



引文格式: 党子豪, 陈刚, 赵伟波, 等. 北祁连东北缘香黄沟剖面磨拉石沉积岩系碎屑锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 西北地质, 2026, 59(2): 219–235. DOI: 10.12401/j.nwg.2025100

Citation: DANG Zihao, CHEN Gang, ZHAO Weibo, et al. Detrital Zircon U-Pb Geochronology of Molasse Sedimentary Rock Series in Xianghuanggou Section, Northeastern Margin of North Qilian Mountains and Its Geological Significance[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(2): 219–235. DOI: 10.12401/j.nwg.2025100

北祁连东北缘香黄沟剖面磨拉石沉积岩系碎屑锆石 U-Pb 年代学及其地质意义

党子豪^{1,2}, 陈刚^{2,*}, 赵伟波¹, 周进松¹, 吴海燕¹, 杨振¹, 史彪¹, 刘道宏¹, 张建亭¹

(1. 陕西延长石油(集团)有限责任公司天然气研究院, 陕西 西安 710065;

2. 大陆演化与早期生命全国重点实验室, 西北大学, 陕西 西安 710069)

摘要: 华北克拉通西南缘相邻的秦-祁-贺交联区早古生代以来的洋陆格局、沉积构造演化及其相邻块体之间的亲缘关系是近年来学界重点关注的热点课题。笔者采取 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学方法, 选取北祁连构造带东北缘南华山地区香黄沟剖面出露的一套原先认为属于志留系—泥盆系但缺少化石记录的粗碎屑磨拉石沉积岩系, 进行了碎屑岩样品采集与碎屑锆石 U-Pb 定年分析, 探讨其地层时代、碎屑物质来源及其地质构造意义。测试结果表明, 该磨拉石建造所含最年轻锆石 U-Pb 谐和年龄为 (230.2 ± 2.6) Ma, 还有几个年轻锆石谐和年龄分别为 (232 ± 5) Ma、 (232 ± 3) Ma 和 (236.7 ± 2.4) Ma, 样品最年轻组分锆石 U-Pb 加权年龄为 (233.2 ± 5.1) Ma, 由此限定其宿主地层的最早沉积时代为晚三叠世; 结合周邻相近地层单元的碎屑锆石年龄谱对比分析认为, 研究区该套磨拉石沉积层系主体应属上三叠统沉积地层单元, 不支持过去将其归为志留系—泥盆系的传统认识。区域年龄谱对比分析认为, 南华山香黄沟剖面这套晚三叠世的粗碎屑磨拉石沉积岩系早中生代组分碎屑物质来源主要为北秦岭地区和阿拉善地区, 早古生代碎屑物质来源主要为祁连-北秦岭地区, 前寒武纪碎屑物质来源具有华北板块与祁连-北秦岭造山带的双向混合物源特征。该砾岩沉积主要受控于印支期秦-祁碰撞造山带的构造作用, 属于印支期秦-祁海槽最终碰撞闭合过程的沉积构造响应, 指示印支期秦-祁碰撞造山事件以后, 鄂尔多斯盆地西南部及其相邻秦-祁造山带地区全面进入了陆内或板内构造环境。

关键词: 北祁连构造带东北缘; 晚三叠世; 碎屑锆石 U-Pb 年代学; 物源分析

中图分类号: P597; P58

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)02-0219-17

Detrital Zircon U-Pb Geochronology of Molasse Sedimentary Rock Series in Xianghuanggou Section, Northeastern Margin of North Qilian Mountains and Its Geological Significance

收稿日期: 2024-03-10; 修回日期: 2024-11-24; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41630312), 新型油气勘探开发国家科技重大专项(2025ZD1400200), 西北大学大陆动力学国家重点实验室科技部专项经费(BJ14252), 中国地质调查局项目(1212011220761) 和国家基础科学人才培养基金(XDCX2019-28)联合资助。

作者简介: 党子豪(1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事构造地质学研究。E-mail: 996189601@qq.com。

* 通讯作者: 陈刚(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事含油气盆地地质学研究。E-mail: chengang@nwu.edu.cn。

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

DANG Zihao^{1,2}, CHEN Gang^{2,*}, ZHAO Weibo¹, ZHOU Jinsong¹, WU Haiyan¹, YANG Zhen¹,
SHI Biao¹, LIU Daohong¹, ZHANG Jianting¹

(1. Natural Gas Research Institute of Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Xi'an 710065, Shaanxi, China;

2. State Key Laboratory of Continental Evolution and Early Life, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

Abstract: The ocean-continent pattern, sedimentary tectonic evolution and the relationship between adjacent blocks in the Qin-Qi-He crosslinking area on the southwest margin of the North China Craton since the Early Paleozoic have been the focus of research in recent years. In this paper, LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronological analysis is used to analyze a set of coarse clastic molarite sedimentary rocks, which were previously thought to belong to Silurian and Devonian but lack of fossil records, from Xianghuanggou section in Nanhuaashan area, northeastern margin of the North Qilian tectonic belt. Clastic rock samples were collected and detrital zircon U-Pb dating analysis was performed. The results show that the U-Pb concordant age of the youngest zircon is 230.2 ± 2.6 Ma, and the concordant age of several younger zircons is 232 ± 5 Ma, 232 ± 3 Ma and 236.7 ± 2.4 Ma, respectively. U-Pb weighted age of the youngest zircon is 233.2 ± 5.1 Ma, and the earliest depositional age of the host strata is the Late Triassic. Combined with the age spectrum of detrital zircons from the adjacent stratigraphic units, it is concluded that the main body of the molarite sedimentary strata in the study area belongs to the Upper Triassic sedimentary stratigraphic units. It does not support the traditional understanding of the Silurian Devonian system in the past. According to the comparative analysis of regional age spectrum, the Late Triassic coarse clastic molarite sedimentary rocks in Xianghuanggou section of Nanhuaashan Mountain are mainly derived from the North Qinling and Alxa areas in the Early Mesozoic, and the Qilian-North Qinling areas in the Early Paleozoic. The source of Precambrian detrital material is a bidirectional mixture source between the North China plate and the Qilian-North Qinling orogenic belt. The conglomerate deposits were mainly controlled by the tectonism of the Qin-Qi collisional orogenic belt in the Indosinian period, and should belong to the sedimentary tectonic response of the final collisional closure process of the Qin-Qi trough in the Indosinian period.

Keywords: northeastern margin of the North Qilian tectonic belt; late Triassic; U-Pb chronology of detrital zircons; provenance analysis

华北克拉通西南部相邻的秦-祁-贺交联区的沉积、构造演化及其与相邻陆块的关系一直是中国地学界长期关注的研究争议热点。1988~1990年,宁夏区调队在进行海原县等4幅区调时,将分布于北祁连地层分区西华山地区的旱峡组下部地层根据所含微古植物和遗迹化石划归震旦系,并认为属冰水沉积,与河南的罗圈组、贺兰山的正目观组对比(阎志强等, 1992)。老君山组由黄汲清1945年命名的老君山砾岩演变而来,其含义是指一套不整合于下古生界之上,不整合或平行不整合于沙流水组之下的红色磨拉石堆积。北祁连地层分区靖远-西吉地层小区(南华山)的老君山组以宁夏海原县南华山水冲寺香黄沟剖面为代表, (雪山群)老君山组不整合于上志留统旱峡组之上,由暗紫-灰紫色中厚层钙质中粗砾岩、砂砾岩、含砾砂岩及砂岩组成,属山麓堆积相。北祁连构造带

东北缘南华山地区香黄沟剖面出露一套缺少化石记录的粗碎屑磨拉石沉积岩系,以往将其划归志留系—泥盆系,但依据碎屑锆石 U-Pb 年代学数据发现其沉积时代可能存在较大误判,并非以往认识的志留系—泥盆系。

近些年来,不同学者对北祁连-河西走廊地区奥陶系—泥盆系研究认为中祁连地块和华北板块初始碰撞的时间限定为 470~450 Ma,并认为北祁连构造带的碰撞早上过程具有斜向和不规则碰撞的特征(Yang et al., 2009; 杜远生等, 2009; Xu et al., 2010a, 2010b)。中宁县石峡沟剖面泥盆系的锆石 U-Pb 年代学研究显示其以来自阿拉善地块和北祁连构造带的物质为主(Yuan et al., 2014)。但北祁连构造带东北缘志留系(照花井组和旱峡组)的碎屑锆石 U-Pb 年代学的研究相对薄弱,而志留系是奥陶纪海相与泥盆纪陆

相环境转变的重要沉积记录,对北祁连构造带东北缘加里东晚期—早华力西期构造事件的研究起着至关重要的作用(师晓林,2016)。

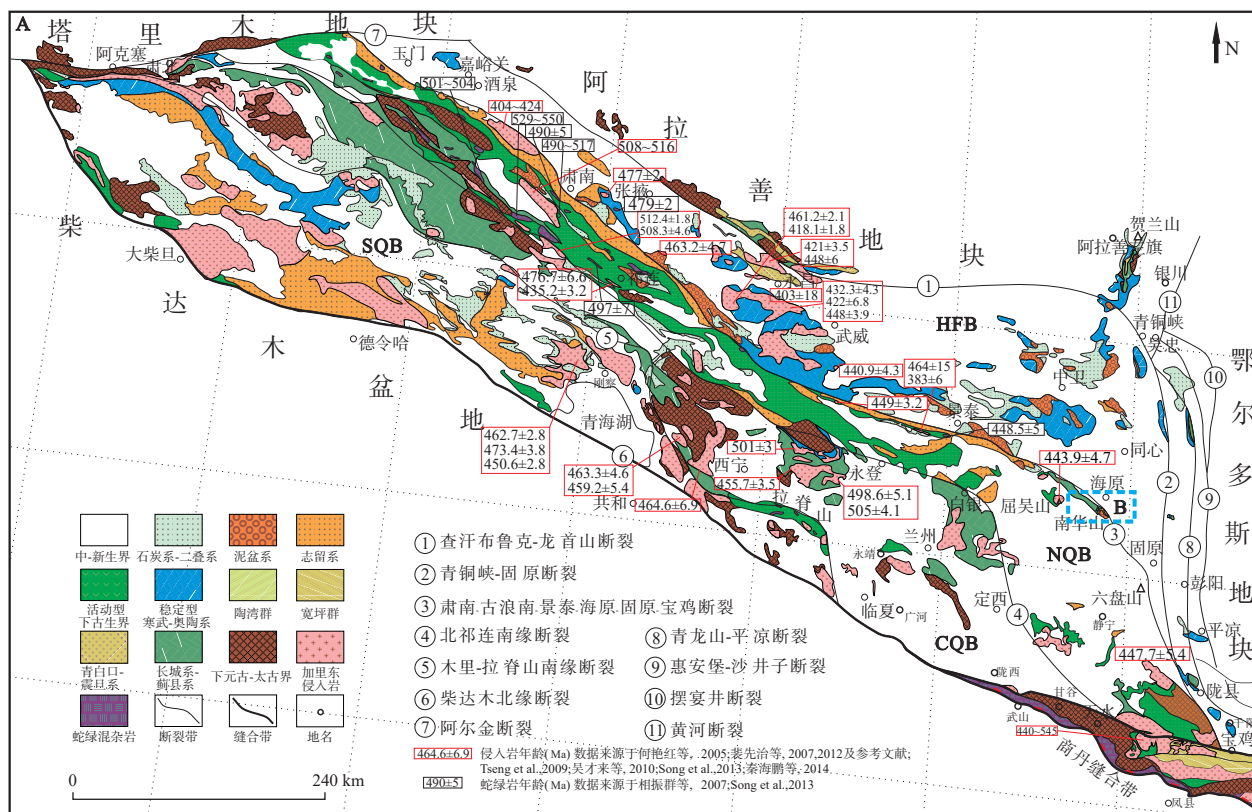
南华山香黄沟志留系—泥盆系碎屑锆石 U-Pb 年代学研究示踪北祁连构造带东北缘志留纪—泥盆纪的沉积物源—环境演化及其与北祁连碰撞造山过程的关系,不仅对深化认识北祁连东北缘志留纪—泥盆纪构造古地理环境和盆—山关系具有重要的科学理论意义,也有可能为华北克拉通西部早古生代洋陆格局和相邻陆块之间构造归属关系研究提供重要约束。

1 地质构造背景及采样位置

祁连造山带是中国中西部的重要板块缝合带,位于青藏高原东北缘,处在特提斯构造域的最北部,属于中国中央造山系西段,该造山带沿 NWW 向展布,延伸近 1 200 km。其北部以祁连山北缘断裂与河西走廊盆地交界,并通过阿拉善地块与古亚洲洋构造域接壤;南部以柴达木盆地北缘断裂(简称“柴北缘断

裂”)与柴达木盆地交界,西北部被阿尔金断裂所切,东部与秦岭造山带等相接(图 1)。祁连造山带是典型的增生型造山带,具有很厚的陆壳(可达 72 km 左右)和典型山根(由花岗质榴辉岩组成)特征(邓晋福等,1995);祁连造山带包括微陆块、俯冲增生杂岩、蛇绿岩块、岛弧火山岩及相应的盆地沉积等构造单元(肖序常等,1978; Song et al., 2013),主要由复杂变形的早古生界岛弧和岩浆弧等组成,由南向北可分为南祁连造山带、中祁连地块和北祁连造山带等 3 个近 NW 向展布的构造单元(杨柳等等, 2025)。该造山带主要经历了古大陆、大洋和新大陆等阶段的克拉通演化(刘懿馨等, 2019; 陈宣华等, 2019)。

北祁连地处祁连造山带的北缘,北与阿拉善地块相邻,南与中祁连相接,西北为塔里木地块。是华北古大陆西南边缘的重要缝合带,主要由古生代蛇绿岩、岛弧火山岩、花岗质侵入体、高压蓝片岩相/榴辉岩相变质基性岩和交质沉积岩、志留纪复理石理石建造、泥盆纪磨拉石,以及石炭纪—三叠纪的沉积盖层组成,区内主要有南北两条蛇绿岩带,即以北祁连大洋闭合



A.区域构造平面图; B.研究区位置; NQB.北祁连造山带; CQB.中祁连造山带; SQB.南祁连造山带; HFB.河西走廊前陆拗陷冲断带

图1 北祁连构造带及其相邻区域断裂构造与结构分区特征(据冯益民等, 1996; Song et al., 2013 修改)

Fig. 1 Fault structure and structural zoning characteristics of the North Qilian tectonic belt and its adjacent areas

产生的南蛇绿岩带(大道尔基-熬油沟-玉石沟-东草河)和以祁连古大洋向北俯冲形成的北蛇绿岩带(九个泉-大盆大阪-扁都口)(刘懿馨等, 2019)。蛇绿岩有两种不同的来源, 南边的蛇绿岩被认为来自成熟的洋盆, 玄武岩有类似于 MORB 的地球化学特征, 作为北祁连古大洋闭合的产物, 在整个北祁连蛇绿岩带中, 玉石沟蛇绿岩形成时代最早(521~550 Ma), 古祁连洋(原特提斯洋)在新元古代末期—早寒武世开启(史仁灯等, 2004; Song et al., 2013)。具有弧前环境地球化学特征的大盆大阪蛇绿岩, 锆石 U-Pb 年龄多为 502~519 Ma, 被看作是北祁连洋在早古生代早期(寒武纪)已开始发生俯冲增生作用的标志(孟繁聪等, 2010)。九个泉蛇绿岩形成于弧后盆地扩张脊环境, 弧后盆地在早奥陶世打开(Xia et al., 2012; 张建新等, 2015)。整个奥陶纪为洋壳的俯冲阶段, 并在中晚奥陶世开始发生弧后拉张, 逐渐形成了沟-弧-盆体系并存的构造

格局; 志留纪洋盆闭合, 发生陆-陆碰撞和造山作用。

前人已对研究区内走廊地层分区志留系进行了岩石组合及古生物特征的研究, 并建立了志留系划分对比方案及典型层型剖面, 研究区内北祁连地层分区发育上志留统早峡组(S_3h), 以海原县南华山香黄沟剖面为代表(图 2; 宁夏回族自治区地质矿产局, 1990, 1996; 霍福臣, 1993)。上志留统早峡组覆盖于早志留世花岗闪长岩之上, 而与上覆老君山组间为角度不整合接触。底部为一套灰色厚层-块状钙质细-中砾岩、粗-巨砾岩。向上为褐红-紫红色中-厚层钙质中-细粒长石石英砂岩夹少量灰白色粗-巨砾岩及灰绿、紫红色粉砂质泥岩、泥岩, 构成向上变粗的层序。砂岩层中发育平行层理和板状斜层理, 碎屑粒度自下而上逐渐变粗, 上部含少量细砾石, 顶部为透镜状, 具有向上变粗的特征, 应属近滨环境沉积(宁夏回族自治区地质矿产局, 1990, 1996)。

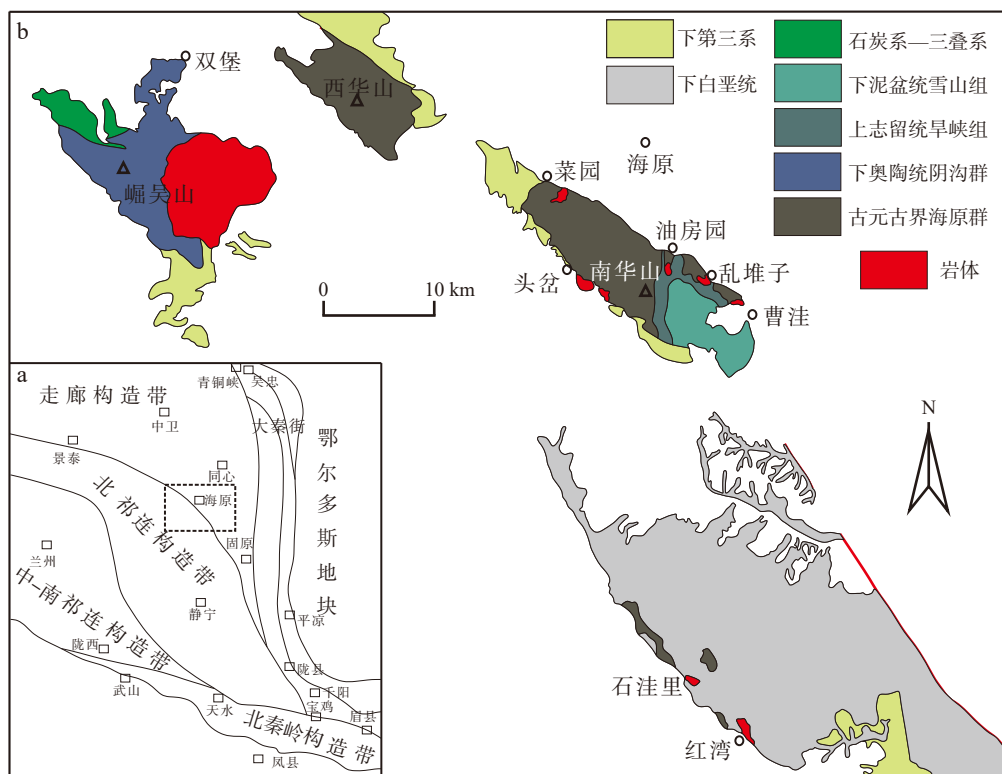


图2 研究区构造平面图(据师晓林等, 2016 修改)

Fig. 2 The structural plane map of the study area

在研究区采得 LJS-1、LJS-2 样品(图 3), 分属于实测剖面上部砂砾岩层段(XHG 二段紫红或紫褐色砂砾岩沉积层序即传统认识上的泥盆系中统老君山组或雪山组)等底部和上部; XHG-1、LJS-3 样品分属于下部砂砾岩层段(XHG 一段砖红色砂砾岩沉积层系即

传统认识上的志留系上统早峡组)的中、上部, 采样地理坐标为 N 36°26'43.8", E 105°41'23.6"。

样品 LJS-1 采自海原县南华山北麓水冲寺北的香黄沟上游假整合于上志留统早峡组之上的泥盆系老君山组底砾岩夹层砂岩样品, 采样位置为 N 36°26'24.4",

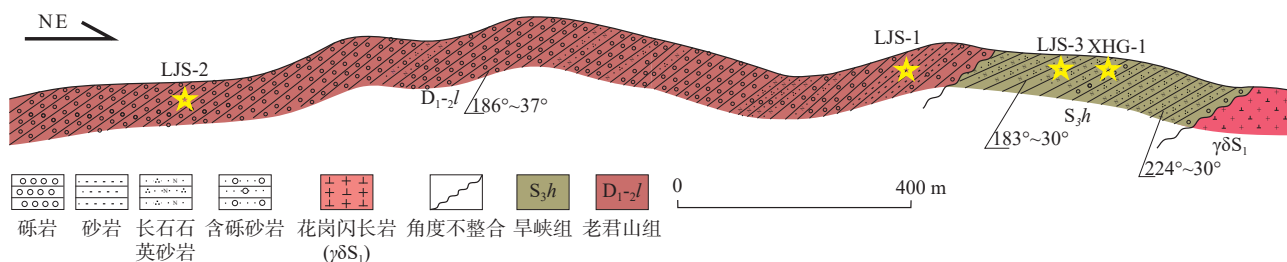


图3 海原县南华山香黄沟剖面志留系—泥盆系沉积建造与地层接触关系(据宁夏回族自治区地质矿产局, 1990 修改)

Fig. 3 Silurian-Devonian sedimentary construction and stratigraphic contact relationship in Xianghuanggou section of Nanhua Mountain, Haiyuan County

E 105°41'28.5"; 样品 LJS-2 采自香黄沟上游假整合于上志留统早峡组之上的泥盆系老君山组底砾岩向前(南)200 m 西侧沟中的老君山组灰褐色中粗粒砂岩, 位于底砾岩夹层砂岩样品 LJS-1 之南 200 m, 采样位置为 N36°26'09.2", E 105°41'29.3"; 样品 LJS-3 采自香黄沟下游不整合于蓟县系或花岗岩体上覆上志留统早峡组砖红色中粒砂岩, 采样位置为 N 36°26'43.8", E 105°41'23.6"; 样品 XHG-1 采自香黄沟口花岗岩上覆上志留统早峡组紫红色中砂岩, 采样位置为 N 36°26'43.8", E 105°41'23.6"(图 4)。



图4 样品照片

Fig. 4 Sample photos

2 测试方法与样品分析结果

2.1 样品测试方法

重矿物分析和锆石分选在河北省区域地质矿产研究所完成。在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成样品制靶、CL 图像分析和锆石 U-Pb 定年。采用激光剥蚀等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)对锆石进行了 U-Pb 谐和年龄测定。锆石样品制靶抛光后进行了

锆石显微特征研究和锆石颗粒、激光剥蚀位置的选定。进而测定 LJS-1、LJS-2、LJS-3 和 XHG-1 砂岩样品的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄。激光光斑直径为 20-30 μm。当频率为 5 Hz 时, 激光取样方式为单点腐蚀。以国际标准锆石 91500 为外标测定锆石 U-Pb 同位素年龄, 以 NIST610 为外标测定元素含量。采用 Glitter(ver4.0)程序进行数据处理, 以国际标准锆石 91500 为外标进行锆石年龄校正。Si 为内标, NIST610 为外标。锆石年龄谱由 Isoplot 程序(Ver3.0)获得(柳小明等, 2007; 李艳广等, 2023, 2025)。

2.2 样品碎屑矿物分析结果

对本次研究所采砂岩样品进行碎屑组分分析, 显示出 4 组砂岩样品中矿物碎屑以石英(68%~68.5%)和长石(6%~8%)为主, 岩屑主要为硅质岩(7%~8%)、石英岩(2%~4%), LJS-2 样品中含钙质泥岩(4%), 其余为石英片岩(1%), 细粒石英砂岩(1%)以及其他组分(包括千枚岩、花岗岩、石英片岩等岩屑以及极少量副矿物为锆石和榍石等)。石英碎屑分选中等且以次圆状为主, 分选中等, 个别石英波状消光。长石碎屑多为次圆状, 可见其发生绢云母化和碳酸盐化蚀变。中粒砂状结构, 接触式胶结, 钙泥质胶结(图 5), 定名为中粒岩屑石英砂岩。

2.3 碎屑锆石特征

阴极发光图像显示大多数锆石颗粒具有明显的岩浆振荡环带且环带较窄, 暗示着该类锆石多为低温条件下花岗岩中的锆石(杨伟等, 2025)。该类锆石年龄主要集中于新元古代和早古生代; 锆石颗粒的形态多呈长柱状, 少部分呈短柱状或者经搬运磨损后的颗粒残余, 长宽比为 1:1~2:1(图 6)。

对锆石成因的判别还需要结合锆石 Th、U 含量及 Th/U 值, 认为岩浆锆石在一般情况下具有较高的 Th、U 含量, Th/U 值>0.4; 而变质锆石中 Th 和 U 的含

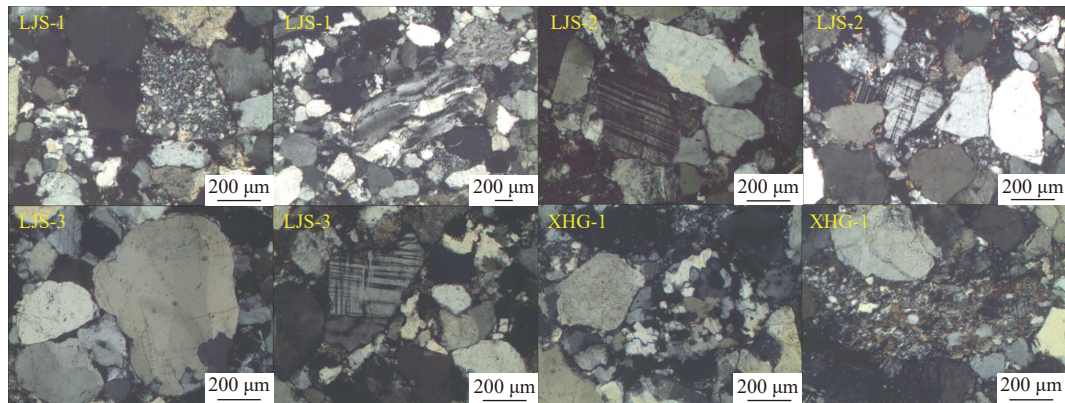


图5 岩石薄片照片

Fig. 5 Photos of rock slices

量通常相对较低, Th/U 值 < 0.1 (罗伟等, 2017; 苏惠等, 2023; 贾彬等, 2025; 向浩予等, 2025)。 Th/U 值为 $0.1 \sim 0.4$ 的锆石为经历变质事件的岩浆成因锆石, 仍视为岩浆成因锆石。此外, 有些岩浆锆石具有异常的 Th/U 值, 其比值 < 0.1 , 而在部分碳酸岩样品中发现的

岩浆锆石, 其 Th/U 值很高, 这可能与初始熔体具有异常的 Th/U 值有关 (李三忠等, 2017)。南华山香黄沟剖面样品锆石 Th/U 值为 $0.04 \sim 2.46$, 仅有 3 粒锆石颗粒 Th/U 值小于 0.1, Th/U 值分别为 $0.04(395 \pm 6 \text{ Ma})$ 、 $0.07(401 \pm 5 \text{ Ma})$ 和 $0.08(397 \pm 4 \text{ Ma})$ 。锆石 Th/U 值分

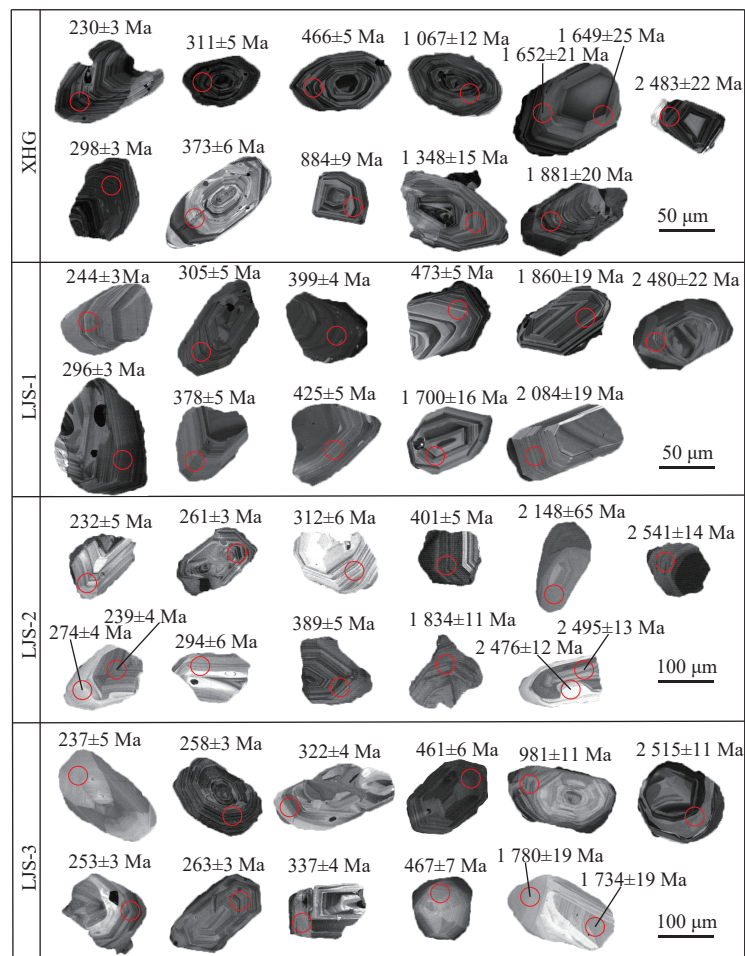


图6 碎屑锆石 CL 图像

Fig. 6 Detrital Zircon CL image

布图显示, 4 个样品中各个峰值年龄区间内锆石 Th/U 值均为 0.1~0.4 和大于 0.4, Th/U 值总体上显示出大于 0.1 的特征, 暗示该样品锆石颗粒多为岩浆成因的锆石, 这与 CL 图像所见碎屑锆石以岩浆成因锆石为主的结果相一致(图 7)。

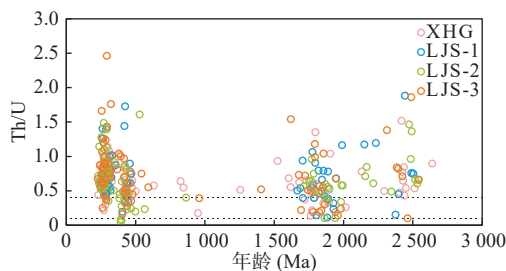


图7 南华山香黄沟剖面碎屑锆石 Th/U 值分布图

Fig. 7 Distribution map of Zircon Th/U value of detrital zircon in Xianghuangou section of Nanhua Mountain

2.4 碎屑锆石年龄分布

对南华山香黄沟剖面上部砂砾岩层段样品(LJS-1)中 84 个测点进行 U-Pb 谐和年龄测定, 在谐和度较好区间内(90%~110%)共计有 76 个测点。样品 LJS-1 所测锆石最小年龄为 244.1 Ma, 最大年龄为 2 506 Ma。76 个测点年龄主要为 240~330 Ma(n=35)、370~500 Ma(n=12)、1 600~2 000 Ma(n=21)和 2 100~2 600 Ma(n=8)4 个年龄段, 峰值年龄分别为 275 Ma、462 Ma、1 887 Ma 和 2 500 Ma。

对南华山香黄沟剖面上部砂砾岩层段样品(LJS-2)中 85 个测点进行 U-Pb 谐和年龄测定, 在谐和度较好区间内(90%~110%)共计有 83 个测点。样品 LJS-2 所测锆石最小年龄为 232 Ma, 最大年龄为 2 541 Ma。83 个测点年龄主要为 230~570 Ma(n=55)、867 Ma(n=1)、1 710~2 000 Ma(n=17)和 2 140~2 550 Ma(n=8)4 个年龄段, 峰值年龄分别为 271 Ma、867 Ma、1 894 Ma 和 2 486 Ma。

对南华山香黄沟剖面下部砂砾岩层段样品(LJS-3)中 85 个测点进行 U-Pb 谐和年龄测定, 在谐和度较好区间内(90%~110%)共计有 82 个测点, 样品 LJS-3 所测锆石最小年龄为 232 Ma, 最大年龄为 2 515 Ma。82 个测点年龄主要为 230~600 Ma(n=54)、981 Ma(n=1)、1 730~2 000 Ma(n=19)和 2 395~2 520 Ma(n=7)4 个年龄段, 峰值年龄分别为 271 Ma、981 Ma、1 831 Ma 和 2 508 Ma。

对南华山香黄沟剖面下部砂砾岩层段样品(XHG-1)中 84 个测点进行 U-Pb 谐和年龄测定, 在谐和度较

好区间内(90%~110%)共计有 79 个测点, 样品 XHG-1 所测锆石最小年龄为 230.2 Ma, 最大年龄为 2 643 Ma。79 个测点年龄主要为 230~500 Ma(n=42)、850~1 000 Ma(n=4)、1 520~2 020 Ma(n=19)和 2 130~2 650 Ma(n=12)4 个年龄段, 峰值年龄分别为 273 Ma、884 Ma、1 798 Ma 和 2 440 Ma。

南华山香黄沟两个剖面样品的碎屑锆石 U-Pb 年龄谱特征及谐和图(图 8)显示, 两者都存在 230~600 Ma、850~1 000 Ma、1 500~2 000 Ma、2 100~2 650 Ma 等 4 个基本相近的年龄区间, 且与之对应的峰值年龄主要集中在 273 Ma、1 800 Ma、1 900 Ma、2 500 Ma, 表明南华山香黄沟剖面上部砂砾岩层段和南华山香黄沟剖面下部砂砾岩层段的主要沉积物源具有很大的相似性。值得注意的是, LJS-1 年龄区间内缺失约 900 Ma 的样品, 暗示着南华山香黄沟剖面上部砂砾岩层段和南华山香黄沟剖面下部砂砾岩层段的沉积物源可能存在一定的差异性。

4 个样品显示出极为相似的峰值年龄分布, 测试结果表明, 样品最年轻锆石 U-Pb 谐和年龄为 (230.2 ± 2.6) Ma, 此粒锆石谐和度为 100, 充分满足碎屑锆石 U-Pb 年代学对谐和度的要求并落在谐和曲线上。该锆石具有明显的明暗相间的振荡环带, Th/U 值大于 0.4 (图 4)。另有几个年轻锆石谐和年龄分别为 (232 ± 5) Ma、 (232 ± 3) Ma 和 (236.7 ± 2.4) Ma, 最年轻组分锆石 U-Pb 加权年龄为 (233.2 ± 5.1) Ma, 限定其宿主地层的最早沉积时代为晚三叠世。进一步结合周邻相近地层单元的碎屑锆石年龄谱对比分析认为, 研究区该套磨拉石沉积层系主体应属上三叠统沉积地层单元。

3 样品分析结果讨论

3.1 地层时代

岩石学特征表明本次样品岩性与研究区不同于传统志留系底部砾岩层, 与邻区上三叠统下部灰白色厚层石英细砾岩、长石石英砂岩, 上部中细粒石英砂岩、长石石英砂岩以及甘肃崆峒山和策底坡地区发育的褐色、灰褐色细粒或砂质砾岩和含砾砂岩相似(刘帅等, 2019, 阮壮等, 2021)。

近年来, 南华山香黄沟剖面所处的北祁连造山带东北缘的潜在物源区的地层特征和碎屑锆石 U-Pb 年代学研究取得了很大的进展, 这种进步在界定研究区物源方面提供了理论支持。搜集研究区潜在物源区

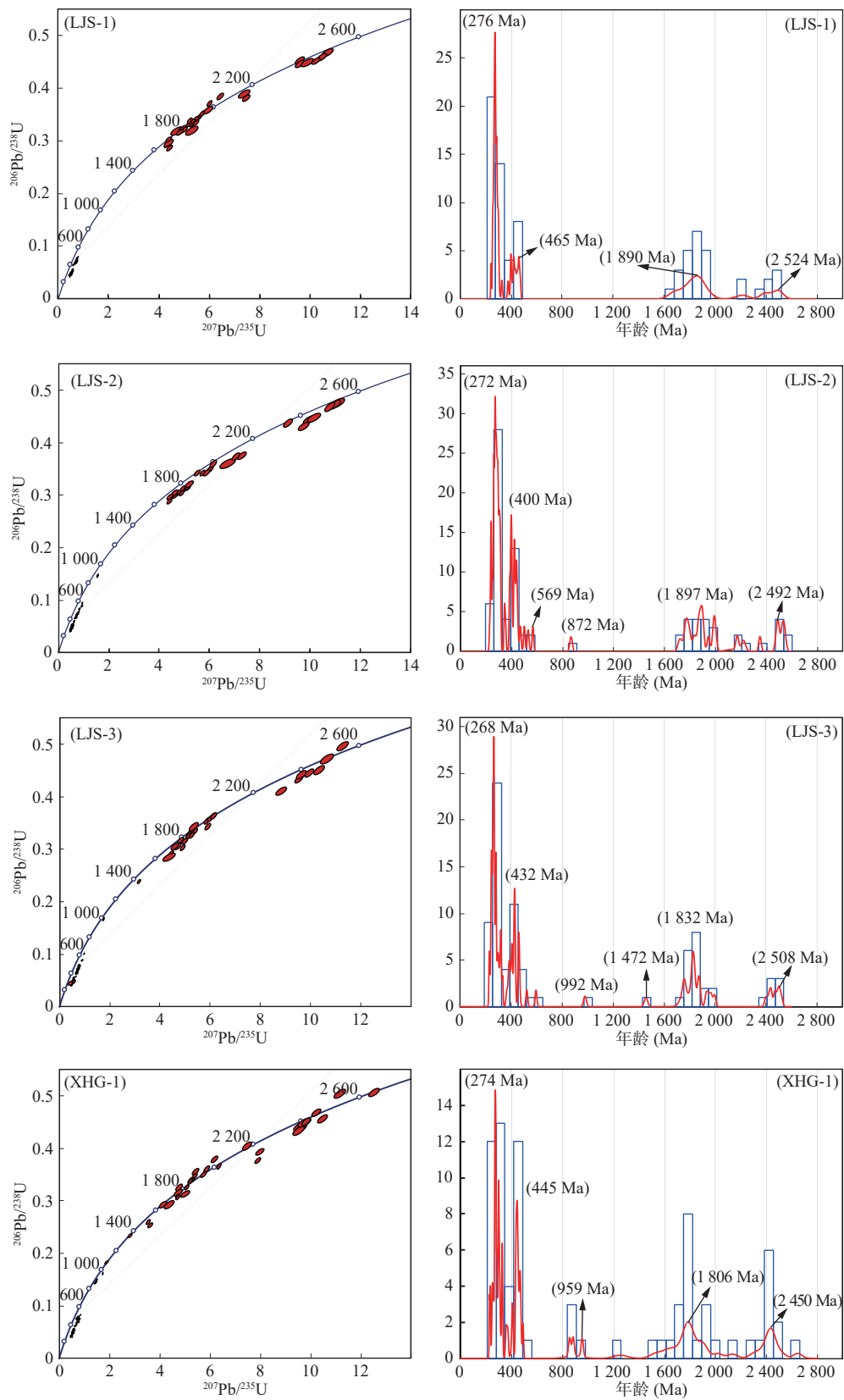


图8 南华山香黄沟剖面碎屑锆石 U-Pb 谐和图和年龄频谱图

Fig. 8 Centroclastic zircon U-Pb harmonic diagram and age spectrogram of Xianghuanggou section of Nanhua Mountain

的部分岩体锆石年龄、其他同位素测年数据及岩浆-测试样品的碎屑锆石 U-Pb 年龄数据共同做图, 进行地热事件报道(表 1), 用前人测试的岩体年龄与本次碎屑物源区域对比。

表 1 南华山香黄沟剖面周缘地质体数据表
Tab. 1 Data table of geological bodies around the profile of Xianghuanggou in Nanhua Mountain

地区	岩石类型	时代	成岩年龄 (Ma)	来源
阿拉善地块	北大山片麻状花岗岩	晚奥陶世—泥盆纪	410~390	宫江华等, 2018
	雅布赖山黑云母花岗岩	晚奥陶世—泥盆纪	390	宫江华等, 2018
	北大山花岗糜棱岩	石炭纪	327~324	宫江华等, 2018
	北大山辉长岩	二叠纪—早三叠世	293±2、267±2	宫江华等, 2018
	龙首山橄榄岩	二叠纪—早三叠世	284.4±3.5	焦建刚等, 2017
	北大山花岗闪长岩	二叠纪—早三叠世	295±2	陈炜等, 2013
秦岭造山带	石家湾钾长花岗斑岩	早白垩世	144.44±0.59	赵海杰等, 2010
	文峪和娘娘山黑云母二长花岗岩	早白垩世	138±2.5、142±2.5	王义天等, 2010
	老牛山黑云二长花岗岩	早白垩世	146.35±0.55	朱赖民等, 2008
	金堆城含矿斑岩	早白垩世	140.95±0.45	朱赖民等, 2008
	西秦岭冶力关埃达克岩	印支早期	245±6	金维浚等, 2005
	西秦岭夏河埃达克岩	印支早期	238±4	金维浚等, 2005
	华山二长花岗岩	早白垩世	133.8±1.1	郭波等, 2009
	合峪黑云母二长花岗岩	早白垩世	134.5±1.5	郭波等, 2009
祁连造山带	祁连县榴辉岩	晚奥陶世—泥盆纪	421	Song et al., 2009
	百经寺榴辉岩	晚奥陶世—泥盆纪	422±11	宋述光等, 2004
	上香子沟榴辉岩	晚奥陶世—泥盆纪	463±6	宋述光等, 2004
	上香子沟榴辉岩	晚奥陶世—泥盆纪	463±6	Song et al., 2006
	百经寺榴辉岩	晚奥陶世—泥盆纪	468±13	宋述光等, 2004
	上香子沟榴辉岩	晚奥陶世—泥盆纪	472	Song et al., 2009
	瓦窑沟石榴辉岩	晚奥陶世—泥盆纪	477±16	Zhang et al., 2007
	上香子沟是榴辉岩	晚奥陶世—泥盆纪	489±7	Zhang et al., 2007
	滩间山群英安岩	中寒武世—奥陶纪	486±13	赵风清等, 2003
	陇县七桥沟斜长角闪岩	LA-ICP-MS	452±8、417±1.5	何世平等, 2006
	陇县关山沟陇山岩群中辉绿岩墙	LA-ICP-MS	440.9±1.7	何世平等, 2006
	陇县铁佛寺陇山岩群中辉长岩墙	LA-ICP-MS	442.8±1.1	何世平等, 2006
	白银铜矿区变石英角斑岩	LA-ICP-MS	467.3±2.9、414.2±2.7	何世平等, 2006
	白银铜矿区糜棱岩化石英角斑岩	LA-ICP-MS	467.1±2.2	何世平等, 2006

南华山香黄沟剖面碎屑锆石 U-Pb 年龄谱(图 8)显示, 该剖面样品主要集中于 230~350 Ma 和 350~600 Ma 两个年龄区间内, 少量分布于 1 500~2 000 Ma 和 2 100~2 600 Ma 年龄区间, 极少量位于 860~980 Ma 年龄区间。分组进行南华山香黄沟剖面碎屑锆石 U-Pb 分析并作出相应物源推测。

3.2 沉积物源分析

3.2.1 前寒武纪年龄组分及其物源

南华山香黄沟剖面粗碎屑磨拉石沉积岩系样品的前寒武纪碎屑锆石 U-Pb 年龄主要为 600~2 600 Ma, 在样品测点中占据较小比例, 主要存在 893 Ma、1 838 Ma 和 2 502 Ma 等 3 个峰值年龄。该年龄段在

周缘板块的年龄谱中也有较多分布,南华山西南侧相邻祁连山地区的变质基底主要包括祁连西段的古元古代北大河岩群和祁连中段古元古代湟源岩群、祁连东段古元古代陇山岩群以及葫芦河群(毛景文等, 1997;董国安等, 2007;何世平等, 2008;徐学义等, 2008;胡健民等, 2012;刘明强等, 2013)。整理统计祁连山造山带的同位素定年数据发现(图 8),该构造单元普遍存在 700~2 900 Ma,且包含 939.2 Ma、1 416 Ma、1 782 Ma、2 044 Ma 和 2 420.8 Ma 等峰值年龄的前寒武纪年龄记录。整理统计研究区相邻的北秦岭地区的同位素定年数据发现,该构造单元普遍存在 700~2 800 Ma,且包含 946 Ma、1 816 Ma 和 2 500 Ma 等峰值年龄的前寒武纪年龄记录。华北地块-鄂尔多斯盆地区域普遍存在锆石 U-Pb 峰值年龄分别接近 2.5 Ga 和 1.85 Ga 的构造岩浆热变质事件(徐旺春, 2007),华北地块存在 1 700~2 000 Ma 和 2 400~2 600 Ma 这两个特征年龄峰值(李怀坤等, 2007);与之相比,鄂尔多斯地块南缘相邻的祁连-北秦岭前寒武纪则普遍存在 1.7 Ga 和 0.93 Ga 的构造岩浆事件(赵太平等, 2004;何世平等, 2007;翟明国等, 2007;陆松年等, 2009;裴先治等, 2012;杨昕, 2015)。

因此,南华山香黄沟剖面粗碎屑磨拉石沉积岩系的前寒武纪碎屑锆石 U-Pb 年龄与上述华北地块、秦-祁造山带前寒武纪基底岩系的峰值年龄分布具有较好的可比性,表明南华山香黄沟剖面粗碎屑磨拉石沉积岩系的沉积物源具有祁连-北秦岭地区和华北板块双向物源特征。

3.2.2 早古生代年龄组分及其物源

南华山香黄沟剖面粗碎屑磨拉石沉积岩系样品的早古生代碎屑锆石 U-Pb 年龄主要为 254~600 Ma,在样品测点中占据较大比例,主要存在 276 Ma、435 Ma 和 535 Ma 等 3 个峰值年龄,大致对应于加里东中晚期的构造岩浆热事件。祁连地块东段出露加里东期与俯冲-碰撞相关的基性侵入体(470~434 Ma)。该地区锆石 U-Pb 年代学数据的统计分析结果进一步表明,该地区存在 414 Ma、416 Ma、468 Ma 和 552 Ma 的峰值年龄(图 8),这与南华山香黄沟剖面粗碎屑磨拉石沉积岩系样品所包含的早古生代碎屑锆石 U-Pb 年龄分布基本接近。南华山南侧的北秦岭地区,早古生代至少存在 3 期花岗岩浆活动,分别对应于~500 Ma 陆壳深俯冲、~450 Ma 碰撞地壳增厚和嗣后的~420 Ma 地壳抬升构造岩浆活动事件(高景民等,

2012)。整理统计研究区相邻的北秦岭地区的同位素定年数据发现(图 9),该构造单元早古生代的构造岩浆活动主要分布在 403~430 Ma、430~490 Ma、490~540 Ma 等 3 个年龄段,与之对应的峰值年龄主要为 446 Ma。因此,北秦岭早古生代岩体的年龄分布与研究区南华山香黄沟剖面粗碎屑磨拉石沉积岩系样品所包含的早古生代碎屑锆石 U-Pb 峰值年龄相似可比。

上述证据表明,南华山香黄沟剖面粗碎屑磨拉石沉积岩系样品的早古生代碎屑锆石 U-Pb 年龄分布与祁连山东段和北秦岭加里东期构造岩浆事件总体具有较好的相关可比性,证实北秦岭和祁连山东段的加里东中晚期岩体对南华山香黄沟剖面粗碎屑磨拉石沉积岩系的沉积物源均有较大的贡献。

3.2.3 早中生代年龄组分及其物源

南华山香黄沟剖面粗碎屑磨拉石沉积岩系样品的早中生代碎屑锆石 U-Pb 年龄主要为 230~252 Ma。印支期岩浆热事件在秦岭造山带内广泛发育,以陆-陆碰撞为主,如北秦岭西段有宝鸡、翠华山等三叠纪岩体,分别侵入于奥陶系、中石炭统、秦岭岩群和宽坪群中(刘丙祥等, 2013),西秦岭造山带内印支期花岗岩体分为早期(245~230 Ma)和晚期(230~205 Ma),早期岩体主要分布在中西部,主体侵入到泥盆纪沉积岩(Dong et al., 2014),这些岩浆活动在北秦岭构造带中产生了大量的花岗质岩石,也暗示着北秦岭地区可能为研究区提供较多物源。此外,石沟驿剖面的样品未显示此期锆石分布;而南面的千阳剖面样品中也有 1 粒此期锆石(242 ± 2 Ma)(Wang et al., 2013)。指示鄂尔多斯盆地西南部上三叠统地层中发育较少此期锆石。印支期关山花岗岩(227 ± 19 Ma 或 229 ± 7 Ma)(王晓霞等, 2015)与本次测试样品年龄基本相符,推测样品中锆石应来源于印支期关山岩体。

选取南华山香黄沟剖面周邻地区的碎屑锆石 U-Pb 年龄频谱图与本次测试样品年龄频谱图进行综合对比(图 9)。可以看出,南华山香黄沟剖面粗碎屑磨拉石沉积岩系样品的中生代的碎屑锆石 U-Pb 年龄与阿拉善地区的年龄图谱中生代的年龄信息相吻合(图 10)。阿拉善地区广泛存在二叠纪—早三叠世(236~300 Ma)花岗岩、基性岩和火山岩(何世平等, 2007)。这些证据表明,阿拉善地区也为南华山香黄沟剖面粗碎屑磨拉石沉积岩系提供碎屑锆石物源。

因此,南华山香黄沟剖面粗碎屑磨拉石沉积岩系

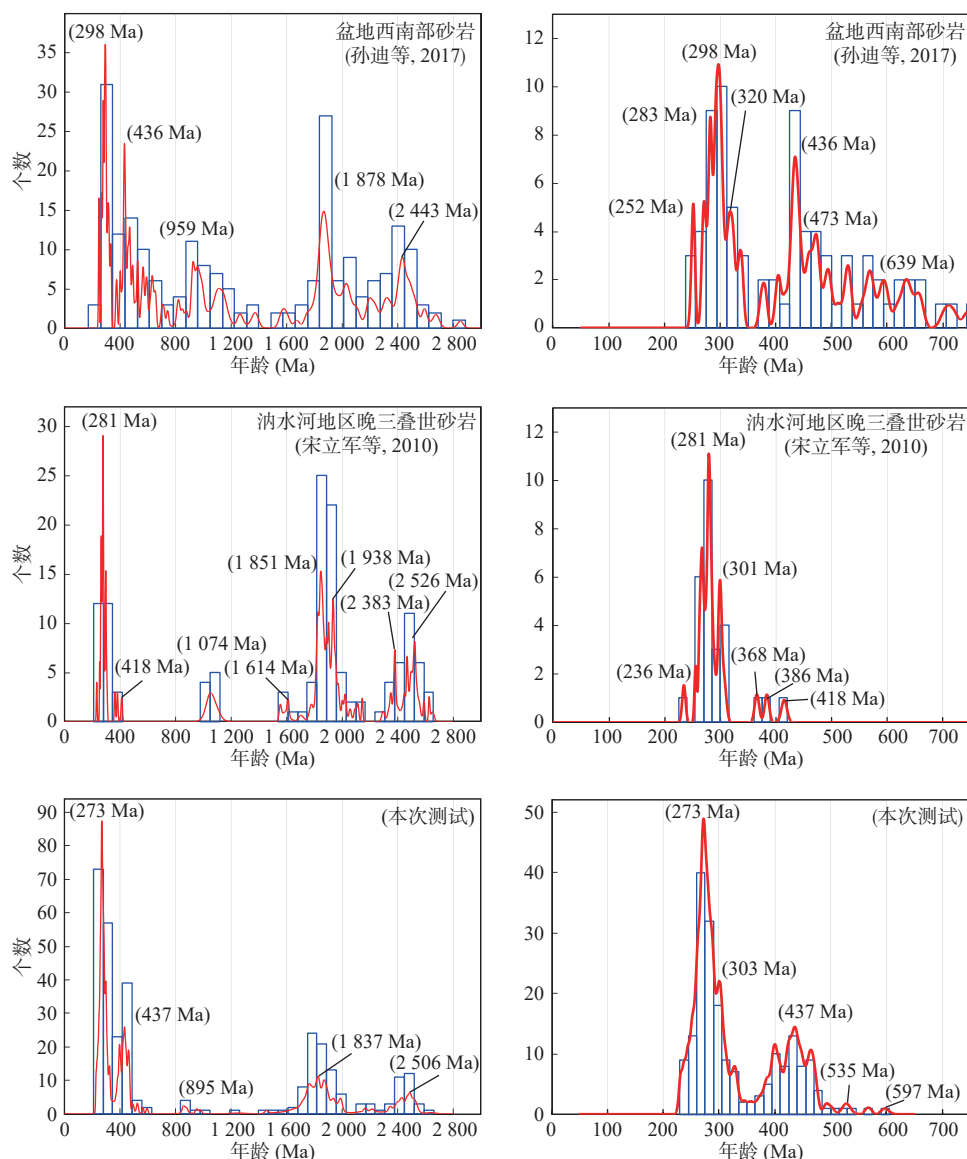


图9 研究区与周邻地区锆石年龄谱对比图

Fig. 9 Comparison of zircon age spectrum between the study area and the surrounding areas

样品的早中生代的碎屑物质来源主要有北秦岭地区和阿拉善地区。

3.3 沉积构造环境讨论

秦岭-祁连地区最为强烈的主碰撞造山作用主要发生在印支期(张国伟等, 2001; Dong et al., 2011)。秦-祁碰撞造山带 SW-NE 向挤压, 导致造山带北麓的鄂尔多斯盆地西南缘南华山地区发生显著沉降和山前拗陷型粗碎屑砾岩堆积, 使得南华山近邻的秦岭-祁连造山带陇山群、秦岭群、宽坪群、大草滩群和葫芦河群等岩石地层单元和前石炭纪岩体抬升剥露, 并为香黄沟剖面晚三叠世砾岩沉积提供了重要物源。结合上述碎屑锆石 U-Pb 年龄与北祁连东段和北秦岭西段峰值年龄相关可比的地质事实综合分析认为, 研究

区砾岩沉积主要受控于印支期秦-祁碰撞造山带的构造作用。

印支期秦-祁碰撞造山事件之后, 鄂尔多斯盆地西南部及其相邻秦-祁造山带地区全面进入了陆内或板内构造环境, 尤其是在晚侏罗世—早白垩世的燕山中期, 秦-祁造山带及其北侧相邻的华北(鄂尔多斯)地块南缘构造带经历了不亚于印支期碰撞造山作用的强烈陆内变形和以走滑-逆冲推覆为主要表现形式的陆内造山作用(张国伟等, 2001), 导致鄂尔多斯盆地西南缘反 S 型构造体系的形成和显著的陆内走滑-逆冲断裂活动(陈刚等, 2007; 师晓林等, 2015), 造成祁连山东段和北秦岭西段地区前中生代岩石地层单元的广泛隆升剥露, 并为早白垩世砾岩沉积提供了复

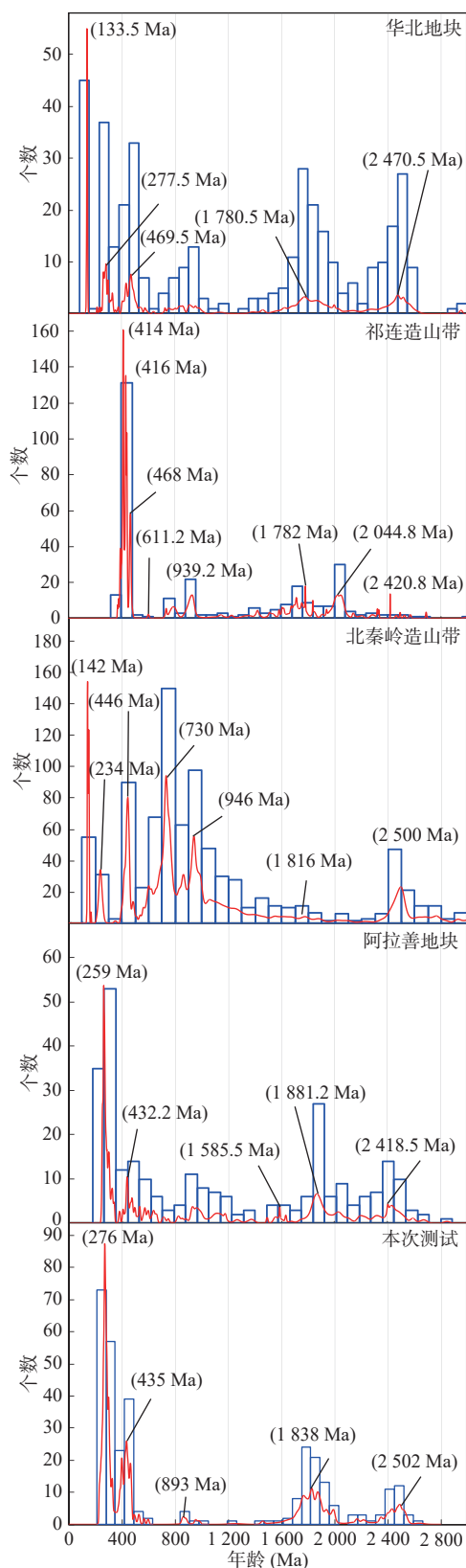


图10 南华山香黄沟剖面碎屑锆石 U-Pb 年龄谱区域对比特征

Fig. 10 Comparative characteristics of detrital zircon U-Pb age spectrum in Xianghuanggou section of Nanhua Mountain

杂多样的沉积物源(图 11)。

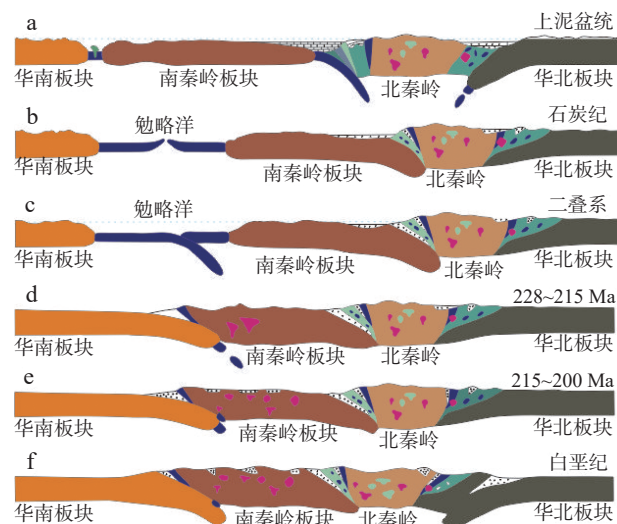


图11 秦岭造山带构造演化历史示意图

Fig. 11 Schematic cartoon showing the tectonic evolutionary history of the Qinling orogen.

4 结论

(1)磨拉石沉积岩系最年轻锆石 U-Pb 谐和年龄为 (230.2 ± 2.6) Ma。其宿主地层的最早沉积时代为晚三叠世,研究区该套磨拉石沉积层系主体应属上三叠统沉积地层单元,不支持过去将其归为志留系—泥盆系的传统认识。上述关于南华山香黄沟剖面粗碎屑磨拉石沉积岩系的沉积时代的制约受到周邻地区年龄频谱图支持。

(2)南华山香黄沟剖面粗碎屑磨拉石沉积岩系早中生代组分碎屑物质来源主要为北秦岭地区和阿拉善地区,早古生代碎屑物质来源主要为祁连—北秦岭地区,前寒武纪碎屑物质来源具有华北板块与祁连—北秦岭造山带的双向混合物源特征。

(3)印支期秦—祁碰撞造山带 SEW-NE 向挤压,导致造山带北麓的鄂尔多斯盆地西南缘南华山地区发生显著沉降和山前拗陷型粗碎屑砾岩堆积,使得北秦岭和祁连山东段的加里东中晚期岩体对南华山香黄沟剖面粗碎屑磨拉石沉积岩系的沉积物源均有较大的贡献。综合分析认为,该砾岩沉积主要受控于印支期秦—祁碰撞造山带的构造作用,属于印支期秦—祁海槽最终碰撞闭合过程的沉积构造响应。印支期秦—祁碰撞造山事件以后,鄂尔多斯盆地西南部及其相邻秦—祁造山带地区全面进入了陆内或板内构造环境。

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):

- 陈刚, 孙建博, 周立发, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘中生代构造事件的裂变径迹年龄记录[J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 2007, 37(S1): 110–118.
- CHEN Gang, SUN Jianbo, ZHOU Lifa, et al. Fission track age record of Mesozoic tectonic events in the southwestern margin of Ordos Basin[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2007, 37(S1): 110–118.
- 陈炜, 周文平, 陈开旭, 等. 内蒙古阿拉善右旗金长山早二叠世花岗闪长岩锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征[J]. 矿物岩石, 2013, 33(4): 53–60.
- CHEN Wei, ZHOU Wenping, CHEN Kaixu, et al. Early Permian granodiorite zircon U-Pb chronology and geochemical characteristics of Jinchangshan, Alxa Right Banner, Inner Mongolia[J]. Mineralogy and Petrology, 2013, 33(4): 53–60.
- 陈宣华, 邵兆刚, 熊小松, 等. 祁连造山带断裂构造体系、深部结构与构造演化[J]. 中国地质, 2019, 46(5): 995–1020.
- CHEN Xuanhua, SHAO Zhaogang, XIONG Xiaosong, et al. Fault tectonic system, deep structure and tectonic evolution of Qilian orogenic belt[J]. Geology in China, 2019, 46(5): 995–1020.
- 邓晋福, 吴宗絮, 杨建军, 等. 格尔木-额济纳旗地学断面走廊域地壳-上地幔岩石学结构与深部过程[J]. 地球物理学报, 1995, 38(S2): 130–144.
- DENG Jinfu, WU Zongxu, YANG Jianjun, et al. Crustal-upper mantle petrological structure and deep process in the Golmud-Ejina Banner geoscience section corridor area[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1995, 38(S2): 130–144.
- 董国安, 杨怀仁, 杨宏仪, 等. 祁连地块前寒武纪基底锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 科学通报, 2007, 52(13): 1572–1585.
- DONG Guoan, YANG Huairan, YANG Hongyi, et al. Precambrian basal zircon SHRIMP U-Pb chronology and its geological significance in Qilian massif[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(13): 1572–1585.
- 杜远生, 朱杰, 徐亚军, 等. 北祁连造山带加里东-早海西期沉积地质学研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2009.
- 冯益民, 何世平. 祁连山大地构造与造山作用[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- 高景民, 裴先治, 李佐臣, 等. 西秦岭天水地区流水沟岩浆杂岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年和岩石地球化学特征[J]. 地质通报, 2012, 31(9): 1482–1495.
- GAO Jingmin, PEI Xianzhi, LI Zuochen, et al. LA-ICP-MS ZIRCON U-Pb dating and rock geochemical characteristics of Liushuigou magmatic complex in Tianshui area of the West Qinling Mountains[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(9): 1482–1495.
- 宫江华, 张建新, 王宗起, 等. 阿拉善地块晚奥陶世—石炭纪的构造演化历史——来自北大山地区多期岩浆-变质-变形事件的约束[J]. 岩石矿物学杂志, 2018, 37(5): 771–798.
- GONG Jianghua, ZHANG Jianxin, WANG Zongqi, et al. Late Ordovician-Carboniferous tectonic evolution history of the Alxa massif: Constraints of multi-period magmatic-metamorphism-deformation events from the Beidashan area[J]. Journal of Petromineralogy, 2018, 37(5): 771–798.
- 郭波, 朱赖民, 李桦, 等. 华北陆块南缘华山和合峪花岗岩岩体锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成与成岩动力学背景[J]. 岩石学报, 2009, 25(2): 265–281.
- GUO Bo, ZHU Laimin, LI Ben, et al. Zircon U-Pb age, Hf isotopic composition and diagenetic dynamics background of Huashan Heheyu granite rock mass in the southern margin of the North China Massif[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(2): 265–281.
- 何世平, 王洪亮, 陈隽璐, 等. 甘肃白银矿田变酸性火山岩锆石 LA-ICP-MS 测年——白银式块状硫化物矿床形成时代新证据[J]. 矿床地质, 2006(4): 401–411.
- HE Shiping, WANG Hongliang, CHEN Junlu, et al. LA-ICP-MS dating of zircon of variable acid volcanic rock in Gansu silver field: new evidence of the formation age of silver-type massive sulfide deposits[J]. Mineral Deposits, 2006(4): 401–411.
- 何世平, 王洪亮, 徐学义, 等. 北祁连东段红土堡基性火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 地球科学进展, 2007, 22(2): 143–151.
- HE Shiping, WANG Hongliang, XU Xueyi, et al. LA-ICP-MS U-Pb zircon of lateritic volcanic rocks in the eastern part of North Qilian and its geological significance[J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(2): 143–151.
- 何世平, 王洪亮, 陈隽璐, 等. 中祁连马衔山岩群内基性岩墙群锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及其构造意义[J]. 地球科学

- (中国地质大学学报), 2008, 33(1): 35–45.
- HE Shiping, WANG Hongliang, CHEN Junlu, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb chronology and its tectonic significance in the mafic rock wall group in the Middle Qilian Mabitshan Rock Group [J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2008, 33(1): 35–45.
- 胡健民, 刘新社, 李振宏, 等. 鄂尔多斯盆地基底变质岩与花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年 [J]. *科学通报*, 2012, 57(26): 2482–2491.
- HU Jianmin, LIU Xinshe, LI Zhenhong, et al. SHRIMP U-PB of basal metamorphic rocks and granite zircon in Ordos Basin [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(26): 2482–2491.
- 霍福臣. 宁夏地质概要 [J]. *甘肃地质学报*, 1993, (S1): 101–133.
- HUO Fuchen. *Journal of Geological Science of Gansu*, 1993, (S1): 101–133.
- 贾彬, 吴欢欢, 魏立勇, 等. 南秦岭紫阳—镇坪地区基性岩墙和碱性火山岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其地质意义 [J]. *西北地质*, 2025, 58(4): 291–307.
- JIA Bin, WU Huanhuan, WEI Liyong, et al. Zircon U-Pb Chronology Geochemical Characteristics and Geological Significance of Alkaline Maficionado Dikes and Intermediate Volcanic Rocks in the Ziyang-Zhenping Area of South Qinling [J]. *Northwestern Geology*, 2025, 58(4): 291–307.
- 焦建刚, 靳树芳, 芮会超, 等. 甘肃龙首山东段小口子镁铁-超镁铁质岩体岩石学、地球化学及年代学研究 [J]. *地质学报*, 2017, 91(4): 736–747.
- JIAO Jiangang, JIN Shufang, RUI Huichao, et al. Petrological, geochemical and chronological study of Xiaokouzi mafic-ultramafic rock mass in the eastern member of Longshou Mountain, Gansu Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(4): 736–747.
- 金维浚, 张旗, 何登发, 等. 西秦岭埃达克岩的 SHRIMP 定年及其构造意义 [J]. *岩石学报*, 2005, 21(3): 959–966.
- JIN Weijun, ZHANG Qi, HE Dengfa, et al. SHRIMP dating and its tectonic significance of the Edake rocks in the West Qinling Mountains [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(3): 959–966.
- 李怀坤, 陆松年, 相振群, 等. 北祁连山西段北大河岩群碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究 [J]. *地质论评*, 2007, 53(1): 132–140.
- LI Huaikun, LU Songnian, XIANG Zhenqun, et al. Chronological study of detrital zircon SHRIMP U-Pb of Beidahe rock group in the western section of the North Qilian Mountains [J]. *Geological Review*, 2007, 53(1): 132–140.
- 李三忠, 李涛, 赵淑娟, 等. 东亚原特提斯洋 (IV): 北界西段早古生代构造变形 [J]. *岩石学报*, 2017, 33(6): 1615–1632.
- LI Sanzhong, LI Tao, ZHAO Shujuan, et al. East Asian Proto-Tethys Ocean (IV.): Early Paleozoic tectonic deformation in the western part of the northern boundary [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(6): 1615–1632.
- 刘丙祥, 聂虎, 齐玥, 等. 豫西南地区北秦岭地体新元古代花岗岩类岩石成因及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 2013, 29(7): 2437–2455.
- LIU Bingxiang, NIE Hu, QI Yue, et al. Neoproterozoic granite rocks in the North Qinling Mountains in southwest Henan and its geological significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(7): 2437–2455.
- 李艳广, 靳梦琪, 汪双双, 等. LA-ICP-MS U-Pb 定年技术相关问题探讨 [J]. *西北地质*, 2023, 56(4): 274–282.
- LI Yanguang, JIN Mengqi, WANG Shuangshuang, et al. Exploration of Issues Related to the LA-ICP-MS U-Pb Dating Technique [J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(4): 274–282.
- 刘懿馨. 北祁连西段古-中元古代构造-岩浆作用及其地质意义 [D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- LIU Yixin. Paleo-Mesoproterozoic tectonic-magmatic process and its geological significance in the western part of North Qilian [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.
- 李艳广, 霍金晶, 孙国超. 岩石薄片原位磷灰石 U-Pb 定年技术探讨: 超基性岩年代学分析的新视角 [J]. *西北地质*, 2025, 58(4): 197–206.
- LI Yanguang, HUO Jinjing, SUN Guochao. Rock Thin Section Scale In-Situ Apatite U-Pb Dating Technique Discussion: A New Perspective on Ultramafic Rock Geochronology Analysis [J]. *Northwestern Geology*, 2025, 58(4): 197–206.
- 刘明强. 甘肃北祁连武威地区莲花山花岗岩体的单颗粒锆石 U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. *兰州大学学报 (自然科学版)*, 2013, 49(4): 448–452.
- LIU Mingqiang. Single-grain zircon U-Pb age and geological significance of Lianhuashan granite body in Wuwei area of North Qilian, Gansu Province [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Science Edition)*, 2013, 49(4): 448–452.
- 刘帅, 阮壮, 杨志辉, 等. 鄂尔多斯盆地南缘中晚三叠世物源演变及其地质意义 [J]. *古地理论*, 2019, 21(6): 939–958.
- LIU Shuai, RUAN Zhuang, YANG Zhihui, et al. Evolution of Middle and Late Triassic provenance and geological significance in the southern margin of Ordos Basin [J]. *Acta Palaeogeography*, 2019, 21(6): 939–958.

- 柳小明, 高山, 第五春容, 等. 单颗粒锆石的 20 μm 小斑束原位微区 LA-ICP-MSU-Pb 年龄和微量元素的同时测定[J]. 科学通报, 2007, 52(2): 228–235.
- LIU Xiaoming, GAO Shan, WU Chunrong, et al. Simultaneous determination of LA-ICP-MSU-Pb age and trace elements in 20 μm small spot beam in-situ microarea of single particle zircon[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(2): 228–235.
- 罗伟. 鄂尔多斯盆地西缘马家滩—惠安堡地区中侏罗统直罗组沉积演化及物源分析[D]. 西安: 西北大学, 2017.
- LUO Wei. Sedimentary evolution and provenance analysis of the Middle Jurassic Zhiluo Formation in the Majiatan-Hui'anbao area of the western margin of the Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2017.
- 陆松年, 李怀坤, 王惠初, 等. 秦-祁-昆造山带元古宙副变质岩层碎屑锆石年龄谱研究[J]. 岩石学报, 2009, 25(9): 2195–2208.
- LU Songnian, LI Huaikun, WANG Huichu, et al. Study on the age spectrum of Zircon in the Proterozoic parametamorphic strata of the Qin-Qi-Kun orogenic belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(9): 2195–2208.
- 毛景文, 杨建民, 张招崇, 等. 北祁连山西段前寒武纪地层单颗粒锆石测年及其地质意义[J]. 科学通报, 1997, 42(13): 1414–1417.
- MAO Jingwen, YANG Jianmin, ZHANG Zhaochong, et al. Single-grain zircon dating and geological significance of Precambrian strata in the western part of North Qilian Mountain[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(13): 1414–1417.
- 孟繁聪, 张建新, 郭春满, 等. 大岔大坂 MOR 型和 SSZ 型蛇绿岩对北祁连洋演化的制约[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(5): 453–466.
- MENG Fancong, ZHANG Jianxin, GUO Chunman, et al. Constraints of Dacha Osaka MOR and SSZ ophiolite on the evolution of the North Qilian Ocean[J]. Journal of Petromineralogy, 2010, 29(5): 453–466.
- 宁夏回族自治区地质矿产局. 宁夏回族自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1990.
- 宁夏回族自治区地质矿产局. 宁夏回族自治区岩石地层志[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996.
- 裴先治, 李佐臣, 李瑞保, 等. 祁连造山带东段早古生代葫芦河群变质碎屑岩中碎屑锆石 LA-ICP-MSU-Pb 年龄: 源区特征和沉积时代的限定[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 205–224.
- PEI Xianzhi, LI Zuochen, LI Ruibao, et al. Detrital zircon LA-ICP-MSU-Pb age in the metamorphic clastic rocks of the Huluhe Group in the early Paleozoic of the eastern member of the Qilian orogenic belt: characteristics of the source area and the limitation of sedimentary age[J]. Earth Science Frontier, 2012, 19(5): 205–224.
- 阮壮, 罗忠, 于炳松等. 鄂尔多斯盆地中—晚三叠世盆地原型及构造古地理响应[J]. 地学前缘, 2021, 28(1): 12–32.
- RUAN Zhuang, LUO Zhong, YU Bingsong, et al. Prototype and tectonic paleogeographic response of Middle-Late Triassic Basin in Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(1): 12–32.
- 史仁灯, 杨经绥, 吴才来, 等. 北祁连玉石沟蛇绿岩形成于晚震旦世的 SHRIMP 年龄证据[J]. 地质学报, 2004, 78(5): 649–657.
- SHI Rendeng, YANG Jingsui, WU Cailai, et al. Evidence of SHRIMP age of Yushigou ophiolite formed in the Late Sinian[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(5): 649–657.
- 师晓林. 北祁连构造带东北缘志留系和泥盆系砂岩地球化学与锆石 U-Pb 年代学分析[D]. 西安: 西北大学, 2016.
- SHI Xiaolin. Geochemical and zircon U-Pb chronology of Silurian and Devonian sandstones in the northeast margin of the North Qilian tectonic belt[D]. Xi'an: Northwest University, 2016.
- 师晓林, 陈刚, 杨甫, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘崆峒山砾岩碎屑锆石 U-Pb 年代学特征及物源意义[J]. 高校地质学报, 2015, 21(4): 719–726.
- SHI Xiaolin, CHEN Gang, YANG Fu, et al. Chronological characteristics and provenance significance of zircon U-Pb in conglomerate clastic conglomerate of Kongtong Mountain in the southwestern margin of Ordos Basin[J]. Journal of Geology of Chinese Universities, 2015, 21(4): 719–726.
- 宋述光, 张立飞, Y Niu, 等. 青藏高原北缘早古生代板块构造演化和大陆深俯冲[J]. 地质通报, 2004, 23(9–10): 918–925.
- SONG Shuguang, ZHANG Lifei, Y Niu, et al. Early Paleozoic plate tectonic evolution and continental deep subduction in the northern margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(9–10): 918–925.
- 苏惠, 曾认宇, 甘德斌, 等. 阿拉善北大山地区花岗岩斑岩岩石成因及构造启示: 元素地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素约束[J]. 现代地质, 2023, 37(6): 1580–1596.
- SU Hui, ZENG Renyu, GAN Debin, et al. Petrogenesis and Tectonic Implications of Granite Porphyry in the Beidashan Area, Alxa Block: Constraints from Geochemistry, Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopes[J]. Geoscience, 2023, 37(6): 1580–1596.

- 1580–1596.
- 王晓霞, 王涛, 张成立. 秦岭造山带花岗质岩浆作用与造山带演化[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(8): 1109–1125.
- WANG Xiaoxia, WANG Tao, ZHANG Jianli. Granitic magmatism and orogenic belt evolution in Qinling Orogenic Belt[J]. Science China: Earth Science, 2015, 45(8): 1109–1125.
- 向浩予, 刘松, 康波, 等. 班公湖-怒江成矿带西段白板地北部晚侏罗世花岗岩闪长岩锆石 U-Pb 年龄、微量元素组成及地质意义[J]. 西北地质, 2025, 58(1): 43–51.
- XIANG Haoyu, LIU Song, KANG Bo, et al. Geochronology and Trace Element Compositions of Zircon in Granodiorite in North Baibandi Area, Western Bangong-Nujiang Metallogenic Belt and Their Geological Significance[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(1): 43–51.
- 王义天, 叶会寿, 叶安旺, 等. 小秦岭文峪和娘娘山花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其意义[J]. 地质科学, 2010, 45(1): 167–180.
- WANG Yitian, YE Huishou, YE Anwang, et al. AGE AND SIGNIFICANCE OF ZIRCON SHRIMP U-PB of Wenyu and Niangniangshan granite bodies in Xiaoqinling Mountains[J]. Chinese Journal of Geology, 2010, 45(1): 167–180.
- 肖序常, 陈国铭, 朱志直. 祁连山古蛇绿岩带的地质构造意义[J]. 地质学报, 1978, (4): 281–295+338.
- XIAO Xuchang, CHEN Guoming, ZHU Zhizhi. Geological structure significance of the ancient ophiolite belt in the Qilian Mountains[J]. Acta Geologica Sinica, 1978, (4): 281–295+338.
- 徐旺春. 祁连山化隆群锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素组成对基底构造演化的限制 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2007.
- XU Wangchun. Limitation of zircon U-Pb chronology, geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic composition on basement tectonic evolution in Qilian Shanhu Ridge Group[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2007.
- 徐学义, 何世平, 王洪亮, 等. 早古生代北秦岭—北祁连结合部构造格局的地层及构造岩浆事件约束[J]. 西北地质, 2008, 41(1): 1–21.
- XU Xueyi, HE Shiping, WANG Hongliang, et al. Stratigraphic and tectonic magmatic event constraints of the tectonic pattern of the North Qinling-North Qilian junction in the early Paleozoic[J]. Northwestern Geology, 2008, 41(1): 1–21.
- 杨柳, 冯旭亮, 张健, 等. 祁连造山带东段覆盖区重磁场特征及北中祁连构造边界划分[J]. 西北地质, 2025, 58(3): 63–74.
- YANG liu, FENG Xuliang, ZHANG Jian, et al. Gravity and Magnetic Field Characteristics in the Covered Area of Eastern Segment of the Qilian Orogenic Belt and the Delineation of the Northern and Central Qilian Tectonic Boundaries[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(3): 63–74.
- 杨昕. 中祁连西段托赖(岩)群的解体及其地质意义 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- YANG Xin. Disintegration and geological significance of the Tuolai (rock) group in the western section of the Middle Qilian[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2015.
- 杨伟, 邱亮, 木红旭, 等. 西准噶尔谢米斯台辉绿岩锆石 U-Pb 年代学及其构造意义[J]. 现代地质, 2025, 39(6): 1461–1482.
- YANG Wei, QIU Liang, MU Hongxu, et al. Zircon U-Pb Geochronology and Tectonic Significance of Diabase in the Xiemisitai Area of Western Junggar[J]. Geoscience, 2025, 39(6): 1461–1482.
- 阎志强, 方飞龙. 宁夏海原地区震旦系的发现及其特征[J]. 中国区域地质, 1992, (4): 364–368.
- YAN Zhiqiang, FANG Feilong. Discovery and characteristics of Sinian in Haiyuan area of Ningxia[J]. China Regional Geology, 1992, (4): 364–368.
- 翟明国, 彭澎. 华北克拉通古元古代构造事件[J]. 岩石学报, 2007, 23(11): 2665–2682.
- ZHAI Mingguo, PENG Peng. Paleoproterozoic tectonic events in North China craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(11): 2665–2682.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- 张建新, 于胜尧, 李云帅, 等. 原特提斯洋的俯冲、增生及闭合: 阿尔金-祁连-柴北缘造山系早古生代增生/碰撞造山作用[J]. 岩石学报, 2015, 31(12): 3531–3554.
- ZHANG Jianxin, YU Shengyao, LI Yunshuai, et al. Subduction, accretion and closure of the Proto-Tethys Ocean: Early Paleozoic accretion/collisional orogeny in the Altyn-Qilian-Chai northern margin orogenic system[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(12): 3531–3554.
- 赵凤清, 郭进京, 李怀坤. 青海锡铁山地区滩间山群的地质特征及同位素年代学[J]. 地质通报, 2003, 22(1): 28–31.
- ZHAO Fengqing, GUO Jinjing, LI Huaikun. Geological characteristics and isotopic age of Tanjianshan Group along northern margin of Qaidam basin[J]. Geological Bulletin of China, 2003, 22(1): 28–31.
- 赵海杰, 毛景文, 叶会寿, 等. 陕西洛南县石家湾钼矿相关花岗岩的年代学及岩石成因: 锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素制

- 约[J]. 矿床地质, 2010, 29(1): 143–157.
- ZHAO Haijie, MAO Jingwen, YE Huishou, et al. Chronology and lithogenesis of granite porphyry related to molybdenum mine in Luonan County, Shaanxi Province: zircon U-Pb age and Hf isotope constraint[J]. *Geology of Mineral Deposits*, 2010, 29(1): 143–157.
- 赵太平, 翟明国, 夏斌, 等. 熊耳群火山岩锆石 SHRIMP 年代学研究: 对华北克拉通盖层发育初始时间的制约[J]. *科学通报*, 2004, 49(22): 2342–2349.
- ZHAO Taiping, ZHAI Mingguo, XIA Bin, et al. Zircon SHRIMP chronology of volcanic rocks of the bears ear group: constraints on the initial time of craton development in North China[J]. *Science Bulletin*, 2004, 49(22): 2342–2349.
- 朱赖民, 张国伟, 郭波, 等. 东秦岭金堆城大型斑岩钼矿床 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及成矿动力学背景[J]. *地质学报*, 2008, 82(2): 204–220.
- ZHU Laimin, ZHANG Guowei, GUO Bo, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb dating and metallogenic dynamics background of large porphyry molybdenum deposit in Jinduicheng, East Qinling Mountains[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(2): 204–220.
- Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Liu Xiaoming, et al. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41(3): 213–237.
- Dong Yunpeng, Yang Zhao, Liu Xiaoming, et al. Neoproterozoic amalgamation of the Northern Qinling terrain to the North China Craton: Constraints from geochronology and geochemistry of the Kuanping ophiolite[J]. *Precambrian Research*, 2014, 255: 77–95.
- Song Shuguang, Niu Yaoling, Su Li, et al. Tectonics of the North Qilian orogen, NW China[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23: 1378–1401.
- Song Shuguang, Niu Yaoling, Zhang Lifei, et al. Tectonic evolution of Early Paleozoic HP metamorphic rocks in the North Qilian Mountains, NW China: New perspectives[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 35(3–4): 334–353.
- Song Shuguang, Zhang Lifei, Niu Yaoling, et al. Evolution from oceanic subduction to continental collision: A case study from the northern Tibetan Plateau based on geochemical and geochronological data[J]. *Journal of Petrology*, 2006, 47(3): 435–455.
- Wang Xiaoxia, Wang Tao, Zhang Chengli. Neoproterozoic, Paleozoic, and Mesozoic granitoid magmatism in the Qinling Orogen, China: Constraints on orogenic process[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 72: 129–151.
- Xia Xiaohong, Song Shuguang, Niu Yaoling. Tholeiite-boninite terrane in the North Qilian suture zone: Implications for subduction initiation and back-arc basin development[J]. *Chemical Geology*, 2012, 328: 259–277.
- Xu Yajun, Du Yuansheng, Cawood P A, et al. Detrital zircon record of continental collision: Assembly of the Qilian Orogen, China[J]. *Sedimentary Geology*, 2010a, 230(1): 35–45.
- Xu Yajun, Du Yuansheng, Yang Jianghai, et al. Provenance record of a foreland basin: Detrital zircon U-Pb ages from Devonian strata in the North Qilian Orogenic Belt, China[J]. *Tectonophysics*, 2010b, 495(3–4): 337–347.
- Yang Jianghai, Du Yansheng, Cawood P A, et al. Silurian collisional suturing onto the southern margin of the North China Craton: detrital zircon geochronology constraints from the Qilian Orogen[J]. *Sedimentary Geology*, 2009, 220(1): 9–104.
- Yuan Wei, Yang Zhenyu. The Alashan Terrane was not part of North China by the Late Devonian: Evidence from detrital zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes[J]. *Gondwana Research*, 2014, 27: 1270–1282.
- Zhang X J, Meng C F, Wan S Y. A cold Early Palaeozoic subduction zone in the North Qilian Mountains, NW China: petrological and U-Pb geochronological constraints[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2007, 25(3): 285–304.