

赖绍聪,秦江锋,朱韧之等. 2026. 碰撞造山带地壳多层次熔融:对秦岭造山带三叠纪地壳演化与多金属成矿的启示. 岩石学报,42(07): 2319-2331, doi: 10.18654/1000-0569/2026.07.02; CSTR: 32089.14. APS-ysxb. 2026.07.02

碰撞造山带地壳多层次熔融:对秦岭造山带三叠纪地壳演化与多金属成矿的启示^{*}

赖绍聪 秦江锋 朱韧之 刘敏

LAI ShaoCong, QIN JiangFeng, ZHU RenZhi and LIU Min

西北大学大陆演化与早期生命全国重点实验室,地质学系,西安 710069

State Key Laboratory of Continental Tectonics and Early Life, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

2025-11-08 收稿, 2026-05-14 改回.

Lai SC, Qin JF, Zhu RZ and Liu M. 2026. Multi-level crustal melting in collisional orogenic belts: Implications for Triassic crustal evolution and polymetallic mineralization in the Qinling Orogenic Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 42(7): 2319-2331, doi: 10.18654/1000-0569/2026.07.02; CSTR: 32089.14. APS-ysxb. 2026.07.02

Abstract This paper takes Triassic granites in the Qinling Orogenic Belt as the research object and reveals the complete sequence of multi-level crustal melting during the collisional orogeny process: (1) Early stage is dominated by quartz diorite, mainly distributed in the western segment of the Qinling Orogenic Belt. It represents adakitic rocks formed by high-pressure melting of lower crustal mafic rocks, with reducing magma properties, and is closely related to gold deposit formation. (2) Middle stage is mainly distributed in the central segment of the Qinling Orogenic Belt, which is dominated by granodiorite and monzogranite. Most sample exhibit adakitic geochemical attributes and enclosed mafic microgranular enclaves, with the Wulong and Dongjiangkou plutons being the most typical examples. They represent granodiorite formed by mixing of middle-lower crustal melting and mantle-derived magma, and are closely associated with Au-Mo mineralization. (3) The late stage are primarily high-Si granites, mainly distributed in the eastern segment. These magmas have high differentiation degrees, representing high-Si granites formed by shallow melting of middle-upper crustal metamorphic sedimentary rocks, and are linked to W-Mo-Be mineralization in the region. This process not only clarifies the magmatic responses at different stages of Tethys closure and the subduction-collision between the North China and Yangtze plates, showing a dynamic transition from deep high-pressure mafic rock melting in the western segment to shallow metamorphic sedimentary rock melting in the eastern segment from early to late stages, but also reveals a coupling relationship between crustal melting depth and metal mineralization of different properties, Early adakitic magmas in the western segment control gold mineralization; middle-stage crust-mantle mixed magmas in the central orogen dominate Au-Mo mineralization; late-stage high-Si granitic magmatic fluids in the eastern segment drive W-Mo-Be mineralization. This study uncovers the spatio-temporal pattern of multi-level crustal melting and magma-mineralization response in the Qinling Orogenic Belt, providing a paradigm for research on crust-mantle material structure evolution and mineralization regularity in collisional orogens.

Key words Collisional orogenic belt; Multi-Level crustal melting; Polymetallic mineralization; Qinling Orogenic Belt; Crustal evolution

摘 要 本文以秦岭造山带三叠纪花岗岩为研究对象,揭示了碰撞造山过程中地壳多层次熔融的完整序列:早期以石英闪长岩为主,主要分布在秦岭造山带西段,代表下地壳基性岩高压熔融形成埃达克质岩石,岩浆性质为还原性,与金矿的形成密切相关;中期的岩浆重要分布于秦岭造山带中段,以花岗闪长岩和二长花岗岩为主,岩石大部分显示埃达克质花岗岩的地球化学属性,发育暗色微粒包体,以五龙岩体和东江口岩体最为典型,代表中下地壳熔融与幔源岩浆混合形成花岗闪长岩,与金、钨矿化密切相关;晚期的岩石类型主要为高 Si 花岗岩,主要分布在东段,岩浆分异程度较高,代表中上地壳变质沉积岩浅部熔融形成过高 Si 花岗岩,与区内的 W-Mo-Be 矿化密切相关。该过程阐明了华北和扬子板块俯冲碰撞的不同阶段的岩浆响应,从早期到晚期,在造山带西段到东段以从深部高压基性岩熔融到浅部变质沉积岩熔融的动力学转换,而且地壳熔融深度

^{*} 本文受国家自然科学基金项目(402372071)资助。

第一作者简介: 赖绍聪,男,1963 年生,博士,教授,主要从事造山带岩浆岩成因研究,E-mail: shaocong@nwu.edu.cn

与不同性质金属成矿存在耦合关系:造山带西段早期埃达克质岩浆控制金矿化,中段中阶段壳幔混合岩浆主导金、钼矿化,东段晚阶段高 Si 花岗质岩浆流体驱动钨-钼-铍矿化。这揭示了秦岭造山带地壳多层次熔融的时空规律与岩浆-成矿响应,为碰撞造山带壳幔物质结构演化与成矿规律研究提供了范式。

关键词 碰撞造山带;多层次熔融;多金属成矿;秦岭造山带;地壳演化

中图法分类号 P542.4; P611

造山带碰撞过程中的地壳多层次熔融是大陆动力学与成矿作用的核心纽带,由于造山过程构造样式及壳幔物质结构的不同,不同造山带在岩浆序列和熔融层次上有明显不同,这在阿尔卑斯、喜马拉雅及海西造山带中呈现多样化响应,如阿尔卑斯造山带通过板片断离引发岩石圈地幔低度熔融,形成沿环亚得里亚断裂带分布的镁铁质岩墙;喜马拉雅造山带则以“地壳-地幔-地壳”三明治结构为特征,印度地壳俯冲到亚洲岩石圈之下发生黏性底侵,熔融形成的淡色花岗岩记录中地壳(30~40km)白云母脱水熔融过程(吴福元, 2007; Weinberg, 2016; Wu *et al.*, 2020)。Ding *et al.* (2025)通过对喜马拉雅淡色花岗岩及其围岩的系统剖析,并结合相平衡模拟,证实这些具有典型 S 型特征的花岗岩实则可能源自古老 I 型花岗质源区的高温部分熔融,这为造山带的地壳演化与物质循环提供了全新的动力学视角。欧洲海西造山带晚古生代岩浆活动显示四期熔融旋回,从同碰撞阶段地壳增厚熔融到后碰撞垮塌期地幔上涌,反映“挤压增厚-伸展减薄”的动力学转换(Hillenbrand and Williams, 2022; Boscaini *et al.*, 2025)。在岩浆序列与成矿方面,阿尔卑斯富钾流体交代促进 Cu-Au 矿化,海西造山带晚阶段过铝质花岗岩与 W-Sn 成矿相关(Luchitskaya, 2022)。这些实例表明,多圈层熔融过程是壳幔物质循环的直接探针,其时空规律为造山带类型划分和区域成矿预测提供关键约束。

秦岭造山带位于华北克拉通与扬子克拉通之间,是研究板块碰撞动力学与地壳演化的天然实验室。三叠纪时期,伴随古特提斯洋闭合与华北-扬子板块的全面碰撞,秦岭造山带发生了大规模的花岗质岩浆活动,形成了绵延千余千米的花岗岩带。这些花岗岩记录了碰撞造山过程中地壳熔融、壳-幔相互作用及物质循环的关键信息,其形成机制与成矿效应一直是地学研究的前沿科学问题(秦江锋和赖绍聪, 2011; Hu *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2021)。近年来的研究表明,秦岭三叠纪花岗岩具有复杂的源区组成与熔融过程,涉及下地壳基性岩部分熔融、幔源岩浆底侵、流体交代等多尺度动力学过程(Jiang *et al.*, 2010; Qin *et al.*, 2009, 2010, 2013, 2019)。秦岭造山带这种“多阶段、多层次熔融”模式如何控制地壳物质演化,以及如何影响金属元素的富集与成矿,仍需系统梳理与深入探讨。

本文基于秦岭造山带多年来发表的年代学、地球化学数据,结合团队自身的研究,重点剖析秦岭造山带三叠纪地壳熔融的时空规律、动力学机制及其成矿响应,旨在建立碰撞造山带地壳演化与成矿作用的耦合模型。

1 秦岭造山带三叠纪地质背景与岩浆活动时空格架

1.1 秦岭造山带三叠纪花岗岩时空分布规律

秦岭造山带位于华北克拉通与扬子克拉通之间,呈东西向展布,以商丹构造带(古洋壳俯冲缝合带)和勉略构造带(古特提斯洋闭合遗迹)为界,自北向南划分为华北板块南缘、北秦岭、南秦岭和扬子板块北缘四个构造单元(图1)。三叠纪时期,伴随古特提斯洋闭合(Meng and Zhang, 1999; Lai *et al.*, 2008),华北板块与扬子板块发生全面碰撞,但是秦岭造山带不同区段的闭合时限并不一致,现有证据表明,华北与扬子板块的三叠纪碰撞事件具有明显的时空不均一性:其初始碰撞首先发生于西段的西秦岭地区与东段的大别造山带。在西秦岭西侧,发育有 233~249Ma 的埃达克质闪长岩及其伴生火山岩(Liu *et al.*, 2021),这些岩石记录了俯冲-碰撞转换阶段的岩浆响应;而在大别造山带,则以约 245Ma 的峰期变质年龄作为碰撞作用的标志。相比之下,位于中段的秦岭地区,其岩浆岩所记录的碰撞过程则明显偏晚。在中段的秦岭地区,由于缺乏同期的火山岩,花岗岩的年龄主要集中于 220~200Ma 左右,结合松潘-甘孜复理石带下伏陆壳在~228Ma 已广泛发育同碰撞花岗岩(夏磊等, 2017),表明中段的主碰撞拼合及地壳加厚的时间可能相对最晚(秦江锋和赖绍聪, 2011)。

秦岭造山带三叠纪花岗岩的分布几乎不受勉略缝合带和商丹缝合带的控制,最北侧的三叠纪花岗岩包括西安附近的翠华山岩体(Jiang *et al.*, 2010)和宝鸡附近的关山岩体等(Wang *et al.*, 2021),目前大量的地球化学和锆石 U-Pb 年代学发现秦岭造山带三叠纪花岗岩在南北上不存在什么本质差异。北秦岭的三叠纪花岗岩以商丹构造带北侧的宝鸡岩体(213Ma)、秦岭梁奥兰环斑花岗岩(217Ma, 锆石 U-Pb)为代表,岩石类型以花岗闪长岩-二长花岗岩为主,具有高钾钙碱性特征(Wang *et al.*, 2021;附表1)。南秦岭北部为三叠纪岩浆活动核心区,包括东江口岩体群(223±1Ma)、柞水岩体(225±1Ma)、曹坪岩体(224±1Ma)等(附表1),以二长花岗岩为主,普遍发育暗色微粒包体(Qin *et al.*, 2010, 2019)。南秦岭南部的三叠纪花岗岩以佛坪五龙岩体(235~225Ma)、胭脂坝黑云母花岗岩(211±5Ma, 骆金城等, 2010)、碧口地块阳坝岩体(207±2Ma)为代表(Qin *et al.*, 2010)。Lei *et al.* (2025)提出西秦岭印支期岩浆活动可分为两期,早期(265~230Ma)与晚期(230~200Ma),且具有从

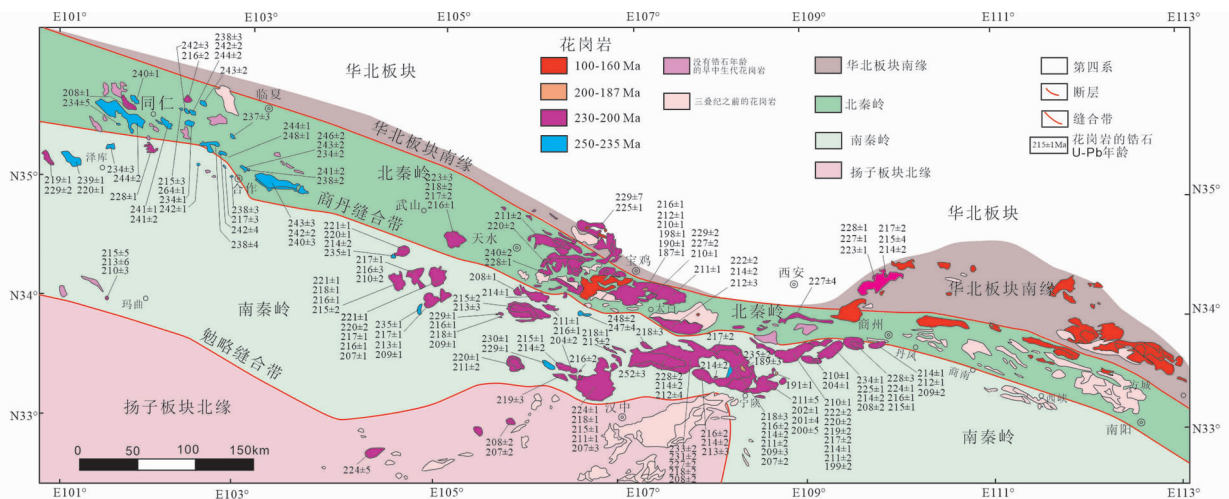


图1 秦岭造山带三叠纪不同时代花岗岩的时空分布图(据 Wang *et al.*, 2021 修改)

Fig. 1 Spatial and temporal distribution of Triassic granitoids of different ages in the Qinling Orogen (modified after Wang *et al.*, 2021)

西北向东南逐渐变新的趋势(Liu *et al.*, 2021; Hu *et al.*, 2019)。早期($>230\text{Ma}$)岩石主要与俯冲背景相关,晚期($230\sim200\text{Ma}$)则形成于同碰撞至后碰撞环境(Qin *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2021)。

而越来越多的研究倾向于将秦岭造山带三叠纪花岗岩的形成分为三个阶段(秦江锋和赖绍聪, 2011; Hu *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2021; He *et al.*, 2025),各阶段在分布区域、岩石类型及核心特征上呈现显著的时空差异。由于花岗岩锆石年龄的差异,不同阶段在时代和岩石类型的划分上存在差异,而且存在时代和岩石类型的重叠。总体来讲,早期($>230\text{Ma}$)分布区域主要集中于秦岭造山带西段,岩石类型以石英闪长岩为主,典型岩体包括西秦岭冶力关岩体($245\pm6\text{Ma}$)、夏河岩体($238\pm4\text{Ma}$)及佛坪五龙岩体边缘的石英闪长岩($235\sim225\text{Ma}$),核心特征为岩石具低Si、高 $\text{Mg}^\#$ 特征,富集Cr、Ni元素,显示埃达克质岩石属性(金维浚等, 2005; 秦江锋和赖绍聪, 2011; 曾俊杰等, 2023)。中期($220\sim210\text{Ma}$)分布区域集中于秦岭造山带中部,岩石类型以花岗闪长岩和二长花岗岩为主,典型岩体有中秦岭与南秦岭的东江口岩体($223\pm1\text{Ma}$)、柞水岩体($225\pm1\text{Ma}$)、曹坪岩体($224\pm1\text{Ma}$),核心特征是该阶段为岩浆活动高峰期,岩体普遍含暗色微粒包体显示岩浆混合迹象,地球化学上属高钾钙碱性系列,指示地壳熔融与幔源物质贡献(Qin *et al.*, 2010)。晚期($<210\text{Ma}$)分布区域局限于秦岭造山带东部,岩石类型以二云母花岗岩为主,典型岩体包括南秦岭胭脂坝岩体($211\pm5\text{Ma}$)、四海坪岩体($207\pm2\text{Ma}$),核心特征为岩石具过铝质特征,可能形成于中上地壳变质沉积岩的部分熔融(Wang *et al.*, 2022)。该划分清晰反映了秦岭三叠纪花岗岩从西到东、从深到浅的熔融演化规律,各阶段岩石类型与分布的耦合关系为区域成矿预测提供了关键依据。

1.2 三叠纪花岗岩岩石地球化学特征的演化规律

秦岭三叠纪花岗岩的地球化学特征呈现显著的时空差异(图2),深刻反映了碰撞造山过程中地壳熔融与地幔-地壳相互作用的动态演化。

早期($>230\text{Ma}$)以石英闪长岩为主,代表性岩体包括西秦岭商丹构造带附近的冶力关岩体($245\pm6\text{Ma}$)、夏河岩体($238\pm4\text{Ma}$)及佛坪五龙岩体边缘的石英闪长岩(锆石 U-Pb 年龄 $235\sim225\text{Ma}$)。岩石地球化学表现为低 SiO_2 ($56\%\sim62\%$)、高 $\text{Mg}^\#$ ($45\sim55$)特征(秦江锋和赖绍聪, 2011; Qin *et al.*, 2013),富集Cr ($>50\times10^{-6}$)、Ni ($>20\times10^{-6}$),Sr 含量 $400\times10^{-6}\sim800\times10^{-6}$,Y 含量 $8\times10^{-6}\sim15\times10^{-6}$,Sr/Y 比值 >40 (图2),符合埃达克岩的地球化学标准(Martin *et al.*, 2005)。锆石 Hf 同位素显示 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 $-2\sim+4$ 之间,指示源区为中元古代增生的基性下地壳在石榴石角闪岩相条件下的部分熔融(金维浚等, 2005; Qin *et al.*, 2013)。然而,值得强调的是,250~235Ma 期间的岩浆作用并非单纯由高Sr/Y 比值和相对亏损的同位素组成主导,而是呈现出显著的岩石学多样性与地球化学异质性。综合最新区域研究资料,该期岩浆岩的岩性分布广泛,除具埃达克质特征的石英闪长岩外,还共存有大量Sr/Y <50 、La/Yb <20 的典型弧岩浆岩(He *et al.*, 2025)。与之呼应的是,这些岩石的放射性同位素组成也表现出极大的跨度(如锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值可达 $-20\sim+10$,全岩 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值介于 $-12.1\sim-1.1$ 之间)。这记录了中元古代增生基性下地壳的贡献,同时也暗示了富集岩石圈地幔或古老沉积岩组分的参与(He *et al.*, 2025; Qin *et al.*, 2013)。表明古特提斯洋壳深俯冲至平俯冲过渡阶段触发的地壳多层次熔融过程:在相对浅部($<40\text{km}$),低压高温条件促使古老俯冲沉积物或岛弧基底发生角闪岩相部分熔

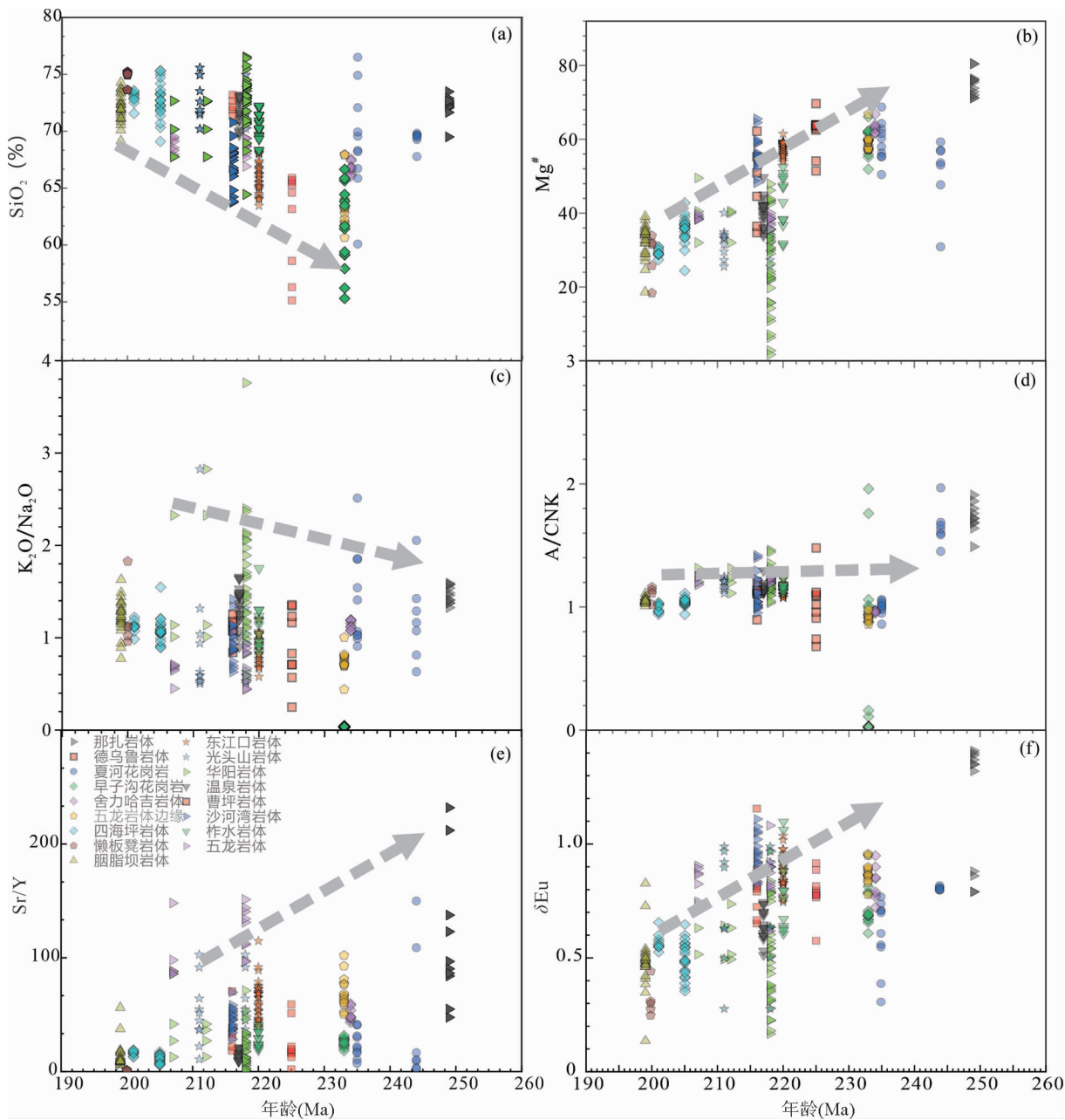


图2 秦岭造山带三叠纪不同时代花岗岩地球化学特征演化规律

Fig. 2 Temporal evolution of geochemical characteristics of Triassic granitoids of different ages in the Qinling Orogen

融,形成具有典型弧特征的岩浆;而在更深部位(>40km),增厚的基性下地壳或榴辉岩相物质在石榴石稳定域下发生熔融,并经历石榴石与角闪石的分离结晶。

中期(230~210Ma)为岩浆活动高峰期,岩石类型以花岗闪长岩和二长花岗岩为主,广泛分布于中秦岭和南秦岭,如东江口岩体(223±1Ma)、桡水岩体(225±1Ma)、曹坪岩体(224±1Ma)等。该阶段花岗岩属于高钾钙碱性系列($K_2O/Na_2O > 1.0$),富集Rb、Ba、K等大离子亲石元素(LILE),亏损Nb、Ta、Ti等高场强元素(HFSE),显示典型的岛弧岩浆地球化学印记(Qin *et al.*, 2010, 2013, 2019)。岩体中普遍发育

暗色微粒包体(图3),其锆石年龄与寄主花岗岩一致(如东江口暗色微粒包体221±1Ma~222±1Ma),其 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值(-8~-5)较寄主岩(-10~-8)偏高, ($^{87}Sr/^{86}Sr$)_i比值(0.706~0.708)偏低(图4),表明幔源镁铁质岩浆与壳源长英质岩浆的混合作用(秦江锋和赖绍聪, 2011)。

晚期(<210Ma)以黑云母花岗岩为主,代表性岩体包括南秦岭胭脂坝岩体(锆石 LA-ICP MS U-Pb 年龄211±5Ma)和懒板凳岩体。岩石具过铝质特征,A/CNK比值>1.1,出现白云母、石榴石等矿物,SiO₂含量普遍>70%(图2),锆石饱和温度较低(700~750℃),Eu*/Eu普遍介于0.4~0.6之

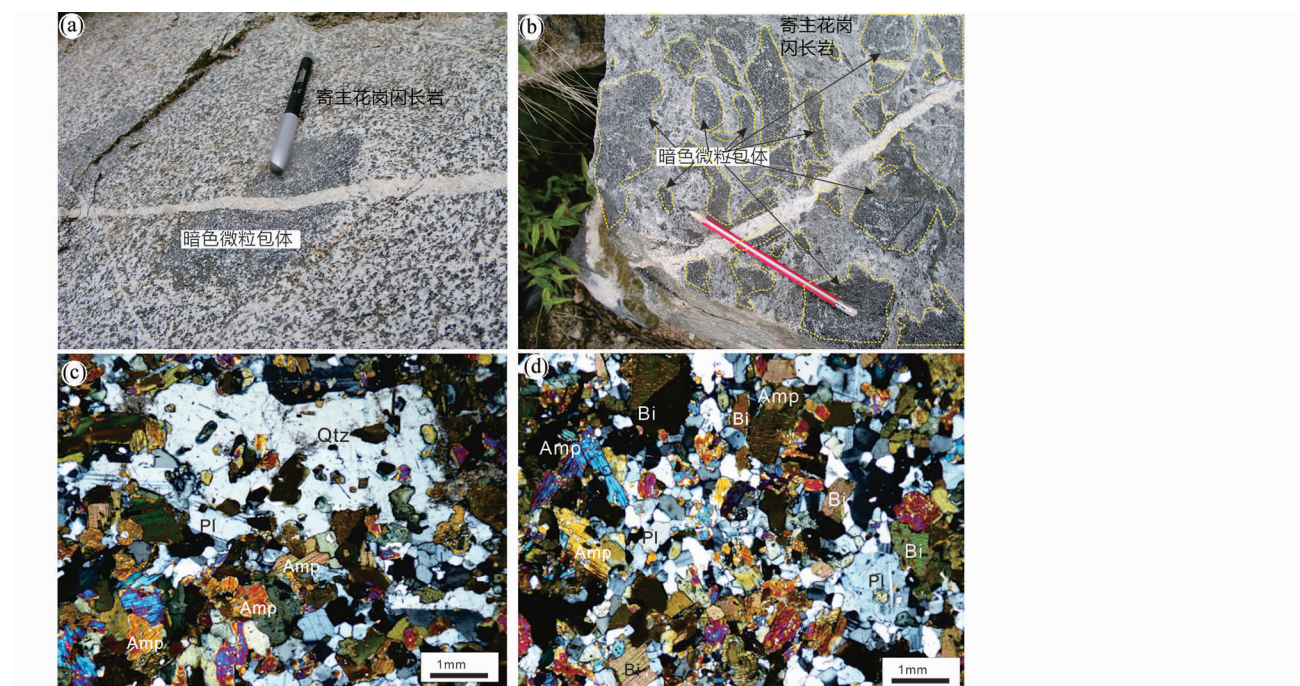


图3 秦岭造山带中期(230~210Ma)花岗闪长岩中暗色微粒包体特征

(a,b)寄主花岗岩闪长岩和暗色微粒包体的野外照片;(c)暗色微粒包体中的石英捕虏晶;(d)镁铁质岩浆催冷形成的细粒结构。Amp-角闪石;Bi-黑云母;Pl-斜长石;Qtz-石英

Fig. 3 Characteristics of mafic microgranular enclaves in the middle-stage (230 ~ 210Ma) granodiorites in the Qinling orogenic belt (a, b) Field photographs of the host granodiorite and mafic microgranular enclaves; (c) Quartz xenocrysts within a mafic microgranular enclave; (d) Fine-grained texture resulting from quenching of mafic magma. Amp-amphibole; Bi-biotite; Pl-plagioclase; Qtz-quartz

间(图2),指示源区为富铝泥质沉积岩的部分熔融(Wang *et al.*, 2022)。锆石 Hf 同位素 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-15 \sim -10$, 二阶段 Hf 模式年龄(t_{DM2})达 $1.8 \sim 2.0\text{Ga}$, 与南秦岭耀岭河群变质沉积岩的同位素组成一致(图4),反映中上地壳变质沉积岩的部分熔融。

2 地壳多层次熔融的岩石学与地球化学证据

秦岭造山带三叠纪不同时代的花岗质岩浆活动记录了碰撞造山过程中地壳从深部到浅部的多层次熔融过程,其岩石学与地球化学特征为揭示不同深度地壳熔融的动力学机制提供了直接证据。以下从下地壳基性岩部分熔融、中地壳熔融与岩浆混合、中上地壳变质沉积岩熔融三个层次,系统阐述其岩石学与地球化学响应。秦岭造山带三叠纪地壳多层次熔融表现为从早到晚、从西到东、从深到浅的系统性迁移,早期($>230\text{Ma}$)下地壳基性岩在高压条件下熔融形成埃达克质石英闪长岩;中期(230~210Ma)中地壳在幔源岩浆底侵触发下熔融,并与幔源熔体混合形成花岗闪长岩-暗色微粒包体组合;晚期($<210\text{Ma}$)中上地壳变质富铝沉积岩在浅部伸展环境下熔融形成过铝质花岗岩。

2.1 早期下地壳基性岩高精度部分熔融

早期($>230\text{Ma}$)是秦岭地壳熔融的初始阶段,以埃达克质石英闪长岩的形成标志,其源区为加厚下地壳基性岩在高压条件下的部分熔融。代表性岩体包括西秦岭商丹构造带附近的冶力关岩体、夏河岩体及佛坪五龙岩体边缘相带。

该阶段岩石以石英闪长岩为主,具低硅高镁特征: SiO_2 含量 $56\% \sim 62\%$, $\text{Mg}^\#$ 值 $45 \sim 55$ ($\text{Mg}^\# = \text{Mg}^{2+}/(\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+})$),显著高于典型壳源花岗岩($\text{Mg}^\# < 40$),暗示源区或岩浆演化过程中有地幔物质参与(Qin *et al.*, 2013)。微量元素表现为高 Sr 低 Y 的埃达克质印记: Sr 含量 $400 \times 10^{-6} \sim 800 \times 10^{-6}$, Y 含量 $8 \times 10^{-6} \sim 15 \times 10^{-6}$, Sr/Y 比值 > 40 , La/Yb 比值 > 20 ,且无 Eu 负异常($\delta\text{Eu} = 0.9 \sim 1.1$)(秦江铎和赖绍聪, 2011)。实验岩石学研究表明,此类特征源于含石榴石角闪岩相下地壳的部分熔融,当玄武质下地壳在压力 $> 1.5\text{GPa}$ (深度 $> 50\text{km}$)条件下熔融时,石榴石(Y 的相容矿物)和角闪石(Sr 的中等不相容矿物)残留于源区,导致熔体中 Y 含量降低、Sr 含量升高,形成高 Sr/Y 比值(Rapp and Watson, 1995; Martin *et al.*, 2005)。

此外,岩石富集 Cr ($> 50 \times 10^{-6}$)、Ni ($> 20 \times 10^{-6}$)等亲铁元素,指示岩浆在上升过程中可能与地幔橄榄岩发生同化混染。例如,佛坪五龙岩体边缘的石英闪长岩 MgO 含量达

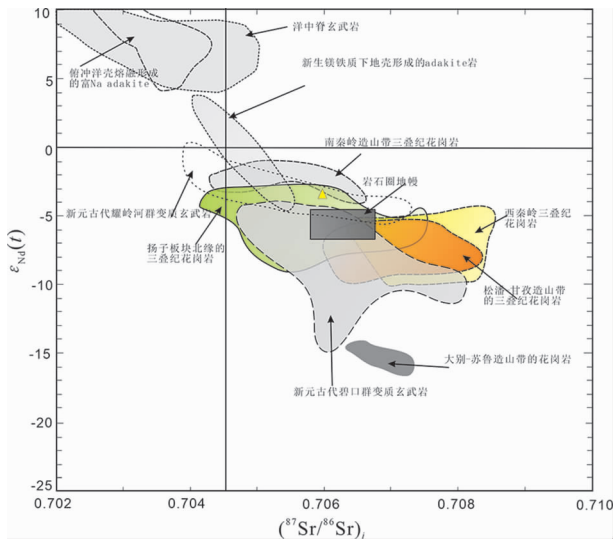


图4 秦岭造山带及周缘造山带三叠纪花岗岩类 Sr-Nd 同位素组成

松潘-甘孜构造带和西秦岭造山带内三叠纪花岗岩类数据引自张宏飞等(2007), Cai *et al.* (2010), Wang *et al.* (2021), 秦江锋和赖绍聪(2011); 扬子板块北缘碧口地块南一里、木皮等三叠纪花岗岩数据引自张宏飞等(2007); 南秦岭造山带新元古代耀岭河群变质玄武岩的范围引自凌文黎等(2002); 扬子板块北缘新元古代碧口群变质玄武岩的范围引自夏林圻等(2007); 大别造山带三叠纪碱性岩类的的数据引自 Yang *et al.* (2005)

Fig. 4 Sr-Nd isotopic compositions of Triassic granitoids in the Qinling Orogen and adjacent orogenic belts

Data sources: Triassic granitoids in the Songpan-Ganzi tectonic belt and West Qinling Orogen are from Zhang *et al.* (2007), Cai *et al.* (2010), Wang *et al.* (2021), and Qin and Lai (2011); Triassic granites at Nanyili and Mupi in the Bikou Block on the northern margin of the Yangtze Block are from Zhang *et al.* (2007); Neoproterozoic metamorphic basalts of the Yaolinghe Group in the South Qinling Orogen are from Ling *et al.* (2002); Neoproterozoic metamorphic basalts of the Bikou Group on the northern margin of the Yangtze Block are from Xia *et al.* (2007); Triassic alkaline rocks in the Dabie Orogen are from Yang *et al.* (2005)

3.5% ~ 4.2%, Cr、Ni 含量分别为 65×10^{-6} ~ 82×10^{-6} 和 28×10^{-6} ~ 35×10^{-6} , 暗示其与交代富集地幔楔的相互作用 (Qin *et al.*, 2013)。该阶段花岗岩锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -2 ~ +4 之间, 单阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM1}) 集中在 1.0 ~ 1.2Ga, 与秦岭中元古代基底岩石 (如耀岭河群变质玄武岩, $t_{\text{DM1}} = 1.0 \sim 1.2\text{Ga}$) 一致, 指示源区为中元古代增生的基性下地壳。全岩 Sr-Nd 同位素显示 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.705 \sim 0.708$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -2 \sim +2$ (图4), 排除了俯冲洋壳熔融的可能性 (Atherton and Petford, 1993)。综合岩石学与同位素证据, 早期 (>230Ma) 埃达克质花岗岩形成于扬子板块俯冲导致地壳增厚后, 下地壳玄武岩在石榴石角闪岩相条件下 (压力 > 1.5GPa, 深度 > 50km) 发生部分熔融, 熔体上升过程中与地幔橄榄岩发生轻微同化混染。

2.2 中阶段中下地壳熔融与岩浆混合

中期 (230 ~ 210Ma) 是秦岭花岗岩岩浆活动的高峰期, 岩石类型以花岗闪长岩和二长花岗岩为主, 广泛分布于南秦岭 (如东江口、曹坪、柞水岩体) 和西秦岭 (如糜署岭、温泉岩体), 该阶段岩浆活动的显著特征是普遍发育暗色微粒包体 (图3a, b), 其岩石学与地球化学特征揭示了中地壳熔融与幔源岩浆底侵的混合过程。

暗色微粒包体呈椭圆状、透镜状或不规则状, 大小多为 1 ~ 10cm, 与寄主花岗岩界限清晰或渐变过渡。镜下可见针状磷灰石、长柱状角闪石等淬火结构, 指示其为快速冷凝的镁铁质岩浆微滴 (图3c, d); 同时发育斜长石反环带结构和石英眼状构造, 反映岩浆混合过程中的物理化学不平衡 (秦江锋和赖绍聪, 2011)。暗色微粒包体主要矿物组成为斜长石 ($\text{An} = 35 \sim 45$)、角闪石 ($\text{Mg}^{\#} = 65 \sim 70$)、黑云母 ($\text{Mg}^{\#} = 50 \sim 55$) 和少量辉石, 岩石类型为闪长质-二长闪长质, 属于橄榄安粗岩系列 ($\text{K}_2\text{O} = 3.5\% \sim 5.0\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 2.5\% \sim 3.5\%$) (Qin *et al.*, 2013, 2019)。

主量元素上, 暗色微粒包体较寄主花岗岩具有更低的 SiO_2 (52% ~ 58% vs. 65% ~ 70%) 和更高的 FeO^{T} (6% ~ 8% vs. 2% ~ 4%)、 MgO (3% ~ 5% vs. 1% ~ 2%)、 CaO (5% ~ 7% vs. 2% ~ 4%), 显示典型的镁铁质岩浆特征。微量元素方面, 暗色微粒包体与寄主花岗岩具有相似的稀土元素配分模式 (轻稀土富集、重稀土平坦), 但其稀土总量 ($\sum \text{REE} = 200 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$) 更高, 且 Eu 异常不明显 ($\delta \text{Eu} = 0.9 \sim 1.0$), 暗示两者源于同一岩浆体系。Sr-Nd 同位素为岩浆混合提供了直接证据, 暗色微粒包体的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -8 \sim -5$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.706 \sim 0.708$, 而寄主花岗岩 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -10 \sim -8$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.708 \sim 0.710$ (图4)。锆石 Hf 同位素进一步显示, 暗色微粒包体中部分锆石具有正 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (+2 ~ +4), 单阶段 Hf 模式年龄 = 0.8 ~ 1.0Ga, 指示幔源岩浆带来了新元古代亏损地幔物质 (秦江锋和赖绍聪, 2011)。

中期 (230 ~ 210Ma) 中地壳熔融发生于后碰撞伸展环境, 岩石圈拆沉导致软流圈上涌, 引发幔源岩浆底侵至中地壳 (深度 30 ~ 50km), 诱发中地壳长英质岩石部分熔融。底侵的镁铁质岩浆不仅提供热量, 还与壳源熔体发生混合, 形成“花岗闪长岩-暗色微粒包体”组合。寄主花岗岩锆石饱和温度为 750 ~ 800℃, 而暗色微粒包体为 850 ~ 900℃, 反映幔源岩浆的高温特征 (Hildreth and Moorbath, 1988)。综上, 中期 (230 ~ 210Ma) 岩浆活动记录了中地壳熔融与幔源岩浆底侵的耦合过程, 是后碰撞伸展阶段地壳-地幔物质交换的直接产物。

2.3 晚阶段中上地壳变沉积岩熔融与高 Si 花岗岩的形成

晚期 (<210Ma) 秦岭花岗岩岩浆活动转向浅部, 形成以过铝质黑云母花岗岩为主的岩石组合, 其源区为中上地壳变质富铝沉积岩的部分熔融, 标志着地壳熔融从深部向浅部的

迁移。

该阶段代表性岩体包括南秦岭胭脂坝岩体、四海坪岩体和懒板凳岩体(Jiang *et al.*, 2010;张宏飞等, 2007; Wang *et al.*, 2022)。岩石的 A/CNK 比值($\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$) > 1.1, 其中胭脂坝岩体白云母含量达 5% ~ 8% (骆金诚等, 2010; Wang *et al.*, 2022)。主量元素显示高 SiO_2 (>70%)、富 Al_2O_3 (14% ~ 16%)、低 CaO (<1.5%) 特征, 与变沉积岩部分熔融实验结果一致(Patiño Douce, 1995)。微量元素方面, 岩石富集 Rb (> 300×10^{-6})、Cs (> 10×10^{-6})、亏损 Ba (< 500×10^{-6})、Sr (< 100×10^{-6})、具显著 Eu 负异常($\delta\text{Eu} = 0.3 \sim 0.5$)、反映源区斜长石的残留。锆石饱和温度较低(700 ~ 750℃), 指示熔融发生于浅部地壳(深度 <30km)的低温条件(Watson and Harrison, 1983)。晚期(<210Ma)过铝质花岗岩锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -15 ~ -10, 二阶段 Hf 模式年龄(t_{DM2}) = 1.8 ~ 2.0Ga, 与南秦岭耀岭河群变质沉积岩(t_{DM2} = 1.7 ~ 2.0Ga)和扬子地块北缘西乡群变质沉积岩(t_{DM2} = 1.8 ~ 2.1Ga)的 Hf 同位素组成完全一致(凌文黎等, 2002)。全岩 Nd 同位素显示 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -15 \sim -12$, 进一步证实源区为古元古代变质沉积岩(骆金诚等, 2010)。

3 地壳多层次熔融的动力学机制

秦岭造山带三叠纪花岗质岩浆活动的动力学背景涉及后碰撞伸展、岩石圈拆沉与流体交代等多尺度过程。以下从构造环境转换、岩石圈减薄机制及流体-岩浆耦合作用三个维度, 系统阐述地壳熔融的深部驱动因素。

3.1 后碰撞伸展与岩石圈拆沉

华北-扬子板块的碰撞造山过程在沿昆仑-秦岭-大别造山带不同区段表现出显著的穿时性(Dong *et al.*, 2021)。大别段碰撞启动最早, 约 250Ma 即已进入同碰撞阶段, 峰期变质年龄约 245Ma; 而西秦岭至东昆仑段俯冲-碰撞转换滞后, 约 230Ma 前后才进入同碰撞阶段(He *et al.*, 2025)。就秦岭造山带中段而言, 早期以洋陆俯冲为主, 至 230 ~ 220Ma 左右才转入碰撞后构造体制, 发生大规模的地壳物质熔融。此时地壳平均厚度达 60 ~ 70km, 地温梯度降至 <20℃/km, 岩石圈有效弹性厚度 >80km, 处于重力不稳定状态(张国伟等, 2003)。增厚的岩石圈根因榴辉岩化(密度 $3.8\text{g}/\text{cm}^3$)而密度超过周围软流圈地幔($3.3\text{g}/\text{cm}^3$), 在构造应力减弱的后碰撞阶段发生断裂并沉入软流圈(England and Houseman, 1989)。秦岭造山带三叠纪拆沉即符合这一规律: 早期(>230Ma)岩石圈根开始失稳, 中期(230 ~ 210Ma)完成断离, 晚期(<210Ma)进入稳定伸展阶段, 整个过程历时约 30Myr。锆石裂变径迹和低温热年代学数据记录了拆沉后的快速冷却事件。秦岭造山带在 220 ~ 200Ma 期间冷却速率达 5 ~ 8℃/Myr, 显著高于碰撞期(<1℃/Myr), 对应地壳隆升速率 >1km/Myr(王非等, 2004)。例如, 东秦岭曹坪岩体角闪

石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 217Ma, 黑云母为 210Ma, 钾长石为 205Ma, 指示岩体在 12Myr 内从 500℃ 冷却至 150℃, 对应剥蚀深度 >15km(张国伟等, 2003)。

3.2 同时期镁铁质岩浆-地壳熔融的耦合作用

秦岭造山带三叠纪花岗岩中普遍发育岩浆成因的暗色微粒包体, 以中阶段(230 ~ 210Ma)花岗闪长岩中最为典型。这些暗色微粒包体呈椭圆状、透镜状, 具细粒火成结构及针状磷灰石等淬火特征, 代表与寄主花岗岩近同期侵位的镁铁质岩浆微滴(Qin *et al.*, 2010, 2019)。同时, 商丹构造带附近出露的沙湾湾煌斑岩脉(219 ± 2Ma)为同时期幔源镁铁质岩浆活动提供了直接的独立岩石学证据(Wang *et al.*, 2007)。该类岩石具高钾富碱特征, 其 K_2O 含量 5% ~ 8%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 0.5 \sim 0.8$, $\text{Ba} = 1000 \times 10^{-6} \sim 3000 \times 10^{-6}$, $\text{Sr} = 800 \times 10^{-6} \sim 1500 \times 10^{-6}$, 稀土元素总量($\sum \text{REE}$) = $300 \times 10^{-6} \sim 500 \times 10^{-6}$, 轻稀土富集, 无 Eu 负异常(Wang *et al.*, 2007), 这些特征与含金云母石榴石二辉橄辉岩的部分熔融实验结果一致, 指示流体源区为交代富集地幔楔。煌斑岩脉的全岩($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 比值为 0.708 ~ 0.712, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -9 \sim -6$, 落入俯冲沉积物流体交代地幔范围(Wang *et al.*, 2007)。上述镁铁质岩浆岩的发育, 对同期地壳物质的大规模熔融具有三方面重要启示: (1) 幔源镁铁质岩浆温度通常可达 850 ~ 1000℃ 以上, 远高于中下地壳长英质岩石的固相线温度。当这些高温岩浆底侵至地壳不同层次时, 直接为地壳物质的升温熔融提供了所需热量, 是驱动碰撞后地壳大规模部分熔融的主要热动力来源(Hildreth and Moorbath, 1988)。(2) 镁铁质岩浆在分异结晶晚期所释放的残余熔体或高温流体, 可直接注入邻近的地壳岩石体系。这些富挥发分的晚期流体不仅携带热量, 更显著降低了地壳岩石的固相线温度, 在部分区域造成高温条件下的水致部分熔融, 进而大幅提升熔融效率, 有利于大规模花岗质岩浆的形成(Patiño Douce, 1995)。(3) 幔源镁铁质岩浆能够快速上升至地壳浅部并侵位, 本身即指示区域岩石圈处于伸展或张裂状态。伸展环境下的减压效应与地幔上涌协同作用, 为地壳物质的大规模熔融提供了有利的构造空间和持续的热量补给条件。

3.3 晚期中上地壳变沉积岩的部分熔融

晚期(<210Ma)过铝质花岗岩形成于后碰撞晚期伸展环境, 地壳持续减薄导致中上地壳变质沉积岩(如耀岭河群变质泥岩)在低温(700 ~ 750℃)、低压(<0.8GPa)条件下发生部分熔融。南秦岭晚三叠世关家沟组沉积岩为一套未变质的陆相冲积-洪积序列, 其物源锆石年龄谱显示 210 ~ 200Ma 峰值, 与过铝质花岗岩形成年龄一致, 反映岩浆活动伴随地壳快速抬升与剥蚀(闫全人等, 2004)。综上, 晚期(<210Ma)过铝质花岗岩记录了中上地壳变质富铝沉积岩在浅部伸展环境下的部分熔融过程, 是秦岭造山带地壳多层次熔融的浅部响应。

4 地壳演化与金属成矿响应

4.1 地壳垂向增生与物质再循环

秦岭造山带三叠纪花岗质岩浆活动不仅是地壳熔融的产物,更伴随显著的地壳垂向增生与物质再循环过程。

早期(>230Ma)埃达克质花岗岩的形成标志着下地壳新生的起始。锆石 Hf 同位素显示,该阶段花岗岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 $-2 \sim +4$ 之间,单阶段 Hf 模式年龄(t_{DMI})集中在 $1.0 \sim 1.2\text{Ga}$,显著低于晚期(<210Ma)过铝质花岗岩($t_{\text{DMI}} = 1.8 \sim 2.0\text{Ga}$),指示源区存在新增生的基性地壳物质(Qin *et al.*, 2013)。全岩 Nd 同位素进一步证实,早期(>230Ma)花岗岩 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -2 \sim +2$,Nd 模式年龄(t_{DM}) = $1.1 \sim 1.3\text{Ga}$,与南秦岭新元古代基底岩石(如耀岭河群变质玄武岩, $t_{\text{DMI}} = 1.0 \sim 1.2\text{Ga}$)一致(图4)。

埃达克质岩浆的底侵过程促进了下地壳的重组与增生。实验岩石学模拟显示,当玄武质下地壳在压力 $> 1.5\text{GPa}$ (深度 $> 50\text{km}$)条件下部分熔融时,约 $30\% \sim 40\%$ 的熔体被萃取,残留相为石榴石 + 角闪石 + 钛铁矿组合(Rapp and Watson, 1995)。这些残留相通过重力分异堆积于下地壳底部,形成新生玄武质地壳,而萃取的熔体上升后与地幔橄榄岩同化混染,导致地壳物质中幔源组分(如 Mg、Cr、Ni)的加入。例如,佛坪五龙岩体边缘的石英闪长岩 $\text{Mg}^\# = 45 \sim 55$, $\text{Cr} = 65 \times 10^{-6} \sim 82 \times 10^{-6}$, $\text{Ni} = 28 \times 10^{-6} \sim 35 \times 10^{-6}$,暗示其与地幔橄榄岩的相互作用(Qin *et al.*, 2013)。

早期(>230Ma):熔融深度 $> 50\text{km}$ (压力 $> 1.5\text{GPa}$),以石英闪长岩为代表。锆石饱和温度为 $850 \sim 900^\circ\text{C}$,对应含石榴石角闪岩相条件,源区为下地壳玄武岩(Qin *et al.*, 2013)。中期(230 ~ 210Ma):熔融深度 $30 \sim 50\text{km}$ (压力 $0.8 \sim 1.5\text{GPa}$),以花岗闪长岩为主,伴随暗色微粒包体。锆石饱和温度降至 $750 \sim 850^\circ\text{C}$,指示中地壳长英质岩石熔融,且幔源岩浆底侵贡献 $10\% \sim 30\%$ 的物质(He *et al.*, 2025)。晚期(<210Ma):熔融深度 $< 30\text{km}$ (压力 $< 0.8\text{GPa}$),形成过铝质黑云母花岗岩。这一迁移过程与后碰撞伸展背景下岩石圈拆沉密切相关,早阶段地壳增厚导致下地壳高压熔融;中阶段岩石圈拆沉引发软流圈上涌,幔源岩浆底侵触发中地壳熔融与混合;晚阶段地壳减薄使中上地壳变质沉积岩在浅部低温条件下熔融(秦江锋和赖绍聪, 2011)。同位素数据记录了物质再循环的轨迹,早期(>230Ma)花岗岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值较高($-2 \sim +4$),指示幔源物质加入;中阶段因岩浆混合, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值降至 $-8 \sim -5$;晚阶段过铝质花岗岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -15 \sim -10$,反映古老地壳物质的重熔(图4)。

从西向东,岩体年龄逐渐变新, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 与 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围增大,反映壳幔相互作用增强,支持秦岭造山带经历了自西向东的“剪刀式”俯冲-碰撞闭合过程(Dong and Santosh, 2016; Lei *et al.*, 2025)。这一过程与古特提斯洋的斜向闭合及华北-华南地块碰撞的动力学背景一致。秦岭造山带三

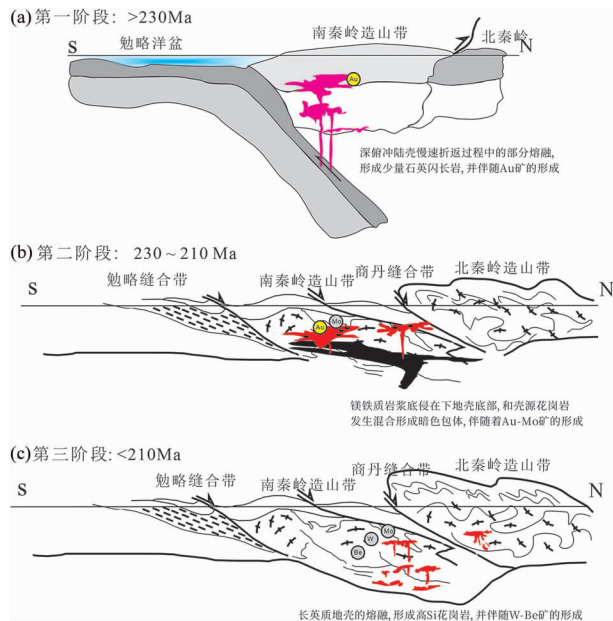


图5 秦岭造山带晚三叠世-早侏罗世不同阶段花岗质岩浆活动与金属成矿的时空演化示意图

Fig. 5 Schematic illustration showing the spatio-temporal evolution of granitic magmatism and associated metallic mineralization during the Late Triassic-Early Jurassic in the Qinling Orogen

叠纪地壳垂向增生与物质再循环表现为下地壳通过埃达克质岩浆底侵与地幔物质混染实现新生,中地壳通过岩浆混合完成壳幔物质交换,中上地壳通过变质沉积岩熔融实现古老物质的再循环。熔融深度从早到晚由 $> 50\text{km}$ 降至 $< 30\text{km}$,同位素组成从幔源亏损向地壳富集演化,这一过程不仅驱动了秦岭地壳的垂向生长,还为金属成矿提供了物质基础与流体通道。

4.2 秦岭三叠纪花岗岩与金属成矿的时空分布规律

秦岭造山带三叠纪的构造-岩浆-成矿系统显示出深刻的时间演化规律和空间分带特征,其成矿专属性受到岩浆演化阶段与岩石圈物质结构的双重控制(图5; Qiu *et al.*, 2023; He *et al.*, 2025)。He *et al.* (2025) 基于对秦岭造山带三叠纪花岗岩类的多指标元素与同位素填图研究,揭示出秦岭造山带的岩石圈深部物质结构受东经 $103^\circ \sim 104^\circ$ 和东经 $107^\circ \sim 108^\circ$ 两条关键的南北向岩石圈尺度边界所分割,可明确区分为东、中、西三个部分,这三个区域的基底物质组成存在显著差异。西段以古老、交代富集的岩石圈地幔为特征,其花岗岩类呈现出最富集的 Sr-Nd-Hf 同位素组成和低 Nb/Ta 比值。中段则表现出复杂的过渡性地壳结构。东段的基底物质相对年轻,花岗岩同位素组成更趋亏损,且高 Nb/Ta 比值指示了强烈的壳幔相互作用与地幔物质贡献。

从时间演化的角度看,岩浆性质与成矿类型存在明显的

表 1 秦岭造山带三叠纪不同成矿类型形成年龄统计表

Table 1 Statistical table of formation ages for different metallogenic types in the Triassic Qinling Orogen

矿床	矿床类型	矿物	方法	年龄 (Ma)	资料来源
早子沟金矿	类卡林型	锆石 (赋矿闪长玢岩)	U-Pb	230、211	杨帆等, 2025
早子沟金矿	类卡林型	独居石	U-Pb	211 ± 3	Qiu <i>et al.</i> , 2020
早子沟金矿	类卡林型	绢云母	Ar-Ar	245	李建威等, 2019
早子沟金矿	类卡林型	锆石	U-Pb	230 ~ 220	隋吉祥, 2016
加甘滩金矿	类卡林型	毒砂	Re-Os	243.1 ± 8.7	陈炳翰等, 2024
阳山金矿	类卡林型	锆石 (赋矿花岗斑岩)	U-Pb	212.5 ± 2.6	李小宇和赵静, 2023
李坝金矿	类卡林型	锆石 (赋矿花岗斑岩)	U-Pb	223	李蓓等, 2021
大桥金矿	类卡林型	黄铁矿	Re-Os	221 ± 7.6	赵洪葆等, 2025
温泉钼矿	斑岩型	锆石 (赋矿花岗斑岩)	U-Pb	212.43 ± 213.4	吴纪修等, 2021
温泉钼矿	斑岩型	辉钼矿	Re-Os	214.1 ± 1.1	王飞, 2011
温泉钼矿	斑岩型	辉钼矿	Re-Os	214 ± 7.1	朱赖民等, 2009a
月河坪钼矿	矽卡岩型	辉钼矿	Re-Os	193.6 ± 3.5	李双庆等, 2010
东阳钨矿	矽卡岩型	辉钼矿	Re-Os	198 ± 2.7	刘茜, 2013
棋盘沟钨矿	石英脉型	锆石	U-Pb	213 ± 2.4	张望等, 2020
棋盘沟钨矿	石英脉型	辉钼矿	Re-Os	199.7 ± 3.9	韩珂, 2021
棋盘沟钨矿	石英脉型	金云母	Ar-Ar	188.6 ± 0.6	晁会霞, 2023
棋盘沟钨矿	矽卡岩型	金云母	Ar-Ar	190.1 ± 0.6	晁会霞, 2023
核桃坪钨矿	石英脉型	辉钼矿	Re-Os	196.3 ± 3.3	Dai <i>et al.</i> , 2018
核桃坪钨矿	矽卡岩型	金云母	Ar-Ar	196.7 ± 2	代鸿章等, 2019
核桃坪钨矿	矽卡岩型	铬云母	Ar-Ar	201.4 ± 2.1	代鸿章等, 2019
桂林沟钼矿	斑岩型	辉钼矿	Re-Os	197.2 ± 1.3	张红等, 2015
向坪钨矿	石英脉型	锆石	U-Pb	200.2 ± 1.7	张望等, 2020
新铺钼矿	石英脉型	辉钼矿	Re-Os	197 ± 1.6	代军治等, 2015
江口钼矿	石英脉型	辉钼矿	Re-Os	198.7 ± 3.9	韩珂, 2021

阶段性耦合。早期 (>230Ma) 埃达克质花岗岩对金矿有重要贡献 (表 1), 夏河-合作地区早期 (>230Ma) 岩浆作用集中于 249 ~ 230Ma 左右, 多数岩石具有高镁闪长岩特征, 属“热壳 + 热幔”壳幔结构, 为成矿提供了优越的物质与热力基础 (Qiu *et al.*, 2023), 硫同位素显示, 早子沟金矿含矿黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-2.9\text{‰} \sim -1.5\text{‰}$, 表现为幔源或岩浆硫特征 (Qiu *et al.*, 2020)。其次, 岩浆侵位引发的构造活动 (如岩体接触带、断裂破碎带) 为矿化提供赋存空间, 如早子沟金矿则受断裂破碎带主导 (杨帆等, 2025)。最后在深部形成斑岩型、矽卡岩型铜金矿, 浅部及远源区发育远成低温热液型金矿, 元素组合从 Cu-Au 向 Au-Sb 分带 (李建威等, 2019)。再如秦岭造山带中段的马鞍桥金矿 (香沟二长花岗斑岩, 242Ma), 该阶段花岗岩源于下地壳基性岩的高压部分熔融, 岩浆氧逸度偏低, 为还原性岩浆, 流体包裹体研究显示其流体体系为 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-NaCl}$, 此条件下金主要以 $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ 络合物形式迁移 (朱赖民等, 2009a; 李建威等, 2019)。

中期 (230 ~ 210Ma) 花岗闪长岩的岩浆分异及幔源流体输入密切相关, 对区域的金矿和钼矿的形成与都有重要作用。幔源流体携带的金属元素 (如 Au、Mo、Cu) 与壳源熔体混合, 提升岩浆的成矿潜力, 如东江口岩体内部的丰富东沟金矿 (陈宝赞等, 2017) 及宁陕东阳钨矿等 (Wang *et al.*, 2022)。与金矿相关的花岗岩主要集中于西秦岭, 典型岩体如西坝岩体 (221 ~ 214Ma)、中川岩体 (220 ~ 213Ma) 等 (表

1), 均为同碰撞或后碰撞阶段地壳重熔型花岗岩。这些花岗岩侵位带来巨大热能, 加热围岩并驱动大气降水、建造水与岩浆流体的混合循环, 促进成矿元素的活化和迁移。此外, 花岗岩自身或其深部源区可能提供部分成矿物质 (如 Au、As、S 等), 同时热液流体在运移过程中萃取围岩中的预富集金, 形成叠加富集 (刘家军等, 2019; Liu *et al.*, 2015)。岩体侵位伴随的断裂、剪切带及接触带为流体汇聚和矿质沉淀提供空间。中酸性岩浆活动常导致流体不混溶或沸腾, 促使金在裂隙或角砾岩中沉淀 (刘家军等, 2019)。以西秦岭的温泉岩体为例, 温泉花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 ($216.2 \pm 1.7\text{Ma} \sim 217.2 \pm 2.0\text{Ma}$) 与钼矿 Re-Os 等时线年龄 ($214.4 \pm 7.1\text{Ma}$) 高度一致 (Zhu *et al.*, 2011), 表明矿化与岩浆活动同期发生, 而且源区特征与岩石成分是成矿的物质基础: 花岗岩源于新元古代中下部地壳的部分熔融, 伴随幔源镁铁质岩浆混合 (Qin *et al.*, 2009), 高 $\text{Mg}^\#$ (40.05 ~ 56.34)、Cr、Ni 含量暗示深部物质参与, 可能富集 Mo 等成矿元素; 再者花岗岩中辉钼矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值 ($5.02\text{‰} \sim 5.66\text{‰}$) 显示硫来自岩浆热液。

而最晚期的花岗岩以区内印支晚期-燕山早期的高 Si 花岗岩为主, 这期花岗岩与南秦岭宁陕-镇安一带 W-Mo-Be 富集密切相关, 其中懒板凳、四海坪、胭脂坝、王家坪等岩体形成时代集中于 190 ~ 200Ma 左右 (骆金诚等, 2010; Wang *et al.*, 2022; 表 1), 岩石具有富硅、高演化, 具强烈分离结晶特

征,富集 Rb、Th、U、Nb、Ta 等元素,亏损 Ba、Sr,具低 Sr/Y 值,显示出高演化岩浆属性(骆金诚等, 2010; 韩珂, 2021),强烈的负 Eu 异常伴随长石石英脉发育,反映岩浆高分异特征(韩珂, 2021)。深部幔源或下地壳 W、Be 等物质通过壳幔交换向上运移,在寒武系碳质板岩屏障下富集成矿,并促进绿柱石的形成(代鸿章等, 2019)。需要说明的是,本文所系统整理并重点剖析的岩浆-成矿资料,主要集中于秦岭造山带的中段,该区段作为连接东西的构造过渡带(He *et al.*, 2025),既发育了与中期花岗闪长岩相关的金、钼、钨多金属成矿作用,又完整记录了从早期俯冲阶段到同碰撞-后碰撞阶段的岩浆演化序列,充分体现了岩石圈物质结构、断裂系统与大地构造演化阶段三者耦合对成矿类型和空间分布格局的根本性控制。

5 结论与展望

秦岭造山带三叠纪花岗岩系统记录了碰撞背景下地壳从深部至浅部的多层次熔融过程:早期(>230Ma)以高压条件下下地壳基性岩熔融形成的埃达克质岩石为代表,中期(230~210Ma)表现为中下地壳熔融与幔源岩浆混合形成的花岗闪长岩,晚期(<210Ma)则发育源自中上地壳变质沉积岩熔融的过铝质高硅花岗岩。该系列形成于后碰撞伸展环境,岩石圈拆沉及软流圈上涌是驱动熔融的关键机制,而幔源岩浆底侵与流体交代共同促进了地壳物质再循环与垂向增生。在成矿响应上,早阶段埃达克质岩浆与金矿化密切相关,中晚阶段壳幔混合岩浆主导金、钼矿化,晚阶段高演化花岗质岩浆流体则控制钨-钼-铍矿化。当前研究多依赖全岩地球化学与锆石年代学进行构造-岩浆阶段划分,然而受地壳物质组成不均一性及构造-热传递滞后性影响,不同性质花岗岩的形成时代往往难以截然分开,阶段之间常存在重叠与过渡。

值得注意的是,目前对秦岭造山带岩石圈地幔熔融在花岗岩形成与金属成矿中的具体贡献仍不明确。未来需加强对磷灰石、角闪石、黑云母等富含挥发分矿物的原位微区分析,结合高精度锆石 Hf-O 同位素与硫化物地球化学,系统揭示地幔流体活动、地壳熔融与成矿元素富集之间的内在联系,进而构建融合熔融时空规律与构造背景的区域成矿预测模型,深化对碰撞造山带壳-幔相互作用与成矿机制的理解。

致谢 王晓霞教授及匿名审稿人对本文进行了细致的审阅,并提出了建设性的修改意见与宝贵建议,为本文质量的提升提供了重要指导,在此表示诚挚的感谢。

References

Atherton MP and Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362 (6416): 144-

- 146
Boscaini A, Davies JHFL, Perrot MG, Sassi R, Mazzoli C, De Min A, Morelli C, Kustatscher E, Blanchet-Gavouyère T and Marzoli A. 2025. Early Permian post-collisional magmatism induced by extensive removal of the Variscan lithospheric mantle. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 180(2): 10
Cai HM, Zhang HF, Xu WC, Shi ZL and Yuan HL. 2010. Petrogenesis of Indosinian volcanic rocks in Songpan-Garze fold belt of the northeastern Tibetan Plateau: New evidence for lithospheric delamination. *Science China (Earth Sciences)*, 53(9): 1316-1328
Chao HX, Cui WW, Yang XK, Wang R, Han K, Yang N and Wang YZ. 2023. Phlogopite ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of the Qipangou tungsten deposit in western Zhen'an, South Qinling Mountains and its significance of Late Indosinian ore mineralization. *Geotectonica et Metallogenia*, 47(3): 570-579 (in Chinese with English abstract)
Chen BH, Zhang Y and Li KN. 2024. Genesis of the Jiagantan gold deposit in West Qinling, China: Constraints from Re-Os dating, in-situ trace elements and S isotope of gold bearing minerals. *Acta Petrologica Sinica*, 40(6): 1767-1783 (in Chinese with English abstract)
Chen BY, Hou MT, Wang XL, Qiao JX and Chen WH. 2017. An analysis of the Fengfu gold deposit in the Dongjiangkou granite of the South Qinling orogenic belt. *Geology and Exploration*, 53(1): 43-53 (in Chinese with English abstract)
Dai HZ, Wang DH, Wang CH and Huang F. 2018. Re-Os isotopic dating of a W-Be polymetallic deposit in the Southern Qinling region, China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 92(1): 414-415
Dai HZ, Wang DH, Liu LJ, Huang F and Wang CH. 2019. Metallogenic epoch and metallogenic model of the Hetaoping W-Be deposit in Zhen'an County, South Qinling. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1342-1358 (in Chinese with English abstract)
Dai JZ, Yu KP, Wang RT, Yuan HC, Wang L, Zhang XS and Li JB. 2015. Geological characteristics, Re-Os geochronology of Xinpu molybdenum deposit in Ningshan, southern Qinling and its implications. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1): 189-199 (in Chinese with English abstract)
Ding HX, Zhang ZM and Kohn MJ. 2025. Himalayan "S-type" granite generated from I-type sources. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 122 (22): e2500480122
Dong YP and Santosh M. 2016. Tectonic architecture and multiple orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China. *Gondwana Research*, 29(1): 1-40
Dong YP, Sun SS, Santosh M, Zhao J, Sun JP, He DF, Shi XH, Hui B, Cheng C and Zhang GW. 2021. Central China Orogenic Belt and amalgamation of East Asian continents. *Gondwana Research*, 100: 131-194
England P and Houseman G. 1989. Extension during continental convergence, with application to the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 94(B12): 17561-17579
Han K. 2021. Ore-controlling structure-magma-fluid-metallogenetic regularity and prospecting prediction in the W-Mo-Au polymetallic ore concentration area in Ningshan-Zhen'an area, South Qinling. Ph. D. Dissertation. Xi'an: Chang'an University (in Chinese with English abstract)
He DY, Qiu KF, Yu HC, Jowitt SM, Zheng X, Mazumder R and Deng J. 2025. Lithospheric architecture and evolution of the Qinling Orogen of Central China and associated controls on metallogeny. *Earth-Science Reviews*, 264: 105092
Hildreth W and Moorbath S. 1988. Crustal contributions to arc magmatism in the Andes of Central Chile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 98(4): 455-489
Hillenbrand IW and Williams ML. 2022. Geochemical evidence for diachronous uplift and synchronous collapse of the high elevation Variscan hinterland. *Geophysical Research Letters*, 49 (21): e2022GL100435
Hu FY, Liu SW, Ducea MN, Chapman JB, Wu FY and Kusky T. 2020. Early Mesozoic magmatism and tectonic evolution of the Qinling

- Orogen: Implications for oblique continental collision. *Gondwana Research*, 88: 296-332
- Hu JQ, Li XW, Xu JF, Mo XX, Wang FY, Yu HX, Shan W, Xing HQ, Huang XF and Dong GC. 2019. Generation of coeval metaluminous and muscovite-bearing peraluminous granitoids in the same composite pluton in West Qinling, NE Tibetan Plateau. *Lithos*, 344-345: 374-392
- Jiang YH, Jin GD, Liao SY, Zhou Q and Zhao P. 2010. Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on the origin of Late Triassic granitoids from the Qinling orogen, central China: Implications for a continental arc to continent-continent collision. *Lithos*, 117(1-4): 183-197
- Jin WJ, Zhang Q, He DF and Jia XQ. 2005. SHRIMP dating of adakites in western Qinling and their implications. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 959-966 (in Chinese with English abstract)
- Lai SC, Qin JF, Chen L and Grapes R. 2008. Geochemistry of ophiolites from the Mian-Lue suture zone: Implications for the tectonic evolution of the Qinling Orogen, central China. *International Geology Review*, 50(7): 650-664
- Lei YD, Zhang YP, Cao GY, Zhao Z, Liu J, Qin GX, Yang SK, Zhang DL and Tang XC. 2025. Petrogenesis of Triassic granitoids in the Guide area, Western Qinling: Implications for the scissors-like subduction to collision orogenic processes. *Lithosphere*, 2025(3): lithosphere_2024_231
- Li B, Zhu LM, Ding LL, Ma YB, Xiong X, Yang T and Wang F. 2021. Geology, isotope geochemistry, and ore genesis of the Liba gold deposit in the western Qinling orogen, China. *Acta Geologica Sinica*, 95(2): 427-448 (in Chinese with English abstract)
- Li JW, Sui JX, Jin XY, Wen G, Chang J, Zhu R, Zhan HY and Wu WH. 2019. The intrusion-related gold deposits in the Xiahe-Hezuo district, West Qinling Orogen: Geodynamic setting and exploration potential. *Earth Science Frontiers*, 26(5): 17-32 (in Chinese with English abstract)
- Li SQ, Yang XY, Qu WJ, Chen FK and Sun WD. 2010. Molybdenite Re-Os age and metallogeny of the Yueheping skarn molybdenum deposit in Ningshan, southern Qinling. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1479-1486 (in Chinese with English abstract)
- Li XY and Zhao J. 2023. Zircon chronology of mineralized and unmineralized dikes in Yangshan gold deposit. *Sichuan Metallurgy*, 45(1): 31-35 (in Chinese with English abstract)
- Ling WL, Gao S, Ouyang JP, Zhang BR and Li HM. 2002. Time and tectonic setting of the Xixiang Group: Constraints from zircon U-Pb geochronology and geochemistry. *Science in China (Series D)*, 45(9): 818-831
- Liu HN, Li XW, Mo XX, Xu JF, Liu JJ, Dong GC, Shan W, Zhang Y, Wang K and Yu HX. 2021. Early Mesozoic crustal evolution in the NW segment of West Qinling, China: Evidence from diverse intermediate-felsic igneous rocks. *Lithos*, 396-397: 106187
- Liu JJ, Dai HZ, Zhai DG, Wang JP, Wang YH, Yang LB, Mao GJ, Liu XH, Liao YF, Yu C and Li QZ. 2015. Geological and geochemical characteristics and formation mechanisms of the Zhaishang Carlin-like type gold deposit, western Qinling Mountains, China. *Ore Geology Reviews*, 64: 273-298
- Liu JJ, Liu CH, Wang JP, Zhu LM, Zhang J, Zhai DG, Wang YH, Liu ZJ and Zhang FF. 2019. Classification and mineralization of the gold deposits in the western Qinling region, China. *Earth Science Frontiers*, 26(5): 1-16 (in Chinese with English abstract)
- Liu X. 2013. The characteristics and genesis of the Zhen'an W deposit, Shaanxi Province, China. Master Degree Thesis. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract)
- Luchitskaya MV. 2022. The composition, petrogenesis, and geodynamic setting of adakite magmatism: An overview. *Geotectonics*, 56(4): 486-519
- Luo JC, Lai SC, Qin JF, Li HB, Li XJ and Zang WJ. 2010. Geochemistry and geological significance of Late Triassic Yanzhiba pluton from the Southern Qinling orogenic belt. *Geological Review*, 56(6): 792-800 (in Chinese with English abstract)
- Martin H, Smithies RH, Rapp R, Moyen JF and Champion D. 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79(1-2): 1-24
- Meng QR and Zhang GW. 1999. Timing of collision of the North and South China blocks: Controversy and reconciliation. *Geology*, 27(2): 123-126
- Patiño Douce AE. 1995. Experimental generation of hybrid silicic melts by reaction of high-Al basalt with metamorphic rocks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B8): 15623-15639
- Qin JF, Lai SC and Li YF. 2005. Petrogenesis and geological significance of Yangba granodiorites from Bikou area, northern margin of Yangtze Plate. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 697-710 (in Chinese with English abstract)
- Qin JF, Lai SC, Grapes R, Diwu CR, Ju YJ and Li YF. 2009. Geochemical evidence for origin of magma mixing for the Triassic monzonitic granite and its enclaves at Mishuling in the Qinling orogen (central China). *Lithos*, 112(3-4): 259-276
- Qin JF, Lai SC, Grapes R, Diwu CR, Ju YJ and Li YF. 2010. Origin of Late Triassic high-Mg adakitic granitoid rocks from the Dongjiangkou area, Qinling orogen, central China: Implications for subduction of continental crust. *Lithos*, 120(3-4): 347-367
- Qin JF and Lai SC. 2011. Petrogenesis and Geodynamic Implications of the Late-Triassic Granitoids from the Qinling Orogenic Belt. Beijing: Science Press, 1-255 (in Chinese)
- Qin JF, Lai SC and Li YF. 2013. Multi-stage granitic magmatism during exhumation of subducted continental lithosphere: Evidence from the Wulong pluton, South Qinling. *Gondwana Research*, 24(3-4): 1108-1126
- Qin JF, Lai SC, Long XP, Li YF, Ju YJ, Zhao SW, Zhu RZ, Wang JB and Zhang ZZ. 2019. Hydrous melting of metasomatized mantle wedge and crustal growth in the post-collisional stage: Evidence from Late Triassic monzodiorite and its mafic enclaves in the south Qinling (central China). *Lithosphere*, 11(1): 3-20
- Qiu KF, Yu HC, Deng J, McIntire D, Gou ZY, Geng JZ, Chang ZS, Zhu R, Li KN and Goldfarb R. 2020. The giant Zaozigou Au-Sb deposit in West Qinling, China: Magmatic- or metamorphic-hydrothermal origin? *Mineralium Deposita*, 55(2): 345-362
- Qiu KF, Deng J, He DY, Rosenbaum G, Zheng X, Williams-Jones AE, Yu HC and Balen D. 2023. Evidence of vertical slab tearing in the Late Triassic Qinling Orogen (central China) from multiproxy geochemical and isotopic imaging. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128(4): e2022JB025514
- Rapp RP and Watson EB. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8 ~ 32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891-931
- Sui JX. 2016. Gold mineralization related to reduced intrusions in the Xiahe-Hezuo district, West Qinling, China. Ph. D. Dissertation. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan) (in Chinese)
- Wang F, Zhu RX, Li Q, He HY, Luo QH, Lu XX, Sang HQ and Wang YL. 2004. A differential uplifting of Qinling orogeny belt evidences from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology of granites. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 445-459 (in Chinese with English abstract)
- Wang F. 2011. The geological and geochemical characteristics of the Wenquan molybdenum deposit in the West Qinling, and its metallogenetic geodynamic setting. Master Degree Thesis. Xi'an: Northwest University (in Chinese with English abstract)
- Wang F, Li DC, Fan JL, Han K, Zhu LM, Wang PP, Ji CK, Zhou XL, Zhao W and Zang F. 2022. Petrogenesis of the Triassic Sihaiping granite in the South Qinling orogen, central China: Implications for Mo-W mineralization. *Ore Geology Reviews*, 150: 105166
- Wang XX, Wang T, Jahn BM, Hu NG and Chen W. 2007. Tectonic significance of Late Triassic post-collisional lamprophyre dykes from the Qinling Mountains (China). *Geological Magazine*, 144(5): 837-848
- Wang XX, Wang T, Ke CH, Yang Y and Tian YF. 2021. Timing and Nd-Hf isotopic mapping of Early Mesozoic granitoids in the Qinling orogen, central China: Implication for architecture, nature and

- processes of the orogen. *American Journal of Science*, 321 (1-2): 118-151
- Watson EB and Harrison TM. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295-304
- Weinberg RF. 2016. Himalayan leucogranites and migmatites: nature, timing and duration of anatexis. *Journal of Metamorphic Geology*, 34 (8): 821-843
- Wu FY, Li XH, Yang JH and Zheng YF. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217-1238 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Liu XC, Liu ZC, Wang RC, Xie L, Wang JM, Ji WQ, Yang L, Liu C, Khanal GP and He SX. 2020. Highly fractionated Himalayan leucogranites and associated rare-metal mineralization. *Lithos*, 352-353: 105319
- Wu JX, Wang W, Huang ZB, Wang XS, Xue QB and Su X. 2021. Zircon U-Pb age, Hf isotope composition, and magma source of Mo-bearing granite porphyry in the Wenquan Mo deposit from West Qinling. *Geology in China*, 48(5): 1596-1608 (in Chinese with English abstract)
- Xia LQ, Xia ZC, Xu XY, Li XM and Ma ZP. 2007. Petrogenesis of the Bikou Group volcanic rocks. *Earth Science Frontiers*, 14(3): 84-101 (in Chinese with English abstract)
- Xia L, Yan QR, Xiang ZJ, Jiang W, Song B and Chen HM. 2017. Late Triassic andesitic accretionary arc in the central Songpan-Ganzi terrane and its tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 33 (2): 579-604 (in Chinese with English abstract)
- Yan QR, Hanson AD, Wang ZQ, Druschke PA, Yan Z, Wang T and Lu HF. 2004. Timing and setting of Guanjiagou conglomerate in South Qinling and their tectonic implications. *Chinese Science Bulletin*, 49 (16): 1722-1729
- Yang F, Jepson G, Bagas L, Tu JR, Zhang C, Zhu R and Shen JF. 2025. Temporal evolution, exhumation history, and preservation potential of the superlarge Zaozigou gold deposit in the West Qinling Orogen, China. *Science China (Earth Sciences)*, 68(4): 1158-1179
- Yang JS, Liu FL, Wu C, Xu Z, Shi RD, Chen SY, Deloule E and Wooden JL. 2005. Two ultrahigh-pressure metamorphic events recognized in the central orogenic belt of China: Evidence from the U-Pb dating of coesite-bearing zircons. *International Geology Review*, 47(4): 327-343
- Zeng JJ, Pu WF, Liu B, Yuan Z and Yang Z. 2023. Magmatism in the Early Triassic continental margin arc environment in the West Qinling mountains: Evidence from zircon U-Pb ages and geochemical characteristics of the Nazha pluton. *Geological Bulletin of China*, 42 (6): 1001-1012 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GW, Dong YP, Lai SC, Guo AL, Meng QR, Liu SF, Cheng SY, Yao AP, Zhang ZQ, Pei XZ and Li SZ. 2004. Mianlue tectonic zone and Mianlue suture zone on southern margin of Qinling-Dabie orogenic belt. *Science in China (Series D)*, 47(4): 300-316
- Zhang H, Chen DL, Zhai MG, Zhang FX, Gong XK and Sun WD. 2015. Molybdenite Re-Os dating and its tectonic significance of the Guilingou porphyry molybdenum deposit, southern Qinling. *Acta Petrologica Sinica*, 31(7): 2023-2037 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HF, Xiao L, Zhang L, Yuan HL and Jin LL. 2007. Geochemical and Pb-Sr-Nd isotopic compositions of Indosinian granitoids from the Bikou block, northwest of the Yangtze plate: Constraints on petrogenesis, nature of deep crust and geodynamics. *Science in China (Series D)*, 50(7): 972-983
- Zhang W, Wang GB, Zhang K, Wang JL, Hu Y, Wang PP, Wang F, Liu WJ, Chen Y, Chen YW, Zhou XL and Ji CK. 2020. Indosinian ore-forming process of the Qipangou W deposit in Zhen'an, Shaanxi: Evidence from hydrothermal zircon U-Pb dating. *Geology in China*, 47(2): 552-554 (in Chinese with English abstract)
- Zhao HB, He GD, Niu PF, Wu BX and He JZ. 2025. Re-Os dating of pyrite from early ore stage of the Daqiao superlarge gold deposit in South Qinling and its geologic significance. *Chinese Journal of Geology*, 60(2): 594-606 (in Chinese with English abstract)
- Zhu LM, Ding ZJ, Yao SZ, Zhang GW, Song SG, Qu WJ, Guo B and Lee B. 2009. Ore-forming event and geodynamic setting of molybdenum deposit at Wenquan in Gansu Province, Western Qinling. *Chinese Science Bulletin*, 54(13): 2309-2324
- Zhu LM, Zhang GW, Lee B, Guo B, Gong HJ, Kang L and Lü SL. 2010. Zircon U-Pb dating and geochemical study of the Xianggou granite in the Ma'anqiao gold deposit and its relationship with gold mineralization. *Science China (Earth Sciences)*, 53(2): 220-240
- Zhu LM, Zhang GW, Chen YJ, Ding ZJ, Guo B, Wang F and Lee B. 2011. Zircon U-Pb ages and geochemistry of the Wenquan Mo-bearing granitoids in West Qinling, China: Constraints on the geodynamic setting for the newly discovered Wenquan Mo deposit. *Ore Geology Reviews*, 39(1-2): 46-62

附中文参考文献

- 晁会霞, 崔文玮, 杨兴科, 王冉, 韩珂, 杨宁, 王仪卓. 2023. 南秦岭镇安棋盘沟矿床⁴⁰Ar-³⁹Ar年代学及其对印支末期成矿的指示. *大地构造与成矿学*, 47(3): 570-579
- 陈宝赞, 余金杰, 侯满堂, 王小朗, 乔建新, 陈炜华. 2017. 南秦岭东江口岩体中丰富金矿床特征与成因浅析. *地质与勘探*, 53 (1): 43-53
- 陈炳翰, 张勇, 李康宁. 2024. 西秦岭加甘滩金矿成因研究: 毒砂 Re-Os 定年、载金矿物原位微量元素和硫同位素限定. *岩石学报*, 40(6): 1767-1783
- 代鸿章, 王登红, 刘丽君, 黄凡, 王成辉. 2019. 南秦岭镇安核桃坪钨铍矿床成矿时代及成矿模式探讨. *地质学报*, 93(6): 1342-1358
- 代军治, 鱼康平, 王瑞廷, 袁海潮, 王磊, 张西社, 李剑斌. 2015. 南秦岭宁陕地区新铺钨矿地质特征、辉钨矿 Re-Os 年龄及地质意义. *岩石学报*, 31(1): 189-199
- 韩珂. 2021. 南秦岭宁陕-镇安一带钨钼金多金属矿集区控矿构造-岩浆-流体-成矿规律与找矿预测. 博士学位论文. 西安: 长安大学
- 金维浚, 张旗, 何登发, 贾秀勤. 2005. 西秦岭埃达克岩的 SHRIMP 定年及其构造意义. *岩石学报*, 21(3): 959-966
- 李蓓, 朱赖民, 丁乐乐, 马渊博, 熊潇, 杨涛, 王飞. 2021. 西秦岭李坝金矿床地质、同位素地球化学及其成因探讨. *地质学报*, 95 (2): 427-448
- 李建威, 隋吉祥, 靳晓野, 文广, 昌佳, 朱锐, 詹涵钰, 武文辉. 2019. 西秦岭夏河-合作地区与还原性侵入岩有关的金成矿系统及其动力学背景和勘查意义. *地学前缘*, 26(5): 17-32
- 李双庆, 杨晓勇, 屈文俊, 陈福坤, 孙卫东. 2010. 南秦岭宁陕地区月河坪夕卡岩型钨矿 Re-Os 年龄和矿床学特征. *岩石学报*, 26 (5): 1479-1486
- 李小宇, 赵静. 2023. 阳山金矿矿化-未矿化岩脉中锆石年代学研究. *四川冶金*, 45(1): 31-35
- 凌文黎, 高山, 欧阳建平, 张本仁, 李惠民. 2002. 西乡群的时代与构造背景: 同位素年代学及地球化学制约. *中国科学(D辑)*, 32(2): 101-112
- 刘家军, 刘冲昊, 王建平, 朱赖民, 张静, 翟德高, 王银宏, 柳振江, 张方方. 2019. 西秦岭地区金矿类型及其成矿作用. *地学前缘*, 26(5): 1-16
- 刘茜. 2013. 陕西镇安钨矿床特征及成因研究. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京)

骆金诚, 赖绍聪, 秦江锋, 李海波, 李学军, 臧文娟. 2010. 南秦岭晚三叠世胭脂坝岩体的地球化学特征及地质意义. 地质论评, 56(6): 792-800

秦江锋, 赖绍聪. 2011. 秦岭造山带晚三叠世花岗岩成因与深部动力学. 北京: 科学出版社, 1-255

隋吉祥. 2016. 西秦岭夏河—合作地区与还原性侵入岩有关的金成矿作用. 博士学位论文. 武汉: 中国地质大学(武汉)

王非, 朱日祥, 李齐, 贺怀宇, 罗清华, 卢欣祥, 桑海清, 王英兰. 2004. 秦岭造山带的差异隆升特征——花岗岩⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学研究的证据. 地学前缘, 11(4): 445-459

王飞. 2011. 西秦岭温泉钼矿床地质-地球化学特征与成矿动力学背景. 硕士学位论文. 西安: 西北大学

吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报, 23(6): 1217-1238

吴纪修, 王文, 黄增保, 王晓赛, 薛倩冰, 苏新. 2021. 西秦岭温泉钼矿区含钼花岗岩斑岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及岩浆物质来源讨论. 中国地质, 48(5): 1596-1608

夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 李向民, 马中平. 2007. 碧口群火山岩岩石成因研究. 地学前缘, 14(3): 84-101

夏磊, 闫全人, 向忠金, 江文, 宋博, 陈辉明. 2017. 松潘-甘孜地体中部晚三叠世安山质增生弧的确定及其意义. 岩石学报, 33(2): 579-604

闫全人, Hanson AD, 王宗起, Druschke PA, 闫臻, 王涛, 卢海峰. 2004. 南秦岭关家沟组砾岩的时代、成因环境及其构造意义. 科学通报, 49(14): 1416-1423

杨帆, Jepson G, Bagas L, 涂家润, 张存, 朱锐, 申俊峰. 2025. 西秦岭早子沟巨型金矿时间演化、剥露历史及保存潜力. 中国科学

(地球科学), 55(4): 1195-1217

曾俊杰, 蒲万峰, 刘斌, 袁臻, 杨壮. 2023. 西秦岭早三叠世陆缘弧环境岩浆作用：来自那扎岩体锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征的证据. 地质通报, 42(6): 1001-1012

张国伟, 董云鹏, 赖绍聪, 郭安林, 孟庆任, 刘少峰, 程顺有, 姚安平, 张宗清, 裴先治, 李三忠. 2003. 秦岭-大别造山带南缘勉略构造带与勉略缝合带. 中国科学(D 辑), 33(12): 1121-1135

张红, 陈丹玲, 翟明国, 张复新, 宫相宽, 孙卫东. 2015. 南秦岭桂林沟斑岩型钼矿 Re-Os 同位素年代学及其构造意义研究. 岩石学报, 31(7): 2023-2037

张宏飞, 肖龙, 张利, 袁洪林, 靳兰兰. 2007. 扬子陆块西北缘碧口块体印支期花岗岩类地球化学和 Pb-Sr-Nd 同位素组成：限制岩石成因及其动力学背景. 中国科学(D 辑), 37(4): 460-470

张望, 王根宝, 张凯, 王居里, 胡洋, 汪佩佩, 王飞, 刘文建, 陈元, 陈亚伟, 周兴龙, 纪崇科. 2020. 陕西镇安棋盘沟钼矿床印支期成矿：来自热液锆石 U-Pb 年龄证据. 中国地质, 47(2): 552-554

赵洪葆, 何甘地, 牛鹏飞, 吴保祥, 何进忠. 2025. 南秦岭大桥超大型金矿早成矿阶段黄铁矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义. 地质科学, 60(2): 594-606

朱赖民, 丁振举, 姚书振, 张国伟, 宋史刚, 屈文俊, 郭波, 李犇. 2009a. 西秦岭甘肃温泉钼矿床成矿地质事件及其成矿构造背景. 科学通报, 54(16): 2337-2347

朱赖民, 张国伟, 李犇, 郭波, 弓虎军, 康磊, 吕拾零. 2009b. 马鞍山金矿床中香沟岩体锆石 U-Pb 定年、地球化学及其与成矿关系研究. 中国科学(D 辑), 39(6): 700-720