中国科学: 地球科学 2024 年 第 54 卷 第 1 期: 203 ~ 215
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

秭归盆地下侏罗统火山碎屑沉积物源分析及其对东秦岭造山带晚三叠世地壳增厚的启示

柴嵘[1,3], 杨江海[2*], 杜远生[2], 王成善[1]

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100023;
2. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074;
3. 中国地质科学院, 北京 100037
* 通讯作者, E-mail: yangjh@cug.edu.cn

收稿日期: 2023-04-23; 收修改稿日期: 2023-08-25; 接受日期: 2023-09-05; 网络版发表日期: 2023-12-14
国家自然科学基金项目(批准号: 41888101、42102121、42122015)、中国地质调查局项目(编号: DD20230008, DD20221656)和贵州省科技计划项目(编号: 黔科合基础-ZK[2022]一般081)资助

摘要 秦岭造山带在晚三叠世经历了强烈的碰撞造山作用, 伴随岩浆底侵和构造变形, 造山带可能发生了显著的地壳增厚和隆升, 但对缺少同时期岩浆岩记录的造山带东段, 其造山过程的地壳厚度变化还未有明确约束. 在东秦岭造山带的南麓发育一系列的早中生代前陆盆地, 保存有大量源自造山带隆升剥蚀的碎屑沉积记录, 是重建造山带演化的重要信息载体. 为进一步厘定秦岭造山带的碰撞造山过程, 本文对秭归盆地下侏罗统桐竹园组的砂岩开展了火山岩岩屑地球化学、碎屑锆石U-Pb年代学和微量元素组成分析. 结果显示, 含有大量火山岩岩屑的砂岩具有250~200Ma的特征性碎屑锆石年龄组成, 指示了其主要物源为三叠纪的火山岩. 下侏罗统碎屑锆石U-Pb年龄谱的区域对比和古水流分析表明, 该火山岩物源区应位于盆地北部的秦岭造山带, 可与造山带西部出露的三叠纪花岗质岩体进行对比, 同属于秦岭三叠纪碰撞造山的岩浆作用. 依据花岗质岩和锆石化学组成与地壳厚度的相关关系, 桐竹园组的火山岩岩屑La/Yb比值和三叠纪年龄碎屑锆石Eu/Eu*比值指示, 秦岭造山带在晚三叠世发生了显著的地壳增厚, 最大厚度可达60~70km, 与秦岭造山带三叠纪花岗质岩石记录的地壳厚度变化一致, 可能与碰撞造山过程中的大规模地壳缩短和岩浆作用有关.

关键词 秦岭造山带, 秭归盆地, 晚三叠世, 碎屑锆石, 地壳增厚

1 引言

地壳增厚、山脉隆升和气候变化之间具有密切的成因联系(Lee等, 2015; Sundell等, 2019; Hillenbrand和Williams, 2022), 对理解地貌演化、气候转变等具有重要意义. 现今的地壳厚度可以通过地球物理方法来进行测量, 但是对地质历史时期的地壳厚度约束则具有很大的挑战(Cawood和Hawkesworth, 2019; Szwillus等, 2019; Lieu和Stern, 2019; Zhu等, 2022; Ding等, 2022). Farner和Lee(2017)的研究发现, 全新世岛弧岩

中文引用格式: 柴嵘, 杨江海, 杜远生, 王成善. 2024. 秭归盆地下侏罗统火山碎屑沉积物源分析及其对东秦岭造山带晚三叠世地壳增厚的启示. 中国科学: 地球科学, 54(1): 203–215, doi: 10.1360/SSTe-2023-0080
英文引用格式: Chai R, Yang J, Du Y, Wang C. 2024. Provenance of the Lower Jurassic pyroclastic sediments in the Zigui Basin: Implication for crustal thickening in the eastern Qinling orogenic belt. Science China Earth Sciences, 67(1): 196–207, https://doi.org/10.1007/s11430-023-1189-y

© 2023 《中国科学》杂志社

浆岩的全岩地球化学组成随地壳厚度的变化而变化, 地壳较厚的区域相对富集SiO_2而相对亏损Fe元素. 在美洲地区, 随着地壳的增厚岩浆分异作用会导致新生陆壳具有较高的Rb/Sr比值和SiO_2含量(Dhuime等, 2015). 基于对GEOROC全岩地球化学数据库的分析, Mantle和Collins(2008)认为岛弧玄武岩的Ce/Y比值与地壳厚度(莫霍面深度)之间存在相关性, 同时中酸性岛弧火山岩(55~68%SiO_2)的Sr/Y和La/Yb比值与莫霍面深度也存在较好的正相关关系(Chiaradia, 2015; Profeta等, 2016; Sundell等, 2021). 通过对比高加索、喀尔巴阡山脉和西藏等地区新生代中酸性火山岩的Sr/Y和La/Yb比值与地壳厚度的关系, Hu等(2017)建立了适用于俯冲带和碰撞造山带地壳厚度估算的转换方程. 考虑到岩浆岩的同位素组成受熔体来源以及地壳物质同化混染的影响, DePaolo等(2019)利用全岩Nd-Sr同位素组成建立了温度-通量模型, 提出Nd地壳系数来指示莫霍面(Moho)温度和深度及地壳厚度. 随后, Alexander等(2019)利用锆石与全岩Hf同位素组成的对应关系, 提出了Hf地壳系数来衡量Moho面深度的变化. 锆石的微量元素对地壳厚度也具有重要的指示意义(例如, McKenzie等, 2018; Sundell等, 2022). Tang等(2021a)通过对比锆石的Eu异常与岩浆岩的La/Yb比值, 提出了锆石Eu/Eu^*定量重建地壳厚度的转换方程, 是衡量俯冲-碰撞造山过程地壳厚度变化的重要指标(Tang等, 2021a, 2021b; Brudner等, 2022).

中国中部的秦岭山脉东西向延伸近2000km, 是中国重要的地理和气候分界线, 在三叠纪经历了强烈的碰撞造山作用(Dong和Santosh, 2016; 孟庆任, 2017; Dong等, 2021)(图1). Hu等(2017, 2020)通过研究三叠纪的岩浆岩记录, 认为秦岭造山带在三叠纪晚期地壳增厚至60~70km, 可能形成了与现今青藏高原媲美的山脉. 但是三叠纪的岩浆岩仅在秦岭造山带的西部出露, 而在造山带东部则没有保存. 热年代学、构造地质学以及地球物理的证据显示, 秦岭造山带东段在晚三叠世也发生了大规模的地壳缩短、逆冲推覆和构造挤压作用(Li等, 2015; Wang等, 2019; Zhang等, 2022a). 但是由于缺乏三叠纪的岩浆岩, 对其是否发生与西部一致的地壳增厚事件还没有相关数据的支持. 在东秦岭造山带的南麓分布有一系列的早中生代前陆盆地, 如四川盆地、秭归盆地和当阳盆地, 保存有大量源自造山带的碎屑沉积物, 为研究造山带演化提供了宝贵的物质记录(Liu等, 2005, 2015; Shao等, 2016; Chai等, 2020; Ma等, 2021). 其中, 秭归盆地下侏罗统桐竹园组砂岩含有大量的火山岩碎屑和特征性的三叠纪碎屑锆石年龄峰谱(Chai等, 2020). 为进一步认识秦岭造山带的地壳厚度变化, 本文对秭归盆地下侏罗统桐竹园组砂岩开展了火山岩岩屑地球化学、碎屑锆石U-Pb年代学和微量元素组成分析, 通过沉积物源分析, 揭示了秦岭造山带东部在晚三叠世的同碰撞岩浆作用, 并依据前人提出的经验转换方程估算了秦岭造山带的地壳厚度变化.

2 区域地质

秦岭造山带是中国中央造山带的重要组成部分, 向东与大别造山带相连, 向西与祁连-昆仑造山带相接, 与华北板块以洛南-栾川断裂为界, 与华南板块以勉略-巴山-襄广断裂为界(Dong和Santosh, 2016). 在造山带内部, 自北向南依次发育新元古代宽坪缝合带、早古生代商丹缝合带和三叠纪勉略缝合带(Dong和Santosh, 2016; Meng和Zhang, 2000). 传统上以商丹缝合带为界, 秦岭造山带可分为北秦岭和南秦岭两部分(张国伟等, 1997). 秦岭造山带经历了中-新元古代以来的复杂造山演化, 是华北板块、北秦岭、南秦岭和华南板块之间俯冲增生和碰撞造山的结果(Shi等, 2013; Dong等, 2021; Yu等, 2022), 其中三叠纪的陆-陆碰撞最终导致秦岭造山带的形成(Meng和Zhang, 1999; Li等, 2007).

南秦岭造山带主要发育新元古代武当群和耀岭河群变火山岩, 寒武纪-下志留统白云岩、泥灰岩和页岩, 泥盆纪-中三叠统碎屑岩、灰岩和泥岩(许志琴等, 2015; Dong和Santosh, 2016; Yu等, 2022). 伴随着三叠纪强烈的碰撞造山作用, 南秦岭发生大规模的岩浆活动, 在宁陕断裂以西形成大面积三叠纪花岗岩岩体, 而在断裂以东的大巴山地区则发育向南的大规模褶皱逆冲带(Dong等, 2013; Bao等, 2015; Zhang等, 2022a; Qiu等, 2023). 在秦岭-大别造山带南麓, 华南北部被动大陆边缘向前陆盆地演化, 形成一系列前陆盆地, 自西向东依次为四川盆地、秭归盆地、当阳盆地、黄石盆地和月山盆地等, 构成了华南北缘早中生代的前陆盆地系统(Yang等, 2010; Liu等, 2015; Shao等, 2016; Chai等, 2020); 在华南内部也形成恩施和吉安等盆地

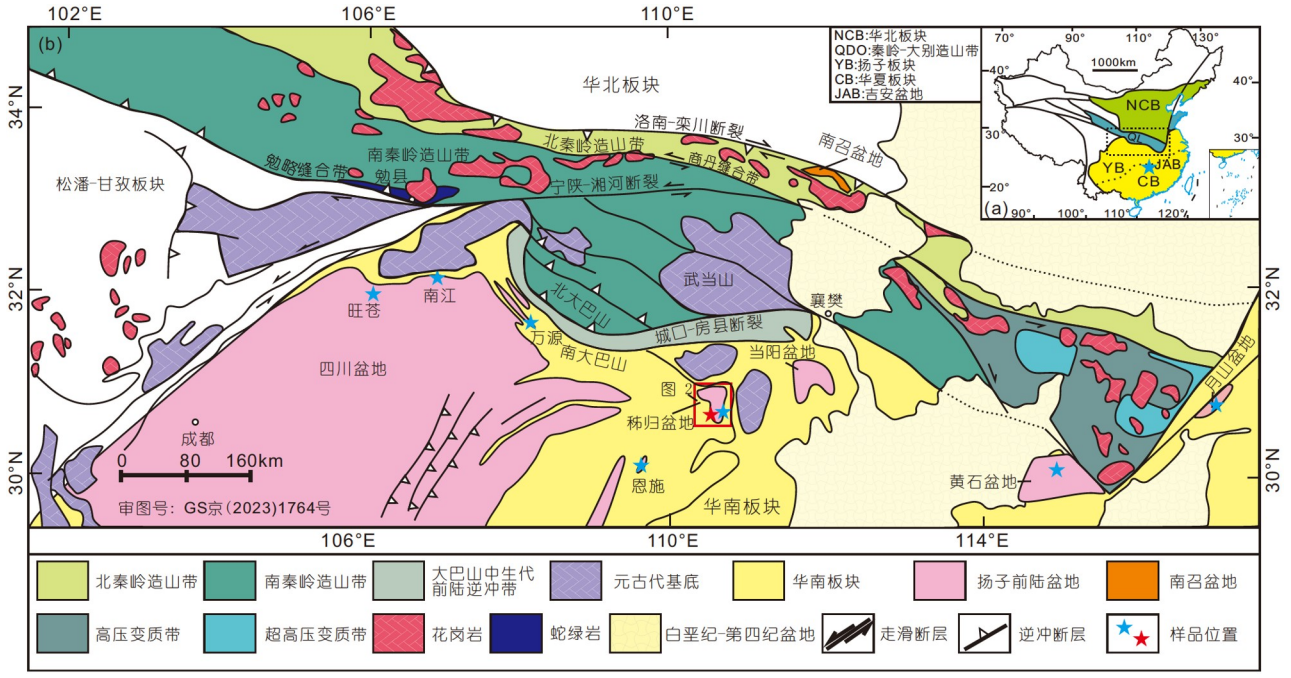

图 1　秦岭-大别造山带及其邻区构造简图

本研究的样品位置由红色五角星标示, 参考文献中的样品位置由蓝色五角星标示(Yang等, 2010; She等, 2012; Meng等, 2015; Shao等, 2016; 张妍等, 2017; 李双建等, 2018). 红色五角星指示采样剖面位置; 蓝色五角星指示下侏罗统碎屑锆石数据来源的样品位置, 包括四川盆地北部(旺苍, 南江和万源)、秭归盆地(郭家坝)、恩施盆地、黄石盆地、月山盆地和吉安盆地. 据Chai等(2020)修改, 红框指示秭归盆地

(She等, 2012; Meng等, 2015), 其三叠纪沉积序列与北缘的前陆盆地可进行大致对比(童金南等, 2019). 本文研究的秭归盆地位于大巴山冲断带的东南部(图2a), 发育有中-上三叠统巴东组、上三叠统九里岗组、下侏罗统桐竹园组、中侏罗统千佛崖组和沙溪庙组以及上侏罗统的遂宁组和蓬莱镇组等地层(马千里等, 2019; Chai等, 2020; Dai等, 2022). 其中, 下侏罗统桐竹园组不整合于九里岗组砂岩之上, 底部发育有块状和层状砾岩, 向上变为以槽状交错层理砂岩和均质层理、水平层理灰黑色泥岩为主的岩石序列, 夹多层煤线, 整体为一套河流-三角洲的沉积环境(Chai等, 2020).

3　采样剖面和分析方法

本文的研究样品均采自两河口剖面下侏罗统桐竹园组的下部(图2). 在该剖面, 桐竹园组底部由中厚-厚层状砾岩组成, 具颗粒支撑结构, 砾石局部呈叠瓦状排列, 底部发育冲刷面. 根据测得的32组砾石最大扁平面产状, 恢复的古流向为自北向南, 与前人研究的秭归盆地桐竹园组古水流方向一致(渠洪杰等, 2009; Chai等, 2020)(图2a). 砾岩之上变为互层的中薄-中厚层状砂岩(图3a)和灰黑色泥岩, 砂岩中发育中-大型槽状交错层理, 含大量的碳化植物根茎化石(图2b).

对该剖面桐竹园组下部细砂岩和中粗粒砂岩分别进行样品采集(图2b、3c), 制作岩石薄片和光片开展显微观察, 确定火山岩岩屑位置并进行激光剥蚀电感耦合等离子质谱(LA-ICP-MS)分析确定其主量和微量元素含量. LA-ICP-MS分析在武汉上谱分析科技有限责任公司完成. GeolasPro激光剥蚀系统由COMPexPro 102ArF 193nm准分子激光器和MicroLas光学系统组成, ICP-MS型号为Agilent 7900, 详细的仪器参数和分析流程已有相关论述(Zong等, 2017). 本次测试分析激光束斑别为44和60μm, 微量元素含量处理中采用玻璃标准物质BHVO-2G、BCR-2G和BIR-1G进行多外标无内标校正(Liu等, 2008).

对采集的两件砂岩样品(LH16-73(g)和LH16-77(g))进行重磁分选, 提取碎屑锆石颗粒. 碎屑锆石制靶抛光后进行阴极发光(CL)图像、LA-ICPMS锆石U-Pb

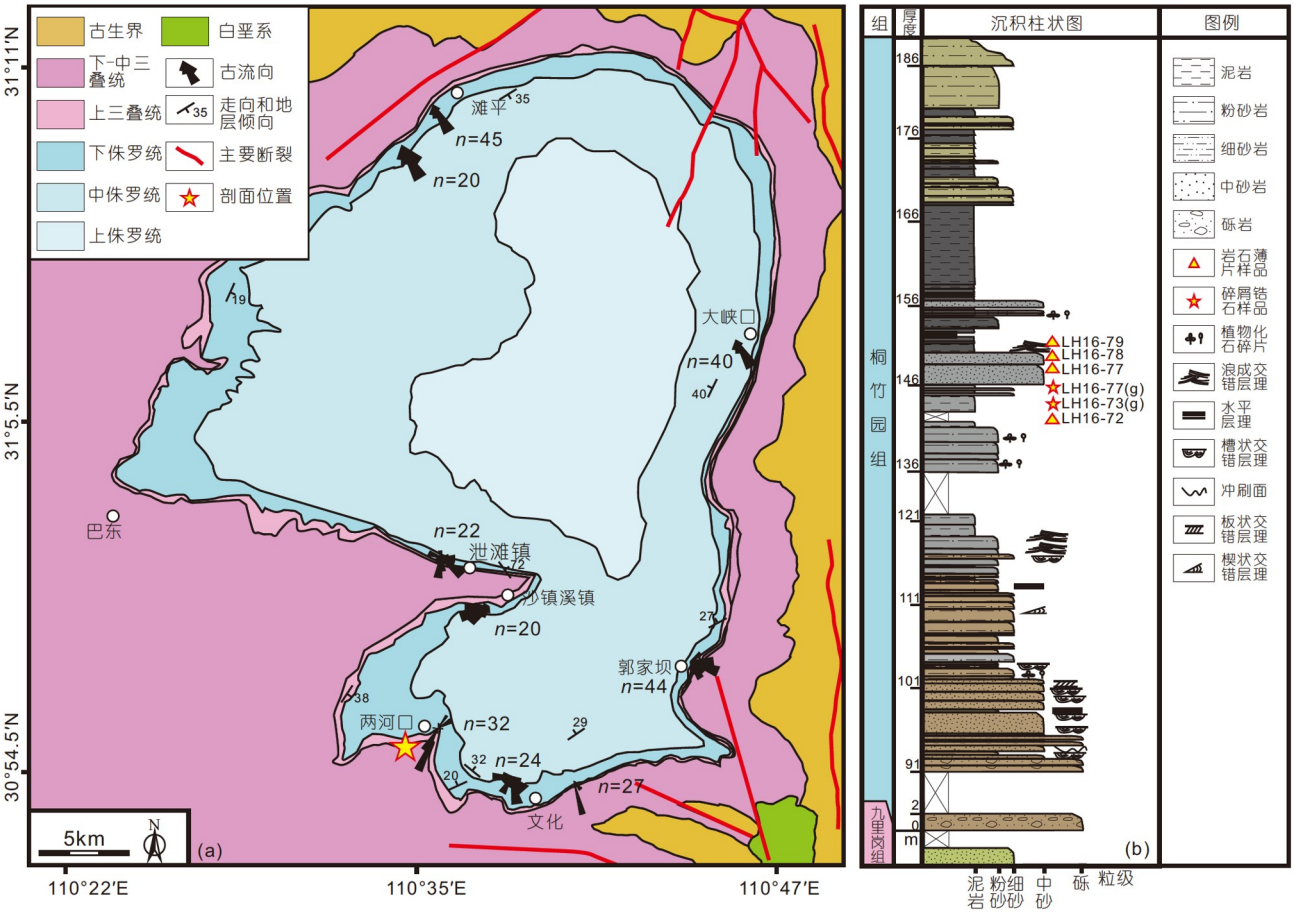

图 2　秭归盆地的区域地质图和两河口剖面的下侏罗统岩性柱状图及采样位置

同位素定年和微量元素含量分析. CL图像分析仪器为JEOLJXA-8100型电子探针, LA-ICPMS分析的激光束斑和频率分别为32μm和5Hz, 在中国地质大学地质过程和矿产资源国家重点实验室完成. 每个时间分辨分析数据包括大约20~30s空白信号和50s样品信号. U-Pb同位素定年和微量元素含量处理中采用锆石标准91500和玻璃标准物质NIST610作外标分别进行同位素和微量元素分馏校正. 对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及U-Pb同位素比值和年龄计算)采用软件ICPMSDataCal完成(Liu等, 2008, 2010). 按100×[1-abs($^{206}Pb/^{238}U$ Age- $^{207}Pb/^{235}U$ Age)/average($^{206}Pb/^{238}U$ Age +$^{207}Pb/^{235}U$ Age)]计算年龄协和度, 小于1000Ma的锆石颗粒采用$^{206}Pb/^{238}U$年龄, 大于1000Ma的锆石颗粒采用$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄. 对比锆石标准91500微量元素含量的测量值和推荐值(附表S1, http://earthcn.scichina.com), 可以确定锆石微量元素的测量误差绝大多数<20%, 其中80%锆石标准91500的Nb含量的测量误差均<10%.

4　数据结果

细砂岩样品含有次圆-次棱角状的石英颗粒、低级变质岩岩屑(千枚岩、石英云母片岩等)和少量火山岩岩屑(图3b). 中-粗粒砂岩样品含有棱角-次棱角状的石英颗粒, 分选较差, 火山岩岩屑含量较高, 多为等粒-不等粒状的霏细晶状火山结构(图3d). 这些砂岩中的火山岩岩屑具有中-酸性火山岩的地球化学属性, 其SiO_2含量为64.66~78.73wt%, TiO_2含量为0.02~1.75wt%, Na_2O+K_2O含量为3.89~9.79wt%, Nb/Y比值为0.04~3.60, Rb/Sr比值为0.07~38.24, 标准化的$(La/Yb)_N$比值为0.36~25.52(网络版附表S2). 在全碱二氧化硅



图 3　秭归盆地下侏罗统桐竹园组砂岩的野外照片((a)、(c))和显微照片((b)、(d))

(b) 砂岩样品LH16-72; (d) 粗砂岩样品LH16-77, 黄色箭头指示火山岩岩屑; 正交偏光

(TAS)和SiO_2-Nb/Y图解上多数具有流纹岩质特性(图4).

细砂岩样品LH16-73(g)中的锆石颗粒多为无色透明状, 粒度为50~100μm, 多呈椭圆状-次棱角状, 磨圆程度较差, 其CL图像呈现震荡环带或均一状的内部结构(图5a). 对该样品76颗锆石进行76个点位的测试分析, 其中71个分析点位年龄谐和度≥90%(附表S3). 碎屑锆石U-Pb年龄从2517Ma到201Ma, 具有两个主要年龄组, 分别为950~700Ma和500~400Ma, 并含有少量三叠纪和古-中元古代年龄的碎屑颗粒(图5c).

岩屑砂岩样品LH16-77(g)中的碎屑锆石颗粒多为无色透明, 粒度为100~200μm, 多数为长柱状, 磨圆程度较差, 在CL图像上多具有震荡环带的内部结构(图5a). 对该样品的69颗锆石进行了70个点位的分析测试, 其中67个点位年龄谐和度≥90%(附表S3). 碎屑锆石U-Pb年龄范围为2277Ma到207Ma, 只具有一个250~200Ma的主要年龄组, 其峰值为~210Ma, 并含有少量中-新元古代年龄的碎屑锆石颗粒(图5b).

两个样品中三叠纪年龄的碎屑锆石颗粒一共33颗, 其Ti含量为1.44~12.61ppm(1ppm=μg g^{-1})、P含量为211~7495ppm(附表S4). 在球粒陨石标准配分图上, 三叠纪年龄的碎屑锆石多数具有轻稀土元素亏损、重稀土元素富集、Ce正异常和Eu负异常的典型岩浆锆石化学特征, 另有部分颗粒具有轻稀土元素相对富集的化学特征(图6a). 这些三叠纪碎屑锆石颗粒的Th/U、Eu/Eu^*、Th/Nb、U/Yb和Hf/Th比值分别为0.10~1.30、0.11~0.66、49.38~322.40、0.45~3.56和15.16~135.03(图6b~6f), Hf/Th和Th/Nb比值具有与弧/造山带岩浆锆石相似的微量元素组成特征(图6b).

5　讨论

5.1　秭归盆地早侏罗世的火山岩物源区

对比早侏罗世桐竹园组两件砂岩碎屑锆石U-Pb

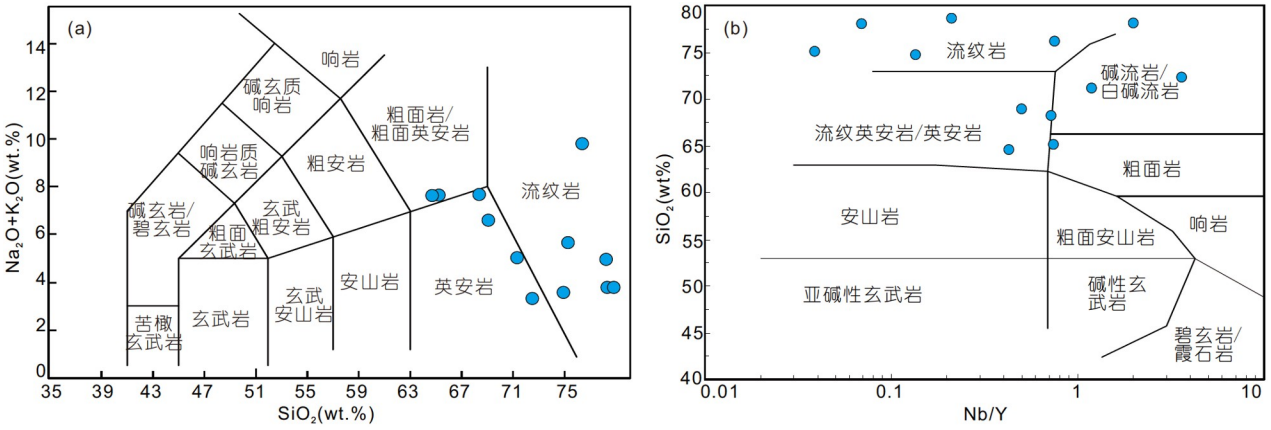

图 4　下侏罗统火山岩岩屑TAS分类图解(a)和SiO_2-Nb/Y图解(b)

(a) 据Le Bas等(1986); (b) 据Winchester和Floyd(1977)

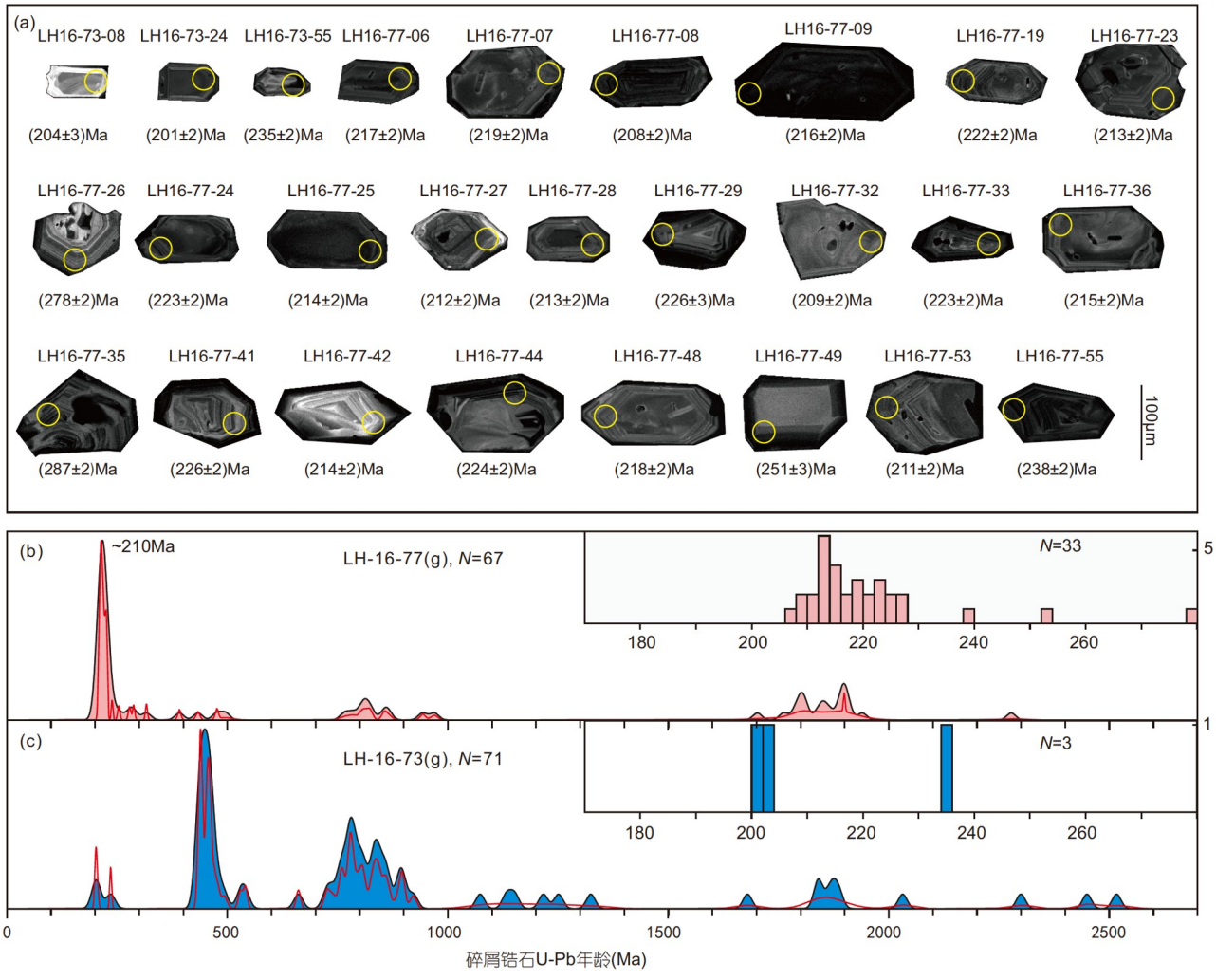

图 5　下侏罗统桐竹园组砂岩碎屑锆石的阴极发光图像(a)和U-Pb年龄PDP-KDE分布图((b), (c))

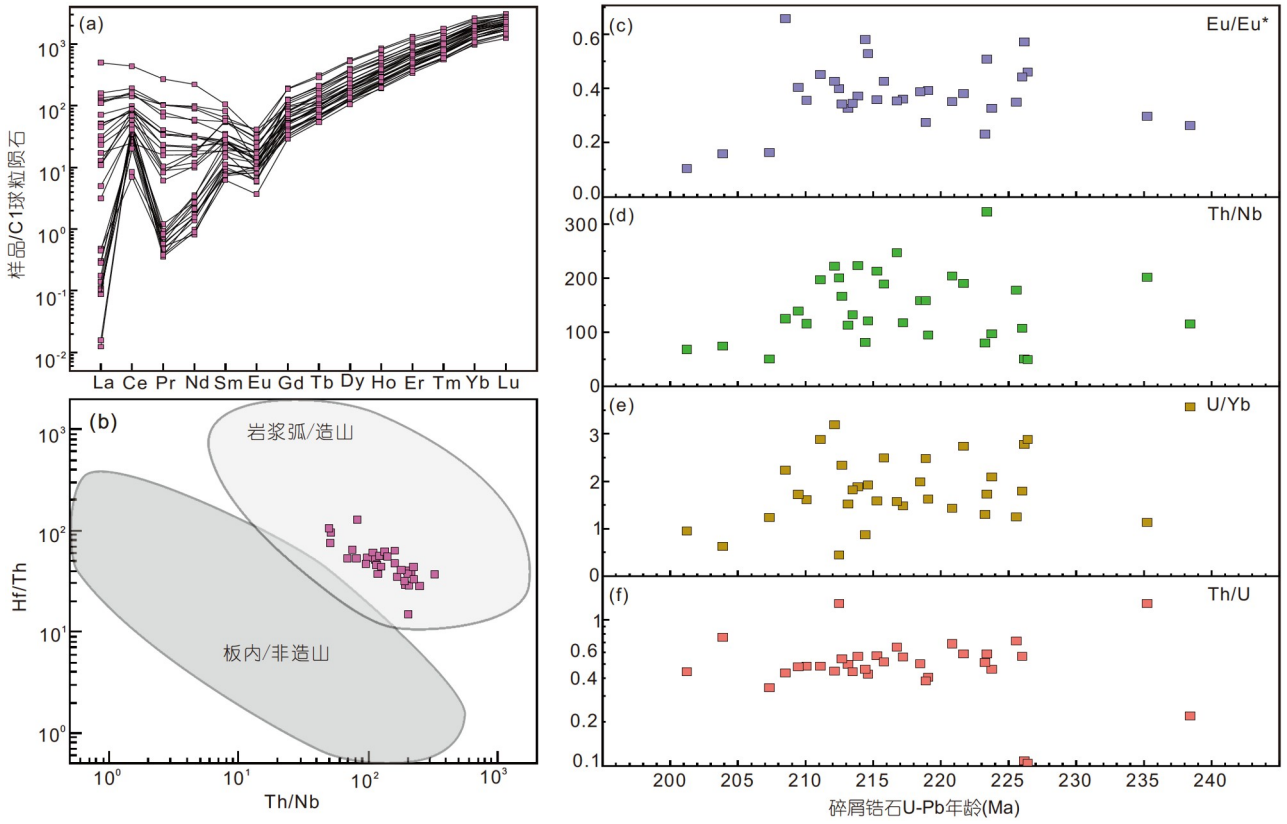

图 6　桐竹园组的三叠纪碎屑锆石稀土元素C1球粒陨石配分模式(a)、微量元素Th/Nb-Hf/Th判别图解(b)和微量元素比值随U-Pb年龄的变化((c)~(f))

(b) 据Yang等(2012)

年龄数据可知，含大量火山岩岩屑砂岩具有250~200Ma的特征性碎屑锆石U-Pb年龄组，表明火山岩岩屑与三叠纪年龄的碎屑锆石应来自一个火山岩物源区. 依据三叠纪碎屑锆石的Th/Nb和Hf/Th比值, 该火山源岩应形成于俯冲-碰撞的造山构造环境(Yang等, 2012)(图6b). 秭归盆地早侏罗世的砾岩叠瓦状组构和砂岩交错层理分析主要指示了向南的古水流特征(渠洪杰等, 2009; Chai等, 2020). 在紧邻秦岭造山带南麓的四川盆地北部和秭归盆地及当阳盆地，早侏罗世发育粗粒的冲积扇和河流沉积序列(刘少峰等, 2010; Qian等, 2015), 而向南粒度变细. 区域对比发现, 秭归盆地下侏罗统桐竹园组与西侧四川盆地北部旺苍、南江和万源地区的下侏罗统具有相似的碎屑锆石U-Pb分布特征，均含有250~200Ma的主要年龄组(Shao等, 2016; 李双建等, 2018)(图7a、7b), 但与西侧的黄石、月山盆地(Yang等, 2010; She等, 2012; 张妍等, 2017)(图7d、7e)和南侧恩施(She等, 2012)(图7c)、吉安盆地(Meng等, 2015)(图7f)的下侏罗统在碎屑锆石U-Pb年龄组成上具有较大差异，后者不含有250~200Ma的主要年龄组. 这种碎屑锆石年龄组的分布差异表明，三叠纪年龄的碎屑锆石不可能来自盆地的东部和南部源区. 此外, 根据古地理和沉积物源, 前人推测在华南北缘存在早侏罗世自东向西的大河流(王鸿桢等, 1985; Yang等, 2010; She等, 2012), 最终汇水于西侧的四川盆地. 基于广泛的碎屑锆石U-Pb年龄组成的对比分析, 本文认为贯穿月山、黄石等盆地的古河流可能没有经过秭归盆地，而应该是经南侧的恩施盆地到达四川盆地南部(She等, 2012; Xu, 2023). 尽管前人认为华北板块、华南板块和秦岭造山带都作为华南北缘早中生代的潜在沉积物源区(Shao等, 2016; 李双建等, 2018), 但是基于向南的古水流数据和碎屑锆石年龄组成的对比，可以推测秭归盆地早侏罗世沉积的三叠纪火山岩

物源区应来自盆地的北部, 即秦岭造山带. 同时也观察到, 四川盆地北部和秭归盆地下侏罗统与南秦岭造山带内部现代河流沙在碎屑锆石年龄组成上具有很好的一致性, 所记录的主要年龄组分别可以对应于秦岭造山带新元古代、早古生代以及早中生代的岩浆活动事件(Yang等, 2007; He等, 2014; Dong和Santosh, 2016)(图7g). 位于大别山南麓和东南麓的黄石和月山盆地下侏罗统则主要由古元古代和少量新元古代的碎屑锆石组成(Yang等, 2010; She等, 2012), 与恩施盆地、四川盆地南部的碎屑锆石年龄组成一致, 应具有不同的物源区构成.

所分析的两件样品在砂岩碎屑组成和碎屑锆石组成上的差异性表明, 两者应具有不同的物源区. 相对于含有250~200Ma主要年龄组的岩屑砂岩, 细石英砂岩样品具有500~400Ma和900~700Ma两个主要年龄组, 这与秦岭造山带内部发育的大量早古生代和新元古代的岩浆记录相吻合(Dong和Santosh, 2016; Wang等, 2019), 表明其主要物源区来自这些造山带岩石的侵蚀和风化. 两件样品之间物源的差异可能与区域的水系发育和造山带的差异隆升有关, 即在早侏罗世的秦岭造山带内部即存在早古生代和新元古代的剥蚀区, 也发育有三叠纪火山岩出露区. 三叠纪火山岩在早侏罗世可能经历了快速的剥露和侵蚀, 为秭归盆地提供了大量的火山碎屑沉积物, 致使其没能保存下来. 尽管造成两件砂岩样品之间物源差异的具体成因机制还不清楚, 但综合上述砂岩碎屑组分、古水流和碎屑锆石U-Pb年龄数据, 可以确定秭归盆地在早侏罗世接受了大量来自三叠纪火山岩物源区的碎屑沉积物, 该火山物源区应位于北部的秦岭造山带. 秭归盆地的沉积和演化受到北大巴山前陆褶皱逆冲推覆体系的控制和影响(Shi等, 2013; Wang等, 2019), 其物源区由早期大巴山褶皱冲断带向火山弧转变. 此后伴随早侏罗世造山作用和隆升剥蚀(Chai等, 2020), 大量与碰撞相关的中酸性火山岩遭受侵蚀, 为四川盆地北部和秭归盆地提供了大量火山碎屑沉积物, 包括火山岩岩屑和250~200Ma的碎屑锆石.

5.2 秦岭造山带晚三叠世的地壳增厚

物源分析表明, 秭归盆地下侏罗统桐竹园组砂岩的火山岩岩屑和250~200Ma的碎屑锆石是秦岭造山带三叠纪岩浆活动的重要物质记录. 因此, 本文尝试利用其化学组成来反映秦岭造山带三叠纪的构造岩浆演化, 特别是估算地壳厚度的变化. 地壳增厚会增大地壳内部岩浆作用的压力, 影响部分熔融过程和结晶矿物组合, 改变微量元素的分配系数, 使得岩浆岩的微量元素特征能够反映岩浆演化过程中的共存矿物相, 进而示踪地壳厚度的相对变化(Mantle和Collins, 2008; Lee等, 2015; Profeta等, 2016; Farner和Lee, 2017). 对全球地壳厚度和俯冲带岩浆分异作用研究发现, 地壳厚度小于43km时, 岛弧岩浆岩的La/Yb和Gd/Yb比值与地壳厚度没有显著的相关关系, 但当地壳厚度超过该临界值时, 这些比值与地壳厚度存在较好的正相关关系(Farner和Lee, 2017). 在地壳增厚导致压力>1.2GPa时, 石榴石在岩浆系统中的分馏作用增强, 而斜长石则相对减弱(Tang等, 2021a). 在这一过程中, Y和Yb将优先进入石榴石中而不相容的Sr和La则在岩浆中富集, 导致分异的岩浆具有较高的Sr/Y和La/Yb比值(Chapman等, 2015; Farner和Lee, 2017 ; Hu等, 2017). 基于花岗质岩石的Sr/Y和La/Yb比值, Hu等(2017)对秦岭造山带的地壳厚度进行了重建, 认为在230Ma以后南秦岭地区地壳厚度发生了显著增加, 在220~210Ma期间达到最大地壳厚度60~70km. 本研究获得了12个火山岩岩屑的地球化学数据, 但仅有一个分析数据满足前人提出的全岩数据筛选标准, 即SiO_2=55~72wt%, MgO=0.5~6.0wt%和Rb/Sr比值<0.35(Hu等, 2017; Hillenbrand和Williams, 2022), 该筛选标准用以排除地幔或中-上地壳部分熔融对全岩地球化学数据的影响. 这一火山岩岩屑的球粒陨石标准化La/Yb比值, 即$(La/Yb)_N$比值为25.52, 参考Hu等(2017)提出的花岗质岩La/Yb比值与地壳厚度(Moho深度)的相关关系, 可以指示秦岭造山带晚三叠世岩浆源区具有~60km的地壳厚度.

早侏罗世桐竹园组230~210Ma的碎屑锆石具有较高的U/Yb和Th/Nb比值, 分别达到>1.5和>100之上(图7f、7g), 表明其源区岩浆作用中有大量陆壳物质的加入(Grimes等, 2007; Yang等, 2012). 相对于幔源岩浆分异结晶的锆石来说, 大陆弧或造山带地壳岩浆结晶的锆石具有较高的Th、U和较低的Nb、Yb含量(Grimes等, 2007). 碎屑锆石的化学组成变化趋势表明, 秦岭造山带在晚三叠世发生有大量陆壳物质参与的岩浆活动. 这与前人对秦岭造山带的研究认识一致, 即随勉略洋的俯冲消减, 华南与华北在晚三叠世发生强烈的碰

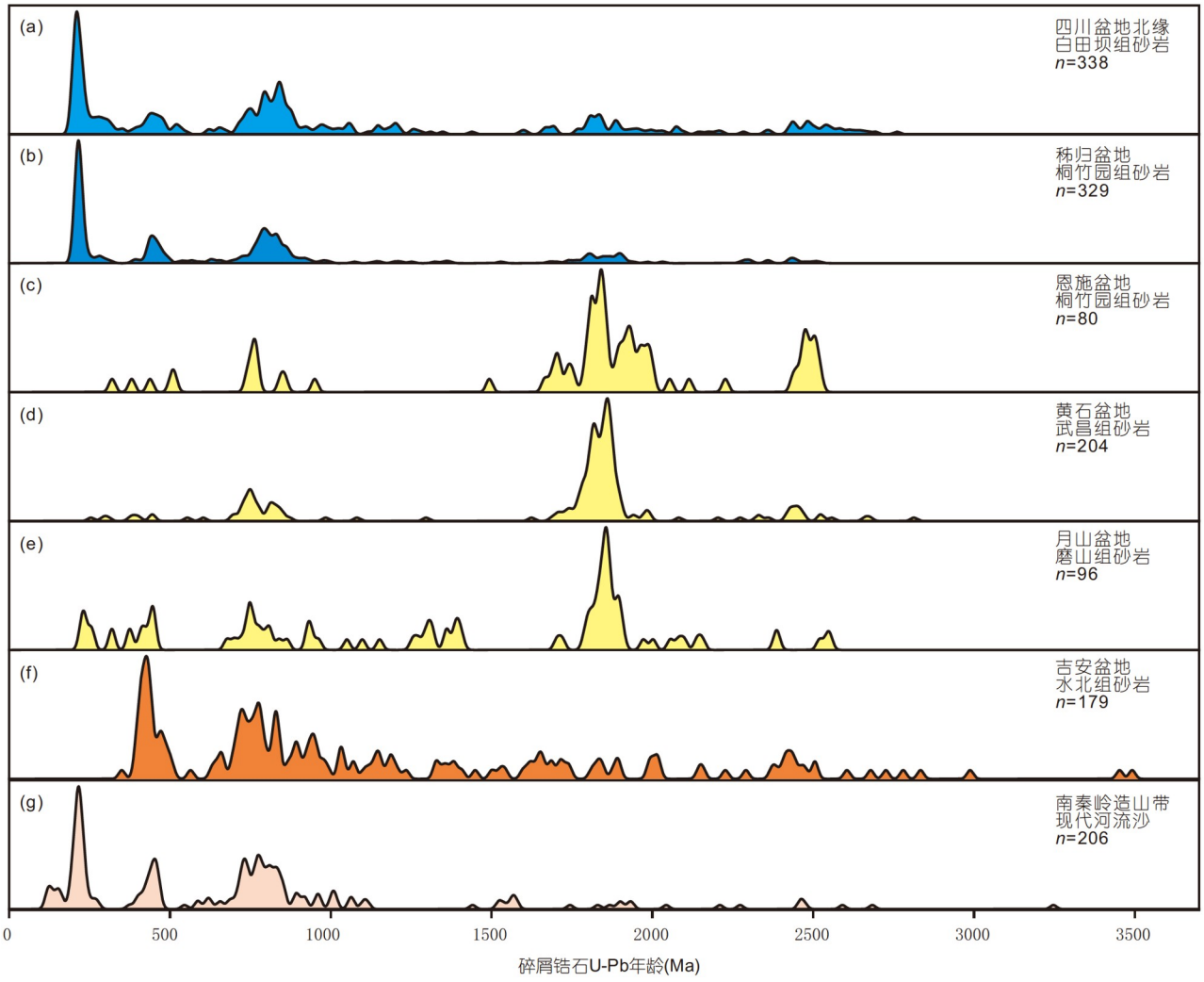

图 7　四川盆地北部(a)、秭归盆地(b)、恩施盆地(c)、黄石盆地(d)、月山盆地(e)和吉安盆地(f)下侏罗统砂岩及南秦岭现代河流沙(g)的碎屑锆石U-Pb年龄KDE分布图

(a) Shao等(2016), 李双建等(2018); (b) 本文, Chai等(2020); (c) She等(2012); (d) Yang等(2010), She等(2012); (e) 张妍等(2017); (f) Meng等(2015); (g) Yang等(2007), He等(2014)

撞造山作用(Bao等, 2015; Hu等, 2020). 这些230~210Ma的碎屑锆石也具有较高的Eu/Eu*比值>0.3(图7d). Tang等(2021a)发现中酸性岩的锆石Eu/Eu*比值与全岩La/Yb比值呈现显著的正相关关系, 据此提出利用锆石Eu/Eu*估算地壳厚度指标的经验公式, 即

$$z = (84.2 \pm 9.2) \times \mathrm{Eu/Eu^{*}_{zircon}} + (24.5 \pm 3.3). \quad (1)$$

在利用这一关系估算地球厚度之前, 需要对锆石数据进行筛选, 即去除Th/U比值<0.1或La>1ppm的锆石数据, 以消除变质作用和包裹体等因素对锆石化学分析数据的影响(Tang等, 2021a). 在此基础上, 依据锆石P元素与REE+Y含量之间的关系, 去除0.77<(REE+Y)/P<1.23的锆石数据, 排除具有S型花岗岩质岩来源的锆石颗粒(Zhu等, 2020). 按上述标准进行筛选, 只有15个碎屑锆石微量元素数据满足要求. 尽管满足要求的数据量较少, 但利用Tang等(2021a)的经验公式计算结果显示, 地壳平均厚度在215~210Ma达到>60km, 与上述基于火山岩岩屑La/Yb比值计算的地壳厚度一致(图8).

基于桐竹园组火山岩岩屑La/Yb比值和碎屑锆石Eu/Eu*计算的秦岭造山带晚三叠世地壳厚度可以与前人依据花岗质岩的估算结果进行很好的对比, 支持秦岭造山带在晚三叠世发生了显著的地壳增厚. 现有的

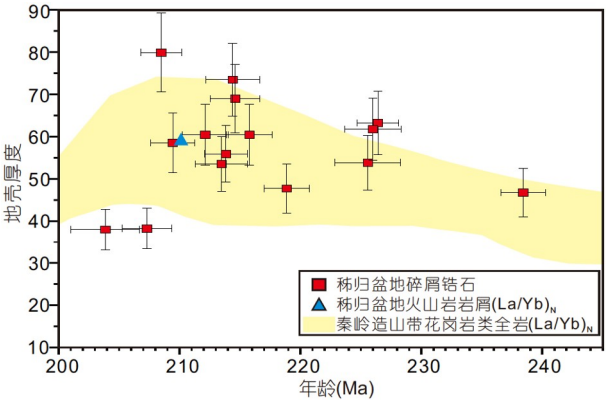

图 8　秭归盆地下侏罗统火山岩岩屑La/Yb比值和三叠纪碎屑锆石Eu/Eu*比值计算的地壳厚度随时代的变化及其与秦岭造山带西部花岗质岩La/Yb比值计算的地壳厚度对比图

据Hu等(2020)

资料表明，南秦岭在晚三叠世的地壳增厚度(近20km)很可能是由于板块斜向碰撞所导致大规模岩浆作用而引起的(Hu等, 2017, 2020; Qiu等, 2023). 但以单一的花岗岩类作为地壳生长演化的指标，一般难以确定地壳增厚的时间和机制，在与高压变质岩相结合对于理解地壳增厚过程更为有效(Zhang等, 2022b). 对勉略带高压麻粒岩样品P-T演化轨迹及变质时代的研究发现, 在215Ma之前地壳已经俯冲到地壳深部(~60km)遭受榴辉岩相或高压麻粒岩相变质作用(梁莎等, 2013). 沉积学和碎屑锆石年代学的证据显示，四川盆地北部和秭归盆地早侏罗世地层均含有大量源自秦岭造山带的火山碎屑沉积物(Shao等, 2016; Chai等, 2020), 结合花岗质岩体可以表明，秦岭造山带在晚三叠世发生了广泛的同碰撞岩浆火山作用. 对全球典型碰撞造山带的研究发现，造山带的地壳增厚并非由单一机制所导致, 例如喜马拉雅造山带，岩浆作用和逆冲断作用都驱动地壳增厚的重要因素(Pitard等, 2021; Ding等, 2022). 在东秦岭大巴山地区，热年代学和构造地质学数据揭示了晚三叠世大规模的向西南逆冲褶皱和近百公里的地壳缩短, 可以导致东秦岭地区的地壳快速增厚(Li等, 2015; Wang等, 2019; Zhang等, 2022a).

6　结论

秭归盆地下侏罗统桐竹园组的砂岩碎屑组分、火山岩屑地球化学和碎屑锆石U-Pb年代学证据显示，在早侏罗世秦岭造山带为秭归盆地提供了大量的三叠纪火山碎屑沉积物. 桐竹园组的火山岩岩屑La/Yb比值和三叠纪碎屑锆石Eu/Eu*数据表明，秦岭造山带在晚三叠世发生了显著的地壳增厚，可与花岗质岩石地球化学所指示的造山带地壳厚度变化进行很好的对比，表明秦岭造山带230~210Ma的地壳厚度达到了60~70km. 这一地壳增厚可能与大量岩浆作用和地壳缩短等造山作用有关，但具体驱动机制还需要更多的研究加以限定.

致谢　锆石微量元素分析和岩屑微区原位分析得到中国地质大学(武汉)罗涛副教授的帮助, 在成文过程中受到北京大学唐铭教授的指导，两位匿名专家提出重要修改意见, 在此一并表示感谢.

参考文献

李双建, 孙冬胜, 蔡立国, 高平, 李天义, 袁玉松, 郑孟林, 邱登峰. 2018. 川北米仓山山前带碎屑锆石U-Pb年代学及盆山演化意义. 大地构造与成矿学, 42: 1087–1107

梁莎, 刘良, 张成立, 杨永成, 杨文强, 康磊, 曹玉亭. 2013. 南秦岭勉略构造带高压基性麻粒岩变质作用及其锆石U-Pb年龄. 岩石学报, 29: 1657–1674

刘少峰, 王平, 胡明卿, 郜瑭郡, 王凯. 2010. 中、上扬子北部盆-山系统演化与动力学机制. 地学前缘, 17: 14–26

马千里, 柴嵘, 杜远生, 杨江海, 戴贤铎. 2019. 中扬子区巴东组凝灰岩层的锆石U-Pb年龄约束. 地质学报, 93: 2785–2796

孟庆任. 2017. 秦岭的由来. 中国科学: 地球科学, 47: 412–420

渠洪杰, 胡健民, 崔建军, 武国利, 田蜜, 施炜, 赵陕兰. 2009. 大巴山构造带东段秭归盆地侏罗纪沉积充填过程及其构造演化. 地质学报, 83: 1255–1268

童金南, 楚道亮, 梁蕾, 舒文超, 宋海军, 宋婷, 宋虎跃, 吴玉样. 2019. 中国三叠纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49: 194–226

王鸿祯, 楚旭春, 刘本培. 1985. 中国古地理图集, 北京: 地图出版社. 97–98

许志琴, 李源, 梁凤华, 裴先治. 2015. “秦岭-大别-苏鲁”造山带中“古特提斯缝合带”的连接. 地质学报, 89: 671–680

张国伟, 董云鹏, 姚安平. 1997. 秦岭造山带基本组成与结构及其构造演化. 陕西地质, 1–14

张妍, 石永红, 宋传中, 李加好, 任升莲, 朱琳, 冯启, 杨帆. 2017. 大别山东南缘侏罗系磨山组沉积环境及地质意义. 岩石学报, 33: 639–652

Alexander E W, Wielicki M M, Harrison T M, DePaolo D J, Zhao Z D,

Zhu D C. 2019. Hf and Nd isotopic constraints on pre- and syn-collisional crustal thickness of southern Tibet. J Geophys Res-Solid Earth, 124: 11038–11054

Bao Z, Wang C Y, Zeng L, Sun W, Yao J. 2015. Slab break-off model for the Triassic syn-collisional granites in the Qinling orogenic belt, Central China: Zircon U-Pb age and Hf isotope constraints. Int Geol Rev, 57: 492–507

Brudner A, Jiang H, Chu X, Tang M. 2022. Crustal thickness of the Grenville orogen: A Mesoproterozoic Tibet? Geology, 50: 402–406

Cawood P A, Hawkesworth C J. 2019. Continental crustal volume, thickness and area, and their geodynamic implications. Gondwana Res, 66: 116–125

Chai R, Yang J, Du Y, Liu J, He F, Huang Y, Ma Q, Dai X. 2020. Constraints on the early Mesozoic denudation of the Qinling orogen from Upper Triassic-Lower Jurassic successions in the Zigui Basin, central China. J Asian Earth Sci, 195: 104360

Chapman J B, Ducea M N, DeCelles P G, Profeta L. 2015. Tracking changes in crustal thickness during orogenic evolution with Sr/Y: An example from the North American Cordillera. Geology, 43: 919–922

Chiaradia M. 2015. Crustal thickness control on Sr/Y signatures of recent arc magmas: An Earth scale perspective. Sci Rep, 5: 8115

Dai X, Du Y, Ziegler M, Wang C, Ma Q, Chai R, Guo H. 2022. Middle Triassic to Late Jurassic climate change on the northern margin of the South China Plate: Insights from chemical weathering indices and clay mineralogy. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 585: 110744

DePaolo D J, Harrison T M, Wielicki M, Zhao Z, Zhu D C, Zhang H, Mo X. 2019. Geochemical evidence for thin syn-collision crust and major crustal thickening between 45 and 32 Ma at the southern margin of Tibet. Gondwana Res, 73: 123–135

Dhuime B, Wuestefeld A, Hawkesworth C J. 2015. Emergence of modern continental crust about 3 billion years ago. Nat Geosci, 8: 552–555

Ding L, Kapp P, Cai F, Garzione C N, Xiong Z, Wang H, Wang C. 2022. Timing and mechanisms of Tibetan Plateau uplift. Nat Rev Earth Environ, 3: 652–667

Dong S, Gao R, Yin A, Guo T, Zhang Y, Hu J, Li J, Shi W, Li Q. 2013. What drove continued continent-continent convergence after ocean closure? Insights from high-resolution seismic-reflection profiling across the Daba Shan in central China. Geology, 41: 671–674

Dong Y, Santosh M. 2016. Tectonic architecture and multiple orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China. Gondwana Res, 29: 1–40

Dong Y, Sun S, Santosh M, Zhao J, Sun J, He D, Shi X, Hui B, Cheng C, Zhang G. 2021. Central China orogenic belt and amalgamation of East Asian continents. Gondwana Res, 100: 131–194

Farner M J, Lee C T A. 2017. Effects of crustal thickness on magmatic differentiation in subduction zone volcanism: A global study. Earth Planet Sci Lett, 470: 96–107

Grimes C B, John B E, Kelemen P B, Mazdab F K, Wooden J L, Cheadle M J, Hanghøj K, Schwartz J J. 2007. Trace element chemistry of zircons from oceanic crust: A method for distinguishing detrital zircon provenance. Geology, 35: 643

He M, Zheng H, Bookhagen B, Clift P D. 2014. Controls on erosion intensity in the Yangtze River basin tracked by U-Pb detrital zircon dating. Earth-Sci Rev, 136: 121–140

Hillenbrand I W, Williams M L. 2022. Geochemical evidence for diachronous uplift and synchronous collapse of the high elevation variscan hinterland. Geophys Res Lett, 49: e2022GL100435

Hu F, Ducea M N, Liu S, Chapman J B. 2017. Quantifying crustal thickness in continental collisional belts: Global perspective and a geologic application. Sci Rep, 7: 7058

Hu F, Liu S, Ducea M N, Chapman J B, Wu F, Kusky T. 2020. Early Mesozoic magmatism and tectonic evolution of the Qinling Orogen: Implications for oblique continental collision. Gondwana Res, 88: 296–332

Le Bas M J, Maitre R W L, Streckeisen A, Zanettin B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. J Petrol, 27: 745–750

Lee C T A, Thurner S, Paterson S, Cao W. 2015. The rise and fall of continental arcs: Interplays between magmatism, uplift, weathering, and climate. Earth Planet Sci Lett, 425: 105–119

Li J, Dong S, Yin A, Zhang Y, Shi W. 2015. Mesozoic tectonic evolution of the Daba Shan Thrust Belt in the southern Qinling orogen, central China: Constraints from surface geology and reflection seismology. Tectonics, 34: 1545–1575

Li S, Kusky T M, Wang L, Zhang G, Lai S, Liu X, Dong S, Zhao G. 2007. Collision leading to multiple-stage large-scale extrusion in the Qinling orogen: Insights from the Mianlue suture. Gondwana Res, 12: 121–143

Lieu W K, Stern R J. 2019. The robustness of Sr/Y and La/Yb as proxies for crust thickness in modern arcs. Geosphere, 15: 621–641

Liu S, Li W, Wang K, Qian T, Jiang C. 2015. Late Mesozoic development of the southern Qinling-Dabieshan foreland fold-thrust belt, Central China, and its role in continent-continent collision. Tectonophysics, 644-645: 220–234

Liu S, Steel R, Zhang G. 2005. Mesozoic sedimentary basin development and tectonic implication, northern Yangtze Block, eastern China: Record of continent-continent collision. J Asian Earth Sci, 25: 9–27

Liu Y, Gao S, Hu Z, Gao C, Zong K, Wang D. 2010. Continental and

oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. J Petrol, 51: 537–571

Liu Y, Hu Z, Gao S, Günther D, Xu J, Gao C, Chen H. 2008. *In situ* analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. Chem Geol, 257: 34–43

Ma Q, Yang J, Du Y, Dai X, Chai R, Guo H, Xu Y. 2021. Early Triassic initial collision between the North China and South China blocks in the eastern Qinling Orogenic Belt. Tectonophysics, 814: 228965

Mantle G W, Collins W J. 2008. Quantifying crustal thickness variations in evolving orogens: Correlation between arc basalt composition and Moho depth. Geology, 36: 87–90

McKenzie N R, Smye A J, Hegde V S, Stockli D F. 2018. Continental growth histories revealed by detrital zircon trace elements: A case study from India. Geology, 46: 275–278

Meng L, Li Z X, Chen H, Li X H, Zhu C. 2015. Detrital zircon U-Pb geochronology, Hf isotopes and geochemistry constraints on crustal growth and Mesozoic tectonics of southeastern China. J Asian Earth Sci, 105: 286–299

Meng Q R, Zhang G W. 1999. Timing of collision of the North and South China blocks: Controversy and reconciliation. Geology, 27: 123

Meng Q R, Zhang G W. 2000. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling orogen, central China. Tectonophysics, 323: 183–196

Pitard P, Replumaz A, Chevalier M L, Leloup P H, Bai M, Doin M P, Thieulot C, Ou X, Balvay M, Li H. 2021. Exhumation History Along the Muli Thrust—Implication for Crustal Thickening Mechanism in Eastern Tibet. Geophys Res Lett, 48: e93677

Profeta L, Ducea M N, Chapman J B, Paterson S R, Gonzales S M H, Kirsch M, Petrescu L, Decelles P G. 2016. Quantifying crustal thickness over time in magmatic arcs. Sci Rep, 5: 17786

Qian T, Liu S, Li W, Gao T, Chen X. 2015. Early-Middle Jurassic evolution of the northern Yangtze foreland basin: A record of uplift following Triassic continent-continent collision to form the Qinling-Dabieshan orogenic belt. Int Geol Rev, 57: 327–341

Qiu K F, Deng J, He D Y, Rosenbaum G, Zheng X, Williams J A E, Yu H C, Balen D. 2023. Evidence of Vertical Slab Tearing in the Late Triassic Qinling Orogen (Central China) From Multiproxy Geochemical and Isotopic Imaging. J Geophys Res-Solid Earth, 128: e2022JB025514

Shao T, Cheng N, Song M. 2016. Provenance and tectonic-paleogeographic evolution: Constraints from detrital zircon U-Pb ages of Late Triassic-Early Jurassic deposits in the northern Sichuan basin, central China. J Asian Earth Sci, 127: 12–31

She Z, Ma C, Wan Y, Zhang J, Li M, Chen L, Xu W, Li Y, Ye L, Gao J. 2012. An Early Mesozoic transcontinental palaeoriver in South China: Evidence from detrital zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes. J Geol Soc Lond, 169: 353–362

Shi Y, Yu J H, Santosh M. 2013. Tectonic evolution of the Qinling orogenic belt, Central China: New evidence from geochemical, zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes. Precambrian Res, 231: 19–60

Sundell K E, George S W M, Carrapa B, Gehrels G E, Ducea M N, Saylor J E, Pepper M. 2022. Crustal thickening of the northern Central Andean Plateau inferred from trace elements in zircon. Geophys Res Lett, 49: e2021GL096443

Sundell K E, Saylor J E, Lapen T J, Horton B K. 2019. Implications of variable late Cenozoic surface uplift across the Peruvian central Andes. Sci Rep, 9: 4877

Sundell K E, Laskowski A K, Kapp P A, Ducea M N, Chapman J B. 2021. Jurassic to Neogene quantitative crustal thickness estimates in southern Tibet. GSA Today, 31: 4–10

Szwillus W, Afonso J C, Ebbing J, Mooney W D. 2019. Global crustal thickness and velocity structure from geostatistical analysis of seismic data. J Geophys Res-Solid Earth, 124: 1626–1652

Tang M, Chu X, Hao J, Shen B. 2021b. Orogenic quiescence in Earth's middle age. Science, 371: 728–731

Tang M, Ji W Q, Chu X, Wu A, Chen C. 2021a. Reconstructing crustal thickness evolution from europium anomalies in detrital zircons. Geology, 49: 76–80

Wang R, Xu Z, Santosh M, Cai Z, Xu X. 2019. Formation of Dabashan arcuate structures: Constraints from Mesozoic basement deformation in South Qinling Orogen, China. J Struct Geol, 118: 135–149

Winchester J A, Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. Chem Geol, 20: 325–343

Xu X. 2023. Late Triassic to Middle Jurassic tectonic evolution of the South China Block: Geodynamic transition from the Paleo-Tethys to the Paleo-Pacific regimes. Earth-Sci Rev, 241: 104404

Yang J, Cawood P A, Du Y, Huang H, Huang H, Tao P. 2012. Large Igneous Province and magmatic arc sourced Permian-Triassic volcanogenic sediments in China. Sediment Geol, 261-262: 120–131

Yang J, Cawood P A, Du Y. 2010. Detrital record of mountain building: Provenance of Jurassic foreland basin to the Dabie Mountains. Tectonics, 29: TC4011

Yang J, Gao S, Yuan H, Gong H, Zhang H, Xie S. 2007. Detrital zircon ages of Hanjiang River: Constraints on evolution of northern Yangtze Craton, South China. J China University Geoscis, 18: 210–222

Yu H C, Qiu K F, Pirajno F, Zhang P C, Dong W Q. 2022. Revisiting Phanerozoic evolution of the Qinling Orogen (East Tethys) with perspectives of detrital zircon. Gondwana Res, 103: 426–444

Zhang Y, Dong S, Wang H, Feng M, Thybo H, Li J, Gao R, Shi W. 2022a. Coupled lithospheric deformation in the Qinling Orogen, Central China: Insights from seismic reflection and surface-wave tomography. Geophys Res Lett, 49: e2022GL097760

Zhang Y, Yin C, Davis D W, Li S, Qian J, Zhang J, Gao P, Wu S, Li W, Xia Y. 2022b. Mechanism of crustal thickening and exhumation of southern Lhasa terrane during the Late Cretaceous: Evidence from high-pressure metamorphic rocks of the Eastern Himalayan Syntaxis. GSA Bull, 135: 608–620

Zhu D C, Wang Q, Weinberg R F, Cawood P A, Chung S L, Zheng Y F, Zhao Z, Hou Z Q, Mo X X. 2022. Interplay between oceanic subduction and continental collision in building continental crust. Nat Commun, 13: 7141

Zhu Z, Campbell I H, Allen C M, Burnham A D. 2020. S-type granites: Their origin and distribution through time as determined from detrital zircons. Earth Planet Sci Lett, 536: 116140

Zong K, Klemd R, Yuan Y, He Z, Guo J, Shi X, Liu Y, Hu Z, Zhang Z. 2017. The assembly of Rodinia: The correlation of early Neoproterozoic (ca. 900 Ma) high-grade metamorphism and continental arc formation in the southern Beishan Orogen, southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB). Precambrian Res, 290: 32–48

(责任编委: 万博)