



引文格式: 田智博, 苟龙龙, 徐晓飞, 等. 秦岭造山带涝峪地区宽坪岩群变质作用温压条件及原位 Rb-Sr 年代学研究[J]. 西北地质, 2025, 58(1): 1-26. DOI: 10.12401/j.nwg.2023046

Citation: TIAN Zhibo, GOU Longlong, XU Xiaofei, et al. Metamorphic P-T Conditions and In-situ Rb-Sr Geochronology of the Kuanping Group in the Laoyu Area of the Qinling Orogenic Belt[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(1): 1-26. DOI: 10.12401/j.nwg.2023046

秦岭造山带涝峪地区宽坪岩群变质作用温压条件 及原位 Rb-Sr 年代学研究

田智博, 苟龙龙*, 徐晓飞, 刘学锋, 毛振宇

(西北大学, 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069)

摘要: 秦岭造山带涝峪地区发育宽坪岩群的典型剖面, 是研究宽坪岩群变质变形、构造热历史的重要区域。然而, 由于缺乏对该地区宽坪岩群变质温压条件和年代学的约束, 导致区域变质与多期变形事件的关系及地质意义认识仍不清楚。笔者以该地区宽坪岩群 SN 向剖面中的二云母石英片岩、含石榴子石二云母石英片岩、绿片岩和大理岩为研究对象, 开展了详细的岩相学研究。在此基础上, 重点对二云母石英片岩和含石榴子石二云母石英片岩进行了黑云母 Ti 温度计、多硅白云母地质压力计、变质相平衡模拟和原位 LA-ICP-MS 黑云母和白云母 Rb-Sr 年代学研究, 进而探讨了涝峪地区宽坪岩群经历多期构造热事件的意义。野外和岩相学观察发现二云母石英片岩和绿片岩发生了强烈的变形, 金云母大理岩经历了强烈的糜棱岩化作用。黑云母 Ti 温度计和多硅白云母压力计限定得到二云母石英片岩样品 KP-3 和 KP-4 的变质温压条件为 300~500 °C、2.0~8.0 kbar, 对应的平均值为 440 °C、4.0 kbar。黑云母 Ti 温度计限定得到含石榴子石二云母石英片岩样品 KP2202 的变质温度为 652~683 °C。变质相平衡模拟 P-T 视剖面图计算得到二云母石英片岩样品 KP-3 和 KP-4 的变质温压条件为 400~480 °C 和 2.0~10 kbar; 而含石榴子石二云母石英片岩样品 KP2202 的变质温压条件为 645~680 °C、8.0~9.0 kbar。综合地质温压计和相平衡模拟的结果, 可以确定二云母石英片岩为绿片岩相变质作用的产物, 而含石榴子石二云母石英片岩经历了低角闪岩相变质作用。原位 LA-ICP-MS 黑云母和白云母 Rb-Sr 分析显示二云母石英片岩记录两期等时线年龄, 分别为 ~290 Ma 和 ~155 Ma, 而含石榴子石二云母石英片岩记录的等时线年龄为 ~110 Ma。因此涝峪地区宽坪岩群中的二云母石英片岩记录了 3 期等时线年龄, 分别为 ~290 Ma、~155 Ma 和 ~110 Ma。结合前人的研究结果, 3 期等时线年龄均代表了后期构造热事件的时代, 其中 ~290 Ma 的等时线年龄与古特提斯洋向北俯冲作用相对应, 而 ~155 Ma 和 ~110 Ma 的等时线年龄可能与中生代时期北秦岭构造带发生强烈的变形和花岗岩岩浆活动导致的热重置有关。

关键词: 变质岩石学; 宽坪岩群; 相平衡模拟; 原位 Rb-Sr 年代学; 秦岭造山带; 涝峪

中图分类号: P588.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)01-0001-26

收稿日期: 2023-02-15; 修回日期: 2023-03-14; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“秦岭造山带喂子坪-宝鸡太白地区秦岭杂岩麻粒岩相变质作用及构造意义”

(42172059) 和大陆动力学国家重点实验室项目(SKLCD-04)联合资助。

作者简介: 田智博(1996-), 男, 矿物学、岩石学、矿床学专业硕士研究生。E-mail: 346428809@qq.com。

* 通讯作者: 苟龙龙(1984-), 男, 教授, 主要从事变质地质学工作。E-mail: LLgou@nwu.edu.cn。

Metamorphic P-T Conditions and In-situ Rb-Sr Geochronology of the Kuanping Group in the Laoyu Area of the Qinling Orogenic Belt

TIAN Zhibo, GOU Longlong*, XU Xiaofei, LIU Xuefeng, MAO Zhenyu

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

Abstract: The laoyu area of the Qinling orogenic belt has a typical section of the Kuanping group, which is important for studying the metamorphism, deformation, and tectonothermal history of the Kuanping group. However, the metamorphic P-T conditions and chronology of the Kuanping group in this region are still lacking, which hinders our understanding of the relationship between its regional metamorphism and later deformation events, as well as their geological significances. In this study, detailed petrographic studies were carried out on two-mica quartz schist, garnet-bearing two-mica quartz schist, greenschist, and marble in the north-south section of the Kuanping group in this area. Based on this, the geological significances of multiple tectonothermal events that the Kuanping group in the Laoyu region underwent were examined with a focus on two-mica quartz schist and garnet-bearing two-mica quartz schist using Ti-in-biotite thermometry, phengite geobarometry, phase equilibrium modelling, and in situ LA-ICP-MS biotite and muscovite Rb-Sr dating. According to field and petrographic observations, two-mica quartz schist and greenschist were both significantly deformed, and phlogopite marble suffered strong mylonitization. The Ti-in-biotite thermometer and phengite geobarometer yielded the metamorphic PT conditions of 300~500 °C and 2.0~8.0 kbar (average values are 440 °C and 4.0 kbar) for the two-mica quartz schist samples KP-3 and KP-4. The Ti-in-biotite thermometry constrained the metamorphic temperature of the garnet-bearing two-mica quartz schist sample KP2202 to be 652~683 °C. According to the PT pseudosection modeling, the metamorphic PT conditions of the two-mica quartz schists and the garnet-bearing two-mica quartz schists are 400~480 °C and 2.0~10 kbar, and 645~680 °C and 8.0~9.0 kbar, respectively. On the basis of the results from the geothermobarometry and phase equilibrium modelling, the two-mica quartz schist is the consequence of greenschist-facies metamorphism, whereas the garnet-bearing two-mica quartz schist formed by low-amphibolite facies metamorphism. In-situ LA-ICP-MS biotite and muscovite Rb-Sr dating shows that the two-mica quartz schist records two isochron ages of ~290 Ma and ~155 Ma, while the garnet-bearing two-mica quartz schist records an isochron age of ~110 Ma. Consequently, the two-mica quartz schists in the Kuanping group of the Laoyu region record three isochron ages, which are ~290 Ma, ~155 Ma, and ~110 Ma. Combined with the results of previous studies, all three isochron ages represent the timings of late tectonothermal events, where the isochron age of ~290 Ma corresponds to the northward subduction of the paleo-Tethys Oceanic crust, while the isochron ages of ~155 Ma and ~110 Ma may be related to the intense deformation and thermal resetting caused by granitic magmatism in the North Qinling tectonic belt during the Mesozoic.

Keywords: metamorphic petrology; Kuanping Group; phase equilibrium modelling; in-situ Rb-Sr geochronology; Qinling orogenic belt; Laoyu

秦岭造山带是中央造山带的重要组成部分,由长期的构造演化过程形成现今复杂的组成与构造特征,受到国内外学者广泛关注(张国伟等, 1995a, 1996b, 2001; Xue et al., 1996; Ratschbacher et al., 2003; Dong et al., 2014, 2016a, 2021; Liu et al., 2016; 陈龙龙等, 2024; 冉亚洲等, 2024)。宽坪岩群位于北秦岭构造带最北部,与秦岭杂岩相比(Ratschbacher et al., 2003; Cheng et al., 2012; Wu et al., 2013; 刘良等, 2013; Liu et al., 2016),宽坪岩群的变质程度相对较低(张国伟等, 2001; 第五春

荣等, 2010; 胡娟, 2010; Liu et al., 2011; Dong et al., 2014; 王海杰等, 2021),而变形强烈(张维吉等, 1987, 1988),除部分区域样品经历了角闪岩相变质作用外(胡娟, 2010; Liu et al., 2011; Dong et al., 2014; 王海杰等, 2021),主体经历了绿片岩相的变质作用(张国伟等, 2001; 第五春荣等, 2010)。前人对桐柏地区宽坪岩群的角闪岩进行了普通角闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar和SHRIMP锆石U-Pb年代学研究,得到其变质时代为~440 Ma(Zhai et al., 1998; Liu et al., 2011),认为宽坪岩群区域

变质作用与秦岭造山带早古生代的构造演化有关。张维吉等(1988)对莽岭马河地区的宽坪岩群进行了研究,确定其经历了至少三期叠加变形,第一期为区域性挤压的紧闭平卧褶皱,第二期为弯窿状或长垣状褶皱,第三期为南北向开阔宽缓褶皱。因此,多期面理置换与不同期次、不同样式的褶皱相互叠加是宽坪岩群的主要构造特征,并指出该研究区 SN 向构造的形成,有可能与受东西两端晚侏罗世到早白垩世蟒岭岩体(秦海鹏等, 2012; 杨阳等, 2014)和晚侏罗世牧护关岩体(丁丽雪等, 2010)侵位时产生的相向挤压作用有关。因此,宽坪岩群对研究秦岭造山带早古生代及中生代构造演化历史都具有重要的意义。

部分学者通过对宽坪岩群的云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 和斜长石、角闪石等单矿物 Rb-Sr 年代学研究,得到的年龄为 $\sim 414\sim 350$ Ma (张宗清等, 1994; 闫全人等, 2008; Dong et al., 2018)。此外,张宗清等(1994)对商洛板桥地区斜长角闪岩样品进行角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年,得到的坪年龄为 (324 ± 3) Ma, 而对洛南马河地区斜长角闪岩进行角闪石-斜长石矿物 Rb-Sr 定年,得到的等时线年龄为 265 Ma。闫全人等(2008)对商洛地区宽坪岩群中的石榴子石黑云母石英片岩进行了黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究,得到的坪年龄为 (319.1 ± 3.6) Ma。与构造变形分析结果相似,这些年龄结果指示宽坪岩群在经历区域变质作用之后经历了多期构造热事件,然而这些年龄结果都是对分选矿物进行分析的结果,很可能是多期同位素平衡体系混合的结果。原位 LA-ICP-MS 黑云母和白云母 Rb-Sr 定年方法是近年

来发展成熟的构造热年代学分析方法(Gorojovsky et al., 2020; Wang et al., 2022),可以有效区分不同产状与期次的黑云母和白云母,因此,该方法的应用对更好认识宽坪岩群多期构造热演化历史具有重要的意义。

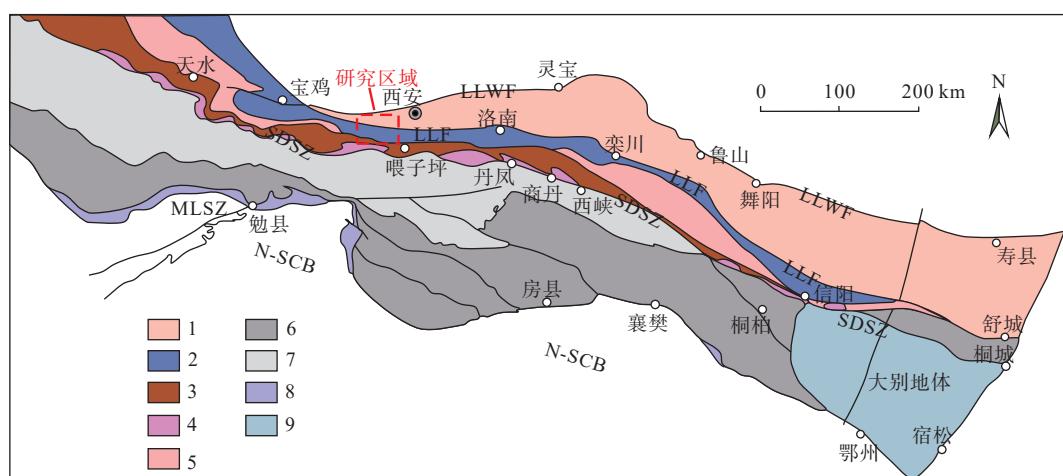
涝峪地区发育宽坪岩群的典型剖面,主要岩石类型包括绿片岩、二云母石英片岩和糜棱岩化大理岩,其内所出露的岩石都存在较强的变形,并显示多期变形叠加的特点。因此,对该地区宽坪岩群开展变质作用与构造热年代学相结合的研究对于揭示秦岭造山带构造演化过程具有重要的意义。本研究选择二云母石英片岩、含石榴子石二云母石英片岩、绿片岩和糜棱岩化含金云母大理岩为研究对象,在详细的岩相学和矿物化学研究基础上,利用黑云母 Ti 温度计、多硅白云母压力计、变质相平衡模拟温压条件计算以及原位 LA-ICP-MS 黑云母和白云母 Rb-Sr 年代学分析,并探讨了它们经历多期构造热事件的构造意义。

1 区域背景

秦岭造山带由灵宝-鲁山断裂、洛南-栾川断裂、商丹断裂带及勉略断裂带,由北向南划分为华北板块南缘构造带、北秦岭构造带、南秦岭构造带和扬子陆块北缘 4 个岩石构造单元(张国伟等, 1995a, 1996b, 2001; Dong et al., 2011a; 王汉辉等, 2023; 李康宁等, 2024)(图 1)。

1.1 华北板块南缘构造带

华北板块南缘主要是由 2.8~2.5 Ga 的太华群与



LLWF.灵宝-鲁山-舞阳断裂; LLF.洛南-栾川断裂; N-SCB.华南板块北缘; 1.华北板块南缘; 2.宽坪岩群; 3.秦岭杂岩;

4.商丹缝合带; 5.二郎坪群; 6.南秦岭南部带; 7.南秦岭北部带; 8.MLSZ.勉略缝合带; 9.大别地体

图1 秦岭造山带地质简图(据 Dong et al., 2011a 修改)

Fig. 1 Simplified tectonic division of the Qinling orogenic belt

登封群结晶基底(Diwu et al., 2010; Wu et al., 2013)、中元古代未经变质到低级变质的熊耳群火山岩(He et al., 2009; Zhao et al., 2009; Wang et al., 2010)和上覆不整合中元古代—中生代沉积盖层组成(Gao et al., 1996; Dong et al., 2011a)。结晶基底主要由一套经历角闪岩相变质的TTG片麻岩组成；熊耳群火山岩主体形成于1.80~1.75 Ga，其主要由双峰式火山岩夹部分陆源碎屑物组成(Zhao et al., 2004)。陶湾群位于华北板块南缘的最南边，主要由变质砂岩、千枚岩、片岩、板岩与大理岩组成，在多个层位发现了微体古生物化石，通过微体化石将陶湾群形成时代确定为奥陶纪(张维吉等, 1989; Wang et al., 2008)。

1.2 北秦岭构造带

北秦岭构造带主要由前寒武纪基底单元、新元古代和早古生代蛇绿岩、火山沉积岩组合组成，并被局部发育的石炭系和二叠系碎屑沉积不整合覆盖(张国伟等, 2001)。由北向南，北秦岭构造带的主要岩石单元依次为宽坪岩群、二郎坪群、秦岭杂岩群和丹凤群，它们之间被逆冲断层或韧性剪切带分隔(Dong et al., 2011a; Zhao et al., 2015)。

宽坪岩群在北秦岭构造带中呈带状展布，在陕西宝鸡、眉县、户县等地区均有断续出露(张维吉等, 1987)，经历了绿片岩相到低角闪岩相的变质作用，并且经历较强的变形作用(Zhai et al., 1998; Ratschbacher et al., 2003; Liu et al., 2011)。其早期被划分为3个组(肖思云等, 1988)。下部的广东坪组，主要为绿片岩和斜长角闪岩，原岩主要为基性火山岩；中部是四岔口组，主要由云母石英片岩和长英质片麻岩组成，原岩属于一套碎屑岩；上部是谢湾组，主要为黑云母大理岩和斜长角闪岩，原岩为泥沙质碳酸盐岩夹基性火山岩。其总体由变沉积单元与蛇绿岩单元两部分组成(Dong et al., 2016a)，其中变沉积单元主要由二云母片岩、石英岩、大理岩组成，而蛇绿岩单元则主要由绿片岩和角闪岩组成，全岩地球化学研究表明绿片岩和角闪岩具有N-MORB与E-MORB的地球化学特征(张宗清等, 1995; 第五春荣等, 2010; Dong et al., 2014)。最初全岩Sm-Nd同位素等时线年代学研究揭示基性火山岩的年龄为~0.94~1.20 Ga(张宗清等, 1994)，认为宽坪岩群的形成时间应为中-新元古代(张宗清等, 1995)。随后，李靠社(2002)利用单颗粒锆石U-Pb同位素稀释法对商洛市地区宽坪岩群中的绿片岩进行年代学研究，所分析的5颗锆石数据大致沿一

条不一致线分布，其上交点年龄为 (1827 ± 11) Ma，而下交点年龄为 (418 ± 8) Ma，认为分别代表了基性岩原岩的形成年龄和变质年龄。Zhai等(1998)对桐柏地区宽坪岩群角闪岩中的角闪石进行了 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年，得到 (434 ± 2) Ma的变质年龄，而Liu等(2011)对该地区宽坪岩群石榴角闪岩进行了SHRIMP锆石U-Pb定年，确定其变质作用的时代为~440 Ma。第五春荣等(2010)对涝峪地区宽坪岩群中的变基性岩开展了详细的LA-ICP-MS锆石U-Pb年代学研究，得到其原岩形成年龄为 (943 ± 6) Ma。此外，Dong等(2014)对宽坪岩群变基性岩进行LA-ICP-MS锆石U-Pb年代学研究，认为宽坪岩群变基性岩原岩的最大形成时间为 (1445 ± 60) Ma。锆石U-Pb年代学研究显示，宽坪岩群中变沉积岩的最年轻碎屑锆石年龄为约为460 Ma(第五春荣等, 2010; Zhu et al., 2011; Liu et al., 2013; Shi et al., 2013; Cao et al., 2016; 王海杰等, 2021)，指示其原岩的形成时代应晚于中奥陶世。此外，在户县马召等宽坪岩群中变质变形相对较弱的变沉积岩中发现了早-中奥陶纪微体化石(王宗起等, 2009)。因此，第五春荣等(2010)认为宽坪岩群中变沉积岩与变基性火山岩不属于一个延续的沉积层序，是晚期构造运动将这些形成于不同时代、不同构造环境的岩石单元混杂叠置在一起。

二郎坪群以透镜体形式东向西分布于宽坪岩群与秦岭杂岩之间，是一套变质火山-沉积岩组合，主要由蛇绿岩单元、沉积碎屑岩以及碳酸盐岩组成(Dong et al., 2011a; 张国伟等, 2001)。Liu等(2011)对桐柏地区二郎坪群中的角闪岩进行了SHRIMP锆石U-Pb定年，认为在约440 Ma经历了角闪岩相变质作用，而在394 Ma时经历了绿片岩相变质作用的叠加。

秦岭杂岩主要由片麻岩、角闪岩和大理岩组成，部分地区出露麻粒岩和高压-超高压榴辉岩(Ratschbacher et al., 2003; 刘良等, 2013)。早期认为秦岭杂岩为一套经历了多次构造运动和变质作用的岩石地层单元，形成于早元古代(张宗清等, 1994)。陈能松等(1991)对秦岭杂岩中多个变质地层中的变质岩样品进行了Rb-Sr等时线年代学研究，认为该岩群在 (990 ± 0.4) Ma时发生角闪岩相变质，而在 (425 ± 48) Ma受到接触热变质的改造。锆石U-Pb年代学研究显示秦岭杂岩记录了两期麻粒岩相变质事件，分别发生在506~485 Ma(Chen et al., 2004; 张建新等, 2011)和455~395 Ma(Liu et al., 2011, 2014; Zhao et al., 2020)。

前者对应高压麻粒岩相变质作用的时代(Chen et al., 2004; 张建新等, 2011; Zhang et al., 2020), 而后者为中压变质作用的时代。高压-超高压榴辉岩峰期时代为 $\sim 500\text{--}484\text{ Ma}$, 其两期退变质作用的时代为 $\sim 450\text{ Ma}$ 和 $\sim 420\text{ Ma}$ (刘良等, 2009, 2013; 张建新等, 2011; Wang et al., 2011; Cheng et al., 2012)。

丹凤群在北秦岭构造带南部间断出露, 主要由辉长岩、玄武岩、安山岩、少量超镁铁质岩石和少量沉积岩组成(张成立等, 1994; 张国伟等, 2001)。Dong 等(2011b)对岩湾地区的辉长岩进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb年代学研究, 得到的年龄为 $(517.8 \pm 2.8)\text{ Ma}$ 。结合前人的研究结果, Dong 等(2011b)认为该岩群形成时代应为 $\sim 530\text{--}470\text{ Ma}$ 。不同学者对该套岩石地球化学特征进行研究, 发现该套岩石不同地点的样品具有N-MORB和E-MORB以及弧火山岩的地球化学特征(张宗清等, 1994; Ratschbacher et al., 2003; Dong et al., 2011b)。因此, Dong 等(2011a, 2011b)认为该套岩石是商丹洋壳的残余, 属于岛弧序列的一部分。

1.3 南秦岭构造带

南秦岭构造带位于商丹缝合带与勉略缝合带之间, 由基底与沉积盖层组成。基底由前寒武纪岩群组成, 经历了绿片岩-角闪岩相的变质作用, 如陡岭岩群、

武当群、碧口群、耀岭河群等(Dong et al., 2017)。其中陡岭岩群为新太古代结晶基底, 主要由花岗片麻岩、角闪岩、大理岩组成, 其中花岗片麻岩的原岩形成时代为 $\sim 2.51\text{--}2.47\text{ Ga}$, Hf同位素模式年龄为 $\sim 3.30\text{--}2.95\text{ Ga}$ (Hu et al., 2013), 这些结晶基底被 $\sim 759\text{--}705\text{ Ma}$ 花岗岩体侵入(Wang et al., 2013; Hu, 2013)。沉积盖层不整合于基底岩群之上, 主要由震旦系碳酸盐岩、寒武—奥陶系灰岩、志留系页岩、泥盆系—石炭系碎屑岩组成, 并有少量的二叠纪和早三叠纪砂岩出现在南秦岭构造带的北部(张国伟等, 2001)。

1.4 扬子陆块北缘

扬子陆块北缘, 即图1显示的华南板块北缘, 出露有高级变质的太古代到古元古代的结晶基底和浅变质的中—新元古代盖层(Dong et al., 2017)。扬子陆块最古老岩石是黄陵地区的崆岭岩群, 主要由高级变质的TTG片麻岩、角闪岩、混合岩以及变沉积岩组成(Ma et al., 1997; Gao et al., 1990, 1999, 2011), 其中TTG片麻岩原岩形成的时代为 $\sim 3.8\text{--}3.4\text{ Ga}$ 和 $\sim 2.9\text{ Ga}$ (Zhang et al., 2006a, 2006b; Guo et al., 2014)。

本次研究的宽坪岩群位于北秦岭构造带的涝峪地区, 主要由二云母石英片岩、含石榴子石二云母石英片岩、绿片岩、大理岩和糜棱岩化含金云母大理岩组成, 采样位置见图2。

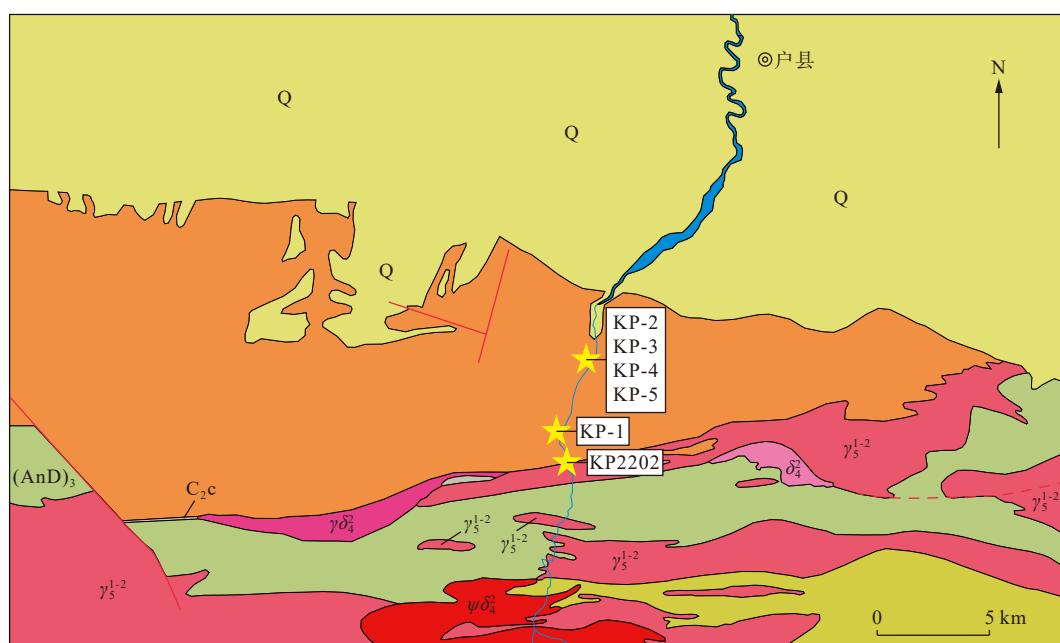


图2 涝峪地区地质图及采样位置(据陕西省地质局区测队, 1966; 陕西地质局13队, 1972修改)

Fig. 2 Simplified geological map of Laoyu area, showing the sample location

2 分析方法

矿物主量元素分析在中国地质调查局西安地质调查中心和西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,电子探针型号为日本 JEOL 公司的 JXA-8230, 实验条件为: 加速电压 15 kV, 电流为 10 nA, 分析束斑分别采用 5 和 2 μm 。采用 SPI 公司提供的不同矿物标样进行校正。

TIMA(TESCAN Integrated Mineral Analyser, 即 TESCAN 矿物分析仪)矿物分析扫描在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成, 实验条件为: 加速电压为 25 kV, 电流为 10 nA, 工作距离为 15 毫米。电流和 BSE 信号强度使用铂法拉第杯自动程序校准, EDS 信号使用 Mn 标样校准。

全岩主量元素分析是在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行的, 通过荧光光谱仪(XRF)分析事先制作的玻璃片完成。

原位 LA-ICP-MS 黑云母和白云母 Rb-Sr 年代学分析分两次在广州拓岩检测技术有限公司完成。仪器由 NWR 193 nm ArF 准分子激光烧蚀(LA)系统与电感耦合等离子体质谱(ICP-MS, iCAP TQ 00108)两部分组成。通过在线扫描模式下剥蚀 NIST SRM610(束斑大小为 30 μm ; 脉冲重复频率为 10 Hz; 能量密度 $\sim 3.5 \text{ J/cm}^2$), 来调整透镜和单位参数以达到最大灵敏度。在样品分析过程中, 激光设置束斑大小为 110 μm , 能量密度为 $\sim 7 \text{ J/cm}^2$, 频率为 5 Hz, 仪器分析条件参照 Gorojovsky 等(2020)。第一次实验中采用 Mica-Mg 与 BHVO-2G 作为外标, 而使用标样 NIST SRM610 作为内标, 分析得到标样 NIST SRM610 的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值分别为 $2.16 \pm 0.0528(n = 10, 2\sigma)$ 与 $0.7120 \pm 0.0098(n = 10, 2\sigma)$, 与其参考值相比 ($^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} = 2.33$, Gorojovsky et al., 2020; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.709699 \pm 0.000018$, Woodhead et al., 2001), 测得的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值与参考值在误差范围内一致, 而测得的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 值稍小, 可能与外标 Mica-Mg 具有较高的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 值有关 (154~155, Gorojovsky et al., 2020)。第二次实验中, 采用 Mica-Mg 作为 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 值的校正外标, BHVO-2G 作为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的校正外标。标样 Mica-Mg 测得的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 $155.3557 \pm 6.8128(n = 28, 2\sigma)$, 与其参考值 (154~155, Gorojovsky et al., 2020); 相比在误差范围内一致。标样 BHVO-2G 测得的

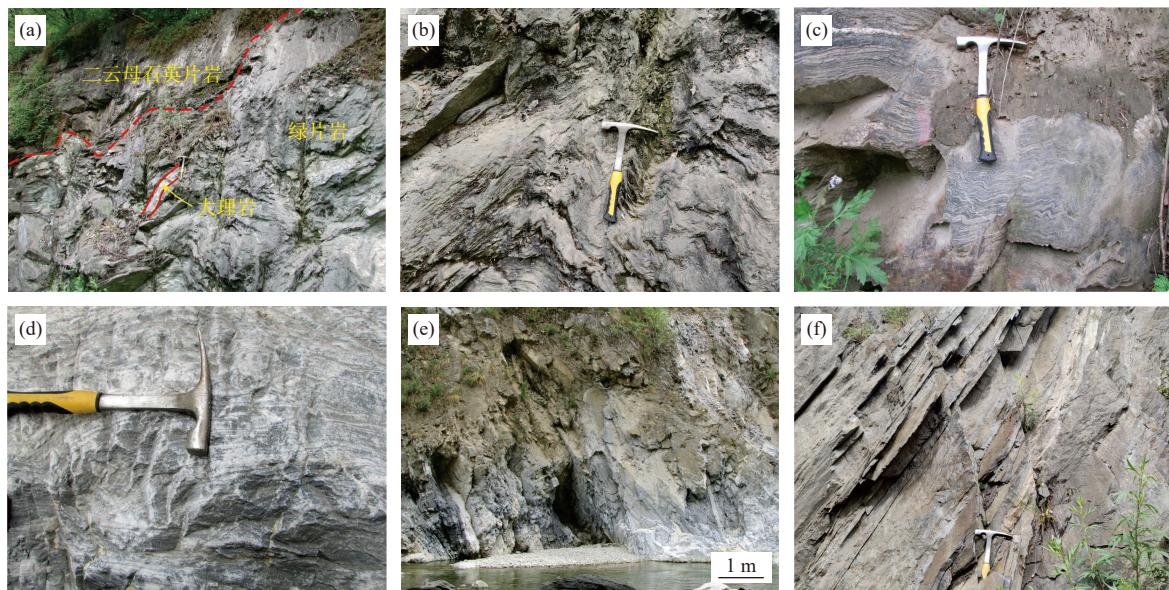
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 $0.7034 \pm 0.0036(n = 28, 2\sigma)$, 与其参考值 ($0.7033 \sim 0.7038$, Gorojovsky et al., 2020) 相比在误差范围内一致。使用标样 NIST SRM610 作为监控标样, 测得的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值分别为 $1.9083 \pm 0.1470(n = 4, 2\sigma)$ 与 $0.7094 \pm 0.0063(n = 4, 2\sigma)$, 与其参考值相比 ($^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} = 2.33 \sim 2.34$, Gorojovsky et al., 2020; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.709699 \pm 0.000018$, Woodhead et al., 2001), 测得的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值与参考值在误差范围内一致, 而测得的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 值稍小, 可能与外标 Mica-Mg 具有较高的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 值有关 (154~155, Gorojovsky et al., 2020)。使用已知年龄的样品 WANG 同样作为监控标样, 测得的年龄结果为 $(13.90 \pm 4.05) \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 6$), 与其参考年龄 ($20.5 \pm 1.3 \text{ Ma}$, Wang et al., 2022) 在误差范围内相近。详细的方法可参见 Gorojovsky 等(2020)和 Wang 等(2022)。

3 岩石学与矿物化学

二云母石英片岩和含石榴子石二云母石英片岩的新鲜面为灰白色, 均发育强烈的面理构造(图 3a~图 3d), 局部露头发育面理褶皱和多期面理置换; 而绿片岩显示墨绿色, 呈条带状分布在二云母石英片岩中, 并经历强烈的褶皱变形(图 3b)。糜棱岩化含金云母大理岩, 呈透镜状或条带状分布在云母片岩中, 具流状构造和典型的糜棱结构, 手标本呈灰白色(图 3e、图 3f)。本研究在详细的岩石学观察基础上, 共选择 5 个典型样品进行了研究, 其中样品 KP-3 和 KP-4 为二云母石英片岩, 采自研究区的北部, 而样品 KP2202 为含石榴子石二云母石英片岩, 采自于南部。样品 KP-2 和 KP-5 为绿片岩, 样品 KP-1 为糜棱岩化含金云母大理岩。文中矿物缩写符号引自 Whitney 等(2010): Dol.白云石; Cal.方解石; Qz.石英; Bt.黑云母; Ms.白云母; Ep.绿帘石; Ab.钠长石; Pl.斜长石; Ilm.钛铁矿; Rt.金红石; Phl.金云母。

3.1 二云母石英片岩

样品 KP-3 的主要矿物为石英(58%)、钠长石(14%)、黑云母(13%)、白云母(10%)、绿泥石(2%), 副矿物有钛铁矿、金红石、绿帘石(图 4a~图 4c)。石英以细小粒状出现, 部分颗粒可见波状消光。黑云母与白云母呈定向排列形成明显的片理构造。在薄片尺度可见片理发生褶皱变形(图 4a、图 4b)。样品 KP-4 与样品 KP-3 岩石学特征相似, 其主要矿物组成为石英(72%)、白



a. 强烈褶皱变形的二云母石英片岩与绿片岩; b. 绿片岩; c、d. 二云母石英片岩; e、f. 糜棱岩化含金云母大理岩

图3 野外露头照片

Fig. 3 Photographs of outcrop

云母(13%)、黑云母(7%)、绿泥石(3%)和钾长石(4%),副矿物有钛铁矿、金红石、绿帘石(图4d~图4f)。

样品KP-3中黑云母的成分变化较小(表1),其Ti含量和Mg[#]值分别为0.04~0.07 cpfu和0.44~0.48。白云母具有较高的Si含量(3.19~3.50 cpfu)和Mg[#]值(0.50~0.74)(表1),其较高的Si含量表明样品中的白云母为多硅白云母。样品KP-4中黑云母具有与样品KP-3中黑云母相近的Ti含量(0.04~0.06 cpfu),但Mg[#]值(0.51~0.55)相对较高(表1),白云母具有与样品KP-3中白云母相近的Si含量(3.15~3.36 cpfu)和Mg[#]值(0.56~0.85),同样为多硅白云母(表1)。

3.2 含石榴子石二云母石英片岩

样品KP2202的主要矿物为石英(50%)、斜长石(15%)、白云母(15%)、黑云母(15%)和石榴子石(5%),副矿物有磁铁矿、钛铁矿、锆石和电气石(图4g~图4i)。黑云母有两种产状,分别为基质中与石榴子石相接触的黑云母(简称接触黑云母),另一种为在基质中但是与石榴子石没有接触的黑云母(简称基质黑云母),两种产状的黑云母的成分有少量差别(表2)。石榴子石呈半自形粒状,颗粒半径较小(~0.5~1 mm; 图4g),发育裂隙,石榴子石中包裹体矿物有石英、白云母和锆石,其边缘与斜长石、石英、白云母或黑云母相接触(图4g)。

接触黑云母的Fe²⁺含量(1.51~1.58 cpfu)稍高于基质黑云母的Fe²⁺含量(1.37~1.47 cpfu),而接触黑云

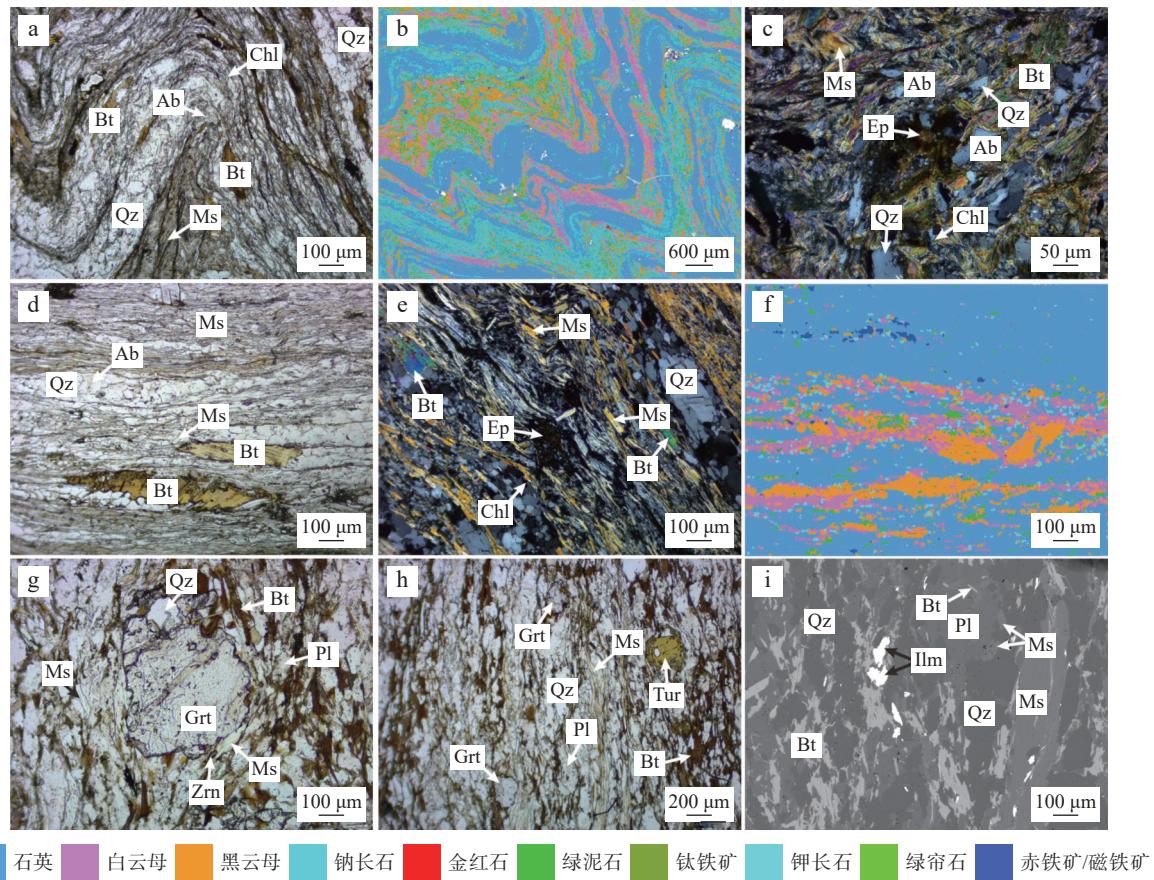
母的Mg含量(0.59~0.73 cpfu)稍低于基质黑云母的Mg含量(0.70~0.77 cpfu)。不同位置黑云母中Fe²⁺与Mg的不同含量以及两者间的的近线性负相关,可能是石榴子石与黑云母发生了Fe-Mg交换的结果(图5a)。另外,接触黑云母的Ti含量和Mg[#]值分别为0.17~0.19 cpfu和0.27~0.33(表2),而基质黑云母的含量,Ti含量与接触黑云母的Ti含量没有明显差别,但Mg[#]值略高。白云母中的Si含量为3.04~3.11 cpfu,Mg[#]值为0.36~0.47(表2)。斜长石X_{An}为0.25~0.30,多为奥长石(表2,图5b)。石榴子石变斑晶具有较高的铁铝榴石(X_{Alm}=0.63~0.78)和锰铝榴石(X_{Sps}=0.12~0.20)含量,而钙铝榴石(X_{Grs}=0.02~0.15)和镁铝榴石(X_{Py}=0.04~0.07)含量较低,从核部至边部,铁铝榴石降低,锰铝榴石核部较为平坦,而边部轻微升高,钙铝榴石从核部到边部升高,镁铝榴石轻微降低(表2,图6),指示石榴子石经历了降温扩散过程。

3.3 绿片岩

绿片岩样品KP-2与KP-5的矿物组合和岩石学特征相似,具有纤状粒状变晶结构和片状构造,它们的矿物组合为阳起石(50%)、绿帘石(30%)、绿泥石(10%)、钠长石(5%)和石英(5%)(图7a、图7b)。

3.4 糜棱岩化含金云母大理岩

糜棱岩化含金云母大理岩样品KP-1的碎基含量大于90%,应为超糜棱岩,主要矿物有方解石(90%)、白云石(3%)、金云母(2%)、石英(2%)、白云母(1%),



a.二云母石英片岩样品KP-3片理发生褶皱弯曲(单偏光); b.二云母石英片岩样品KP-3部分区域TIMA扫描图显示褶皱变形; c.二云母石英片岩样品KP-3中的黑云母、白云母、石英和钠长石等矿物(正交偏光); d.二云母石英片岩样品KP-4中黑云母、白云母和石英等矿物(单偏光); e.二云母石英片岩样品KP-4中黑云母、白云母和石英等矿物以及明显的片理构造(正交偏光); f.二云母石英片岩样品KP-4部分区域TIMA扫描图; g、h.含石榴子石二云母石英片岩样品KP2202石榴子石变斑晶和基质矿物黑云母、白云母、斜长石, 和石英(单偏光); i.含石榴子石二云母石英片岩样品KP2202中黑云母、白云母、石英、斜长石和钛铁矿等矿物(背散射照片)

图4 二云母石英片岩和含石榴子石二云母石英片岩显微照片

Fig. 4 Photomicrographs of the two-mica quartz schist and the garnet-berting two-mica quartz schist

副矿物有:金红石、绿泥石、黄铁矿等。碎斑主要为方解石,碎基主要为方解石和白云石(图7c)。金云母多为碎斑形式存在,而细小的金云母较少(图7c)。大颗粒金云母经历了明显的变形作用(图7d、图7e),指示金云母在糜棱岩化作用之前就存在,应该形成于早期的区域变质作用过程。金云母具有较低的Ti含量(0.02~0.04 cpfu)和较高的Mg[#]值(0.95~0.97)(表3)。

4 变质温压条件计算

4.1 地质温压计结果

本研究使用黑云母Ti温度计(Henry et al., 2005)对二云母石英片岩和含石榴子石二云母石英片岩样品进行了变质温度估算。二云母石英片岩样品KP-3

中黑云母Ti含量为0.04~0.07 cpfu,计算得到的变质温度为330~468 °C,平均值为422 °C。二云母石英片岩样品KP-4中黑云母Ti含量为0.04~0.06 cpfu,计算得到的变质温度为304~441 °C,平均值为384 °C。含石榴子石二云母石英片岩样品KP2202中黑云母Ti含量为0.17~0.20 cpfu,计算得到的变质温度为652~683 °C,平均值为670 °C。

白云母在绿片岩-角闪岩相变沉积岩中分布广泛,其Si含量随着变质作用压力的增加而增加,可作为地质压力计(魏春景等,2007)。但在使用多硅白云母地质压力计时,应充分考虑变质岩全岩成分和矿物组合的影响,在含有绿泥石或黑云母的双变、三变域多硅白云母可以作为很好的地质压力计(魏春景等,2007)。因此,多硅白云母地质压力计适用于本次研究样品。

表 1 二云母石英片岩样品 KP-3 和 KP-4 中黑云母和白云母成分

Tab. 1 Mineral composition of biotite and muscovite in the two-mica quartz schist of sample KP-3 and KP-4

续表1

样品 矿物	KP-4															
	Bt								Ms							
SiO ₂	39.47	39.17	38.65	38.87	37.79	37.96	37.32	37.30	49.08	49.20	51.91	50.22	48.64	49.35	48.80	48.45
TiO ₂	0.83	0.83	0.93	0.76	0.84	0.79	0.98	0.96	0.23	0.09	0.20	0.09	0.05	0.23	0.11	0.05
Al ₂ O ₃	17.77	18.12	17.97	18.22	18.05	17.53	17.42	17.19	34.04	35.13	30.48	33.82	33.17	32.12	32.23	32.49
FeO	16.53	16.74	16.65	16.10	17.53	17.59	18.11	17.90	0.64	0.57	1.09	0.57	1.92	2.37	1.89	2.01
MnO	0.04	0.12	0.11	0.11	0.13	0.07	0.07	0.14	0.00	0.01	0.00	0.15	0.00	0.03	0.00	0.00
MgO	10.91	11.11	10.94	10.96	10.53	10.48	10.70	10.86	1.57	1.46	2.53	1.81	1.51	1.77	1.71	1.43
CaO	0.14	0.12	0.11	0.12	0.03	0.05	0.09	0.05	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na ₂ O	0.04	0.05	0.01	0.09	0.09	0.09	0.03	0.01	0.35	0.37	0.10	0.26	0.31	0.32	0.32	0.28
K ₂ O	7.97	8.14	8.00	8.20	8.99	8.92	8.49	8.61	9.68	9.82	9.31	9.71	10.59	10.74	10.61	10.76
Totals	93.71	94.38	93.35	93.41	93.97	93.49	93.21	93.02	97.03	98.12	96.68	98.09	96.18	96.92	95.67	95.47
Oxygens	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Si	2.95	2.92	2.91	2.92	2.87	2.89	2.86	2.86	3.18	3.15	3.36	3.22	3.21	3.24	3.24	3.22
Ti	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00
Al	1.57	1.59	1.60	1.61	1.61	1.58	1.57	1.56	2.60	2.66	2.33	2.55	2.58	2.49	2.52	2.55
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.07	0.05	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	1.04	1.04	1.05	1.01	1.11	1.12	1.16	1.15	0.04	0.03	0.06	0.03	0.11	0.13	0.10	0.11
Mn	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	1.22	1.23	1.23	1.23	1.19	1.19	1.22	1.24	0.15	0.14	0.24	0.17	0.15	0.17	0.17	0.14
Ca	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.04	0.05	0.01	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04
K	0.76	0.77	0.77	0.79	0.87	0.87	0.83	0.84	0.80	0.80	0.77	0.79	0.89	0.90	0.90	0.91
Sum	7.60	7.63	7.62	7.63	7.72	7.72	7.72	7.73	6.89	6.90	6.83	6.88	6.97	6.98	6.97	6.98
Mg [#]	0.54	0.54	0.54	0.55	0.52	0.51	0.51	0.52	0.81	0.82	0.81	0.85	0.58	0.57	0.62	0.56
Al ^{Vl}	0.52	0.51	0.51	0.53	0.48	0.47	0.43	0.42	1.84	1.87	1.73	1.82	1.78	1.72	1.75	1.77
X(Ti)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
X(Fe)	0.37	0.37	0.37	0.36	0.39	0.40	0.40	0.40	0.02	0.02	0.03	0.02	0.05	0.06	0.05	0.06
X(Mg)	0.43	0.44	0.43	0.44	0.42	0.42	0.43	0.43	0.08	0.07	0.12	0.09	0.07	0.09	0.08	0.07
T(℃) ^①	381	382	433	341	378	346	442	440	-	-	-	-	-	-	-	-
T(℃) ^②	455	452	465	447	454	446	463	458	-	-	-	-	-	-	-	-

注: Mg[#]=Mg/(Mg+Fe²⁺), X_{Ti}=Ti/(Ti+Fe²⁺+Mg+Al^{Vl}), X_{Fe}=Fe/(Ti+Fe²⁺+Mg+Al^{Vl}), X_{Mg}=Mg/(Ti+Fe²⁺+Mg+Al^{Vl}); ①为Henry等(2005)计算的黑云母Ti温度计结果; ②为Wu等(2015)计算的黑云母Ti温度计结果。

表 2 含石榴子石二云母石英片岩样品 KP2202 中黑云母、白云母、斜长石和石榴子石成分

Tab. 2 Mineral compositions of biotite, muscovite, plagioclase and garnet in the garnet-bearing two-mica quartz schist sample KP2202

续表2

样品 位置 矿物	KP2202																	
	Ms							Pl				Grt				Grt		
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
SiO ₂	45.44	45.36	45.60	45.33	45.76	45.74	61.80	62.30	61.47	36.66	36.54	37.05	36.37	36.23	36.94	36.56		
TiO ₂	1.09	1.14	0.62	0.71	0.62	0.65	0.00	0.05	0.02	0.06	0.08	0.10	0.06	0.03	0.00	0.08		
Al ₂ O ₃	35.01	34.91	35.29	35.11	35.43	34.84	24.06	23.28	24.25	20.64	21.19	21.14	21.02	20.84	20.98	20.83		
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.00	0.02	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00		
FeO	1.50	1.52	1.68	1.67	1.54	1.65	0.15	0.18	0.08	29.03	28.37	30.50	33.61	33.81	33.93	33.70		
MnO	0.00	0.01	0.09	0.02	0.06	0.01	0.00	0.00	0.04	8.10	6.34	5.91	5.62	5.64	5.58	5.37		
MgO	0.54	0.60	0.57	0.54	0.52	0.62	0.00	0.01	0.01	1.36	1.25	1.36	1.51	1.55	1.61	1.63		
CaO	0.02	0.00	0.06	0.00	0.08	0.00	5.94	5.71	6.28	3.45	5.26	3.41	1.27	1.05	1.02	0.97		
Na ₂ O	0.36	0.40	0.50	0.34	0.40	0.33	8.33	8.48	8.36	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.02	0.02		
K ₂ O	11.28	11.44	11.12	10.89	11.26	11.03	0.19	0.18	0.22	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03		
SrO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.16	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
NiO	0.00	0.02	0.04	0.01	0.00	0.02	0.00	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.02		
Totals	95.24	95.39	95.57	94.63	95.68	94.90	100.53	100.41	100.82	99.34	99.04	99.51	99.48	99.19	100.09	99.22		
Oxygens	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	8.00	8.00	8.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00		
Si	3.05	3.04	3.05	3.05	3.05	3.07	2.73	2.76	2.72	3.00	2.98	3.01	2.98	2.98	3.00	3.00		
Ti	0.06	0.06	0.03	0.04	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01		
Al	2.77	2.76	2.78	2.79	2.79	2.76	1.25	1.22	1.26	1.99	2.04	2.02	2.03	2.02	2.01	2.01		
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		
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00		
Fe ²⁺	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.00	0.00	0.00	1.97	1.93	2.07	2.29	2.29	2.31	2.31		
Mn	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.56	0.44	0.41	0.39	0.39	0.38	0.37		
Mg	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06	0.00	0.00	0.00	0.17	0.15	0.16	0.18	0.19	0.20	0.20		
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.28	0.27	0.30	0.30	0.46	0.30	0.11	0.09	0.09	0.09		
Na	0.05	0.05	0.07	0.04	0.05	0.04	0.71	0.73	0.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00		
K	0.97	0.98	0.95	0.94	0.96	0.95	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Sum	7.02	7.04	7.04	7.01	7.03	7.01	5.00	5.00	5.01	8.00	8.00	7.98	8.00	8.00	7.99	7.99		
Mg [#]	0.39	0.41	0.38	0.36	0.38	0.40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
T(°C)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
X _{An}	-	-	-	-	-	-	0.28	0.27	0.29	-	-	-	-	-	-	-		
X _{Ab}	-	-	-	-	-	-	0.71	0.72	0.70	-	-	-	-	-	-	-		
X _{Or}	-	-	-	-	-	-	0.01	0.01	0.01	-	-	-	-	-	-	-		
X _{Alm}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.66	0.65	0.70	0.77	0.77	0.78	0.78		
X _{Sps}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.19	0.15	0.14	0.13	0.13	0.13	0.13		
X _{Py}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07		
X _{Grs}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.10	0.15	0.10	0.04	0.03	0.03	0.03		

注: Mg[#]=Mg/(Mg+Fe²⁺), X_{An}=Ca/(Ca+Na+K), X_{Ab}=Na/(Ca+Na+K), X_{Or}=K/(Ca+Na+K); X_{Alm}=Fe²⁺/(Fe²⁺+Mn+Mg+Ca), X_{Sps}=Mn/(Fe²⁺+Mn+Mg+Ca), X_{Py}=Mg/(Fe²⁺+Mn+Mg+Ca), X_{Grs}=Ca/(Fe²⁺+Mn+Mg+Ca)。

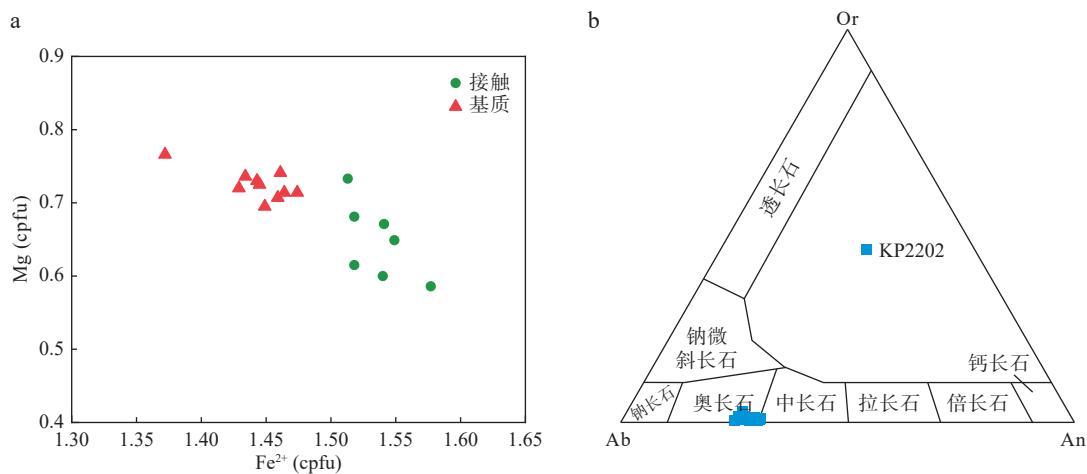


图5 含石榴子石二云母石英片岩的黑云母Mg-Fe²⁺图(a)于长石分类图解(b)

Fig. 5 (a) Biotite Mg-Fe²⁺ diagram, (b) plagioclase X_{Or}-X_{Ab}-X_{An} diagram in the garnet-bearing two-mica quartz schist sample KP2202

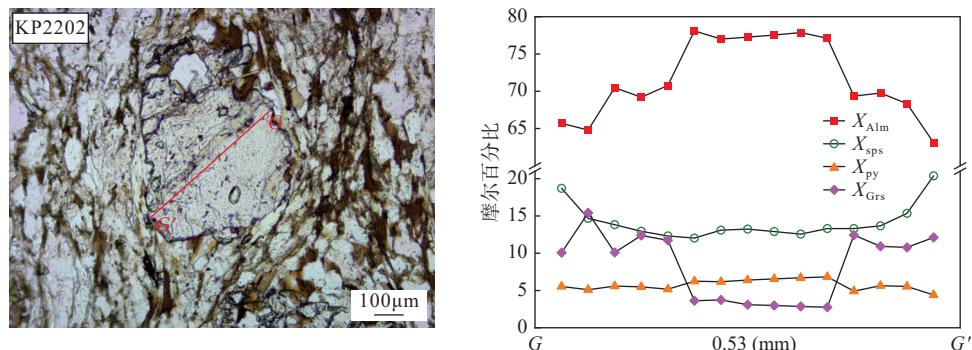
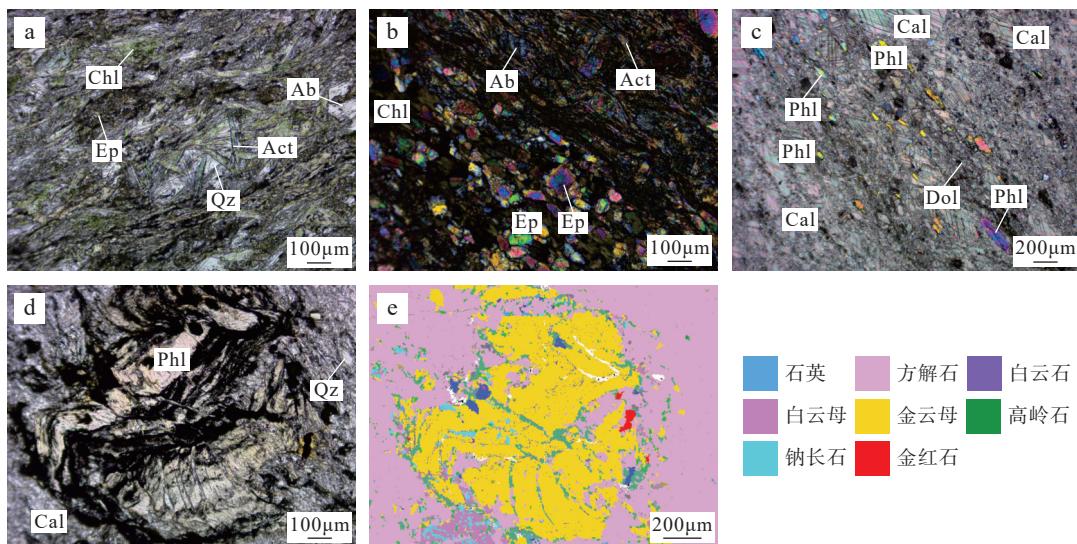


图6 含石榴石的二云母石英片岩KP2202石榴子石变斑晶成分剖面

Fig. 6 Compositional profiles of garnet porphyroblast from the garnet-bearing two-mica quartz schist sample KP2202



a. 绿片岩样品KP-2中绿泥石、绿帘石和阳起石等矿物(单偏光); b. 绿片岩样品KP-5中定向分布的绿泥石、绿帘石和阳起石等矿物(正交偏光); c. 粘棱岩化含金云母大理岩样品KP-1中的方解石斑晶与碎基以及金云母(正交偏光); d. 粘棱岩化含金云母大理岩中经历变形的金云母(单偏光); e. TIMA扫描图(与图7d具有相同视域)

图7 绿片岩及粘棱岩化金云母大理岩显微照片与TIMA扫描图

Fig. 7 Photo-micrographs of green schist and mylonitized phlogopite-bearing marble

表3 糜棱岩化含金云母大理岩样品KP-1中金云母成分

Tab. 3 Mineral compositions of phlogopite in the mylonitized phlogopite-bearing marble sample KP-1

样品		KP-1												
矿物		Phl												
SiO ₂	42.92	43.62	43.77	43.51	42.62	43.51	42.03	43.87	43.86	44.71	43.33	41.89	42.29	43.08
TiO ₂	0.60	0.82	0.55	0.39	0.55	0.73	0.78	0.46	0.41	0.39	0.49	0.53	0.57	0.62
Al ₂ O ₃	16.35	15.69	15.68	16.11	16.33	16.48	16.59	15.23	15.02	15.02	15.95	17.42	17.57	17.54
FeO	1.45	1.62	1.23	1.91	1.35	1.48	1.70	1.57	1.48	1.55	2.02	1.71	1.87	1.82
MnO	0.02	0.00	0.03	0.00	0.01	0.03	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MgO	22.49	22.69	22.96	22.92	22.37	22.06	22.36	23.16	22.77	23.38	22.63	22.06	21.88	21.84
CaO	0.02	0.02	0.05	0.02	0.06	0.04	0.00	0.11	0.05	0.02	0.02	0.08	0.07	0.09
Na ₂ O	0.09	0.00	0.08	0.05	0.03	0.05	0.08	0.03	0.03	0.02	0.00	0.11	0.09	0.04
K ₂ O	10.34	10.31	10.22	9.94	10.51	10.45	10.61	10.29	10.39	10.40	10.41	10.60	10.69	10.78
Totals	94.27	94.75	94.56	94.86	93.83	94.82	94.15	94.78	94.01	95.49	94.85	94.41	95.03	95.79
Oxygens	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Si	3.01	3.04	3.05	3.02	3.00	3.03	2.96	3.06	3.08	3.09	3.02	2.94	2.95	2.98
Ti	0.03	0.04	0.03	0.02	0.03	0.04	0.04	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03
Al	1.35	1.29	1.29	1.32	1.36	1.35	1.38	1.25	1.24	1.22	1.31	1.44	1.45	1.43
Fe 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
Fe ²⁺	0.09	0.09	0.07	0.11	0.08	0.09	0.10	0.09	0.09	0.09	0.12	0.10	0.11	0.11
Mn	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
Mg	2.35	2.36	2.38	2.37	2.35	2.29	2.35	2.40	2.38	2.41	2.35	2.31	2.28	2.25
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01
Na	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01
K	0.92	0.92	0.91	0.88	0.94	0.93	0.95	0.91	0.93	0.92	0.93	0.95	0.95	0.95
Sum	7.76	7.74	7.74	7.74	7.77	7.73	7.79	7.76	7.75	7.74	7.76	7.79	7.78	7.76
Mg [#]	0.97	0.96	0.97	0.96	0.97	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.95	0.95	0.95	0.96

注: Mg[#]=Mg/(Mg+Fe²⁺)。

文中采用 Massonne 等(1997)提出的多硅白云母地质压力计进行变质压力计算时是基于黑云母 Ti 温度计(Henry et al., 2005)计算的变质温度结果。二云母石英片岩样品 KP-3 与 KP-4 采自同一个野外露头, 所以对二云母石英片岩进行变质压力估算时选取两者变质温度的平均值。样品 KP-3 与样品 KP-4 中白云母的 Si 原子数变化范围为 3.19~3.50 之间, 平均值为 3.29, 其变质温度为 304~468 °C, 平均值为 406 °C。多硅白云母地质压力计计算出的平均变质压力为 P=1.9~7.8 kbar, 平均值约为~4.0 kbar(图 8b)。

此外, 本研究中还利用 Wu 等(2015)重新标定的 Ti 饱和变泥质岩中黑云母 Ti 温度计, 对样品 KP-3 与

KP-4 进行变质温度进行估算, 压力根据多硅白云母压力计计算结果平均值(4.0 kbar)。样品 KP-3 中黑云母 X_{Ti} 、 X_{Fe} 与 X_{Mg} 值分别为 0.02、0.42~0.46 和 0.36~0.39, 得到的变质温度为 455~495 °C, 样品 KP-4 中黑云母 X_{Ti} 、 X_{Fe} 与 X_{Mg} 值分别为 0.02、0.36~0.40 和 0.42~0.44, 得到的变质温度为 446~465 °C。

对比样品 KP-3 与 KP-4 使用两个黑云母 Ti 温度计结果, Wu 等(2015)的黑云母 Ti 温度计所得到的平均变质温度条件稍高, 但仍然指示样品 KP-3 与 KP-4 为绿片岩相变质作用的产物。

4.2 相平衡模拟结果

本研究对宽坪岩群二云母石英片岩样品 KP-3、

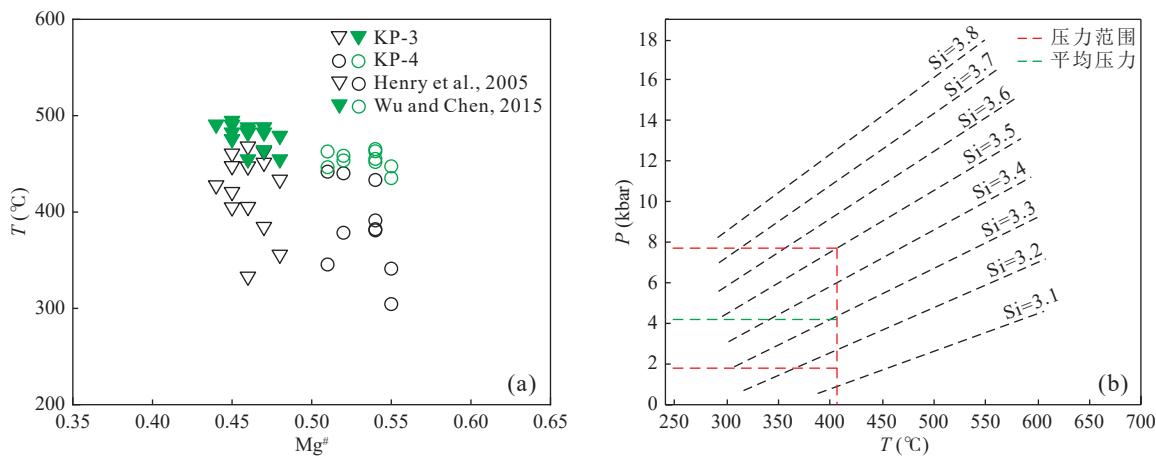


图8 二云母石英片岩样品KP-3与KP-4的黑云母Ti温度计结果(a)与多硅白云母压力计计算结果(b)

Fig. 8 The P - T conditions calculated by (a) Ti-in-biotite geothermometer and (b) phengite geobarometer

KP-4和含石榴子石二云母石英片岩样品KP2202进行了变质相平衡 P - T 视剖面图模拟计算研究。采用的模拟软件为 Domino (Capitani et al., 2010), 热力学数据库为 ds62 (Holland et al., 1998, 2011), 选择的体系为目前常用的 $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{K}_2\text{O}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{TiO}_2-\text{O}_2$ (NCKFMASHTO) 体系 (White et al., 2014a)。选用的矿物成分-活度模型为: 石榴子石、黑云母、十字石、堇青石和绿泥石 (White et al., 2014a, 2014b), 斜长石 (Holland et al., 2003), 钛铁矿 (White et al., 2000), 绿帘石 (Holland et al., 2011), 白云母与钠云母 (Smey et al., 2010)。纯的固溶体端元有夕线石、蓝晶石、红柱石、石英和金红石。本次模拟中设石英与 H_2O 过量, 而 $\text{O}(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 的含量则是通过滴定法测得 FeO 含量后计算得到。相平衡模拟计算使用的全岩主量成分见表4。

4.2.1 二云母石英片岩样品KP-3

样品KP-3的 P - T 视剖面图显示(图9), 模拟的温压范围为 2~10 kbar 和 350~700 °C。根据岩相学观察, 该样品的矿物组合为 ms-bt-chl-ilrn-rt-ab-ep, 在 P - T 视剖面图中对应区域的温度和压力范围分别为 350~525 °C 和 2~10 kbar(图9a)。基于黑云母 Ti 含量(0.05~0.07)和 X_{Fe} 比值(0.42~0.46)对应等值线, 进一步将矿物组合稳定的温压范围限定为 400~500 °C 和 2~10 kbar(图9b)。

4.2.2 二云母石英片岩样品KP-4

样品KP-4的 P - T 视剖面图显示金红石稳定于 550 °C 以下, 绿泥石稳定在 <~575 °C 的区域(图10a), 矿物组合区域为 ms-bt-chl-ilrn-ep-rt, 对应区域的温度和压力范围分别为 420~570 °C 和 2~10 kbar (图10a)。利用黑云母的 Ti 含量(0.04~0.06)与 X_{Fe} 比

表4 用于变质相平衡模拟计算的全岩主量元素成分

Tab. 4 Whole-rock compositions used for phase equilibrium modelling

样品号	全岩成分 (%)												
	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	LOI	Total
KP-3	71.24	0.65	12.38	2.27	3.22	0.04	2.28	0.15	1.41	3.33	0.07	2.37	99.41
KP-4	79.14	0.52	9.34	1.78	1.88	0.03	1.84	0.11	0.11	2.76	0.05	2.22	99.78
KP2202	67.62	0.83	15.35	1.14	4.56	0.12	1.54	0.94	1.14	4.30	0.06	1.67	99.27

样品号	相平衡模拟中的各组分含量 (mol%)											
	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	FeO	K_2O	Na_2O	TiO_2				
KP-3	71.790	7.351	0.162	3.425	4.436	2.140	1.377	0.493	0.861	图9a、图9b		
KP-4	78.552	5.463	0.117	2.723	2.890	1.747	0.106	0.388	0.665	图10a、图10b		
KP2202	71.096	9.510	1.059	2.414	4.913	2.883	1.162	0.656	0.452	图11a、图11b		

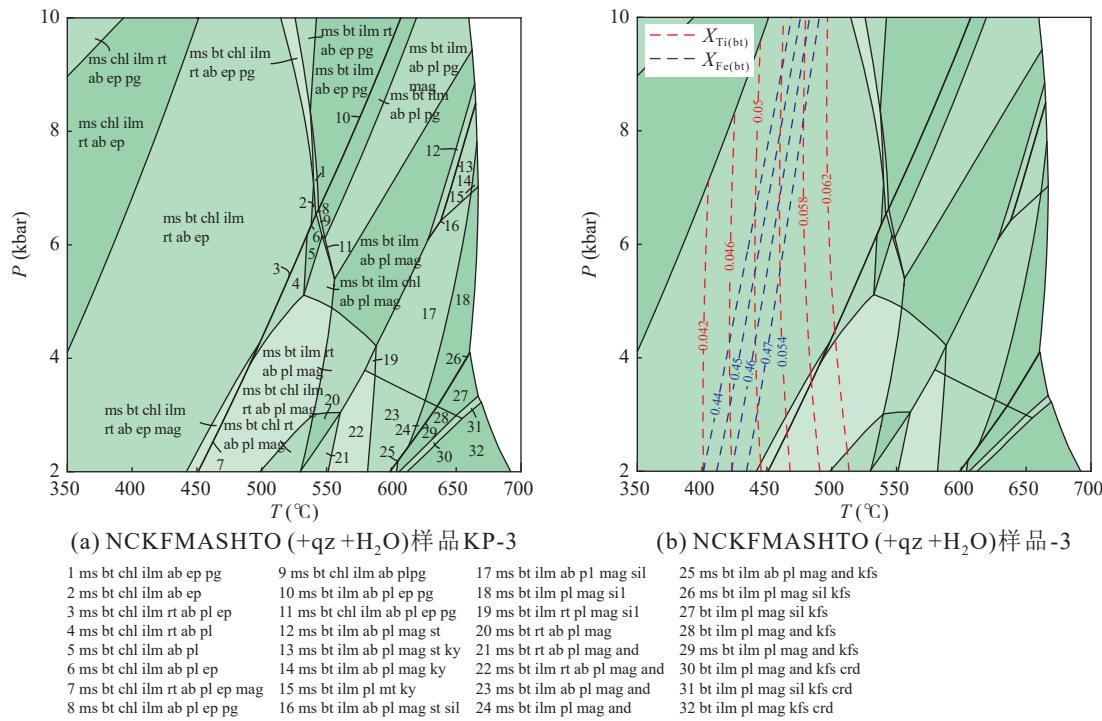


图9 二云母石英片岩样品 KP-3 的 P-T 视剖面图(a)、黑云母 $X_{\text{Ti(bt)}}$ 和 $X_{\text{Fe(bt)}}$ 等值线的 P-T 视剖面图(b)

Fig. 9 (a) P - T pseudosection, (b) P - T pseudosection with isopleths of $X_{\text{Ti(bt)}}$ and $X_{\text{Fe(bt)}}$ for the two-mica quartz schist sample KP-3

值(0.45~0.50)对应的等值线,进一步将矿物组合温压范围限定为425~470 °C和2~7 kbar(图10b)。

4.2.3 含石榴子石二云母石英片岩样品 KP2202

含石榴子石二云母石英片岩样品 KP2202 模拟的 P - T 视剖面图温压范围为4~12 kbar 和 400~750 °C (图11)。该 P - T 视剖面显示金红石稳定于550 °C以下,石榴子石稳定的温压区域为>~550 °C,>8 kbar (图11a)。该样品的峰期矿物组合为grt-ms-bt-pl-ilm-mag, 对应区域的温度和压力范围分别为620~680 °C 和 8~9.8 kbar(图11a)。利用石榴子石中的 X_{py} 和 X_{grs} 等值线进一步将峰期变质温压条件限定在645~680 °C/8~9 kbar(图11b)。

5 原位LA-ICP-MS黑云母和白云母Rb-Sr年代学

5.1 二云母石英片岩样品 KP-3

本研究对二云母石英片岩样品 KP-3 共进行了40个点的原位 Rb-Sr 同位素分析,由于样品中的黑云母和白云母较小,很难分别进行分析,因此本研究中得到的 Rb-Sr 同位素数据大多是两种矿物混合的结果,由于是同一阶段生长的矿物,对等时线年龄

的获得没有影响。部分分析点位见图12a,分析获得的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值分别为0.1349~49.9564和0.6885~0.8432(表5),这些数据拟合得到等时线年龄为(155.64±9.82) Ma (n=40, MSWD=8.6)(图13a)。

5.2 二云母石英片岩样品 KP-4

对二云母石英片岩样品 KP-4 的原位 Rb-Sr 同位素分析共获得了40个数据(图12b)。因为分析点7、8、13、14、24 对应的数据较分散,所以没有用于等时线年龄的拟合。剩余数据点对应的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值分别为1.4073~97.7716 和 0.7136~0.9360(表6),由这些数据拟合得到两个等时线年龄,分别为(294.33±5.7) Ma(n=22, MSWD=3.1)与(156.89±4.00) Ma (n=19, MSWD=4.6)(图13b)。

5.3 含石榴子石二云母石英片岩样品 KP2202

在对含石榴子石二云母石英片岩样品 KP2202 原位 Rb-Sr 同位素分析中,分别对白云母和黑云母进行了选点(图12c、图12d),共获得了50个数据(表7)。大片白云母的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 值变化有限并且较低,尽管它的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 有一定变化,但仍无法获得有效的等时线年龄(图13c)。剩余黑云母与白云母的 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值分别为12.7696~356.2216 和 0.7805~1.3801,拟合得到等时线年龄为(109.54±4.61) Ma (n=33, MSWD=

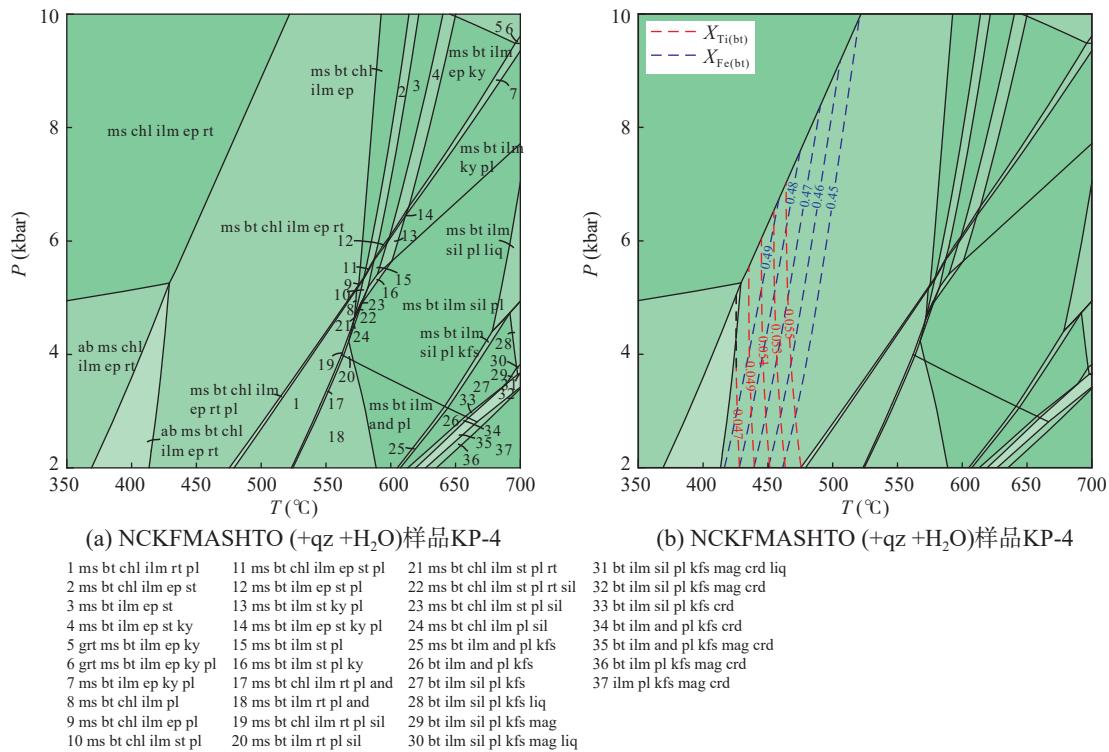


图10 二云母石英片岩样品KP-4的P-T视剖面图(a)、黑云母 $X_{\text{Ti(b)}}^{\text{Mg}}$ 和 $X_{\text{Fe(b)}}^{\text{Mg}}$ 等值线的P-T视剖面图(b)

Fig. 10 (a) P - T pseudosection, (b) P - T pseudosection with isopleths of $X_{\text{Ti(bt)}}$ and $X_{\text{Fe(bt)}}$ for the two-mica quartz schist sample KP-4

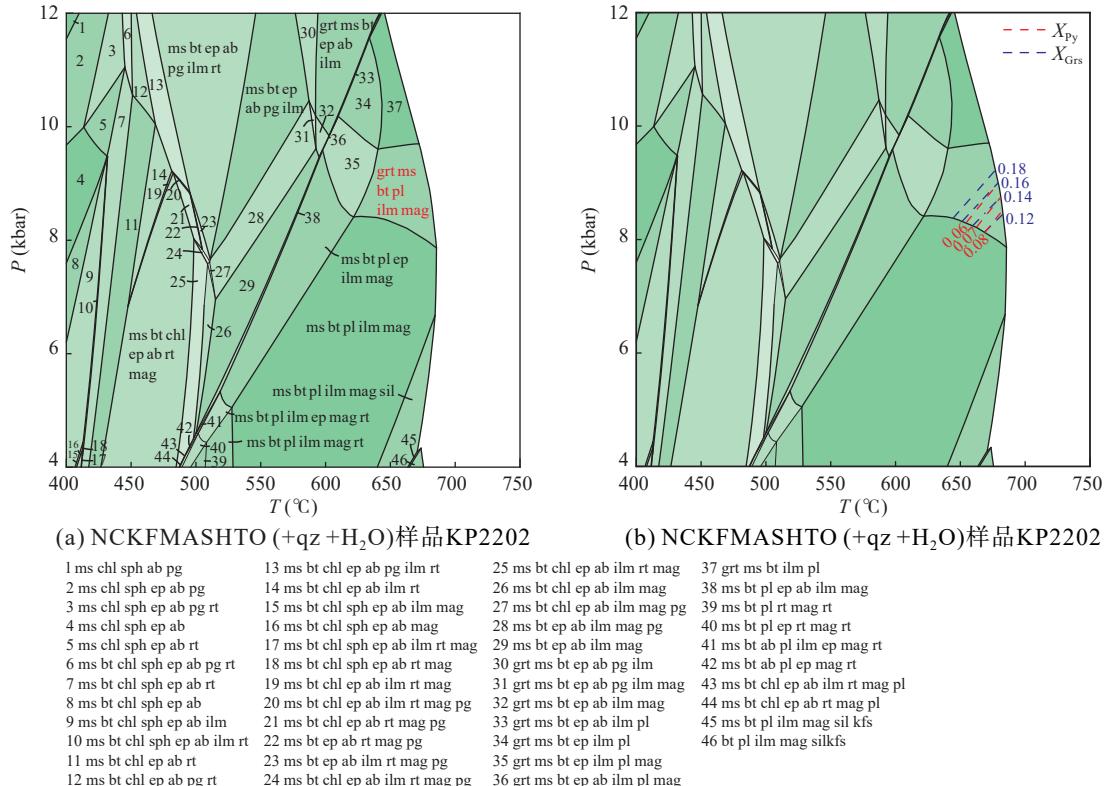
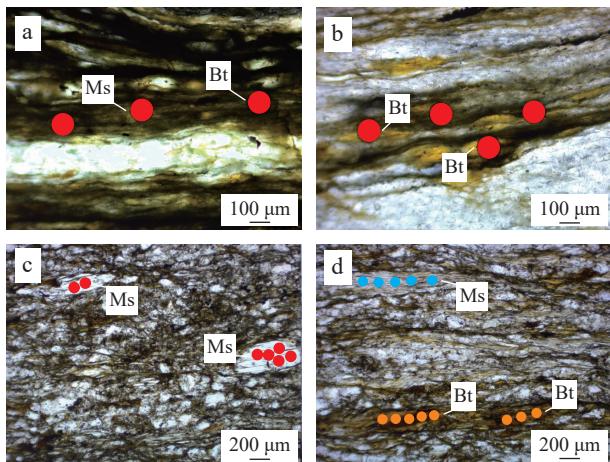


图11 含石榴子石二云母石英片岩样品KP2202的P-T视剖面图(a)、石榴子石 X_{Py} 和 X_{Grs} 等值线的P-T视剖面图(b)

Fig. 11 (a) P - T pseudosection, (b) P - T pseudosection with isopleths of X_{Py} and X_{Grs} for the garnet-bearing two-mica quartz schist sample KP2202



a.二云母石英片岩样品 KP-3; b.二云母石英片岩样品 KP-4; c、d.含石榴子石二云母石英片岩样品 KP2202

图12 原位 LA-ICP-MS 黑云母和白云母 Rb-Sr 定年的部分分析点位

Fig. 12 Spot locations for in-situ LA-ICP-MS biotite and muscovite Rb-Sr analysis

2.8)(图 13c)。

6 讨论

6.1 宽坪岩群变质温压条件

黑云母 Ti 地质温度计(Henry et al., 2005; Wu et al., 2015)与多硅白云母地质压力计(Massonne et al., 1997)计算显示二云母石英片岩样品 KP-3 和 KP-4 的变质温压范围为 304~495 °C 和 1.9~7.8 kbar, 对应的平均值为 ~440 °C 和 ~4.0 kbar(图 8), 含石榴子石二云母石英片岩样品 KP2202 的变质温度为 652~683 °C, 平均值为 670 °C。通过 $P-T$ 视剖面图模拟计算得到样品 KP-3 和 KP-4 矿物组合稳定的温压范围分别为 ~400~480 °C/~2.0~10.0 kbar 和 ~425~470 °C/~2.0~7.5 kbar(图 9、图 10), 样品 KP2202 变质温压条件为 645~680 °C/8~9 kbar(图 11)。因此, 滝峪地区宽坪岩群二云母石英片岩北部二云母石英片岩经历了绿片岩相变质作用, 而南部含石榴子石二云母石英片岩经历了低角闪岩相变质作用(图 14), 可能存在递增变质作用, 但仍需要进一步的工作揭示。

笔者对前人关于宽坪岩群变质温压演化的结果进行了总结, 以便与本研究结果进行对比。Liu 等(2011)对桐柏地区宽坪岩群北部和南部两个构造单元进行了变质温压条件计算, 结果显示北部单元压力峰期的变质温压条件为 570~610 °C/9.3~11.2 kbar,

表 5 二云母石英片岩样品 KP-3 的原位 LA-ICP-MS 黑云母和白云母 Rb-Sr 同位素数据

Tab. 5 In-situ LA-ICP-MS biotite and muscovite Rb-Sr isotopic data for two-mica quartz schist sample KP-3

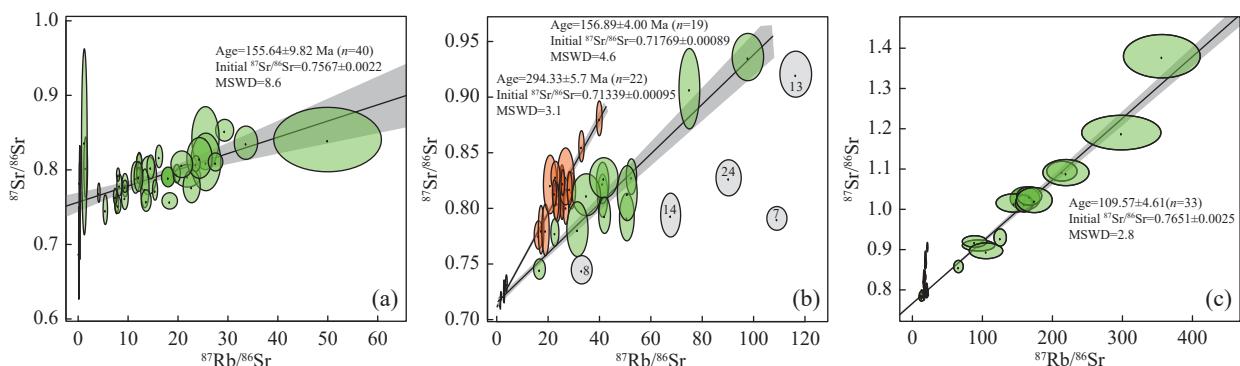
点位	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$\pm 1\sigma$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\pm 1\sigma$
KP-3-1	18.016 6	0.538 9	0.790 5	0.005 4
KP-3-2	29.341 6	0.738 5	0.853 2	0.006
KP-3-3	16.200 9	0.290 7	0.818 1	0.006 2
KP-3-4	11.506 1	0.366 3	0.789 9	0.008 7
KP-3-5	18.336 9	0.634	0.758 4	0.004 5
KP-3-6	12.238 9	0.216 2	0.804 8	0.007 6
KP-3-7	9.393 9	0.259 5	0.779 5	0.006 4
KP-3-8	7.713 9	0.155 3	0.754 6	0.005 5
KP-3-9	21.905 9	1.070 8	0.792	0.006 2
KP-3-10	25.497 6	1.116 4	0.842 6	0.017 3
KP-3-11	14.042 2	0.672 8	0.792 4	0.010 6
KP-3-12	5.436 1	0.181 6	0.746 7	0.008 2
KP-3-13	25.586 6	1.218 5	0.810 7	0.015 8
KP-3-14	13.364 2	0.339 8	0.775 1	0.010 6
KP-3-15	23.585 6	0.343 9	0.808 6	0.004 3
KP-3-16	22.733	0.697 1	0.777 8	0.008 9
KP-3-17	9.348 6	0.278 4	0.763 2	0.006 7
KP-3-18	13.624 9	0.405 7	0.758 8	0.005 9
KP-3-19	14.534 2	0.311 2	0.804	0.006 5
KP-3-20	8.259 9	0.211 5	0.779 7	0.006
KP-3-21	12.219 2	0.221 5	0.811 1	0.004 3
KP-3-22	7.998 2	0.128 9	0.793 7	0.003 6
KP-3-23	12.193	0.209 4	0.792 7	0.004 3
KP-3-24	19.749 6	0.293 7	0.795	0.005
KP-3-25	15.400 3	0.207	0.773 1	0.005 6
KP-3-26	9.377 8	0.201 7	0.777 9	0.003 4
KP-3-27	24.297	1.035 4	0.816 1	0.011 2
KP-3-28	12.085	0.358 1	0.791 1	0.008 2
KP-3-29	33.607 8	0.955 1	0.836 5	0.009 1
KP-3-30	7.961 1	0.246	0.753 1	0.004 6
KP-3-31	49.956 4	4.410 4	0.840 7	0.017 7
KP-3-32	4.144 9	0.102 1	0.769 4	0.005 3
KP-3-33	7.428 6	0.146 7	0.764 6	0.004 4
KP-3-34	20.755 5	0.889 5	0.807 6	0.007 3
KP-3-35	27.518	0.593 5	0.810 6	0.004 9
KP-3-36	1.505 8	0.152 1	0.803 5	0.016 7
KP-3-37	1.235 6	0.230 9	0.837 7	0.051
KP-3-38	0.274 1	0.021 5	0.783 6	0.010 7
KP-3-39	0.134 9	0.018 5	0.688 5	0.025 5
KP-3-40	0.326 4	0.042 6	0.756 2	0.031 2

退变质阶段的温压条件为 600~630 °C/6.7~6.8 kbar, 因而记录了一条以近等温降压为特点的顺时针 $P-T$

表 6 二云母石英片岩样品 KP-4 原位 LA-ICP-MS 黑云母和白云母 Rb-Sr 同位素数据

Tab. 6 In-situ LA-ICP-MS biotite and muscovite Rb-Sr isotopic data for two-mica quartz schist sample KP-4

点位	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$\pm 1\sigma$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\pm 1\sigma$
KP-4-1	25.446 6	0.454	0.814 6	0.01
KP-4-2	41.225 9	0.817 8	0.811 4	0.007 9
KP-4-3	50.653 2	1.172 5	0.792 2	0.008 7
KP-4-4	26.931 1	0.438	0.801 4	0.006 4
KP-4-5	29.053 1	0.666 6	0.815 8	0.006 7
KP-4-8	33.092 4	1.664 9	0.744 8	0.005 2
KP-4-9	16.647 6	0.937	0.745 4	0.003 7
KP-4-10	41.210 9	0.994 3	0.822 9	0.007 6
KP-4-11	52.434 6	0.829 1	0.828 5	0.006 6
KP-4-12	2.860 4	0.084 3	0.725 1	0.004 1
KP-4-15	26.826 3	1.323 5	0.828 7	0.010 5
KP-4-16	34.877 9	2.254 9	0.812 2	0.007 7
KP-4-17	17.255 2	0.446 2	0.780 8	0.008 9
KP-4-18	23.546 5	0.563	0.804 9	0.007
KP-4-19	50.804 7	1.575 9	0.813 7	0.010 1
KP-4-20	97.771 6	2.502 5	0.936	0.008 7
KP-4-21	18.971 5	0.590 2	0.780 7	0.009 5
KP-4-22	41.677 8	2.263 7	0.827 5	0.007 4
KP-4-23	20.799 9	1.074 4	0.821 5	0.010 8
KP-4-25	41.977 1	0.938 1	0.793 9	0.006 7
KP-4-26	22.892 3	0.719 6	0.829	0.005 4
KP-4-27	31.417 8	1.691 9	0.781 3	0.010 1
KP-4-28	75.000 6	1.655 8	0.907 6	0.014 8
KP-4-29	39.930 3	0.453 9	0.880 9	0.006 4
KP-4-30	32.988 9	0.427 3	0.855 8	0.005 7
KP-4-31	23.071 3	0.450 1	0.806 5	0.007
KP-4-32	25.723 3	0.278 8	0.823 2	0.004 8
KP-4-33	22.632 3	0.641 4	0.778 3	0.005 1
KP-4-34	28.391	0.384 4	0.818 1	0.006 2
KP-4-35	22.447 9	0.319	0.814	0.004 9
KP-4-36	2.877 5	0.056 8	0.730 4	0.002 2
KP-4-37	3.76	0.134 4	0.732 5	0.003 2
KP-4-38	2.936 3	0.067	0.725 8	0.001 8
KP-4-39	1.407 3	0.033 5	0.713 6	0.001 8
KP-4-40	1.629 4	0.068 3	0.721 3	0.001 6



a.二云母石英片岩样品 KP-3; b.二云母石英片岩样品 KP-4; c.含石榴子石二云母石英片岩样品 KP220

图13 原位 LA-ICP-MS 黑云母和白云母 Rb-Sr 等时线年龄图

Fig. 13 In situ LA-ICP-MS biotite and muscovite Rb-Sr isochron diagrams

轨迹(图 14),南部构造单元的峰期变质温压条件为 630~650 °C/6.6~8.9 kbar,同样记录了一条顺时针的 $P-T$ 轨迹(Liu et al., 2011)(图 14)。胡娟(2010)对桐柏地区宽坪岩群的研究中发现,南部左老庄组变质温压条件明显高于北部的回龙寺组,推测在桐柏地区宽坪岩群从北向南发生了递增变质作用。王海杰等(2021)对红土岭地区的含石榴子石石英片岩进行了详细的岩石学研究,限定出进变质阶段的温压条件为 525~528 °C /6.41~6.58 kbar,而压力和温度峰期的变质温压条件分别为 557~563 °C/7.17~7.92 kbar 和 578~586 °C/6.27~6.82 kbar,因而得到了早期以升温升压,晚期以降压升温而后降温降压为特点的顺时针的变质 $P-T$ 轨迹(图 14)。研究显示,涝峪地区宽坪岩群经历了绿片岩相和低角闪岩相变质作用,该地区北部宽坪岩群中的二云母石英片岩的变质温压条件显著低于桐柏和红土岭地区的宽坪岩群峰期变质温压条件,而南部的含石榴子石二云母石英片岩峰期变质温压条件与桐柏地区南部构造单元的压力峰期变质温压条件相近(胡娟, 2010; Liu et al., 2011; 王海杰等, 2021)(图 14)。

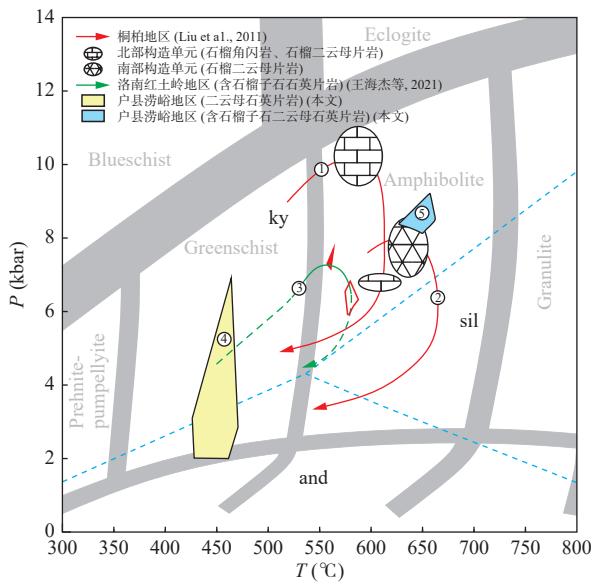
6.2 宽坪岩群的变质变形时代

与宽坪岩群中变基性火山岩(绿片岩)和变碎屑岩原岩形成时代的限定工作相比(张宗清等, 1994; 第五春荣等, 2010; Zhu et al., 2011; Liu et al., 2013; Shi et al., 2013; Cao et al., 2016; 王海杰等, 2021),目前对宽坪岩群变质时代的研究工作要薄弱很多,究其原因是除了桐柏地区与红土岭地区的宽坪岩群变质程度达到了角闪岩相,其余变质程度较低,只经历了绿片岩相到低角闪岩相的变质作用,如在涝峪、黑河和红门河等区域发育的宽坪岩群。

表 7 含石榴子石二云母石英片岩样品 KP2202 原位 LA-ICP-MS 黑云母和白云母 Rb-Sr 同位素数据

Tab. 7 In-situ LA-ICP-MS biotite and muscovite Rb-Sr isotopic data for garnet-bearing two-mica quartz schist sample KP2202

点位	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$\pm 1\sigma$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\pm 1\sigma$	备注
KP2202-1	21.344 6	0.376 8	0.906 1	0.004 8	Ms type-1
KP2202-2	19.080 2	0.376 9	0.866 8	0.004 2	Ms type-1
KP2202-3	16.160 7	0.251 1	0.823 1	0.003 4	Ms type-1
KP2202-4	16.961 1	0.230 4	0.828 9	0.003 6	Ms type-1
KP2202-5	18.697 2	0.288 5	0.884 6	0.004 8	Ms type-1
KP2202-6	17.092 9	0.298 6	0.834 8	0.004 4	Ms type-1
KP2202-7	18.568 4	0.314 5	0.866 5	0.004 9	Ms type-1
KP2202-30	16.567 9	0.264 0	0.837 0	0.005 1	Ms type-1
KP2202-31	17.724 1	0.303 5	0.837 7	0.003 9	Ms type-1
KP2202-32	18.418 6	0.300 5	0.860 8	0.003 7	Ms type-1
KP2202-40	17.475 5	0.283 9	0.829 2	0.003 5	Ms type-1
KP2202-41	17.997 4	0.465 3	0.831 7	0.003 7	Ms type-1
KP2202-42	17.660 0	0.255 6	0.830 7	0.004 3	Ms type-1
KP2202-43	16.964 2	0.263 4	0.793 0	0.004 3	Ms type-1
KP2202-44	16.528 1	0.279 8	0.792 0	0.003 4	Ms type-1
KP2202-45	16.701 4	0.367 2	0.817 3	0.004 2	Ms type-1
KP2202-46	16.545 3	0.308 1	0.811 2	0.003 6	Ms type-1
KP2202-11	16.915 9	0.289 8	0.794 5	0.004 4	Ms type-2
KP2202-12	18.146 9	0.310 6	0.801 0	0.003 6	Ms type-2
KP2202-13	17.911 2	0.332 1	0.794 1	0.004 3	Ms type-2
KP2202-14	19.946 9	0.331 5	0.796 3	0.004 1	Ms type-2
KP2202-22	18.903 5	0.301 5	0.802 1	0.004 3	Ms type-2
KP2202-23	19.898 7	0.344 3	0.800 3	0.003 8	Ms type-2
KP2202-24	16.655 5	0.395 0	0.783 5	0.003 4	Ms type-2
KP2202-25	19.947 1	0.372 3	0.795 8	0.004 4	Ms type-2
KP2202-26	18.989 2	0.333 2	0.796 0	0.004 8	Ms type-2
KP2202-27	13.298 2	0.470 8	0.790 0	0.004 2	Ms type-2
KP2202-28	21.199 0	0.519 5	0.792 7	0.004 4	Ms type-2
KP2202-29	18.495 1	0.406 8	0.796 1	0.004 4	Ms type-2
KP2202-33	12.769 6	1.165 5	0.788 7	0.003 0	Ms type-2
KP2202-34	20.184 4	0.543 4	0.805 8	0.004 4	Ms type-2
KP2202-35	20.006 1	0.341 4	0.796 1	0.004 2	Ms type-2
KP2202-36	20.578 7	0.310 2	0.790 4	0.004 1	Ms type-2
KP2202-8	160.802 4	8.560 5	1.026 8	0.011 6	Bt
KP2202-9	144.930 3	10.253 0	1.015 7	0.009 2	Bt
KP2202-10	213.518 1	8.719 9	1.094 7	0.009 9	Bt
KP2202-15	94.452 8	9.335 7	0.910 3	0.005 5	Bt
KP2202-16	159.500 3	4.995 4	1.014 5	0.008 5	Bt
KP2202-17	13.229 4	1.583 4	0.781 7	0.003 9	Bt
KP2202-18	167.016 1	7.148 7	1.033 2	0.009 2	Bt
KP2202-19	356.221 6	22.073 6	1.380 1	0.021 7	Bt
KP2202-20	298.369 3	22.772 5	1.190 5	0.017 3	Bt
KP2202-21	88.798 1	7.072 0	0.920 2	0.005 8	Bt
KP2202-37	105.155 6	9.634 3	0.897 0	0.007 9	Bt
KP2202-38	65.793 6	2.756 6	0.858 0	0.006 2	Bt
KP2202-39	125.350 6	3.581 9	0.930 0	0.008 6	Bt
KP2202-47	219.276 9	13.270 6	1.091 2	0.013 1	Bt
KP2202-48	19.146 2	1.163 4	0.793 1	0.004 7	Bt
KP2202-49	174.102 3	10.290 1	1.022 9	0.012 6	Bt
KP2202-50	27.711 7	1.115 2	0.780 5	0.004 0	Bt



轨迹1和2分别为桐柏地区宽坪岩群北部和南部构造单元变质P-T轨迹(Liu et al., 2011);轨迹3为红土岭地区含石榴子石石英片岩变质P-T轨迹(王海杰等, 2021);区域4和5分别为涝峪地区宽坪岩群中二云母石英片岩和含石榴子石二云母石英片岩变质温压条件(本研究)

图14 宽坪岩群变质温压条件及P-T轨迹

Fig. 14 Summary of metamorphic P-T conditions and paths for the Kuaping Group

Zhai 等(1998)对桐柏地区北部宽坪岩群中的角闪岩进行角闪石 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年,限定该角闪岩的变质年龄为(434 ± 2) Ma。此外,Liu 等(2011)对桐柏地区南部宽坪岩群中的石榴子石角闪岩中的变质锆石进行SHRIMP锆石U-Pb定年,得到角闪岩的变质年龄为(442 ± 6) Ma。张宗清等(1994)对商洛板桥地区宽坪岩群云母石英片岩进行全岩Rb-Sr同位素定年,得到的年龄为(414 ± 44) Ma,而对该地区斜长角闪岩进行角闪石-斜长石及全岩Sm-Nd同位素分析,得到的等时线年龄为(393 ± 42) Ma,这两个年龄结果比桐柏地区宽坪岩群中的角闪岩的变质年龄略小。基于以上年代学研究结果,特别是变质锆石U-Pb年龄结果,可以推测宽坪岩群发生区域变质作用的时代可能在~440 Ma。

本研究首次采用原位黑云母和白云母Rb-Sr定年的定年方法,对涝峪地区的二云母石英片岩和含石榴子石二云母石英片岩进行了年代学的研究,得到四个等时线年龄,分别为(294.33 ± 5.7) Ma、(155.64 ± 9.82) Ma、(156.89 ± 4.00) Ma和(109.54 ± 4.61) Ma(图9),与宽坪岩群发生区域变质作用的时代相比,这四组年龄明显年轻许多,因此,本研究并没有获得涝

峪地区宽坪岩群区域变质作用的时代。本研究获得的~290 Ma应该代表后期构造热事件导致云母Rb-Sr体系发生热重置的时代,类似年龄在之前其它研究区宽坪岩群中也有过报道。例如,张宗清等(1994)对商洛板桥地区斜长角闪岩样品进行角闪石 ^{40}Ar / ^{39}Ar 定年,得到的坪年龄为(324 ± 3) Ma,而对洛南马河地区斜长角闪岩进行角闪石-斜长石矿物Rb-Sr定年,得到的等时线年龄为265 Ma。闫全人等(2008)对商洛地区宽坪岩群中的石榴子石黑云母石英片岩进行了黑云母 ^{40}Ar / ^{39}Ar 年代学研究,得到的坪年龄为(319.1 ± 3.6) Ma。这些年龄结果指示了324~265 Ma时秦岭造山带北秦岭构造带宽坪岩群可能经历了一期构造热事件。勉略缝合带及南秦岭构造带发育大量与俯冲作用有关的火山岩、花岗岩体和辉绿岩(Xu et al., 2000; Lai et al., 2000; Li et al., 2004),其中三岔子斜长岩的锆石U-Pb年龄为(300 ± 61) Ma(Li et al., 2004),辉绿岩中岩浆锆石U-Pb年龄为295~264 Ma,代表了勉略洋(古特提斯洋)向北俯冲消减的时代(Dong et al., 2011a, 2021, 2022)。本研究得到的~290 Ma的年龄可能与该次构造事件有关。晚中生代秦岭造山带发生强烈的陆内造山运动(Dong et al., 2011a, 2016b, 2021),在北秦岭构造带发育大量与该陆内造山作用有关的晚中生代(~158~130 Ma与~120~100 Ma)花岗岩体(张国伟等, 2001; Dong et al., 2011a, 2021; 王晓霞等, 2011; Wang et al., 2013, 2015),该陆内造山事件与花岗岩浆作用可能导致了涝峪宽坪岩群二云母石英片岩样品的黑云母与白云母Rb-Sr同位素体系发生重置,进而记录了两期更年轻的Rb-Sr等时线年龄(~155 Ma与~110 Ma),它们同样为后期构造热事件的结果。这两期年龄目前还没有在其它区域的宽坪岩群中报道,它们可能对应张维吉等(1988)在莽岭马河地区研究工作指出的宽坪岩群南北向构造形成的时代。

综上所述,宽坪岩群整体经历了绿片岩至角闪岩相变质作用,发生的区域变质作用时间可能为~440 Ma,并在随后的构造热事件中发生了多期构造变形叠加(张维吉, 1987; 闫全人等, 2008; Dong et al., 2018)。

6.3 构造意义

前人对于宽坪岩群的变质作用研究显示,桐柏地区宽坪岩群经历了顺时针的变质P-T轨迹(Liu et al., 2011),洛南红土岭宽坪岩群含石榴子石石英片岩同样经历了顺时针的变质作用P-T轨迹(王海杰

等, 2021) (图 14)。由于顺时针的变质作用 $P-T$ 轨迹与碰撞造山地壳增厚以及造山带后期的伸展抬升的过程有关(England et al., 1984; Thompson et al., 1984; Harley, 1989), 因而宽坪岩群的变质作用与秦岭造山带 $\sim 440\sim 390$ Ma 的碰撞造山作用有关。Liu 等(2011)认为宽坪岩群记录的 ~ 440 Ma 区域变质作用与二郎坪弧后盆地的消减有关, 即大洋岩石圈在弧-陆碰撞前向南俯冲至二郎坪弧下所致, 这与 Xue 等(1996a, 1996b)提出的构造模型相一致。值得注意的是, 宽坪岩群经历的该期变质作用时代与秦岭杂岩中变沉积岩发生强烈深熔作用的时代一致(Liu et al., 2011; 张建新等, 2011; 向华等, 2014; Mao et al., 2017; Sun et al., 2019; Zhao et al., 2020), 而该深熔作用事件被认为与商丹洋闭合以及之后大陆碰撞导致的地壳加厚和热驰豫有关(Dong et al., 2011a, 2011c; Zhao et al., 2020)。宽坪岩群 ~ 440 Ma 的变质作用与秦岭造山带北秦岭构造带的碰撞造山和地壳加厚有关。

宽坪岩群 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 和 Rb-Sr 定年结果(张宗清等, 1994; 闫全人等, 2008; Dong et al., 2018)指示在该造山作用之后至 ~ 350 Ma 期间, 北秦岭构造带进入抬升阶段(Dong et al., 2018)。在 324–300 Ma 期间宽坪岩群经历了一期构造热事件, 其与古特提斯洋的向北俯冲相对应。在中生代早期, 南秦岭构造带西部广泛发育有 245 \sim 200 Ma 的同碰撞和后碰撞花岗岩(张成立等, 2008; Wang et al., 2015), 结合 ~ 200 Ma 的高压麻粒岩(李三忠等, 2000; Liao et al., 2021), 表明扬子板块与南秦岭构造带碰撞以及勉略洋的闭合。随后晚中生代秦岭造山带开始转变为陆内造山运动, 整个秦岭造山带由早中侏罗世碰撞后垮塌转变为晚侏罗世到早白垩世的挤压变形, 北倾的褶皱和断裂标志着北秦岭构造带在侏罗纪后向南逆冲, 华北板块沿鲁山-舞阳断裂带进行南向陆内俯冲(Dong et al., 2011a, 2016b, 2021), 伴随着秦岭地区晚中生代岩浆活动(158 \sim 130 Ma 以及 120 \sim 100 Ma)(张国伟等, 2001; Dong et al., 2011a, 2021; 王晓霞等, 2011; Wang et al., 2013; Wang et al., 2015; Xue et al., 2022)。本次研究中的糜棱岩化含金云母大理岩可能与该期晚中生代发生的强烈陆内造山运动有关, 该构造事件与岩浆活动可能导致涝峪地区宽坪岩群中云母石英片岩的部分云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 和 Rb-Sr 体系受到热重置并记录了 ~ 155 与 ~ 110 Ma 较年轻的等时线年龄。

7 结论

(1) 黑云母 Ti 温度计和多硅白云母压力计计算得到涝峪地区宽坪岩群中二云母石英片岩的峰期变质温压条件为 304 \sim 495 °C/1.9 \sim 7.8 kbar 之间(平均温压条件为 437 °C/4.1 kbar), 含石榴子石二云母石英片岩的变质温度为 652 \sim 683 °C。 $P-T$ 视剖面图得到二云母石英片岩的变质温压条件为 400 \sim 480 °C 和 2 \sim 10 kbar, 而含石榴子石二云母石英片岩的变质温压条件为 645 \sim 680 °C/8 \sim 9 kbar。

(2) 涝峪地区宽坪岩群中二云母石英片岩和含石榴子石二云母石英片岩共记录了三期等时线年龄, 分别为 ~ 290 Ma、 ~ 155 Ma 和 ~ 110 Ma 的年龄。

(3) 三组年龄都代表了后期构造热事件的时代, 其中 ~ 290 Ma 构造热事件与古特提斯洋向北俯冲相对应, 而 ~ 155 和 ~ 110 Ma 的等时线年龄可能与中生代时期北秦岭构造带发生强烈的变形和花岗岩岩浆活动导致的热重置有关。

参考文献(References):

- 陈龙龙, 唐利, 沈彦谋, 等. 秦岭造山带栾川 Mo-W 矿集区和柞水-山阳 Cu-Mo 矿集区斑岩型矿床成矿差异性对比[J]. 西北地质, 2024, 57(2): 67–89.
- CHEN Longlong, TANG Li, SHEN Yanmou, et al. Comparison on Metallogenetic Differences of Porphyry Deposits between Luanchuan Mo-W and Zhashui-Shanyang Cu-Mo Ore-clusters in Qinling Orogenic Belt: Constraints of Magmatic Source and Metallogenetic Conditions[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(2): 67–89.
- 陈能松, 韩郁菁, 游振东, 等. 豫西东秦岭造山带核部岩群全岩 Sm-Nd, Rb-Sr 和单晶锆石 $\sim (207)\text{Pb}-\sim (206)\text{Pb}$ 计时及其地壳演化[J]. 地球化学, 1991, 20(3): 219–228.
- CHEN Nengsong, HAN Yuqing, YOU Zhendong, et al. Whole-rock Sm-Nd, Rb-Sr, and single grain zircon Pb-Pb dating of group rocks from the interior of the Qinling orogenic belt, Western Henan and its crustal evolution[J]. Geochemica, 1991, 20(3): 219–228.
- 丁丽雪, 马昌前, 李建威, 等. 华北克拉通南缘蓝田和牧护关花岗岩体: LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 地球化学, 2010, 39(5): 401–413.
- DING Lixue, MA Changqian, LI Jianwei, et al. LA-ICPMS zircon U-Pb ages of the Lantian and Muhuguan granitoid plutons, southern margin of the North China craton: Implications for tectonic setting[J]. Geochimica, 2010, 39(5): 401–413.
- 第五春荣, 孙勇, 刘良, 等. 北秦岭宽坪岩群的解体及新元古代 N-MORB[J]. 岩石学报, 2010, 26(7): 2025–2038.

- DIWU Chunrong, SUN Yong, LIU Liang, et al. The disintegration of Kuanping Group in North Qinling orogenic belts and Neo-proterozoic N-MORB[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(7): 2025–2038.
- 胡娟. 桐柏北部宽坪群变质作用研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2010.
- HU Juan. Study on metamorphism of the KuanPing Group, northern Tongba[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2010.
- 李康宁, 汤庆艳, 栾晓刚, 等. 西秦岭三叠纪大河坝组砂岩构造背景与物质来源[J]. 西北地质, 2024, 57(3): 113–127.
- LI Kangning, TANG Qingyan, LUAN Xiaogang, et al. Tectonic Setting and Provenance of Sandstones from Triassic Daheba Formation in the West Qinling Orogenic Belt[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(3): 113–127.
- 李靠社. 陕西宽坪岩群变基性熔岩锆石 U-Pb 年龄[J]. *陕西地质*, 2002, 20(1): 72–78.
- LI KaoShe. Zircon U-Pb age of meta-basic lava from the Kuanping Rock Group, Shaanxi Province[J]. *Geology of Shaanxi*, 2002, 20(1): 72–78.
- 李三忠, 张国伟, 李亚林, 等. 勉县地区勉略带内麻粒岩的发现及构造意义[J]. *岩石学报*, 2000, 16(2): 220–226.
- LI Sanzhong, ZHANG Guowei, LI Yalin, et al. Discovery of granulite in the Mianxian-Lueyang suture zone, Mianxian area and its tectonic significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2000, 16(2): 220–226.
- 刘良, 陈丹玲, 王超, 等. 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, 2009, 39(3): 472–479.
- LIU Liang, CHEN Danling, WANG Chao, et al. New progress on geochronology of high-pressure/ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the South Altyn Tagh, the North Qaidam and the North Qinling orogenic, NW China and their geological significance[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2009, 39(3): 472–479.
- 刘良, 廖小莹, 张成立, 等. 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*, 2013, 29(5): 1634–1656.
- LIU Liang, LIAO Xiaoying, ZHANG Chengli, et al. Multi-metamorphic timings of HP-UHP rocks in the North Qinling and their geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(5): 1634–1656.
- 马大铨, 李志昌, 肖志发. 鄂西崆岭岩群的组成, 时代及地质演化[J]. 地球学报: 中国地质科学院院报, 1997, 18(3): 233–241.
- MA Daquan, LI Zhichang, XIAO Zhifa. The constitute, geochronology and geologic evolution of the Kongling group, western Hubei[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1997, 18(3): 233–241.
- 秦海鹏, 吴才来, 武秀萍, 等. 秦岭造山带蟠岭花岗岩锆石 LA-ICP-MSU-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质论评*, 2012, 58(4): 783–793.
- QIN Haipeng, WU Cailai, WU Xiuping, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb ages and implications for tectonic setting of the Mangling granitoid plutons in Qinling Orogen Belt[J]. *Geological Review*, 2012, 58(4): 783–793.
- 冉亚洲, 陈涛, 梁文天, 等. 西秦岭郎木寺组火山岩锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 西北地质, 2024, 57(1): 110–121.
- RAN Yazhou, CHEN Tao, LIANG Wentian, et al. Zircon U-Pb Age of Volcanic Rocks from the Langmusi Formation in the Western Qinling Mountains and Its Tectonic Significance[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(1): 110–121.
- 陕西省地质局区测队. 东江口幅 I-49-19 1/20 万地质图矿产图说明书[DS]. 全国地质资料馆, 1966.
- 陕西地质局 13 队. 西安幅 I-49-13 1/20 万地质矿产图及其说明书[DS]. 全国地质资料馆, 1972.
- 魏春景, 朱文萍. 多硅白云母地质压力计的研究进展[J]. *地质通报*, 2007, 26(9): 1123–1130.
- WEI Chunjing, ZHU Wenping. Progress in the study of phengite geobarometry[J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(9): 1123–1130.
- 王汉辉, 唐利, 杨勃畅, 等. 东秦岭黄水庵碳酸岩型 Mo-REE 矿床方解石地球化学特征和氟碳铈矿 U-Th-Pb 年龄及其意义. 西北地质, 2023, 56(1): 48–62.
- WANG Hanhui, TANG Li, YANG Bochang, et al. Geochemical Characteristics of Calcite and Bastnäsite U-Th-Pb Age of the Huangshui 'an Carbonatite-hosted Mo-REE Deposit, Eastern Qinling. Northwestern Geology, 2023, 56(1): 48–62.
- 王宗起, 闫臻, 王涛, 等. 秦岭造山带主要疑难地层时代研究的新进展[J]. *地球学报*, 2009, 30(5): 561–570.
- WANG Zongqi, YAN Zhen, WANG Tao, et al. New advances in the study on ages of metamorphic strata in the Qinling orogenic belt[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2009, 30(5): 561–570.
- 王晓霞, 王涛, 齐秋菊, 等. 秦岭南中生代花岗岩时空分布, 成因演变及构造意义[J]. *岩石学报*, 2011, 27(6): 1573–1593.
- WANG Xiaoxia, WANG Tao, QI Qiuju, et al. Temporal-spatial variations, origin and their tectonic significance of the Late Mesozoic granites in the Qinling, Central China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(6): 1573–1593.
- 王海杰, 陈丹玲, 任云飞, 等. 北秦岭构造带与华北板块关系探讨: 来自宽坪岩群变碎屑岩锆石 U-Pb 年代学与变质作用证据[J]. *岩石学报*, 2021, 37(5): 1489–1507.
- WANG HaiJie, CHEN DanLing, REN YunFei, et al. The relationship between the North Qinling Belt and the North China Craton: Constrains from zircon U-Pb geochronology and metamorphism of metaclastic rocks from the Kuanping Group[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2021, 37(5): 1489–1507.
- 肖思云, 张维吉, 宋子季, 等. 北秦岭变质地层[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.
- 向华, 钟增球, 李晔, 等. 北秦岭造山带早古生代多期变质与深熔作用: 锆石 U-Pb 年代学证据[J]. *岩石学报*, 2014, 30(8): 2421–2434.
- XIANG Hua, ZHONG ZengQiu, LI Ye, et al. Early Paleozoic polymetamorphism and anatexis in the North Qinling orogen: Evidence from U-Pb zircon geochronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(8): 2421–2434.
- 杨阳, 王晓霞, 柯昌辉, 等. 北秦岭蟠岭岩体的锆石 U-Pb 年龄, 地球化学及其演化[J]. *矿床地质*, 2014, 33(1): 14–36.
- YANG Yang, WANG Xiaoxia, KE Changhui, et al. Zircon U-Pb ages, geochemistry and evolution of Mangling pluton in North Qinling Mountains[J]. *Mineral Deposits*, 2014, 33(1): 14–36.

- 闫全人, 王宗起, 闫臻, 等. 秦岭造山带宽坪群中的变铁镁质岩的成因、时代及其构造意义 [J]. *地质通报*, 2008, 27(9): 1475–1492.
- YAN Quanren, WANG Zongqi, YAN Zhen, et al. Origin, age and tectonic implications of metamorphic rocks in the Kuanping Group of the Qinling orogenic belt, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(9): 1475–1492.
- 张维吉. 宽坪群的层序划分及时代归属 [J]. 西安地质学院学报, 1987, 9(1): 15–29.
- ZHANG Weiji. The subdivision of the Kuanping Group and its geological date [J]. *Journal of Xi'an College of Geology*, 1987, 9(1): 15–29.
- 张维吉, 马志和. 陕西蟒岭马河地区宽坪群多期褶皱变形 [J]. 西安地质学院学报, 1988, 10(4): 33–42.
- ZHANG Weiji, MA Zhihe. The polydeformation of Kuanping Group at Mahe of Mangling, Shaanxi Province [J]. *Journal of Xi'an College of Geology*, 1988, 10(4): 33–42.
- 张维吉, 李育敬. 陶湾群层序及时代研究 [J]. 西安地质学院学报, 1989, 11(2): 1–10.
- ZHANG Weiji, LI Yujing. The sequences and the age of the Taowan Group [J]. *Journal of Xi'an College of Geology*, 1989, 11(2): 1–10.
- 张宗清, 刘敦一, 付国民. 北秦岭变质地层同位素年代研究 [M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- 张成立, 韩松. 陕西商州地区丹凤变质火山岩的地球化学特征 [J]. 地质科学, 1994, 29(4): 384–392.
- ZHANG Chengli, HAN Song. The geochemical characteristics of Danfeng metavolcanic rocks in Shangzhou area, Shaanxi province [J]. *Chinese Journal of Geology*, 1994, 29(4): 384–392.
- 张宗清, 张旗. 北秦岭南元古代宽坪蛇绿岩中变质基性火山岩的地球化学特征 [J]. *岩石学报*, 1995, 11(S1): 165–177.
- ZHANG Zongqin, ZHANG Qi. Geochemistry of metamorphosed late Proterozoic Kuanping ophiolite in the northern Qinling, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1995, 11(S1): 165–177.
- 张国伟, 孟庆任, 赖绍聪. 秦岭造山带的结构构造 [J]. 中国科学B辑, 1995, 25(9): 994–1003.
- ZHANG Guowei, MENG Qingren, LAI Shaocong. Structural structure of Qinling orogenic belt [J]. *Science in China (Series B)*, 1995, 25(9): 994–1003.
- 张国伟, 张宗清, 董云鹏. 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*, 1995, 11(2): 101–114.
- ZHANG Guowei, ZHANG Zongqing, DONG Yunpeng. Nature of main tectono-lithostratigraphic units of the Qinling orogen: implications for the tectonic evolution [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1995, 11(2): 101–114.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- 张成立, 王涛, 王晓霞. 秦岭造山带早中生代花岗岩成因及其构造环境 [J]. *高校地质学报*, 2008, 14(3): 304–316.
- ZHANG Chengli, WANG Tao, WANG Xiaoxia. Origin and tectonic setting of the Early Mesozoic granitoids in Qinling orogenic belt [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2008, 14(3): 304–316.
- 张建新, 于胜尧, 孟繁聪. 北秦岭造山带的早古生代多期变质作用 [J]. *岩石学报*, 2011, 27(4): 1179–1190.
- ZHANG Jianxin, YU Shengyao, MENG Fancong. Polyphase Early Paleozoic metamorphism in the northern Qinling orogenic belt [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(4): 1179–1190.
- Chen D L, Liu L, Sun Y, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating for high-pressure basic granulite from North Qinling and its geological significance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49: 2296–2304.
- Capitani D C, Petrakakis K. The computation of equilibrium assemblage diagrams with Theriau/Domino software [J]. *American mineralogist*, 2010, 95(7): 1006–1016.
- Cao H H, Li S Z, Zhao S J, et al. 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*, 2016, 279: 1–16.
- Cheng H, Zhang C, Vervoort J D, et al. Timing of eclogite facies metamorphism in the North Qinling by U–Pb and Lu–Hf geochronology [J]. *Lithos*, 2012, 136: 46–59.
- Diwu C R, Sun Y, Lin C L, et al. LA-(MC)-ICPMS U-Pb zircon geochronology and Lu-Hf isotope compositions of the Taihua group on the southern margin of the North China Craton [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55: 2557–2571.
- Dong Y P, Zhang G W, Neubauer F, et al. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: review and synthesis [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011a, 41(3): 213–237.
- Dong Y P, Zhang G W, Hauzenberger C, et al. Palaeozoic tectonics and evolutionary history of the Qinling orogen: evidence from geochemistry and geochronology of ophiolite and related volcanic rocks [J]. *Lithos*, 2011b, 122(1–2): 39–56.
- Dong Y P, Genser J, Neubauer F, et al. U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints on the exhumation history of the North Qinling terrane, China [J]. *Gondwana Research*, 2011c, 19(4): 881–893.
- Dong Y P, Yang Z, Liu X M, et al. Neoproterozoic amalgamation of the Northern Qinling terrain to the North China Craton: Constraints from geochronology and geochemistry of the Kuanping ophiolite [J]. *Precambrian Research*, 2014, 255: 77–95.
- Dong Y P, Santosh M. Tectonic architecture and multiple orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China [J]. *Gondwana Research*, 2016a, 29(1): 1–40.
- Dong Y P, Yang Z, Liu X M, et al. Mesozoic intracontinental orogeny in the Qinling Mountains, central China [J]. *Gondwana Research*, 2016b, 30: 144–158.
- Dong Y P, Sun S S, Yang Z, et al. Neoproterozoic subduction-accretionary tectonics of the South Qinling Belt, China [J]. *Precambrian Research*, 2017, 293: 73–90.
- Dong Y P, Neubauer F, Genser J, et al. Timing of orogenic exhumation processes of the Qinling orogen: Evidence from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating [J]. *Tectonics*, 2018, 37(10): 4037–4067.
- Dong Y P, Sun S S, Santosh M, et al. Central China orogenic belt and amalgamation of East Asian continents [J]. *Gondwana Research*, 2021, 100: 131–194.
- Dong Y P, Sun S S, Santosh M, et al. Cross Orogenic belts in Cent-

- ral China: Implications for the tectonic and paleogeographic evolution of the east Asian continental collage[J]. *Gondwana Research*, 2022, 109: 18–88.
- England P C, Thompson A B. Pressure—temperature—time paths of regional metamorphism I. Heat transfer during the evolution of regions of thickened continental crust[J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 894–928.
- Gao S, Zhang B R, Li Z J. Geochemical evidence for Proterozoic continental arc and continental-margin rift magmatism along the northern margin of the Yangtze Craton, South China[J]. *Precambrian Research*, 1990, 47(3–4): 205–221.
- Gao S, Ling W, Qiu Y, et al. Contrasting geochemical and Sm-Nd isotopic compositions of Archean metasediments from the Kongling high-grade terrain of the Yangtze craton: evidence for cratonic evolution and redistribution of REE during crustal anatexis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(13–14): 2071–2088.
- Gao S, Yang J, Zhou L, et al. Age and growth of the Archean Kongling terrain, South China, with emphasis on 3.3 Ga granitoid gneisses[J]. *American Journal of Science*, 2011, 311(2): 153–182.
- Gao S, Zhang B R, Wang D P, et al. Geochemical evidence for the Proterozoic tectonic evolution of the Qinling Orogenic Belt and its adjacent margins of the North China and Yangtze cratons[J]. *Precambrian Research*, 1996, 80(1–2): 23–48.
- Gorobovskiy L, Alard O. Optimisation of laser and mass spectrometer parameters for the in situ analysis of Rb/Sr ratios by LA-ICP-MS/MS[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2020, 35(10): 2322–2336.
- Guo J L, Gao S, Wu Y B, et al. 3.45 Ga granitic gneisses from the Yangtze Craton, South China: implications for Early Archean crustal growth[J]. *Precambrian Research*, 2014, 242: 82–95.
- Harley S L. The origins of granulites: a metamorphic perspective[J]. *Geological Magazine*, 1989, 126(3): 215–247.
- Henry D J, Guidotti C V, Thomson J A. The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites: Implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms[J]. *American mineralogist*, 2005, 90(2–3): 316–328.
- He Y H, Zhao G C, Sun M, et al. SHRIMP and LA-ICP-MS zircon geochronology of the Xiong'er volcanic rocks: implications for the Paleo-Mesoproterozoic evolution of the southern margin of the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 2009, 168(3–4): 213–222.
- Holland T J B, Powell R. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1998, 16(3): 309–343.
- Holland T, Powell R. Activity–composition relations for phases in petrological calculations: an asymmetric multicomponent formulation[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2003, 145: 492–501.
- Holland T J B, Powell R. 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*, 2011, 29(3): 333–383.
- Hu J, Liu X C, Chen L Y, et al. A ~2.5 Ga magmatic event at the northern margin of the Yangtze craton: Evidence from U-Pb dating and Hf isotope analysis of zircons from the Douling Group in the South Qinling orogen[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58: 3564–3579.
- Lai S, Zhang G, Yang R. Identification of the island-arc magmatic zone in the Lianghe-Raofeng-Wuliba area, south Qinling and its tectonic significance[J]. *Science in China Series D:Earth Sciences*, 2000, 43: 69–81.
- Li S, Hou Z, Yang Y, et al. Timing and geochemical characters of the Sanchazi magmatic arc in Mianlue tectonic zone, South Qinling[J]. *Science in China Series D:Earth Sciences*, 2004, 47(4): 317–328.
- Liu X C, Jahn B M, Hu J, et al. 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*, 2011, 29(9): 979–1002.
- Liu X C, Jahn B M, Li S Z, et al. U - Pb zircon age and geochemical constraints on tectonic evolution of the Paleozoic accretionary orogenic system in the Tongbai orogen, central China[J]. *Tectonophysics*, 2013, 599: 67–88.
- Liu Q, Wu Y B, Wang H, et al. Zircon U–Pb ages and Hf isotope compositions of migmatites from the North Qinling terrane and their geological implications[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2014, 32(2): 177–193.
- Liu L, Liao X, Wang Y, et al. 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*, 2016, 159: 58–81.
- Liao X Y, Liu L, Zhai M G, et al. Metamorphic evolution and Petrogenesis of garnet–corundum silica–undersaturated metapelitic granulites: A new case study from the Mianlue Tectonic Zone of South Qinling, Central China[J]. *Lithos*, 2021, 392: 106154.
- Massonne H J, Szpurka Z. Thermodynamic properties of white micas on the basis of high-pressure experiments in the systems k2o-mgo-al2o3-sio2-h2o and k2o-feo-al2o3-sio2-h2o[J]. *Lithos*, 1997, 41(1–3): 229–250.
- Mao X H, Zhang J X, Yu S Y, et al. 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*, 2017, 60: 943–957.
- Ratschbacher L, Hacker B R, Calvert A, et al. Tectonics of the Qinling (Central China): tectonostratigraphy, geochronology, and deformation history[J]. *Tectonophysics*, 2003, 366(1–2): 1–53.
- Smey A J, Greenwood L V, Holland T J B. Garnet–chloritoid–kyanite assemblages: eclogite facies indicators of subduction constraints in orogenic belts[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2010, 28(7): 753–768.
- Shi Y, Yu J H, Santosh M. Tectonic evolution of the Qinling orogenic belt, Central China: new evidence from geochemical, zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes[J]. *Precambrian Research*, 2013, 231: 19–60.
- Sun S, Dong Y, He D, et al. 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*, 2019, 176(6): 1218–1231.
- Thompson A B, England P C. Pressure—temperature—time paths of regional metamorphism II. Their inference and interpretation using mineral assemblages in metamorphic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 929–955.
- Wang C Y, Alard O, Lai Y J, et al. Advances in in-situ Rb-Sr dating using LA-ICP-MS/MS: applications to igneous rocks of all ages and to the identification of unrecognized metamorphic events [J]. *Chemical Geology*, 2022, 610: 121073.
- Wang X L, Jiang S Y, Dai B Z. Melting of enriched Archean subcontinental lithospheric mantle: Evidence from the ca. 1760 Ma volcanic rocks of the Xiong'er Group, southern margin of the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 2010, 182(3): 204–216.
- Wang Z Q, Gao L D, Wang T, et al. Microfossils from the siltstones and muddy slates: Constraint on the age of the Taowan Group in the Northern Qinling Orogenic Belt, Central China[J]. *Science in China Series D:Earth Sciences*, 2008, 51: 172–180.
- Wang H, Wu Y B, Gao S, et al. Eclogite origin and timings in the North Qinling terrane, and their bearing on the amalgamation of the South and North China Blocks[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2011, 29(9): 1019–1031.
- Wang X X, Wang T, Zhang C L. Neoproterozoic, Paleozoic, and Mesozoic granitoid magmatism in the Qinling Orogen, China: Constraints on orogenic process[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 72: 129–151.
- Wang X X, Wang T, Zhang C L. Granitoid magmatism in the Qinling orogen, central China and its bearing on orogenic evolution[J]. *Science China Earth Sciences*, 2015, 58: 1497–1512.
- Whitney D L, Evans B W. Abbreviations for names of rock-forming minerals[J]. *American mineralogist*, 2010, 95(1): 185–187.
- Wu Y B, Zheng Y F. Tectonic evolution of a composite collision orogen: an overview on the Qinling–Tongbai–Hong'an–Dabie–Sulu orogenic belt in central China[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(4): 1402–1428.
- White R W, Powell R, Holland T J B, et al. The effect of TiO₂ and Fe₂O₃ on metapelitic assemblages at greenschist and amphibolite facies conditions: mineral equilibria calculations in the system K₂O-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O-TiO₂-Fe₂O₃[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2000, 18(5): 497–511.
- White R W, Powell R, Johnson T E. The effect of Mn on mineral stability in metapelites revisited: New a-x relations for manganese - bearing minerals[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2014a, 32(8): 809–828.
- White R W, Powell R, Holland T J B, et al. New mineral activity–composition relations for thermodynamic calculations in metapelitic systems[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2014b, 32(3): 261–286.
- Wu C M, Chen H X. Revised Ti-in-biotite geothermometer for ilmenite-or rutile-bearing crustal metapelites[J]. *Science Bulletin*, 2015, 60: 116–121.
- Woodhead J D, Hergt J M. Strontium, neodymium and lead isotope analyses of NIST glass certified reference materials: SRM 610, 612, 614[J]. *Geostandards Newsletter*, 2001, 25(2–3): 261–266.
- Xu J, Wang Q, Yu X. Geochemistry of high-Mg andesites and adakitic andesite from the Sanchazi block of the Mian-Lue ophiolitic melange in the Qinling Mountains, central China: evidence of partial melting of the subducted Paleo-Tethyan crust[J]. *Geochemical Journal*, 2000, 34(5): 359–377.
- Xue F, Lerch M F, Kröner A, et al. Tectonic evolution of the East Qinling Mountains, China, in the Palaeozoic: a review and new tectonic model[J]. *Tectonophysics*, 1996a, 253(3–4): 271–284.
- Xue F, Kröner A, Reischmann T, et al. 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*, 1996b, 153(3): 409–417.
- Xue Y Y, Liu H Y, Wang Z Y, et al. Reworking of the Juvenile Crust in the Late Mesozoic in North Qinling, Central China. *Journal of Earth Science*, 2022, 33(3): 623–641.
- Zhai X M, Day H W, Hacker B R, et al. Paleozoic metamorphism in the Qinling orogen, Tongbai Mountains, central China[J]. *Geology*, 1998, 26(4): 371–374.
- Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Zircon U–Pb age and Hf isotope evidence for 3.8 Ga crustal remnant and episodic reworking of Archean crust in South China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006a, 252(1–2): 56–71.
- Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Zircon isotope evidence for ≥ 3.5 Ga continental crust in the Yangtze craton of China[J]. *Precambrian Research*, 2006b, 146(1–2): 16–34.
- Zhang Q Q, Gao X Y, Chen R X, et al. Granulites record the tectonic evolution from collisional thickening to extensional thinning of the Tongbai orogen in central China[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2020, 38(3): 265–295.
- Zhao T, Zhai M, Xia B, et al. Zircon U-Pb SHRIMP dating for the volcanic rocks of the Xiong'er Group: Constraints on the initial formation age of the cover of the North China Craton[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49: 2495–2502.
- Zhao G C, He Y H, Sun M. The Xiong'er volcanic belt at the southern margin of the North China Craton: petrographic and geochemical evidence for its outboard position in the Paleo-Meso-proterozoic Columbia Supercontinent[J]. *Gondwana research*, 2009, 16(2): 170v181.
- Zhao S J, Li S Z, Liu X, et al. The northern boundary of the Proto-Tethys Ocean: Constraints from structural analysis and U–Pb zircon geochronology of the North Qinling Terrane[J]. *Journal of Asian earth sciences*, 2015, 113: 560–574.
- Zhao Y H, Gou L L, Long X P, et al. Zircon U–Pb geochronology and clockwise P–T evolution of garnet-bearing migmatites from the Qinling group in the Weiziping area of the Qinling Orogen, Central China: Implications for thermal relaxation after crustal thickening[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2020, 195: 104354.
- Zhu X Y, Chen F, Li S Q, et al. 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*, 2011, 20(1): 194–204.