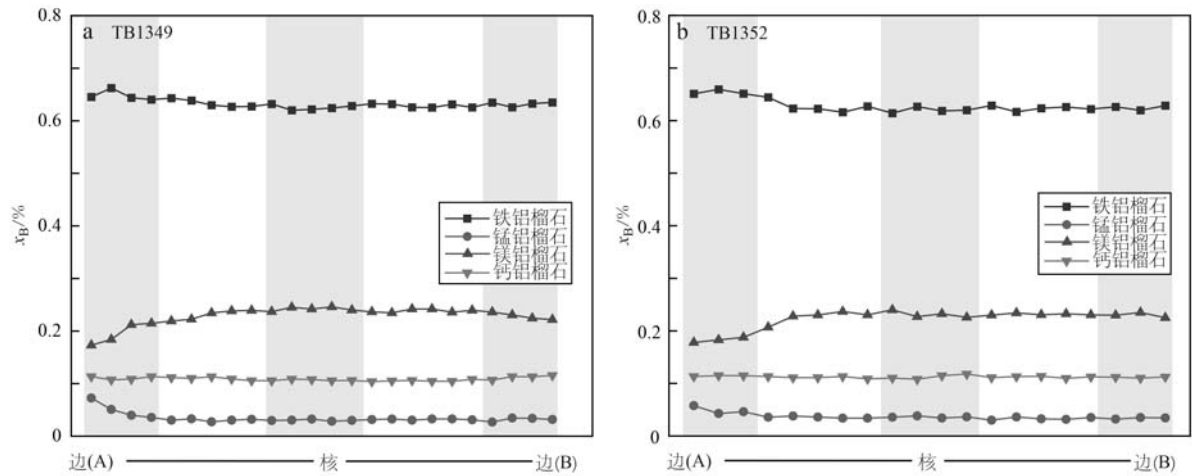


图4 样品 TB1349(a) 和 TB1352(b) 中石榴子石变斑晶的成分剖面图

Fig. 4 Compositional profiles of the garnet porphyroblasts in sample TB1349 (a) and sample TB1352 (b)

表1 样品 TB1349 中镁铁闪石、黑云母、石榴子石和斜长石的矿物化学成分表

 $w_B/\%$

Table 1 Representative mineral compositions of cummingtonite, biotite, garnet, and plagioclase in the sample TB1349

	Cum-M			Bt-In Grt		Bt-C Grt		Bt-M		Grt-Rim			Grt-Core			Pl-M	
SiO ₂	52.86	53.36	52.63	37.12	37.67	36.63	35.98	36.96	36.78	38.60	38.56	38.55	38.40	38.11	38.44	58.82	59.69
TiO ₂	0.10	0.06	0.04	2.45	2.76	2.14	1.98	3.08	2.95	0.02	0.04	0.03	0.01	0.01	0.04	0.06	0.00
Al ₂ O ₃	1.94	2.05	2.05	16.33	16.40	15.99	15.91	16.27	15.87	21.52	21.77	21.46	21.33	21.75	21.69	26.49	26.06
Cr ₂ O ₃	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	0.00
Fe ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.68	0.00	0.00	3.07	0.00	0.00	0.00	0.05	0.09	0.00	0.00	0.00	0.19	0.03
FeO	23.17	22.85	22.93	16.51	12.54	17.36	15.66	17.00	16.77	28.97	28.95	28.70	28.66	28.56	28.79	0.00	0.00
MnO	0.60	0.68	0.60	0.08	0.06	0.13	0.12	0.08	0.05	1.75	1.39	1.38	1.23	1.23	1.27	0.00	0.01
MgO	16.84	17.07	16.60	13.17	15.44	12.77	12.76	12.47	12.35	5.32	5.72	6.06	6.27	6.47	6.52	0.02	0.00
CaO	0.63	0.70	0.79	0.04	0.02	0.04	0.17	0.05	0.04	4.05	4.23	4.00	3.42	3.13	2.87	8.92	8.18
Na ₂ O	0.11	0.16	0.15	0.30	0.47	0.20	0.12	0.38	0.39	0.00	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	6.66	7.03
K ₂ O	0.02	0.01	0.02	8.83	8.86	9.46	8.12	9.09	9.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.07
总量	96.27	96.94	95.81	95.51	94.21	94.72	93.90	95.38	94.57	100.22	100.74	100.29	99.32	99.25	99.64	101.17	101.07
O	23.00	23.00	23.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	8.00	8.00
Si	7.84	7.84	7.84	2.78	2.80	2.79	2.74	2.78	2.79	3.02	3.00	3.01	3.02	3.00	3.01	2.60	2.64
Ti	0.01	0.01	0.00	0.14	0.15	0.12	0.11	0.17	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	0.34	0.36	0.36	1.44	1.44	1.43	1.43	1.44	1.42	1.99	2.00	1.98	1.98	2.02	2.00	1.38	1.36
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	0.00
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Fe ²⁺	2.87	2.81	2.86	1.03	0.78	1.10	1.00	1.07	1.07	1.90	1.88	1.87	1.89	1.88	1.89	0.00	0.00
Mn	0.08	0.09	0.08	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.12	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.00	0.00
Mg	3.72	3.74	3.69	1.47	1.71	1.45	1.45	1.40	1.40	0.62	0.66	0.71	0.74	0.76	0.76	0.00	0.00
Ca	0.10	0.11	0.13	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.34	0.35	0.33	0.29	0.26	0.24	0.42	0.39
Na	0.03	0.05	0.04	0.04	0.07	0.03	0.02	0.06	0.06	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.57	0.60
K	0.00	0.00	0.00	0.84	0.84	0.92	0.79	0.87	0.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
总和	15.00	15.00	15.00	7.79	7.79	7.85	7.74	7.79	7.81	7.98	8.00	8.00	7.99	8.00	7.99	4.99	4.99
X_{Mg}	0.56	0.57	0.56	0.59	0.69	0.57	0.59	0.57	0.57	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29	0.29		
X_{Alm}										0.64	0.63	0.62	0.63	0.63	0.63		
X_{Sps}										0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03		
X_{Py}										0.21	0.22	0.23	0.25	0.25	0.26		
X_{Grs}										0.11	0.12	0.11	0.10	0.09	0.08		
X_{An}																0.43	0.39
X_{Ab}																0.57	0.61
X_{Or}																0.00	0.00

-M 代表基质中的矿物, -In Grt 代表石榴子石包裹的矿物, -C Grt 代表与石榴子石接触的矿物, -Rim 和-Core 分别代表石榴子石边部和核部。

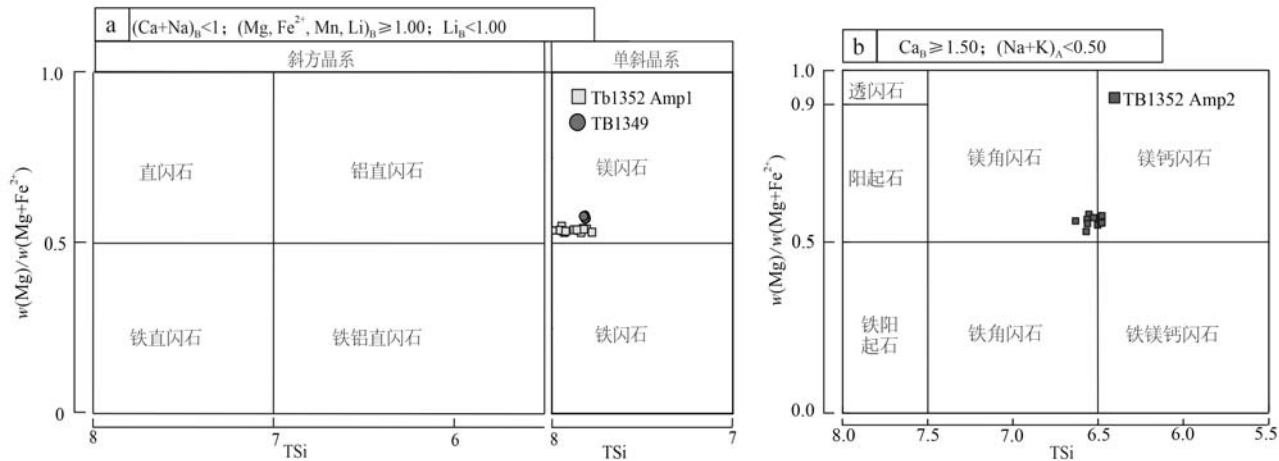


图 5 样品 TB1349 和 TB1352 的角闪石分类图解(据 Leake *et al.* , 1997)

Fig. 5 Classification diagram for amphibole of sample TB1349 and sample TB1352 (according to Leake *et al.* , 1997)

表 2 样品 TB1352 中普通角闪石、镁铁闪石、黑云母、石榴子石和斜长石的矿物化学成分表 w_B/%
Table 2 Representative mineral compositions of hornblende, cummingtonite, garnet, biotite and plagioclase in the sample TB1352

	Hbl-M		Cum-M		Grt-Rim				Grt-Core				Bt-M		Pl-C Grt		Pl-M	
SiO ₂	44.46	43.24	53.07	52.54	37.98	38.23	38.42	37.98	38.15	38.33	38.15	38.33	36.48	35.96	57.08	55.75	58.54	57.51
TiO ₂	0.80	0.93	0.09	0.05	0.00	0.03	0.03	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	2.74	1.74	0.01	0.00	0.00	0.01
Al ₂ O ₃	11.81	12.89	1.38	1.21	20.72	21.48	21.54	20.57	21.33	21.41	21.14	21.22	15.77	15.98	27.07	28.17	25.15	26.53
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	0.00	0.00	0.38	0.00	0.00	0.42	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ₂ O ₃	3.79	4.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.34	0.00	0.00	0.39	0.00	0.22	0.00	1.98	0.15	0.13	0.00	0.03
FeO	14.29	13.44	24.29	24.52	29.55	28.22	28.36	29.35	28.15	28.67	27.85	28.72	18.02	17.29	0.00	0.00	0.00	0.00
MnO	0.40	0.28	0.74	0.75	1.90	1.57	1.68	2.06	1.69	1.75	1.60	1.53	0.09	0.12	0.00	0.00	0.00	0.05
MgO	10.19	9.35	15.55	15.40	4.60	5.85	6.06	4.75	5.41	5.57	6.11	5.93	11.22	11.77	0.00	0.00	0.02	0.00
CaO	9.64	10.52	0.60	0.66	4.03	4.10	3.99	4.03	3.77	4.26	3.90	3.88	0.05	0.00	9.98	10.80	7.78	9.18
Na ₂ O	0.96	1.09	0.11	0.12	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.20	0.09	5.74	5.39	7.23	6.14
K ₂ O	0.27	0.38	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	9.54	9.06	0.03	0.03	0.09	0.08
总量	96.60	96.35	95.85	95.27	99.03	99.52	100.42	99.11	98.50	100.41	99.17	100.12	94.09	94.00	100.07	100.26	98.80	99.52
O	23.00	23.00	23.00	23.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	11.00	11.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Si	6.63	6.48	7.95	7.94	3.03	3.01	3.00	3.03	3.03	3.00	3.01	3.00	2.80	2.77	2.56	2.50	2.65	2.59
Ti	0.09	0.11	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	2.08	2.28	0.24	0.22	1.95	1.99	1.98	1.93	2.00	1.98	1.97	1.96	1.43	1.45	1.43	1.49	1.34	1.41
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ³⁺	0.43	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.12	0.01	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	1.78	1.69	3.04	3.10	1.97	1.86	1.85	1.96	1.87	1.88	1.84	1.88	1.16	1.11	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn	0.05	0.04	0.09	0.10	0.13	0.11	0.11	0.14	0.11	0.12	0.11	0.10	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	2.27	2.09	3.47	3.47	0.55	0.69	0.70	0.56	0.64	0.65	0.72	0.69	1.28	1.35	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	1.54	1.69	0.10	0.11	0.34	0.35	0.33	0.35	0.32	0.36	0.33	0.33	0.00	0.00	0.48	0.52	0.38	0.44
Na	0.28	0.32	0.03	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.50	0.47	0.63	0.54
K	0.05	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.94	0.89	0.00	0.00	0.01	0.01
总和	15.19	15.23	14.94	14.97	7.99	8.00	8.00	7.99	7.97	8.00	7.99	8.00	7.81	7.80	4.97	4.99	5.00	4.98
X _{Mg}	0.56	0.55	0.53	0.53	0.21	0.27	0.28	0.22	0.26	0.26	0.28	0.27	0.53	0.55				
X _{Alm}					0.66	0.62	0.62	0.65	0.64	0.63	0.61	0.63						
X _{Spss}					0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03						
X _{Py}					0.18	0.23	0.23	0.19	0.22	0.22	0.24	0.23						
X _{Grs}					0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.12	0.11	0.11						
X _{An}															0.49	0.52	0.37	0.45
X _{Ab}															0.51	0.47	0.62	0.54
X _{Or}															0.00	0.00	0.00	0.01

注:表头的缩写同表 1。

表 3 样品 TB1352 中石榴子石变斑晶后成合晶中斜长石、普通角闪石和黑云母的矿物化学成分表 $w_B/\%$
 Table 3 Representative mineral compositions of plagioclase, hornblende and biotite in symplectite around garnet in the sample TB1352

	Grt 1.1						Grt 1.2						Grt 1.3					
	Bt		Hbl		Pl		Bt		Hbl		Pl		Bt		Hbl		Pl	
SiO ₂	35.85	35.95	43.55	43.68	57.38	56.23	37.49	36.38	43.59	42.58	56.25	57.11	35.83	34.99	43.55	43.94	57.98	58.07
TiO ₂	2.18	2.02	0.51	0.30	0.00	0.01	1.45	1.20	0.70	0.68	0.03	0.00	1.23	0.98	0.76	0.86	0.07	0.07
Al ₂ O ₃	15.07	15.74	12.26	12.86	27.66	27.63	16.31	15.84	13.05	13.20	27.84	27.40	15.56	16.25	12.75	12.25	26.40	26.88
Cr ₂ O ₃	0.04	0.43	0.56	0.00	0.00	0.00	0.79	0.51	0.00	0.48	0.00	0.00	0.12	0.00	0.08	0.00	0.51	0.07
Fe ₂ O ₃	0.00	0.00	3.12	2.49	0.25	0.15	0.00	3.07	3.89	3.77	0.31	0.26	0.87	3.10	3.90	3.49	0.09	0.08
FeO	20.07	19.39	13.31	14.49	0.00	0.00	17.82	16.51	13.29	12.76	0.00	0.00	17.21	15.81	13.45	13.62	0.00	0.00
MnO	0.10	0.09	0.29	0.28	0.00	0.00	0.10	0.09	0.32	0.35	0.00	0.00	0.01	0.15	0.33	0.33	0.00	0.00
MgO	10.49	10.62	9.36	8.79	0.00	0.00	10.92	12.23	9.18	9.17	0.00	0.01	12.17	13.02	9.25	9.61	0.00	0.01
CaO	0.01	0.04	10.83	10.94	10.19	10.36	0.34	0.04	10.34	10.27	10.67	9.87	0.10	0.04	10.55	10.27	8.48	9.03
Na ₂ O	0.07	0.05	1.04	1.21	5.75	5.46	0.35	0.05	1.20	1.42	5.37	5.94	0.47	0.06	1.17	1.02	6.56	6.30
K ₂ O	9.53	9.69	0.29	0.31	0.04	0.04	9.24	9.22	0.34	0.37	0.04	0.02	8.86	7.87	0.33	0.31	0.04	0.03
总量	93.44	94.01	95.13	95.36	101.26	99.88	94.82	95.14	95.90	95.06	100.51	100.60	92.44	92.27	96.12	95.71	100.14	100.53
O	11.00	11.00	23.00	23.00	8.00	8.00	11.00	11.00	23.00	23.00	8.00	8.00	11.00	11.00	23.00	23.00	8.00	8.00
Si	2.81	2.79	6.60	6.61	2.54	2.53	2.85	2.77	6.54	6.46	2.52	2.55	2.80	2.72	6.54	6.61	2.59	2.58
Ti	0.13	0.12	0.06	0.03	0.00	0.00	0.08	0.07	0.08	0.08	0.00	0.00	0.07	0.06	0.09	0.10	0.00	0.00
Al	1.39	1.44	2.19	2.30	1.45	1.47	1.46	1.42	2.31	2.36	1.47	1.44	1.43	1.49	2.26	2.17	1.39	1.41
Cr	0.00	0.03	0.07	0.00	0.00	0.00	0.05	0.03	0.00	0.06	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.36	0.28	0.01	0.01	0.00	0.18	0.44	0.43	0.01	0.01	0.05	0.18	0.44	0.40	0.00	0.00
Fe ²⁺	1.32	1.26	1.69	1.84	0.00	0.00	1.13	1.05	1.67	1.62	0.00	0.00	1.12	1.03	1.69	1.71	0.00	0.00
Mn	0.01	0.01	0.04	0.04	0.00	0.00	0.01	0.01	0.04	0.05	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	0.04	0.00	0.00
Mg	1.23	1.23	2.11	1.98	0.00	0.00	1.24	1.39	2.05	2.07	0.00	0.00	1.42	1.51	2.07	2.15	0.00	0.00
Ca	0.00	0.00	1.76	1.78	0.48	0.50	0.03	0.00	1.66	1.67	0.51	0.47	0.01	0.00	1.70	1.66	0.41	0.43
Na	0.01	0.01	0.31	0.36	0.49	0.48	0.05	0.01	0.35	0.42	0.47	0.51	0.07	0.01	0.34	0.30	0.57	0.54
K	0.95	0.96	0.06	0.06	0.00	0.00	0.90	0.89	0.07	0.07	0.00	0.00	0.88	0.78	0.06	0.06	0.00	0.00
总和	7.85	7.84	15.22	15.27	4.98	4.98	7.79	7.81	15.21	15.28	4.98	4.99	7.86	7.78	15.23	15.19	4.99	4.98
X_{Mg}	0.51	0.21	0.56	0.52			0.52	0.57	0.55	0.56			0.56	0.59	0.55	0.56		
X_{An}					0.49	0.51					0.52	0.48					0.42	0.44
X_{Ab}					0.50	0.49					0.48	0.52					0.58	0.56
X_{Or}					0.00	0.00					0.00	0.00					0.00	0.00

(3%)组成(图 6a),副矿物有锆石和独居石。

样品 TB1364 和 TB1354 相同,也是混合岩中的浅色体,主要矿物有石英(53%)、斜长石(45%)、少量黑云母(2%)(图 6b),副矿物有锆石和独居石。

4 锆石 U-Pb 年代学

对含石榴子石角闪黑云斜长片麻岩样品 TB1349 和浅色体样品 TB1354、TB1364 进行了锆石 U-Pb 年代学研究,其中较为典型的锆石 CL 图像见图 7。片麻岩样品 TB1349 中的锆石为浑圆状,颗粒较大,粒径在 100~150 μm 之间(图 7a)。阴极发光(CL)显示该样品中锆石分为两种类型,其中一种具核边结构,核部为继承的碎屑锆石,边部为变质锆石,另外一种为单一的变质锆石,具有冷杉状或均匀

的结构;有些单一的变质锆石同样具有核边结构,核部为冷杉状结构,而边部为均一的结构(图 7a)。对变质锆石共进行了 27 个分析点测试,其中分析点 05 可能由于锆石核部影响得出较大的年龄,而点 11 可能由于 Pb 丢失的原因,导致年龄偏小,因此不参与加权平均年龄计算,对剩余谐和度大于 95%的 17 个分析点年龄进行计算,得出其²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 383.2 $\pm$ 7.0 Ma(图 8a)(表 4)。谐和度大于 95%的 17 个锆石(图 8b)的 Th 含量为 55.67 $\times 10^{-6}$ ~164.37 $\times 10^{-6}$,U 含量为 168.67 $\times 10^{-6}$ ~1027.9 $\times 10^{-6}$,Th/U 值为 0.09~0.46,(Gd/Yb)_N 值为 0.03~2.49(表 5)。球粒陨石标准化稀土配分图显示此样品有重稀土元素相对平坦的特征且具明显的 Eu 负异常,它们的 Eu/Eu* 值在 0.05~0.17 之间(图 8b)。

浅色体样品 TB1354 中的锆石颗粒呈浑圆状,粒

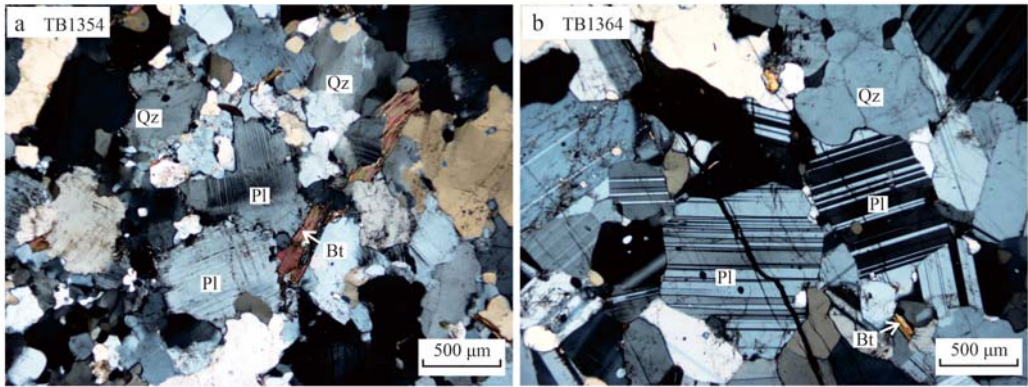


图 6 喂子坪地区秦岭杂岩混合岩中浅色体样品显微镜照片

Fig. 6 Photomicrographs of leucosome samples in migmatite of Qinling Complex in the Weiziping area
a—浅色体样品 TB1354 中的石英、斜长石和黑云母; b—浅色体样品 TB1364 中的石英、斜长石和黑云母
a—quartz, plagioclase and biotite in the leucosome sample TB1354; b—quartz, plagioclase and biotite in the leucosome sample TB1364

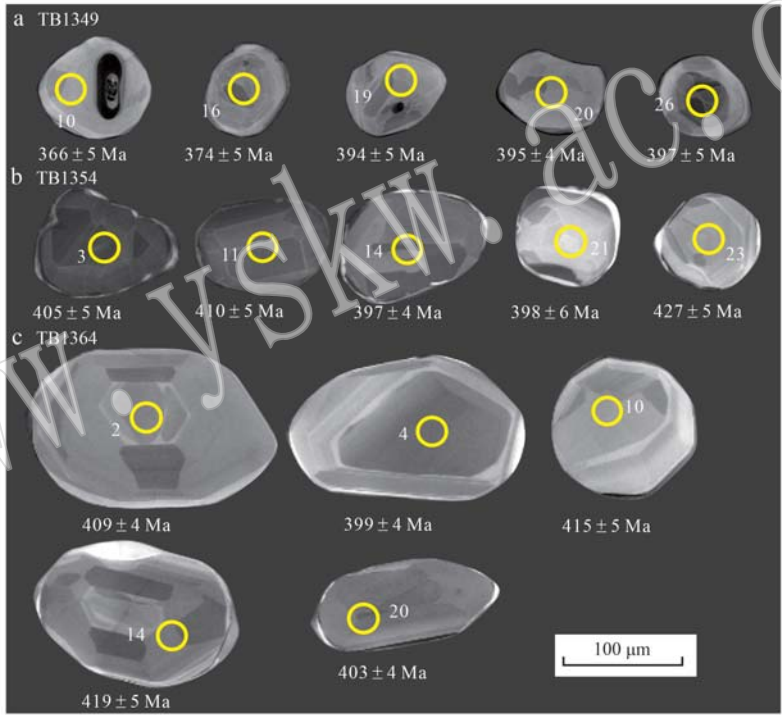


图 7 含石榴子石角闪黑云斜长片麻岩样品 TB1349 及浅色体样品 TB1354、TB1364 的代表性锆石颗粒阴极发光图像、测试点位和对应的年龄(圆圈为直径为 24 μm 的激光分析点)
Fig. 7 Cathodoluminescence (CL) images, analytical spots and corresponding ages of typical zircons within the sample TB1349, and leucosome samples TB1354 and TB1364 (the circles represent laser analytical spots with a diameter of 24 μm)

径在 90~120 μm 之间,阴极发光(CL)表明锆石分两种,一种为单一的变质锆石,具有明显的冷杉状结构或弱分带,另一种具有明显核边结构,核部为变质锆石,其分带明显,亮度较高,边部均匀,亮度相对核部更高(图 7b)。对该样品变质锆石共进行了 28 个分析点测试,其中分析点 13、15、23 年龄相对较老,可能是测点时受到锆石核部影响,所以不参与加权平均年龄计算,剩余谐和度大于 95% 的 14 个分析点的²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 400±3.6 Ma(图 8c)

(表 4)。这 14 个锆石(图 8b)的 Th 含量为 46.83×10⁻⁶~302.94×10⁻⁶,U 含量为 186.40×10⁻⁶~1 770.08×10⁻⁶,Th/U 值为 0.04~0.45,(Gd/Yb)_N 值为 0.24~1.08(表 5)。球粒陨石标准化稀土配分图显示它们具有重稀土元素平坦的模式和明显的 Eu 负异常,它们的 Eu/Eu* 值在 0.01~0.10 之间(图 8d)。
浅色体样品 TB1364 中的锆石颗粒较大,呈圆状或椭圆形,粒径在 100~150 μm 之间,阴极发光(CL)显示同样具有两种类型的变质锆石,一种是单一的

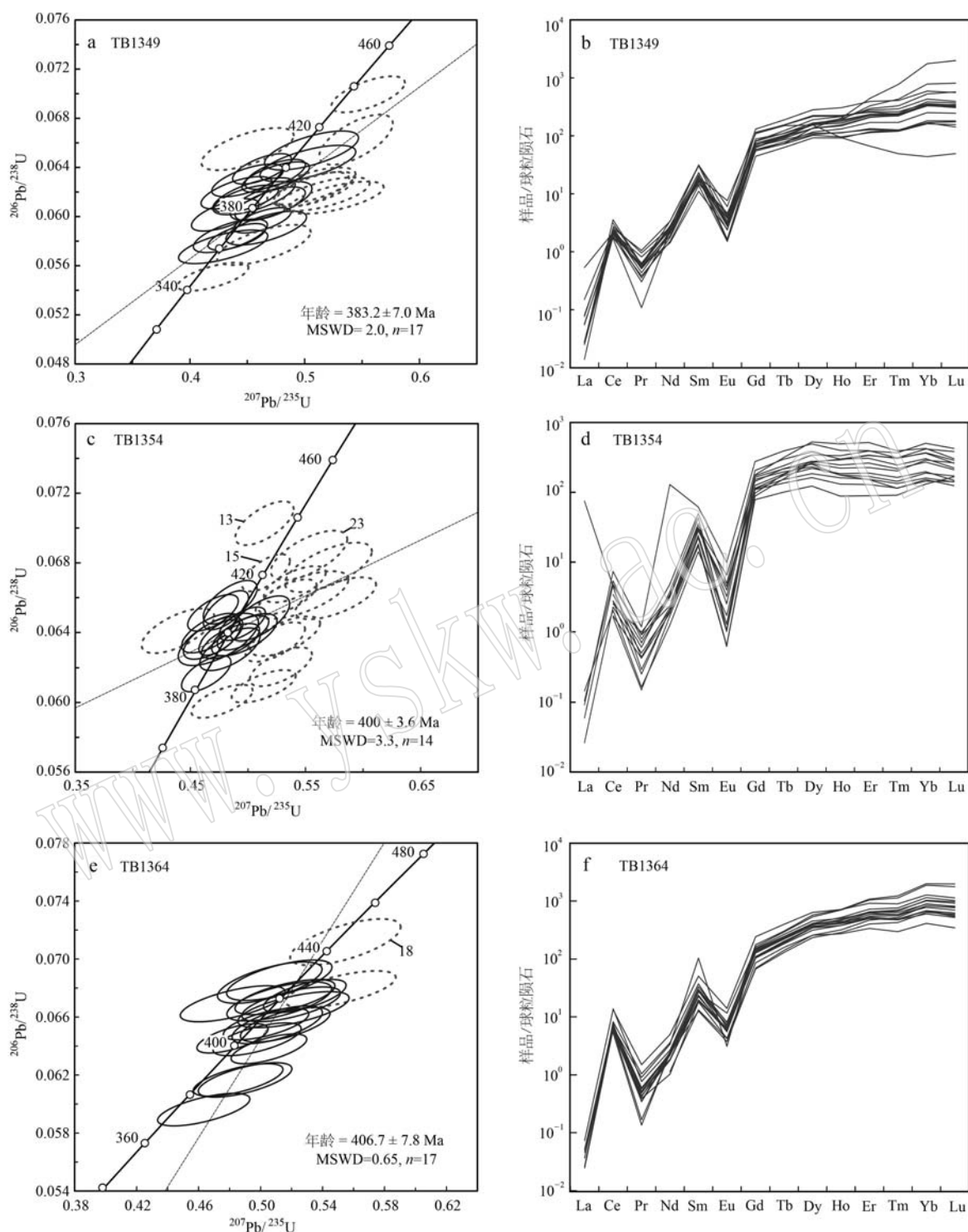


图8 喂子坪地区秦岭杂岩样品 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年谐和图和球粒陨石标准化稀土元素配分图(标准化值引自 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 8 Concordia diagrams of LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and the chondrite-normalized REE patterns (normalization values from Sun and McDonough, 1989)

a—含石榴子石角闪黑云斜长片麻岩样品 TB1349 锆石 U-Pb 定年谐和图; b—样品 TB1349 锆石球粒陨石标准化稀土元素配分图; c—浅色体样品 TB1354 锆石 U-Pb 定年谐和图; d—样品 TB1354 锆石球粒陨石标准化稀土元素配分图; e—浅色体样品 TB1364 锆石 U-Pb 定年谐和图; f—样品 TB1364 锆石球粒陨石标准化稀土元素配分图(图中实线圈为谐和度大于 95% 且参与加权平均年龄计算的分析点)

a—garnet-bearing hornblende-biotite-plagioclase gneiss sample TB1349; b—the chondrite-normalized REE patterns for zircon grains from sample TB1349; c—leucosome sample TB1354; d—the chondrite-normalized REE patterns for zircon grains from sample TB1354; e—leucosome sample TB1364; f—the chondrite-normalized REE patterns for zircon grains from sample TB1364 (the solid circles represent the analytical points that have confidence value greater than 95%, and were used in calculation of the weighted mean age)

表 4 样品 TB1349、TB1354 和 TB1364 的锆石 U-Pb 同位素数据及年龄表
Table 4 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic data and ages from samples TB1349, TB1354 and TB1364

点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				同位素年龄/Ma				谐和度/%				
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ			$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	
样品 TB1349																
01	97.87	422.68	0.23	0.059 0	0.002 7	0.509 3	0.022 7	0.062 2	0.000 9	565	101.84	418	15.30	389	5.67	92
02	137.98	364.21	0.38	0.061 8	0.003 2	0.527 4	0.027 4	0.061 5	0.000 9	733	112.95	430	18.19	385	5.27	88
03	93.21	231.35	0.40	0.061 0	0.003 2	0.517 2	0.026 1	0.061 8	0.000 9	639	111.87	423	17.46	387	5.49	90
04	147.81	468.08	0.32	0.055 7	0.002 5	0.469 9	0.020 2	0.061 0	0.000 9	443	99.99	391	13.96	382	5.53	97
05	95.88	392.74	0.24	0.057 1	0.002 1	0.555 3	0.021 1	0.070 0	0.001 0	494	81.48	448	13.80	436	5.85	97
06	85.14	252.57	0.34	0.057 2	0.002 9	0.466 5	0.023 2	0.059 1	0.000 9	498	111.10	389	16.03	370	5.54	95
07	68.23	231.08	0.30	0.059 0	0.003 0	0.505 9	0.025 4	0.062 5	0.001 0	569	111.10	416	17.14	391	6.02	93
08	66.72	212.26	0.31	0.056 4	0.003 1	0.502 8	0.027 5	0.064 3	0.001 0	478	120.36	414	18.62	402	5.93	97
09	151.55	406.50	0.37	0.052 8	0.002 2	0.449 1	0.018 5	0.061 4	0.000 7	320	89.81	377	12.93	384	4.47	97
10	102.07	219.78	0.46	0.054 8	0.003 0	0.435 3	0.021 3	0.058 4	0.000 9	406	120.36	367	15.09	366	5.50	99
11	90.30	230.48	0.39	0.055 4	0.002 7	0.420 1	0.020 4	0.055 1	0.000 8	428	138.87	356	14.59	346	4.65	97
12	169.50	495.47	0.34	0.059 0	0.002 0	0.544 8	0.021 1	0.066 3	0.001 3	565	69.43	442	13.90	414	8.15	93
13	147.84	310.51	0.48	0.058 7	0.002 5	0.505 8	0.021 7	0.062 2	0.000 9	567	97.21	416	14.61	389	5.66	93
14	76.77	235.35	0.33	0.056 1	0.002 9	0.470 8	0.023 5	0.061 3	0.001 0	454	110.18	392	16.22	383	6.35	97
15	105.15	292.31	0.36	0.052 3	0.002 6	0.430 8	0.019 4	0.060 1	0.000 9	298	111.10	364	13.76	376	5.28	96
16	125.70	485.25	0.26	0.054 7	0.002 0	0.463 3	0.016 4	0.059 7	0.000 7	398	78.70	387	11.36	374	4.14	96
17	164.37	582.36	0.28	0.054 4	0.002 1	0.441 0	0.016 6	0.058 4	0.000 7	387	89.81	371	11.73	366	4.32	98
18	55.67	601.46	0.09	0.051 9	0.001 8	0.462 8	0.016 9	0.063 9	0.000 8	283	81.47	386	11.75	399	4.95	96
19	99.15	355.77	0.28	0.051 5	0.002 4	0.450 3	0.020 7	0.063 0	0.000 9	261	105.54	377	14.46	394	5.31	95
20	137.59	420.86	0.33	0.054 1	0.002 2	0.474 7	0.019 5	0.063 2	0.000 8	372	90.73	394	13.40	395	4.95	99
21	91.04	218.34	0.42	0.058 6	0.003 4	0.464 4	0.026 9	0.057 7	0.001 1	554	127.76	387	18.68	362	6.58	93
22	83.71	274.77	0.30	0.051 8	0.002 5	0.440 6	0.020 5	0.061 9	0.000 9	276	112.95	371	14.44	387	5.29	95
23	74.49	168.67	0.44	0.056 5	0.003 1	0.505 9	0.027 1	0.065 4	0.001 0	472	120.36	416	18.25	408	6.34	98
24	64.65	211.40	0.31	0.054 2	0.003 4	0.429 0	0.025 7	0.057 5	0.000 9	389	143.51	362	18.23	361	5.50	99
25	92.55	217.87	0.42	0.053 3	0.002 7	0.455 8	0.023 8	0.061 7	0.001 0	343	108.32	381	16.57	386	6.03	98
26	112.62	1 027.90	0.11	0.053 9	0.001 9	0.474 3	0.017 4	0.063 4	0.000 8	369	71.29	394	11.97	397	4.88	99
27	70.24	187.06	0.38	0.050 1	0.002 9	0.450 2	0.026 6	0.065 5	0.001 1	211	133.32	377	18.61	409	6.88	91
样品 TB1354																
01	48.07	493.73	0.10	0.063 6	0.002 6	0.576 3	0.023 2	0.066 0	0.000 8	728	86.26	462	14.95	412	4.81	88
02	64.88	275.70	0.24	0.060 1	0.002 9	0.546 9	0.026 6	0.066 2	0.000 9	606	103.69	443	17.45	413	5.45	92
03	116.12	871.19	0.13	0.056 9	0.001 8	0.510 4	0.017 1	0.064 8	0.000 9	500	74.99	419	11.49	405	5.16	96
04	210.33	860.59	0.24	0.058 4	0.001 8	0.534 4	0.016 7	0.066 0	0.000 7	546	66.66	435	11.06	412	4.02	94
05	136.62	623.18	0.22	0.058 5	0.001 9	0.540 7	0.017 7	0.066 8	0.000 7	550	72.21	439	11.70	417	4.17	94
06	68.72	574.83	0.12	0.052 8	0.001 9	0.467 6	0.016 6	0.064 0	0.000 7	324	113.88	390	11.49	400	4.47	97
07	85.86	722.40	0.12	0.052 2	0.001 7	0.469 6	0.014 5	0.065 1	0.000 7	295	72.22	391	10.04	407	4.20	96
08	62.66	298.48	0.21	0.049 6	0.002 4	0.439 2	0.020 8	0.064 1	0.000 8	172	112.95	370	14.69	401	5.07	91
09	69.12	1 567.40	0.04	0.053 7	0.001 4	0.475 6	0.012 0	0.063 7	0.000 7	361	57.40	395	8.27	398	4.04	99
10	210.33	1 171.51	0.18	0.053 2	0.001 5	0.480 9	0.013 0	0.065 3	0.000 7	339	97.21	399	8.89	408	4.48	97

续表 4
Continued Table 4

点号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值			同位素年龄/Ma			谐和度/%						
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$							
11	302.94	870.39	0.35	0.053 0	0.001 7	0.484 6	0.015 5	0.065 7	0.000 8	332	106.47	401	10.57	410	4.99	97
12	89.37	635.31	0.14	0.053 0	0.002 0	0.469 8	0.017 0	0.063 7	0.000 8	332	85.18	391	11.78	398	4.81	98
13	229.85	633.75	0.36	0.052 6	0.001 7	0.514 4	0.016 7	0.070 3	0.000 8	309	74.07	421	11.23	438	5.02	96
14	167.96	940.22	0.18	0.054 8	0.001 9	0.484 9	0.016 6	0.063 5	0.000 7	467	75.92	401	11.38	397	3.99	98
15	103.95	1 004.97	0.10	0.055 2	0.001 5	0.515 7	0.013 7	0.067 4	0.000 7	420	56.48	422	9.20	421	4.25	99
16	209.01	1 019.93	0.20	0.054 2	0.001 7	0.463 8	0.014 2	0.061 7	0.000 7	389	73.14	387	9.82	386	4.17	99
17	62.01	518.81	0.12	0.056 3	0.002 2	0.496 9	0.018 7	0.063 9	0.000 8	465	85.18	410	12.70	399	4.79	97
18	224.22	581.29	0.39	0.055 5	0.002 0	0.484 5	0.017 3	0.063 0	0.000 8	435	84.25	401	11.86	394	4.84	98
19	68.83	618.50	0.11	0.057 4	0.002 2	0.477 5	0.017 6	0.060 1	0.000 6	509	78.70	396	12.10	376	3.83	94
20	121.61	755.93	0.16	0.055 5	0.001 6	0.495 8	0.014 8	0.064 0	0.000 6	432	62.96	409	10.05	400	3.94	97
21	46.83	186.40	0.25	0.055 3	0.002 9	0.474 3	0.023 0	0.063 6	0.001 0	433	149.06	394	15.84	398	5.95	99
22	234.96	1 770.08	0.13	0.055 3	0.001 5	0.495 1	0.013 3	0.064 5	0.000 6	433	62.96	408	9.02	403	3.84	98
23	191.29	427.84	0.45	0.058 7	0.002 5	0.553 0	0.022 0	0.068 4	0.000 9	567	97.21	447	14.36	427	5.66	95
24	208.50	863.62	0.24	0.059 5	0.002 0	0.523 8	0.017 0	0.063 5	0.000 7	583	65.73	428	11.37	397	4.47	92
25	168.09	844.12	0.20	0.061 3	0.002 1	0.528 6	0.017 8	0.062 1	0.000 7	650	74.06	431	11.86	388	4.47	89
26	74.55	389.56	0.19	0.060 8	0.002 7	0.569 9	0.025 0	0.067 7	0.000 9	632	97.05	458	16.14	423	5.67	91
27	88.23	599.71	0.15	0.060 8	0.002 3	0.513 7	0.018 4	0.060 9	0.000 6	632	86.10	421	12.32	381	3.77	90
28	117.56	774.17	0.15	0.060 0	0.002 3	0.532 4	0.020 0	0.063 8	0.000 7	606	83.32	433	13.24	399	4.50	91
样品 TB1364																
01	267.31	756.08	0.35	0.056 4	0.001 9	0.528 6	0.017 6	0.067 4	0.000 8	478	77.77	431	11.70	421	4.57	97
02	169.07	676.14	0.25	0.054 9	0.002 0	0.503 6	0.018 2	0.065 5	0.000 7	409	79.62	414	12.30	409	4.36	98
03	121.09	465.60	0.26	0.055 9	0.002 0	0.510 8	0.019 3	0.065 5	0.000 9	450	81.47	419	12.95	409	5.22	97
04	118.41	674.59	0.18	0.056 8	0.001 8	0.505 4	0.016 1	0.063 8	0.000 7	483	72.22	415	10.89	399	4.12	95
05	133.91	515.28	0.26	0.056 7	0.002 2	0.515 9	0.019 1	0.065 5	0.000 8	480	85.18	422	12.80	409	4.75	96
06	104.29	584.66	0.18	0.057 0	0.002 3	0.490 0	0.019 9	0.061 7	0.000 8	500	95.36	405	13.60	386	4.78	95
07	104.32	531.34	0.20	0.055 7	0.002 4	0.463 3	0.019 7	0.059 6	0.000 7	439	94.44	387	13.64	373	4.52	96
08	96.32	487.36	0.20	0.056 4	0.002 2	0.485 5	0.019 1	0.061 7	0.000 7	465	88.88	402	13.07	386	4.50	95
09	102.14	635.10	0.16	0.053 5	0.001 7	0.481 9	0.015 2	0.064 5	0.000 7	350	78.70	399	10.41	403	4.04	99
10	213.84	375.10	0.57	0.056 6	0.002 7	0.521 2	0.023 7	0.066 5	0.000 8	476	110.17	426	15.84	415	4.97	97
11	98.67	391.93	0.25	0.058 3	0.002 5	0.551 6	0.023 5	0.067 9	0.000 8	539	94.43	446	15.41	424	5.10	94
12	90.58	531.41	0.17	0.054 9	0.002 3	0.515 8	0.021 3	0.067 4	0.000 8	406	94.44	422	14.27	420	4.81	99
13	100.25	578.46	0.17	0.053 8	0.002 4	0.512 1	0.022 5	0.068 5	0.000 9	361	101.84	420	15.08	427	5.55	98
14	107.20	673.93	0.16	0.054 6	0.0024	0.512 1	0.022 3	0.067 1	0.000 9	398	99.99	420	14.99	419	5.37	99
15	156.81	651.28	0.24	0.053 1	0.002 4	0.505 9	0.022 3	0.068 4	0.000 9	332	101.84	416	15.03	426	5.68	97
16	119.95	610.28	0.20	0.055 7	0.002 3	0.519 7	0.021 0	0.066 9	0.000 8	439	92.59	425	14.05	417	4.78	98
17	104.73	552.66	0.19	0.019 1	0.003 4	0.161 5	0.029 3	0.062 5	0.001 2	—	—	152	25.63	391	7.42	12
18	105.25	437.64	0.24	0.056 3	0.002 5	0.554 7	0.023 6	0.071 2	0.001 1	465	98.14	448	15.39	443	6.35	98
19	102.84	402.86	0.26	0.052 0	0.002 5	0.482 1	0.022 4	0.066 9	0.000 8	283	111.10	400	15.35	418	4.95	95
20	132.25	551.04	0.24	0.055 5	0.002 2	0.497 8	0.018 8	0.064 5	0.000 7	432	87.03	410	12.75	403	4.52	98

变质锆石,具明显的分带,另一种锆石具明显的核边结构,核部亮度低,结构均匀,边部亮度高(图 7c)。对该样品中 20 个变质锆石进行测试,其中分析点 18 年龄相对较老,同样可能是受到锆石核部的影响所造成的,所以不参与加权平均年龄计算,剩余谐和度大于 95% 的 17 个分析点的²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄

为 406.7±7.8 Ma(图 8e)(表 4)。谐和度大于 95% 的 17 个锆石(图 8e)的 Th 含量为 90.58×10⁻⁶~267.31×10⁻⁶,U 含量为 375.10×10⁻⁶~756.08×10⁻⁶,Th/U 值为 0.16~0.57,(Gd/Yb)_N 值为 0.08~0.24(表 5)。球粒陨石标准化稀土元素配分图显示此样品有重稀土元素平坦的特征及明显的 Eu 负异常,

表 5 样品 TB1349、TB1354、TB1364 中锆石的微量元素组成
Table 5 LA-ICP-MS trace element compositions of zircon from sample TB1349, TB1354 and TB1364

w_B/10⁻⁶

点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	(Gd/Yb) _N	Eu/Eu [*]
样品 TB1349																	
01	0.01	1.39	0.03	0.82	2.89	0.08	12.30	3.06	31.90	7.22	26.40	3.97	37.20	5.11	132	0.27	0.04
02	0.00	1.61	0.05	0.97	3.94	0.22	19.30	4.64	43.90	11.30	44.00	7.16	72.60	11.10	221	0.22	0.08
03	0.00	1.31	0.03	0.73	2.40	0.11	12.10	3.12	30.80	7.57	30.60	5.17	51.50	8.24	154	0.19	0.06
04	0.04	1.44	0.06	1.23	2.76	0.25	15.27	3.64	39.83	10.71	54.60	10.99	132.89	20.54	294	0.10	0.12
05	0.01	1.11	0.06	1.13	2.63	0.17	14.53	3.36	34.53	8.73	34.87	5.63	57.88	8.86	173	0.21	0.08
06	0.13	1.31	0.08	1.06	2.47	0.27	11.98	2.93	29.54	7.44	28.13	4.34	42.72	6.24	139	0.23	0.15
07	0.00	0.97	0.06	0.76	2.75	0.06	11.00	2.58	24.00	6.00	20.30	3.09	31.10	4.68	107	0.29	0.03
08	0.01	1.08	0.04	0.71	2.14	0.09	9.13	2.37	23.42	5.21	19.42	3.18	30.91	4.59	102	0.24	0.06
09	0.01	2.18	0.06	1.58	4.78	0.35	26.97	7.06	71.50	17.35	64.86	10.39	100.40	14.19	322	0.22	0.09
10	0.00	1.47	0.06	1.16	3.56	0.17	15.27	3.82	39.09	9.46	37.89	6.02	60.17	8.28	186	0.21	0.07
11	0.02	1.41	0.05	1.01	3.00	0.20	16.78	4.60	48.17	12.15	46.13	7.42	73.08	10.00	224	0.19	0.08
12	0.00	9.02	0.04	0.75	2.86	0.37	15.80	4.26	55.70	17.30	95.30	21.90	297.00	52.90	574	0.04	0.17
13	0.00	1.79	0.08	1.33	4.23	0.20	21.30	5.33	58.10	14.10	57.30	9.24	88.50	13.80	275	0.20	0.06
14	0.00	1.16	0.03	1.15	3.01	0.16	11.87	2.92	26.75	6.45	21.08	3.10	28.59	3.60	110	0.34	0.08
15	0.01	1.60	0.05	0.88	3.15	0.19	16.51	4.16	42.44	10.57	39.07	5.82	56.73	8.11	189	0.24	0.08
16	0.00	1.91	0.06	1.32	3.52	0.18	18.17	4.11	39.54	9.41	36.97	5.72	58.18	8.79	188	0.26	0.07
17	0.00	1.70	0.09	1.24	4.84	0.25	23.46	5.79	57.00	12.76	42.16	6.11	56.60	7.80	220	0.34	0.07
18	0.00	1.03	0.01	1.11	2.96	0.44	22.47	5.59	38.92	5.25	10.97	1.25	7.46	1.25	99	2.49	0.17
19	0.01	1.45	0.04	0.98	2.52	0.22	14.23	3.68	41.04	11.17	48.97	8.41	89.50	14.54	237	0.13	0.11
20	0.01	1.55	0.10	1.57	4.66	0.17	23.66	5.74	54.77	12.32	43.55	6.67	61.16	8.62	225	0.32	0.05
21	0.27	3.47	0.15	2.47	3.59	0.45	18.70	4.82	48.00	11.70	43.40	6.48	65.60	9.47	219	0.27	0.17
22	0.00	1.27	0.03	0.82	2.74	0.09	12.00	2.71	25.84	5.43	18.80	3.06	27.41	3.96	104	0.36	0.05
23	0.01	1.26	0.06	1.24	2.30	0.23	13.55	3.21	28.08	6.37	21.99	3.22	28.92	4.43	115	0.39	0.13
24	0.00	1.30	0.05	0.98	2.57	0.14	12.92	3.46	40.75	10.06	38.88	6.21	65.65	9.42	192	0.16	0.07
25	0.01	1.22	0.05	1.00	3.20	0.10	13.07	3.64	34.06	8.44	34.24	5.81	55.72	8.07	169	0.19	0.05
26	0.02	1.30	0.05	0.67	1.70	0.14	11.32	2.72	34.70	11.48	73.49	19.75	298.93	50.47	507	0.03	0.10
27	0.01	1.10	0.03	0.59	1.76	0.07	7.75	2.25	23.50	5.93	24.80	3.89	39.80	6.12	118	0.16	0.06
样品 TB1354																	
01	0.00	2.75	0.05	0.86	3.19	0.20	15.80	5.29	53.50	12.30	41.30	6.05	46.70	5.86	194	0.28	0.09
02	0.00	3.58	0.08	1.03	4.75	0.39	30.20	8.86	83.40	16.20	43.30	5.32	35.90	3.86	237	0.70	0.10
03	0.01	1.39	0.05	0.95	4.45	0.23	23.00	5.67	46.90	9.13	25.50	3.40	27.30	3.58	152	0.70	0.07
04	0.00	1.13	0.04	1.05	4.58	0.14	22.20	5.52	39.20	6.83	17.00	2.35	18.30	2.31	121	1.00	0.04
05	0.01	1.14	0.06	1.24	3.53	0.07	19.80	5.16	43.00	8.61	26.00	4.00	36.50	5.92	155	0.45	0.03
06	0.03	3.27	0.08	1.58	4.70	0.38	29.40	8.14	70.90	13.90	43.40	5.53	46.10	5.35	233	0.53	0.10
07	0.01	2.93	0.09	1.10	5.04	0.19	36.50	11.70	134.00	27.80	85.20	10.00	72.40	7.70	395	0.42	0.04
08	0.01	2.72	0.03	0.77	3.20	0.23	25.70	7.88	86.80	20.20	63.40	8.14	61.90	7.31	288	0.34	0.08
09	0.03	1.24	0.02	0.58	2.15	0.10	19.90	6.74	65.40	12.50	37.30	5.15	49.10	6.70	207	0.34	0.05
10	0.00	1.53	0.09	1.54	5.34	0.07	31.40	7.31	59.00	10.00	28.00	3.65	32.10	4.33	184	0.81	0.02
11	0.00	1.68	0.02	0.95	3.70	0.08	25.70	6.86	70.40	16.50	55.60	7.91	70.70	9.71	270	0.30	0.02
12	0.00	2.88	0.09	2.24	7.57	0.29	42.10	11.10	96.20	17.00	50.90	6.29	51.40	5.67	294	0.68	0.05
13	0.01	3.64	0.09	2.43	8.10	0.32	51.50	13.80	138.00	28.60	85.30	10.40	83.10	8.82	434	0.51	0.05
14	0.02	4.49	0.11	60.20	9.43	0.58	56.60	14.60	125.00	22.50	65.50	7.91	61.60	6.64	435	0.76	0.08

续表 5

Continued Table 5

点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	$(\text{Gd/Yb})_N$	Eu/Eu*
15	0.00	1.73	0.05	1.30	5.23	0.12	30.90	7.45	59.60	11.70	40.00	5.56	53.80	8.20	226	0.48	0.03
16	0.00	1.04	0.04	0.87	3.40	0.06	22.40	5.06	41.20	7.38	21.30	2.92	24.50	3.61	134	0.76	0.02
17	0.00	2.66	0.04	1.04	4.30	0.26	23.40	6.46	55.80	10.40	31.30	4.17	33.50	3.76	177	0.58	0.08
18	0.00	2.09	0.07	1.46	5.46	0.15	35.60	8.98	87.20	18.90	64.50	9.39	85.30	10.80	330	0.34	0.03
19	0.58	7.04	0.74	5.66	4.04	1.20	20.40	5.47	48.10	9.80	33.90	5.03	45.90	6.73	195	0.37	0.40
20	0.00	0.99	0.01	0.78	2.59	0.04	16.10	3.74	31.20	4.99	14.70	2.32	22.30	4.22	104	0.60	0.02
21	17.70	2.73	0.03	0.94	2.80	0.04	18.10	5.81	67.60	16.90	56.30	7.77	62.60	7.31	267	0.24	0.02
22	0.00	1.69	0.06	1.74	6.62	0.06	33.70	8.08	64.20	9.96	25.10	2.91	25.90	3.16	183	1.08	0.01
23	0.01	1.98	0.04	1.01	4.22	0.12	25.70	7.54	92.80	25.10	109.00	18.10	172.00	25.00	482	0.12	0.04
24	0.00	1.37	0.05	0.92	4.20	0.09	28.60	6.93	57.40	10.40	34.90	5.46	63.10	10.90	224	0.37	0.02
25	0.00	0.90	0.03	0.51	2.52	0.07	13.60	2.83	22.80	4.12	11.50	1.49	11.70	1.76	74	0.96	0.03
26	0.01	4.05	0.05	0.53	2.14	0.33	15.30	4.99	55.90	17.20	88.90	20.70	282.00	47.90	540	0.04	0.17
27	0.00	0.97	0.04	0.85	3.15	0.06	17.40	4.24	36.50	6.82	22.30	3.72	36.30	6.60	139	0.40	0.02
28	0.01	1.76	0.05	1.21	4.34	0.00	26.70	6.22	52.30	8.45	25.80	3.33	27.90	4.02	162	0.79	0.00
样品 TB1364																	
01	0.02	8.19	0.14	2.32	7.78	0.81	49.90	14.80	162.00	40.30	152.00	22.70	215.00	28.70	705	0.19	0.13
02	0.01	5.04	0.10	1.67	5.71	0.38	36.00	11.30	145.00	40.40	179.00	31.20	341.00	49.80	847	0.09	0.08
03	0.01	4.54	0.04	0.83	2.88	0.34	21.30	6.82	80.10	21.30	90.10	14.30	141.00	19.50	403	0.13	0.13
04	0.01	3.92	0.05	1.14	4.08	0.67	31.40	9.92	115.00	28.40	102.00	14.90	132.00	17.70	462	0.20	0.18
05	0.01	4.74	0.03	1.01	3.41	0.36	26.50	8.67	98.80	26.30	108.00	17.70	171.00	23.30	489	0.13	0.11
06	0.01	3.67	0.04	1.16	4.26	0.41	29.80	8.95	101.00	23.50	82.20	12.10	102.00	13.20	382	0.24	0.11
07	0.00	4.24	0.05	1.02	2.97	0.33	22.50	7.39	90.10	23.60	96.90	15.00	152.00	20.40	436	0.12	0.12
08	0.00	3.98	0.05	0.87	3.02	0.37	22.10	7.08	87.20	24.50	103.00	17.20	176.00	24.70	470	0.10	0.14
09	0.00	3.50	0.03	1.11	4.41	0.43	30.20	9.15	104.00	24.90	87.40	12.60	114.00	13.70	406	0.22	0.11
10	0.00	8.47	0.07	1.24	5.04	0.46	28.70	8.47	98.40	27.20	108.00	16.30	150.00	20.60	473	0.16	0.12
11	0.01	4.40	0.02	0.89	2.89	0.37	17.40	5.93	74.00	20.80	85.70	14.30	143.00	19.30	389	0.10	0.16
12	0.00	3.22	0.01	1.13	3.65	0.32	22.70	7.62	87.40	21.50	82.40	12.00	116.00	15.70	374	0.16	0.11
13	0.01	4.29	0.00	0.53	2.01	0.24	13.70	4.84	59.50	16.20	66.40	10.90	108.00	15.10	302	0.10	0.14
14	0.00	3.76	0.04	0.48	2.77	0.25	17.70	5.91	65.10	15.50	55.70	7.56	69.80	8.76	253	0.21	0.11
15	0.01	4.10	0.09	1.57	15.80	0.18	33.40	10.90	135.00	39.30	172.00	28.80	319.00	45.00	806	0.09	0.02
16	0.00	4.24	0.05	1.05	4.54	0.47	26.10	8.21	93.60	23.00	86.20	12.50	116.00	14.40	391	0.19	0.13
17	0.00	4.64	0.03	0.37	2.50	0.24	15.70	5.36	63.50	17.10	70.60	11.40	106.00	14.50	312	0.12	0.12
18	0.01	4.39	0.01	0.53	2.29	0.25	16.60	5.59	73.00	19.40	80.90	13.20	132.00	18.10	366	0.10	0.12
19	0.00	3.67	0.02	1.08	1.92	0.22	14.30	5.24	65.00	18.00	77.50	13.30	140.00	19.70	360	0.08	0.13
20	0.01	4.33	0.06	1.11	4.30	0.33	27.20	8.85	104.00	29.50	120.00	19.40	195.00	25.90	539	0.12	0.09

$$\text{Eu}/\text{Eu}^* = \text{Eu}_N / [(\text{Sm})_N^* (\text{Gd})_N]^{1/2}.$$

Eu/Eu* 值在 0.02~0.18 之间(图 8f)。

5 温压条件计算

分别对含石榴子石角闪黑云斜长片麻岩样品 TB1349 和含石榴子石黑云角闪斜长片麻岩样品 TB1352 进行了变质相平衡模拟,用于限定它们的变质温压条件演化。峰期变质阶段进行变质相平衡模拟采用的热力学软件为 Perple-X 6.9.1 (Connolly, 1990, 2005),全岩主量成分见表 6,其中 FeO 采用滴定法测定。MnO 和 P₂O₅ 在全岩成分中含量较低,可

以忽略不计,因此选用 NCKFMASHTO (Na₂O-CaO-K₂O-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O-TiO₂-O) 体系进行模拟(White *et al.*, 2014)。模拟选用的数据库为 hp62ver. Dat (Holland and Powell, 1998, 2011),流体状态方程采用自 Holland 和 Powell (1998)。采用的矿物活度模型如下:石榴子石、黑云母、白云母、绿泥石、堇青石、钛铁矿和熔体(White *et al.*, 2014),斜长石(Holland and Powell, 2003),角闪石(Diener *et al.*, 2007)。石英和金红石作为纯的固溶体端员处理。

此外,对样品 TB1352 中石榴子石分解形成的局

表 6 用于峰期变质相平衡模拟的全岩成分

Table 6 Bulk-rock compositions used for phase equilibrium modelling of peak metamorphism

样品号	全岩各组分含量 ($w_B/\%$)											
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI
TB1349	63.47	0.84	14.15	1.05	6.03	0.11	4.38	4.19	2.25	1.77	0.18	0.77
TB1352	52.57	1.03	15.16	1.58	9.68	0.24	6.73	5.72	2.28	1.95	0.16	1.96
样品号	相平衡模拟中的各组分含量 ($x_B/\%$)											总量
	H ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	O*	图	
TB1349	2.687	66.418	8.725	4.697	6.833	6.102	1.181	2.282	0.661	0.206	图 9a	
TB1352	4.200	54.877	9.325	6.397	10.474	9.692	1.298	2.307	0.809	0.311	图 9b	

部矿物成分域进行了变质相平衡模拟研究,用于进行石榴子石分解后变质阶段温压条件的限定,选用的热力学软件为 GeoPS 3.3.2.133 (Xiang and Connolly, 2021)。同样选用的是 NCKFMASHTO (Na₂O-CaO-K₂O-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O-TiO₂-O) 体系 (White *et al.*, 2014),所用的数据库为 ds62 (Holland and Powell, 1998, 2011),流体状态方程采用自 Holland 和 Powell (1998)。矿物活度模型如下:石榴子石、黑云母、白云母、绿泥石、堇青石、钛铁矿和熔体 (White *et al.*, 2014),斜长石 (Holland and Powell, 2003),角闪石 (Green *et al.*, 2016)。石英和金红石为纯的固溶体端员。计算视剖面图所需 H₂O 含量为给定水值。由于峰期和退变质阶段模拟中,角闪石的矿物活度模型不同,所以本研究选择了不同的热力学软件分别对两个变质阶段的视剖面图进行了计算模拟。

5.1 峰期变质阶段

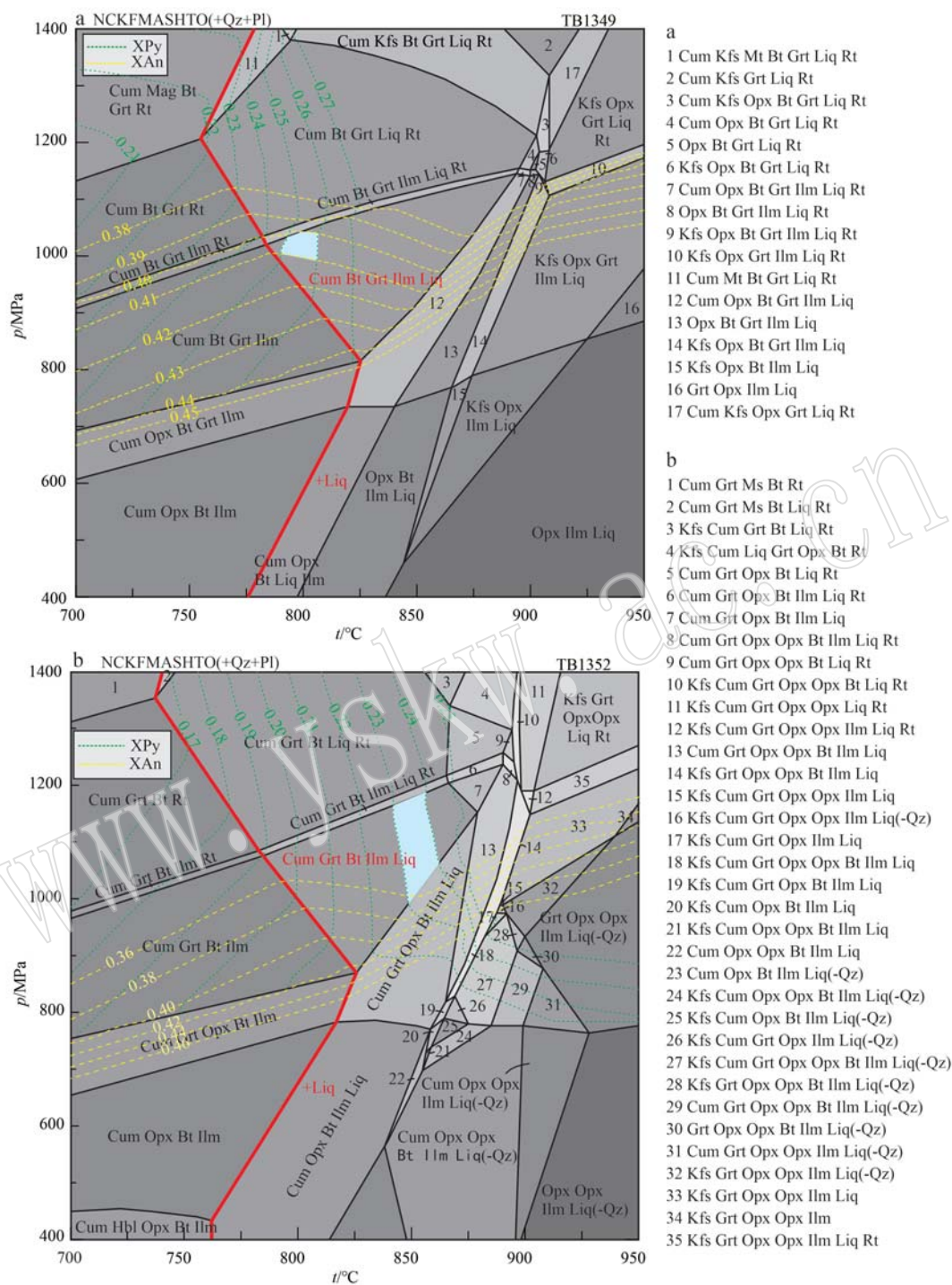
含石榴子石角闪黑云斜长片麻岩样品 TB1349 以 700~950℃ 和 400~1 400 MPa 为温压范围来计算 p - T 视剖面图,并且计算了相关矿物组合域的斜长石的钙等值线 (X_{An}) 和石榴子石镁等值线 (X_{Py}) (图 9a)。固相线的温度范围在 p - T 视剖面图上显示在 755~825℃ 之间,该样品峰期矿物组合 Cum+Bt+Grt+Pl+Ilm+Qz+Liq 对应视剖面图中的一个较大的温压范围:782~892℃/820~1 140 MPa,其中温度上下限分别以为斜方辉石的出现和熔体的消失为标志。由于峰期矿物组合的温压范围较大,所以采用石榴子石幔部 X_{Py} 值 (0.25~0.26) 和基质中斜长石核部 X_{An} 值 (0.40~0.41),更详细地限定出峰期变质矿物组合的温压范围为 790~810℃/990~1 040 MPa (图 9a)。

含石榴子石黑云角闪斜长片麻岩样品 TB1352 以 700~950℃ 和 400~1 400 MPa 作为温度和压力范

围计算 p - T 视剖面图,同样也计算了相关矿物组合域的石榴子石中斜长石 X_{An} 等值线和镁铝榴石成分等值线 X_{Py} (图 9b)。 p - T 视剖面图中固相线的温度范围在 737~825℃ 之间,该样品峰期矿物组合为 Cum+Bt+Grt+Pl+Ilm+Qz+Liq 在视剖面图中对应的温度和压力范围为 785~880℃/870~1 200 MPa,温度上下限同样分别以斜方辉石的出现和熔体的消失为标志。峰期矿物组合的温压范围相对较大,石榴子石幔部 X_{Py} 值 (0.23~0.24) 进一步将峰期变质温压范围限定在 840~862℃/1 000~1 190 MPa 之间 (图 9b)。

5.2 退变质阶段

含石榴子石黑云角闪斜长片麻岩样品 TB1352 中石榴子石周围发育后成合晶结构,为典型降压结构。后成合晶中的矿物组合代表该样品记录的第 2 期变质矿物组合,选择了 3 颗石榴子石颗粒周围形成的后成结晶,用它们的成分进行了变质相平衡模拟,从而确定退变质阶段的温压条件。选择的 3 个石榴子石和其后成结晶分别命名为 Grt1.1、1.2、1.3。Grt1.1 主要特征是大部分石榴子石已经分解,内部只保留少量石榴子石残余,后成合晶主要由黑云母、斜长石、普通角闪石和石英组成;Grt1.2 中石榴子石分解程度没有 Grt1.1 中高,显示中等程度的石榴子石残余,后成合晶主要由黑云母、普通角闪石、斜长石、和石英组成;Grt1.3 的特征是石榴子石只有少量分解,内部结构比较完整,只是边部呈港湾状结构,后成合晶主要由斜长石、普通角闪石、黑云母等矿物组成 (图 10)。在岩相学观察的基础上,利用估计的后成合晶中矿物体积比和矿物成分,分别计算了以上 3 个后成合晶的有效全岩成分 (表 7) 和相平衡模拟中的各组分含量 (表 8),具体计算过程如下:首先根据背散射图像绘制石榴子石变斑晶的区域 (图 10),将不同矿物分别以不同颜色标记;其

图9 样品 TB1349 和 TB1352 的变质相平衡 p - T 视剖面图Fig. 9 p - T pseudosection diagrams of sample TB1349 and sample TB1352

a—含石榴子石角闪黑云斜长片麻岩样品 TB1349; b—含石榴子石黑云角闪斜长片麻岩样品 TB1352; 峰期矿物组合为红色字体所标记, 样品 TB1349 蓝色阴影区域为石榴子石 X_{Py} 和斜长石 X_{An} 等值线共同限定的变质峰期温压范围, 而样品 TB1352 蓝色阴影区域为石榴子石 X_{Py} 限定的变质峰期温压范围。

a—garnet-bearing hornblende-biotite-plagioclase gneiss sample TB1349; b—garnet-bearing biotite-hornblende-plagioclase gneiss sample TB1352; the peak mineral assemblage of Cum+Grt+Bt+Ilm+Liq (+Qz+Pl) is marked in red color, and the blue area of TB1349 marks the metamorphic peak p - T condition limited using isopleths of X_{Py} and X_{An} , whereas the blue area of TB1352 marks the metamorphic peak p - T condition limited using isopleths of X_{Py} .

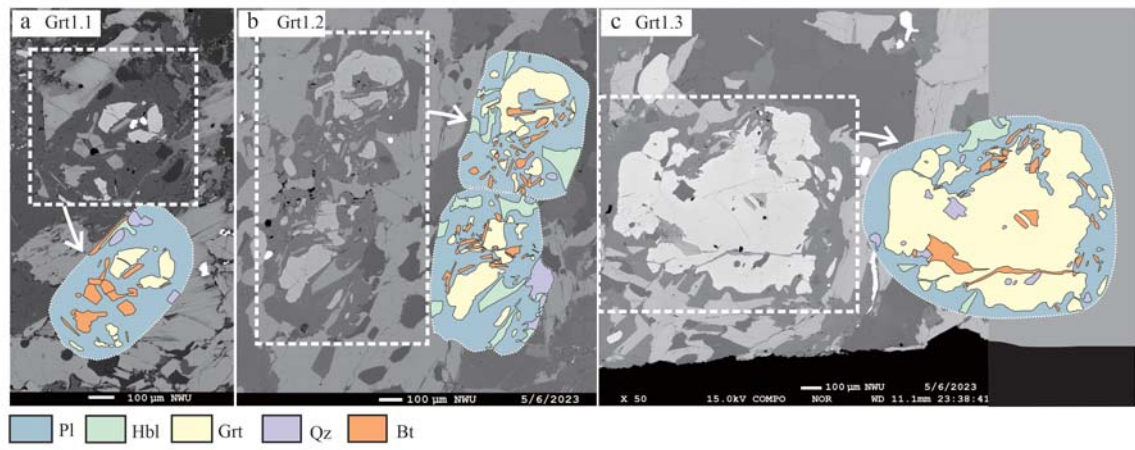


图 10 TB1352 中 3 个石榴子石和其后成合晶的背散射照片和示意图

Fig. 10 BSE image and sketch map of 3 garnet porphyroblasts and their coronas in the sample TB1352

表 7 TB1352 中石榴子石周围后成合晶的有效全岩成分

$w_B/\%$

Table 7 Effective bulk-rock composition of garnet corona in the sample TB1352

样品	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TfFeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	LOI	Total
Grt1.1	55.01	0.28	24.75	2.96	0.02	1.56	8.55	4.55	1.30	—	98.99
Grt1.2	54.18	0.17	24.24	3.76	0.06	2.06	9.79	4.13	0.44	—	98.83
Grt1.3	55.62	0.23	23.64	3.36	0.04	2.08	8.06	4.67	1.06	—	98.76

表 8 样品 TB1352 局部成分域变质相平衡模拟中的各组分含量

$x_B/\%$

Table 8 The content of each component in the metamorphic phase equilibrium simulation of sample TB1352

样品	相图类型		H ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	O*	图
Grt1.1	$p-X_O$	$X=0$	2.000	60.559	16.056	10.087	2.566	2.728	0.915	4.859	0.232	0.000	图 11a
		$X=1$	1.973	59.740	15.839	9.950	2.531	2.691	0.902	4.793	0.228	1.353	
	$t-X_{H_2O}$	$X=0$	0.000	64.673	17.146	10.772	2.740	2.913	0.977	5.189	0.247	0.220	图 11b
		$X=1$	5.000	61.439	16.289	10.233	2.603	2.768	0.928	4.929	0.235	0.209	
		$p-T$		1.600	63.638	16.872	10.599	2.696	2.867	0.961	5.106	0.243	0.216
Grt1.2	$p-X_O$	$X=0$	2.000	59.270	15.625	11.476	3.360	3.442	0.308	4.379	0.140	0.000	图 12a
		$X=1$	1.947	57.700	15.211	11.172	3.271	3.351	0.300	4.263	0.136	1.724	
	$t-X_{H_2O}$	$X=0$	0.000	63.276	16.681	12.252	3.587	3.675	0.329	4.675	0.149	0.217	图 12b
		$X=1$	5.000	60.112	15.847	11.639	3.408	3.491	0.312	4.441	0.142	0.206	
		$p-T$		1.700	62.200	16.397	12.044	3.526	3.612	0.323	4.595	0.147	0.213
Grt1.3	$p-X_O$	$X=0$	2.000	60.915	15.253	9.461	3.400	3.081	0.740	4.960	0.190	0.000	图 13a
		$X=1$	1.754	61.068	15.292	9.485	3.408	3.088	0.742	4.973	0.190	1.547	
	$t-X_{H_2O}$	$X=0$	0.000	65.035	16.285	10.101	3.630	3.289	0.790	5.296	0.202	0.217	图 13b
		$X=1$	5.000	61.784	15.471	9.596	3.448	3.125	0.751	5.031	0.192	0.206	
		$p-T$		1.750	63.897	16.000	9.924	3.566	3.232	0.777	5.203	0.199	0.213

次,计算每个区域的有效面积占比,结合各矿物的密度,计算其质量分数;然后将各组分含量原始探针数据与质量分数分别相乘再相加,即可得到最终所需的有效全岩成分含量。研究中计算了 $p-X_O$ 视剖

面图,用来确定合适的 O 含量,在计算过程中,当 $X_O=0$, H_2O 含量设置为 2.0%(摩尔分数),将全岩成分的铁全部为 FeO 作为样品的最小含氧量($X_O=0$)和全部作为 Fe_2O_3 作为样品的最大含氧量($X_O=1$)所限

定的范围作为 p - X_0 图横坐标, 将 200~1 200 MPa 限定的压力范围为纵坐标。计算 p - T 视剖面图选择的温压范围为 600~900°C 和 200~1 200 MPa, 计算 t - X_{H_2O} 时所用 O 含量为根据 p - X_0 计算所得。模拟时的水含量都是通过 t - X_{H_2O} 视剖面图确定的, Grt1. 1、Grt1. 2、Grt1. 3 的 t - X_{H_2O} 视剖面图计算的压力是在前期的初始 p - T 视剖面图绘制以及结合矿物组合基础上选择的, 分别为 700 MPa、680 MPa 和 600 MPa, 在计算 t - X_{H_2O} 时, 将完全无水时 ($X_{H_2O}=0$) 的全岩水含量作为最小水含量, 将水含量为 5.0% (摩尔分数) 作为最大水含量 ($X_{H_2O}=1.0$)。

Grt1. 1 的合成合晶矿物组合为 Hbl+Bt+Pl+Qz+Liq, 在 p - X_0 中, 该矿物组合所对应的 X_0 的范围为 0.01~0.21, 选取 $X_0=0.14$ 进行后续计算 (图 11a)。在 t - X_{H_2O} 图上其温度下限为固相线, 而固相线所在的 X_{H_2O} 范围为 0.28~0.34, 本文选择该固相线的中值 $X_{H_2O}=0.32$ 作为恰当的 H_2O 计算 p - T 视剖面图 (图 11b)。在模拟的温压范围内, 固相线出现在 720~760°C 之间, 矿物组合所在的温压范围在 735~826°C 和 400~860 MPa 之间, 斜长石钙等值线 X_{An} (0.49~0.50) 进一步限定其温压范围为 735~814°C 和 400~810 MPa (图 11c)。

Grt1. 2 的后成合晶矿物组合为 Hbl+Bt+Pl+Qz+Liq, 在 p - X_0 中, 该矿物组合所对应的 X_0 的范围为 0~0.39, 选取 $X_0=0.11$ 进行后续计算 (图 12a)。该矿物组合位于 t - X_{H_2O} 图固相线之上, 固相线的 X_{H_2O} 范围为 0.32~0.36, 本文选择该固相线的中值 $X_{H_2O}=0.34$ 作为恰当的 H_2O 计算 p - T 视剖面图 (图 12b)。 p - T 视剖面图的固相线出现在 705~760°C 之间, 退变质矿物组合所在的温压范围在 721~798°C 和 430~790 MPa 之间, 由斜长石中的 X_{An} 等值线 (0.53~0.54) 进一步将该变质温压范围缩小为 721~794°C 和 430~700 MPa (图 12c)。

Grt1. 3 的后成合晶矿物组合为 Hbl+Bt+Pl+Qz+Liq, 在 p - X_0 中, 该矿物组合所对应的 X_0 的范围为 0.08~0.34, 选取 $X_0=0.12$ 进行后续计算 (图 13a)。 t - X_{H_2O} 视剖面图显示该矿物组合固相线之上, 该固相线的 X_{H_2O} 范围为 0.33~0.37, 本文选择其中值 $X_{H_2O}=0.35$ 作为恰当的 H_2O 计算 p - T 视剖面图 (图 13b)。 p - T 视剖面图显示固相线出现在 730~781°C 之间, 矿物组合所在的温压范围在 730~811°C 和 330~800 MPa 之间, 斜长石中的 X_{An} 等值线 (0.46~0.47) 进一步限

定其温压范围为 740~810°C 和 470~780 MPa (图 13c)。

6 讨论

6.1 变质时代

近年来, 前人已经对秦岭造山带中秦岭杂岩做了大量与麻粒岩相变质作用有关的年代学研究工作 (Kröner *et al.*, 1993; Zhai *et al.*, 1998; Zhang *et al.*, 1998; Xiang *et al.*, 2012; Bader *et al.*, 2013; Tang *et al.*, 2015; 毛小红等, 2017; Sun *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2020; 郭祺等, 2022)。在商南松树沟地区, 陈丹玲等 (2004) 通过对基性麻粒岩样品进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析, 得到的加权平均年龄为 485 ± 3 Ma, 表明该时期为该地麻粒岩相变质作用的峰期时代; 刘良等 (2009) 对长英质高压麻粒岩进行了 SHRIMP 锆石 U-Pb 分析, 得出其变质年龄为 518 ± 12 Ma; 张建新等 (2011) 利用 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 方法分别对基性麻粒岩和长英质麻粒岩进行分析, 分别得到了 504 ± 7 Ma 和 506 ± 3 Ma 的加权平均年龄, 认为是发生高压麻粒岩相变质作用的时期。张建新等 (2011) 通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年对西峡地区的角闪二辉麻粒岩进行研究, 得出了 440 ± 2 Ma 和 426 ± 1 Ma 的年龄, 认为前者是经历了角闪岩相变质作用的时期, 后者是经历了中压麻粒岩相变质时期。梁爽等 (2021) 对西峡-内乡地区进行研究, 分别通过 LA-ICP-MS 独居石 U-Pb 定年和锆石 U-Pb 定年对石榴黑云斜长片麻岩和石榴黑云二长片麻岩进行分析, 获得独居石加权平均年龄分别为 413 ± 1.6 Ma 和 409.6 ± 1.9 Ma, 锆石加权平均年龄分别为 408.8 ± 3.3 Ma 和 405.8 ± 3.6 Ma, 认为其记录了变质作用的时期。在西秦岭造山带天水地区, 一些学者也做了年代学研究, 毛小红等 (2017) 对天水地区角闪二辉麻粒岩和混合岩中的浅色体进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 得出浅色体的加权平均年龄为 426 ± 2 Ma, 代表深熔作用形成熔体的结晶年龄, 而角闪二辉麻粒岩有两个加权平均年龄: 424 ± 3 Ma 和 402 ± 3 Ma, 前者被认为是经历麻粒岩相变质作用的时期, 后者被认为是麻粒岩相变质之后的退变质时期; 郭祺等 (2022) 对西秦岭北缘天水地区石榴夕线黑云片麻岩进行原位独居石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学分析, 得出了 3 组年龄, 分别是 421 Ma、388 Ma 和 368~362 Ma, 其中 421 Ma 代表中压麻粒岩相峰期变

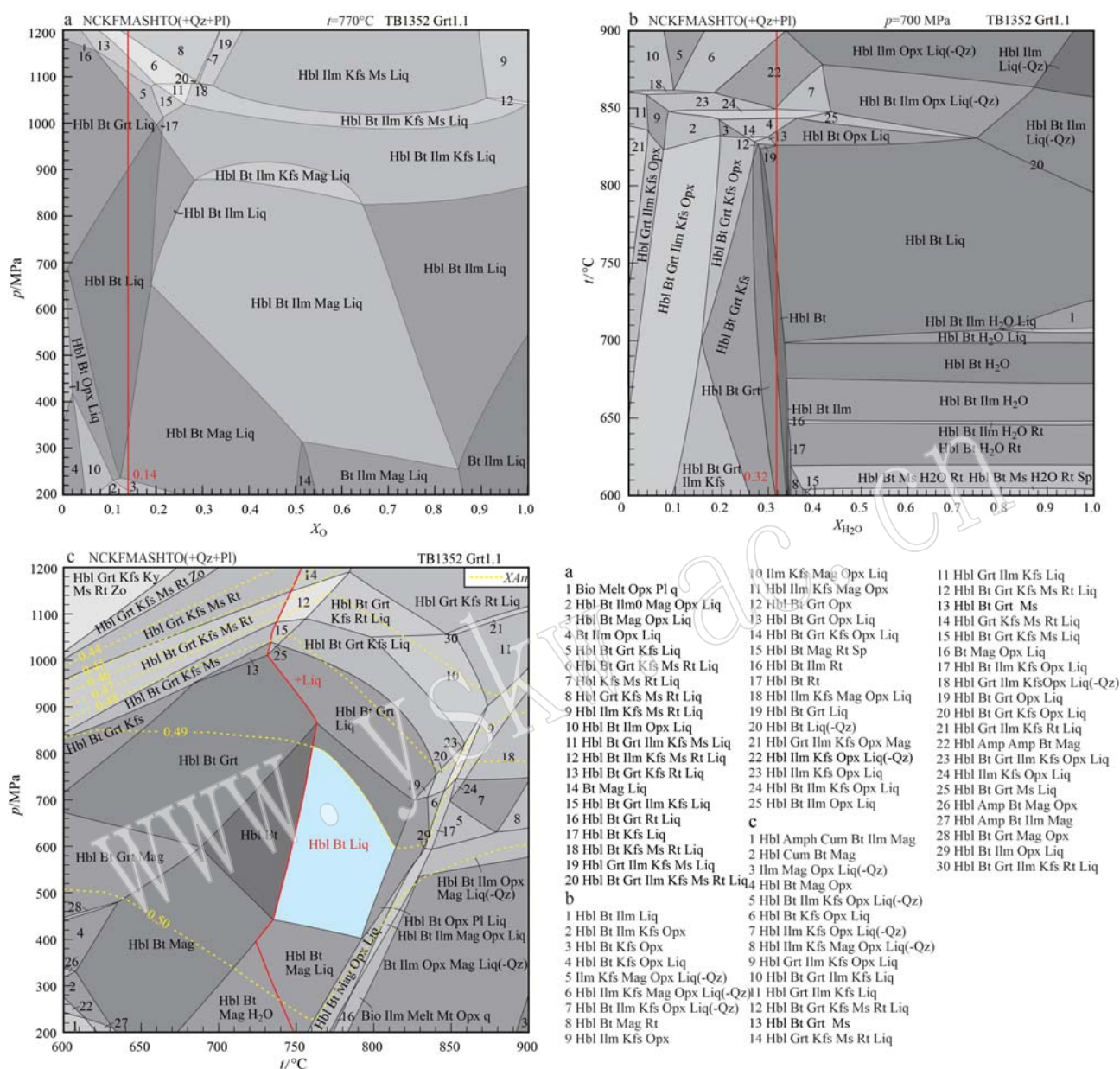


图 11 样品 TB1352(Gr1.1) 局部成分域变质相平衡模拟视剖面图

Fig. 11 p - X_0 , t - X_{H_2O} and p - T pseudosections calculated using local effective bulk-rock compositions in the sample

TB1352(Gr1.1)

a—Gr1.1 局部成分域的 p - X_0 视剖面图; b—Gr1.1 局部成分域的 t - X_{H_2O} 视剖面图; c—Gr1.1 局部成分域的 p - T 视剖面图; 红色字体表示峰期矿物组合, 淡蓝色区域为斜长石 X_{An} 等值线限定的温压范围, 图 a 中的红线为对应 O 含量; 图 b 中的红色线为 t - X_{H_2O} 中水的取值
a— p - X_0 pseudosection of the Gr1.1; b— t - X_{H_2O} pseudosection of the Gr1.1; c— p - T pseudosection of the Gr1.1; red bars in Fig. a denote O contents used for subsequent modelling, red bars in Fig. b denote H_2O contents used for subsequent modelling, the peak mineral assemblage of Hbl+Bt+Liq (+Qz+Pl) is marked in red color, and the light blue area represents the peak metamorphic p - T conditions constrained using isopleths of X_{An}

质作用的年代, 388 Ma 代表峰期之后的降温降压到熔体固相线的年龄, 368~362 Ma 代表与韧性剪切变形相关联的热事件。桐柏山地区的秦岭杂岩变质程度较高, 变质年龄可以划分为 2 组: 490~424 Ma

(Kröner *et al.*, 1993; Zhang *et al.*, 1998; Wang *et al.*, 2011b; Liu *et al.*, 2011; 张建新等, 2011; Xiang *et al.*, 2012; Wu *et al.*, 2014; Zhang Q Q *et al.*, 2020) 和 415~400 Ma (Zhai *et al.*, 1998; Xiang

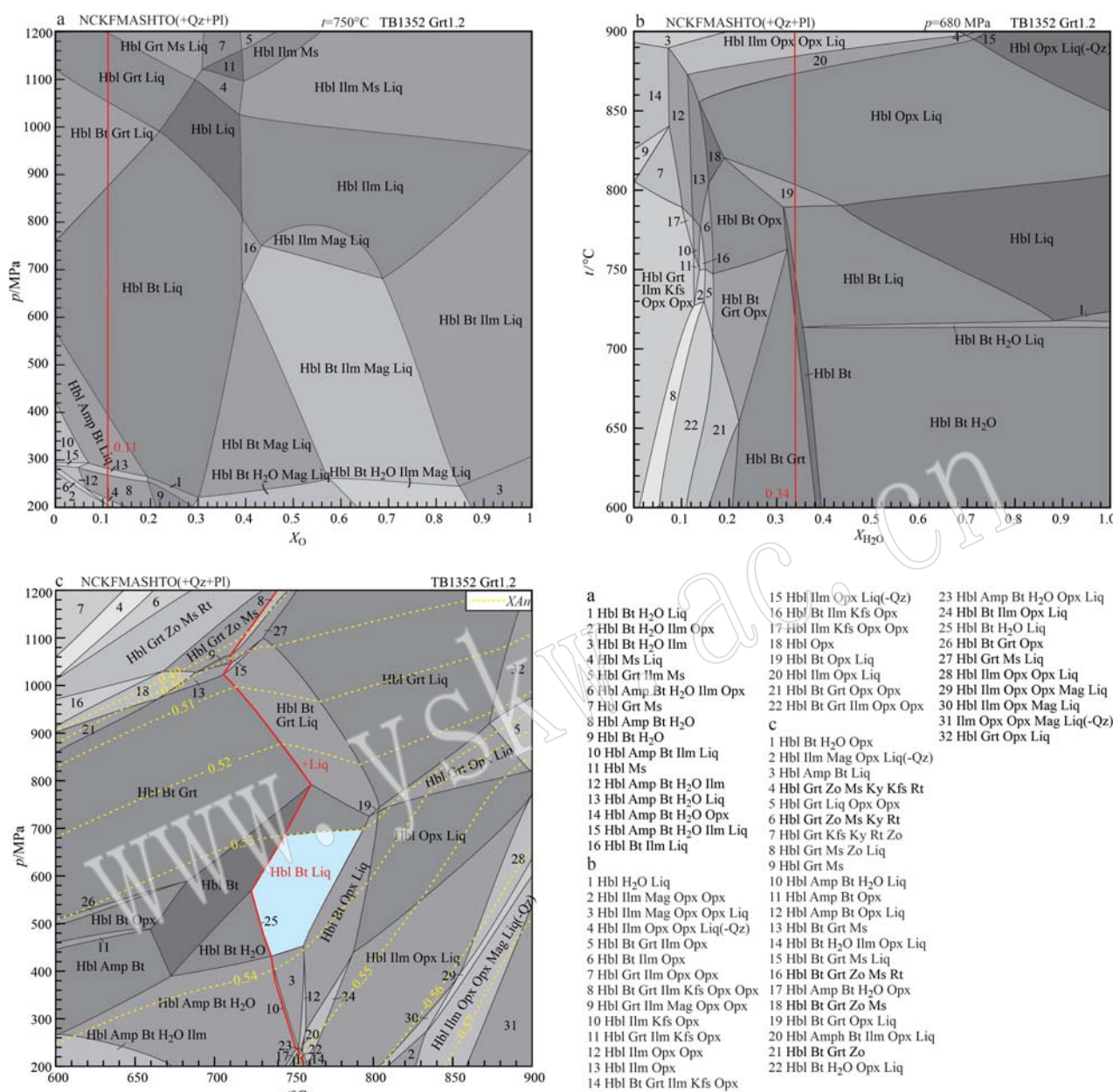


图 12 样品 TB1352 (Grt1.2) 局部成分域变质相平衡模拟视剖面图

Fig. 12 p - X_0 , t - X_{H_2O} and p - T pseudosections calculated using local effective bulk-rock compositions in the sample TB1352 (Grt1.2)

a—Grt1.2 局部成分域的 p - X_0 视剖面图; b—Grt1.2 局部成分域的 t - X_{H_2O} 视剖面图; c—Grt1.2 局部成分域 p - T 视剖面图; 红色字体表示峰

期矿物组合, 淡蓝色区域为斜长石 X_{An} 等值线限定的温压范围, 图 a 中的红线为对应 O 含量; 图 b 中的红色线为 t - X_{H_2O} 中水的取值

A— p - X_0 pseudosection of the Grt1.2; b— t - X_{H_2O} pseudosection of the Grt1.2; c— p - T pseudosection of the Grt1.2; red bars in Fig. a denote O contents used for subsequent modelling, red bars in Fig. b denote H_2O contents used for subsequent modelling, the peak mineral assemblage of Hbl+Bt+Liq (+Qz+Pl) is marked in red color, and the light blue area represents the peak metamorphic p - T conditions constrained using isopleths of X_{An}

et al., 2014; Zhang *et al.*, 2020), 分别认为是发生麻粒岩相变质作用的时代和退变质作用的时代 (表 9)。

本研究对喂子坪地区含石榴子石黑云角闪斜长片麻岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 得到

的²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄范围在 402~361 Ma 之间, 其加权平均年龄为 383.2±7.0 Ma。对 2 个混合岩中的浅色体样品进行了锆石年代学研究, 其中样品 TB1354 的锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄范围在 403~386 Ma, 加权平均年龄为 400±3.6 Ma, 样品 TB1364 年龄范围在

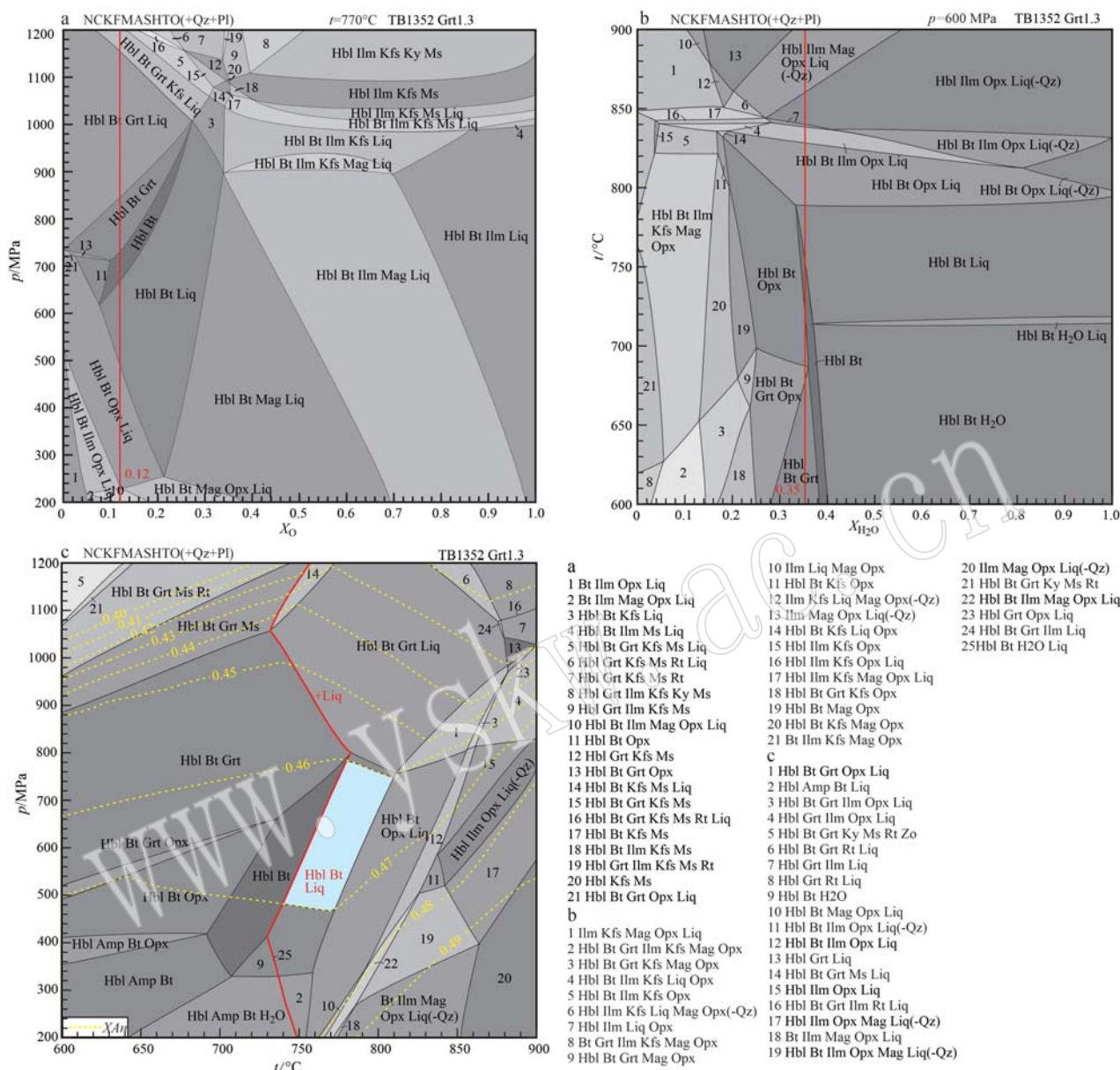


图 13 样品 TB1352 (Grt1.3) 局部成分域变质相平衡模拟视剖面图

Fig. 13 $p-X_0$, $t-X_{\text{H}_2\text{O}}$ and $p-T$ pseudosections calculated using local effective bulk-rock compositions in the sample

TB1352 (Grt1.3)

a—Grt1.3 局部成分域的 $p-X_0$ 视剖面图; b—Grt1.3 局部成分域的 $t-X_{\text{H}_2\text{O}}$ 视剖面图; c—Grt1.3 局部成分域 $p-T$ 视剖面图; 红色字体表示峰

期矿物组合,淡蓝色区域为斜长石 X_{An} 等值线限定的温压范围,图 a 中的红线为对应 O 含量;图 b 中的红色线为 $t-X_{\text{H}_2\text{O}}$ 中水的取值

a— $p-X_0$ pseudosection of the Grt1.3; b— $t-X_{\text{H}_2\text{O}}$ pseudosection of the Grt1.3; c— $p-T$ pseudosection of the Grt1.3; Red bars in Fig. a denote O contents used for subsequent modelling, Red bars in Fig. b denote H_2O contents used for subsequent modelling, the peak mineral assemblage of Hbl+Bt+Liq (+Qz+Pl) is marked in red color, and the light blue area represents the peak metamorphic $p-T$ conditions constrained using isopleths of X_{An}

373~427 Ma,加权平均年龄为 $406.7 \pm 7.8\text{ Ma}$ 。Tang 等(2015)通过对该地区混合岩的中色体进行了锆石 U-Pb 年代学的研究,得到了 3 组加权平均年龄,分

别为 $379 \pm 5\text{ Ma}$, $391 \pm 2\text{ Ma}$ 和 $405 \pm 4\text{ Ma}$,因此把 405~379 Ma 限定为该地区秦岭杂岩发生部分熔融和混合岩化的时间;Sun 等(2019)在喂子坪地区对混合

表 9 桐柏山地区秦岭杂岩变质时代统计表

Table 9 The summary of metamorphic ages for the Qinling Complex from the Tongbaishan area

岩性	研究方法	年龄/Ma	解释	参考文献
基性麻粒岩	Pb-Pb 蒸发法	470	原岩年龄	Kröner <i>et al.</i> , 1993
花岗岩长片麻岩	Pb-Pb 蒸发法	435±14	麻粒岩相变质作用	
长英质麻粒岩	角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	404±2	冷却年龄	Zhai <i>et al.</i> , 1998
长英质麻粒岩	Pb-Pb 蒸发法	479±6	麻粒岩相变质作用	Zhang <i>et al.</i> , 1998
二辉麻粒岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	436±1	麻粒岩相变质作用	张建新等, 2011
长英质麻粒岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	424±4	麻粒岩相变质作用	Wang <i>et al.</i> , 2011b
片麻岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	438±4	进变质作用	
基性麻粒岩/长英质麻粒岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	440	麻粒岩相峰期变质阶段	Liu <i>et al.</i> , 2011
		420	角闪岩相退变质阶段	
		400	绿片岩相退变质阶段	
基性麻粒岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	432±4	峰期麻粒岩相变质阶段	Xiang <i>et al.</i> , 2012
基性麻粒岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	432±4	退变质作用	
尖晶石麻粒岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	429±7	峰期后变质作用阶段	Xiang <i>et al.</i> , 2014
尖晶石麻粒岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	412±4	退变质作用	
长英质麻粒岩	LA-ICP-MS 独居石 U-Pb	430±3、423±2、425±3	峰期麻粒岩相变质阶段	Wu <i>et al.</i> , 2014
浅色体	LA-ICP-MS 独居石 U-Pb	426±3	峰期麻粒岩相变质阶段	
长英质麻粒岩	LA-ICP-MS 独居石 U-Pb	490~450	高压-中压麻粒岩相	Zhang <i>et al.</i> , 2020
基性麻粒岩/长英质麻粒岩	LA-ICP-MS 独居石 U-Pb	440~430	超高温麻粒岩相	
基性麻粒岩/长英质麻粒岩	LA-ICP-MS 独居石 U-Pb	410~405	退变质作用	

岩的浅色体、中色体和侵入混合岩的花岗岩脉分别测试,得到浅色体的结晶年龄为 408 ± 2 Ma, 中色体变质锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 403 ± 2 Ma 和 400 ± 2 Ma, 而混合岩中侵入的花岗岩脉的平均年龄为 396 ± 2 Ma, 因此将混合岩化的年龄限定在 410~396 Ma; Zhao 等(2020)对该地区混合岩中的中色体进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究,得到的变质年龄为 410~390 Ma, 认为是该区域发生麻粒岩相变质作用的时期。可以注意到前人得到的混合岩化的时代有一定差别 (Sun *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2020), 主要原因是在进行混合岩变质锆石定年时得到的变质年龄有较大的变化范围, 最年轻的加权平均年龄大约为 380 Ma (Tang *et al.*, 2015; 本研究), 此外, Zhao 等(2020)也得到了较年轻的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄, 认为可能是由于 Pb 丢失的结果, 所以没有用于加权平均年龄计算。基于喂子坪地区混合岩中的变质锆石颗粒较大, 且不发育裂隙, 可以推测较年轻的变质锆石年龄应该不是 Pb 丢失的结果, 可能同样具有地质意义。喜马拉雅造山带麻粒岩相变质作用可以持续约 30 Ma (Zhang *et al.*, 2015b, 2017), 因此本研究认为喂子坪地区秦岭杂岩变沉积岩发生了麻粒岩相峰期变质作用和强烈的混合岩化作用的时代约 410~390 Ma, 而约 380 Ma 的年龄可能是代表退变质冷却到固相线的时代, 但不管怎样形成喂

子坪地区混合岩的麻粒岩相变质作用的时期年轻于桐柏地区以及天水地区。

6.2 变质温压

近年来, 对秦岭杂岩除了变质作用时代的研究工作外, 大量的工作集中在对榴辉岩和麻粒岩相变质岩变质温压演化轨迹的限定方面, 并取得了很多重要进展 (Kröner *et al.*, 1993; Zhai *et al.*, 1998; Zhang *et al.*, 1998; 陈丹玲等, 2004, 2011, 2015; 张建新等, 2009, 2011; Cheng *et al.*, 2011, 2012; Dong *et al.*, 2011a; Wang *et al.*, 2011a, 2011b; Liu *et al.*, 2011, 2014; Xiang *et al.*, 2012, 2014; Bader *et al.*, 2013; Tang *et al.*, 2015; 毛小红等, 2017; Zhao *et al.*, 2020; 梁爽等, 2021; 唐源等, 2022; 郭祺等, 2022)。

毛小红等(2018)研究了西秦岭天水地区的石榴子石夕线石片麻岩的变质作用, 得出其峰期变质条件为 $793 \sim 803^\circ\text{C}/880 \sim 950$ MPa, 认为其记录了近等温降压的顺时针 p - T 轨迹 (图 14)。郭祺等(2022)对西秦岭北缘天水地区中压麻粒岩相变质的石榴夕线黑云片麻岩进行研究, 同样得到顺时针 p - T 演化轨迹, 进变质阶段以升温升压、峰期变质阶段后以近等温降压为特征, 峰期的变质温压条件为 $820^\circ\text{C}/1\ 020$ MPa, 达到中压麻粒岩相变质作用的年龄为约 420 Ma (图 14)。Liu 等(2011)对桐柏山地区秦岭杂岩的基

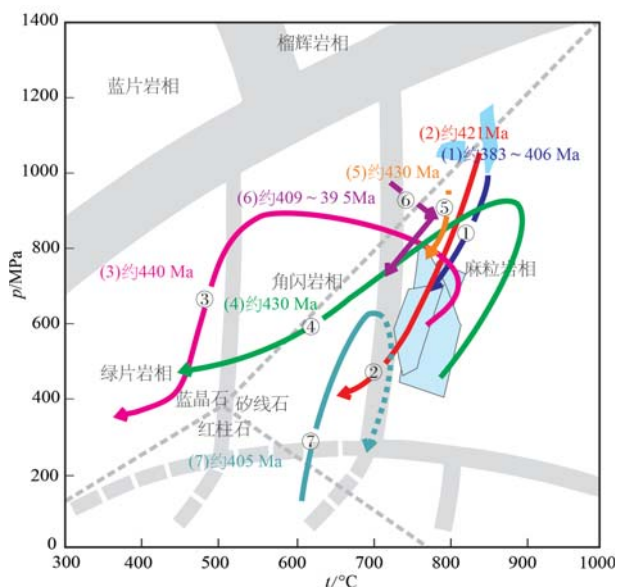


图 14 秦岭杂岩麻粒岩相变质岩的 p - T 轨迹总结

Fig. 14 Summary of p - T paths from the granulite-facies metamorphic rocks from the Qinling Complex

①—喂子坪地区含石榴子石黑云角闪斜长片麻岩变质 p - T 轨迹 (本文); ②—西秦岭北缘天水地区石榴夕线黑云片麻岩变质 p - T 轨迹 (郭祺等, 2022); ③—桐柏山地区基性麻粒岩变质 p - T 轨迹 (Liu *et al.*, 2011); ④—桐柏山地区超高温基性麻粒岩和泥质麻粒岩变质 p - T 轨迹 (Xiang *et al.*, 2012); ⑤—西秦岭造山带的石榴子石夕线石片麻岩变质 p - T 轨迹 (毛小红等, 2018); ⑥—喂子坪地区含石榴子石黑云角闪斜长片麻岩变质 p - T 轨迹 (Zhao *et al.*, 2020); ⑦—西峡-内乡地区石榴黑云斜长片麻岩和石榴黑云二长片麻岩变质 p - T 轨迹 (梁爽等, 2021) (图中深蓝色区域为峰期矿物组合区域, 浅蓝色区域为退变质矿物组合区域)

①—metamorphic p - T path of garnet-bearing hornblende-biotite-plagioclase gneiss in the Weiziping area (this study); ②—metamorphic p - T path of garnet-sillimanite-biotite gneiss on the northern edge of the West Qinling Orogen in the Tianshui area (Guo *et al.*, 2022); ③—metamorphic p - T path of mafic granulites in the Tongbaishan area (Liu *et al.*, 2011); ④—metamorphic p - T path of UHT mafic and pelitic granulites in the Tongbaishan area (Xiang *et al.*, 2012); ⑤—metamorphic p - T path of garnet-sillimanite gneiss in the western Qinling Orogen (Mao *et al.*, 2018); ⑥—metamorphic p - T path of garnet-bearing biotite-plagioclase gneiss in the Weiziping area (Zhao *et al.*, 2020); ⑦—metamorphic p - T path of garnet-biotite-plagioclase gneisses and garnet-biotite two-feldspar gneiss in the Xixia and Neixiang area (Liang *et al.*, 2021) (the dark blue area in the figure represents the peak mineral assemblage area, while the light blue area represents the retrograde metamorphic mineral assemblage area)

性麻粒岩进行研究, 得出 $770 \sim 830^\circ\text{C}/690 \sim 850 \text{ MPa}$ 为其达到峰期变质作用的条件, 该样品得到的 p - T 演化轨迹为逆时针, 变质时代约为 440 Ma (图 14)。Xiang 等 (2012) 对桐柏山地区秦岭杂岩中的超高温基性麻粒岩和泥质麻粒岩进行研究, 发现它们的峰期变质条件为 $880 \sim 920^\circ\text{C}/800 \sim 1000 \text{ MPa}$, 也经历了逆时针的 p - T 演化轨迹, 变质时代约为 430 Ma (图

14)。梁爽等 (2021) 对秦岭造山带西峡-内乡地区石榴黑云斜长片麻岩和石榴黑云二长片麻岩进行研究, 通过 GBPQ 温压计计算, 得到它们进变质阶段和峰期变质阶段的温压条件分别为: $553^\circ\text{C}/210 \text{ MPa}$, $676^\circ\text{C}/520 \text{ MPa}$ 和 $617^\circ\text{C}/300 \text{ MPa}$, $705^\circ\text{C}/600 \text{ MPa}$, 认为该地区经历了广泛的角闪岩相变质作用。由此可见, 秦岭杂岩在不同区域经历变质作用程度和变质温压演化是有差别的。Zhao 等 (2020) 对秦岭造山带喂子坪地区含石榴子石黑云角闪斜长片麻岩进行研究, 认为该岩石经历了中压麻粒岩相变质作用, 并且该地区的石榴子石记录了进变质阶段的演化, 传统温压计计算的进变质温压条件为 $703^\circ\text{C}/1000 \text{ MPa}$, 而通过相平衡模拟计算的峰期变质的温压条件为 $745 \sim 820^\circ\text{C}/850 \sim 970 \text{ MPa}$, 记录了顺时针的 p - T 轨迹, 进变质阶段以升温降压为特点。

在之前工作的基础上, 本研究得到含石榴子石角闪黑云斜长片麻岩样品 TB1349 的峰期矿物组合为镁铁闪石+黑云母+石榴子石+斜长石+钛铁矿+熔体, 形成的温压条件为 $790 \sim 810^\circ\text{C}/990 \sim 1040 \text{ MPa}$; 含石榴子石黑云斜长角闪片麻岩样品 TB1352 的峰期矿物组合与样品 TB1349 相同, 也记录了相似的峰期变质温压条件 ($840 \sim 862^\circ\text{C}/1000 \sim 1190 \text{ MPa}$), 指示变质程度达到了麻粒岩相。样品 TB1352 石榴子石变斑晶周围常见冠状体后成合晶, 本研究通过后成合晶局部有效全岩成分 p - T 视剖面图计算, 得到了 3 组变质温压条件, 分别为 $735 \sim 814^\circ\text{C}/400 \sim 810 \text{ MPa}$, $721 \sim 794^\circ\text{C}/430 \sim 700 \text{ MPa}$ 和 $740 \sim 810^\circ\text{C}/470 \sim 780 \text{ MPa}$ 。因此, 与天水地区泥质麻粒岩 p - T 轨迹相似 (毛小红等, 2018; 郭祺等, 2022), 本研究揭示喂子坪地区混合岩化片麻岩同样记录了近等温降压 p - T 轨迹 (图 14)。

6.3 构造意义

秦岭杂岩经历了 $506 \sim 485 \text{ Ma}$ (陈丹玲等, 2004; Zhang *et al.*, 2011, 2020) 和 $455 \sim 395 \text{ Ma}$ 麻粒岩相变质事件 (Wang *et al.*, 2011b; Xiang *et al.*, 2012, 2014; Liu *et al.*, 2011, 2014; 毛小红等, 2017; Sun *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2020)。对于晚奥陶世到中泥盆世麻粒岩相变质事件, 不同学者提出了不同的构造意义解释。Liu 等 (2011) 认为桐柏山地区 440 Ma 基性麻粒岩是由二郎坪洋内弧和秦岭大陆弧与中朝克拉通碰撞造山作用形成; Xiang 等 (2012) 认为桐柏山地区泥质和基性麻粒岩经历了超高温变质作用, 变质时代为约 430 Ma , 认为该超高温

变质作用事件与商丹洋向北的洋脊俯冲相关联; 西秦岭天水地区秦岭杂岩经历麻粒岩相变质作用的时代为约 430~420 Ma, 退变质时代为约 400~390 Ma (毛小红等, 2017; 郭祺等, 2022), 认为这一高温事件与大陆碰撞造山作用相关联。Zhao 等 (2020) 对喂子坪地区混合岩进行研究, 认为混合岩的部分熔融和混合岩化是在 409~395 Ma 地壳增厚后的热弛豫所导致的, 而地壳增厚是由不晚于 409 Ma 的北秦岭构造带和南秦岭构造带碰撞引起的; Li 等 (2023) 研究得出关石地区混合岩化的时代为约 400~386 Ma, 认为是由华北板块与华南海板块碰撞而导致的地壳增厚所引起的。除此之外, 北秦岭和南秦岭在约 510~480 Ma 碰撞及地壳加厚 (Zhang *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2016), 商丹洋在志留纪向北秦岭构造带下俯冲有关的大陆边缘弧环境 (Wang *et al.*, 2011b; Wu and Zheng, 2013; Wu *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2014; Dong *et al.*, 2018), 以及志留纪华南海板块和华北板块的碰撞 (Mattauer *et al.*, 1985; Faure *et al.*, 2008) 等构造模式也被提出, 用于解释约 455~395 Ma 秦岭杂岩麻粒岩相变质作用。

天水地区秦岭杂岩麻粒岩相变质峰期的时代为约 430~420 Ma (毛小红等, 2017; 郭祺等, 2022), 石榴子石夕线石片麻岩峰期变质条件为 793~803°C/880~950 MPa 和 820°C/1020 MPa, 并记录了近等温降压的顺时针 p - T 轨迹 (毛小红等, 2018; 郭祺等, 2022) (图 14)。桐柏山地区秦岭杂岩泥质麻粒岩和超高温基性麻粒岩发生变质作用的时代为约 430 Ma, 峰期变质条件为 880~920°C/800~1000 MPa, 经历了逆时针的 p - T 演化轨迹 (Xiang *et al.*, 2012) (图 14)。以上两个地区麻粒岩相变质作用的时代相同, 但记录了不同的 p - T 轨迹样式, 前者认为与大陆碰撞作用相关联 (毛小红等, 2018; 郭祺等, 2022), 而后者认为与商丹洋洋脊俯冲相关 (Xiang *et al.*, 2012), 因此可能指示构造过程的区域差异性。本研究得到喂子坪秦岭杂岩麻粒岩相变沉积岩压力峰期的变质条件为 790~810°C/990~1 040 MPa 和 840~862°C/1 000~1 190 MPa (图 14), 该变质条件与天水地区秦岭杂岩中泥质麻粒岩相同, 并且都经历了近等温降压的 p - T 演化轨迹, 这与喜马拉雅造山带高压泥质麻粒岩记录的变质轨迹样式相同 (Zhang *et al.*, 2015b, 2017) (图 14), 应该与大陆碰撞造山作用过程有关。

7 结论

(1) 岩相学观察及其矿物成分分析结果显示, 喂子坪地区样品 TB1349 记录了峰期矿物组合为石榴子石+斜长石+黑云母+镁铁闪石+石英+钛铁矿+熔体; 而 TB1352 记录了 3 个变质演化阶段: 早期进变质阶段 (M1), 以石榴子石及其内部包裹体 (黑云母、斜长石和石英) 为特征; 峰期变质阶段 (M2) 的矿物组合为石榴子石+黑云母+斜长石+镁铁闪石+石英+钛铁矿+熔体; 峰期后的退变质阶段 (M3) 以石榴子石的分解和普通角闪石的出现为特征, 其矿物组合为普通角闪石+斜长石+石英+黑云母+熔体。

(2) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年获得 3 个 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均变质年龄, 分别是 383.2 $\pm$ 7.0 Ma, 400 $\pm$ 3.6 Ma, 406.7 $\pm$ 7.8 Ma。喂子坪地区变沉积岩麻粒岩相峰期变质作用和强烈的混合岩化作用的时代约 410~390 Ma, 而约 380 Ma 的年龄可能是代表退变质冷却到固相线的时代。

(3) 喂子坪含石榴子石片麻岩的经历了中压麻粒岩相变质作用, 压力峰期变质温压条件为 790~810°C/990~1 040 MPa 和 840~862°C/1 000~1 190 MPa, 而退变质温压范围为 735~814°C/400~810 MPa, 721~794°C/430~700 MPa, 740~810°C/470~780 MPa。峰期到退变质阶段以近等温降压的 p - T 轨迹为特点, 记录了大陆碰撞造山作用和之后的地壳伸展过程。

References

- Bader T, Franz L, Ratschbacher L, *et al.* 2013. The Heart of China revisited: II Early Paleozoic (ultra) high-pressure metamorphic Qinling orogenic collage[J]. *Tectonics*, 32(4): 922~947.
- Cao H H, Li S Z, Zhao S J, *et al.* 2016. Detrital zircon geochronology of Neoproterozoic to early Paleozoic sedimentary rocks in the North Qinling Orogenic Belt: Implications for the tectonic evolution of the Kuanping Ocean[J]. *Precambrian Research*, 279: 1~16.
- Chen Danling, Liu Liang, Sun Yong, *et al.* 2004. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating for high-pressure basic granulite from North Qinling and its geological significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(18): 1 901~1 908 (in Chinese with English abstract).
- Chen Danling, Ren Yunfei, Gong Xiangkuan, *et al.* 2015. Identification and its geological significance of eclogite in Songshugou, the North Qinling[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(7): 1 841~1 854 (in Chi-

- nese with English abstract).
- Cheng H, Zhang C, Vervoort J D, *et al.* 2011. Geochronology of the transition of eclogite to amphibolite facies metamorphism in the North Qinling orogen of central China[J]. *Lithos*, 125: 969~983.
- Cheng H, Zhang C, Vervoort J D, *et al.* 2012. Timing of eclogite facies metamorphism in the North Qinling by U-Pb and Lu-Hf geochronology[J]. *Lithos*, 136: 46~59.
- Connolly J A D. 1990. Multivariable phase-diagrams—An algorithm based on generalized thermodynamics[J]. *American Journal of Science*, 290: 666~718.
- Connolly J A D. 2005. Computation of phase equilibria by linear programming: A tool for geodynamic modeling and its application to subduction zone decarbonation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 236(1-2): 524~541.
- Diener J F A, Powell R, White R W, *et al.* 2007. A new thermodynamic model for clino- and orthoamphiboles in the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{O}$ [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 25(6): 631~656.
- Diwu Chunrong, Sun Yong, Liu Liang, *et al.* 2010. The disintegration of Kuanping Group in North Qinling orogenic belts and Neo-Proterozoic N-MORB[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2 025~2 038 (in Chinese with English abstract).
- Diwu C R, Sun Y, Zhao Y, *et al.* 2014. Geochronological, geochemical, and Nd-Hf isotopic studies of the Qinling Complex, Central China: Implications for the evolutionary history of the North Qinling Orogenic Belt[J]. *Geoscience Frontiers*, 5(4): 499~513.
- Dong Y P, Genser J, Neubauer F, *et al.* 2011b. U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints on the exhumation history of the North Qinling terrane, China[J]. *Gondwana Research*, 19(4): 881~893.
- Dong Y P, Neubauer F, Genser J, *et al.* 2018. Timing of orogenic exhumation processes of the Qinling Orogen: Evidence from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating[J]. *Tectonics*, 37(10): 4 037~4 067.
- Dong Y P and Santosh M. 2016. Tectonic architecture and multiple orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China[J]. *Gondwana Research*, 29(1): 1~40.
- Dong Y P, Yang Z, Liu X M, *et al.* 2014. Neoproterozoic amalgamation of the Northern Qinling terrain to the North China Craton: Constraints from geochronology and geochemistry of the Kuanping ophiolite[J]. *Precambrian Research*, 255: 77~95.
- Dong Y P, Zhang G W, Hauzenberger C, *et al.* 2011c. Paleozoic tectonics and evolutionary history of the Qinling orogen: Evidence from geochemistry and geochronology of ophiolite and related volcanic rocks[J]. *Lithos*, 122(1~2): 39~56.
- Dong Y P, Zhang G W and Neubauer F. 2011a. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(3): 213~237.
- Faure M, Lin W, Patrick Monié, *et al.* 2008. Palaeozoic collision between the North and South China blocks, Triassic intracontinental tectonics, and the problem of the ultrahigh-pressure metamorphism[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 340: 139~150.
- Gao Sheng, Chen Danling, Gong Xiangkuan, *et al.* 2015. Zircon U-Pb dating of clastic rocks and granites of Kuanping Group in Dongcha areas of Tianshui, and its geological implications[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(4): 255~264 (in Chinese with English abstract).
- Green E, White R, Diener J, *et al.* 2016. Activity-composition relations for the calculation of partial melting equilibria in metabasic rocks[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 34(9): 845~869.
- Guo Qi, Mao Xiaohong, Zhang Jianxin, *et al.* 2022. Granulite-facies metamorphism in the northern part of West Qinling: Constraints from phase equilibrium modeling and in-situ U-Pb dating of monazite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(11): 3 259~3 283 (in Chinese with English abstract).
- Hacker B R, Ratschbacher L and Liou J G. 2004. Subduction, collision and exhumation in the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie orogen[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 226(1): 157~175.
- Holland T J B and Powell R. 1998. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 16(3): 309~343.
- Holland T J B and Powell R. 2003. Activity-composition relations for phases in petrological calculations: An asymmetric multicomponent formulation[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 145: 492~501.
- Holland T J B and Powell R. 2011. An improved and extended internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest, involving a new equation of state for solids[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 29(3): 333~383.
- Hu P, Wu Y B, Zhang W X, *et al.* 2019. Timing of the Erlangping back-arc basin in the Qinling orogen, central China and its tectonic significance[J]. *Terra Nova*, 31(5): 458~464.
- Kröner A, Zhang G W and Sun Y. 1993. Granulites in the Tongbai area, Qinling belt, China: Geochemistry, petrology, single Zircon geochronology, and implications for the tectonic evolution of Eastern Asia[J]. *Tectonics*, 12(1): 245~255.
- 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[J]. *The Canadian Mineralogist*, 35(1): 219~246.
- Li Y, Sun S, Dong Y, *et al.* 2023. Rheological behavior of amphibolite facies migmatites during orogenesis: A case study from the North Qinling Belt, China[J]. *Lithos*, 107240.
- Liang Shuang, Zhang Qian, Liu Jiahui, *et al.* 2021. LA-ICP-MS U-Pb dating of metamorphic monazite and zircon of the Qinling metamorphic complex, Xixia and Neixiang areas, Henan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(12): 3 797~3 822 (in Chinese with English abstract).

- abstract).
- Liu Liang, Chen Danling, Wang Chao, *et al.* 2009. Research progress and tectonic geological significance of high-pressure and ultra-high pressure rock chronology in the northern margin of Altun, Qaidam, and North Qinling Mountains[J]. *Journal of Northwest University: Natural Science Edition*, 39(3): 472~479 (in Chinese with English abstract).
- Liu L, Liao X Y, Wang Y, Wang C, *et al.* 2016. Early paleozoic tectonic evolution of the north qinling orogenic belt in central china: Insights on continental deep subduction and multiphase exhumation [J]. *Earth-Science Reviews*, 159: 58~81.
- Liu Liang, Liao Xiaoying, Zhang Chengli, *et al.* 2013. Multi-metamorphic timings of HP-UHP rocks in the North Qinling and their geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(5): 1 634~1 656 (in Chinese with English abstract).
- Liu Q, Wu Y B, Wang H, *et al.* 2014. Zircon U-Pb ages and Hf isotope compositions of migmatites from the North Qinling terrane and their geological implications [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 32(2): 177~193.
- 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[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 29(9): 979~1 002.
- 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[J]. *Chemical Geology*, 257(1~2): 34~43.
- 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 of mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51(1~2): 537~571.
- Mao Xiaohong, Zhang Jianxin, Yu Shengyao, *et al.* 2017. Early Paleozoic granulite-facies metamorphism and anatexis in the northern West Qinling orogen: Monazite and zircon U-Pb geochronological constraints[J]. *Science China Earth Sciences*, 47(5): 601~616 (in Chinese with English abstract).
- Mao Xiaohong, Zhang Jianxin, Yu Shengyao, *et al.* 2018. Metamorphism of the Qinling Complex on the Northern Margin of the West Qinling Mountains: Petrology, Phase Equilibrium Simulation of Paragneiss and Its Geological Significance[J]. *Earth Sciences*, 43(1): 278~295 (in Chinese with English abstract).
- Mao X H, Zhang J X, Yu S Y, *et al.* 2017. Early Paleozoic granulite-facies metamorphism and anatexis in the northern West Qinling orogen: Monazite and zircon U-Pb geochronological constraints[J]. *Science China—Earth Sciences*, 60(5): 943~957.
- Mattauer M, Matte P, Malavieille J, *et al.* 1985. Tectonics of the Qinling Belt: Buildup and evolution of eastern Asia[J]. *Nature*, 317: 496~500.
- Meng Q R and Zhang G W. 1999. Timing of collision of the North and South China blocks: Controversy and reconciliation[J]. *Geology*, 27(2): 123~126.
- Okay A I. 1993. Petrology of a diamond and coesite-bearing metamorphic terrain: Dabie Shan, China[J]. *European Journal of Mineralogy*, 5(4): 659~675.
- Qin J, Lai S, Grapes R, *et al.* 2009. Geochemical evidence for origin of magma mixing for the Triassic monzonitic granite and its enclaves at Mishuling in the Qinling orogen (central China) [J]. *Lithos*, 112: 259~276.
- 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[J]. *Geological Society of America Special Paper*, 403: 45~75.
- Ratschbacher L, Hacker B R, Calvert A, *et al.* 2003. Tectonics of the Qinling (Central China): Tectonostratigraphy, geochronology, and deformation history[J]. *Tectonophysics*, 366(1-2): 1~53.
- Shi Y, Huang Q, Liu X, *et al.* 2018. Provenance and tectonic setting of the supra-crustal succession of the Qinling Complex: Implications for the tectonic affinity of the North Qinling Belt, Central China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 158: 112~139.
- Shi Yu, Yu Jinhai, Xu Xisheng, *et al.* 2009. Chronological and geochemical studies of the Qinling rock group in the eastern section of the Qinling orogenic belt [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2 651~2 670 (in Chinese with English abstract).
- Spear F S. 1995. Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths[J]. *Washington: Mineralogical Society of America*, 573~639.
- Sun S, Dong Y, He D, *et al.* 2019. Thickening and partial melting of the Northern Qinling Orogen, China: Insights from zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic composition of migmatites[J]. *Journal of the Geological Society*, 176(6): 1 218~1 231.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and process [C]// Saunders & Nony M J. *Magmatism in the ocean basin*. *Geological Society London Special Publication*, 42(1): 313~345.
- Sun W, Li S, 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[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 21(1): 69~76.
- Sun Y, Lu X X, Han S, *et al.* 1996. Composition and formation of Paleozoic Erlangping ophiolitic slab, North Qinling: Evidence from geology and geochemistry[J]. *Science China Earth Science*, 39: 50~59.
- Tang L, Santosh M, Dong Y P. 2015. Tectonic evolution of a complex orogenic system: Evidence from the northern Qinling belt, Central China[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 113: 544~559.
- Tang Yuan, Chen Danling, Ren Yunfei, *et al.* 2022. Discovery of Early Paleozoic eclogite-facies metamorphic rocks in the western part of

- North Qinling Orogen and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(3): 585~597 (in Chinese with English abstract).
- Tian Z B, Gou L L, Liu X F, *et al.* 2024. Metamorphic p - T conditions, in-situ LA-ICP-MS biotite-muscovite Rb-Sr geochronology and tectonic implications of two-mica-quartz schist from the Kuanping Group in the North Qinling Orogenic Belt[J]. *Geological Journal*, 59(1): 46~64.
- Wang H, Wu Y B, Gao S, *et al.* 2011a. Eclogite origin and timing in the North Qinling terrane, and their bearing on the amalgamation of the South and North China Blocks[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 29: 1 019~1 031.
- Wang H, Wu Y B, Gao S, *et al.* 2011b. Silurian granulite-facies metamorphism, and coeval magmatism and crustal growth in the Tongbai orogen, central China[J]. *Lithos*, 125: 249~271.
- Wang H, Wu Y B, Gao S, *et al.* 2013. Continental origin of eclogites in the North Qinling terrane and its tectonic implications[J]. *Precambrian Research*, 230: 13~30.
- Wang H, Wu Y B, Gao S, *et al.* 2016. Continental growth through accreted oceanic arc: Zircon Hf-O isotope evidence for granitoids from the Qinling orogen[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 182: 109~130.
- Wang Xueren, Hua Hong and Sun Yong. 1995. A study on microfossils of the Erlangping Group in the Xixiawantan Area, Henan Province[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 25(4): 353~358 (in Chinese with English abstract).
- White R W, Powell R, Holland T J B, *et al.* 2014. New mineral activity-composition relations for thermodynamic calculations in metapelitic systems[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 32(3): 261~286.
- Whitney D L and Evans B W. 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals[J]. *American Mineralogist*, 95(1): 185~187.
- Wu Y B, Wang H, Gao S, *et al.* 2014. LA-ICP-MS monazite U-Pb age and trace element constraints on the granulite-facies metamorphism in the Tongbai orogen, central China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 82(3): 90~102.
- Wu Y B and Zheng Y F. 2013. Tectonic evolution of a composite collision orogen: An over-view on the Qinling-Tongbai-Hong'an-Dabie-Sulu orogenic belt in central China[J]. *Gondwana Research*, 23(4): 1 402~1 428.
- Xiang H and Connolly J A D. 2021. GeoPS: An interactive visual computing tool for thermodynamic modelling of phase equilibria[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 40(2): 243~255.
- Xiang H, Zhang L, Zhong Z Q, *et al.* 2012. Ultrahigh-temperature metamorphism and anticlockwise p - T path of Paleozoic granulites from north Qinling-Tongbai orogen, Central China[J]. *Gondwana Research*, 21: 559~597.
- Xiang H, Zhong Z Q, Li Y, *et al.* 2014. Sapphirine-bearing granulites from the Tongbai orogen, China: Petrology, phase equilibria, zircon U-Pb geochronology and implications for Paleozoic ultrahigh temperature metamorphism[J]. *Lithos*, 208~209: 446~461.
- Xue F, Kröner A, Reischmann T, *et al.* 1996b. Palaeozoic pre-and post-collision calc-alkaline magmatism in the Qinling orogenic belt, central China, as documented by zircon ages on granitoid rocks[J]. *Journal of the Geological Society*, 153(3): 409~417.
- Xue F, Lerch M F, Kröner A, *et al.* 1996a. Tectonic evolution of the East Qinling Mountains, China, in the Palaeozoic: A review and new tectonic model[J]. *Tectonophysics*, 253(3-4): 271~284.
- Yang Li, Chen Fukun, Yang Yizeng, *et al.* 2010. Zircon U-Pb ages of the Qinling Group in Danfeng area: Recording Mesoproterozoic and Neoproterozoic magmatism and Early Paleozoic metamorphism in the North Qinling terrain[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1 589~1 603 (in Chinese with English abstract).
- Yang Min, Liu Liang, Wang Yawei, *et al.* 2016. Geochronology of detrital zircons from metaclastic of Erlangping complex in the North Qinling belt and its tectonic implication[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(5): 1 452~1 466 (in Chinese with English abstract).
- Zhai X M, Day H W, Hacker B R, *et al.* 1998. Paleozoic metamorphism in the Qinling orogen, Tongbai Mountains, central China[J]. *Geology*, 26: 371~374.
- Zhang C L, Liu L, Wang T, *et al.* 2013. Granitic magmatism related to early Paleozoic continental collision in North Qinling[J]. *Chinese Science Bulletin*, 58: 4 405~4 410.
- Zhang Guowei, Meng Qingren and Lai Shaocong. 1995a. The structural structure of the Qinling Orogenic Belt[J]. *Chinese Science: Part B*, 25(9): 994~1 003 (in Chinese with English abstract).
- Zhang G W, Meng Q R, Yu Z, *et al.* 1996. Orogenesis and dynamics of the Qinling orogenic[J]. *Science in China*, 3: 225~234.
- Zhang Guowei, Zhang Zongqing and Dong Yunpeng. 1995b. Nature of main tectono-lithostratigraphic units of the Qinling Orogen: Implications for the tectonic evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 11(2): 101~114 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H F, Gao S, Zhang L, *et al.* 1998. Granulite genesis and tectonic evolution in Tongbai area: Single zircon evaporation ages and Nd isotopic geochemistry[J]. *Journal of China University of Geosciences*, 9: 217~222.
- Zhang H F, Lu H, Zhou D W, *et al.* 2015a. The meta-gabbroic complex of Fushui in north Qinling orogen: A case of syn-subduction mafic magmatism[J]. *Gondwana Research*, 35: 4 405~4 410.
- Zhang Jianxin, Yu Shengyao, Meng Fancong, *et al.* 2009. Paired high-pressure granulite and eclogite in collision orogens and their geodynamic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9): 2 050~2 066 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianxin, Yu Shengyao and Meng Fancong. 2011. Poyphase Early Paleozoic metamorphism in the northern Qinling orogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 1 179~1 190 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q Q, Gao X Y, Chen R X, *et al.* 2020. Granulites record the tec-

- tonic evolution from collisional thickening to extensional thinning of the Tongbai orogen in central China[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 38(3): 265~295.
- Zhang Zongqing, Liu Dunyi and Fu Guomin. 1994. *Isotopic Dating of Metamorphic Strata in the North Qinling Mountains* [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Zhang Z M, Xiang H, Dong X, *et al.* 2017. Oligocene HP metamorphism and anatexis of the Higher Himalayan Crystalline Sequence in Yadong region, east-central Himalaya[J]. *Gondwana Research*, 41: 173~187.
- Zhang Z M, Xiang H, Dong X, *et al.* 2015b. Long-lived high-temperature granulite-facies metamorphism in the Eastern Himalayan orogen, south Tibet[J]. *Lithos*, 212-215: 1~15.
- Zhao Jiao, Chen Danling, Tan Qinghai, *et al.* 2021. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of basic volcanics from Erlangping Group of the North Qinling, eastern Qinling Mountains and its geological implications [J]. *Earth Science Frontiers*, 19(4): 118~125 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Y H, Gou L L, Long X P, *et al.* 2020. Zircon U-Pb geochronology and clockwise p - T evolution of garnet-bearing migmatites from the Qinling complex in the Weiziping area of the Qinling Orogen, Central China: Implications for thermal relaxation after crustal thickening [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 195: 104354.
- 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[J]. *Earth-Science Reviews*, 62: 105~161.
- Zhu X Y, Chen F K, Li S Q, *et al.* 2011. Crustal evolution of the North Qinling terrain of the Qinling Orogen, China: Evidence from detrital zircon U-Pb ages and Hf isotopic composition [J]. *Gondwana Research*, 20: 194~204.
- 郭 祺, 毛小红, 张建新, 等. 2022. 西秦岭北缘秦岭杂岩麻粒岩相变质作用: 来自相平衡模拟和独居石原位 U-Pb 定年的制约[J]. *岩石学报*, 38(11): 3 259~3 283.
- 梁 爽, 张 谦, 刘嘉惠, 等. 2021. 西峡-内乡地区秦岭岩群变质独居石和锆石的 U-Pb 定年[J]. *岩石学报*, 37(12): 3 797~3 822.
- 刘 良, 陈丹玲, 王 超, 等. 2009. 阿尔金、柴北缘与北秦岭高压-超高压岩石年代学研究进展及其构造地质意义[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 39(3): 472~479.
- 刘 良, 廖小莹, 张成立, 等. 2013. 北秦岭高压-超高压岩石的多期变质时代及其地质意义[J]. *岩石学报*, 29(5): 1 634~1 656.
- 毛小红, 张建新, 于胜尧, 等. 2017. 西秦岭造山带北部早古生代麻粒岩相变质作用及深熔作用——锆石和独居石 U-Pb 年代学的制约[J]. *中国科学: 地球科学*, 47(5): 601~616.
- 毛小红, 张建新, 于胜尧, 等. 2018. 西秦岭北缘秦岭杂岩变质作用——副片麻岩岩石学、相平衡模拟及其地质意义[J]. *地球科学*, 43(1): 278~295.
- 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[J]. *岩石学报*, 25(10): 2 651~2 670.
- 唐 源, 陈丹玲, 任云飞, 等. 2022. 北秦岭造山带西段早古生代榴辉岩相变质岩石的发现及其地质意义[J]. *岩石学报*, 38(3): 585~598.
- 王学仁, 华 洪, 孙 勇. 1995. 河南西峡湾潭地区二郎坪群微体化石研究[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 25(4): 353~358.
- 杨 力, 陈福坤, 杨一增, 等. 2010. 丹凤地区秦岭岩群片麻岩锆石 U-Pb 年龄: 北秦岭地体中新元古代岩浆作用和早古生代变质作用的记录[J]. *岩石学报*, 26(5): 1 589~1 603.
- 杨 敏, 刘 良, 王亚伟, 等. 2016. 北秦岭二郎坪杂岩变沉积岩碎屑锆石年代学及其构造地质意义[J]. *岩石学报*, 32(5): 1 452~1 466.
- 张国伟, 孟庆任, 赖绍聪. 1995a. 秦岭造山带的结构构造[J]. *中国科学: B 辑*, 25(9): 994~1003.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 2001. *秦岭造山带与大陆动力学* [M]. 北京: 科学出版社.
- 张国伟, 张宗清, 董云鹏. 1995b. 秦岭造山带主要构造岩石地层单元的构造性质及其大地构造意义[J]. *岩石学报*, 11(2): 101~114.
- 张建新, 于胜尧, 孟繁聪, 等. 2009. 造山带中成对出现的高压麻粒岩与榴辉岩及其地球动力学意义[J]. *岩石学报*, 25(9): 2 050~2 066.
- 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[J]. *岩石学报*, 27(4): 1 179~1 190.
- 张宗清, 刘敦一, 付国民. 1994. *北秦岭变质地层同位素年代研究* [M]. 北京: 地质出版社.
- 赵 姣, 陈丹玲, 谭清海, 等. 2012. 北秦岭东段二郎坪群火山岩锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义[J]. *地学前缘*, 19(4): 118~125.
- 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[J]. *科学通报*, 49(18): 1 901~1 908.
- 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[J]. *地学前缘*, 18(2): 158~169.
- 陈丹玲, 任云飞, 宫相宽, 等. 2015. 北秦岭松树沟榴辉岩的确定及其地质意义[J]. *岩石学报*, 31(7): 1 841~1 854.
- 第五春荣, 孙 勇, 刘 良, 等. 2010. 北秦岭宽坪岩群的解体及新元古代 N-MORB[J]. *岩石学报*, 26(7): 2 025~2 038.
- 高 胜, 陈丹玲, 宫相宽, 等. 2015. 天水东岔地区宽坪岩群碎屑岩和花岗岩中的锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. *地学前缘*, 22(4): 255~264.

附中文参考文献