第 59 卷 第 5 期
2026 年（总 249 期）

西 北 地 质
NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 59 No. 5
2026(Sum249)

引文格式：吴泽静，廖小莹，刘良，等. 北秦岭寨根地区峡河岩群的变质作用与原岩形成时代研究[J]. 西北地质，2026，59(5)：303−318. DOI：10.12401/j.nwg.2025087

Citation：WU Zejing，LIAO Xiaoying，LIU Liang，et al. Metamorphism and Formation Age of the Xiahe Group in the Zhaigen Area of North Qinling Belt[J]. Northwestern Geology，2026，59(5)：303−318. DOI：10.12401/j.nwg.2025087

北秦岭寨根地区峡河岩群的变质作用与原岩形成时代研究

吴泽静，廖小莹*，刘良，PAK Sang Wan，朱博康，王戈，李鑫，盖永升，马拓

（大陆演化与早期生命全国重点实验室，西北大学地质学系，陕西 西安 710069）

摘 要：峡河岩群是北秦岭构造带中的一套以碎屑−火山碎屑沉积岩系为主的低级变质岩系，变质级别明显有别于秦岭杂岩。然而，目前大多数研究者把峡河岩群归并为秦岭杂岩的一部分，而对其系统解析较为薄弱，特别是变质岩石学分析十分缺乏，从而影响对峡河岩群的变质特征、形成时代和构造演化历史的认识。笔者对北秦岭寨根地区峡河岩群中的寨根组和界牌组的不同岩性段的代表岩石，进行了详细的岩相学、矿物化学研究，利用矿物温压计确定寨根组普遍经历了 P=5.5～7.5 kbar 和 T=572～607 ℃ 的中压角闪岩相变质作用，界牌组则经历了 P=1.6～2.6 kbar 和 T=443～532 ℃ 的绿片岩相变质作用，两者变质级别明显不同。碎屑锆石 U-Pb 年代学研究表明，寨根地区峡河岩群寨根组原岩的最大沉积时代为～1.2 Ga，界牌组中至少存在两套原岩形成时代不同的岩石类型。其中，最大沉积时代较早（～1.0 Ga）的大部分界牌组岩石与寨根组的沉积时代和物源供给相似，原岩最大沉积时限较晚（～0.5 Ga）的少量界牌组岩石中出现 0.6～0.8 Ga 的碎屑锆石，显示明显不同的物源供给。寨根组含榴云母石英片岩中独居石 U-Pb 定年获得了（475±3）Ma，（432±2）Ma 和（403±1）Ma 等 3 组变质年龄记录，其中（475±3）Ma 可能代表了近峰期变质时代，432～403 Ma 则代表了退变质时代，结合寨根组升温升压的进变质 PT 轨迹，共同表明寨根地区峡河岩群的寨根组可能经历了北秦岭早古生代陆壳俯冲后的陆−陆碰撞地壳加厚过程。对比岩石类型，变质温压条件以及原岩形成时代，寨根地区峡河岩群中原划的寨根岩组和界牌岩组，可能并非密切共生的地层单位，而更可能是在俯冲碰撞过程中构造并置在一起的不同岩片。

关键词：峡河岩群；变质 PT 条件；碎屑锆石 U-Pb 年代学；北秦岭构造带

中图分类号：P588.3 **文献标志码**：A **文章编号**：1009-6248(2026)05-0303-16

Metamorphism and Formation Age of the Xiahe Group in the Zhaigen Area of North Qinling Belt

WU Zejing, LIAO Xiaoying*, LIU Liang, PAK Sang Wan, ZHU Bokang, WANG Ge, LI Xin, GAI Yongsheng, MA Tuo

（State Key Laboratory of Continental Evolution and Early Life, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China）

Abstract：The Xiahe Group is a low-grade metamorphic rock series mainly composed of clastic-volcanic-sedi-

收稿日期：2024-02-28；**修回日期**：2025-05-22；**责任编辑**：曹佰迪

基金项目：国家自然科学基金项目面上项目（42272059）和重点项目（42030307）联合资助。

作者简介：吴泽静（1999–），女，硕士研究生，矿物学岩石学矿床学专业。E−mail：1241807936@qq.com。

* **通讯作者**：廖小莹（1991–），女，博士，副教授，主要从事变质地质学及造山带演化研究。E−mail：xyliao@nwu.edu.cn。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

mentary sequences in the North Qinling belt. It exhibits distinct metamorphic characteristics differentiating it from the adjacent Qinling Complex. Despite this petrogenetic disparity, previous studies have commonly considered the Xiahe Group as part of the Qinling Complex, resulting in insufficient systematic research, especially metamorphic petrological stuides remain underexplored, which affects the understanding of the metamorphic characteristics, formation age, and tectonic evolution history of the Xiahe Group. In this study, geothermometers show that the Zhaigen Formation has generally undergone medium pressure amphibolite facies metamorphism at 5.5–7.5 kbar and 572–607 ℃, while the Jiepai Formation has undergone low-grade greenschist facies metamorphism at 1.6–2.6 kbar and 443–532 ℃. Detrital zircon U-Pb dating constrains the maximum sedimentary age of the Zhaigen Formation is ～1.0 Ga, while the maximum sedimentary age of the Jiepai Formation is～0.5 Ga. In addition, U-Pb dating of monazite in the garnet quartz schist from the Zhaigen Formation obtained three metamorphic age clusters: a near-peak metamorphic event at (475±3)Ma, followed by retrogressive metamorphism between 432–403 Ma. The obtained geochronological framework, coupled with the reconstructed prograde *PT* trajectory exhibiting simultaneous temperature-pressure increase, suggests the Zhaigen Formation underwent crustal thickening processes. This tectonothermal event likely corresponds to Early Paleozoic continental collision of the North Qinling belt. The Zhaigen and Jiepai Formations not be coexisting stratigraphic units, but more likely different slices that were juxtaposed during subduction and collision.

Keywords：Xiahe Group；metamorphic PT conditions；detrital zircon geochronology；North Qinling Belt

峡河岩群分布于豫陕交界及豫西地区的北秦岭构造带之中，是一套以沉积作用为主的碎屑–火山碎屑的低级变质片岩系(陈瑞保等，1993；裴先治等，1995；王涛等，1997)。陈瑞保等(1993)在 1∶5 万寨根幅填图中北以寨根北箭岭韧性剪切带为界，南至商丹断裂带，将寨根地区出露的一套浅变质岩系从原秦岭岩群南缘中解体出来，初建了“峡河岩群”，并划为寨根岩组和界牌岩组。峡河岩群以其低级的变质岩石类型(主要为泥质–长英质片岩及钙质片岩)有别于毗邻的秦岭杂岩高级变质岩石。随后，裴先治等(1995)在商丹地区 1∶5 万填图中也将峡河岩群从原秦岭杂岩中解体。王涛等(1997)在 1∶5 万狮子坪幅填图中沿用了这一构造地层单位名称，将原“峡河岩群”向西北延至官坡–双槐树，把发育在原秦岭岩群中部呈 NW–SE 向展布的楔形部分划为广义的“峡河岩群”(图 1b)，两侧与秦岭杂岩均呈韧性剪切相接触。然而，陆松年等(2003)对峡河岩群与秦岭杂岩的接触关系进行了野外考察，认为两者之间没有截然的断层，且两侧的岩性亦无显著差异。因此，目前大多数研究者把峡河岩群归并为秦岭杂岩中的一部分，峡河岩群与秦岭杂岩的相互关系需要进一步研究探讨。虽然前人根据地层对比等方法，将“峡河岩群”其从秦岭杂岩中划出(陈瑞保等，1993；裴先治等，1995；王涛等，1997)，但对该套构造岩石单元的原岩和变质时代一直缺乏精确的同位素定年资料。Zhao et al.(2021)对官坡–双槐树地区的峡河岩群开展了碎屑锆石年代学研究，并获得了与秦岭杂岩中副变质岩石相似的碎屑锆石年龄谱系，结合全岩地球化学以及区域资料对比，认为峡河岩群与秦岭岩群两者形成时代及环境一致或相近。目前，对峡河岩群的系统解析仍较为薄弱，特别是缺乏变质岩石学的深入分析，限制了对峡河岩群的变质特征、形成时代和构造属性的认识。

笔者系统采集了北秦岭寨根地区峡河岩群典型剖面中寨根岩组和界牌岩组不同岩性段的代表岩石，进行了详细的岩相学、矿物化学研究，分别对两岩组的变质作用温压条件进行了限定，并通过碎屑锆石年代学和独居石 U-Pb 定年研究，明确了峡河岩群的变质 *PT* 条件和原岩形成时代。综合前人的研究成果，从区域变质岩石和年代学的角度，试图深入探讨寨根地区峡河岩群不同地层单元的构造归属及地质意义。

1 区域地质背景

秦岭造山带位于华北板块和扬子板块之间，西与祁连和昆仑造山带相连，东与大别–苏鲁造山带接壤，处于中国中部地区重要的构造位置(图 1a；贾彬等，2026)。自北向南可划分为华北板块南缘、北秦岭构造带、南秦岭构造带(秦岭微板块)和扬子板块北缘 4

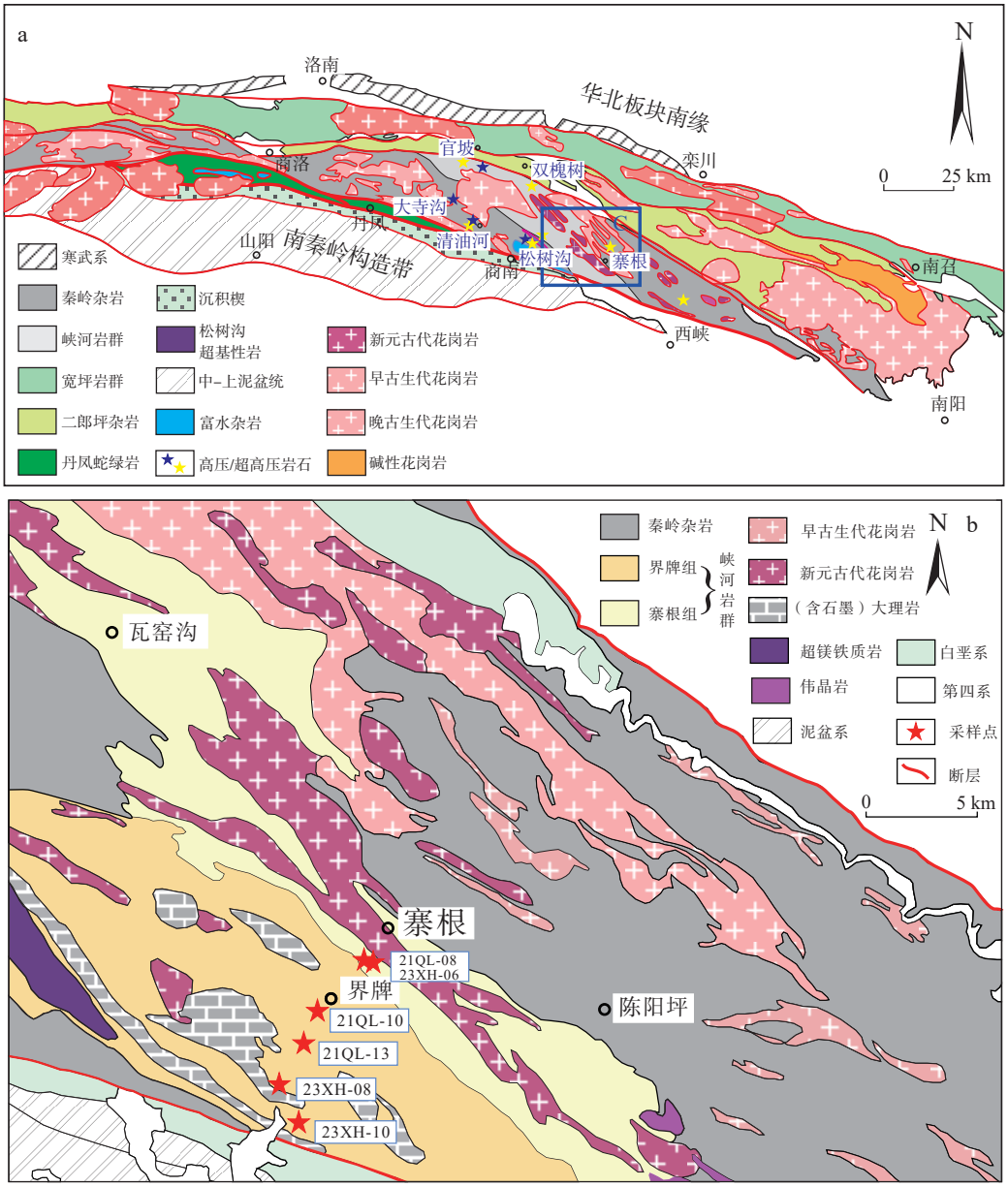


图1　北秦岭构造带和寨根地区地质简图及采样位置（据 Dong et al.，2016 修改）

Fig. 1　Geological map of the North Qinling Belt and Xiahe Group in Zhaigen area

个构造单元(张国伟等, 1995; Dong et al., 2011a; 周彬等, 2025; 杨涛等, 2026)。北秦岭构造带为商丹断裂带与洛南–栾川–方城断裂带之间的秦岭造山带北部区域, 其间又以多条断裂由北到南依次划分为宽坪岩群、二郎坪杂岩、秦岭杂岩和丹凤岩群(图 1b)。宽坪岩群位于北秦岭构造带最北部, 主要为一套陆源碎屑岩、变质火山岩和大理岩比如绿片岩–斜长角闪岩类、云母石英片岩–片麻岩类及大理岩(刘国惠等, 1993), 经历了绿片岩相–低角闪岩相的变质作用(刘国惠等, 1993)。已有的年代学和古生物学研究, 得到宽坪岩群变碎屑沉积岩形成于早古生代寒武纪—奥陶纪(Shi et al., 2013; 王宗起等, 2009)。二郎坪群主体为一套绿片岩相–低角闪岩相变质的火山–沉积岩系, 最新获得的基性火山岩和辉长–辉绿岩的形成年龄为 475～463 Ma(Dong et al., 2011b; 赵姣等, 2012)。变碎屑岩的碎屑锆石年代学研究指示其沉积时代晚于～550 Ma(杨敏等, 2016)。丹凤群位于北秦岭构造带的最南部, 商丹断裂带北部, 主体由一套绿片岩相至低角闪岩相的火山–沉积岩系组成, 具有以岛弧型火山岩为特点的镁铁质、超镁铁质岩石组合, 形成于洋内岛弧构造环境(张旗等, 1995); 西延在岩湾、关子镇、武山等地发现典型的 N-MORB 和 E-MORB 型蛇绿岩和相关的火

成岩，并确定其形成时代主体为 534～500 Ma（Dong et al., 2011b）。秦岭杂岩是北秦岭构造带的一个重要组成部分，呈透镜状夹于二郎坪和丹凤群之间，在其东段豫陕交界的丹凤–商县–西峡以北地区出露规模最大（图 1b），主要由各种片麻岩、大理岩–钙硅酸粒岩和斜长角闪岩组成，普遍出现黑云母、石墨、矽线石和石榴子石，局部出现蓝晶石等变质矿物，变形复杂且普遍遭受深熔作用（游振东等，1991；王涛等，1993）。游振东等（1991）认为秦岭杂岩由若干个构造透镜体组成，如豫陕交界处的腰庄–蛇尾透镜体，单个透镜体或可看做一个变质核杂岩。王涛等（1997）认为秦岭杂岩是限定于朱夏断裂带与商丹断裂带之间的一个巨大透镜状地质体，原称“秦岭群”，包括秦岭岩群（被峡河岩群分割成西部的峦庄块体和东部的蛇尾块体）、峡河岩群、正片麻岩、大理岩和蛇绿岩片。长期复杂的构造演化历史使得秦岭杂岩中地质记录复杂多样，其形成时代和构造属性一直存在争议。张宗清（2006）认为秦岭岩群为一套岩石地层单元，形成于古元古代。近年来，大量秦岭杂岩片麻岩中碎屑锆石的研究结果显示，不同地区的主要年龄峰值以及最小年龄集中区有所差别，主要表现为中元古代晚期—新元古代早期的峰值（杨力等，2010；Diwu et al., 2014）或新元古代早期的年龄峰值（时毓等，2009；万渝生等，2011；Shi et al., 2018），说明秦岭杂岩中片麻岩的沉积时代可能为中元代晚期—新元古代早期。此外，秦岭岩群还以局部发育新元古代花岗岩和广泛出露早古生代花岗岩为特征。北秦岭已发现的高压–超高压变质岩石分布在秦岭杂岩北部的官坡–双槐树、中部的清油河–丹凤大寺沟，以及南部的松树沟和寨根地区（图 1b），峰期变质时代为 500～490 Ma，被认为记录了早古生代北秦岭造山带的大陆深俯冲事件（Liu et al., 2016 及其参考文献）。

笔者的研究区位于秦岭杂岩的中段南缘的河南省西峡县寨根乡，是最早从原秦岭群中解体出峡河岩群的典型地区（陈瑞保等，1993；图 1c）。裴先治等（1995）在对商丹地区 1∶5 万填图中也将峡河岩群从原秦岭杂岩中解体。王涛等（1997）在狮子坪幅填图中沿用了这一构造地层单位名称，将原“峡河岩群”向西北沿至官坡–双槐树一线，将发育在秦岭岩群中部呈 NW–SE 向展布的部分扩展划为广义的“峡河岩群”（图 1b），以其低级的变质岩石类型（主要为泥质–长英质及钙质片岩）有别于毗邻的秦岭杂岩。峡河岩群原岩主体为陆源碎屑岩、泥灰岩、钙质细碎屑岩夹基性火山岩沉积建造（裴先治等，1995）。根据岩石组合及变质变形程度，陈瑞保等（1993）将寨根地区的峡河岩群由北向南划分为寨根组和界牌组，空间上两者呈渐变整合接触（图 1c）。界牌组出露西宽东窄，尖灭于商–丹断裂带，北部主要岩石类型有互层状钙质黑云石英（斜长）片岩、黑云石英（斜长）钙质片岩、黑云钙质片岩、方柱透闪钙质片岩、方柱透闪–阳起片岩夹透镜状大理岩，与寨根组呈正常构造接触；南部主要为变斑状黑云斜长片岩、黑云石英片岩夹钙质片岩。横向上呈钙质片岩–大理岩–斜长角闪（阳起）岩的相变关系，绿片岩相变质，不存在混合岩化作用。寨根组与下伏的秦岭变质杂岩以韧性剪切带相分割，其主要岩石类型有含榴二云石英片岩、含榴黑云石英片岩、含榴变粒岩、二云石英片岩、黑云斜长片岩夹薄层石英岩，属石榴子石带，局部可见浅色条带。陈瑞保等（1993）认为两个岩组反映了峡河岩群由南向北递进区域变质作用的特点。裴先治等（1996）通过对豫陕交界地区峡河岩群中斜长角闪岩的全岩 Sm-Nd 同位素分析，得出峡河岩群中基性火山岩形成时代为 1 750～1 605 Ma，认为峡河岩群时代为中元古代早期，北秦岭地区活动大陆边缘的形成可追溯至中元古代。

2 分析方法

矿物化学成分分析测试在西北大学大陆动力学国家重点实验室的 JXA-8230 型电子探针显微分析仪上完成。实验条件为加速电压为 15 kV，电子束电流为 10 nA，束斑直径为 1～5 μm，矿物标样由 SPI 公司提供，分析结果采用 ZAF 校正。

锆石的 CL 图象分析在装有英国 Gatan 公司生产的 MonoCL3+阴极银光探测仪的电子显微扫描电镜上完成。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分析在 Agilient 公司带有 ShieldTorch 的 Agilient 7500a 质谱仪上完成。LA-ICP-MS 激光剥蚀采样方式为单点剥蚀。实验前用人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST SRM610 进行仪器调试，实验中采用氦气作为剥蚀物质的载气，激光束直径为 24 μm，剥蚀深度为 20～40 μm。标准锆石 91500 为外标进行同位素比值分馏校正，每隔 6 个样品点分析一次，采用 NIST SMR610 作为外标，^{29}Si 作为内标校正。同位素比值及元素含量的数据处理采用 ICPMSDataCal（Liu et al., 2010），锆石谐和图及频

谱图用 Isoplot 程序(ver 4.0)获得(Ludwig, 2003)。

独居石 LA-ICPMS U-Pb 定年及微量元素分析在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。采用 GeoLasHD 激光剥蚀系统和 Agilent 7900 电感等离子体质谱仪联机, 以高纯 He 作为载气, 高纯 Ar 作为补偿气, 采用的激光束斑是 16 μm, 剥蚀频率为 2 Hz。分析过程中获得 U-Pb 年龄和微量元素数据, 以标准独居石 44069 作为外标进行分馏校正, 其推荐值为(424.9±0.4) Ma (Aleinikoff et al., 2006)。数据信号的积分选择、漂移校正、数值计算和微量元素校正, 使用 ICPMSDataCal(Liu et al., 2010)软件进行处理。

3　岩相学特征与矿物化学

研究区为西峡寨根–界牌峡河岩群出露的典型剖面(图 1c), 区内峡河岩群构造变形简单, 未出现混合岩化条带和深熔伟晶岩脉(图 2c～图 2f), 但穿过寨根往北则表现出构造变形复杂、混合岩化条带发育等类似秦岭杂岩的野外地质特征。该剖面的主体岩石为泥质–长英质片岩, 包括二云斜长石英片岩、(含榴)云母石英片岩、钙质黑云斜长石英片岩、黑云石英片岩夹钙质片岩(图 2), 泥质–长英质及钙质片岩均呈互层状、夹层状产出, 可见少量似层状产出的变基性岩脉体或岩墙。沿剖面自北向南采集了 2 件寨根组和 5 件界牌组不同岩性段的代表性样品(图 2)。

3.1　寨根组

含榴云母石英片岩(23XH-06、21QL-08)呈灰白色(图 2b), 鳞片变晶结构, 片状构造, 主要矿物为石英(40%～45%)、白云母(15%～20%)、黑云母(10%～15%)、斜长石(10%～15%)、石榴子石(～5%)(图 3a), 副矿物有钛铁矿、锆石、独居石和榍石。样品 23XH-06 中石榴子石、白云母含量较 21QL-08 中高, 而 21QL-08 中黑云母含量较 23XH-06 中高, 石榴子石零星出现。石榴子石呈自形–半自形, 粒度小, 粒径为 0.05～0.25 mm, 内部包裹体矿物较少; 斜长石和石英呈他形, 白云母和黑云母呈叶片状定向排列。

23XH-06 中石榴子石无包裹体, 成分以铁铝榴石为主, 其剖面显示明显的核–边成分环带特征(图 4b)。核部成分比较均一, 从核部至边部钙铝榴石含量显著升高, 由 0.04 升高至 0.10, 镁铝榴石和铁铝榴石含量轻微降低, 分别由 0.06 和 0.84 下降至 0.04 和 0.79。白云母成分由颗粒的核部到边部呈现微弱的变化。X_{Mg}

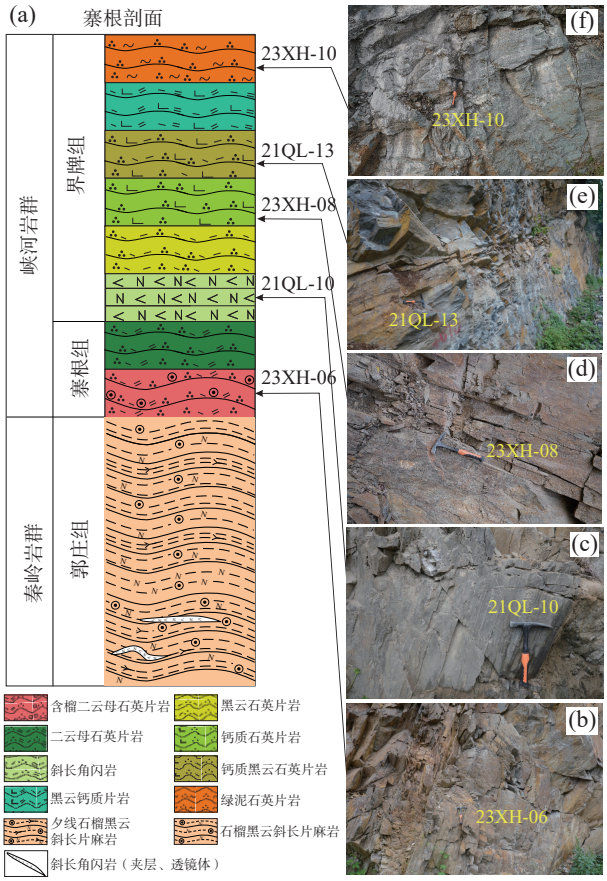


图2　北秦岭寨根地区峡河岩群和秦岭岩群地层柱状示意图(非实际地层厚度)(a)及野外露头照片(b～f)

Fig. 2　(a) Stratigraphic columns of the Xiahe and Qinling Group in the Zhaigen area of the North Qinling belt (not to scale) and (b–f) field photos

由 0.32 升高至 0.42, 单位分子 Si 值为 3.09～3.13; 黑云母具有两种产状, 分别出现在基质中与围绕石榴子石颗粒边部, 成分差别不大, X_{Mg}=0.31～0.34, Ti=0.14～0.16 (图 4e, 表 1)。基质中的斜长石和围绕石榴子石与黑云母共生的斜长石 An 值均为 21～25, 为奥长石。

21QL-08 中石榴子石中出现少量的石英包裹体, 成分以铁铝榴石和锰铝榴石为主, 成分剖面显示无明显环带结构(图 4d), 边部显示微弱的镁铝榴石和锰铝榴石含量升高, 钙铝榴石和铁铝榴石含量降低。黑云母成分由核部到边部无明显变化(图 4e), X_{Mg}=0.29～0.31, Ti=0.19～0.23(表 1)。白云母成分均一, X_{Mg}=0.38～0.42, Ti=0.04～0.05(图 4f); 斜长石 An=0.22～0.23, 为奥长石。

3.2　界牌组

黑云石英片岩(21QL-10)呈浅灰色, 片状变晶结构, 片状构造, 主要由石英(55%)、黑云母(30%)、斜

长石(10%)组成(图 3b)。其中,石英拉长变形,黑云母呈暗棕色自形–半自形片状,半定向排列。样品中黑云母 X_{Mg}=0.57～0.60, Ti=0.11～0.12, 成分由核部到边部无明显变化(图 4e, 表 1)。

钙质石英片岩(21QL-13、23XH-08)呈灰白色,鳞片粒状变晶结构,片状构造,主要矿物为石英(35%～40%)、黑云母(15%～20%)、方解石(15%～10%)、斜长石(10%～15%)、绿帘石(5%),含少量白云母(图 3c)。其中方解石呈他形,粒径为 0.1～0.3 mm; 黑云母为黄绿色半自形片状,粒径为 0.1～0.4 mm; 半定向排列; 斜长石呈他形,粒径为 0.1~0.3 mm; 绿帘石为他形粒状常见于斜长石颗粒内部; 石英为他形粒状,粒径为 0.1～0.3 mm。样品 21QL-13 中黑云母成分均一, X_{Mg}= 0.62～0.64, Ti=0.09～0.10(图 4e, 表 1)。

钠长阳起片岩(23XH-10)呈灰绿色,由阳起石(40%～35%)、绿泥石(15%～10%)、钠长石(25%～20%)、绿帘石(～10%)组成; 钠长石呈圆球状颗粒,粒径为 0.5～0.6 mm; 绿泥石呈深绿色鳞片状集合体; 阳起石为绿色自形–半自形,可见菱形解理(图 3f)。样品中阳起石和钠长石的成分都较为均一。阳起石的 SiO_2 含量为 50%～54%, Ca_B=1.84～1.90, $(Na+K)_A$=0.07～0.14, X_{Mg}=0.71～0.77(表 1)。

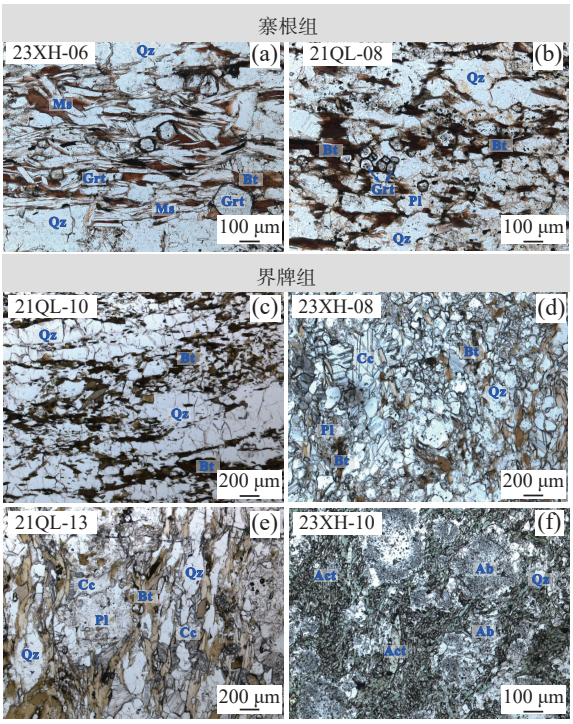
4 变质作用 *PT* 条件

综合岩相学和矿物化学的分析结果,利用 Holdaway(2000)的 Grt-Bt 温度计和 Wu et al.(2004) 的 Grt-Bt-Pl-Qz 温压计对寨根组的含榴云母片岩进行变质 *PT* 条件计算(图 5, 表 2)。寨根组含榴云母石英片岩 21QL-08 中石榴子石及黑云母均无明显成分环

表 1 寨根地区峡河岩群主要组成岩石中代表性矿物化学成分(%)

Tab. 1 Representative electron microprobe analyses of minerals (%) for Xiahe Group in the Zhaigen area

样号	23XH-06								21QL-08				21QL-10		21QL-13		23XH-10		
矿物	石榴子石		黑云母		白云母		斜长石		石榴子石		黑云母	斜长石	黑云母		黑云母		阳起石		钠长石
产状	核部	边部	基质	Grt边部	核部	边部	Grt边部	基质	核部	边部	基质	基质							
SiO_2	36.92	36.75	37.59	34.36	46.00	47.51	62.81	63.32	36.87	38.30	34.15	62.97	36.97	36.11	37.83	37.99	53.07	49.78	69.78
TiO_2	0.01	0.09	1.91	2.74	0.50	0.49	0.03	0.05	0.00	0.00	3.41	0.10	1.90	2.00	1.60	1.54	0.06	0.84	0.00
Al_2O_3	20.47	20.59	18.47	18.83	35.43	35.49	23.93	23.40	20.10	21.62	17.92	23.22	17.08	17.16	15.28	14.96	3.29	5.50	18.87
FeO	37.34	34.45	14.53	24.24	1.49	1.58	0.40	0.04	28.84	24.91	22.58	0.00	15.63	16.36	14.19	15.20	9.93	10.39	0.01
MnO	2.98	2.92	0.15	0.07	0.02	0.04	0.00	0.00	10.27	10.48	0.26	0.00	0.12	0.13	0.16	0.18	0.15	0.14	0.00
MgO	1.36	0.95	11.87	5.32	0.45	0.65	0.10	0.01	1.07	0.86	5.49	0.00	12.13	11.41	14.01	14.03	16.55	14.32	0.00
CaO	1.42	3.38	0.03	0.05	0.00	0.06	4.89	4.96	2.16	2.45	0.18	4.95	0.00	0.00	0.00	0.00	12.37	11.54	0.22
Na_2O	0.04	0.03	0.05	0.13	0.85	0.62	9.09	8.45	0.02	0.99	0.01	8.80	0.08	0.10	0.01	0.04	0.43	0.60	11.73
K_2O	0.04	0.00	9.93	9.35	10.48	9.57	0.20	0.10	0.00	0.18	9.93	0.27	10.47	10.14	10.22	10.05	0.19	1.14	0.19
Total	100.62	99.25	94.58	95.13	95.23	96.06	101.53	100.33	99.36	100.03	93.93	100.31	94.44	93.47	93.30	93.99	96.05	94.25	100.80
Si	3.00	3.01	2.81	2.69	3.07	3.12	2.75	2.79	3.03	3.07	2.70	2.78	2.80	2.78	2.88	2.88	7.68	7.42	3.02
Ti	0.00	0.01	0.11	0.16	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.11	0.12	0.09	0.09	0.01	0.09	0.00
Al	1.96	1.99	1.63	1.74	2.79	2.74	1.24	1.21	1.95	2.04	1.67	1.21	1.53	1.56	1.37	1.34	0.56	0.97	0.96
Fe	2.54	2.36	0.91	1.59	0.08	0.09	0.01	0.00	1.98	1.67	1.50	0.00	0.99	1.05	0.90	0.96	1.20	1.29	0.00
Mn	0.21	0.20	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.10	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.00
Mg	0.16	0.12	1.32	0.62	0.04	0.06	0.01	0.00	0.19	0.21	0.65	0.00	1.37	1.31	1.59	1.59	3.57	3.18	0.00
Ca	0.12	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.23	0.71	0.71	0.01	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	1.92	1.84	0.01
Na	0.01	0.01	0.01	0.02	0.11	0.08	0.77	0.72	0.00	0.15	0.00	0.75	0.01	0.01	0.00	0.01	0.12	0.17	0.99
K	0.00	0.00	0.95	0.94	0.89	0.80	0.01	0.01	0.00	0.02	1.00	0.02	1.02	1.00	0.99	0.97	0.04	0.22	0.01



Grt.石榴子石；Ms.白云母；Qz.石英；Bt.黑云母；Pl.斜长石；Ab.钠长石；Act.阳起石；Cc.方解石

图3　北秦岭寨根地区峡河岩群寨根组(a、b)和界牌组代表性岩石的显微照片(c～f)

Fig. 3　(a、b) Photographs of representative samples from Zhaigen and (c–f) Jiepai Formations in the Xiahe Group

带, 均选取核部成分进行计算, 获得变质温压范围为 T=572～607 ℃, P=5.1～6.0 kbar, 平均温压条件为 T=603±10 ℃, P=5.5±0.2 kbar。根据矿物成分剖面选取寨根组含榴云母石英片岩 23XH-06 中石榴子石的核部与基质黑云母核部成分, 以及石榴子石边部与围绕石榴子石边部的黑云母成分, 分别进行计算获得核部的变质温压范围为 T=534～578 ℃, P=3.0～5.5 kbar, 平均温压条件为 T=555±11 ℃, P=4.0±0.6 kbar; 边部的变质温压范围为 T=549～585 ℃, P=6.6～7.5 kbar, 平均温压条件为 T=573±13 ℃, P=7.0±0.3 kbar, 表明寨根组含榴云母石英片岩 23XH-06 记录了升温升压的变质 PT 轨迹(图 5)。

利用 Gerya et al.(1997)的角闪石温压计(Hbl)对界牌组钠长阳起片岩 23XH-10 进行变质 PT 条件计算, 获得变质温压范围为 T=443～485 ℃, P=1.6～2.6 kbar, 平均温压条件为 T=463±14 ℃, P=2.0±0.4 kbar; 界牌组的黑云石英片岩 21QL-10 和钙质黑云石英片岩 21QL-13 因矿物组合较为简单, 利用 Wu et al.(2015)的 Bt-Ti 温度计进行温度估算(图 5, 表 2)。考虑到界牌组钙质片岩与钠长阳起片岩密切共生, 参照钠长阳起片岩的温压计算结果, 将压力限定在2.0 kbar, 获得黑云石英片岩 21QL-10 和钙质黑云石英片岩 21QL-13 的平均温度分别为 532±8 ℃ 和 491±12 ℃(图 5, 表 2)。

5　碎屑锆石 U-Pb 定年

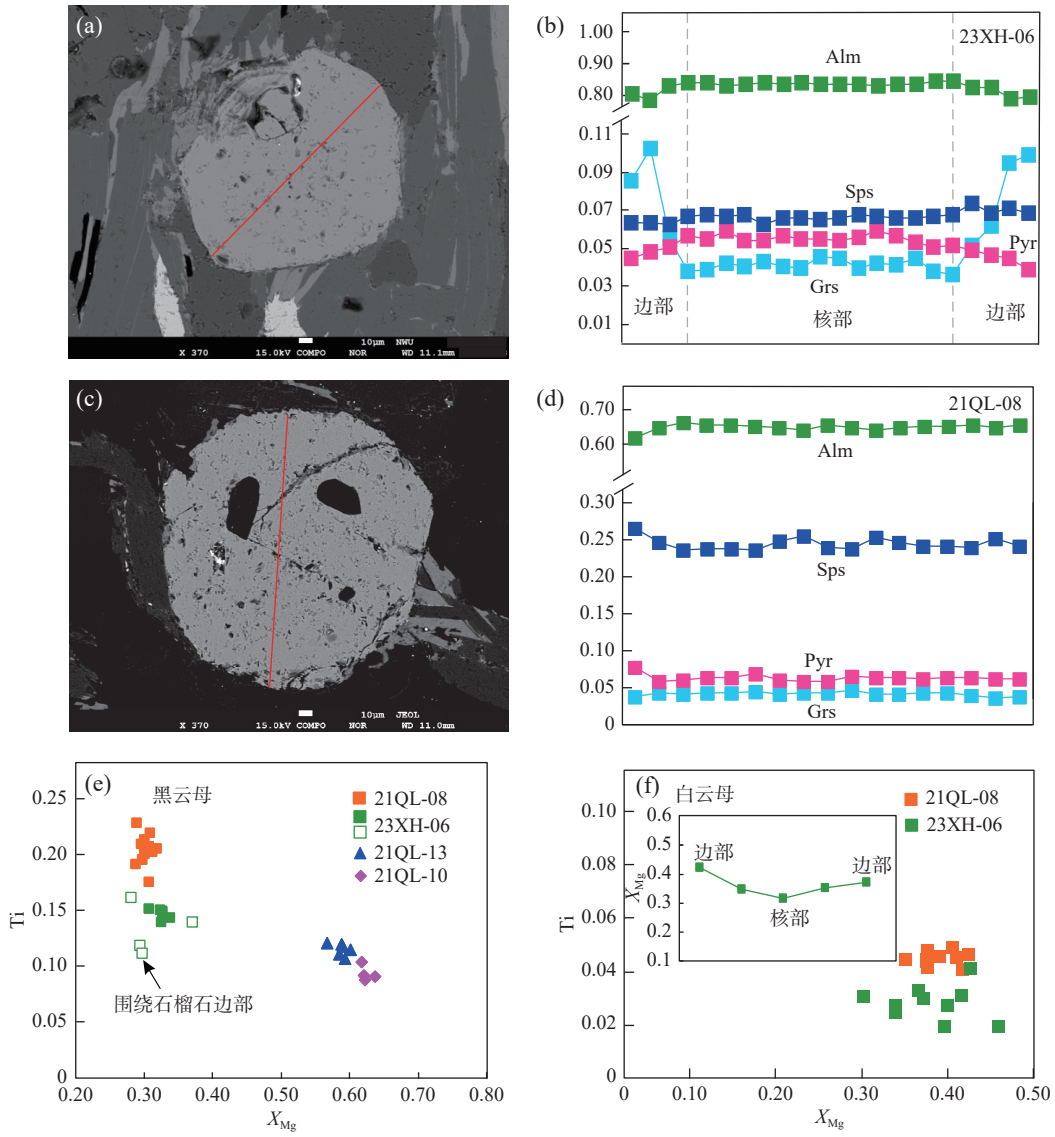
笔者对寨根地区峡河岩群典型剖面上 5 件样品进行了锆石定年分析测试, 共获得寨根组 63 个年龄数据和界牌组 249 个年龄数据。以 1 000 Ma 处的天然年龄为界, 大于 1 000 Ma 的年龄按照 $^{206}Pb/^{207}Pb$ 值计算, 小于 1 000 Ma 的年龄按照 $^{206}Pb/^{238}U$ 值计算, 数据表及谐和图上的同位素误差均为 1σ, 谐和图和频谱图中显示所有年龄为协和度≥90% 的分析点。

5 件样品中的锆石多呈次棱角状–棱角状, 以半自形–他形为主, 粒径为 50～100 μm, 长宽比为 1∶1～1∶3。锆石 CL 图像显示, 大多数锆石颗粒整体上发育清晰的岩浆振荡环带, 少部分锆石环带较弱或无环带(图 6)。锆石 U 含量为 71×10^{-6}～$1\,464\times10^{-6}$, Th 含量为 6×10^{-6}～$1\,079\times10^{-6}$, 大多数的 Th/U 值大于 0.1(图 7)。锆石结构具有明显的振荡环带, Th/U 值＞0.1, 表明峡河岩群碎屑锆石具有典型的岩浆锆石特点。寨根组样品 21QL-08 中的部分锆石颗粒具有发光性较暗的变质增生边(图 6), 但该变质边太窄不能进行测试。因此, 分析结果均为锆石核部的测点结果。

寨根组样品 21QL-08 中 63 个分析点均落在谐和线之上或附近(图 8a), 这些年龄介于 1 209～2 383 Ma, Th/U 值为 0.18～1.53。频谱图显示 1 481～1 658 Ma 的主要年龄组、～1.6 Ga 的年龄峰值(图 8a、图 8b), 最年轻的锆石谐和年龄为(1 209±51)Ma。

界牌组样品 21QL-10 的 72 个分析点具有较好的谐和性, 均落在谐和线之上(图 8c)。这些年龄介于 1 020～2 459 Ma, 主要年龄为 1.2～1.4 Ga、1.5～1.7 Ga, 对应的峰值分别为～1.2 Ga 和～1.6 Ga(图 8c、图 8d)。最老的两个颗粒为(2 391±31)Ma 和(2 459±31)Ma, 最年轻的锆石谐和年龄为(1 048±16)Ma。

界牌组样品 21QL-13 中 53 个分析点落在谐和线上或谐和线附近(图 8e), 年龄介于 843～2 433 Ma, 主要年龄为 1.2～1.4 Ga 和 1.5～1.7 Ga, 对应的峰值为～1.2 Ga 和～1.5 Ga, 具有与样品 21QL-10 相似的分布特征。此外, 少量年龄为 1.0～1.1 Ga、1.7～1.9 Ga 和 2.3～2.4 Ga(图 8f), 最年轻的锆石谐和年龄为(992±9) Ma。



a～d. 石榴子石 BSE 图及成分剖面；e. 黑云母 X_{Mg}-Ti 图解；f. 白云母成分剖面及 X_{Mg}-Ti 图解

图4 峡河岩群各类岩石中主要组成矿物的化学成分分析结果

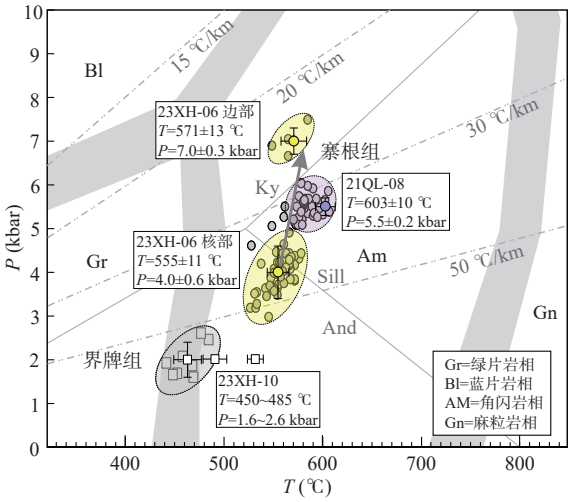
Fig. 4 Chemical composition analysis results of minerals in representative samples of the Xiahe Group

界牌组样品 23XH-10 中 70 个分析点落在谐和线上或谐和线附近(图 8g)，年龄介于 1 043～2 618 Ma，主要年龄为 0.9～1.0 Ga、1.1～1.2 Ga、1.3～1.5 Ga、1.6～1.9 Ga，对应的峰值为～0.95 Ga、～1.2 Ga、～1.4 Ga、～1.75 Ga(图 8h)。这些年龄分布范围与样品 21QL-10、21QL-13 相似，但分布特征略有不同，最年轻的锆石谐和年龄为(828±19)Ma。

界牌组样品 23XH-08 中 54 个分析点多具有较好的谐和性，落在谐和线上或谐和线附近(图 8i)，年龄介于 498～2 754 Ma，主要年龄为 0.6～0.8 Ga、1.0～1.2 Ma、1.4～1.7 Ma，对应峰值分别为～0.75 Ga、～1.1 Ga 和～1.6 G。此外，少量年龄为 2.4～2.5 Ga(图 8j)，最小谐和年龄为(498±7) Ma，Th/U 值为 0.51。4 个最年轻锆石颗粒的加权平均年龄为(519±11)Ma，Th/U 值为 0.19～0.51。与前 3 个界牌组样品相比，样品 23XH-08 获得了新元古代及少量早古生代的年龄值(图 8)。

6 独居石 U-Pb 定年

寨根组含榴云母石英片岩样品 21QL-08 中的独居石为无色透明的椭圆状或浑圆状晶体。粒径大小为 30~70 μm，长宽比为 1.5∶1～1∶1。激光拉曼分析显示独居石中含有大量石英、黑云母等包裹体矿物。利用 LA-ICPMS 对 30 粒独居石进行了 U-Pb 年龄元素



变质相简称、变质相边界引自 Brown(2014)

图5　北秦岭寨根地区峡河岩群变质 *PT* 条件图解

Fig. 5　Metamorphic *PT* conditions of Xiahe group in Zhaigen area of North Qinling Belt

测试获得 27 个有效的分析点(表 2), 获得两组$^{206}Pb/^{238}U$年龄集中区, 加权平均年龄分别为(432±2)Ma(MSWD=2.1)和(403±1)Ma (MSWD=1.8)(图 9a), 以及一个相对较老的谐和年龄为(475±3)Ma。两组独居石的稀土元素配分模式显示轻重稀土分馏明显, 轻稀土明显富集, 重稀土亏损, 以及明显的 Eu 负异常的特征(图 9b), 其中(403±1) Ma 期独居石较(432±2)Ma 期独居石重稀土含量的相对富集。

7　讨论

7.1　峡河岩群变质 *PT* 条件、变质时代的确定及意义

峡河岩群作为一套从原秦岭杂岩中解体出的, 变质特征有别于秦岭杂岩的构造岩石地层单位, 其变质时代及变质温压条件对探究峡河岩群与秦岭杂岩的相互关系及其构造属性十分关键。然而, 目前对峡河岩群变质岩石学研究十分薄弱。一方面, 大多数研究者赞同峡河岩群应归并为秦岭杂岩中的一部分; 另一方面, 野外观测到峡河岩群中多数岩石变质级别较低, 缺乏特征性的变质矿物组合, 不易限定其变质级别和获得变质时代。笔者通过对寨根地区峡河岩群中各类岩石主要矿物进行了精细的矿物成分及成分剖面分析, 选取 GB& GBPQ、Bt-Ti 和角闪石温压计进行温压估算。计算结果显示, 寨根组含榴云母石英片岩峰期变质条件为 5.5～7.5 kbar 和 572～607 ℃, 普遍经历了中压角闪岩相变质作用(图 5); 样品 23XH-06 记录了从 555±11 ℃/4.0±0.6 kbar 到 573±13 ℃/7.0±0.3 kbar 升温升压的进变质 *PT* 轨迹(图 5), 表明寨根组经历了一定程度的地壳加厚作用; 剖面南段界牌组的变质条件为 443～532 ℃和 1.6～2.6 kbar, 仅记录了绿片岩相的低级变质作用(图 5)。

由于锆石具有较强的矿物稳定性和高的 Pb 扩散封闭温度, 是用于确定复杂造山作用中变质时代的最有效手段, 尤其结合锆石的内部结构特征和微量元素组成及矿物包裹体信息可以对不同阶段的变质作用进行限定(Hermann et al., 2001)。虽然本次研究的部分锆石显示有变质增生边(图 6a), 但这些变质边太窄(小于 10 μm)无法获得变质年龄信息。独居石是泥质变质岩中非常重要的副矿物, 与锆石相比, 独居石对温压变化和熔、流体活动更加敏感, 更容易被改造或者是发生重结晶(Johnson et al., 2015)。在探究中高级变质岩石的变质演化过程中, 独居石可以提供比锆石更多的年龄信息。笔者对北秦岭寨根地区峡河岩群寨根组的含榴云母片岩进行了独居石 U-Pb 定年, 获

表 2　寨根地区峡河岩群主要组成岩石的温压计算结果

Tab. 2　*PT* results of geothermometers calculation for representative samples from Xiahe Group

采样位置	样号	岩石类型	矿物组合	温压计	压力(kbar)	温度(℃)
寨根组	23XH-06	含榴云母石英片岩	Qz、Grt-c、Ms、Bt、Pl	GB-GBPQ	4.0±0.6	555±11
			Qz、Grt-r、Ms、Bt、Pl	GB-GBPQ	7.0±0.3	571±13
	21QL-08	含榴云母石英片岩	Qz、Grt、Ms、Bt、Pl	GB-GBPQ	5.5±0.2	603±10
界牌组	21QL-10	黑云石英片岩	Qz、Bt、Pl、Ms	T-Bt	2.0	532±8
	21QL-13	钙质黑云石英片岩	Qz、Bt、Pl、Cc、Ep	T-Bt	2.0	491±12
	23XH-10	钠长阳起片岩	Act、Ab、Chl、Ep、Cc	Hbl	2.0±0.4	463±14

注：GB为 Grt-Bt温度计(Holdaway，2000)；GBPQ为 Grt-Bt-Pl-Qz 压力计(GBPQ；Wu et al. ，2004)；T-Bt在压力设定为2.0 Kbar时，应用 Bt-Ti温度计(Wu et al.，2015)的计算的值；Hbl为的Hbl温压计(Gerya et al.，1997)。



图6 北秦岭寨根地区峡河岩群碎屑锆石阴极发光 CL 图像

Fig. 6 Cathodoluminescence (CL) images of representative detrital zircons from Xiahe group in Zhaigen area of North Qinling Belt

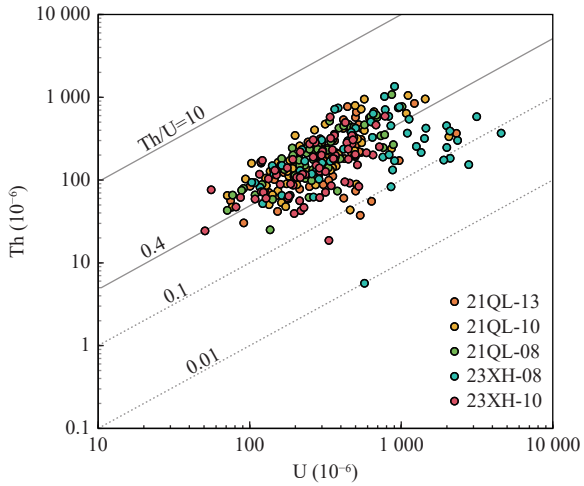


图7 北秦岭寨根地区峡河岩群碎屑锆石 Th-U 图解

Fig. 7 Th-U diagram of detrital zircons from the Xiahe group in the Zhaigen area of the North Qinling Belt

得了(475±3)Ma、(432±2)Ma、(403±1)Ma 等 3 组年龄(图 9a),表明寨根组含榴云母片岩记录了多期变质时代。微量元素分布特征表明,(403±1) Ma 期独居石较(403±1) Ma 期独居石相对富集 HREE(图 9b),表明这些独居石形成于石榴子石发生分解的退变质阶段(Rubatto et al., 2013)。因此,认为寨根组 432～403 Ma 的独居石年龄代表退变质时代,相对较老的(475±3) Ma 可能代表近峰期变质时代。

前人对秦岭杂岩中不同类型的高压–超高压岩石开展了大量年代学研究,包括锆石不同变质生长域的 SHRIMP、SIMS、LA-ICP-MS U-Pb 原位定年、石榴子石 Lu-Hf 定年、独居石和榍石 U-Pb 原位定年以及角闪石和多硅白云母$^{40}Ar/^{39}Ar$ 定年,确定其超高压峰期变质事件的确切年龄为 500～490 Ma(Wang et al., 2011; Liao et al., 2016),以及深俯冲岩石折返过程中 480～450 Ma 的麻粒岩相退变质时代和晚期 420～400 Ma 的角闪岩相退变质时代(Cheng et al., 2011; Li et al., 2014; Hu et al., 2020)。上述峡河岩群寨根组 432～403 Ma 的退变质时代与秦岭杂岩中高压–超高压岩石的角闪岩相退变质时代 420～400 Ma 相似,而可能记录的近峰期变质时代(475±3) Ma 则晚于高压–超高压岩石的峰期变质时代 500～490 Ma。结合寨根组样品中记录了升温升压的变质 *PT* 轨迹(图 5),初步认为寨根地区峡河岩群的寨根组经历了北秦岭早古生代陆壳俯冲后的陆–陆碰撞地壳加厚过程。

7.2 峡河岩群的原岩形成时代

关于峡河岩群的形成时代,裴先治等(1996)、王涛等(1997)依据峡河岩群中斜长角闪岩的全岩 Sm-Nd 同位素年龄 1 750～1 605 Ma,及其被新元古代花岗岩侵入的地质事实,将峡河岩群的形成时代划归为中元古代。随着激光剥蚀–等离子质谱法(LA-ICP-MS)分析技术的快速发展,单颗粒矿物原位同位素测试可以在短时间内获得大量同位素年龄数据,碎屑锆石年龄谱通常对于确定沉积岩的潜在沉积时限有着重要的作用(Cawood et al., 2012)。在大量碎屑锆石年代学分析研究中,最小谐和年龄或最年轻谐和年龄组的加权平均年龄通常被认为是指示沉积岩最大沉积年龄的有效指标(Cawood et al., 2012)。为了限定和对比峡河岩群的形成时代,笔者对采自寨根地区峡河岩群不同岩性段样品进行了详细的碎屑锆石年代学分析,并使用最小谐和年龄限定最大沉积时限。

寨根组中最年轻的锆石颗粒显示具有岩浆锆石属性,谐和年龄为(1 209±51) Ma,表明寨根组形成时代应不早于～1 209 Ma 的中元古代。界牌组中不同样品则显示不同的最小谐和年龄,其中界牌组 3 件样品(21QL-10, 21QL-13 及 23XH-10)具有类似的年龄分布规律,最年轻的岩浆锆石谐和年龄分别为(1 048±

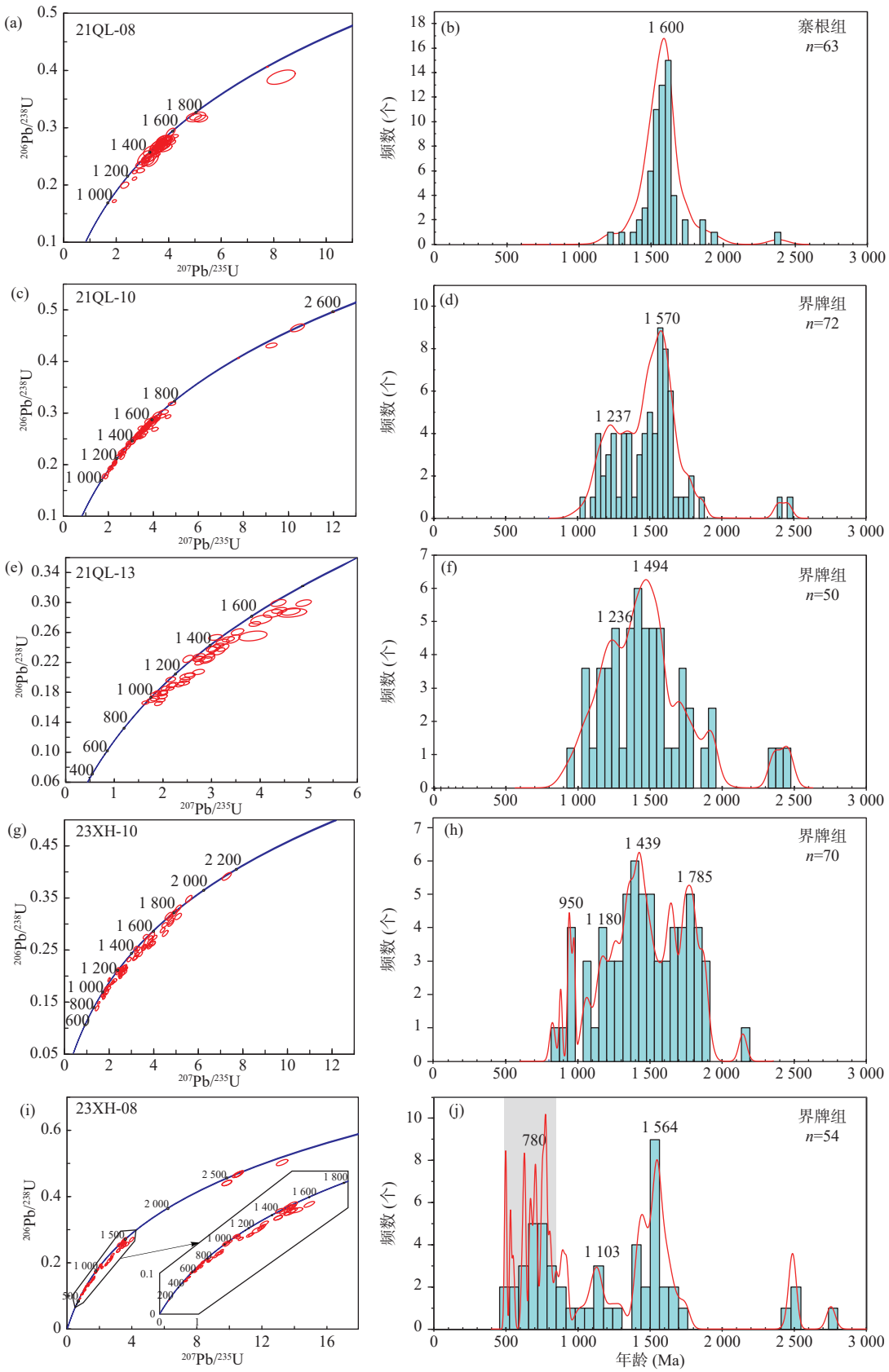


图8　寨根地区峡河岩群碎屑锆石 U-Pb 谐和图(a、c、e、g、i)和年龄频谱图 (b、d、f、h、j)(≥谐和度 90%)

Fig. 8　(a, c, e, g, i) Concordia diagrams of detrital zircon U-Pb analyses and (b, d, f, h, j) age spectra of Xiahe Group in Zhaigen area (concordance≥90%)

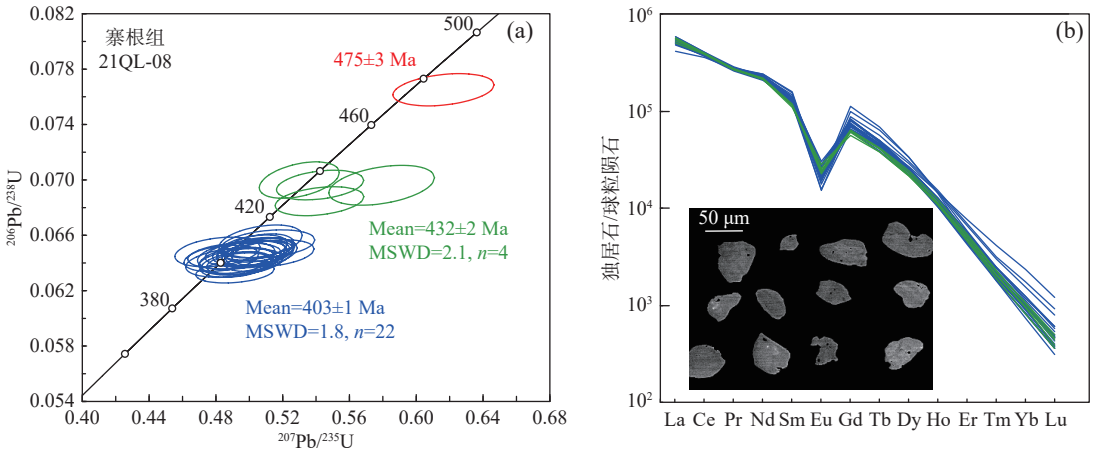


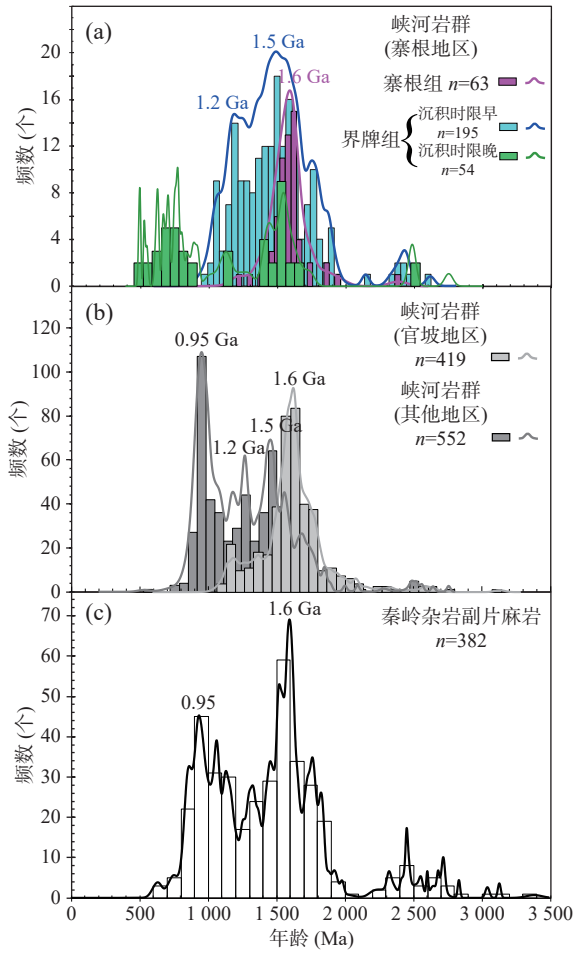
图9 峡河岩群寨根组含榴云母石英片岩的独居石 U-Pb 年龄谐和图(a)及独居石 BSE 照片和球粒陨石标准化稀土配分图(b)

Fig. 9 (a) Concordia diagrams of monazite U-Pb analyses and (b) BSE images and Chondrite-normalized REE patterns for monazite from garnet-bearing quartz schist from Zhaigen Formation of Xiahe Group

16) Ma、(992±9) Ma 和(828±19) Ma, 表明大部分界牌组原岩的沉积时代应不早于 1 048～828 Ma 的晚新元古代—早中元古代。剩余 1 件界牌组样品(23XH-08)显示出明显不同的年龄频谱图和最小谐和年龄(498±7)Ma, 推断其原岩沉积时代应不早于～498 Ma 的早古生代。研究结果表明, 界牌组中至少存在两套原岩最大沉积时限较早(1 048～828 Ma)和原岩最大沉积时限较晚(～498 Ma)且物源供给不同的岩石类型(图 10a)。此外, 通过对比寨根组和界牌组的年龄分布特征以及最大沉积时限, 表明寨根组与界牌组中最大沉积时限较早的样品整体显示相似的年龄分布, 即普遍具有占主导地位的 1.4～1.6 Ga 的中元古代碎屑锆石, 表明寨根地区峡河岩群寨根组和界牌组整体具有类似的物源供给, 以及相似的沉积时限, 推断至少应不早于～1.0 Ga。该结果为进一步揭示峡河岩群的沉积时代提供了有力的指示性意义。

为了进一步探究峡河岩群的原岩形成时代, 笔者依据王涛等(1997)划分的“峡河岩群”(图 1b 原秦岭岩群中部的楔形部分)系统整理了官坡地区以及其他地区(大多数研究者归并为秦岭杂岩的一部分)已有碎屑锆石研究结果与文中进行对比分析。统计结果(图 10b)表明, 官坡地区的峡河岩群最大沉积时代为～1.0 Ga, 年龄分布以 1.4～1.6 Ga 的中元古代碎屑锆石为主(Yang et al., 2002; Wang et al., 2011; Cao et al., 2017; 廖小莹, 2018; Zhao et al., 2021), 与研究区内的大部分样品具有相似的沉积时代和物源供给(图 10a、图 10b)。其他地区峡河岩群碎屑锆石数据显示, 最大沉积时代 0.8～0.9 Ga, 年龄分布包括～0.95 Ga 的新元古代碎屑锆石和 1.2～1.5 Ga 的中元古代碎屑锆石, 这些样品主要采自邻近新元古代花岗侵入体的片岩或片麻岩(宫相宽, 2017; Shi et al., 2018)。综合前人研究成果及本次研究结果(图 10a、图 10b), 推测北秦岭峡河岩群可能存在 3 套沉积年龄及主要物源供给属性不同的岩石类型, 分别为早中元古代(～1.0 Ga)、晚新元古代(0.8～0.9 Ga)、早古生代(～0.5 Ga)。

Zhao et al. (2021)对比了秦岭杂岩副片麻岩和峡河岩群已有的碎屑锆石年代学研究结果, 发现秦岭杂岩与峡河岩群均显示出两组不同沉积时代(1.2 Ga 和 0.8 Ga)和不同物源供给(1.8 ～1.2 Ga 和 1.0～0.8 Ga)的年龄谱系, 认为第一组沉积时代为中元古代晚期且发育～1.6 Ga 峰值的秦岭岩群和峡河岩群共同构成了秦岭地块的基底陆核, ～1.6 Ga 的碎屑物质主要来源于印度克拉通; 另一组沉积时代为新元古代早期且发育～0.95 Ga 峰值的秦岭岩群和峡河岩群为发育在基底之上的陆缘弧沉积, ～0.95 Ga 的碎屑物质主要来源于秦岭地块广泛发育的早新元古代花岗岩(Shi et al., 2018; Zhao et al., 2021)。笔者的研究工作也进一步支持了这一推论(图 10)。但值得注意的是, 本次研究的界牌组中还存在少量样品沉积时限为早古生代(～0.5 Ga)且出现 0.6～0.8 Ga 碎屑锆石, 明显有别于大多数峡河岩群以及秦岭杂岩中的副片麻岩。考虑到 0.6～0.8 Ga 的物源供给只可能来源于邻近的南秦岭



a. 寨根地区峡河岩群数据为本研究数据；b.官坡–双槐树地区峡河岩群数据源自 Yang et al.(2002)、Wang et al.(2011)、Cao et al.(2017)、廖小莹(2018)、Zhao et al.(2021)；其他地区峡河岩群(邻近新元古代花岗侵入体)数据源自宫相宽(2017)、Shi et al.(2018)；c.秦岭杂岩副片麻岩数据源自陆松年等(2006)、时毓等(2009)、杨力等(2010)、万渝生等(2011)、Diwu et al.(2014)、宫相宽(2017)、罗芬红(2019)、Li et al.(2019)

图10　北秦岭不同地区的峡河岩群及秦岭杂岩副片麻岩碎屑锆石年龄频谱图对比

Fig. 10　Comparison of detrital zircon age distributions of Xiahe Group of this study with those in previous works

或扬子板块北缘地区，笔者推断这些沉积时限最早的碎屑记录可能形成于早古生代商丹洋拖曳部分南秦岭陆块向北俯冲过程中(Liu et al., 2016)，刮削下来的俯冲下盘物质形成的增生楔。但仍需要进一步系统地野外地质调查(特别是构造特征)、系统样品采集以及碎屑锆石年代学的深入探究。

7.3　地质意义

陈瑞保等(1993)依据野外特征及岩石组合，将寨根地区的峡河岩群划分为寨根和界牌两个岩组，认为界牌组属绿片岩相带，不存在混合岩化作用，寨根组属石榴子石带，局部可见浅色条带，反映了峡河岩群由南向北递进区域变质作用的特点。温压计算结果显示，寨根组和界牌组的变质级别明显不同，前者普遍经历了中压角闪岩相变质作用，初步认为寨根组变质岩石经历了北秦岭早古生代陆壳俯冲后的陆–陆碰撞地壳加厚过程，而后者仅记录了低压绿片岩相的低级变质作用。因此，对照岩石类型，变质温压条件以及原岩的形成时代来看，寨根地区峡河岩群中原划的寨根和界牌两个岩组，可能并非密切共生的地层单位，而更可能是在俯冲碰撞过程中构造并置在一起的不同岩片。区内的峡河岩群寨根组变质岩石与秦岭杂岩副片麻岩的原岩形成时代和主要物源供给具有一定的相似性，不应再将其作为岩石地层单元划分为以浅变质岩石为代表的“峡河岩群”，而应该属于变质级别更高的秦岭杂岩中的一部分，该结论为峡河岩群的分布及划分提供了重要依据。此外，对王涛等(1997)划分出的广义峡河岩群来说，特别是北部官坡–双槐树地区，不论是该地区云母石英片岩及其包裹的榴辉岩的锆石中金刚石包裹体的发现(Yang et al., 2003)，还是多硅白云母石英片岩的变质演化、锆石和独居石的原位 U-Pb 定年结果(廖小莹 2018 及未发表数据)，共同表明官坡云母石英片岩峰期变质温压条件达柯石英稳定域，且具有与榴辉岩一致的峰期变质时代(495～490 Ma)和退变质时代(～480 Ma)的记录(廖小莹 2018 及未发表数据)，证实它们经历了同秦岭杂岩中其他地区早古生代高压岩石一致的超高压变质–折返过程。因此，官坡–双槐树地区的岩石也不应再划归“峡河岩群”。

8　结论

(1)北秦岭寨根地区峡河岩群的寨根组遍经历了 P=5.5～7.5 kbar 和 T=572～607 ℃ 的中压角闪岩相变质作用，而界牌组则经历了 P=1.6～2.6 kbar 和 T=443～532 ℃ 的绿片岩相低级变质作用。

(2)寨根组含榴云母石英片岩中独居石 U-Pb 定年分别获得了(475±3)Ma、(432±2)Ma 和(403±1)Ma 等 3 组年龄。(475±3)Ma 可能记录了近峰期变质时代，稍晚于北秦岭高压–超高压岩石的峰期变质时代；432~403 Ma 记录了退变质时代，与高压–超高压岩石角闪岩相退变质时代一致。结合寨根组升温升压的

进变质 *PT* 轨迹，推断寨根地区峡河岩群的寨根组可能经历了北秦岭早古生代陆壳俯冲后的陆–陆碰撞地壳加厚过程。

（3）碎屑锆石 U-Pb 定年显示，寨根地区峡河岩群寨根组和界牌组整体具有类似的物源供给及相似的沉积时限，推断至少应不早于～1.0 Ga。少量界牌组岩石的原岩最大沉积时限较晚（～0.5 Ga）且出现 0.6～0.8 Ga 的碎屑锆石，显示明显不同的沉积时限和物源供给。对照岩石类型，变质温压条件以及原岩的形成时代，认为寨根地区峡河岩群中原划的寨根和界牌两个岩组可能并非密切共生的地层，而更可能是在俯冲碰撞过程中构造并置在一起的不同岩片。

致谢：感谢杨文强老师在电子探针实验中的指导和帮助。

利益冲突声明（Conflict of Interests）：

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献（References）：

陈瑞保，张延安. 豫西峡河岩群层序及变形特征[J]. 河南地质，1993，(2)：104−111.

CHENG Ruibao, ZHANG Yanan. Sequence and deformation characteristics of the Xiahe rock group in western Henan[J]. Geology of Henan Province, 1993, (2): 104−111.

宫相宽. 丹凤地区秦岭岩群物质组成、形成时代及变质作用研究 [D]. 西安：西北大学，2017.

GONG Xiangkuan. Metamorphism, composition and forming age of the Qinling Group in Danfeng area[D]. Xi'an: Northwest University, 2017.

贾彬，张振，魏立勇，等. 南秦岭老君庙金矿床载金含砷黄铁矿矿物学研究及其地质意义[J]. 西北地质，2026，59(1)：110−129.

JIA Bin, ZHANG Zhen, WEI Liyong, et al. Mineralogical Study of Gold-Bearing Arsenian Pyrite in the Laojunmiao Gold Deposit, South Qinling, and Its Geological Significance[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(1): 110−129.

廖小莹. 北秦岭陆壳深俯冲-折返作用及其对早古生代构造演化过程的限定 [D]. 西安：西北大学，2018.

LIAO Xiaoying. Continental deep subduction-exhumation process of North Qinling belt: Constraints on Early Paleozoic tectonic evolution[D]. Xi'an: Northwest University, 2018.

刘国惠，张寿广，游振东，等. 秦岭造山带主要变质岩群及变质演化 [M]. 北京：地质出版社，1993：1–190.

陆松年，李怀坤，陈志宏，等. 秦岭中-新元古代地质演化及对 Rodinia 超级大陆事件的响应 [M]. 北京：地质出版社，2003：1–194.

陆松年，陈志宏，相振群，等. 秦岭岩群副变质岩碎屑锆石年龄谱及其地质意义探讨[J]. 地学前缘，2006，13(6)：303−310.

LU Songnian, CHEN Zhihong, XIANG Zhenqun, et al. U-Pb ages of detrital zircons from the para-metamorphic rocks of the Qinling Group and their geological significance[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(6): 303−310.

罗芬红. 北秦岭构造带西段秦岭岩群的物质组成，形成时代及其变质特征研究 [D]. 西安：西北大学，2019.

LUO Fenhong. Composition, forming age and metamorphism of the Qinling Group in the western segment of the North Qinling Orogenic Belt[D]. Xi'an: Northwest University, 2019.

裴先治，王涛，李伍平，等. 北秦岭商丹地区构造岩浆演化特征[J]. 西北地质，1995，16(4)：13−19.

FEI Xianzhi, WANG Tao, LI Wuping, et al. Characteristics of tectonic and magmatic evolution in the Shangdan area of the North Qinling Mountains[J]. Northwestern Geology, 1995, 16(4): 13−19.

裴先治，李国光. 北秦岭东段峡河岩群中斜长角闪岩 Sm–Nd 同位素年龄[J]. 地质通报，1996，(2)：131−134.

PEI Xianzhi, LI Guoguang. Sm-Nd isotope age of plagioclase amphibolite in Xiahe group of eastern North Qinling Mountains [J]. Geologcal Bulletin of China, 1996, (2): 131−134.

时毓，于津海，徐夕生，等. 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，2009，25(10)：2651−2670.

SHI Yu, YU Jinghai, XU Xisheng, et al. Geochronology and geochemistry of the Qinling Group in the eastern Qinling Orogen [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(10): 2651−2670.

万渝生，刘敦一，董春艳，等. 西峡北部秦岭群变质沉积岩锆石 SHRIMP 定年：物源区复杂演化历史和沉积、变质时代确定[J]. 岩石学报，2011，21(4)：1172−1178.

WAN Yusheng, LIU Dunyi, DONG Chunyan, et al. SHRIMP zircon dating of meta-sedimentary rock from the Qinling Group in the north of Xixia, North Qinling Orogenic Belt: Constraints on complex histories of source region and timing of deposition and metamorphism[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(4): 1172−1178.

王涛，胡能高，裴先治，等. 秦岭杂岩的组成、构造格局及演化[J]. 地球学报，1997，(4)：10−16.

WANG Tao, HU Nenggao, FEI Xianzhi, et al. Composition, tectonic and evolution of Qinling complex rocks[J]. Acta Geoscientia Sinica, 1997, (4): 10−16.

王涛，杨家喜. 豫西狮子坪秦岭群流变型式及流变相探讨[J]. 长安大学学报 (地球科学版)，1993，15：54−60.

WANG Tao, YANG Jiaxi. Discussion on the Flow Patterns and Rheological Facies of the Qinling Group in Shiziping, Western Henan[J]. Journal of Chang'an University (Earth Science Edition),

1993, 15: 54−60.

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.

杨力, 陈福坤, 杨一增,等. 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, 2010, 26(5): 1589−1603.

YANG Li, CHEN Fukun, YANG Yizeng, et al. 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, 2010, 26(5): 1589−1603.

杨敏, 刘良, 王亚伟,等. 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, 2016, 32(5): 1452−1466.

YANG Ming, LIU Liang, WANG Yawei, et al. Geochronology of detrital zircons from metaclastic of Erlangping complex in the North Qinling belt and its tectonic implication[J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32(5): 1452−1466.

杨涛, 朱赖民, 胡妍, 等. 西秦岭李坝金矿床成因探讨: 来自含金石英脉流体包裹体及锆石 U-Pb 年代学的证据[J]. 西北地质, 2026, 59(1): 60−78.

YANG Tao, ZHU Laimin, HU Yan, et al. Genesis of the Liba Gold Deposit in West Qinling: Evidence from Fluid Inclusions and Zircon U-Pb Dating in Gold Bearing Quartz Vein[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(1): 60−78.

游振东, 索书田. 造山带核部杂岩变质过程与构造解析—以东秦岭为例 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991.

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 Zongqin, 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.

张旗, 张宗清, 孙勇,等. 陕西商县-丹凤地区丹凤群变质玄武岩的微量元素和同位素地球化学[J]. 岩石学报, 1995, 11(1): 43−54.

ZHANG Qi, ZHANG Zongqin, SU Yong, et al. Trace Element and Isotopic Geochemistry of Metabasalts from Dafeng Group (DFG) in Shangxian-Danfeng Area, Shaanxi Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 1995, 11(1): 43−54.

张宗清, 张国伟, 刘敦一,等. 秦岭造山带蛇绿岩、花岗岩和碎屑沉积岩同位素年代学和地球化学[J]. 北京: 地质出版社, 2006, 1−348.

赵姣, 陈丹玲, 谭海清, 等. 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, 2012, 19(4): 118−125.

ZHAO Jiao, CHEN Danling, TAN Qinghai, et al. 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, 2012, 19(4): 118−125.

周彬, 朱毓, 高沛, 等. 秦岭造山带凤县–山阳地区富钴–镍钠长角砾岩年代学研究及地质意义[J]. 西北地质, 2025, 58(4): 174−196.

ZHOU Bin, ZHU Yu, GAO Pei, et al. Geochronology Study and Geological Significance of Cobalt-Nickel-Rich Albite Breccia in the Fengxian-Shanyang, Qinling Orogenic Belt[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(4): 174−196.

Aleinikoff J N, Schenck W S, Plank M O, et al. Deciphering igneous and metamorphic events in high-grade rocks of the Wilmington Complex, Delaware: Morphology, cathodoluminescence and backscattered electron zoning, and SHRIMP U-Pb geochronology of zircon and monazite[J]. Geological Society of America Bulletin, 2006, 118(1−2): 39−64.

Brown M. The contribution of metamorphic petrology to understanding lithosphere evolution and geodynamics[J]. Geoscience Frontiers, 2014, 5: 553−569.

Cao H H, Li S Z, Zhao S J, et al. Precambrian tectonic affinity of the North Qinling Microcontinent: Constraints from the discovery of Mesoproterozoic magmatic zircons in the Qinling Group[J]. Geological Journal, 2017, 52(S1): 142−154.

Cawood P A, Hawkesworth C J, Dhuime B. Detrital zircon record and tectonic setting[J]. Geology, 2012, 40: 875−878.

Cheng H, Zhang C, Vervoort, J D, et al. Geochronology of the transition of eclogite to amphibolite facies metamorphism in the North Qinling orogen of central China[J]. Lithos, 2011, 3–4: 969–983.

Diwu C, Sun Y, Zhao Y, et al. 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, 2014, 5(4): 499−513.

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: 39−56.

Dong Y P, Santosh, M. Tectonic architecture and multiple orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China[J]. Gondwana Research, 2016, 29(1): 1−40.

Gerya T V, Perchuk L L, Triboulet C, et al. Petrology of the Tumanshet Zonal Metamorphic Complex, Eastern Sayan[J]. Petrology, 1997, 5(6): 503−533.

Hermann J, Rubatto D, Korsakov A, et al. Multiple zircon growth during fast exhumation of diamondiferous, deeply subducted

continental crust (Kokchetav Massif, Kazakhstan)[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2001, 141(1): 66−82.

Holdaway M J. Application of new experimental and garnet Margules data to the garnet-biotite geothermometer[J]. American Mineralogist, 2000, 85: 881–892.

Hu R G, Wijbrans J R, Brouwer F M, et al. Constraints on retrograde metamorphism of UHP eclogites in North Qinling, Central China, from $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating of amphibole and phengite[J]. Gondwana Research, 2020, 87: 83−106.

Johnson T E, Clark C, Taylor R J M, et al. Prograde and retrograde growth of monazite in migmatites: An example from the Nagercoil Block, southern India[J]. Geoscience Frontiers, 2015, 6: 373−387.

Li C, Ren L D, Zong S, et al. Confirmation of the Major Grenville Event in the Qinling Complex of the Qinling Orogenic Belt, Central China[J]. Journal of Earth Science, 2019, 30(3): 494−509.

Li Y, Zhou H W, Li Q L, et al. Palaeozoic polymetamorphism in the North Qinling orogenic belt, Central China: Insights from petrology and in situ, titanite and zircon U–Pb geochronology[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 92(5): 77−91.

Liao X Y, Liu L, Wang Y W, et al. Multi-stage metamorphic evolution of retrograde eclogite with a granulite-facies overprint in the Zhaigen area of the North Qinling Belt, China[J]. Gondwana Research, 2016, 30: 79−96.

Liu L, Liao X Y, Wang Y W, 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.

Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. 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, 2010, 51: 537−571.

Ludwig K R. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[R]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 2003, 1–71.

Rubatto D, Chakraborty S, Dasgupta S. Timescales of crustal melting in the higher Himalayan Crystallines (Sikkim, Eastern Himalaya) inferred from trace element constrained monazite and zircon chronology[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2013, 165 (2), 349–372.

Shi Y, Yu J, 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.

Shi Y, Huang Q W, Liu X J, et al. Provenance and tectonic setting of the supra-crustal succession of the Qinling Complex: Implications for the tectonic affinity of the North Qinling Belt[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2018, 158: 112−139.

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: 1019−1031.

Wu C M, Chen H X. Revised Ti-in-biotite geothermometer for ilmenite-or rutile-bearing crustal metapelites[J]. Science Bulletin, 2015, 60(1): 116−121.

Wu C M, Zhang J, Ren L D. Empirical garnet–biotite–plagioclase–quartz (GBPQ) geobarometry in medium-to high-grade metapelites[J]. Lithos, 2004, 45: 1907−1921.

Yang J S, Xu Z Q, Dobrzhinetskaya I F, et al. Discovery of metamorphic diamonds in central China: An indication of a ＞4 000-km-long zone of deep subduction resulting from multiple continental collisions[J]. Terra Nova, 2003, 15(6): 370−379.

Yang J S, Xu Z Q, Pei X Z, et al. Discovery of diamond in North Qinling: evidence for a giant UHP belt across central China and recognition of Paleozoic and Mesozoic dual deep subduction between North China and Yangtze plates[J]. Acta Geolpgical Sinica. 2002, 76: 484–495.

Zhao L M, Li Y, Xiang H, et al. Meso-Neoproterozoic arc-related sediments of the Xiahe Group in the Qinling block, central China: Implications for the paleogeographic reconstruction of Rodinia[J]. Precambrian Research, 2021, 361: 106263.