

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.04.003

岩浆核杂岩和变质核杂岩特征对比及控矿实例 ——南秦岭牛山-凤凰山变质核杂岩和牛山北岩浆核杂岩构造群落及控矿模式

杨兴科^{1,2}, 何虎军^{1,2}, 晁会霞^{1,2}, 朱昊磊², 韩珂², 王北颖³

YANG Xingke^{1,2}, HE Hujun^{1,2}, CHAO Huixia^{1,2}, ZHU HaoLei², HAN Ke², WANG Beiyong³

1. 长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054;

2. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054;

3. 陕西省地质调查院, 陕西 西安 710065

1. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

3. Shaanxi Geological Survey, Xi'an 710065, Shaanxi, China

摘要:以南秦岭牛山-凤凰山变质核杂岩和牛山北岩浆核杂岩为例,通过核杂岩的构造群落、变质程度、岩浆侵位与变形时代、构造层次与演化、控矿特征与控矿构造-蚀变岩相填图及测年研究,对比2类核杂岩的特征及其控矿作用。结果表明,2类核杂岩有相似的结构样式,但构造群落和演化差别较大。牛山-凤凰山变质核杂岩核部为新元古代武当岩群和耀岭河岩组中深变质岩,其中可见新元古代石英闪长岩和加里东期辉石岩-辉绿岩株,说明是在新元古代或加里东期形成的。核杂岩与外围震旦系-泥盆系浅变质岩间由剥离断层及韧性剪切带分割。志留系梅子垭岩组为浅变质强变形的岩片组合,发育多层次韧性剪切、固态流变、滑脱-逆冲-走滑变形3期新生面理及其置换。而牛山北岩浆核杂岩核部和外围是浅变质岩,在核部和外围填图、测试时发现新元古代、早古生代、三叠纪、侏罗纪4期侵入岩,与岩浆核杂岩相关的有三叠纪-早侏罗世二长花岗岩林和晚侏罗世花岗岩脉2期侵入岩。研究发现,与岩浆核杂岩伴随的岩浆侵位、韧性剪切变形与热变质增温-变斑晶加大-自然金沿S₂面理分布-金矿化热液蚀变等的时代均集中在晚三叠世-侏罗纪,指示了时代较新的陆内造山期岩浆核杂岩的脆-韧性剪切变形-立交桥式岩浆-热液垂向增生-热液蚀变成矿时空关联特点及深部找矿方向。

关键词: 岩浆核杂岩; 变质核杂岩; 构造群落; 脆-韧性剪切带; 控矿构造模式; 金矿成矿规律; 南秦岭

中图分类号: P54; P618.51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2023)04-0520-020

Yang X K, He H J, Chao H X, Zhu H L, Han K, Wang B Y. Comparison of characteristics between magmatic core complex and metamorphic core complex and examples of ore control: Tectonic community and ore controlling model of Niushan-Fenghuangshan metamorphic core complex and North Niushan magmatic core complex in the South Qinling Mountains. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(4): 520-539

Abstract: Taking the metamorphic core complex of Niushan-Fenghuangshan (NFMtCC) in the southern Qinling Mountains and the North Niushan magmatic core complex (NMgCC) as examples, this study compares the characteristics and ore-controlling effects of

收稿日期: 2022-06-19; 修订日期: 2022-08-28

资助项目: 国家自然科学基金项目《豫西熊耳山变质核杂岩的形成演化及其对金银成矿的控制作用》(批准号: 42173028)、陕西省自然科学基金《地质大数据挖掘与智能预测找矿靶区实验研究》(编号: 2023-JC-YB-261)、陕西省地勘基金成果集成项目《陕西秦岭成矿带金矿成矿规律与找矿预测》(编号: 61201506280)、中国地质调查局项目《陕西石泉-旬阳金矿整装勘查区关键基础地质研究》(编号: 12120114014201[2014]04-025-063)和《陕西石泉-旬阳金矿整装勘查区专项填图与技术应用示范》(编号: 12120114014201[2015]02-09-01-063)及中央高校基本科研项目《秦岭陆内造山成矿作用与找矿建模研究》(编号: 310827173702)

作者简介: 杨兴科(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 从事地球系统科学、矿田构造与成矿预测教学和科研。E-mail: xky6105@chd.edu.cn

the two types of core complexes. The research method is to compare and analyze the structural community, metamorphic degree, magma emplacement and deformation era, structural hierarchy and evolution, and ore control characteristics of the nuclear complex, combined with ore control structure alteration lithofacies mapping and dating research. The results indicate that the two types of core complexes have similar structural styles, but there are significant differences in their tectonic communities and evolution. The core of Niushan-Fenghuangshan metamorphic core complex is the Neoproterozoic Wudang rock group and Yaolinghe rock group medium deep metamorphic rock, with Neoproterozoic quartz diorite and Caledonian pyroxene diabase strain, indicating that it was formed in Neoproterozoic or Caledonian. There are detachment faults and ductile shear zones between the core complex and the surrounding Sinian Devonian shallow metamorphic rock. The Meiziya Formation of the Silurian system is a combination of shallow metamorphic and strongly deformed rock slices, with three stages of newly formed foliation and replacement, including multi-level ductile shear, solid-state rheology, detachment thrust strike slip deformation. The core and periphery of the North Niushan magmatic core complex are shallow metamorphic rock, and four intrusive rocks of Neoproterozoic, early Paleozoic, Triassic and Jurassic are found in the core and periphery by mapping and testing. There are two phases of intrusive rock related to the magmatic core complex: Triassic-Early Jurassic monzonitic granite stock (180.2 ± 3.6 Ma, 176.0 ± 1.9 Ma) and Late Jurassic granite vein (156.5 Ma). This research has found that the magma emplacement, ductile shear deformation, and thermal metamorphism accompanied by the magma core complex, as well as the increase of metamorphic phenocrysts, the distribution of natural gold along the S_2 plane, and the hydrothermal alteration of gold mineralization, are all concentrated in the Late Triassic-Jurassic, indicating the spatiotemporal correlation characteristics of the brittle ductile shear deformation, overpass type magma, thermal vertical accretion, and hydrothermal alteration of the magma core complex during the relatively new era of intracontinental orogeny, as well as the direction of deep exploration.

Key words: magmatic core complex(MgCC); metamorphic core complex(MtCC); tectonic community; brittle-ductile shear zone; ore controlling structure model; metallogenic regularity of gold deposits; South Qinling

近 20 年来,重视研究地球内外多圈层相互作用的地球系统科学(Earth System Science,简称 ESS)已成为当代地球科学的核心理论^{①②},超越板块构造观点引发的陆内造山-构造变形-变质-岩浆活动-热液蚀变-成矿聚集耦合关系的研究思路及成果认识(许志琴等,1986;杨志华等,1993;2000;2002;崔盛芹,1999;张国伟等,2001;郭华等,2002;杨经绥等,2010;万天丰,2011;巫建华等,2013;董树文等,2014)在不断深化与提高。陆内造山伴随多期构造-变形变质-岩浆活动-成矿聚集,一般指在板块碰撞后的继续变形活动与(后)造山作用,是较复杂的多圈层构造变形-变质-岩浆热液-蚀变成矿富集等动力成矿作用过程的体现。除应力构造变形-变质作用外,更重要的是伴随地球热力作用或岩浆核杂岩的壳幔岩浆活动-热液蚀变等多圈层物质流变、重熔、重组或重构方式的构造物理化学作用,对南秦岭构造带金钨钼成矿富集的控制作用十分重要。

1 南秦岭带多期多类构造变形与变质核杂岩构造群落

南秦岭构造带经历过古陆块或微陆块裂解、板块俯冲-碰撞、伸展剥离、走滑剪切、岩浆侵位、断块隆升等多期复杂变形,属于复合型造山带(张国伟

等,2001;胡健民等,2002;杨经绥等,2010),经历了多期次的裂解、聚合、碰撞、碰撞后构造变形变位的多期演变历程(杨兴科等,2016;韩珂等,2020)和壳幔作用不断重建、互馈、构造动力的强烈改造。晚印支期-燕山期-喜马拉雅期为陆内造山多期变形改造及盆山转化、逆冲推覆、走滑伸展、抬升剥蚀阶段。如此复杂的陆内构造演化格局决定了南秦岭带晚印支期-燕山期陆内造山多期次变形和多样式构造演化与钨钼金关键金属矿产多期成矿富集叠加的特点。

关于陆内造山变形改造与成矿特征,前人多有研究。杨志华等(1993;2000;2002)研究秦岭造山带认为,三叠纪以后的“陆内造山”阶段是该区最重要的造山阶段,是不同时代、不同层次的构造岩片逆冲推覆或剥离滑脱相互拼贴叠置的构造堆垛体,提出抽拉-逆冲岩片构造或抽拉构造是秦岭构造带形成的主要方式,代表了陆内造山的主要方式。杨经绥等(2010)认为,包括秦岭造山带在内的中国中央造山带是一个典型的经历泥盆纪和三叠纪 2 次碰撞造山及中生代晚期以来陆内造山的“复合造山带”。董树文等(2014)研究认为,南秦岭南侧的大巴山带是一个典型的经历了中三叠世-早侏罗世碰撞造山前陆变形和中-晚侏罗世陆内变形的造

山带,可能存在构造挤出式和陆内俯冲式造山 2 种动力学机制。郭华等(2002)通过对燕山和大别山板内构造带的研究,认为陆内构造变形是板块碰撞后的继续变形与(后)造山作用,远离缝合带表现出山脉剧烈隆升,伴有强烈的陆内逆冲、走滑、岩浆侵位、变形变质,以及较大尺度的伸展-剥离与山体抬升、塌陷(万天丰,2011)。

近年笔者研究发现,在南秦岭复合造山带由多个元古宙变质岩基底与古生代浅变质或未变质的沉积岩层组合而成的变质核杂岩或穹窿构造(图 1),且在变质岩基底或穹窿核部或外围构造层浅变质岩层中可见有新元古代—早古生代—中生代(三叠纪—侏罗纪)多期次的侵入岩体、岩株或岩脉。

在南秦岭牛山—凤凰山变质核杂岩(伴随新元古代—早古生代侵入岩)北部周缘,识别出中生代(三叠纪、早侏罗世、晚侏罗世)多期中酸性岩浆侵位形成的花岗岩体或岩脉。因此,研究认为,在牛山—凤凰山变质核杂岩(NFMtCC)以北的核部或外围构造层,中生代(三叠纪、早侏罗世、晚侏罗世)持续发育或近同位叠加侵位基性—中酸性岩体(辉绿岩、花岗岩类、煌斑岩等),形成牛山及北部岩浆核杂岩,本文简称为牛山北岩浆核杂岩(NMgCC)(图 1、图 2)。

从南秦岭带变质核杂岩和岩浆核杂岩的出露规模(面积)、古陆块结晶基底与盖层构造-岩层组合、剥离断层发育特征及其构造群落等分析^{③④⑤⑥}(徐学义等,2015),陕西境内可划分出 3 个一级变

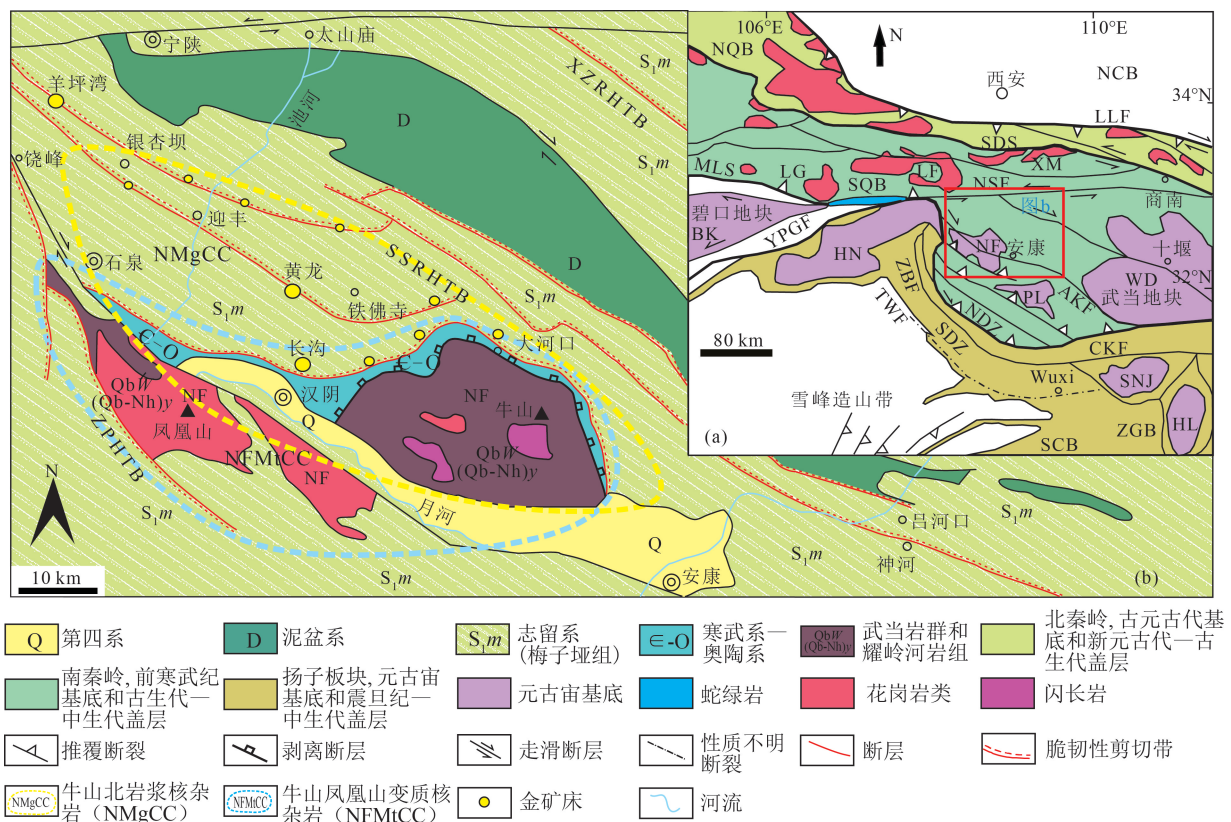


图 1 南秦岭带周缘构造单元(a)和牛山—凤凰山变质核杂岩(NFMtCC)及牛山北岩浆核杂岩(NMgCC)分布位置(b)

Fig. 1 Distribution location of structural units around the South Qinling belt(a) and Niushan-Fenghuangshan metamorphic core complex(NFMtCC)and North Niushan magmatic core complex(NMgCC)(b)

a—南秦岭及周缘构造单元(据张国伟等,2001;Hu et al., 2012 修改):NCB—华北陆块;SCB—扬子陆块;NQB—北秦岭构造带;SQB—南秦岭构造带;BK—碧口地块;HN—汉南杂岩地块;XM—小磨岭—陡岭变质核杂岩;NF—牛山—凤凰山变质核杂岩;PL—平利变质核杂岩;SNJ—神龙架变质核杂岩;HL—黄龙变质核杂岩;NDZ—北大巴山带;SDZ—南大巴山带;ZGB—秭归带;断裂带:LLF—陇县—洛南断裂带;SDS—商南—丹凤断裂带;MLS—勉县—略阳断裂带;NSF—宁陕断裂带;AKF—安康断裂带;CKF—城口断裂带;ZBF—镇坪断裂带;TWF—巫溪断裂带;YPGF—阳平关断裂带;b—牛山—凤凰山变质核杂岩分布图(据冯明申等,1994;杨兴科等,2016;Han et al., 2020 修改):

浅蓝色虚线为牛山—凤凰山变质核杂岩范围;黄色虚线为牛山北岩浆核杂岩范围

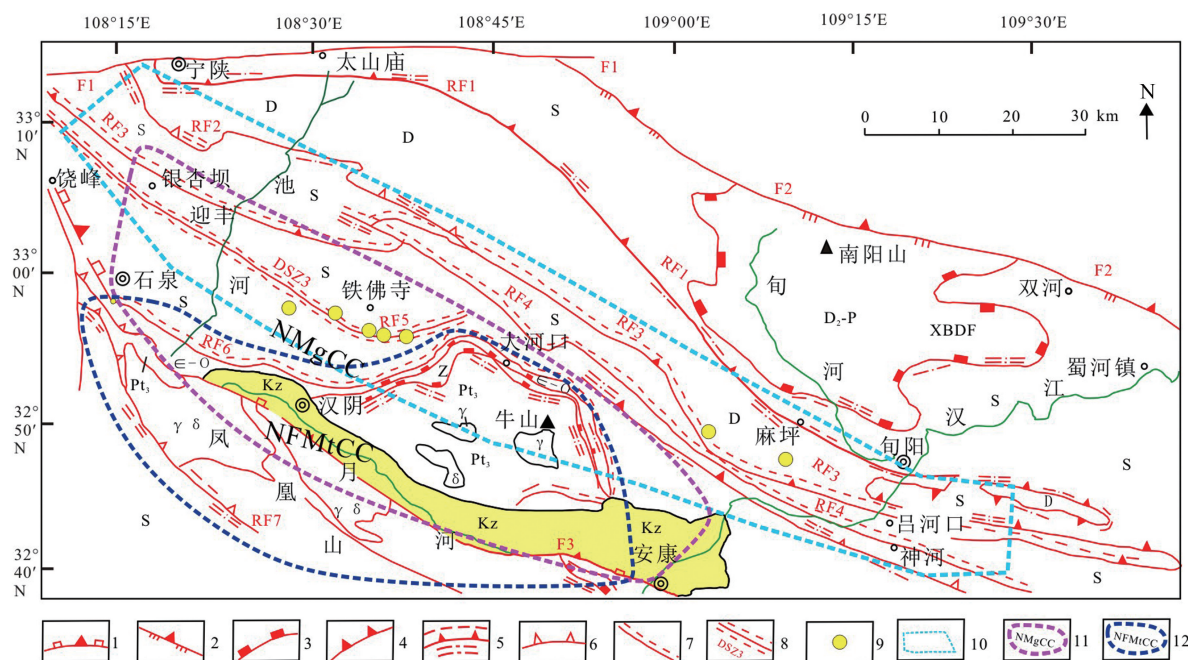


图 2 南秦岭牛山-凤凰山变质核杂岩和牛山北岩浆核杂岩构造纲要图

(据吴闻人等,1991^③;胡健民等 2002;杨兴科等,2016;韩珂等,2020 修改)

Fig. 2 Structural outline of Niushan-Fenghuangshan metamorphic core complex(NFMtCC)

and North Niushan magmatic core complex(NMgCC) in the South Qinling Mountains

1—脆性伸展-走滑断层;2—高角度逆断层;3—韧性剥离断层;4—早期韧性推覆断层;5—韧性滑脱断层;6—晚期韧性推覆断层;7—韧性斜推断层;8—脆-韧性剪切带;9—金矿床;10—整装勘查区;11—牛山北岩浆核杂岩(NMgCC)范围;12—牛山-凤凰山变质核杂岩(NFMtCC)范围;XBDP—旬阳北剥离断层系;Kz—新生界;D₂-P—中泥盆统-二叠系;D—泥盆系;S—志留系;C-O—寒武系-奥陶系;Pt₃—新元古界(武当岩群和耀岭河岩组);γ—花岗岩;γδ—花岗闪长岩;δ—闪长岩;RF1~RF7—韧性断层;F1—宁陕断裂;F2—双河-白河断裂;F3—太庙-麻坪河断裂;F4—石泉-安康(月河)断裂

质核杂岩区(出露面积超 500 km²):碧口地块(BK)-留坝-佛坪区(LF)、陡岭区(DL)、武当及周缘(WD)(图 1-a);5 个二级变质核杂岩区(面积 100~500 km²):留坝光头山及周缘(LG)、宁陕旬阳坝-月河区(XY)、柞水小磨岭区(XM)、汉阴牛山-凤凰山一带(NF)、平利一带(PL);5 个三级变质或岩浆核杂岩区(面积小于 100 km²,约几平方千米到几十平方千米):商洛沙河湾(SH)、山阳小河口一带(XC)、山阳板板山(BS)、柞水冷水沟(LS)、镇安青铜关王家岭(WJ)。外围有汉南杂岩(HN)、神龙架(SNJ)、黄龙(HL)、碧口地块(BK)、后龙门山一带的刘家坪(李佐臣,2009)、轿子顶等(图 1,YPGF 阳平关断裂带之南)。

2 岩浆核杂岩与变质核杂岩特征对比

2.1 变质核杂岩构造类型和岩石组合条件

变质核杂岩(metamorphic core complexes,MtCC)

是 20 世纪 80 年代针对板块内部或陆内造山产生的构造隆升-伸展剥离等变形变质事件,提出的一种从大陆岩石圈伸展变形中的破裂和伸展的上地壳岩石下被拉出(剥露)出来的、位于大规模缓倾斜的正断层之下的大陆中、下地壳岩石组成的地质体(Davis,1983;Lister et al., 1989;Davis 等,2002),是大陆高应变伸展环境中发育的一套伸展构造和独特岩石单位的组合地质体。

变质核杂岩具有典型的构造变形-岩石组合标志:①在空间上呈穹状或长垣状大型背斜的外貌,地貌上常为区内高山,位于造山带腹地部位;②核部由中、下地壳的中、深变质岩组成,常有晚期同构造期的中酸性侵入岩体(Davis 等,2002;颜丹平等,2002);③核部杂岩顶部发育以糜棱岩类岩石组成的缓倾至中等倾角、具有大规模位移的主剥离断层或韧性剪切带;④糜棱岩顶部被大型低角度正断层所切割,使糜棱岩成为绿泥石化、赤铁矿化碎裂岩类或绿泥石化角

砾岩;⑤上盘以不变质的显生宙沉积岩层为主,发育多世代不同类型的正断层,反映了水平伸展下的脆性变形;⑥上盘的脆性伸展方向、剥离断层的滑动方向及下盘糜棱岩的剪切运动方向通常在运动学上具一致性,反映了统一的运动方式。关键点是中、下地壳($\geq 10\sim 15$ km)岩石因伸展剥离而沿主剥离断层被拉出地表,造成地壳岩层柱大套被切失(Davis 等, 2002)。因此,上盘浅表岩石中零星出露了以糜棱岩类为代表的中、下地壳的岩石(变质核),其间沿大规模低角度主剥离断层使相当多的沉积岩层被切失,充分反映了岩石圈内部的重要断裂从浅部向深部具有特征性的系列连续变形和岩石组合特点。

2.2 岩浆核杂岩概念

岩浆核杂岩(magmatic core complex, MgCC)是近年提出的一类控岩控矿构造新类型(刘俊来等, 2001; 2002; 袁月蕾, 2014; 吕古贤等, 2015; 2016; 何昌成, 2018),指具有复杂成因、多种来源和不同岩浆演化序列的沉积岩或变质岩+多期次侵入岩体组合聚集形成的一套构造岩相带+核部侵入岩。典型构造如刘俊来等(2001; 2002)提出的辽吉岩浆核杂岩、吕古贤等(2015; 2016)提出的胶东金矿田的岩浆杂岩隆起-滑脱拆离带构造系统和演化成矿、喻安光等(1998; 2000)提出的川西南石棉伸展构造与穹状岩浆核杂岩构造。

2.3 岩浆核杂岩与变质核杂岩特征对比

岩浆核杂岩与变质核杂岩有许多类似的样式或群落组合,前人已对二者进行对比,显示出较显著的差异(刘俊来等, 2001; 吕古贤等, 2016)。本文对岩浆核杂岩与变质核杂岩的差异特征进行归类,主要从核部岩石组合、外围构造层样式、剥离界面、构造群落(平剖面组合、构造环境与样式等)、变质程度、成矿特征等方面进行差异性对比(表 1),发现各自的构造群落和典型特征。岩浆核杂岩主要由 3 个构造群落组合而成:核部与外围岩石组合+多期次侵入岩杂岩组合、剥离断层附近的韧性剪切带、外围滑覆-剥离带构造组合。一般核部岩浆杂岩主要是由与剥离滑覆时代相当的同构造侵位花岗岩类岩体组成。花岗岩核部就位于古元古代变质岩层之下,与上覆深成变质岩盖层呈局部不整合接触,形成“状似披盖片麻岩穹窿”的构造形式。

综合对比岩浆核杂岩与变质核杂岩,主要区别(表 1)体现在以下几方面。①核部杂岩组合:地表

呈穹状或卵圆状杂岩组合的是岩浆岩或变质岩。②上部构造层及其力学属性:在陆内收缩挤压-伸展引张构造演变期,或出现构造-岩浆-地台活化环境的是岩浆核杂岩,一般在古老造山带转化为陆内松弛与张裂阶段,在剪切应力环境的挤压-隆起-伸展滑脱阶段出现的则是变质核杂岩。③主界面或主剥离带特点:岩浆核杂岩表现出热液交代滑脱蚀变带,早期韧性、晚期脆-韧性剪切带或滑脱断层,滑脱带是岩浆热液交代作用的主要区段,有变质岩和花岗岩接触带,发育糜棱岩、构造片岩、铲式断层,核部为花岗岩体,少见古老变质杂岩;而变质核杂岩主剥离带主要发育在古老的变质基底岩系,可有或无深成侵入岩体,盖层多为中生代断陷盆地沉积岩。④构造群落(平剖面组合、构造变形环境与构造样式、构造应力场特点):变质核杂岩中老外新,且显示 3 层构造样式。核部为中深变质岩,可有或无侵入岩,主界面发育低角度脆-韧性剪切变形转换组构的剥离断层带及绿泥石化角砾岩,上构造层为沉积岩或浅变质岩,以区域拉张、伸展构造应力为主。基底与外围构造层的地质时代相差较大。岩浆核杂岩也是中老外新,但核部有多期侵入岩体,核部与外围岩层间的地质时代差别不大,可见侵入不整合接触关系,花岗岩体发育脆-韧性剪切带,以区域或局部挤压-伸展构造转换期应力场为主。⑤变质作用特点:岩浆核杂岩以较新的中生代岩浆热液、热动力变质作用为主,变质核杂岩则以较老或较新变质且与韧性剪切变形同期的不均匀区域变质作用为主。⑥成矿富集特点与成矿时代:变质核杂岩成矿富集在主剥离断层和韧性剪切带附近,成矿时代与侵入岩活动时代和韧性剪切变形时代相近,而岩浆核杂岩沿核部杂岩和外围岩体周围、主界面及其附近多条剥离滑脱带富集成矿,成矿时代与较新的侵入岩活动及较新的韧性剪切变形时代一致(表 1)。

3 牛山-凤凰山变质核杂岩实例特征

3.1 变质核杂岩构造位置和展布特征

陕西安康汉阴牛山-凤凰山变质核杂岩研究区(图 1、图 2)位于南秦岭复合造山带。出露在牛山-凤凰山一带的新元古代武当岩群、南华纪耀岭河岩组构成了变质核杂岩的核部(图 1、图 2)。牛山一带武当岩群主要由偏碱流纹岩、石英角斑岩、

表 1 岩浆核杂岩与变质核杂岩基本特征对比

Table 1 Comparison of basic characteristics between magmatic core complex and metamorphic core complex

基本特征对比		变质核杂岩(MtCC)	岩浆核杂岩(MgCC)
核部	核部(基底)杂岩组合	主要是各类中深变质岩+一期侵入岩+糜棱岩	是沉积岩(或中浅变质岩)+多期次侵入岩
外围	上部构造层及其应力场特点	为浅变质或沉积岩层,发育铲式正断层;是区域拉张、伸展构造应力环境,或隆起-伸展滑脱应力环境;产在古老造山带转化为陆内松弛或张裂阶段	为浅变质或沉积岩层,是在区域或局部挤压-伸展构造转换期应力场,产在挤压收缩-伸展引张-构造转换-岩浆侵位演变期,发育于陆内构造-岩浆活动转换阶段
界面	主剥离断层带	发育剥离断层和韧性剪切带,且主要发育在古老的变质基底岩系,或在侵入岩体也有糜棱岩和韧性剪切带	有剥离断层或早期韧性、晚期脆-韧性剪切带或滑脱断层,表现出岩浆热液交代蚀变或糜棱岩带或铲状正断层带
构造群落	平面和剖面构造组合	中老外新。核部中深变质岩,可有可无侵入岩,呈闭合地质体。外围浅变质岩或沉积岩,无侵入岩。剖面呈复式背形,显示横弯褶皱	中老外新,核部外围为沉积岩或变质岩及至少一期以上侵入岩体,呈闭合或半闭合,剖面复式背形,显示横弯褶皱或热力背斜
	变形变质岩石组合与构造变形环境	外围构造层为沉积岩或浅变质岩,核部与外围间有剥离断层或脆-韧性剪切带,切失地层较多,核部与外围构造层时代差别较大。核部变质岩基底可有花岗岩类侵入岩体	核部与外围构造层多为沉积岩或浅变质岩,也可出现脆-韧性剪切带,但切失地层较少,核部与外围构造层时代差别不大,可出现角度不整合或侵入接触关系
变质	变质作用特点和变质程度	核部中深变质岩,外围沉积岩或浅变质岩,以区域变质作用为主,中高级变质程度	核部和外围均可作为沉积岩或浅变质岩,以热动力变质作用和岩浆热液蚀变为主,中低级变质程度
成矿	成矿富集特点与成矿时代	主剥离断层和韧性剪切带附近成矿富集,成矿时代与侵入岩活动时代和韧性剪切变形时代相近	沿核部岩浆核杂岩和外围岩体周围、主界面带附近成矿富集,成矿时代与较新的侵入岩活动及韧性剪切变形时代相近

粗面岩及火山碎屑岩组成,凤凰山一带武当岩群则主要由绿帘(阳起或绿泥)钠长片岩、石英钠长片岩及晶(岩)屑凝灰(熔)岩、火山集块岩组成。武当岩群虽变质程度达绿片岩相,但变形复杂,发育多期面理或片理,原始层理多已被构造置换,以片理面为变形面理形成的褶皱较普遍,且十分发育韧性剪切变形和固态流变变形。耀岭河岩组主要由绢云绿泥钠长片岩、钠长绿泥片岩、绢云石英钠长片岩及绿泥绿帘(阳起)钠长片岩组成,夹少量炭质绢云千枚岩,牛山—凤凰山一带多见有火山角砾(熔)岩、角砾凝灰岩、火山集块岩等。总体上以基性火山-沉积岩组合为主,原岩为细碧岩、(枕状)玄武岩、少数流纹岩、角斑岩及其火山碎屑岩。牛山与凤凰山 2 个地段的核杂岩组构稍有差异。

前人对其核部的新元古代变质岩与外围岩层间韧性剪切带中的云母类矿物进行了⁴⁰Ar-³⁹Ar 测年(冯明申等,1994;胡健民等,2009;2011;陈虹等,2014;董树文等,2014;徐学义等,2015;杨兴科等,2016;2020;Han et al., 2020;韩珂等,2020),得到多

组剪切变形年龄 222~189 Ma、178~163 Ma,石泉—饶峰一带韧性剪切带黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 测年 169~161 Ma(胡健民等,2009;2011;杨兴科等,2020)。以上表明,该区除新元古代和加里东期变形外,至少还经历了印支期和燕山期侏罗纪 2 期构造变形-岩浆侵位-热液蚀变事件。

多轮 1:25 万、1:5 万地质调查填图(胡健民等,2009;2011;徐学义等,2015)^{③④⑤⑥}和近年国家级整装勘查区综合研究及矿田构造-蚀变岩相专题填图(张康,2012;杨兴科等,2016;2020;韩珂等,2020)发现,牛山-凤凰山变质核杂岩周缘及其北部上构造层石泉—汉阴—旬阳一带,存在有较明显的以新元古代中深变质岩组合和早古生代一套浅变质或未变质但强变形岩石组合(图 3、图 4、图版 I)构成的变质核杂岩。除牛山-凤凰山核部变质岩和新元古代—早古生代侵入岩外,在凤凰山北部、牛山及其北部沈坝—长沟—黄龙一带构造层还发育三叠纪—侏罗纪多期侵入岩,故在牛山北部叠加形成了岩浆核杂岩(NMgCC)。两类

核杂岩构造群落组合明显,一系列大型北西向线性脆-韧性剪切带系统变形较强烈(DSZ1-5),新生面理十分发育(图1—图6)。石泉-汉阴-旬阳北部几十千米长的脆-韧性剪切带,控制了金银、铜、铁、铅锌矿,以及更北部的镇安西部钨钼金等构造-岩浆-气液蚀变成矿富集及矿化蚀变异常带等(杨兴科等,2016;2020;韩珂等,2020)(图1、图2、图4—图6、图版I)。

3.2 变质核杂岩构造单元和构造-岩石组合特征

牛山-凤凰山变质核杂岩核部出露古老变质褶皱基底,主要是新元古代武当岩群、耀岭河岩组变质岩,外围岩层依次有震旦系、寒武系、奥陶系、志留系、泥盆系,由浅变质强变形的早古生代浅变质岩层和部分泥盆系沉积岩组成(图1、图2;表2)。

变质核杂岩和岩浆核杂岩构造单元划分:旬阳-镇安韧性滑脱带、石泉-神河韧性滑脱带、饶峰-石泉-大河口伸展剥离断层、牛山-凤凰山变质核杂岩(NFMtCC)、牛山北岩浆核杂岩(NMgCC)、汉阴-安康断陷盆地、汉王-汉阳城伸展剥离断层、紫阳-平利滑脱带等(图1、图2)。

凤凰山一带由于多条断裂切割呈不规则条带状、棱形条块状。北侧被饶峰-池河-安康断裂带截切,南侧以凤凰山南的公家寨推覆断裂带与汉王城变质叠覆岩片相邻^④。牛山一带表现在牛山北侧、东侧以基底剥离-滑脱断层与茨沟-吕河口滑脱逆冲推覆岩片接触,南部与汉阴-月河-安康古近系一新近系断陷盆地叠加,向北西在马岭关被巴山弧形断裂截切,平面呈不规则椭圆状、蝌蚪状。

3.3 变质核杂岩伸展构造群落与变形特征

牛山-凤凰山变质核杂岩物质组成为新元古代变质火山岩建造和铁瓦殿超单元侵入岩。以基底剥离断层为界,伏于汉王城叠覆岩片变质沉积盖层之下。核部以发育前造山期褶皱层近顺层固态流变构造群落(图3)、印支主造山期韧性剪切构造群落及多级韧性剪切带为特征,面理置换较彻底,属强变形中低级变质地体。主要发育伸展构造群落。表现为主造山期前顺层韧性剪切带,形成石英旋斑、流纹面理顺层褶皱、糜棱面理等。

构造群落有:①韧性剪切变形主要出现在武当岩群杨坪岩组中,为规模不等的顺层韧性剪切带。②褶皱多为核部基底岩层发育的露头尺度顺层褶

皱。牛山隆起受主造山期后北东向褶皱叠加影响,该带隆升暴露地表。③面理置换:基底岩层面理置换,主要发育杨坪岩组凝灰岩片理化、角斑岩顺层剪切带面理和耀岭河岩组基性火山岩片理。④变形期次与构造层次:根据面理置换和褶皱叠加样式,早期顺层韧性剪切带,主要为流劈理、流变褶皱等,属于中深构造层次,形成于主造山期前。伸展构造群落表现在:晋宁运动使扬子陆块稳定成型;加里东运动导致大规模南北向伸展-拉张作用,形成多级伸展剥离断层;华力西期持续区域性隆升发展,基底抬升,形成凤凰山北部隆滑并出现多级剥离断层系(图1—图3),且主要形成褶皱叠层,部分区段出现韧性剪切滑脱剥离系。褶皱叠层作为主造山期前加里东-海西期伸展构造的重要形式,广泛发育于核部岩层及下古生界中。受岩石能干性、构造层次等因素的差异影响,其类型不尽相同(图3)。

主要构造样式有:① S_{n+1} 面理:发育在核部变质岩中,呈残余片理出现在 S_{n+2} 片理弱变形域或出现在密集发育的韧性剪切带 S_{n+2} 剪切面理变形域^④。②固态流变褶皱:发育于核杂岩中基底变质岩或盖层浅变质岩中,以近顺层紧闭A型褶皱、鞘褶皱为主,或出现近顺层掩卧褶皱构成的固态流变褶皱(图3)。以 S_{n+1} 面理为变形面, S_1 为轴面劈理(产状 $25^\circ\sim 55^\circ$ 面 $\angle 15^\circ\sim 32^\circ$)。③线性构造:主要是剥离断层和韧性剪切带。有杨坪岩组与耀岭河岩组间的基底剥离断层、马岭关杂岩与震旦系之间的胡家寨剥离断层、耀岭河岩组与震旦系之间的槐树湾剥离断层、滑覆系统中发育的多级分划性韧性剪切带(图3)。

伸展构造或剥离断层的共同特征是:发育长英质或钙质糜棱岩、千糜岩、构造片岩、S-L构造岩、剪切面理、顺层掩卧褶皱、近顺层A型无根流变褶皱、鞘褶皱、拉伸线理($6^\circ\angle 27^\circ$)、S-C组构、矿物细晶化、石英拔丝组构、核幔组构、长英质眼球状碎斑压力影、长石双晶扭折、粘滞性石香肠等^④。①主剥离断层界面发育宽数十厘米至1m的千糜岩、超糜棱岩带。造成地层柱上部变沉积岩与耀岭河岩组变基性火山熔岩层切失较严重^④。主界面产状变化较大,总体倾向北东—北北东向,倾角 $7^\circ\sim 45^\circ$ 。②胡家寨剥离断层(RF2)沿核部杂岩与震旦系界面发育。受后期构造切失,出露受限于池河—胡家寨

表 2 牛山-凤凰山变质核杂岩和牛山北岩浆核杂岩构造-岩石组合

Table 2 Structure rock assemblage of Niushan-Fenghuangshan metamorphic core complex and North Niushan magmatic core complex

地质年代				主要地层岩石组合与年龄	构造-岩层 接触关系	岩浆核杂岩 (MgCC)	变质核杂岩 (MtCC)
宙	代	纪	世				
显生宙	新生代	第四纪	全新世 (Qh)	松散堆积砂砾层、卵砾石层、砂土、亚砂土等,沿月河河谷阶地、河流两侧或坡地、地势低洼处分布	不整合		
		新近纪—古近纪	(N-E)	杨家湾组(Ny)+石泉组(Es):紫红色、灰色粗-细碎屑岩-粘土岩组合,下部含砾砂岩、杂砂岩、粘土质砂岩,向上为粉砂岩、粉砂质粘土岩、粘土岩等,发育斜层理,为陆相断陷盆地沉积,厚度大于1 km	不整合,沿月河断陷盆地分布	叠加断陷盆地	
	中生代	侏罗纪	(J ₁₋₂ M)	勉县群(J ₁₋₃ M):紫红色中厚层含砾砂岩、砂岩、粉砂岩、粘土岩偶夹煤线,主体粗碎屑岩夹泥质细碎屑岩	角度不整合	陆相沉积+三叠纪—侏罗纪花岗岩、煌斑岩	
	晚古生代	泥盆纪	中晚泥盆世 (D ₂₋₃)	蟠龙山组(D ₃ P):碳酸盐岩夹碎屑岩。灰岩、白云岩夹绢云粉砂质板岩、钙质板岩;星红铺组(D ₃ X):变粉砂质泥岩、泥灰质板岩;石家沟组(D ₂ S-d):碳酸盐岩组合,偶夹细碎屑岩;古道岭组(D ₂ G):碳酸盐岩组合,重结晶灰岩、生物碎屑灰岩等	整合或平行不整合 韧性剥离断层,片理平行接触	三叠纪—侏罗纪花岗岩脉、煌斑岩脉	上构造层沉积岩或浅变质岩组合
				梅子堖岩组(S ₁ m):灰色含石榴子石绢云石英片岩、含石榴子石绢云石英千枚岩、条带状千枚状变粉砂岩、粉砂质绢云千枚岩,夹条带状石英岩、透镜状变砂岩、硅质岩、炭硅质岩、变质重结晶灰岩,个别夹粗面质火山岩、凝灰质砂岩夹层	整合接触,构造片理平行接触	三叠纪—侏罗纪花岗岩脉、煌斑岩脉+早古生代辉石岩-辉绿岩脉、正长岩-粗面岩	上构造层沉积岩或浅变质岩组合
	早古生代	志留纪	早志留世(S ₁)	斑鸠关岩组(O ₃ -S ₁ b):灰色、深灰色炭质、硅质粘板岩夹灰绿色绿泥钠长石英片岩、绿帘钠长片岩,偶夹绿帘石化、绿泥石化凝灰岩、变质火山熔岩等	整合/断层接触,构造片理平行接触	三叠纪—侏罗纪花岗岩+Pz ₁ 辉石岩-辉绿岩脉叠加	上构造层绿片岩相变质,早古生代变形较强
				洞河岩组(Odh):灰色绢云石英片岩、绿泥绢云石英片岩夹中薄层石英岩、大理岩、深灰色炭硅质板岩、变长石英砂岩、结晶灰岩、绢云母粉砂质板岩等	整合/断层接触,构造片理平行接触,韧性剪切带接触		
		奥陶纪	中奥陶世—早中寒武世(O-Є ₁₋₂)	箭竹坝岩组(Є ₁₋₂ j):灰色含炭硅质板岩,炭硅质板岩夹炭质片岩、绢云石英片岩、结晶灰岩,偶夹变砂岩		早古生代辉石岩脉、辉绿岩脉侵位叠加	上构造层组合沉积岩+变质岩
				鲁家坪岩组(Є ₁ l):深灰色硅质岩夹含炭硅质板岩,炭硅质板岩夹炭质片岩。下部中厚-薄层硅质岩,上部薄层薄板状硅质岩、炭硅质板岩夹炭质片岩			
	寒武纪			灯影组(Zdn):碳酸盐岩,如结晶灰岩、白云质灰岩夹片岩、硅质岩等。韧性剪切固态流变构造发育	剥离断层接触,构造片理平行接触 主剥离断层		
				陡山沱组(Zds):含炭绢云石英片岩夹薄层灰岩、炭硅质板岩、白云质灰岩、含锰灰岩条带等,片理及固态流变构造发育,低绿片岩相变质岩			
元古宙	新元古代	震旦纪	灯影组-陡山沱组	耀岭河岩组(Qb-Nh) _{yl} :变质基性—中基性火山岩系。下段为灰绿色绢云绿泥石英钠长片岩、绢云绿泥阳起钠长片岩,上段为绿帘绿泥阳起钠长片岩、绢云绿泥石英钠长片岩等,夹变火山角砾岩、火山集块凝灰岩等。锆石 U-Pb 年龄 795 Ma, Rb-Sr 年龄 744 Ma	与南北上下岩层均呈剥离断层接触;与耀岭河岩组间为剥离断层接触,见糜棱岩和韧性剪切带	可见早古生代基性—中基性侵入岩、三叠纪—侏罗纪花岗岩	核杂岩核部中深变质岩;基底构造单元组合;可见新元古代花岗岩侵入体
				武当岩群(QbW):杨坪岩组:变质片岩、变酸性火山集块岩、变火山角砾岩、糜棱岩、变质碎屑岩等;姚坪岩组:中基性绿片岩相变火山岩—各类片岩、变中基性火山角砾凝灰岩、变安山玄武岩、凝灰质英安岩等,锆石 U-Pb 年龄 1686±75 Ma;马岭关杂岩:为马池幅新建非正式构造-岩层单位,石英钠长片岩夹蚀变辉长岩、花岗质糜棱岩、变粒岩。锆石 U-Pb 年龄 1700±12 Ma			

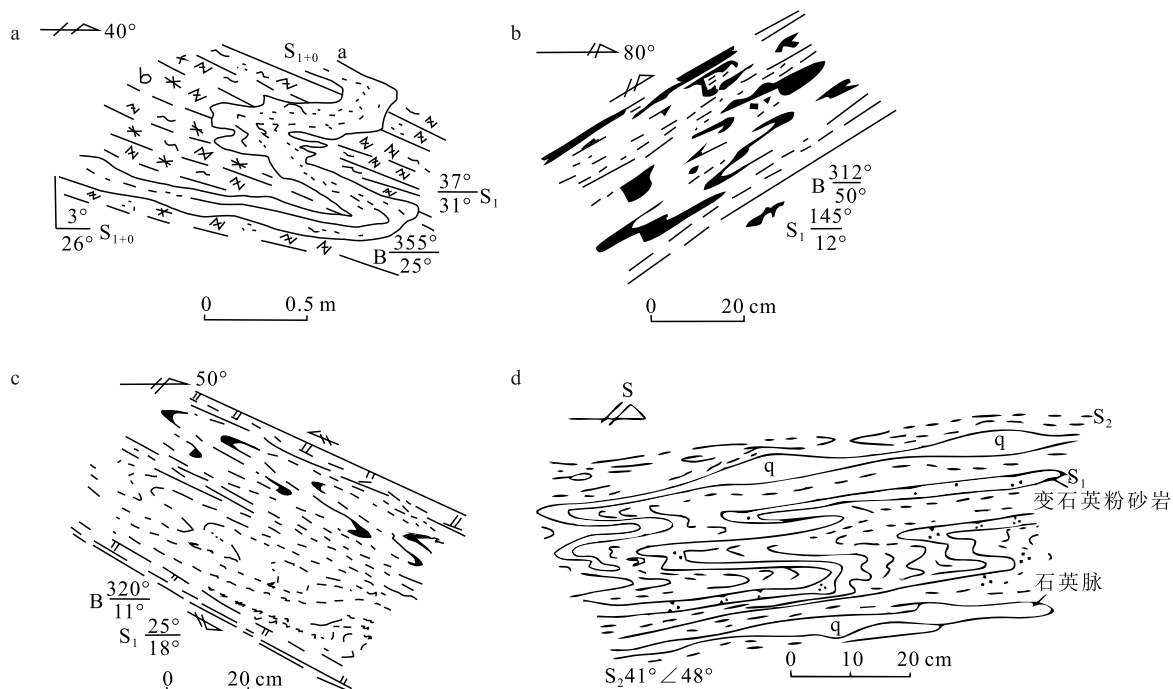


图3 牛山-凤凰山变质核杂岩核部与周缘主界面及上部岩层中固态流变褶皱和褶叠层样式^④

Fig. 3 Solid rheological folds and fold stacking patterns in the core and peripheral main interface of Niushan-Fenghuangshan metamorphic core complex and the upper strata

a—石泉松树沟:耀岭河岩组变火山岩与变砂岩流变褶皱及 S_{n+1}/S_{n+2} 面理置换;b—平梁沐浴河:寒武系变质灰岩中固态流变褶皱;c—汉阴小立元河:寒武系变质灰岩中顺层掩卧褶皱;d—汉阴池河:奥陶系洞河岩组二云石英片岩中变粉砂岩固态流变褶皱。q—石英脉

一带。上盘滑覆体由上震旦统一奥陶系组成,近断层发育。主滑移界面为一截然的岩性分界面和韧性剪切带,发育宽数十厘米的千糜岩带和数百米的糜棱岩带。倾向北北东,倾角 $28^{\circ}\sim 59^{\circ}$ 。③槐树湾剥离断层也是主剥离断层之一,沿耀岭河岩组与上震旦统界面发育。受后期构造破坏,断续出露于凤凰山两侧槐树湾、松树沟-龙王沟-大堰沟、公家寨、安溪桥等地^④。发育宽近百米的千糜岩、构造片岩带,拉伸线理 $La=164^{\circ}\angle 43^{\circ}$;耀岭河岩组发育宽数百米的糜棱岩带。主滑移界面产状变化较大,在核杂岩北侧北倾,南侧南倾,倾角 $10^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 。

变质核杂岩上部脆-韧性剪切变形特征体现在汉阴北部广泛发育多期新生面理,面理置换较明显。早古生代岩石组构发生了显著变化,表现出新生面理与局部的先期面理近平行排列(图3)。梅子垭岩组普遍出现固态流变褶皱样式(图3)和脆-韧性剪切变形,岩石变质程度达绿片岩相,且构造变形较强,新生 S_2 面理为主期面理(图3、图4、图版I)。

4 牛山北岩浆核杂岩构造群落特征

4.1 岩浆核杂岩特征

岩浆核杂岩与变质核杂岩相似但又明显不同(表1),主要表现在核杂岩核部和外围岩层是否出现2期以上的侵入岩浆活动。

在凤凰山北部、牛山及北部构造层,经区调填图和专项研究^{③④⑤⑥}(杨志华等,2002;胡健民等,2009;董树文等,2014;徐学义等,2015;杨兴科等,2016;2020;韩珂等,2020),发现有3类4~5期侵入岩:铁瓦殿新元古代石英闪长岩-花岗闪长岩体($\delta o-\gamma \delta Pt_3$)、五里南侧早古生代辉石岩体(ΨtPz_1)、三叠纪—早侏罗世花岗岩体($\eta \gamma T-J_1$)、晚侏罗世花岗岩脉($\eta \gamma J_3$)^④(徐学义等,2015)(图1、图2)。除新元古代和早古生代侵入岩与牛山-凤凰山变质核杂岩相伴外,中生代(三叠纪、早侏罗世、晚侏罗世)花岗岩类侵入岩是该区岩浆核杂岩的孪生体。

4.2 新元古代侵入岩时空群落

新元古代侵入岩,以中性—中酸性侵入岩为主,发育糜棱岩化或片麻状组构,如胭脂沟-马岭关

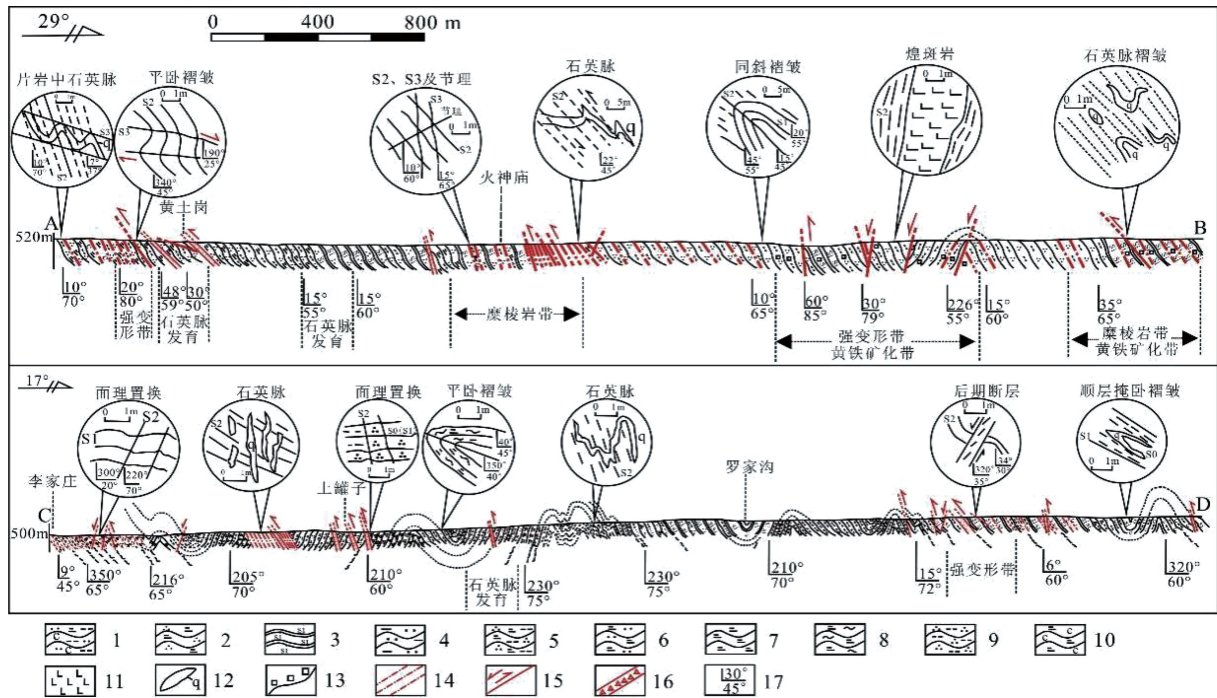


图 4 牛山北岩岩浆核杂岩与北部脆-韧性剪切带变形组构(a-o)和实测剖面构造特征

Fig. 4 Deformation fabric(a-o), measured section and structural style of North Niushan magmatic core complex and northern brittle-ductile shear zone

- 1—含炭粉砂质二云片岩;2—粉砂质二云片岩;3—硅质板岩;4—粉砂质泥质片岩;5—二云石英片岩;6—粉砂质云母片岩;
7—绿泥片岩;8—绿泥石英片岩;9—黑云母石英片岩;10—含炭云母片岩;11—煌斑岩;12—石英脉;13—黄铁矿化;
14—糜棱岩;15—逆断层或剥离正断层;16—断层破碎带;17—产状(上倾向、下倾向)

花岗质片麻岩、铁瓦殿-玉皇庙片麻状石英闪长岩-花岗闪长岩体,是一类与变质核杂岩配套的核部侵入岩。玉皇庙片麻状石英闪长岩锆石 U-Pb 年龄为 745 ± 14 Ma^④,牛山曼坡岭闪长岩锆石 U-Pb 年龄为 668 ± 19 Ma、花岗闪长岩年龄为 741 ± 5 Ma,凤凰山铁瓦殿石英二长岩锆石 U-Pb 年龄为 742 ± 5 Ma、石英闪长岩-二长花岗岩年龄为 722 Ma;石英闪长岩侵位于 704 Ma(徐学义等,2015)。总体看,经过较确切的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,获得的年龄数据集中在 $745 \sim 668$ Ma 之间,显示新元古代—早震旦世显著的侵入岩浆活动,可能与新元古代汇聚—裂解事件有关。在外围构造层早古生代岩层中难以见到新元古代侵入岩,但可能在某些构造混杂岩-断裂破碎带内夹杂有新元古代的侵入岩脉。前人在石泉北部下志留统梅子垭岩组绢云石英片岩穿插的中酸性石英闪长岩脉中采样,获得锆石 U-Pb 年龄为 771.9 ± 3.4 Ma(段少帅等,2017),发现一组新元古代岩浆活动的数据,与志留纪岩层时代不符,与汉南杂岩和牛山-凤凰山变质核杂岩内新元古代

的岩浆活动具有同步性,指示区域伸展裂解的构造背景及其复杂演化。其中的构造破碎带和中性岩脉的穿插关系与构造演化较复杂,值得深入研究。

4.3 早古生代侵入岩时空群落

早古生代基性—超基性侵入岩脉,主要为辉石岩-辉绿岩株、岩脉,如马岭关-金家沟超基性岩-基性岩-煌斑岩序列组合。对马岭关—太平沟一带的太平寨基性岩(变辉长岩、变辉绿岩)单矿物辉石进行 K-Ar 测年,获得年龄为 421.3 ± 20.8 Ma、 471.4 ± 23.2 Ma(徐学义等,2015),显示岩浆活动时代在奥陶纪—早志留世。这些碱性杂岩属于高钛富铁的碱性岩类,形成于早古生代的大陆伸展拉张环境(徐学义等,2015)。凤凰山核部、牛山核部和东缘外围构造层均可见此类侵入岩,区域上分布广泛。标志着牛山-凤凰山变质核杂岩的结束和牛山北岩岩浆核杂岩开始形成。与北大巴山-南秦岭带早古生代(加里东期)发育的区域伸展构造伴随的基性侵入岩-碱性岩活动事件对应(徐学义等,2001;胡健民等,2002),区域上产出有铌钽矿床并具有找矿

潜力。

4.4 中生代花岗岩时空群落

中生代花岗岩类活动事件:在凤凰山变质核杂岩北部的马院子、黄金寨、朱家沟和牛山及北部岩浆核杂岩区外围,如汉阴北长沟、柳坑、元滩子、黄龙观音河等地均见有黑云二长花岗岩、(细晶)花岗岩、花岗闪长岩脉及煌斑岩脉(图5)。近年,笔者通过汉阴北部多个金矿区控矿构造-蚀变岩相填图的专题调研,除前人确定的三叠纪和晚侏罗世侵入岩外,明确识别出早侏罗世的中酸性岩浆侵入活动事件(图版Ⅱ、图7、图8)。此类侵入岩脉在南秦岭带的早期调研活动中多被忽视,目前发现这类半隐伏状侵入岩体对该区金矿及其更北部的宁陕东部-镇安西部钨钼金成矿富集有重要的控制作用(杨兴科等,2016;2020;2021;Han et al., 2020;韩珂等,2020)。

本次选择长沟金矿东延的柳坑金矿段钻孔岩心中发现的细晶花岗岩(图5、图7、图版Ⅱ)和黄龙

金矿西北部观音河花岗闪长岩脉(图5、图版Ⅱ、图8)进行研究,花岗岩样品分别采自柳坑金矿段0号勘探线钻孔002孔深568m处的新鲜无蚀变岩心样和黄龙矿区观音河花岗闪长岩脉(采样坐标:东经 $108^{\circ}31'5.19''$ 、北纬 $33^{\circ}03'20.16''$)。本文仅列出对这类花岗岩脉进行LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素测年的结果,以明确牛山北部岩浆核杂岩相关的岩浆活动时代。

对2处岩浆岩脉样品的锆石分选,由河北省廊坊市诚信地质服务有限公司完成。使用重液浮选和电磁分离方法挑选锆石,在双目镜下挑选晶形和透明度较好的锆石制靶、抛光清洗、镀膜,之后在长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室完成锆石阴极发光(CL)照相。最后在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行锆石激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)原位U-Pb测年分析工作。激光剥蚀束斑直径约 $30\text{ }\mu\text{m}$,剥蚀深度 $20\sim 40\text{ }\mu\text{m}$ 。每个测点的同位素比值与U-Pb

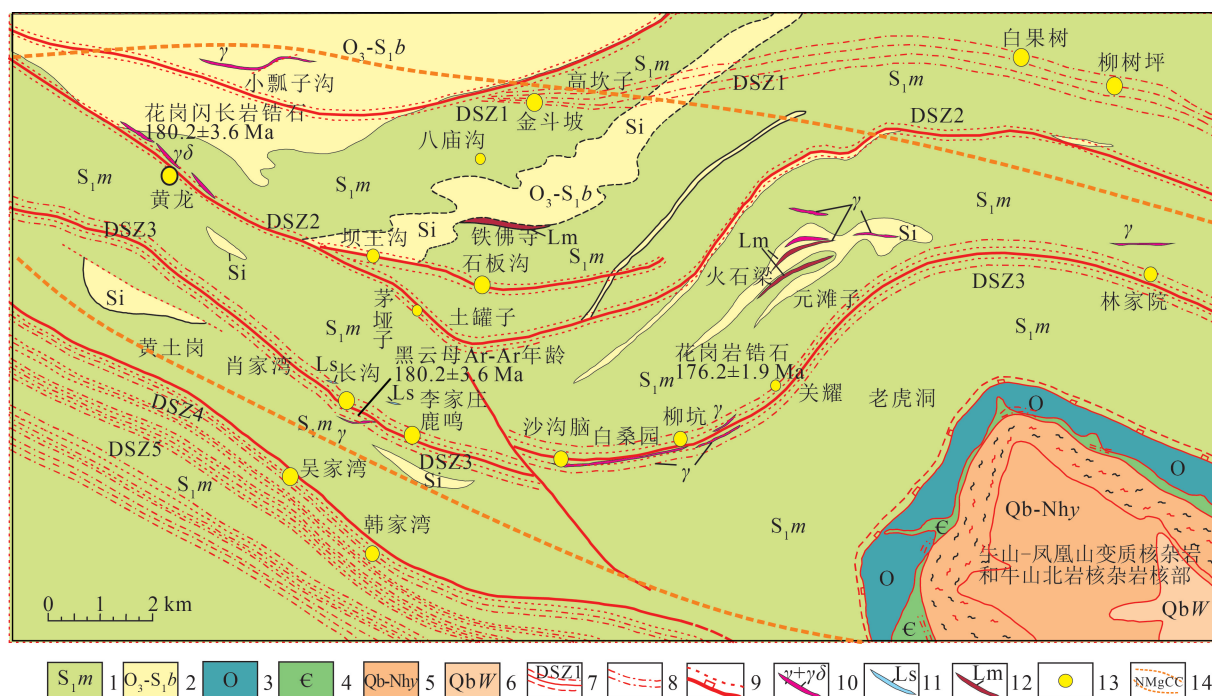
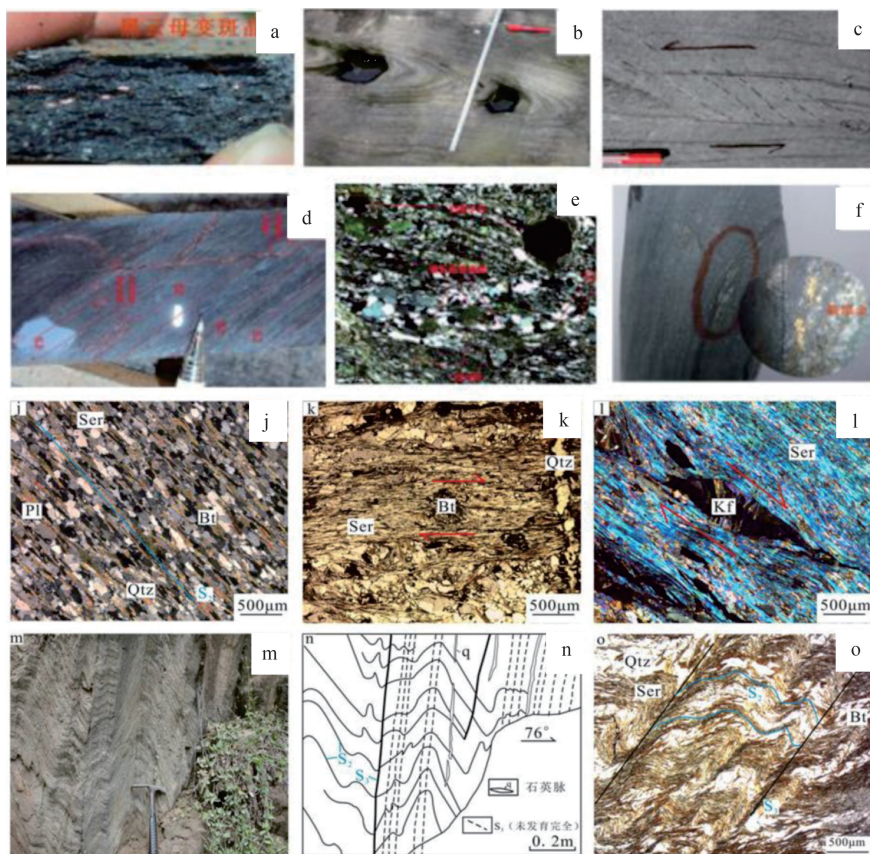


图5 牛山-凤凰山变质核杂岩、牛山北岩浆核杂岩与脆-韧性剪切带及金矿床分布图

Fig. 5 Distribution of Niushan-Fenghuangshan metamorphic core complex and North Niushan magmatic core complex with brittle-ductile shear zone and gold deposits

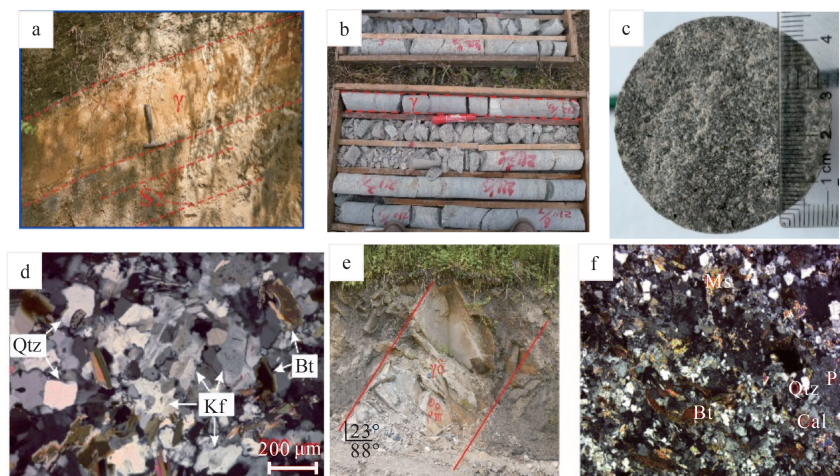
- 1—志留系梅子垭岩组;2—奥陶系-志留系斑鸠关岩组;3—奥陶系;4—寒武系;5—青白口系-南华系耀岭河岩组;6—青白口系武当岩群;
- 7—脆-韧性剪切带及其编号;8—糜棱岩;9—剥离断层;10—花岗岩(长沟、柳坑、元滩子等)或花岗闪长岩(黄龙观音河、小瓢子沟等);
- 11—灰岩透镜体(长沟);12—褐铁矿化条带(铁佛寺、火石梁);13—金矿床(黄龙、金斗坡、柳树坪、坝王沟、石板沟、长沟、鹿鸣、沙沟、柳坑、吴家湾等金矿);14—牛山北岩浆核杂岩 NMgCC 北支花岗质岩浆活动范围

图版 I Plate I



a.脆-韧性剪切带内黑云母变斑晶;b.紧闭同斜褶皱;c.S-C 组构与剪切方向;d.钻孔岩心发育的剪切面理 S_2 ;e.剪切面理显微构造与新生石英条带;f.沿剪切面理 S_2 分布的裂隙状自然金;j.新生矿物黑云母石英拉长定向顺 S_2 面理发育;k.云母眼球状构造;l.钾长石呈剪切旋斑状;m、n、o.露头或磨光面展示 S_2 与 S_3 面理置换。Bt—黑云母;Ser—绢云母;Pl—斜长石;Qtz—石英;Kf—钾长石;q—石英脉

图版 II Plate II



a~f.牛山北岩浆核杂岩柳坑矿段钻孔花岗岩和黄龙矿区观音河花岗闪长岩露头及显微照片。a.柳坑矿段花岗岩(γ)露头;b.柳坑矿段花岗岩钻孔岩心;c.柳坑矿段 Zk002 花岗岩心断面;d.柳坑矿段花岗岩显微镜下矿物组构;e.黄龙矿区观音河花岗闪长岩($\gamma\delta$)露头,数字代表岩脉边界产状;f.黄龙矿区观音河花岗闪长岩显微镜下矿物组构。Qtz—石英;Kfs—长石;Bt—黑云母;Pl—斜长石;Ms—白云母;Cal—碳酸盐化

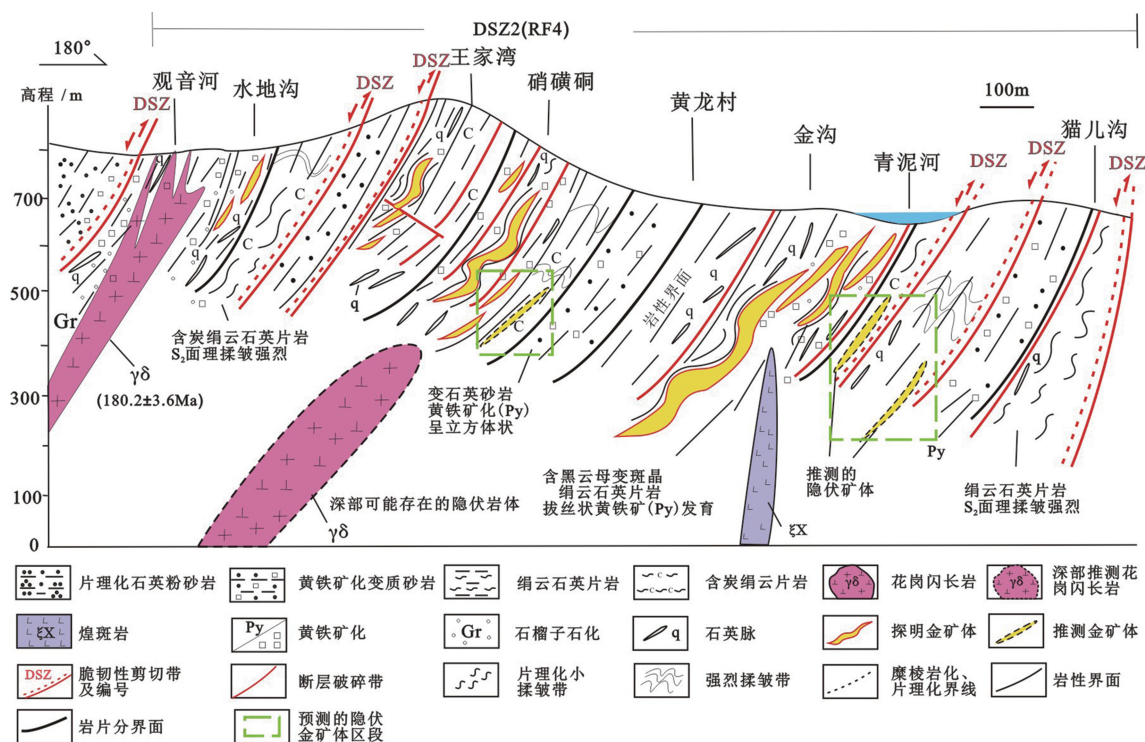


图6 牛山北岩浆核杂岩北部黄龙金矿区观音河侵入岩脉及控矿构造模式

Fig. 6 Guanyinhe intrusive dyke and ore controlling tectonic model in Huanglong gold deposit, North Niushan magmatic core complex

DSZ2(RF4)—黄龙—石板沟脆—韧性剪切带

年龄计算采用 Glitter 软件完成,年龄加权平均值计算及谐和曲线绘制采用 Isoplot 完成。

对柳坑矿段钻孔岩心样品分选出的锆石矿物由制靶并拍摄 CL 图像(图7),样品锆石颜色明亮,形态以长柱状和短柱状为主,长宽比为1:1~1:4,大多数锆石晶体内部可见自形生长环带,晶面与两侧棱锥均发育较好。Th/U 值为0.44~1.03,平均为0.65,显示出典型的岩浆锆石特征。本次共获得16个有效测点,其中 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于168~183 Ma 之间,锆石 U-Pb 谐和图(图7)显示16个测点数据分布较集中,其年龄加权平均值为 176.0 ± 1.9 Ma (MSWD=1.30),代表了该花岗岩的结晶年龄,为早侏罗世岩浆侵位活动的产物。

汉阴北黄龙矿区北部观音河花岗闪长岩脉,呈多条脉状侵入于梅子垭岩组含黑云母变斑晶绢云母石英片岩中,顺 S_2 面理产出,其中采样岩脉长25 m、宽3 m,岩脉产状 $23^\circ \angle 88^\circ$ (图5、图版II、图6、图8)。显微镜下,石英含量约42%,斜长石含量约46%,正长石约1%,黑云母含量4%,白云母含量3%,其他暗色矿物少量。岩脉具有高硅、低铝、贫钙

镁、富碱的特征,富集 Rb、Ba、Th 等大离子亲石元素及 Sr 等不相容元素,亏损 K、Ta、Nb 等元素,未见 Eu 异常,稀土元素配分模式呈陡的右倾型,成岩类型判别图显示为 I 型花岗岩。

挑选的锆石呈现无色—浅黄色、透明—半透明状,条状和柱状,自形程度较高,大小为50~180 μm ,长宽比3:1~4:1。锆石内部振荡生长环带较显著,明显具有岩浆锆石的特征。本次共获得16个有效测点,通过 Pb 校正后进行锆石 U-Pb 谐和图分析(图8),显示16个测点数据分布较集中,且几乎均位于谐和线上及周围, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中于 $174 \sim 194 \pm 2$ Ma,其年龄加权平均值为 180.2 ± 3.6 Ma (MSWD=0.37),代表了该花岗闪长岩脉的结晶年龄,为早侏罗世,属于早燕山期陆内造山期构造—岩浆侵位活动的产物。

牛山—凤凰山一带除多期变质变形外,在核部和外围构造层浅变质岩层中,出现多期岩浆侵入活动事件。除早古生代基性岩墙岩脉外,可能有三叠纪花岗岩类侵入体、早侏罗世花岗闪长岩或细晶花岗岩及煌斑岩脉(图6)、晚侏罗世花岗岩脉。前人

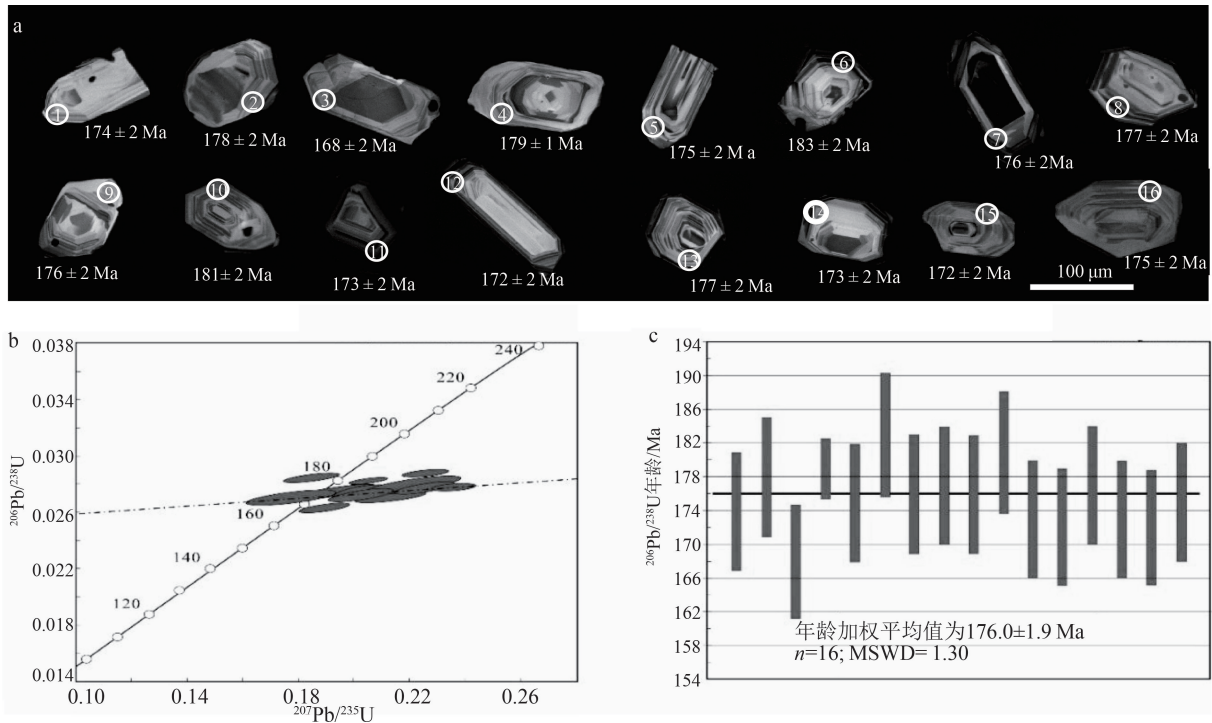


图 7 牛山北岩浆核杂岩柳坑矿段钻孔花岗岩锆石 CL 图像(a)、U-Pb 谐和图(b)和年龄频谱图(c)

Fig. 7 Zircon CL image(a), U-Pb concordia(b) and age frequency(c) diagrams of granite in Liukeng ore section of North Niushan magmatic core complex

曾将牛山、柳坑、长沟、黄龙观音河花岗岩脉的时代归为三叠纪^④(徐学义等, 2015)。本次锆石测年证实有早侏罗世花岗岩脉。此外, 也可能有凤凰山北马院子黑云二长花岗岩所测黑云母 K-Ar 年龄 156.5 Ma^④(徐学义等, 2015)的岩脉。由此表明, 在中生代的三叠纪—晚侏罗世, 都可能代表岩浆核杂岩的花岗质岩浆侵位活动事件。

综合分析, 牛山及北部中生代经历了三叠纪、早侏罗世、晚侏罗世 3 期构造-岩浆侵位活动与热液蚀变-成矿富集, 表明除变质核杂岩外, 晚三叠世以来牛山北部还叠加出现岩浆核杂岩。

5 构造与金成矿规律

5.1 北部构造变形与金成矿规律

经过对牛山之北的汉阴北部一带控矿构造-蚀变岩相填图研究, 发现与牛山北岩浆核杂岩配套的脆-韧性剪切带十分发育(图 4)。经汉阴北部金矿田统计, 其中北西向和北西西向展布的 S_2 期面理最发育, 大多数新生矿物(石英条带、绢云母、黑云母、拔丝状黄铁矿)和自然金均沿 S_2 面理分布(图 4)。

不同期次的面理中还发育多种样式的石英团块和石英脉, 大多数石英脉沿 S_2 面理发育, 部分地段可见沿稍早期 S_1 面理的石英脉, 多数已被 S_2 面理改造。此外, 矿田区多个花岗岩脉边部蚀变带内岩石多已褪色化、热液蚀变矿物次生加大。经对石泉-汉阴金矿整装勘查区多个矿区控矿构造和金矿床流体包裹体研究, 发现金矿化成矿流体来源与富集均与构造变形-变质和岩浆气液蚀变叠加富集有关, 尤其是晚印支期-燕山期叠加的岩浆核杂岩及配套构造群落, 如脆-韧性剪切带及其变形-中生代岩浆侵位-热液蚀变对该区金矿成矿富集, 具有十分密切的系统内在关联性。

5.2 构造变形与成岩成矿时代

根据对汉阴北部控矿构造-蚀变岩相填图^{④⑤⑥}(杨兴科等, 2016; 2020; 2021; Han et al., 2020; 韩珂等, 2020)研究, 针对多期面理的相互置换与切穿关系, 明确了岩浆核杂岩和变质核杂岩与各期面理的大致对应时段(图 6、图 9、图 10)。如董树文等(2014)研究测得, 凤凰山变质核杂岩北缘安康断裂带北侧附近韧性剪切带内变形面理中云母⁴⁰Ar-³⁹Ar

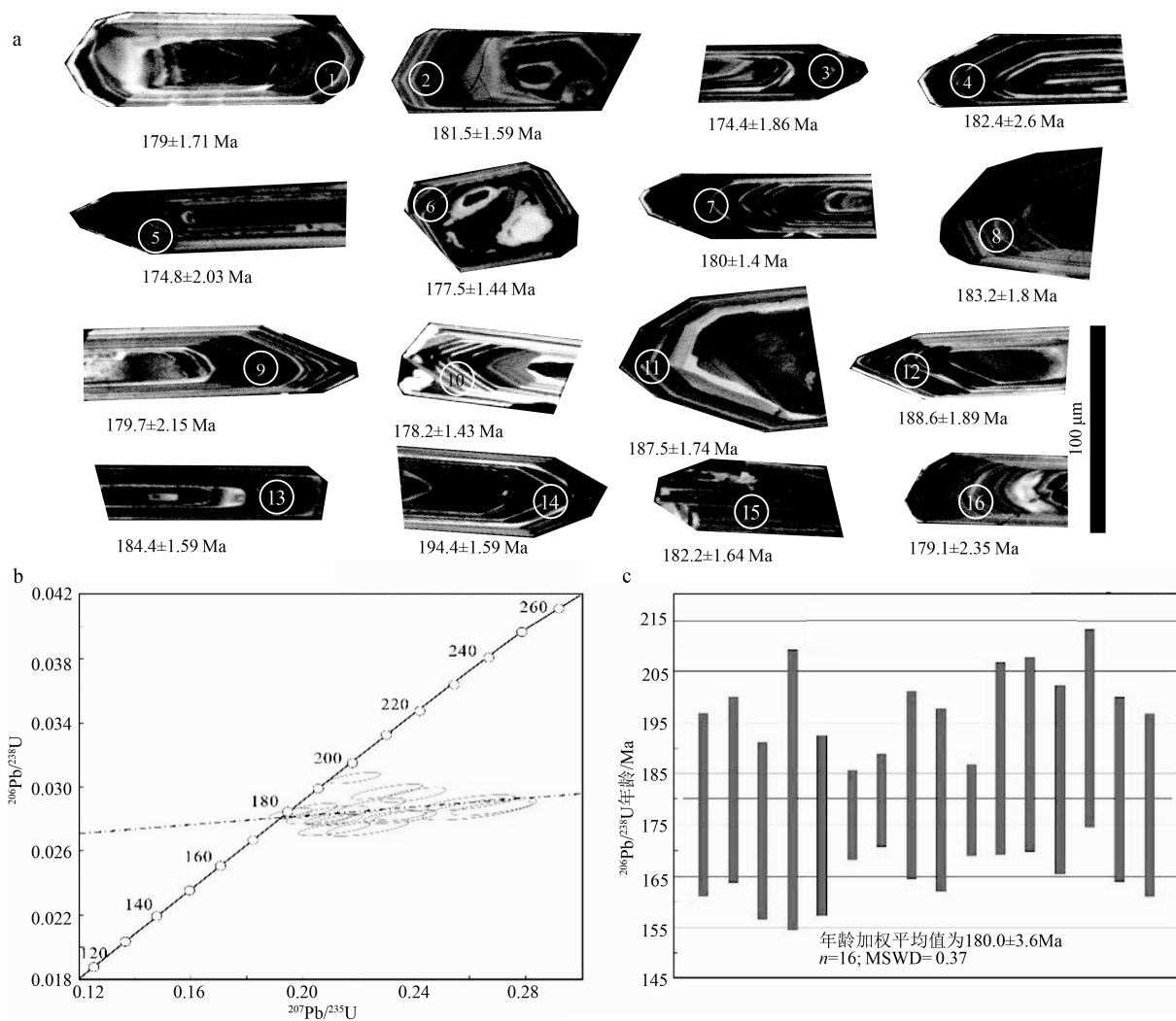


图8 牛山北岩浆核杂岩黄龙矿区观音河花岗闪长岩锆石 CL 图像(a)、U-Pb 谐和图(b)和年龄频谱图(c)

Fig. 8 Zircon CL image(a), U-Pb concordia(b) and age frequency(c) diagrams of Guanyinhe granodiorite in Huanglong mining area of North Niushan magmatic core complex

年龄为 178~163 Ma,安康断裂带南侧凤凰山核杂岩北缘韧性剪切带中黑云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄为 222~189 Ma。胡健民等(2002;2009)获得石泉县饶峰一带凤凰山变质核杂岩北缘的韧性剪切带变形 S_2 面理中黑云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄为 169~161 Ma。陈虹等(2014)对安康断裂带内变形岩石中云母矿物的 Ar-Ar 测年显示,糜棱岩化花岗岩中黑云母在中高温阶段的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄为 161.2 Ma;黑云母片岩中黑云母在中高温阶段的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄为 161.3 Ma;大理岩中金云母在中高温阶段的坪年龄为 173.5±1.3 Ma,明确了主体变形时代为 161.2~173.5 Ma,属于早—中侏罗世。笔者对长沟金矿区脆—韧性剪切带

内受岩浆热液活动次生加大形成的黑云母变斑晶进行了 ^{40}Ar - ^{39}Ar 测年,获得坪年龄为 178.4±0.8 Ma (韩珂等,2020)。同时,对黄龙金矿区确磺硐矿段 2.5 km 处出露的 7 条 1~3 m 宽,且平行于 S_2 面理, Au 品位达 0.2×10^{-6} 的观音河浅灰色花岗闪长岩脉(图 5、图版 II、图 6、图 8—图 10)进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,获得其与剪切面理和金矿化富集有关的花岗岩脉侵位年龄为 180.2±3.6 Ma (高雅宁,2017;韩珂等,2020)。前人对与汉阴长沟金矿东延同一成矿带的柳坑金矿 ZK002 钻孔细晶花岗岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,获其侵位活动时代和矿化蚀变相近,年龄为 176.0±1.9 Ma

表 3 牛山-凤凰山变质核杂岩和牛山北岩浆核杂岩及其北部一带构造类型与变形序列
Table 3 Structural types and deformation sequences of Niushan-Fenghuangshan metamorphic core complex and North Niushan magmatic core complex and their northern belt

旋迴	世代	变形机制	构造层次	主要构造类型
喜马拉雅期	D9	垂向抬升	浅部层次	各级阶地,正断层
	D8	南北向收缩断块	上部层次	北西西向、近东西向逆断层、北东向、北西向、南北向共轭断层、平移断层
	D7	南北向伸展断块	上部层次	北西西向、近东西向正断层、平滑断层,断陷盆地
燕山期	D6	东西向伸展	上部层次	南北向宽缓褶皱,区域性节理、膝折,断陷盆地
	D5	南北向走滑	上构造层次	近东西向右行走滑剪切带、伸展-走滑-岩浆核杂岩形成
	D4	南北向收缩	中-上部层次	逆冲推覆构造,区域复式背向斜、紧闭褶皱,扇状褶皱理
印支期	D3	南北向收缩	中部层次	区域北西西向、近东西向逆掩推覆、转换构造、滑劈理、片理、片麻理、韧性剪切带、掩卧褶皱,局部伸展-走滑
加里东期—海西期	D2	南北向伸展(隆滑)	中一下部层次	伸展-剥离断层、隆滑构造,岩浆核杂岩孕育;多级剥离剪切带、流劈理、片理、片麻理、掩卧褶皱、分枝性韧性剪切带、褶皱层等伸展构造组合多样
	D1	南北向伸展(拉张)	下部层次	变质核杂岩形成,基底剥离断层、顺层剪切面理、掩卧褶皱、分枝性韧性剪切带、褶皱层,伸展构造组合,裂陷槽

(高雅宁,2017;韩珂等,2020)(图 7),说明牛山北岩浆核杂岩及周缘存在早侏罗世岩浆活动,属于燕山期陆内造山期岩浆活动与成矿富集。岩浆岩脉侵位时代与黑云母变斑晶次生加大、 S_2 面理变形时代、金矿化叠加富集时代等(图 10),大体具有一致性,均集中在 180~176 Ma,对应早侏罗世,属于燕山期早期。

综合已有的测年数据分析,该区可能经历过印支期(222~189 Ma)和燕山期(180~161 Ma)至少 2 期显著的岩浆岩侵位活动和构造变形。区域脆-韧性剪切带是该区的主要控矿构造,属

于晚印支期—燕山期成矿构造;矿区岩浆岩多顺 S_2 面理发育,推断岩浆岩应与 S_2 面理同期或稍晚期发育,而 S_2 面理对该区金矿体具有一定的控制作用,两者为同期发育。由此推断,岩浆核杂岩主期岩浆活动时代在晚三叠世—早侏罗世(图 6、图 9、图 10)。

5.3 构造演化与成矿富集

新元古代:随陆壳不断增生,使下部地壳发生剥离,造成基底大规模近水平分层剪切变形与区域变质作用。强烈的构造热动力作用,促使壳-幔发生部分熔融,产生大规模的岩浆侵位,形成耀岭河

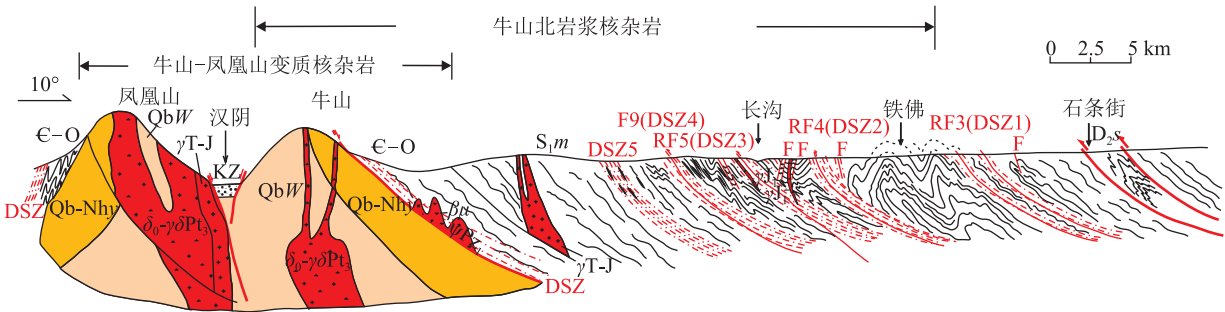


图 9 牛山-凤凰山变质核杂岩与牛山北岩浆核杂岩叠加构造剖面

Fig. 9 Structural profile of the superimposition of Niushan-Fenghuangshan metamorphic core complex and North Niushan magmatic core complex

Kz—新生界;D_{2s}—泥盆系石家沟组;S_{1m}—志留系梅子埂岩组;C-O—寒武系—奥陶系;Qb-Nhy—青白口系—南华系耀岭河岩组;QbW—青白口系武当岩群;γT-J—三叠纪—侏罗纪花岗岩;ΨPz₁—早古生代正长岩;βu—辉绿岩;δo-γδPt₃—新元古代英云闪长岩—花岗闪长岩;DSZ—脆-韧性剪切带;RF5—韧-脆性剪切带;红色虚线—糜棱岩;F—断层

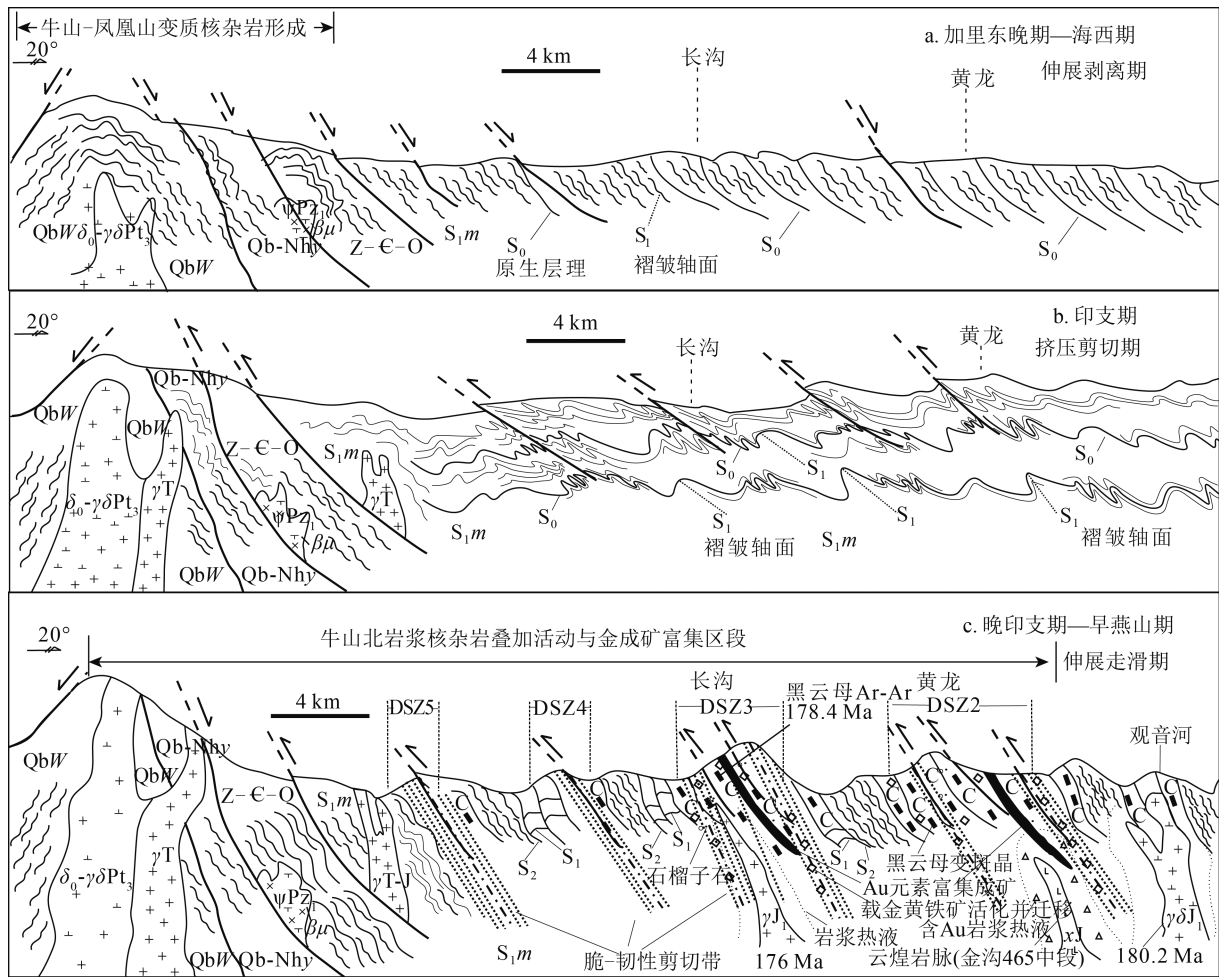


图 10 牛山-凤凰山变质核杂岩与牛山北岩浆核杂岩叠加构造演化模式

Fig. 10 Structural evolution model of superimposed Niushan-Fenghuangshan metamorphic core complex and North Niushanbei magmatic core complex

S_1m —志留系梅子垭岩组; $Z-C-O$ —震旦系—寒武系—奥陶系; $Qb-Nhy$ —青白口系—南华系耀岭河岩组; QbW —青白口系武当岩群; γJ_1 —早侏罗世花岗岩; xJ —侏罗纪煌斑岩; γJ_1 —早侏罗世花岗岩; γT —三叠纪—侏罗纪花岗岩; γT —三叠纪花岗岩; γPz_1 —早古生代正长岩; $\beta\mu$ —辉绿岩; $\delta_0-\gamma\delta Pt_3$ —新元古代英云闪长岩—花岗闪长岩; S_0 —层理; S_1, S_2, S_3 —不同期次的面理; $DSZ3$ —脆—韧性剪切带; 点虚线—糜棱岩; 黑实线或 F —断层; 其他代号含义同前; a—牛山-凤凰山变质核杂岩加里东晚期—海西期演化阶段, 代表变质核杂岩成型期伸展剥离期; b—印支期挤压逆冲推覆剪切变形和岩浆核杂岩启动期; c—晚印支期—早燕山期伸展走滑剪切变形期, 代表牛山北岩浆核杂岩成型期及其叠加活动与金成矿富集阶段的剪切变形—热液蚀变与金矿化富集区段

岩组变质基性岛弧—弧后盆地型拉斑玄武岩喷发及凤凰山铁瓦殿花岗质岩浆侵位。在牛山-凤凰山变质核杂岩演化中, 区内主要发生了垂向隆升和增生转化(图9)。

加里东晚期—海西期: 在拉张伸展背景下, 南秦岭陆块进入陆内裂陷阶段。奥陶纪—早志留世伸展—沉降期, 次深海深水盆地相富炭泥质沉积、陆架斜坡复理石堆积, 广泛发育碱基性—超基性—碱性杂岩。由于上部地壳伸展, 促使基底与盖层发生

多层次多级别剥离—滑脱, 发育固态剪切流变构造群落, 多处在大规模伸展—隆滑构造阶段, 形成牛山-凤凰山变质核杂岩构造系统。在晚古生代的持续伸展背景下, 牛山北岩浆核杂岩开始发育(图10-a)。

印支期: 是秦岭造山带构造体制重大转换期。复杂而巨大的构造聚合运动, 使南北两大板块经秦岭复合造山带发生全面碰撞聚合, 形成统一大陆。构造聚合造山向板内迁移, 地壳收缩, 使该区构造

应力场向南北向挤压收缩转换。受构造汇聚作用影响,上部地壳构造热动力聚集,形成局部热隆,地壳局部发生重熔,造成该区三叠纪花岗岩侵位(图10-b)。在牛山-凤凰山变质核杂岩核部及上部构造层可见三叠纪花岗岩类侵入岩体、岩株或岩脉活动。

印支晚期—燕山期:晚三叠世以来,南秦岭带构造活动进入陆内造山演化阶段。该区地壳变形发生了挤压收缩—伸展隆升—走滑剪切—拉张断陷等转换,造成印支晚期—燕山期由北向南的多级脆—韧性剪切带和逆冲推覆—伸展—走滑构造的普遍发育,形成并改造了早期剥离断层,造成该区不同构造—岩层地质体再次发生伸展剥离、堆叠、走滑变形等,形成多级岩片或岩块叠置的复杂组合系统。在牛山-凤凰山变质核杂岩核部及外围构造层均可见三叠纪—侏罗纪的花岗岩类侵入岩体或岩脉(图10-c)。如石泉—汉阴北部韧性剪切带中,获得黑云母变斑晶 K-Ar 年龄 184 Ma,在长沟金矿区韧性剪切带 DSZ3 中获得黑云母变斑晶 ^{39}Ar — ^{40}Ar 年龄 178.4 ± 0.8 Ma(韩珂等,2020),柳坑矿区钻孔岩心花岗岩脉锆石年龄为 176.0 ± 1.9 Ma(韩珂等,2020)。该阶段为牛山北岩浆核杂岩活动叠加较强烈区段。

另外,在凤凰山北部马院子等地花岗岩脉 K-Ar 测年结果还有 156 Ma,说明在晚侏罗世仍有一定程度的构造—岩浆活动事件。总体上,在牛山-凤凰山变质核杂岩的基础上,在牛山北及其以北区段叠加形成了岩浆核杂岩构造群落。这可能是南秦岭带在晚印支期—燕山期较独特的陆内构造变形样式,或与中—晚侏罗世汉南地块向南秦岭带的斜向楔入有关(胡健民等,2009)。结合南秦岭—大巴山带凤凰山核杂岩周缘花岗岩体的磷灰石裂变径迹测试结果,该区经历过3个明显的隆升阶段:中—晚侏罗世(166~161 Ma)强烈隆升剥蚀阶段、早白垩世中晚期(135~95 Ma)缓慢隆升阶段、晚白垩世(95~65 Ma)快速隆升阶段(董树文等,2014)。因此,南秦岭带在中—晚侏罗世出现较强烈的脆—韧性剪切带和大量新生面理、大规模逆冲推覆及强烈的隆升变形剥蚀,其实质是处在燕山期陆内构造背景下的陆内俯冲式汇聚造山机制。南秦岭带晚期走滑剪切在北部以左行走滑为主,南部以右行走滑为主,表现出自北向南依次向东发生走滑剪切,突

出表现为有广泛弥散性、呈面状透入性、渗透于各推覆体内部的平移走滑剪切带,普遍具有自西向东的蠕散滑移、塑性流动和左行平移(陈虹等,2014)。燕山晚期陆内造山阶段以斜向扭动走滑剪切变形较明显。

喜马拉雅期:主要是断块升降阶段。月河断裂和多组正断层系及其右行走滑、古近纪—新近纪断陷盆地的形成,均代表了该期近南北向收缩与拉伸构造转换的不均匀地壳表层变形特征。

6 结 论

(1)岩浆核杂岩与变质核杂岩是两类既存在相似性、又具有明显对比特征的构造类型。2类核杂岩的构造群落—岩石组合、变形—变质、侵入岩浆活动、时空构造特征等均具有一定的差异。牛山-凤凰山变质核杂岩形成于新元古代—早古生代加里东期,牛山北岩浆核杂岩形成于晚印支期—燕山早期(晚三叠世—早侏罗世)。岩浆核杂岩常具有多来源和多期次的核部侵入岩体组合与穹窿状构造群落。

(2)牛山-凤凰山变质核杂岩核部是新元古代中深变质岩组合的武当岩群和耀岭河岩组,外围构造层为震旦系—泥盆系岩层,有多期面理置换,奥陶系—志留系为浅变质强变形岩石组合,发育多层次韧性剪切、滑脱、逆冲推覆及走滑构造变形。核部侵入有新元古代—侏罗纪4期基性岩—中酸性侵入岩体、岩脉。本次新识别出早侏罗世花岗岩脉(180~176 Ma)等岩浆侵入活动事件,其与黑云母变斑晶、韧性剪切带变形时代(178~161 Ma)及金矿化富集时代大致对应。综合研究确认,牛山北岩浆核杂岩于加里东期—侏罗纪在牛山-凤凰山变质核杂岩北部叠加形成多期穹窿状构造—岩浆活动—热液成矿聚集区带。其在晚三叠世—早侏罗世发生的伸展走滑作用及伴随的花岗质岩浆活动与热液富金成矿,更是岩浆核杂岩控矿的重要表现。

(3)岩浆核杂岩北部北西向展布的 S_2 期剪切面理较发育,大多数新生矿物如黑云母、石英、黄铁矿、自然金等均沿其分布。2类核杂岩伴随的脆—韧性剪切变形、中生代岩浆侵位与燕山期隆升定位时代近一致,集中在晚三叠世—侏罗纪,表明该区燕山期叠加的岩浆核杂岩—花岗岩脉侵

位及其脆-韧性剪切变形与热液蚀变-热变质增温-变斑晶加大等金矿化富集作用事件均有紧密的内在关联性。

致谢:感谢中国地质调查局地质力学研究所吕古贤研究员的鼓励。感谢地质力学研究所胡健民研究员和长安大学李佐臣教授细致中肯的修改建议。感谢陕西地矿集团齐文教授级高工、宋小文教授级高工,陕西地矿第一地质队公司原总工赵新科、副总工吴邦朝、项目负责贾凤仪,陕西省矿产地质调查中心唐永忠教授级高工,长安大学焦建刚教授和参加南秦岭石泉-汉阴-旬阳金矿整装勘查综合研究的项目组成员及研究生的指导和合作研究。

注释

- ①郭安林,张国伟,等译,张国伟校.构造地质学和大地构造学新航程[R].西北大学大陆动力学重点实验室,2003.
- ②郭安林,张进江,等译,张国伟校.大地构造学研究的挑战与机遇——从地质时间到人类时间尺度地球系统与变形及其过程的关系[R].西北大学大陆动力学重点实验室,2018.
- ③吴闻人,王北颖,冯明申,等.陕西省南秦岭造山带中部韧性剪切带的形成、演化及其与金矿成矿关系研究[R].西安:陕西省地质矿产勘查开发局综合研究队,1991.
- ④王北颖,王向利,白定邦,等.1:5万马池幅、汉王城幅、瓦房店幅区域地质图及说明书[R].陕西省地质调查院,2001.
- ⑤杨兴科,何虎军,张康,等.陕西省安康市汉阴北部金矿田构造与快速找矿方法研究报告[R].长安大学,2012.
- ⑥杨兴科,何虎军,高雅宁,等.陕西石泉-旬阳金矿整装勘查区重点工作区找矿预测研究报告[R].长安大学,2015.

参考文献

- Davis G H. Shear-zone model for the origin of metamorphic core complexes[J]. *Geology*, 1983, 11: 342-347.
- Han K, Yang X K, Chao H X, et al. U-Pb zircon and Re-Os molybdenite geochronology of the W-Mo mineralized region of South Qinling, China, and tectonic implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 95(2): 500-516.
- Hu J M, Chen H, Qu H J, et al. Mesozoic deformation of the Dabashan in the southern Qinling orogen, central China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 47(S1): 171-184.
- Lister G S, Davis G A. The origin of metamorphic core complexes and detachment faults formed during Tertiary continental extension in the northern Colorado River region, U. S. A [J]. *Journal of Structural Geology*, 1989, 12: 65-94.
- 陈虹,胡健民,武国利,等.南秦岭构造带中段晚中生代陆内变形特征与侧向挤出构造[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2014, (6): 1906-1927.

- 崔盛芹.论全球性中-新生代陆内造山作用与造山带[J]. *地学前缘*, 1999, 6(4): 283-293.
- Davis G A, 郑亚东.变质核杂岩的定义、类型及构造背景[J]. *地质通报*, 2002, 21(4): 185-192.
- 董树文,张岳桥,李秋生,等.论大巴山陆内造山带[M].北京:地质出版社,2014: 1-347.
- 段少帅,焦建刚,罗德智,等.南秦岭石泉北部将军河地区酸性岩脉锆石 U-Pb 年代学及其构造意义[J]. *地质学报*, 2017, 91(4): 748-761.
- 冯明申,杨建东.安康地区北部韧性推覆构造基本特征及对金矿成矿控制作用[J]. *陕西地质*, 1994, 12(1): 17-26.
- 高雅宁.南秦岭汉阴北部金矿田陆内造山期构造-岩浆-成矿规律及成矿模式研究[D].长安大学博士学位论文,2017: 1-136.
- 郭华,李明,李守林,等.板内造山带主要构造特征研究——以燕山和大别山造山带为例[M].北京:地质出版社,2002.
- 韩珂,杨兴科,何虎军,等.南秦岭汉阴北部金矿田脆-韧性剪切带控矿构造特征及构造变形-成矿年代学研究[J]. *大地构造与成矿学*, 2020, 44(5): 801-818.
- 何昌成.玲珑金矿田岩浆核杂岩隆起-拆离成矿构造解析与预测[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文,2018.
- 胡健民,孟庆任,白武明,等.南秦岭构造带中一晚古生代伸展构造作用[J]. *地质通报*, 2002, 21(2/3): 471-477.
- 胡健民,施炜,渠洪杰,等.秦岭造山带大巴山弧形构造带中生代构造变形[J]. *地学前缘*, 2009, 16(3): 49-68.
- 胡健民,孟庆任,陈虹,等.秦岭造山带内宁陕断裂带构造演化及其意义[J]. *岩石学报*, 2011, 27(3): 657-671.
- 李佐臣.扬子地块西北缘后龙门山造山带(北段)物质组成、构造特征及其形成演化[D].长安大学博士学位论文,2009: 1-211.
- 梁文天.秦岭造山带东西秦岭交接转换区陆内构造特征与演化过程[D].西北大学博士学位论文,2009.
- 刘俊来,崔迎春.岩浆核杂岩及其成因[C]//吉林大学地球科学系.中蒙中生代伸展构造现场研讨会论文摘要及野外地质考察路线指南.2001: 233-234.
- 刘俊来,崔迎春,关会梅.辽吉朝褶皱带元古宙岩浆核杂岩及其大地构造意义[J]. *地质通报*, 2002, 21(4): 202-208.
- 吕古贤,霍庆龙,袁月蕾,等.胶东金矿陆内构造岩浆隆起-拆离带蚀变成矿[J]. *矿物学报*, 2015, (S1): 1028.
- 吕古贤,李洪奎,丁正江,等.胶东地区“岩浆核杂岩”隆起-拆离带岩浆期后热液蚀变成矿[J]. *现代地质*, 2016, 30(2): 247-262.
- 万天丰.中国大地构造学[M].北京:地质出版社,2011: 1-400.
- 巫建华,郭国林,刘帅,等.大地构造学基础与中国地质学概论[M].北京:地质出版社,2013: 1-389.
- 徐学义,陈冀骝,张二朋,等.秦岭及邻区地质图(1:500 000)说明书[M].北京:地质出版社,2015: 1-81.
- 徐学义,夏林圻,夏祖春,等.崑崙早古生代碱质煌斑岩地球化学特征及成因探讨[J]. *地球学报*, 2001, 22(1): 55-60.
- 许志琴,卢一伦,汤耀庆,等.东秦岭造山带的变形特征及构造演化[J]. *地质学报*, 1986, 3(3): 237-247.
- 颜丹平,周美夫,宋鸿林,等.华南在 Rodina 古陆中位置的讨论——扬

- 子地块西缘变质-岩浆杂岩证据及其与 Seychelles 地块的对比.地学前缘,2002,9(4): 249-256.
- 杨经绥,许志琴,马昌前,等.复合造山作用和中国中央造山带的科学问题[J].中国地质,2010,37(1): 1-11.
- 杨兴科,韩珂,吴旭,等.南秦岭陆内造山构造变形特征与演化:石泉—汉阴北部一带晚印支—燕山期构造变形分析[J].地学前缘,2016,23(4): 72-80.
- 杨兴科,韩珂,何虎军,等.南秦岭汉阴金矿田长沟金矿陆内造山期构造-蚀变岩相填图与找矿[J].地质通报,2020,39(11): 11-23.
- 杨兴科,晁会霞,何虎军,等.南秦岭钨钼金矿陆内造山期立交桥构造-岩浆-流体物理化学叠加成矿[C]//中国地球物理学会等 CGU 会议论文集.2021.
- 杨志华,王北颖.抽拉-逆冲岩片构造——秦岭造山带的新模式[J].地球科学,1993,18(5): 565-575,671.
- 杨志华,郭俊峰,苏生瑞,等.秦岭造山带基础地质研究的新进展[J].中国地质,2002,29(3): 246-256.
- 杨志华,苏生瑞,李勇,等.从抽拉构造到陆内造山带和大陆动力学[C]//中国地质学会.“九五”全国地质科技重要成果论文集.2000: 69-73.
- 喻安光,郭建强,游再平,等.四川石棉草科穹状岩岩浆核杂岩构造特征[J].矿物岩石,1998,18(4): 90-95.
- 喻安光.四川石棉—冕宁地区之伸展构造[J].中国区域地质,2000,19(1): 20-28.
- 袁月蕾.胶东构造岩浆隆起-拆离带热液蚀变成矿与典型矿床研究[D].中国地质大学(北京)博士学位论文,2014.
- 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: 1-855.
- 张康.南秦岭汉阴北部志留系金矿田构造控矿规律及找矿标志研究[D].长安大学硕士学位论文,2012.