

大别地区构造与地壳演化

——来自河流碎屑锆石 U-Pb-Hf 同位素的制约

汪子祺^{1,2}, 田洋^{2,3}, 金巍², 邓新², 王晶², 童喜润², 柳潇²

1. 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074

2. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 武汉 430205

3. 古生物与地质环境演化湖北省重点实验室, 武汉 430205

摘要 【目的】为系统揭示大别地区经历的岩浆构造热事件及地壳生长历程。【方法】对大别地区 3 条不同河流碎屑沉积物中的锆石开展 U-Pb-Hf 同位素分析。【结果】锆石 U-Pb 年龄可分为 4 组: 2 676~2 424 Ma、2 035~1 812 Ma、890~748 Ma、140~120 Ma。锆石 Hf 二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 亦可分为 4 组: 3 371~3 241 Ma、2 470~2 329 Ma、1 858~1 751 Ma 和 1 132~1 072 Ma。【结论】(1) 大别地区记录的岩浆活动可大致分为 9 个阶段, 分别为 4.00~3.00 Ga、2.90~2.40 Ga、2.10~1.80 Ga、0.90~0.70 Ga、0.14~0.12 Ga 的“爆发期”, 与 3.00~2.90 Ga、2.40~2.10 Ga、1.80~0.90 Ga、0.70~0.14 Ga 的“平静期”; (2) 大别地区主要经历了 4 期构造热事件, 分别发生在新太古代晚期 (~2.50 Ga)、古元古代中期 (~2.00 Ga)、三叠纪 (0.24~0.20 Ga) 与白垩纪 (0.14~0.12 Ga); (3) 大别地区主要经历 4 期显著的地壳生长, 地球形成初期约 4.4~4.1 Ga 地壳初始生长、4.0~2.8 Ga 地壳快速生长累积、2.6~2.0 Ga 持续地壳生长与 2.0 Ga 以来地壳缓慢生长, 注意到大别地区 2.7~2.4 Ga 的岩浆活动十分强烈, 说明该时期地壳再造事件也十分普遍; (4) ~2.0 Ga 之前大别与黄陵地区岩浆、变质、地壳生长事件存在明显差异, 表明在此之前两者更可能为独立的微陆块。

关键词 大别地区; 碎屑锆石; U-Pb-Hf 同位素; 地壳演化; 岩浆变质事件

第一作者简介 汪子祺, 女, 2000 年出生, 硕士研究生, 资源与环境, E-mail: wiskywang@foxmail.com

通信作者 田洋, 男, 正高级工程师, E-mail: 41834572@qq.com

中图分类号 P597 **文献标志码** A

0 引言

大陆地壳生长与演化及宜居地球的形成是地质学领域研究的焦点科学问题^[1]。大别地区位于扬子克拉通东北缘, 是华南板块与华北板块中生代俯冲—碰撞的汇聚带, 也是全球碰撞造山带研究的焦点地区^[2]。由于大陆碰撞和抬升导致古老基底岩石出露, 为揭示扬子克拉通地壳形成演化提供了宝贵素材。锆石在地壳循环过程中具有良好的稳定性, 其 U-Pb 年龄可真实地反映岩浆结晶年龄及经历的构造热事件信息, Lu-Hf 同位素组成是示踪源区特征及地壳生长事件的重要手段, 两者相结合可为揭示地壳形成与演化提供重要依据^[3-5]。

近些年来, 大别地区早期基底岩石及锆石年龄信息的相继发现, 使得该地区成为研究早期

收稿日期: 2023-10-30; 收修改稿日期: 2024-03-06

基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20242890, DD20240036, DD20221634) 和中国地质调查局武汉地质调查中心潜龙基金 (QL2022-08)
[Foundation: The China Geological Survey project, No. DD20242890; DD20240036; DD20221634; the Basic Research Foundation of Wuhan Center, China Geological Survey, No. QL2022-08]

地球演化的重要场所。如：在大别木子店地区，Qiu *et al.*^[6]识别了 3 颗年龄为 4.0 Ga 的继承岩浆锆石，Wang *et al.*^[7]发现了 3.81~3.77 Ga 的 TTG 片麻岩与 3.65 Ga 斜长角闪岩，Qiu *et al.*^[8]判识的 2.49~2.41 Ga TTG 片麻岩中的锆石具有弱富集的 Hf 同位素，反映了冥古宙地壳生长事件；徐大良等^[9]在蕲春地区报道了 2.9~2.4 Ga 的片麻岩；Zhao *et al.*^[10]在大别南缘浠水地区鉴别出 2.51~2.47 Ga 的高钾花岗岩片麻岩，其记录的地壳生长历史可追溯至~3.80 Ga，峰值为 3.8~3.7 Ga 和 3.5~3.4 Ga；邱啸飞等^[11]在团风地区识别了~2.0 Ga 的混合岩；田洋等^[12]在贾庙地区原大别岩群解体出 2.63~2.5 Ga 的片麻状花岗岩等。然而这些基底岩石往往呈透镜状产出于晚期花岗质岩石中，规模十分有限，限制了对大别地区地壳生长的理解。与之相比，河流流经范围大，运移能力强，其沉积物可携带流经区域地质体的信息^[13]，其中的锆石可以更全面地反映物源区大陆地壳生长和演化信息^[5,14-18]。

本文通过分析大别地区不同河流碎屑沉积物中锆石 U-Pb-Hf 同位素组成，揭示物源区特征，并综合区域岩浆、变质记录，恢复大别地区岩浆—构造热—地壳生长事件历程，为大别地区乃至扬子克拉通的地壳生长提供新证据。

1 区域地质背景

秦岭—桐柏—大别—苏鲁造山带是华北克拉通与华南板块之间的碰撞造山带，大别造山带位于该造山带的中部^[2]。商城—麻城断裂带将大别造山带分为东、西两部分（图 1）。按变质级别由北到南依次为北淮阳低级变质带、北大别高温超高压榴辉岩相变质带、中大别中温超高压榴辉岩相变质带、南大别低温超高压榴辉岩相变质带以及宿松低温高压蓝片岩相变质带 5 个构造单元，各单元之间均被断层分隔^[21-27]。

研究区位于东大别之北大别变质带，主要出露新元古代花岗质片麻岩，地层出露较少。地层主要为新太古界木子店岩组，古—中元古界大别岩群与第四系。木子店岩组以含条带状（紫苏辉石）磁铁角闪石英岩为特征，主体岩性为（含榴）黑云角闪斜长片麻岩（变粒岩）、（含榴）斜长角闪岩。大别岩群主要岩性为黑云二长（或斜长）片麻岩、变粒岩、浅粒岩、斜长角闪岩、白云石大理岩、磁铁角闪大理岩及少量黑云石英（片）岩，岩浆岩主要为白垩纪二长花岗岩、正长花岗岩。另有斜长角闪岩及太古宙—古元古代早期花岗质岩石零星出露。

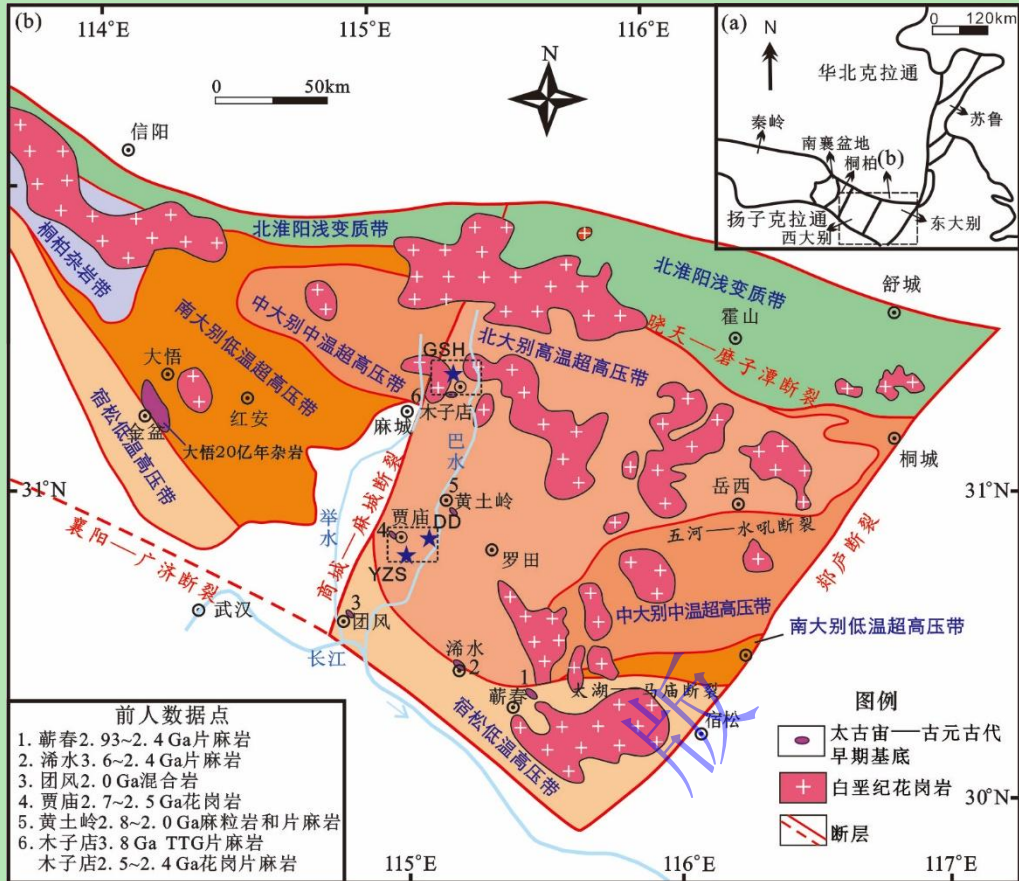


图 1 大别地区地质简图

数据来源: 1. 蕲春 2.93~2.4 Ga 片麻岩, 据徐大良等^[9]修改; 2. 浠水 3.6~2.4 Ga 片麻岩, 据 Zhao *et al.*^[10]修改; 3. 团风混合岩, 据邱啸飞等^[11]修改; 4. 贾庙 2.7~2.5 Ga 花岗岩, 据田洋等^[12]修改; 5. 黄土岭 2.8~2.0 Ga 麻粒岩, 据 Lei *et al.*^[19]修改; 黄土岭-2.8 Ga 片麻岩, 据夏群科等^[20]修改; 6. 木子店 TTG 片麻岩, 据 Wang *et al.*^[7]修改; 花岗岩片麻岩, 据 Qiu *et al.*^[6]修改

Fig.1 Schematic geological map of the Dabie Area

2 样品采集及分析方法

2.1 样品采集

本文锆石 U-Pb-Hf 同位素分析样品采自东大别一字水、但店与木子店地区的三条河流 (图 2)。样品 YZS-10G 采自贾庙乡一字水 (图 2a), 采样坐标: 115°4'51.59" E, 30°45'27.81" N; 样品 DD-1G 采自但店五桂河 (图 2a), 采样坐标: 115°11'26.63" E, 30°47'2.57" N; 样品 GSH-1G 采自木子店地区观石河 (图 2b), 采样坐标: 115°21'3.36" E, 31°11'33.60" N。三处河流碎屑沉积物均采自边滩, 主要为含砾不等粒砂, 砾石成分为花岗质岩石, 含量约 5%~8%; 不等粒砂主要为石英, 其次为花岗质岩屑与长石, 含有少量磁铁矿、角闪石与黑云母等暗色矿物。

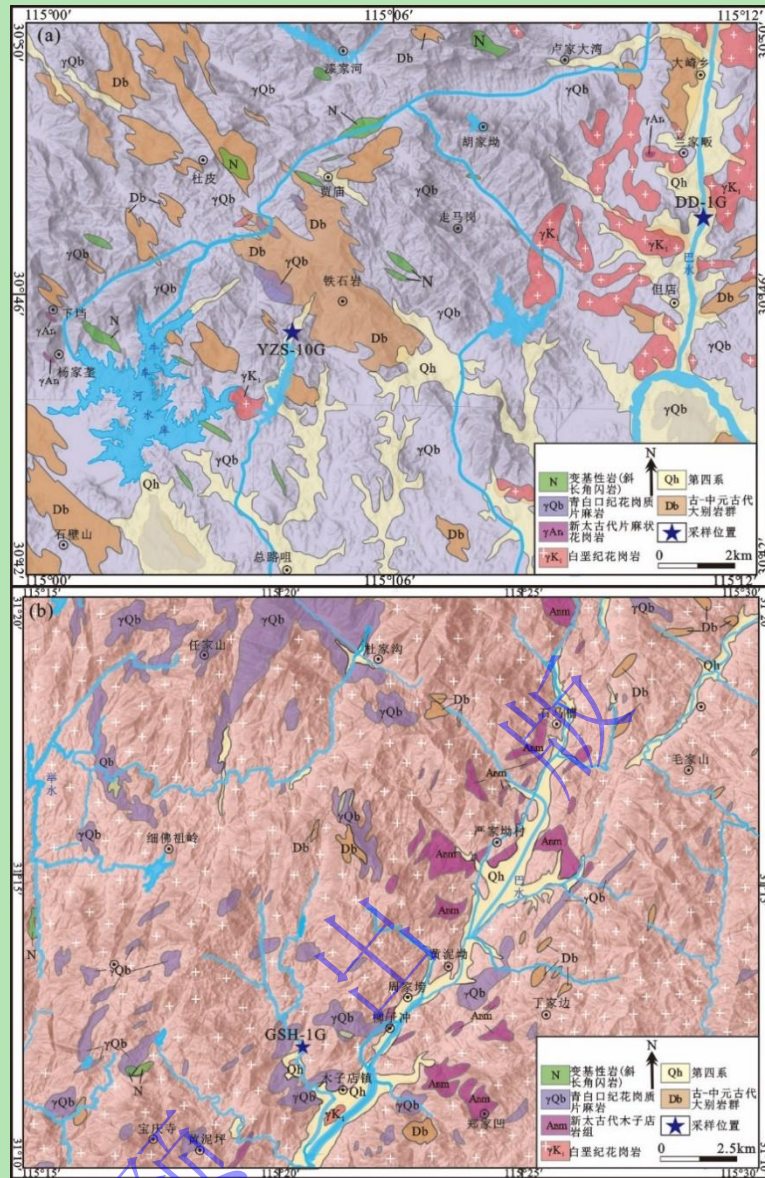


图2 大别山地区地质简图及采样点位置（实测）

Fig.2 Sketch map of the Dabie Mountain Area and sampling sites (based on our geologic survey)

2.2 分析方法

锆石挑选、制靶、透射光、反射光和阴极发光照相均在武汉上谱分析科技有限责任公司完成，样品经粉碎、淘洗后，采用重选和磁选技术进行初步分选，然后于双目镜下手工挑选。将代表性锆石粘在环氧树脂上进行制靶，抛光使其暴露 1/3~1/2 晶面，进行显微照相^[28]。其中阴极发光图像拍摄仪器为配备有 GATAN MINICL 系统的高真空扫描电子显微镜 (JSM-IT100)。工作电场电压为 10.0~13.0 kV，钨灯丝电流为 80~85 μA。

锆石的 U-Pb 定年在中国地质调查局武汉中心同位素地球化学实验室完成。锆石 U-Pb 定年分析利用 RESolution LR 193 nm 激光剥蚀系统和 ICAP-Q 电感耦合等离子体质谱的联用装置 (LA-ICP-MS) 完成。分析所用激光束斑直径为 29 μm，激光束能量密度 4 J/cm²，

频率为 3 Hz。样品测试时，每个点的分析时间为 90 s，其中背景信号 15 s，样品剥蚀 45 s，尾吹 30 s。锆石 U-Pb 定年分析采用锆石标准物质 91500 为外标进行同位素分馏校正，每分析 10 个样品点分析 2 次 91500，同时采用 Tanz 为监控样^[29]。详细操作条件和分析方法见 Zong *et al.*^[30]。锆石样品的同位素比值和元素含量采用软件 ICPMSDataCal 进行数据处理分析^[31]，U-Pb 谐和年龄和加权平均年龄计算及绘图采用软件 Isoplot 3.0 完成^[32]。使用 EXCEL 程序 ComPbCorr#3_15G 进行普通铅校正^[33]。对 $\geq 1\ 000\ \text{Ma}$ 的锆石，选择 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄，对小于 1 000 Ma 的锆石选择 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄，并剔除协和度小于 90% 的年龄，最后采用 Isoplot R 做碎屑锆石年龄频率直方图与年龄谐和图。分析数据见附表 1。

选取已获得 U-Pb 年龄的代表性谐和锆石进行 Hf 同位素分析。锆石 Lu-Hf 同位素分析在中国地质调查局武汉中心同位素地球化学实验室完成，所用仪器同锆石 U-Pb 定年分析。分析点选在锆石 U-Pb 分析点上或附近（图 3）。激光束斑直径为 43 μm ，激光剥蚀时间 60 s，激光频率 6 Hz，激光能量密度为 4 J/cm^2 。分析过程中采用锆石标准物质 Plešovice、Penglai 作为监控样，锆石 Hf 同位素数据处理分析采用软件 ICPMSDataCal 完成。Hf 同位素计算参数选取 $\lambda^{176}\text{Lu}=1.867\times 10^{-11}$ ^[34]； $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}_{\text{Crust}}=0.015$ ^[35]； $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_{\text{CHUR}}=0.282\ 793$ ， $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}_{\text{CHUR}}=0.033\ 8$ ^[36]， $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_{\text{DM}}=0.283\ 25$ ， $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}_{\text{DM}}=0.038\ 4$ ^[37]。分析数据见附表 1。

3 测试结果

3.1 锆石 U-Pb 特征

样品 YZS-10G 锆石多为浅褐色（图 3），少量灰白色，短柱状或椭圆状为主，长宽比介于 1:1~3:1 之间，长轴一般 100~300 μm ，大部分锆石的圆度较好。多数锆石具有明显的韵律环带和相对较亮的 CL 图像，指示岩浆成因；部分锆石韵律环带不太明显或消失，可能指示变质成因。选取 60 颗锆石进行锆石 U-Pb 年龄分析，获得 56 组谐和度大于 90% 的有效年龄，其中 6 颗锆石的 Th/U 比值小于 0.1，CL 图像无明显分带，指示其变质成因。其中 1 颗为新太古代变质锆石，年龄为 2 587 Ma，5 颗年龄集中于古元古代（~2.0 Ga），分别为 1 937 Ma、1 940 Ma、2 000 Ma、2 022 Ma、2 125 Ma。剩余 50 组锆石 Th/U 比值介于 0.19~2.10，CL 图像显示清晰或略微模糊的岩浆振荡环带，指示岩浆成因。锆石谐和年龄可分为 3 个年龄段（图 4a）：2 630~2 468 Ma 的锆石 19 颗，占比 34%，峰值年龄为 2 615 Ma；2 035~1 912 Ma 的锆石 5 颗，占比 9%，峰值年龄为 1 941 Ma；866~767 Ma 的锆石 7 颗，占比 13%，峰值年龄为 789 Ma。

样品 DD-1G 大部分锆石呈灰色，少部分呈亮白色，多为长柱状或椭圆状颗粒，长宽比最大可达 4:1，长轴 100~400 μm 。锆石多为棱角状或角砾状，圆度较差。选取 63 颗锆石进行 U-Pb 定年，获得了 58 组谐和度大于 90% 的有效年龄（图 3）。其中有 7 颗锆石的 CL 图像无明显分带，Th/U 比值小于 0.1，指示了变质成因，1 颗古元古代变质锆石年龄为 1 977 Ma，1 颗三叠纪变质锆石为 203 Ma，剩余 5 个为白垩纪早期，变质年龄为 127~121 Ma；剩余 51 组锆石的 Th/U 比值介于 0.17~1.40，CL 图像显示明显韵律环带，为岩浆成因锆石，年龄分布表现 4 个明显峰值（图 4b）：2 676~2 545 Ma 的锆石 11 颗，占比 19%，峰值年龄为 2 672 Ma；1 913~1 830 Ma 的锆石 10 颗，占比 17%，峰值年龄为 1 871 Ma；890~748 Ma 的锆石 15 颗，占比 26%，峰值年龄为 812 Ma；1 颗白垩纪岩浆锆石，其年龄为 128 Ma。

样品 GSH-1G 的锆石大部分呈灰白色，形态以短柱状或椭圆状为主，少量呈不规则状，长宽比介于 1:1~4:1 之间，长轴 100~400 μm ，形状多为浑圆状，圆度较好。选取 82 颗锆石进行 U-Pb 年龄分析获得 71 组有效年龄，其中 4 颗锆石的 Th/U 比值 < 0.1，CL 图像无明显分带，指示变质成因，其中 3 颗为中生代变质锆石，年龄分别为 128 Ma、133 Ma 和 211 Ma；剩余 1 颗变质锆石年龄 387 Ma。剩余 67 组谐和锆石的 Th/U 比值介于 0.14~2.20，CL 图像发育明显韵律环带，指示其为岩浆锆石。67 组岩浆锆石显示 3 个峰值段（图 4c），包括：2 515~2 424 Ma 的锆石 15 颗，占比 10%，峰值年龄为 2 500 Ma；1 915~1 812 Ma 的锆石 5 颗，占比 7%，峰值年龄为 1 874 Ma；142~120 Ma 的锆石 40 颗，占比 60%，峰值年龄为 128 Ma。

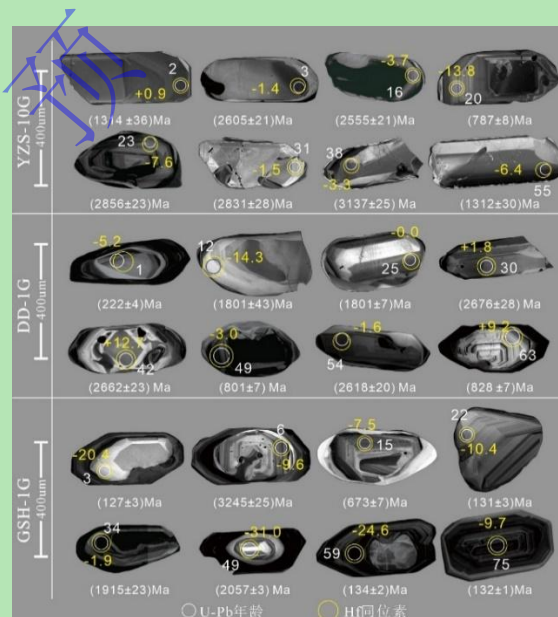


图 3 大别地区代表性河流碎屑锆石 CL 图像

Fig.3 Representative cathodoluminescence images for zircon from river in the Dabie area

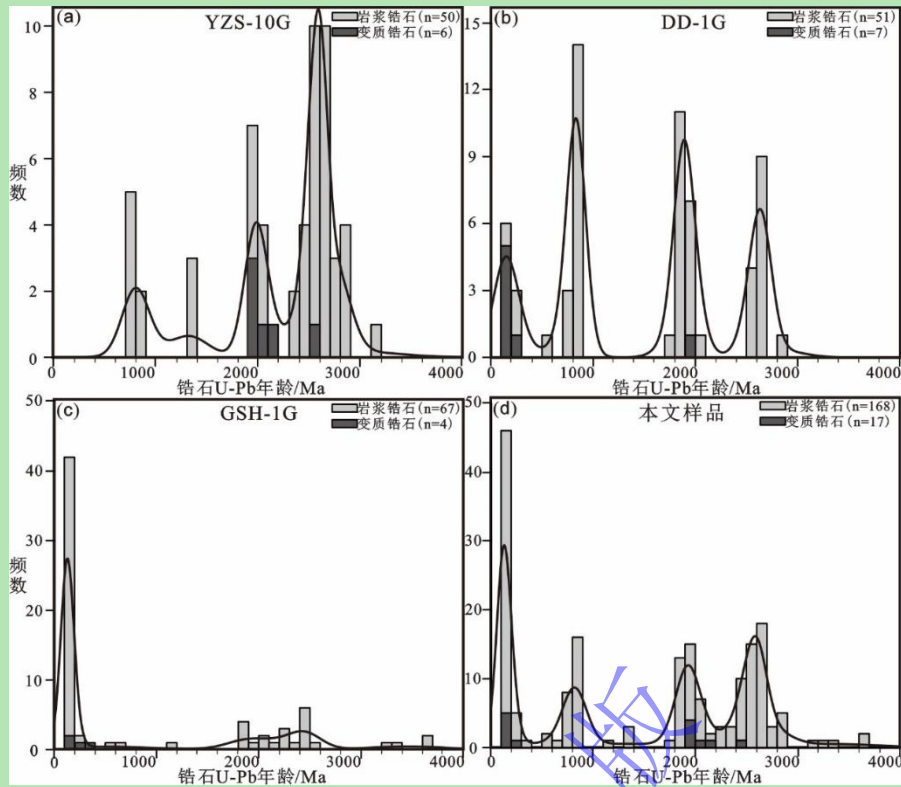


图4 大别地区河流碎屑锆石 U-Pb 年龄频数分布图

Fig.4 Histogram of detrital zircon U-Pb age frequency distribution in the Dabie area

3.2 锆石 Hf 同位素特征

本次工作分别获得样品 YZS-10G 中 21 颗、DD-1G 中 29 颗和 GSH-1G 中 32 颗，共计 82 颗锆石的 Hf 同位素组成。样品 YZS-10G 中 4 颗 > 2.8 Ga 的中太古代岩浆锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.000 864~0.001 163，平均值 0.000 945； $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化范围为 0.280 715~0.280 963，平均值为 0.280 801；其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -8.8~-1.5 之间（图 5），对应的 Hf 二阶段模式年龄（ $t_{\text{DM}2}$ ）变化介于 3 848~3 371 Ma 之间（图 6）。8 颗 2.8~2.5 Ga 的新太古代岩浆锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.000 297~0.000 799，平均值为 0.000 588； $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化范围为 0.280 935~0.281 107，平均值为 0.281 049； $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -0.8~4.3 之间，对应的 $t_{\text{DM}2}$ 介于 3 414~3 164 Ma 之间。2 颗年龄为 1 945 Ma、2 011 Ma 的古元古代岩浆锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.000 864、0.001 895，平均值为 0.001 380； $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化范围为 0.281 129、0.281 163，平均值为 0.281 146； $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -15.8、-14.5，对应的 $t_{\text{DM}2}$ 分别为 3 538 Ma、3 511 Ma。3 颗 900~700 Ma 的新元古代岩浆锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.000 690~0.000 874，平均值为 0.000 771； $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化范围为 0.281 915~0.282 212，平均值为 0.282 014； $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -13.8~-1.8 之间， $t_{\text{DM}2}$ 介于 2 515~1 824 Ma 之间。

样品 DD-1G 中 1 颗结晶年龄为 2.85 Ga 的中太古代岩浆锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.000 680； $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.280 956； $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -1.0（图 5）， $t_{\text{DM}2}$ 为 3 354 Ma（图 6）。6 颗结

晶年龄介于 2.8~2.5 Ga 的新太古代锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.000 491~0.000 958, 平均值为 0.000 713; $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化范围为 0.281 001~0.281 474, 平均值为 0.281 154; $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -6.2~12.7 之间, t_{DM2} 介于 3 428~2 366 Ma 之间。8 颗结晶年龄 2.1~1.8 Ga 的古元古代岩浆锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.000 374~0.001 027, 平均值为 0.000 585; $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化范围为 0.281 031~0.281 332, 平均值为 0.281 191; $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -18.7~-10.3, t_{DM2} 介于 3 693~3 153 Ma。9 颗结晶年龄 900~700 Ma 的岩浆锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.000 705~0.002 111, 平均值为 0.000 878; $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化范围为 0.282 353~0.282 547, 平均值为 0.282 427; $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -8.2~10.6, t_{DM2} 在 2 205~1 072 Ma 之间变化。样品 DD-1G 中 3 粒变质锆石结晶年龄分别为 122 Ma、127 Ma 和 203 Ma, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为 -38.9、-20.9 和 -11.3, t_{DM2} 分别为 3 539 Ma、2 441 Ma 和 1 904 Ma。

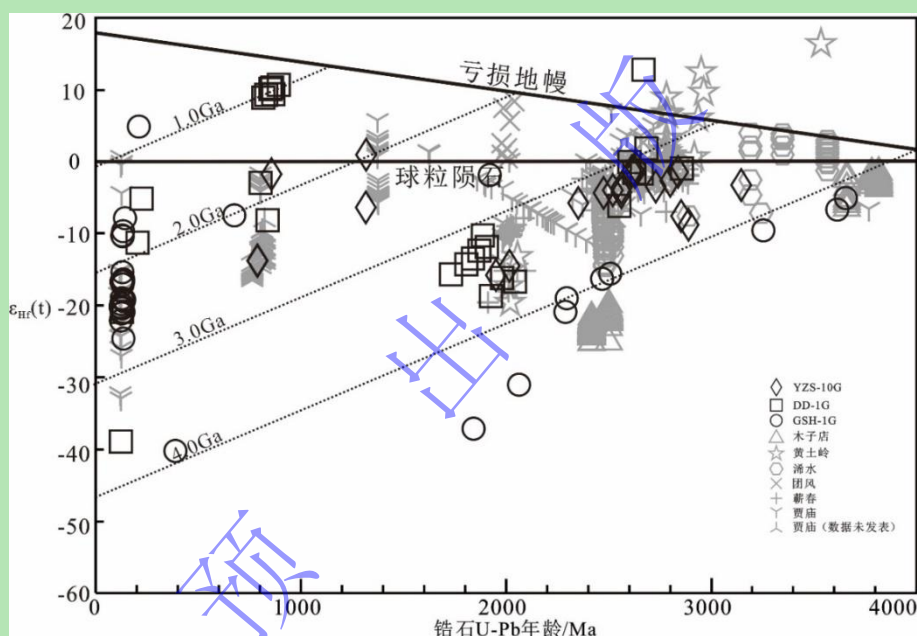


图 5 本文样品与大别地区锆石 U-Pb 年龄— $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 对比图 (含未发表数据)

数据来源:1.蕲春, 据徐大良等^[9]修改; 2.涪水, 据 Zhao *et al.*^[10]修改; 3.团风, 据邱啸飞等^[11]修改; 4.贾庙, 据田洋等^[12]、Li *et al.*^[38]、金巍等^[39]修改; 5.黄土岭, 据 Lei *et al.*^[19]、夏群科等^[20]修改; 6.木子店, 据 Qiu *et al.*^[6]、Wang *et al.*^[7]修改; 未发表数据采自大别贾庙地区, n=58

Fig.5 Detrital zircon U-Pb ages and Hf isotope data from the Dabie Area (Including unpublished data)

样品 GSH-1G 中 2 颗 3 646 Ma、3 604 Ma 的始太古代岩浆锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.000 543、0.001 115, 平均值为 0.000 829; $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.280 289、0.280 347, 平均值为 0.280 318; $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -5.1、-6.7 (图 5), t_{DM2} 为 4 235 Ma、4 297 Ma (图 6)。1 颗结晶年龄为 3 245 Ma 的古太古代岩浆锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.000 512; $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.280 444; $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 -9.6, t_{DM2} 为 4 184 Ma。1 颗结晶年龄为 2 500 Ma 的新太古代岩浆锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.000 155; $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.280 746; $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -15.6, t_{DM2} 为 3 957 Ma。3 颗结晶年龄 2.1~1.8

Ga 的古元古代岩浆锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.000 144~0.001 273, 平均值 0.000 788; $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化范围为 0.280 574~0.281 557, 平均值为 0.280 922; $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -37.1~-1.9 之间, t_{DM2} 介于 4 725~2 664 Ma 之间。16 颗 140~120 Ma 的中生代岩浆锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.000 244~0.002 099, 平均值 0.000 789; $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值变化范围为 0.282 015~0.282 436, 平均值为 0.282 196; $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -24.6~-9.7 之间, t_{DM2} 在 2 675~1 751 Ma 之间变化。3 粒 128 Ma、133 Ma 和 387 Ma 变质锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为 -10.3、-16.4 和 -40.2, 对应的 t_{DM2} 分别为 1 785 Ma、2 168 Ma 和 3 819 Ma。

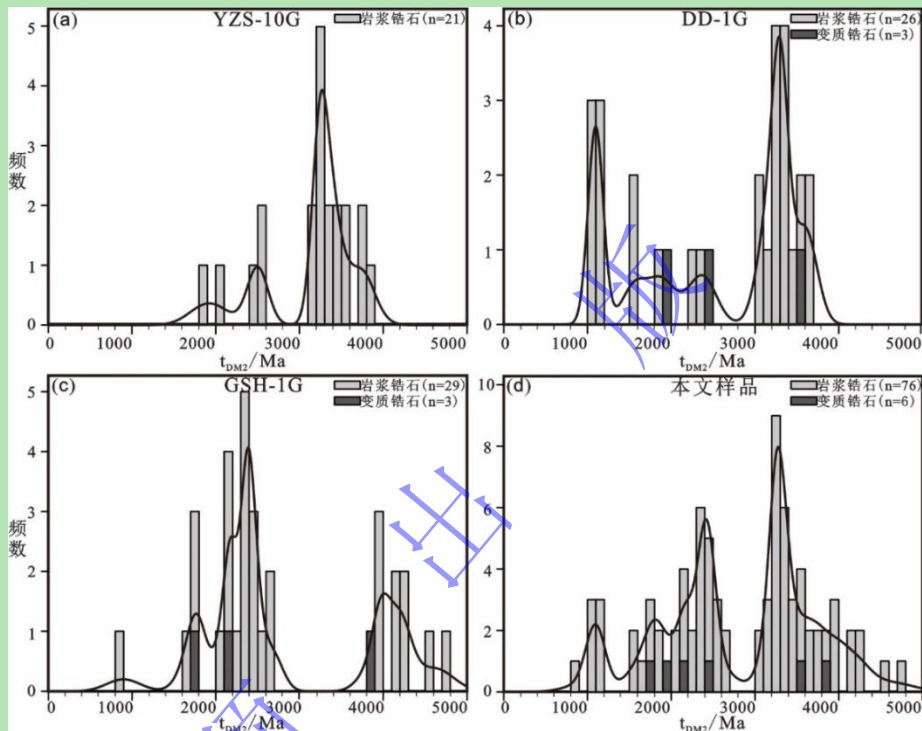


图 6 河流碎屑锆石 t_{DM2} 频数分布图

Fig.6 Histogram of t_{DM2} frequency distribution of detrital zircons from rivers

4 讨论

4.1 研究区大地构造归属

由于采样点位临近华北克拉通, 首先要对大地构造归属进行探讨。前人研究表明华北克拉通在新太古代晚期 (~2.50 Ga) 经历了强烈的岩浆活动, 古元古代 (1.95~1.85 Ga) 存在岩浆和变质事件, 新元古代岩浆活动较少^[40-41]。扬子克拉通在新太古代 (2.70~2.60 Ga) 经历岩浆活动最强烈的时期, 古元古代 (2.10~1.85 Ga) 发生岩浆和变质事件, 新元古代时期扬子周缘发生强烈的岩浆活动, 该期岩浆活动的年龄峰值约为 830 Ma^[16,42-43] (图 7)。本研究 3 件样品的锆石 U-Pb 年龄显示出 ~2.62 Ga、~2.00 Ga 和 ~812 Ma 的年龄峰值, 与扬子克拉通极为相似。另外, 前文已述, 研究区获得的变质锆石年龄主要集中在 ~2.0 Ga, 亦显

示了亲扬子属性，因此物源区更可能属于扬子克拉通。

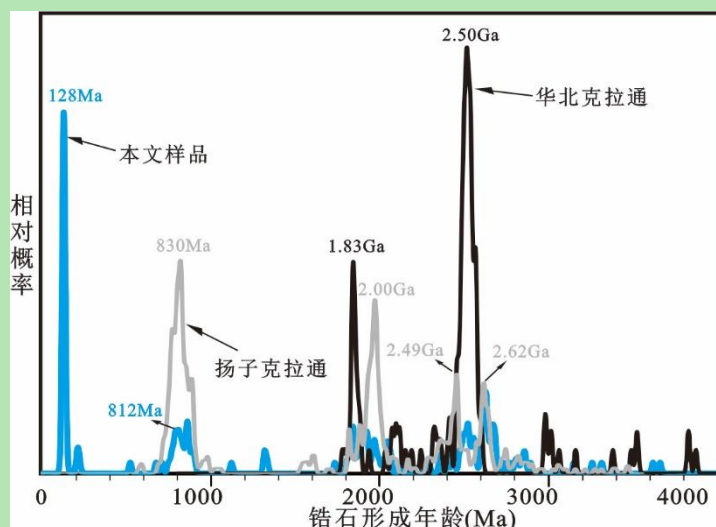


图7 本文样品与扬子、华北克拉通锆石 U-Pb 年龄频数分布对比
数据来源文献^[16,42-43]

Fig.7 Comparison of zircon U-Pb age distribution between this sample and Yangtze and North China

4.2 大别地区岩浆事件

虽然一些地质体难以发现或被剥蚀，但由于锆石的高稳定性，岩浆成因的锆石可以揭示源区经历的岩浆事件。本文样品 ($n=185$) 与结合前人岩浆岩锆石资料 ($n=779$) 绘制的锆石 U-Pb 年龄积累曲线形态相似，表明虽然样品数据有限，但仍可以有效反映大别地区岩浆事件 (图 8)。结合前人数据，大别地区岩浆活动记录划分为 9 个阶段。

4.00~3.00 Ga 持续岩浆活动：该阶段存在 5 颗年龄大于 2.9 Ga 的岩浆锆石，实验测试中虽未发现冥古宙锆石记录，但 Qiu *et al.*^[6] 在木子店地区花岗质片麻岩中实验测试出三颗年龄分别为 4 013 Ma、4 003 Ma 和 4 002 Ma 的岩浆锆石 (继承核)，说明大别地区记录的岩浆活动最早可追溯到冥古宙。同时，Wang *et al.*^[7] 报道了木子店地区 3.81~3.77 Ga 的 TTG 片麻岩与 3.65 Ga 的斜长角闪岩，Zhao *et al.*^[10] 在浠水片麻岩中识别了 3.56~3.18 Ga 的捕获岩浆锆石，徐大良等^[9] 在蕲春地区报道了 2.93 Ga 的花岗片麻岩，以上信息表明大别地区在该时期可能存在持续的岩浆活动 (图 8)。

3.00~2.90 Ga 寂静期：为大别地区岩浆活动平静期，鲜有岩浆锆石记录 (图 8)。

2.90~2.40 Ga 爆发期：样品中 50 颗岩浆锆石年龄在 2.9~2.4 Ga 之间，占比 30%。区域上该时期的基底岩石见有较多报道，如：团风地区混合岩中~2.85 Ga 的中太古代锆石^[11]、黄土岭原岩年龄~2.76 Ga 麻粒岩^[19]与~2.77 Ga 片麻岩^[20]、宿松新太古代 (2.7~2.5 Ga) 花岗片麻岩^[44]、贾庙地区 2.63~2.50 Ga 新太古代片麻状花岗岩^[12]、木子店地区 2.49~2.41 Ga 的 TTG 片麻岩等^[8]，说明这一时期为岩浆活动的强烈爆发期，峰值为 2.5 Ga，其原因可能

与全球体制下的板块启动有关。

2.40~2.10 Ga 寂静期：为大别地区岩浆活动的平静期，岩浆活动较少。

2.10~1.80 Ga 爆发期：样品中 30 颗锆石年龄分布于 2.1~1.8 Ga，占比 18%，指示大别地区发生较强烈的岩浆活动。其中 2.0 Ga 的岩浆活动及全球范围内 2.1~1.9 Ga 造山事件被认为与 Columbia 超大陆的形成有关^[45-47]。

1.80~0.90 Ga 寂静期：这一时期岩浆活动记录较少，加之长时间稳定的碳同位素组成和停滞的生物演化，被称为“沉寂的十亿年”（Boring Billion）^[48-50]。值得注意的是，在大别贾庙地区，Jin *et al.*^[51]识别了 1.37 Ga 的石英正长岩和二长花岗岩，Hu *et al.*^[52]发现了 1.36 Ga 的变火山岩，指示该时期大别地区经历了一期岩浆活动，可能是 Columbia 超大陆裂解的响应^[51]。

0.90~0.70 Ga 爆发期：测试结果中存在 24 颗岩浆锆石形成于该时期，占比 14%，指示该时期大别地区经历强烈的岩浆事件。事实上，新元古代花岗岩是大别地区最主要的岩石类型，分布广泛，如在大别宿松变质带李远等^[44]报道了新元古代（830~770 Ma）花岗片麻岩，孙洋等^[53]研究了年龄为 816 Ma 的鲁家寨岩体。

0.70~0.14 Ga 寂静期：为大别地区又一岩浆活动寂静期，鲜有岩浆锆石记录。

0.14~0.12 Ga 爆发期：岩浆活动较为强烈。实验测试包含 40 颗该时期岩浆锆石，占比 24%。区域上白垩纪花岗岩广泛分布，如：金巍等^[39]在但店地区鉴定了年龄为 124 Ma、120 Ma 的大崎山花岗岩；胡俊良等^[54]于木子店地区报道了 131 Ma 的黑云二长花岗岩^[52]；刘劲松等^[55]识别了木子店地区 129 Ma 的细粒二长花岗岩。该期花岗岩成因可能与西太平洋的板片俯冲及后撤作用或华南—华北板块碰撞造山后垮塌有关^[56-59]。

综上所述，大别地区岩浆事件可分为九个阶段，分别为 4.00~3.00 Ga、2.90~2.40 Ga、2.10~1.80 Ga、0.90~0.70 Ga、0.14~0.12 Ga 的爆发期，与 3.00~2.90 Ga，2.40~2.10 Ga，1.80~0.90 Ga，0.70~0.14 Ga 的平静期。

4.3 变质事件

4.3.1 新太古代变质作用（~2.5 Ga）

实验样品存在一颗年龄为 2 587 Ma 的新太古代变质锆石，与陈能松等^[60]在黄土岭发现年龄为 2 500~2 493 Ma 的变质锆石在时间上一致，虽然数据有限，但仍为新太古代晚期的变质事件提供了可靠证据。

4.3.1 古元古代变质事件（~2.0 Ga）

三件样品中有 6 颗变质锆石年龄为 2.1~1.8 Ga。该时期大别地区以发育麻粒岩相变质

作用^[61]及混合岩化作用^[62]为特征。邱啸飞等^[11]在大别地区得到~2.0 Ga 团风混合岩, Lei *et al.*^[19]在北大别黄土岭麻粒岩中获得了~2.0 Ga 的变质锆石年龄, 田洋等^[12]新太古代花岗岩中也识别了该时期的变质作用, 这些信息表明大别地区广泛经历了该期变质事件, 是一次规模较大的区域变质作用, 这种情况可能与大尺度地壳演化和板块构造密切相关^[61]。

4.3.2 三叠纪变质事件 (240~200 Ma)

实验测试出 2 颗年龄为 203 Ma、211 Ma 的变质锆石, 时间上与华南与华北板块碰撞拼合时限接近^[2]。区域上, 陈道公等^[63]研究指出南大别新店榴辉岩发生变质作用的时间在~220 Ma, 薛怀民等^[64]报道了北大别石竹河附近二长花岗岩片麻岩 229 Ma 的变质年龄, 指示大别地区普遍经历该期变质事件。

4.3.3 白垩纪变质事件 (140~120 Ma)

三件样品中存在 7 颗 140~120 Ma 变质锆石, 记录了早白垩世的变质事件。事实上, 大别地区广泛发育白垩纪的混合岩化作用, 如陈道公等^[65]在漫水河片麻岩中识别了~121 Ma 的变质深熔事件; 邓尚贤等^[66]和 Wang *et al.*^[67]得到~131 Ma 的混合岩化片麻岩年龄; 吴元保等^[68]发现大别地区经历了 137 Ma 和 124 Ma 的两期混合岩化变质事件。

综上所述, 大别地区在漫长的地质演化过程中主要经历了 4 期构造热事件。另外, 田洋等^[12]在大别贾庙地区识别了一颗年龄为 875 Ma 的变质锆石, 陡岭杂岩亦记录了 837 Ma 的变质事件^[69], 指示大别地区乃至整个扬子北缘可能均经历了新元古代变质事件。

4.4 区域地壳生长

由于存在沉积再旋回与长距离搬运的影响, 河流碎屑锆石能否用于反映采样点所在构造单元的地壳生长信息需要甄别。本文采集样品的三条河流源头均位于大别地区北部, 未流经其它地质单元 (图 1), 锆石年龄峰值对应的岩浆岩在北大别地区均有出露, 可作为直接物源 (图 2); 另外, 区域上除大别岩群存在体量极小的碎屑岩夹层外, 出露均为岩浆岩, 可基本排除沉积再旋回影响。因此, 实验采集获得的锆石 Hf 同位素数据可指示大别地区地壳形成与演化历程。

如图 8 所示, 大别地区河流碎屑锆石 Hf 二阶段模式年龄累积曲线可分为 4.0~3.0 Ga、2.6~1.5 Ga 和 1.2~0.8 Ga 三期明显地壳生长阶段和 3.0~2.6 Ga、1.5~1.2 Ga 两期地壳生长平缓阶段。为避免测试数据量偏少可能引起的信息偏差, 本文引入东大别地区发表的岩浆岩锆石 Hf 同位素数据进行补充 (图 8), 结果显示大别地区主要经历 4 期地壳生长: ①地球形成初期约 4.4~4.1 Ga 地壳初始生长; ②4.0~2.8 Ga 地壳快速生长累积; ③2.6~2.0 Ga 地壳持续生长, 注意到大别地区 2.7~2.4 Ga 的岩浆活动十分强烈, 说明该时期地壳再造事件也

十分普遍；④小于 2.0 Ga 地壳缓慢生长。另外，区域上出露的 120 Ma 的基性岩^[70]指示了白垩纪的地壳生长事件。

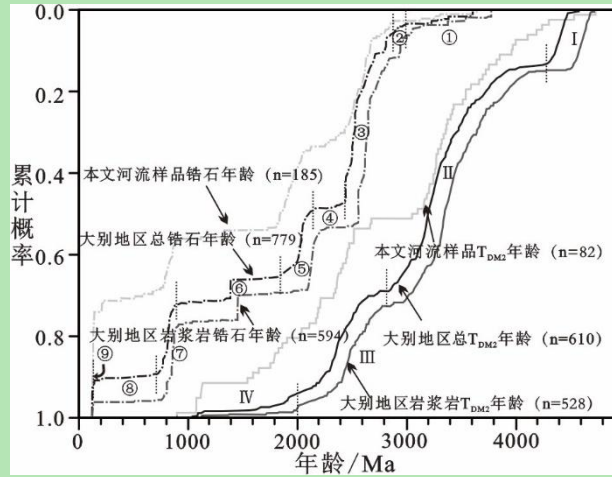


图 8 东大别地区锆石 U-Pb 与 Hf 二阶段模式年龄累积概率曲线图 (含未发表数据)

数据来源: Qiu *et al.* ^[6]; Wang *et al.* ^[7]; 徐大良等^[9]; Zhao *et al.* ^[10]; 邱啸飞等^[11]; 田洋等^[12]; Lei *et al.* ^[19]; 夏群科等^[20]; Li *et al.* ^[38]; 金巍等^[39]; 未发表数据采自大别贾庙地区, n=58

Fig.8 Cumulative age distribution (CDF) of U-Pb age and Hf Isotope data from detrital zircons from the eastern Dabie area (Including unpublished data)

4.5 对扬子克拉通早前寒武纪地壳演化的启示

早前寒武纪 (>2.0Ga) 时期, 黄陵地区经历了 3.30~3.00 Ga、3.00~2.90 Ga 和 2.75~2.60 Ga 三期主要岩浆事件^[71-73], 3.00~2.87 Ga、2.70~2.47 Ga 两期变质事件^[74-78]以及 3.60~3.00 Ga、3.00~2.90 Ga、2.75~2.70 Ga 三期主要地壳生长事件^[11,79-81]。前文所述, 大别地区早前寒武纪主要经历 4.0~3.0 Ga、2.9~2.4 Ga 的岩浆事件, ~2.5 Ga 的变质事件与 4.0~2.8 Ga、2.6~2.0 Ga 两期主要地壳生长阶段。显然, 早前寒武纪时期大别与黄陵地区经历了不同的岩浆、构造热与地壳生长历程, 两者更有可能是独立演化的微陆块。然而, 两者均经历了~2.0 Ga 的变质事件。事实上, 该期变质事件广泛记录于扬子西南缘与北缘, 如 Phan Si Pan^[82-83]、撮科^[84-85]、陡岭^[69,86]、肥东^[87-88]等。再者, 黄陵地区发育~2.15 Ga 的蛇绿混杂岩^[89-90]和 2.05~2.03 Ga 岛弧相关的富 Nb 镁铁质岩石^[91-92]。据此, 推测黄陵和大别微陆块可能在~2.0 Ga 发生了碰撞拼合, 是 Columbia 超大陆聚合的响应。

5 结论

(1) 大别地区的岩浆活动主要可以分为以下 9 个阶段: 冥古宙初始岩浆活动, 4.00~3.00 Ga 持续岩浆活动; 3.00~2.90 Ga 岩浆活动平静期; 2.90~2.40 Ga 岩浆活动强烈爆发期; 2.40~2.10 Ga 岩浆活动平静期; 2.10~1.80 Ga 的爆发期; 1.80~0.90 Ga, 除见有 1.37 Ga 岩浆活动外, 未见明显岩浆活动; 0.90~0.70 Ga 强烈的岩浆活动; 0.70~0.14 Ga 岩浆寂

静期; 0.14~0.12 Ga 强烈岩浆活动期。

(2) 大别地区主要经历 4 期变质事件: 新太古代变质事件 (~2.50 Ga)、古元古代变质事件 (~2.00 Ga)、三叠纪变质事件 (0.24~0.20 Ga) 与白垩纪变质事件 (0.14~0.12 Ga)。

(3) 大别地区主要经历 4 期地壳生长阶段: 地球形成初期约 4.4~4.1 Ga 地壳初始生长、4.0~2.8 Ga 地壳快速生长累积、2.6~2.0 Ga 持续生长与 2.0 Ga 以来地壳缓慢生长。

(4) 大别地区早前寒武纪岩浆—变质—地壳生长事件与黄陵地区存在明显差异, 但均经历了 2.0 Ga 变质事件, 表明黄陵和大别在~2.0 Ga 之前更可能是独立的微陆块, 在~2.0 Ga Columbia 超大陆聚合的背景下拼合在一起。

致谢 中国地质调查局武汉地质调查中心魏运许、彭练红教授级高级工程师在区域背景方面提供了帮助, 两位审稿专家和编辑老师在审稿过程中提出了宝贵的修改意见, 在此一并表示感谢。

参考文献 (References)

- [1] 朱日祥, 侯增谦, 郭正堂, 等. 宜居地球过去、现在与未来: 地球科学发展战略概要[J]. 科学通报, 2021, 66(35): 4485-4490. [Zhu Rixiang, Hou Zengqian, Guo Zhengtang, et al. Summary of "the past, present and future of the habitable Earth: Development strategy of Earth Science"[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(35): 4485-4490.]
- [2] Zheng Y F, Zhao Z F, Chen R X. Ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie-Sulu orogenic belt: Compositional inheritance and metamorphic modification[J]. Geological Society of London, 2019, 474(1): 89-132.
- [3] Hawkesworth C J, Kemp A I S. Evolution of the continental crust[J]. Nature, 2006, 443(7113): 811-817.
- [4] Kemp A I S, Hawkesworth C J, Paterson B A, et al. Episodic growth of the Gondwana supercontinent from hafnium and oxygen isotopes in zircon[J]. Nature, 2006, 439(7076): 580-583.
- [5] Iizuka T, Hirata T, Komiya T, et al. U-Pb and Lu-Hf isotope systematics of zircons from the Mississippi River sand: Implications for reworking and growth of continental crust[J]. Geology, 2005, 33(6): 484-488.
- [6] Qiu X F, Deng X, Jiang T, et al. First discovery of Hadean Xenocrystal zircons from granitic gneisses in the northern Dabie Orogen[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(5): 1775-1776.
- [7] Wang D, Qiu X F, Carlson R W. The Eoarchean Muzidian gneiss complex: Long-lived Hadean crustal components in the building of Archean continents[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2023, 605: 118037.
- [8] Qiu X F, Tong X R, Jiang T, et al. Reworking of Hadean continental crust in the Dabie orogen: Evidence from the Muzidian granitic gneisses[J]. Gondwana Research, 2021, 89: 119-130.
- [9] 徐大良, 彭练红, 邓新, 等. 大别山南缘翁门杂岩中太古代—古元古代岩浆构造热事件的识别及其地质意义[J]. 地球科学, 2023, 48(11): 4072-4087. [Xu Daliang, Peng Lianhong, Deng Xin, et al. Identification of Mesoarchean to Paleoproterozoic magmatic Tectono-thermal events from Wengmen complex in southern Dabie orogen and its geological significance[J]. Earth Science, 2023, 48(11): 4072-4087.]
- [10] Zhao T, Zhu G, Wu Q, et al. Evidence for discrete Archean microcontinents in the Yangtze Craton[J]. Precambrian Research, 2021, 361: 106259.
- [11] 邱啸飞, 江拓, 吴年文, 等. 大别造山带新太古代地壳岩石和古元古代混合岩化作用: 来自锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素证据[J]. 地质学报, 2020, 94(3): 729-738. [Qiu Xiaofei, Jiang Tuo, Wu Nianwen, et al. Neoproterozoic crustal rocks and Paleoproterozoic migmatization in the Dabie orogen: Evidence from zircon U-Pb age and Hf isotopes[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(3): 729-738.]

- [12] 田洋, 王伟, 金巍, 等. 大别贾庙新太古代花岗质岩石: 对扬子克拉通形成与演化的制约[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(11): 2219-2238. [Tian Yang, Wang Wei, Jin Wei, et al. Neoproterozoic granitic rocks from the Jiamiao area of the Dabie orogen: Implications on the Formation and early evolution of the Yangtze Craton[J]. Science China Earth Sciences, 2022, 52(11): 2219-2238.]
- [13] 陈雪, 陈岳龙, 包创, 等. 澜沧江河流沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及其地质意义[J]. 现代地质, 2014, 28(6): 1170-1182. [Chen Xue, Chen Yue-long, Bao Chuang, et al. U-Pb dating and Hf isotopic composition of detrital zircons in the sediments from the Lancang river and its geological significance[J]. Geoscience, 2014, 28(6): 1170-1182.]
- [14] Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, et al. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64(1): 133-147.
- [15] Rino S, Komiya T, Windley B F, et al. Major episodic increases of continental crustal growth determined from zircon ages of river sands; implications for mantle overturns in the Early Precambrian[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2004, 146(1/2): 369-394.
- [16] Liu X M, Gao S, Diwu C R, et al. Precambrian crustal growth of Yangtze craton as revealed by detrital zircon studies[J]. American Journal of Science, 2008, 308(4): 421-468.
- [17] Yang J, Gao S, Chen C, et al. Episodic crustal growth of North China as revealed by U-Pb age and Hf isotopes of detrital zircons from modern rivers[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2009, 73(9): 2660-2673.
- [18] Wang A D, Liu Y C. Neoproterozoic (2.5-2.8 Ga) crustal growth of the North China Craton revealed by zircon Hf isotope: A synthesis[J]. Geoscience Frontiers, 2012, 3(2): 147-173.
- [19] Lei N Z, Wu Y B. Zircon U-Pb age, trace element, and Hf isotope evidence for Paleoproterozoic granulite-facies metamorphism and Archean crustal remnant in the Dabie Orogen[J]. Journal of China University of Geosciences, 2008, 19(2): 110-134.
- [20] 夏群科, 郑永飞, 葛宁洁, 等. 大别山北部黄土岭片麻岩的锆石 U-Pb 年龄和氧同位素组成: 古老的原岩和多阶段历史[J]. 岩石学报, 2003, 19(3): 506-512. [Xia Qunke, Zheng Yongfei, Ge Ningjie, et al. U-Pb ages and oxygen isotope compositions of zircons from gneiss of Huangtuling, northern Dabie: Old protolith and multi-stage evolution[J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19(3): 506-512.]
- [21] Liu Y C, Li S G, Gu X F, et al. Ultrahigh-pressure eclogite transformed from mafic granulite in the Dabie orogen, east-central China[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2007, 25(9): 975-989.
- [22] Zheng Y F. A perspective view on ultrahigh-pressure metamorphism and continental collision in the Dabie-Sulu orogenic belt[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(20): 3081-3104.
- [23] Zheng Y F. Metamorphic chemical geodynamics in continental subduction zones[J]. Chemical Geology, 2012, 328: 5-48.
- [24] 徐旭峰, 石永红, 林伟, 等. 中大别腹地榴辉岩锆石 U-Pb 年龄及其类型归属[J]. 岩石学报, 2013, 29(5): 1559-1572. [Xu Xufeng, Shi Yonghong, Lin Wei, et al. Zircon U-Pb geochronology and typological classification of eclogites in the hinterland of the central Dabie[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(5): 1559-1572.]
- [25] 李静, 陆丽娜, 崔月菊, 等. 大别山榴辉岩中石榴石拉曼光谱特征及其地质学意义[J]. 矿物岩石, 2016, 36(1): 17-21. [Li Jing, Lu Lina, Cui Yueju, et al. Raman spectra features of the garnet in eclogite from the Dabie Mountain and its geological significances[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2016, 36(1): 17-21.]
- [26] 徐大良, 邓新, 彭练红, 等. 大别山碰撞造山带俯冲陆壳基底组成: 白垩纪脉岩捕获/继承锆石的证据[J]. 地学前缘, 2023, 30(4): 299-316. [Xu Daliang, Deng Xin, Peng Lianhong, et al. The components of the subducted continental basement within the Dabieshan orogenic belt as evidenced by xenocrystic/inherited zircons from Cretaceous dykes[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(4): 299-316.]
- [27] 孔令耀, 韩庆森, 郭盼, 等. 大别造山带元古代黑云紫苏斜长片麻岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 地质学报, 2023, 97(5): 1463-1477. [Kong Lingyao, Han Qingsen, Guo Pan, et al. Geochronology and geochemistry of the Early Proterozoic hypersthene plagioclase gneiss in the Dabie orogen and its geological implications[J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(5): 1463-1477.]

- [28] 童喜润, 陈伟雄, 江拓, 等. 大别造山带红安地块康家湾构造混杂岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成及其地质意义[J]. 地质学报, 2023, 97 (1): 52-68. [Tong Xirun, Chen Weixiong, Jiang Tuo, et al. U-Pb ages and Hf isotope compositions of the zircons in the Kangjiawan mélange of the Hongan block, Dabie orogenic belt and its geological implication[J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(1): 52-68.]
- [29] Hu Z C, Li X H, Luo T, et al. Tanz zircon megacrysts: a new zircon reference material for the microbeam determination of U-Pb ages and Zr-O isotopes[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2021, 36(12): 2715-2734.
- [30] Zong K Q, Klemd R, Yuan Y, et al. 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)[J]. Precambrian Research, 2017, 290: 32-48.
- [31] Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. *In situ* analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 2008, 257(1/2): 34-43.
- [32] Ludwig K R. User's manual for Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for microsoft excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 2003: 25-32.
- [33] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 2002, 192(1/2): 59-79.
- [34] Söderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, et al. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 219(3/4): 311-324.
- [35] Griffin W L, Wang X, Jackson S E, et al. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. Lithos, 2002, 61(3/4): 237-269.
- [36] Iizuka T, Yamaguchi T, Hibiya Y, et al. Meteorite zircon constraints on the bulk Lu-Hf isotope composition and early differentiation of the Earth[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(17): 5331-5336.
- [37] Blichert-Toft J, Albarède F. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1997, 148(1/2): 243-258.
- [38] Li Y, Liu Y C, Yang Y, et al. Petrogenesis and tectonic significance of Neoproterozoic meta-basites and meta-granitoids within the central Dabie UHP zone, China: Geochronological and geochemical constraints[J]. Gondwana Research, 2020, 78: 1-19.
- [39] 金巍, 田洋, 王晶, 等. 大别造山带白垩纪花岗岩对太古宙基底的再造: 来自 U-Pb 年代学、Sr-Nd-Hf 同位素的证据[J]. 地质学报, 2023, 97 (6): 1780-1796. [Jin Wei, Tian Yang, Wang Jing, et al. Reconstruction of Archaean basement in the Dabie orogen: Constraints from geochronology and Sr-Nd-Hf isotope of the Early Cretaceous Daqishan granite[J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(6): 1780-1796.]
- [40] Zhang H F, Zhai M G, Santosh M, et al. Geochronology and petrogenesis of Neoproterozoic potassic meta-granites from Huai'an Complex: Implications for the evolution of the North China Craton[J]. Gondwana Research, 2011, 20(1): 82-105.
- [41] Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, et al. Recycling Lower continental crust in the North China craton[J]. Nature, 2004, 432(7019): 892-897.
- [42] 赵军红, 王伟, 刘航. 扬子东南缘新元古代地质演化[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34 (2): 227-233. [Zhao Junhong, Wang Wei, Liu Hang, et al. Geological evolution of the southeastern Yangtze block during the Neoproterozoic[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34(2): 227-233.]
- [43] 涂城. 扬子克拉通北缘肥东杂岩地球化学研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020. [Tu Cheng. Geochemistry of the Feidong Complex in the northern margin of the Yangtze Craton[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.]
- [44] 李远, 刘贻灿, 杨阳, 等. 大别山宿松变质带花岗岩片麻岩的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素成分[J]. 地球科学与环境学报, 2018, 40 (1): 61-75. [Li Yuan, Liu Yican, Yang Yang, et al. Zircon U-Pb Ages and Hf-isotope compositions of Granitic Gneisses from the Susong Metamorphic Zone in the Dabie Orogen, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2018, 40(1): 61-75.]
- [45] Wu Y B, Gao S, Zhang H F, et al. Geochemistry and zircon U-Pb geochronology of Paleoproterozoic arc related granitoid in the northwestern Yangtze block and its geological implications[J]. Precambrian Research, 2012, 200-203: 26-37.
- [46] Wang X, Guo J W, Tao W, et al. Paleoproterozoic tectonic evolution of the Yangtze craton: Evidence from magmatism and sedimentation in the Susong area, South China[J]. Precambrian Research, 2021, 365: 106390.

- [47] 熊定一, 王孝磊, 邢光福. 从超大陆旋回看前寒武纪伟晶岩型锂矿的形成[J]. 华东地质, 2023, 44 (1) : 1-12. [Xiong Dingyi, Wang Xiaolei, Xing Guangfu. A supercontinental cycles perspective for the formation of Precambrian pegmatitic lithium deposits[J]. East China Geology, 2023, 44(1): 1-12.]
- [48] Buick R, Marais D J D, Knoll A H. Stable isotopic compositions of carbonates from the Mesoproterozoic Bangemall Group, northwestern Australia[J]. Chemical Geology, 1995, 123(1/2/3/4): 153-171.
- [49] Brasier M D, Lindsay J F. A billion years of environmental stability and the emergence of eukaryotes: New data from northern Australia[J]. Geology, 1998, 26(6): 555-558.
- [50] 黄天正, 王瑞敏, 沈冰. “中年地球”的磷循环与生物泵: 再谈“沉寂的十亿年”[J]. 科学通报, 2022, 67(15): 1614-1623. [Huang Tianzheng, Wang Ruimin, Shen Bing. The Phosphorus Cycle and Biopump of "Middle aged Earth": Further Discussion on "Silent Billion Years"[J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(15): 1614-1623.]
- [51] Jin W, Liu J H, Tian Y, et al. Mid-Mesoproterozoic (ca. 1.37 Ga) anorogenic magmatism in the Dabie orogen, northern Yangtze Craton: Response to the breakup of Columbia[J]. GSA Bulletin, 2023, doi: org/10.1130/B37141.1.
- [52] Hu Jun, Jin Wei, Tian Yang, et al. Deposition of a newly identified Mesoproterozoic iron formation from the Dabie orogen: Influenced by high-T hydrothermal fluid and redox stratification[J]. Precambrian Research, 2023, 390.
- [53] 孙洋, 马昌前, 张超. 大别山鲁家寨花岗岩地球化学、锆石年代学和 Hf 同位素特征: 扬子克拉通北东缘新元古代岩浆活动证据[J]. 地学前缘, 2011, 18 (2) : 85-99. [Sun Yang, Ma Changqian, Zhang Chao. Geochemistry, zircon geochronology and Hf isotopes of Lujiazhai granites from the Dabie Orogen: Evidence for the Neoproterozoic magmatism along the northeastern margin of Yangtze Block. Earth Science Frontiers, 2011, 18(2): 085-099.]
- [54] 胡俊良, 刘劲松, 刘阿睢, 等. 北大别木子店岩体斑状黑云二长花岗岩的年龄与成因: 锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素与稀土元素证据[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2018, 37 (4) : 750-759. [Hu Junliang, Liu Jinsong, Liu Asui, et al. Age and petrogenesis of the porphyritic biotite monzogranite in the Muzidian complex in northern Dabie mountains: Evidences from zircon U-Pb dating, Hf isotopes and REE geochemistry[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2018, 37(4): 750-759.]
- [55] 刘劲松, 胡俊良, 刘阿睢, 等. 大别山木子店地区细粒二长花岗岩脉的年龄和成因: 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素制约[J]. 地质通报, 2016, 35 (12) : 2088-2099. [Liu Jinsong, Hu Junliang, Liu Asui, et al. Age and origin of Muzidian fine-grained monzogranite dyke in Dabie orogenic belt: Zircon U-Pb dating and Hf isotopic constraints[J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(12): 2088-2099.]
- [56] Zheng Y F, Xu Z, Zhao Z F, et al. Mesozoic mafic magmatism in North China: Implications for thinning and destruction of cratonic lithosphere[J]. Science China Earth Sciences, 2018, 61(4): 353-385.
- [57] Zhu R X, Xu Y G. The subduction of the west Pacific plate and the destruction of the North China Craton[J]. Science China Earth Sciences, 2019, 62(9): 1340-1350.
- [58] Xu H J, Ma C Q, Ye K. Early Cretaceous granitoids and their implications for the collapse of the Dabie Orogen, eastern China: Shrimp zircon U-Pb dating and geochemistry[J]. Chemical Geology, 2007, 240(3/4): 238-259.
- [59] Zhao Z F, Zheng Y F, Wei C S, et al. Post-collisional granitoids from the Dabie orogen in China: Zircon U-Pb age, element and O isotope evidence for recycling of subducted continental crust[J]. Lithos, 2007, 93(3/4): 248-272.
- [60] 陈能松, 刘嵘, 孙敏, 等. 北大别黄土岭长英质麻粒岩的原岩、变质作用及源区热事件年龄的锆石 LA-ICPMS U-Pb 测年约束[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2006, 31 (3) : 294-300. [Chen Nengsong, Liu Rong, Sun Min, et al. LA-ICPMS U-Pb zircon dating for felsic granulite, Huangtuling area, north Dabieshan: Constraints on timing of its Protolith and granulite-facies metamorphism, and thermal events in its provenance[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2006, 31(3): 294-300.]
- [61] Qiu X F, Zhao X M, Yang H M, et al. Geochemical and Nd isotopic compositions of the Palaeoproterozoic metasedimentary rocks in the Kongling complex, nucleus of Yangtze craton, South China block: Implications for provenance and tectonic evolution[J]. Geological Magazine, 2018, 155(6): 1263-1276.

- [62] 吴元保, 陈道公, 郑永飞, 等. 北大别漫水河混合岩化片麻岩中锆石微区微量元素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2004, 20(5): 1141-1150. [Wu Yuanbao, Chen Daogong, Zheng Yongfei, et al. Trace element geochemistry of zircons in migmatitic gneiss at Manshuihe, North Dabieshan and its geological implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(5): 1141-1150.]
- [63] 陈道公, Delouie E, 倪涛. 大别地体新店榴辉岩变质锆石 U-Pb 年龄和氧同位素研究[J]. 中国科学 (D 辑): 地球科学, 2005, 35(8): 691-699. [Chen Daogong, Delouie E, Ni Tao. Metamorphic zircon from Xindian eclogite, Dabie Terrain: U-Pb age and oxygen isotope composition[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2005, 35(8): 691-699.]
- [64] 薛怀民, 董树文, 刘晓春. 北大别大山坑二长花岗片麻岩的地球化学特征与锆石 U-Pb 年代学[J]. 地球科学进展, 2003(02): 192-197. [Xue Huaimin, Dong Shuwen, Liu Xiaochun. Geochemical characteristics and U-Pb zircon dating of dashankeng monzonitic granitic gneiss in northeastern Dabie Mountains[J]. Advance In Earth Sciences, 2003(02): 192-197.]
- [65] 陈道公, 李彬贤, 夏群科, 等. 大别超高压碰撞造山带岩石锆石 U/Pb 同位素框架年代学[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20(4): 253-255. [Chen Daogong, Li Binxian, Xia Qunke, et al. Zircon U/Pb frame geochronology of ultra-high pressure zone rocks for Dabie Orogen[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2001, 20(4): 253-255.]
- [66] 邓尚贤, 王江海, 孙敏, 等. 湖北省罗田凤凰关混合岩浅色体的类型及其锆石 U-Pb 年龄[J]. 地球化学, 1997, 26(2): 75-86. [Deng Shangxian, Wang Jianghai, Sun Min, et al. Leucosome types and age of one-generation leucosome of the fenghuangguan migmatites in Luotian, Hubei province, central China[J]. Geochimica, 1997, 26(2): 75-86.]
- [67] Wang J H, Sun M, Deng S X. Geochronological constraints on the timing of migmatization in the Dabie Shan, East-central China[J]. European Journal of Mineralogy, 2002, 14(4): 513-524.
- [68] 吴元保, 唐俊, 张少兵, 等. 北大别两期混合岩化作用: SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄证据[J]. 科学通报, 2007, 52(8): 939-944. [Wu Yuanbao, Tang Jun, Zhang Shaobing, et al. Two periods of mixed lithiation in Beidabie: Evidence from SHRIMP zircon U-Pb ages[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(8): 939-944.]
- [69] 胡娟, 刘晓春, 陈龙耀, 等. 扬子克拉通北缘约 2.5Ga 岩浆事件: 来自南秦岭陡岭杂岩锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素证据[J]. 科学通报, 2013, 58(34): 3579-3588. [Hu Juan, Liu Xiaochun, Chen Longyao, et al. A ~2.5 Ga magmatic event at the northern margin of the Yangtze craton: Evidence from U-Pb dating and Hf isotope analysis of zircons from the Douling Complex in the South Qinling orogen[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(34): 3579-3588.]
- [70] 李全忠, 谢智, 徐夕生, 等. 大别造山带早白垩世基性岩的同位素特征及下地壳物质对岩浆源区的贡献[J]. 岩石学报, 2008, 24(8): 1771-1781. [Li Quanzhong, Xie Zhi, Xu Xisheng, et al. The isotopic characteristics of the Early-Cretaceous mafic rocks from Dabie Orogenic Belt and the contribution of the Lower crust to the magma source[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(8): 1771-1781.]
- [71] Chen K, Gao S, Wu Y B, et al. 2.6-2.7 Ga crustal growth in Yangtze craton, South China[J]. Precambrian Research, 2013, 224: 472-490.
- [72] Wei J Q, Wei Y X, Wang J X, et al. Geochronological constraints on the formation and evolution of the Huangling basement in the Yangtze craton, South China [J]. Precambrian Research, 2020, 342.
- [73] Gao S, Yang J, Zhou L, et al. Age and growth of the archaean kongling terrain, South China, with emphasis on 3.3 Ga Granitoid Gneisses[J]. American Journal of Science, 2011, 311(2): 153-182.
- [74] Wei Y X, Zhou W X, Hu Z X, et al. Geochronology and Geochemistry of Archaean TTG and Tremolite Schist Xenoliths in Yemadong Complex: Evidence for ≥ 3.0 Ga Archaean Continental Crust in Kongling High-Grade Metamorphic Terrane, Yangtze Craton, China[J]. Minerals, 2019, 9(11): 689.
- [75] Zhang S B, Zheng Y F, Wu P, et al. The nature of subduction system in the Neoproterozoic: magmatic records from the northern Yangtze Craton, South China[J]. Precambrian Research, 2020, 347: 105834..
- [76] Guo J L, Gao S, Wu Y B, et al. 3.45 Ga granitic gneisses from the Yangtze Craton, South China: Implications for Early Archaean crustal growth[J]. Precambrian Research, 2014, 242: 82-95.
- [77] Guo J L, Wu Y B, Gao S, et al. Episodic Paleoproterozoic (3.3-2.0 Ga) granitoid magmatism in Yangtze Craton, South China: Implications for late Archaean tectonics[J]. Precambrian Research, 2015, 270: 246-266.

- [78] Qiu Y M, Gao S, McNaughton N J, et al. First evidence of >3.2 Ga continental crust in the Yangtze craton of South China and its implications for Archean crustal evolution and Phanerozoic tectonics[J]. *Geology*, 2000, 28(1): 11-14.
- [79] Li Y H, Zheng J P, Ping X Q, et al. Complex growth and reworking processes in the Yangtze cratonic nucleus[J]. *Precambrian Research*, 2018, 311: 262-277.
- [80] Jiao W F, Wu Y B, Yang S H, et al. The oldest basement rock in the Yangtze Craton revealed by zircon U-Pb age and Hf isotope composition[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 52(9): 1393-1399.
- [81] 邱啸飞, 陈伟雄, 徐大良, 等. 扬子陆核崆岭杂岩太古宙地壳演化[J]. *华南地质*, 2022, 38(01): 56-66. [Qiu Xiaofei, Chen Weixiong, Xu Daliang, et al. Crustal Evolution in Archean for the Kongling Complex in the Yangtze Craton Nucleus[J]. *South China Geology*, 2022, 38(1): 56-66.]
- [82] Zhao T, Cawood PA, Wang K, et al. Neoproterozoic K-rich granites in the Phan Si Pan Complex, north Vietnam: Constraints on the early crustal evolution of the Yangtze Block[J]. *Precambrian Research*, 2019, 332, 105395.
- [83] Zhao T, Li J, Liu G, et al. Petrogenesis of Archean TTGs and potassic granites in the southern Yangtze Block: Constraints on the early formation of the Yangtze Block[J]. *Precambrian Research*, 2020, 347, 105848.
- [84] 崔晓庄, 任光明, 孙志明, 等. 扬子陆块西南缘早前寒武纪撮科杂岩记录的多期岩浆—变质事件[J]. *地球科学*, 2020, 45, 3054-3069. [Cui Xiaozhuang, Ren Guangming, Sun Zhiming, et al. Multiple Tectonothermal Events Recorded in the Early Precambrian Cuoke Complex in the Southwestern Yangtze Block, South China[J]. *Earth Science*, 2020, 45(8): 3054-3069.]
- [85] Cui X Z, Wang J, Wang X C, et al. Early crustal evolution of the Yangtze Block: Constraints from zircon U-Pb-Hf isotope systematics of 3.1-1.9 Ga granitoids in the Cuoke Complex, SW China[J]. *Precambrian Research*, 2021, 357, 106155.
- [86] Wu Y B, Zhou G Y, Gao S, et al. Petrogenesis of Neoproterozoic TTG rocks in the Yangtze Craton and its implication for the formation of Archean TTGs[J]. *Precambrian Research*, 2014, 254, 73-86.
- [87] 涂城, 张少兵, 苏克, 等. 肥东杂岩锆石 U-Pb 年龄和 Lu-Hf 同位素: 对扬子克拉通统一结晶基底的限制. *地球科学*, 2021, 46, 1630-1643. [Tu Cheng, Zhang Shaobing, Su Ke, et al. Zircon U-Pb Dating and Lu-Hf Isotope Results for Feidong Complex: Implications for Coherent Basement of the Yangtze Craton. *Earth Science*, 2021, 46(5): 1630-1643.]
- [88] Yuan X, Niu M, Cai Q, et al. The nature of Paleoproterozoic basement in the northern Yangtze and its geological implication[J]. *Precambrian Research*, 2022, 378, 106761.
- [89] Han Q, Peng S, Kusky T, et al. A Paleoproterozoic ophiolitic mélange, Yangtze craton, South China: Evidence for Paleoproterozoic suturing and microcontinent amalgamation[J]. *Precambrian Research*, 2017, 293:13-38.
- [90] Zhou W, Huang B, Wei Y, et al. Paleoproterozoic ophiolitic mélanges and orogenesis in the northern Yangtze Craton: Evidence for the operation of modern-style plate tectonics[J]. *Precambrian Research*, 2021, 364: 106385.
- [91] Han Q, Peng S, Polat A, et al. A ca.2.1Ga Andean-type margin built on metasomatized lithosphere in the northern Yangtze craton, China: Evidence from high-Mg basalts and andesites[J]. *Precambrian Research*, 2018, 309: 309-324.
- [92] Han Q, Peng S. Paleoproterozoic subduction within the Yangtze Craton: Constraints from Nb-enriched mafic dikes in the Kongling complex[J]. *Precambrian Research*, 2020, 340: 105634.

Tectonic and Crustal Evolution in the Dabie Region: Constraints from U-Pb-Hf Isotopes of River Clastic Zircons

Wang Ziqi^{1,2}, Tian Yang^{2,3}, Jin Wei², Deng Xin², Wang Jing², Tong Xirun², Liu Xiao²

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Sciences, China University (Wuhan) of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Wuhan Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Central South China), Wuhan 430205, China

3. Hubei Key Laboratory of Paleontology and Geological Environment Evolution, Wuhan 430205, China

Abstract: [Objective] This study aimed to systematically reveal the magmatic tectonic thermal events and crustal growth processes experienced in the Dabie region. [Methods] U-Pb Hf isotope studies were conducted on zircons from three different river debris sediments in the Dabie region. [Results] The results showed that zircon U-Pb ages can be divided into four groups: 2 676-2 424, 2 03-1 812, 890-748, and 140-120 Ma. The zircon Hf two-stage model age (t_{DM2}) can also be divided into four groups: 3 371-3 241, 2 470-2 329, 1 858-1 751, and 1 132-1 072 Ma. [Conclusions] (1) The magmatic activity records in the Dabie region can be roughly divided into nine stages. The "quiet periods" are 3.00-2.90, 2.40-2.10, 1.80-0.90, and 0.70-0.14 Ga respectively, and the "explosive periods" are 4.00-3.00, 2.90-2.40, 2.10-1.80, 0.90-0.70, and 0.14-0.12 Ga. (2) The Dabie region has experienced four metamorphic events, which occurred in the Late Neoproterozoic (~2.50 Ga), Middle Paleoproterozoic (~2.00 Ga), Triassic (0.24-0.20 Ga), and Cretaceous (0.14-0.12 Ga). (3) The Dabie region mainly experienced four stages of crustal growth: the initial growth of the Earth's crust was approximately 4.4-4.1 Ga in the early stage of Earth formation; there was rapid growth and accumulation of crust from 4.0-2.8 Ga; 2.6 to 2.0 Ga experienced long-term crustal growth, with strong the magmatic activity at 2.7 to 2.4 Ga in the Dabie area, indicating that crustal reconstruction events were also extremely common during this period; crust grew slowly after 2.0 Ga. (4) Before 2.0 Ga, there were significant differences in magma, metamorphism, and crustal growth events between the Dabie and Huangling regions, indicating that the two were more likely independent micro blocks before this.

Keywords: Dabie region; debris zircon; U-Pb-Hf isotope; crustal evolution; magmatic metamorphic events