

大别山镁铁质下地壳的 Pb 同位素成分: 来自榴辉岩的制约

古晓锋^{1,2}, 刘贻灿^{1,2}, 刘佳^{1,2}

(1. 中国科学院壳幔物质与环境重点实验室, 安徽 合肥 230026;
2. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026)

摘要:北大别高温超高压杂岩带中榴辉岩的岩石学和地质年代学研究已经证明它们为华南板块新元古代镁铁质下地壳岩石经三叠纪深俯冲变质成因。基于此,开展了北大别榴辉岩的 Pb 同位素地球化学研究。结果表明:北大别榴辉岩表现出与北大别片麻岩相似的低放射性成因 Pb 同位素特征,并具有更低的 $N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb})$ 值;其初始 Pb 同位素组成分别为 $N(^{206}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb})_i = 15.217 \sim 17.522$, $N(^{207}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb})_i = 15.077 \sim 15.540$ 和 $N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb})_i = 35.219 \sim 38.082$,表现出目前已知的大别造山带 3 个含榴辉岩的超高压变质岩片中最低的 Pb 同位素组成,这进一步证明北大别榴辉岩的原岩来自于俯冲镁铁质下地壳;北大别榴辉岩表现出较宽的 Pb 同位素组成变化范围,其中最低的 Pb 同位素组成源自于具有低 $w(\text{U})/w(\text{Pb})$ 值、低 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值演化特征的晚太古代至古元古代镁铁质下地壳,而相对较高的 Pb 同位素组成则继承于新元古代底侵的幔源岩浆,表明北大别榴辉岩的 Pb 同位素特征是幔源岩浆混染古老镁铁质下地壳的结果。与大别山中生代埃达克质岩的 Pb 同位素对比研究表明,早白垩纪拆沉再循环的陆壳物质中不仅含有镁铁质下地壳岩石,还含有长英质下地壳物质,大别山深部的长英质下地壳随镁铁质下地壳一起拆沉并再循环进入地幔。

关键词:地球化学;榴辉岩;Pb 同位素;镁铁质下地壳;新元古代;地壳混染;大陆深俯冲;北大别
中图分类号:P597 **文献标志码:**A

Pb Isotopic Compositions of Mafic Lower Continental Crust in Dabie Orogen, China: Constraint from the Eclogites

GU Xiao-feng^{1,2}, LIU Yi-can^{1,2}, LIU Jia^{1,2}

(1. Key Laboratory of Crust-mantle Materials and Environments, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026, Anhui, China; 2. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China)

Abstract: The eclogites from the North Dabie high-temperature and ultrahigh-pressure complex zone in central China have been previously documented by petrology and geochronology to be transformed from the Neoproterozoic mafic lower continental crust underneath South China block during the Triassic continental deep subduction. An integrated study of Pb isotopic geochemistry on the whole rocks and omphacites of the eclogites from North Dabie was carried out, providing new insight into the Pb isotopic compositions of the mafic lower continental crust. The results

收稿日期:2016-09-14

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2015CB856104);国家自然科学基金项目(41273036,41503002);中央高校基本科研业务费专项资金项目

作者简介:古晓锋(1982-),男,河南漯河人,副研究员,理学博士,博士后,E-mail:xfgu@ustc.edu.cn。

show that the eclogites here display low radiogenic Pb isotopic characteristics similar to the surrounding gneisses with even lower $N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb})$; $(N(^{206}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_i$, $(N(^{207}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_i$ and $(N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_i$ of the eclogites are 15.217-17.522, 15.077-15.540 and 35.219-38.082, respectively, showing the lowest Pb isotopic compositions in the three eclogite-bearing ultrahigh-pressure metamorphic slices of Dabie orogen, and documenting a mafic lower-crustal origin of their protoliths; the variation range of Pb isotopic compositions of the eclogites is large, and the lowest Pb isotopic compositions are demonstrated to be derived from the Paleoproterozoic to Archean mafic lower continental crust with low $w(\text{U})/w(\text{Pb})$ and $w(\text{Th})/w(\text{U})$, while the relatively higher Pb isotopic compositions are inherited from the Neoproterozoic mantle-driven magma, suggesting the precursors of the eclogites from North Dabie are formed by mantle-driven magma contaminated with variable degrees of ancient mafic lower continental crustal materials during the Neoproterozoic. Compared to the Pb isotopic compositions of the Mesozoic adakitic rocks derived from partial melting of delaminated lower continental crust in Dabie orogen, it is suggested that the recycled lower crustal materials contain both mafic and felsic lower-crustal rocks, implying the lowermost felsic lower continental crust together with the whole mafic lower continental crust in Dabie orogen may have been delaminated and recycled into the underlying convective mantle.

Key words: geochemistry; eclogite; Pb isotope; mafic lower continental crust; Neoproterozoic; crustal contamination; continental deep subduction; North Dabie

0 引言

Pb 同位素在上、下地壳和地幔之间有截然不同的演化特征^[1-3],有助于识别岩石在大陆地壳中的初始位置,示踪壳幔物质循环等^[4-8],因此,越来越多地被用在造山带地球化学研究中。位于华南板块和华北板块之间的大别—苏鲁造山带作为世界上出露面积最大的陆-陆碰撞形成的超高压变质带,多位学者对其中的高压—超高压变质岩开展了 Pb 同位素地球化学研究工作^[5-6,8-14]。Pb 同位素填图研究显示,大别山 3 个超高压变质带(南大别低温榴辉岩带、中大别中温超高压变质带、北大别高温超高压杂岩带)分别表现出不同的 Pb 同位素特征^[5-6,10-12,14]。中大别和南大别具有相对较高的放射性成因 Pb 同位素组成,源于俯冲的中、上地壳;而北大别则具有低放射性成因 Pb 同位素组成,源于俯冲的下地壳^[5-6]。但是,从目前地表出露的岩石组成及 Pb 同位素研究来看,大别造山带折返至地表的高压—超高压变质岩主要是相对密度较轻的俯冲上地壳及长英质下地壳岩石^[6],地球物理学研究更显示大别造山带现在缺乏镁铁质下地壳^[15]。大别造山带中镁铁质下地壳可能大多数已经在三叠纪深俯冲过程中与长英质下地壳拆离后再循环进入了上地幔^[16-20]。因此,了解这些深俯冲镁铁质下地壳岩石的地球化学性质

对研究壳幔物质相互作用和识别碰撞后岩浆活动的源区具有重要意义。然而,由于大别造山带中镁铁质下地壳俯冲变质成因的榴辉岩及相关岩石很少出露^[20-22],因而其研究程度很低。

近年来,Liu 等在北大别东部和西南部陆续都发现有榴辉岩^[20,23-25],并在其中发现了金刚石、柯石英等超高压变质证据^[21,24,26-28];岩石学和地质年代学研究证明它们经历了三叠纪超高压变质作用^[20-21,28-30],属于印支期华南俯冲陆壳的一部分。其中,北大别西南部的榴辉岩更被证明是华南板块镁铁质下地壳俯冲变质成因^[20,25]。本文拟对北大别西南部(罗田地区)榴辉岩开展 Pb 同位素研究,结合前人对北大别东部榴辉岩的研究结果,以查清北大别榴辉岩 Pb 同位素特点,探讨大别山深俯冲镁铁质下地壳 Pb 同位素特征,为深俯冲壳幔物质循环及与拆沉镁铁质下地壳相关的大别山中生代碰撞后岩浆活动提供 Pb 同位素制约。

1 区域地质背景和岩石学描述

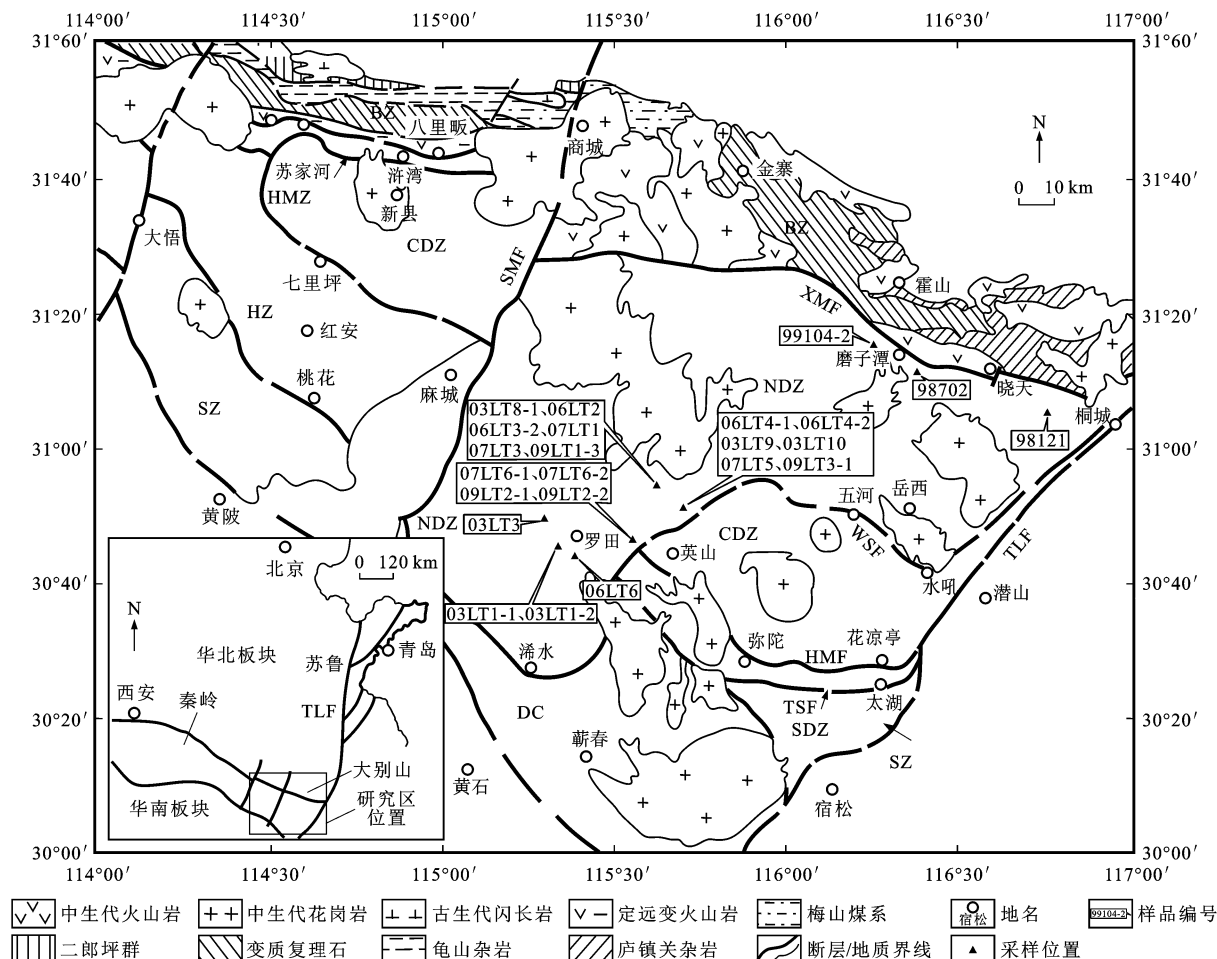
大别造山带位于秦岭—大别—苏鲁造山带的中段,是三叠纪华南板块向华北板块之下俯冲形成的碰撞造山带^[9,31-33]。它包含了几个与大陆深俯冲、碰撞造山作用相关的不同变质程度岩石单位^[20,26],从南到北,可分为宿松变质杂岩带、南大别低温榴

辉岩带、中大别中温超高压变质带、北大别高温超高压杂岩带及北淮阳带等构造岩石单位(图 1)。它们之间依次分别被太湖—山龙、花凉亭—弥陀、水吼—五河及晓天—磨子潭等断裂带或韧性剪切带所分割。其中,南大别、中大别和北大别都发现了超高压变质岩,属于俯冲的华南板块,并具有不同的变质过程^[19-21,26-27,30]。

中大别中温超高压变质带主要由正片麻岩和表壳岩组成,含有大量榴辉岩、副片麻岩、硬玉石英岩和大理岩等一系列超高压变质岩;南大别低温榴辉岩带则主要为榴辉岩及二云绿帘斜长片麻岩、大理岩等副变质岩^[31,34-37]。变质岩中金刚石、柯石英和柯石英假象等超高压变质证据的发现^[31,34,36-39],表明中大别和南大别都经历了超高压变质作用,指示中大别超高压变质的温度为 700 °C~850 °C,压力高于 2.8 GPa,南大别榴辉岩峰期变质的温度为 670 °C,

压力为 3.3 GPa。Pb 同位素研究^[5-6,14]进一步表明,中大别和南大别具有较高的放射性成因 Pb 同位素特征,来自于俯冲的中、上地壳。

北大别高温超高压杂岩带主要岩石类型有英云闪长质和花岗质片麻岩,少量呈布丁状或透镜状包裹于片麻岩中的变橄榄岩、石榴辉石岩、含石榴子石斜长角闪岩、麻粒岩及榴辉岩等,还有中生代辉长岩、辉石岩、花岗岩类等^[30]。该杂岩带变质变形强烈,目前主要表现为角闪岩相,局部保留了麻粒岩相和榴辉岩相矿物组合^[18,20-21,28,40-41],在北大别西南部罗田穹窿一带还残留有古元古代变质形成的中酸性麻粒岩^[42-45]。徐树桐等在北大别榴辉岩和片麻岩中陆续发现了金刚石^[24,26-27,46]、柯石英和柯石英假象^[21,28]等超高压变质证据,限定北大别经历超高压峰期变质的压力高于 3.5 GPa。地质年代学研究表明,北大别榴辉岩和片麻岩的原岩时



BZ 为北淮阳带;NDZ 为北大别高温超高压杂岩带;CDZ 为中大别中温超高压变质带;SDZ 为南大别低温榴辉岩带;SZ 为宿松变质杂岩带;DC 为角闪岩相大别杂岩带;HMZ 为浒湾混杂岩带;HZ 为红安低温榴辉岩带;TLF 为郟城—庐江断裂;XMF 为晓天—磨子潭断裂;WSF 为五河—水吼断裂;HMF 为花凉亭—弥陀断裂;TSF 为太湖—山龙断裂;SMF 为商城—麻城断裂;图件引自文献^[21],有所修改

图 1 大别造山带地质简图及采样位置

Fig. 1 Simplified Geological Map of Dabie Orogen and the Sampling Location

代为 700~800 Ma,并普遍有三叠纪超高压变质年代学记录^[16,20-21,29-30,46-49]。因此,北大别榴辉岩和花岗片麻岩等高级变质岩具有与中大别、南大别相似的新元古代原岩时代,并经历了三叠纪超高压变质作用^[20-21,46,50],属于印支期华南俯冲陆壳的一部分。同中大别和南大别相比,北大别片麻岩和斜长角闪岩等高级变质岩具有较低的放射性成因 Pb 同位素组成^[5-6,14],反映了下地壳特征。

北大别榴辉岩主要出露在东部的百丈岩、华庄、黄尾河和饶钹寨以及西南部罗田穹窿内的金家铺、板船山水库、石桥铺和罗田等地(图 1)。岩石学研究表明,这些榴辉岩都至少经历了超高压榴辉岩相、高压榴辉岩相、高压麻粒岩相叠加和角闪岩相退变质等多阶段变质演化过程^[20-22,25-27,30,51-52]。但不同于东部的榴辉岩,北大别西南部的榴辉岩中还发现有超高压榴辉岩相变质作用之前的紫苏辉石+斜长石等麻粒岩相变质矿物组合^[20,25],证明其原岩为镁铁质下地壳岩石。早期麻粒岩变质作用的时代为 $(794\pm 10)\text{Ma}$,与其原岩时代 $((791\pm 9)\text{Ma})$ 基本一致,表明这些榴辉岩的原岩在华南板块北缘新元古代岩浆板底垫托作用下形成的^[25]。

本文研究的榴辉岩样品大部分采自于北大别西南部罗田穹窿一带,另有一个样品来自于北大别东部的黄尾河(表 1),样品采集位置见图 1。这些样品的岩石学工作,Liu 等已经做过详细的描述和介绍^[20-22,25,28,30]。北大别东部的黄尾河榴辉岩较新鲜,仅局部发生过相对较弱的退变质作用,围岩为面理化变质橄榄岩,主要组成矿物为石榴石、绿辉石、金红石,以及少量石英、紫苏辉石、斜长石和角闪石。北大别西南部榴辉岩主要以透镜体或块状包裹在花岗片麻岩中,遭受了强烈的退变质作用,大多数仅保留石榴石、金红石和少量绿辉石包体,以及晚期与退变质有关的斜长石、透辉石、角闪石、紫苏辉石、磁铁矿、石英等,偶尔含少量榴辉岩相变质作用之前形成的紫苏辉石和斜长石等矿物残留。石榴石中经常有石英包体,并具有放射状胀裂纹,广泛发育两种后成合晶或冠状体结构,即麻粒岩相退变质阶段形成的由紫苏辉石+透辉石+斜长石等矿物组成的后成合晶或冠状体结构和角闪岩相退变质阶段形成的由角闪石+斜长石+磁铁矿等矿物组成的后成合晶或冠状体结构。

2 分析方法

本文分析的样品包括 18 个北大别榴辉岩和 2

个榴辉岩退变质形成的含石榴石斜长角闪岩全岩,以及 3 个榴辉岩的绿辉石单矿物。样品制备时,选取新鲜、无蚀变且矿物分布比较均匀的岩石样品,无污染地粉碎到 200 目(孔径为 0.071 mm)并筛制成测试分析所需的全岩粉末;再选取其中 3 个新鲜的榴辉岩样品,无污染地破碎到 40~60 目(孔径为 0.280~0.450 mm)后用淘选、电磁选物理方法进行分离,选出绿辉石,并在双目镜下挑选纯净无包体的绿辉石颗粒备用。

样品 Pb 同位素测试分析在中国科学技术大学地球和空间科学学院放射性同位素实验室进行。称取全岩粉末约 100 mg 或双目镜下挑选过的纯净绿辉石约 50 mg 装于 7 mL Teflon 溶样罐中,依次加入二次纯化后的 HF 溶液约 3 mL 和 HClO_4 溶液 8~10 滴,拧紧盖子后置于电热板上保持 120 °C 加热 4 d 左右。冷却后,置于超净柜内的电热板上在 120 °C 加热,蒸干样品溶液;升温至 160 °C,加热至白烟冒尽,以赶尽过量的 HF 和 HClO_4 ;用 1 mL 纯化 6 mol·L⁻¹ HCl 溶液淋洗闷罐内壁,蒸干;再次用 1 mL 纯化 6 mol·L⁻¹ HCl 溶液淋洗闷罐内壁,蒸干;加入 1 mL 纯化 0.5 mol·L⁻¹ HBr 溶液溶解样品,准备化学分离和纯化。应用 AG1-X8 常规离子交换树脂(200~400 目(孔径为 0.037~0.071 mm))并用 HBr 溶液做淋取液对 Pb 元素进行两遍纯化,烘干后备用。纯化后的样品 Pb 同位素测定在 Finnigan MAT-262 质谱仪上完成。本次研究中的 Pb 同位素标样 NBS981 多次测定的加权平均结果为 $N(^{206}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb})=16.941\pm 0.002$, $N(^{207}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb})=15.497\pm 0.002$ 和 $N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb})=36.728\pm 0.003$ 。误差类型为 2 σ 。质谱仪测定的 Pb 同位素分析精度优于 0.01%。全流程中的 Pb 元素空白值小于 2 ng。全岩初始 Pb 同位素组成利用 ICP-MS 溶液法给出的 U、Th 和 Pb 含量(质量分数,下同)反算到 220 Ma(榴辉岩相变质时代)即可得到。

3 结果分析

20 个全岩和 3 个绿辉石样品 Pb 同位素分析结果见表 1,另外 3 个北大别东部榴辉岩的全岩 Pb 同位素分析结果引自文献^[10]。全岩样品的 Pb 同位素组成变化较大, $N(^{206}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb})=15.229\sim 18.005$, $N(^{207}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb})=15.077\sim 15.588$, $N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb})=35.226\sim 38.778$,平均 Pb 同位素组成为 17.24、15.42 和 37.69。利用全岩 U、Th 和 Pb 含量对 Pb 元素同位素组成校正回

表 1 北大别榴辉岩及退变质斜长角闪岩的 Pb 同位素组成分析结果

Tab. 1 Analysis Results of Pb Isotopic Compositions of Eclogites and Amphibolites with Retrograde Metamorphism from North Dabie

样品 编号	采样 地点	岩性	$w(\text{U})/10^{-6}$	$w(\text{Th})/10^{-6}$	$w(\text{Pb})/10^{-6}$	$w(\text{U})/w(\text{Pb})$	$N(^{206}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb})$	$N(^{207}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb})$	$N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb})$	$(N(^{206}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_i$	$(N(^{207}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_i$	$(N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_i$	$\Delta_{8/4}$
03LT1-1	罗田	榴辉岩	0.42	1.88	3.25	0.129	17.723 ± 0.002	15.461 ± 0.002	38.275 ± 0.004	17.442	15.447	37.865	115
03LT1-2	罗田	斜长角闪岩	0.37	0.81	5.20	0.071	17.229 ± 0.002	15.547 ± 0.002	38.193 ± 0.005	17.077	15.540	38.082	181
06LT6	罗田	榴辉岩	0.04	0.11	0.22	0.182	16.873 ± 0.003	15.497 ± 0.002	37.831 ± 0.006	16.485	15.477	37.481	192
03LT3	胡家湾	榴辉岩	1.77	4.86	3.56	0.497	18.005 ± 0.002	15.588 ± 0.001	38.778 ± 0.004	16.911	15.533	37.794	172
03LT3	胡家湾	绿辉石					17.445 ± 0.009	15.555 ± 0.008	38.110 ± 0.019				172
03LT8-1	金家湾	榴辉岩	0.10	0.19	4.14	0.024	17.259 ± 0.002	15.421 ± 0.002	37.699 ± 0.004	17.209	15.418	37.666	123
03LT8-1	金家湾	绿辉石					17.086 ± 0.005	15.392 ± 0.004	37.566 ± 0.010				128
06LT2	金家湾	斜长角闪岩	0.26	0.49	3.51	0.074	17.284 ± 0.002	15.494 ± 0.002	37.909 ± 0.004	17.125	15.486	37.811	148
06LT3-2	金家湾	榴辉岩	0.14	0.13	3.91	0.036	17.599 ± 0.001	15.473 ± 0.001	37.778 ± 0.002	17.522	15.469	37.755	94
07LT1	金家湾	榴辉岩	0.22	0.33	4.35	0.051	16.736 ± 0.001	15.309 ± 0.001	37.054 ± 0.002	16.630	15.304	37.001	127
07LT3	金家湾	榴辉岩	0.18	0.15	0.77	0.234	17.509 ± 0.002	15.428 ± 0.002	37.715 ± 0.004	17.007	15.403	37.577	139
09LT1-3	金家湾	榴辉岩	0.29	0.20	4.65	0.062	16.827 ± 0.002	15.420 ± 0.002	37.718 ± 0.005	16.694	15.414	37.688	188
03LT9	板船山	榴辉岩	0.68	3.27	2.65	0.257	17.747 ± 0.001	15.414 ± 0.001	38.529 ± 0.002	17.186	15.386	37.648	124
03LT10	板船山	榴辉岩	0.24	2.05	2.81	0.085	17.571 ± 0.001	15.438 ± 0.001	38.289 ± 0.002	17.383	15.429	37.770	113
06LT4-1	板船山	榴辉岩	0.04	0.04	0.12	0.333	17.332 ± 0.003	15.380 ± 0.003	37.702 ± 0.007	16.617	15.344	37.468	175
06LT4-2	板船山	榴辉岩	0.05	0.04	0.47	0.106	17.420 ± 0.002	15.393 ± 0.002	37.720 ± 0.005	17.192	15.382	37.661	125
07LT5	板船山	榴辉岩	0.06	0.11	10.25	0.006	15.229 ± 0.001	15.077 ± 0.001	35.226 ± 0.002	15.217	15.077	35.219	119
09LT3-1	板船山	榴辉岩	0.14	1.32	1.62	0.086	17.656 ± 0.002	15.431 ± 0.002	38.589 ± 0.005	17.468	15.422	38.006	126
07LT6-1	石桥铺	榴辉岩	0.08	0.14	1.02	0.078	15.969 ± 0.002	15.224 ± 0.002	36.041 ± 0.005	15.809	15.216	35.949	121
07LT6-2	石桥铺	榴辉岩	0.18	1.03	3.08	0.058	17.308 ± 0.001	15.410 ± 0.001	37.460 ± 0.003	17.183	15.404	37.226	83
09LT2-1	石桥铺	榴辉岩	0.16	0.43	0.77	0.208	17.822 ± 0.001	15.463 ± 0.001	37.883 ± 0.003	17.371	15.440	37.486	86
09LT2-2	石桥铺	榴辉岩	0.13	0.15	0.95	0.137	17.604 ± 0.002	15.436 ± 0.002	37.626 ± 0.005	17.310	15.421	37.515	96
98121	百丈岩	榴辉岩	0.23	0.82	19.10	0.012	16.773 ± 0.001	15.346 ± 0.001	37.133 ± 0.001	16.748	15.345	37.103	123
99104-2	铈铈寨	榴辉岩	0.04	0.08	26.60	0.002	17.022 ± 0.001	15.384 ± 0.001	37.330 ± 0.002	17.019	15.384	37.328	113
98702	黄尾河	榴辉岩	0.06	0.14	6.72	0.009	17.988 ± 0.001	15.495 ± 0.001	38.073 ± 0.003	17.969	15.494	38.058	71
98702	黄尾河	绿辉石					17.046 ± 0.025	15.447 ± 0.004	37.780 ± 0.010				154

注: $w(\cdot)$ 为元素含量; $N(\cdot)/N(\cdot)$ 为同一元素同位素比值, $N(\cdot)$ 为该元素的原子丰度;初始 Pb 同位素组成校正到 220 Ma;样品 98121、99104-2 和 98702 为北大别东部榴辉岩,引自文献[10],其余样品为北大别西南部罗田榴辉岩; $\Delta_{8/4} = [(N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_i - (N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_{\text{NHRL}}] \times 100$,下标 i 表示初始比值,下标 NHRL 表示北半球参考线的比值。

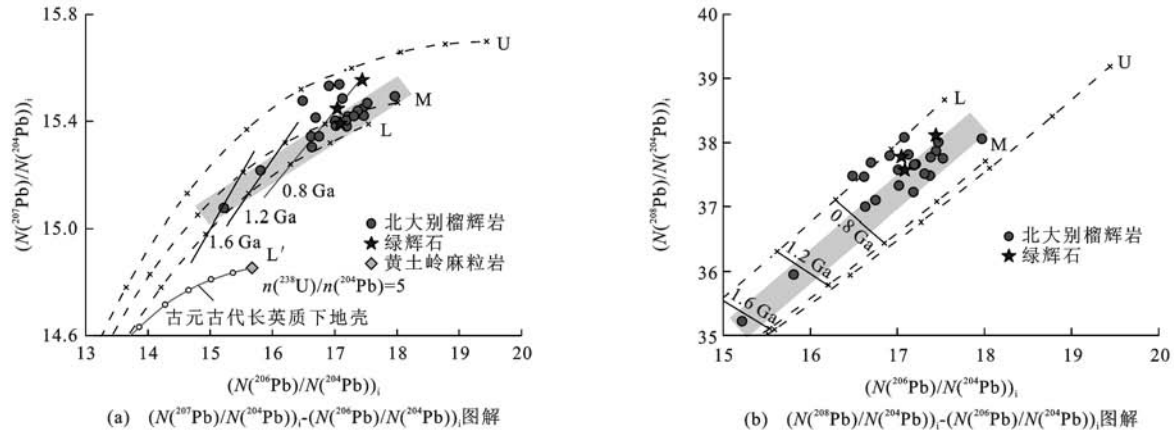
220 Ma(峰期榴辉岩相变质时代)的结果见表 1 和图 2。 $(N(^{206}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_i = 15.217 \sim 17.522$, $(N(^{207}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_i = 15.007 \sim 15.540$, $(N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_i = 35.219 \sim 38.082$ 。3 个绿辉石的 Pb 同位素组成为 17.046~17.445、15.392~15.555 和 37.566~38.110。

4 讨 论

4.1 北大别榴辉岩 Pb 同位素特征

岩石学和地质年代学研究表明^[20-22,25,28,30,53-54],

北大别榴辉岩在深俯冲和折返过程中经历了包括超高压榴辉岩相、高压榴辉岩相、麻粒岩相叠加和角闪岩相退变质等复杂的变质演化阶段,并在变质过程中部分受到了部分熔融作用及流体交代等活动的影响^[53-55]。由于 U 元素在流体活动和部分熔融过程中都非常活跃,Th 元素作为不相容元素更容易富集在熔体中,在流体中则相对不活跃,而 Pb 元素在脱水过程中有较大的活动性^[6]。北大别榴辉岩 $w(\text{U})/w(\text{Pb})$ 值和 $w(\text{Th})/w(\text{Pb})$ 值可能会因为经历的多阶段变质演化过程而受到不同程度的扰动,进一步



U、L、M 线分别为 Pb 构造模型中理想的上地壳、下地壳和地幔演化线,引自文献[1];L'线为根据文献[3]模拟的华南板块北缘古元古代长英质下地壳演化线;实线分别为 0.8、1.2、1.6 Ga 古等时线;黄土岭麻粒岩引自文献[56]; $n(\cdot)/n(\cdot)$ 为不同元素同位素比值, $n(\cdot)$ 为元素的物质的量;初始 Pb 同位素组成校正到 220 Ma

图 2 北大别榴辉岩全岩和绿辉石的初始 Pb 同位素组成图解

Fig. 2 Diagrams of Initial Pb Isotopic Compositions of the Whole Rocks and Omphacitites of Eclogites from North Dabie

干扰到全岩初始 Pb 同位素组成的精确计算。

由于俯冲陆壳岩石在脱水过程中有部分 Pb 元素会被析出的变质流体带走^[6],所以折返过程中角闪岩相退变质阶段的外来流体可能会重置北大别榴辉岩的 Pb 同位素组成。样品 03LT1-2 和 06LT2 位于不同榴辉岩透镜体边部,与围岩片麻岩相接触,是榴辉岩发生退变质形成的含石榴石斜长角闪岩;同核部的榴辉岩样品 03LT1-1 和 06LT3-2 相比,这些斜长角闪岩表现出更低的 $(N(^{206}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_i$ 值和更高的 $(N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_i$ 值(表 1),表明在形成过程中其受到了具有低 $(N(^{206}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_i$ 、高 $(N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_i$ 值特征的外来流体交代。这种流体的 Pb 同位素特征与北大别片麻岩的 Pb 同位素特征一致^[14],表明其来自于围岩片麻岩。同时,这一结果也表明,北大别折返阶段角闪岩相的流体活动主要改造了榴辉岩与片麻岩接触部位的 Pb 同位素组成,而对离围岩较远的榴辉岩 Pb 同位素特征影响较小。

绿辉石作为榴辉岩的一个主要组成矿物,具有很低的 $w(\text{U})/w(\text{Pb})$ 值^[57],而且 Pb 同位素在绿辉石中的扩散活化能和封闭温度都很高^[58],不易受后期热事件的影响而改变组成。因此,绿辉石的 Pb 同位素组成能够代表矿物结晶的初始同位素组成,而无需年龄校正,可以用来直接进行榴辉岩普通 Pb 同位素研究^[8,13,57],评估后期退变质作用对计算榴辉岩全岩初始 Pb 同位素组成的影响。由于多阶段退变质作用的影响,北大别榴辉岩中的绿辉石大部分已经发生了退变质,主要以包体形式存在于石榴

石中或退变成角闪石+长石后成合晶^[20,22,25,28,30],只有少数退变质程度较轻的样品能选出绿辉石单矿物来进行普通 Pb 同位素分析。榴辉岩样品 03LT8-1 的绿辉石与计算出的全岩初始值具有相似的 Pb 同位素组成(表 1),表明其 U-Th-Pb 体系在变质过程中没有受到明显的扰动,通过全岩还原计算得到的 Pb 同位素组成基本能代表榴辉岩相变质阶段的初始 Pb 同位素特征。榴辉岩样品 98702 的绿辉石 Pb 同位素组成则显著低于其还原计算得到的全岩初始 Pb 同位素组成(表 1)。这个样品表现出大离子亲石元素、轻稀土元素以及 Th 和 U 等微量元素亏损的特征^[30],表明该榴辉岩在折返阶段可能经历过部分熔融作用,熔体萃取导致该样品 $w(\text{U})/w(\text{Pb})$ 值和 $w(\text{Th})/w(\text{Pb})$ 值显著降低,进而影响初始 Pb 同位素组成还原计算的结果。不过,对于受到外来流体交代的榴辉岩,不仅全岩 Pb 同位素特征和 U、Th 含量会被外来流体改造,绿辉石的 Pb 同位素组成也可能受到外来流体的影响。主、微量元素研究结果显示,榴辉岩样品 03LT3 在退变质过程中受到一种富含 Ca 的变质流体交代(榴辉岩全岩中 CaO 含量高达 23.5%);还原计算得到的全岩初始 Pb 同位素组成也明显低于绿辉石的 Pb 同位素组成(表 1),表明流体交代过程同时带入了额外的 U、Th。此外,榴辉岩样品 03LT3 全岩及绿辉石单矿物都表现出显著高的 $N(^{207}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb})$ 值(图 2),表明这种变质流体不仅富含 Ca、U、Th 元素,还具有较高的 $N(^{207}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb})$ 值特征。榴辉岩样品 03LT3 的全岩和绿辉石 Pb 同位素组成都受到了外来流体 Pb 同位素的改造,不能真实反

的 Pb 同位素特征。这可能有两个原因:①折返阶段退变质过程中榴辉岩受到外来流体交代;②榴辉岩的原岩本身具有极低放射性成因 Pb 同位素特征,新元古代幔源岩浆底侵过程中混染了具有非常低 Pb 同位素组成的古老下地壳物质。由于 U 元素在流体中相对活跃而 Th 元素则相对不活跃,流体活动主要会改造岩石中的 $w(U)/w(Pb)$ 值而对 $w(Th)/w(Pb)$ 值影响较小,所以在对榴辉岩进行初始 Pb 同位素组成还原计算时,后期流体作用引起的 $w(U)/w(Pb)$ 值升高会导致计算结果比实际值偏小,从而表现出虚假的低放射性成因 Pb 同位素特征。但对于榴辉岩样品 07LT5 而言,其本身具有极低放射性成因 Pb 同位素组成(表 1),而且其 $w(U)/w(Pb)$ 值也非常低(0.006)。因此,流体活动导致的计算误差不足以解释北大别榴辉岩的低放射性成因 Pb 同位素特征。此外,如果外来流体具有非常低的放射性成因 Pb 同位素组成,也可以改造榴辉岩使其表现出低放射性成因 Pb 同位素特征,但这需要找到一个具有非常低 Pb 同位素组成的流体源区。研究区榴辉岩的围岩是片麻岩,目前已知的北大别乃至整个大别山片麻岩的 Pb 同位素组成都显著高于榴辉岩样品 07LT5(图 3),而且样品具有极低 U、Th 含量的特征,也不支持退变质阶段被外来流体交代的假设。因此,北大别榴辉岩具有极低放射性成因 Pb 同位素组成不是在退变质阶段被流体活动改造的结果,而是新元古代幔源岩浆底侵很深的下地壳岩石混染了较多古老下地壳物质的结果。

大量研究表明,华南板块北缘的古老变质基底主要由形成于晚太古代至古元古代的岩石组成^[44-45,63]。在新元古代发生地壳再造和地壳增生时,是否存在具有极低放射性成因 Pb 同位素特征的下地壳岩石? 黄土岭酸性麻粒岩是北大别的典型麻粒岩之一。大量的地质年代学研究表明,北大别黄土岭麻粒岩在 $(2\,029 \pm 13) \sim (2\,042 \pm 7)$ Ma 就位于下地壳,并经历了高温麻粒岩相变质作用^[42-45]。然而,在黄土岭麻粒岩中没有发现三叠纪锆石 U-Pb 年龄记录,这可能意味着它没有参与三叠纪大陆深俯冲过程^[43]。因此,黄土岭麻粒岩的全岩 U-Pb 同位素体系可能自约 2.0 Ga 经历麻粒岩相变质作用以来,一直保持封闭没有受到扰动。根据中国大陆地壳 Pb 同位素演化模型^[3],2.0 Ga 时华南板块下地壳初始 Pb 同位素组成为 $(N(^{206}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_i = 13.86$, $(N(^{207}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_i = 14.63$, $(N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_i = 34.34$, 按照下地壳岩石具有低 $n(^{238}\text{U})/n(^{204}\text{Pb})$ 值和较高 $w(Th)/w(U)$ 值的特征(取 $n(^{238}\text{U})/n(^{204}\text{Pb}) = 5$, $n(^{232}\text{Th})/n(^{238}\text{U}) = 7$) 进行简单模拟计算,演化得到现代 Pb 同位素组成,即 $N(^{206}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}) = 15.679$, $N(^{207}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}) = 14.854$, $N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}) = 38.001$ 。这个模拟计算的结果与黄土岭麻粒岩的 Pb 同位素组成 $(N(^{206}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_t = 15.674$, $N(^{207}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}) = 14.854$, $N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}) = 37.938^{[56]}$ 完全一致[图 2(a)],表明模拟计算参数设置和结果都是合理的,华南板块北缘的古元古代长英质下地壳岩石具有类似于黄土岭麻粒岩低 $w(U)/w(Pb)$ 值、高 $w(Th)/w(U)$ 值的 Pb 同位素演化特征。当这类下地壳岩石演化到 0.8 Ga 时,模拟计算的年龄 t 对应的 Pb 同位素组成为 $(N(^{206}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_t = 15.018$, $(N(^{207}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_t = 14.810$, $(N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_t = 36.580$ 。然而,尽管这类下地壳岩石表现出很低的 $(N(^{206}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_t$ 值和 $(N(^{207}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_t$ 值特征,但其 $(N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_t$ 值却远高于北大别榴辉岩的 $(N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_t$ 值(35.226)。榴辉岩样品 07LT5 极低的放射性成因 Pb 同位素组成要求华南板块北缘古老镁铁质下地壳在新元古代时不仅具有非常低的 $(N(^{206}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_t$ 值和 $(N(^{207}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_t$ 值,还具有非常低的 $(N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_t$ 值。对比大别—苏鲁造山带中榴辉岩和片麻岩的 Pb 同位素组成可以发现,对应相同的 $(N(^{206}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_t$ 值,榴辉岩比片麻岩具有更低的 $(N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_t$ 值[图 3(b)],表明大别山镁铁质原岩比长英质原岩具有更低的 $w(Th)/w(U)$ 值。因此, $w(Th)/w(U)$ 值不同可能是长英质下地壳和镁铁质下地壳 Pb 同位素演化的一个重要区别。相对于长英质下地壳,华南板块北缘的古老镁铁质下地壳具有低的 $w(Th)/w(U)$ 值,并在新元古代时演化为低 $(N(^{206}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_t$ 值、 $(N(^{207}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_t$ 值和 $(N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_t$ 值的特征。

北大别榴辉岩的 Pb 同位素研究结果显示,在新元古代华南板块北缘发生地壳增生时,新生镁铁质下地壳有两个不同的 Pb 同位素源区:一个源区为具有低 $w(U)/w(Pb)$ 值、低 $w(Th)/w(U)$ 值演化特征的晚太古代至古元古代镁铁质下地壳;另一个源区则为幔源岩浆,表现出相对较高的放射性成因 Pb 同位素特征。图 2 中,北大别榴辉岩的 $(N(^{207}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_t$ 值、 $(N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_t$ 值与 $(N(^{206}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_t$ 值之间分别表现出明显的线性正相关关

系。图 2 中,北大别榴辉岩的 $(N(^{207}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_t$ 值、 $(N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_t$ 值与 $(N(^{206}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_t$ 值之间分别表现出明显的线性正相关关

系,进一步证明这些榴辉岩的 Pb 同位素特征是新元古代幔源岩浆侵位过程中混杂了古老镁铁质下地壳低放射性成因 Pb 同位素特征的一系列结果。因此,大别造山带三叠纪深俯冲镁铁质下地壳存在两类成分:一类是晚太古代至古元古代的古老镁铁质下地壳物质,表现出极低的放射性成因 Pb 同位素特征;另一类为新元古代新生的镁铁质下地壳物质,主要表现为类似于地幔演化的 Pb 同位素特征,少量具有接近于古老镁铁质下地壳一系列变化的 Pb 同位素组成。

大量研究表明,大别山中生代埃达克质岩的源区与在三叠纪深俯冲过程中拆离并最终再循环进入上地幔的华南板块北缘镁铁质下地壳有关,并已证明是这部分拆沉的下地壳发生部分熔融的产物^[59-60,64-67],它们的 Sr-Nd-Pb 同位素组成能够代表再循环的加厚下地壳特征^[60]。这些埃达克质岩表现出低放射性成因 Pb 同位素组成以及较高的 $\Delta_{8/4}$ 值(平均值为 192)特征^[59-60]。然而,对北大别榴辉岩的 Pb 同位素研究结果显示,大别山镁铁质下地壳具有低放射性成因 Pb 同位素组成和较低的 $\Delta_{8/4}$ 值(表 1),其中大部分 $\Delta_{8/4}$ 值都低于 130(图 3),显著低于大别山中生代埃达克质岩的 $\Delta_{8/4}$ 值。此外,同苏鲁造山带相比,大别造山带缺少一个具有很低放射性成因 Pb 同位素特征的长英质下地壳岩片^[6,14]。这个岩片原本应就位于北大别之下,但在三叠纪陆壳深俯冲和折返过程及后期造山作用后并未出露地表。它表现为类似于大别山中生代埃达克质岩的低 $(N(^{206}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_i$ 特征,却具有更高的 $(N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_i$ 值(图 3),其 $\Delta_{8/4}$ 平均值为 228^[8]。大别山中生代埃达克质岩的 $\Delta_{8/4}$ 值介于大别山镁铁质下地壳和缺失的长英质下地壳之间(图 3),表明它可能是大别山长英质和镁铁质下地壳 Pb 同位素混合的结果。因此,再循环的陆壳物质中不仅含有镁铁质下地壳岩石,还含有长英质下地壳物质,在早白垩纪岩石圈拆离和造山带去山根事件中,大别山底层的长英质下地壳随镁铁质下地壳一起拆沉并再循环进入地幔。

5 结 语

(1)北大别榴辉岩具有与北大别片麻岩类似的低放射性成因 Pb 同位素成分的下地壳岩石特征,但表现出更低的 $(N(^{208}\text{Pb})/N(^{204}\text{Pb}))_i$ 值,并具有已知的大别造山带 3 个含榴辉岩的超高压变质岩片中最低的 Pb 同位素组成,进一步证明它们的原岩

来自于深俯冲的镁铁质下地壳岩石。

(2)北大别榴辉岩的 Pb 同位素特征是新元古代幔源岩浆侵位过程中不同程度混杂具有低 $w(\text{U})/w(\text{Pb})$ 值、低 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值演化特征的晚太古代至古元古代镁铁质下地壳的结果。参与三叠纪大别山深俯冲的镁铁质下地壳存在两类成分:一类是具有极低的放射性成因 Pb 同位素特征的古老镁铁质下地壳物质;另一类为新元古代新生的镁铁质下地壳物质,主要表现为类似于地幔演化的 Pb 同位素特征。

(3)与大别山中生代埃达克质岩的 Pb 同位素对比研究表明,在华南板块三叠纪深俯冲及早白垩纪岩石圈拆离过程中,大别山深部的长英质下地壳随镁铁质下地壳一起拆沉并再循环进入地幔。

中国科学技术大学陈福坤教授和肖平在 Pb 同位素测试中给予了支持和帮助,在此表示感谢!

参 考 文 献:

References:

- [1] ZARTMAN R, DOE B R. Plumbotectonics: The Model[J]. *Tectonophysics*, 1981, 75(1/2): 135-162.
- [2] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. Oxford: Blackwell, 1985.
- [3] 李 龙, 郑永飞, 周建波. 中国大陆地壳铅同位素演化的动力学模型[J]. *岩石学报*, 2001, 17(1): 61-68.
LI Long, ZHENG Yong-fei, ZHOU Jian-bo. Dynamic Model for Pb Isotope Evolution in the Continental Crust of China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(1): 61-68.
- [4] DEWOLF C P, MEZGER K. Lead Isotope Analyses of Leached Feldspars: Constraints on the Early Crustal History of the Grenville Orogen[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(24): 5537-5550.
- [5] ZHANG H F, GAO S, ZHONG Z Q, et al. Geochemical and Sr-Nd-Pb Isotopic Compositions of Cretaceous Granitoids: Constraints on Tectonic Framework and Crustal Structure of the Dabieshan Ultrahigh-pressure Metamorphic Belt, China[J]. *Chemical Geology*, 2002, 186(3/4): 281-299.
- [6] 李曙光, 黄 方, 周红英, 等. 大别山双河超高压变质岩及北部片麻岩的 U-Pb 同位素组成: 对超高压岩石折返机制的制约[J]. *中国科学: D 辑, 地球科学*, 2001, 31(12): 977-984.
LI Shu-guang, HUANG Fang, ZHOU Hong-ying, et al. U-Pb Isotopic Compositions of the Ultrahigh Pressure Metamorphic (UHPM) Rocks from Shuanghe and

- Gneisses from Northern Dabie Zone in the Dabie Mountains, Central China: Constraint on the Exhumation Mechanism of UHPM Rocks[J]. *Science in China: Series D, Earth Sciences*, 2001, 31(12): 977-984.
- [7] HUANG F, LI S G, DONG F, et al. Recycling of Deeply Subducted Continental Crust in the Dabie Mountains, Central China[J]. *Lithos*, 2007, 96(1/2): 151-169.
- [8] LI S G, WANG C X, DONG F, et al. Common Pb of UHP Metamorphic Rocks from the CCSD Project (100-5 000 m) Suggesting Decoupling Between the Slices Within Subducting Continental Crust and Multiple Thin Slab Exhumation [J]. *Tectonophysics*, 2009, 475(2): 308-317.
- [9] AMES L, ZHOU G Z, XIONG B C. Geochronology and Isotopic Character of Ultrahigh-pressure Metamorphism with Implications for Collision of the Sino-Korean and Yangtze Cratons, Central China[J]. *Tectonics*, 1996, 15(2): 472-489.
- [10] 刘贻灿, 徐树桐, 刘颖, 等. 大别山北部榴辉岩的 Pb 同位素特征[J]. *矿物岩石*, 2002, 22(3): 33-36.
- LIU Yi-can, XU Shu-tong, LIU Ying, et al. Pb Isotope Characteristics of the Eclogites from the Northern Dabie Mountains[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2002, 22(3): 33-36.
- [11] ZHANG L, ZHANG H F, ZHONG Z Q, et al. Geochemical Characteristics of Pb Isotope of High-pressure Metamorphic Rocks and Foliated Granites from HP Unit of Tongbai-Dabie Orogenic Belt[J]. *Journal of China University of Geosciences*, 2003, 14(4): 321-329.
- [12] ZHANG L, ZHONG Z Q, WEI L S, et al. Pb Isotope Mapping in the Tongbai-Dabie Orogenic Belt, Central China[J]. *Acta Geologica Sinica: English Edition*, 2008, 82(1): 126-133.
- [13] 董锋, 李曙光, 李秋立, 等. 中国大陆科学钻探 100~2 000 m 超高压变质岩普通 Pb 同位素地球化学初步研究: 俯冲陆壳内脱耦的证据[J]. *岩石学报*, 2006, 22(7): 1791-1798.
- DONG Feng, LI Shu-guang, LI Qiu-li, et al. Preliminary Study of Common Pb of UHP Metamorphic Rocks from CCSD (100-2 000 m): Evidence for Decoupling within Subducting Continental Crust[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(7): 1791-1798.
- [14] SHEN J, WANG Y, LI S G. Common Pb Isotope Mapping of UHP Metamorphic Zones in Dabie Orogen, Central China: Implication for Pb Isotopic Structure of Subducted Continental Crust[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 143: 115-131.
- [15] GAO S, ZHANG B R, JIN Z M, et al. How Mafic Is the Lower Continental Crust? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 161(1/2/3/4): 101-117.
- [16] BRYANT D L, AYERS J C, GAO S, et al. Geochemical, Age, and Isotopic Constraints on the Location of the Sino-Korean/Yangtze Suture and Evolution of the Northern Dabie Complex, East Central China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2004, 116(5/6): 698-717.
- [17] 李曙光, 李秋立, 侯振辉, 等. 大别山超高压变质岩的冷却史及折返机制[J]. *岩石学报*, 2005, 21(4): 1117-1124.
- LI Shu-guang, LI Qiu-li, HOU Zhen-hui, et al. Cooling History and Exhumation Mechanism of the Ultrahigh-pressure Metamorphic Rocks in the Dabie Mountains, Central China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(4): 1117-1124.
- [18] 刘贻灿, 李曙光. 大别山下地壳岩石及其深俯冲[J]. *岩石学报*, 2005, 21(4): 1059-1066.
- LIU Yi-can, LI Shu-guang. Lower Crustal Rocks from the Dabie Mountains and Their Deep Subduction[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(4): 1059-1066.
- [19] 刘贻灿, 李曙光. 俯冲陆壳内部的拆离和超高压岩石的多板片差异折返: 以大别—苏鲁造山带为例[J]. *科学通报*, 2008, 53(18): 2153-2165.
- LIU Yi-can, LI Shu-guang. Detachment Within Subducted Continental Crust and Multi-slice Successive Exhumation of Ultrahigh-pressure Metamorphic Rocks: Evidence from the Dabie-Sulu Orogenic Belt[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(18): 2153-2165.
- [20] 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): 975-990.
- [21] LIU Y C, GU X F, LI S G, et al. Multistage Metamorphic Events in Granulitized Eclogites from the North Dabie Complex Zone, Central China: Evidence from Zircon U-Pb Age, Trace Element and Mineral Inclusion[J]. *Lithos*, 2011, 122(1/2): 107-121.
- [22] LIU Y C, DENG L P, GU X F, et al. Application of Ti-in-zircon and Zr-in-rutile Thermometers to Constrain High-temperature Metamorphism in Eclogites from the Dabie Orogen, Central China[J]. *Gondwana Research*, 2015, 27(1): 410-423.
- [23] 魏春景, 单振刚, 张立飞, 等. 北大别榴辉岩的确定及其地质意义[J]. *科学通报*, 1997, 42(17): 1832-1836.
- WEI Chun-jing, SHAN Zhen-gang, ZHANG Li-fei, et al.

- Determination and Geological Significance of the Eclogites from the Northern Dabie Mountains, Central China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(17): 1832-1836.
- [24] 徐树桐, 苏文, 刘贻灿, 等. 大别山北部榴辉岩的发现及其岩相学特征[J]. *科学通报*, 1999, 44(13): 1452-1456.
- XU Shu-tong, SU Wen, LIU Yi-can, et al. Discovery of the Eclogite and Its Petrography in the Northern Dabie Mountain[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(13): 1452-1456.
- [25] 刘贻灿, 徐树桐, 李曙光, 等. “罗田穹窿”中下地壳俯冲成因榴辉岩及其地质意义[J]. *地球科学*, 2005, 30(1): 71-77.
- LIU Yi-can, XU Shu-tong, LI Shu-guang, et al. Eclogite from the Subducted Lower Crust of the Yangtze Plate Within the Luotian Dome and Its Geological Implication[J]. *Earth Science*, 2005, 30(1): 71-77.
- [26] 徐树桐, 刘贻灿, 陈冠宝, 等. 大别山、苏鲁地区榴辉岩中新发现的微粒金刚石[J]. *科学通报*, 2003, 48(10): 1069-1074.
- XU Shu-tong, LIU Yi-can, CHEN Guan-bao, et al. New Finding of Micro-diamonds in Eclogites from Dabie-Sulu Region in Central-eastern China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(10): 1069-1074.
- [27] XU S T, LIU Y C, CHEN G B, et al. Microdiamonds, Their Classification and Tectonic Implications for the Host Eclogites from the Dabie and Su-Lu Regions in Central Eastern China[J]. *Mineralogical Magazine*, 2005, 69(4): 509-520.
- [28] LIU Y C, GU X F, ROLFO F, et al. Ultrahigh-pressure Metamorphism and Multistage Exhumation of Eclogite of the Luotian Dome, North Dabie Complex Zone (Central China): Evidence from Mineral Inclusions and Decompression Textures[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2011, 42(4): 607-617.
- [29] 刘贻灿, 李曙光, 徐树桐, 等. 大别山北部榴辉岩和英云闪长质片麻岩锆石 U-Pb 年龄及多期变质增生[J]. *高校地质学报*, 2000, 6(3): 417-423.
- LIU Yi-can, LI Shu-guang, XU Shu-tong, et al. U-Pb Zircon Ages of the Eclogite and Tonalitic Gneiss from the Northern Dabie Mountains, China and Multi-overgrowths of Metamorphic Zircons[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2000, 6(3): 417-423.
- [30] LIU Y C, LI S G, XU S T, et al. Geochemistry and Geochronology of Eclogites from the Northern Dabie Mountains, Central China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 25(3): 431-443.
- [31] XU S T, SU W, LIU Y C, et al. Diamond from the Dabieshan Metamorphic Rocks and Its Implication for Tectonic Setting[J]. *Science*, 1992, 256: 80-82.
- [32] LI S G, XIAO Y L, LIOU D L, et al. Collision of the North China and Yangtze Blocks and Formation of Coesite-bearing Eclogites: Timing and Processes[J]. *Chemical Geology*, 1993, 109(1/2/3/4): 89-111.
- [33] LI S G, JAGOUTZ E, CHEN Y Z, et al. Sm-Nd and Rb-Sr Isotopic Chronology and Cooling History of Ultrahigh Pressure Metamorphic Rocks and Their Country Rocks at Shuanghe in the Dabie Mountains, Central China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(16): 1077-1093.
- [34] OKAY A I. Petrology of a Diamond and Coesite-bearing Metamorphic Terrain: Dabie Shan, China[J]. *European Journal of Mineralogy*, 1993, 5(4): 659-675.
- [35] OKAY A I, SENGOR A M C, SATIR M. Tectonics of an Ultrahigh-pressure Metamorphic Terrane: The Dabie Shan/Tongbai Shan Orogen, China[J]. *Tectonics*, 1993, 12(6): 1320-1334.
- [36] LI X P, ZHENG Y F, WU Y B, et al. Low-T Eclogite in the Dabie Terrane of China: Petrological and Isotopic Constrains on Fluid Activity and Radiometric Dating[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2004, 148(4): 443-470.
- [37] ROLFO F, COMPAGNONI R, WU W P, et al. A Coherent Lithostratigraphic Unit in the Coesite-eclogite Complex of Dabie Shan, China: Geologic and Petrologic Evidence[J]. *Lithos*, 2004, 73(1/2): 71-94.
- [38] OKAY A I, XU S T, SENGOR A M C. Coesite from the Dabieshan Eclogites, Central China[J]. *European Journal of Mineralogy*, 1989, 1(4): 595-598.
- [39] WANG X M, LIOU J G, MAO H K. Coesite-bearing Eclogite from the Dabie Mountains in Central China[J]. *Geology*, 1989, 17(2): 1085-1088.
- [40] 徐树桐, 刘贻灿, 江来利, 等. 大别山的构造格局和演化[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- XU Shu-tong, LIU Yi-can, JIANG Lai-li, et al. Tectonic Regime and Evolution of Dabie Mountains[M]. Beijing: Science Press, 1994.
- [41] ZHANG R Y, LIOU J G, TSAI C H. Petrogenesis of a High-temperature Metamorphic Terrane: A New Tectonic Interpretation for the North Dabie Shan, Central China[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1996, 14(3): 319-333.
- [42] 陈能松, 游振东, 索书田, 等. 大别山区中酸性麻粒岩和变形花岗岩的锆石 U-Pb 年龄[J]. *科学通报*, 1996,

- 41(11):1009-1012.
- CHEN Neng-song, YOU Zhen-dong, SUO Shu-tian, et al. U-Pb Zircon Ages of Intermediate Granulites and Deformed Granites in Dabie Mountains, Central China[J]. Chinese Science Bulletin, 1996, 41(11): 1009-1012.
- [43] 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, 2006, 31(3): 294-300.
- CHEN Neng-song, 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, 2006, 31(3): 294-300.
- [44] WU Y B, ZHENG Y F, GAO S, et al. Zircon U-Pb Age and Trace Element Evidence for Paleoproterozoic Granulite-facies Metamorphism and Archean Crustal Rocks in the Dabie Orogen[J]. Lithos, 2008, 101(3/4): 308-322.
- [45] JIAN P, KRONER A, ZHOU G Z. SHRIMP Zircon U-Pb Ages and REE Partition for High-grade Metamorphic Rocks in the North Dabie Complex: Insight into Crustal Evolution with Respect to Triassic UHP Metamorphism in East-central China[J]. Chemical Geology, 2012, 328: 49-69.
- [46] LIU Y C, LI S G, XU S T. Zircon SHRIMP U-Pb Dating for Gneisses in Northern Dabie High T/P Metamorphic Zone, Central China: Implication for Decoupling Within Subducted Continental Crust [J]. Lithos, 2007, 96(1/2): 170-185.
- [47] ZHAO Z F, ZHENG Y F, WEI C S, et al. Zircon U-Pb Ages, Hf and O Isotopes Constrain the Crustal Architecture of the Ultrahigh-pressure Dabie Orogen in China[J]. Chemical Geology, 2008, 253(3/4): 222-242.
- [48] XIE Z, CHEN J F, CUI Y R. Episodic Growth of Zircon in UHP Orthogneisses from the North Dabie Terrane of East-central China: Implications for Crustal Architecture of a Collisional Orogen[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2010, 28(9): 979-995.
- [49] WANG S L, LI S G, AN S C, et al. A Granulite Record of Multistage Metamorphism and REE Behavior in the Dabie Orogen: Constraints from Zircon and Rock-forming Minerals [J]. Lithos, 2012, 136/137: 109-125.
- [50] ZHENG Y F, ZHAO Z F, WU Y B, et al. Zircon U-Pb Age, Hf and O Isotope Constraints on Protolith Origin of Ultrahigh-pressure Eclogite and Gneiss in the Dabie Orogen[J]. Chemical Geology, 2006, 231(1/2): 135-158.
- [51] 刘贻灿,古晓锋,邓亮鹏.北大别的高温超高压变质作用与多阶段折返[J]. 岩石学报, 2011, 27(2): 589-600.
- LIU Yi-can, GU Xiao-feng, DENG Liang-peng. High-T/UHP Metamorphism and Multistage Exhumation History of the North Dabie Complex Zone[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(2): 589-600.
- [52] 刘贻灿,古晓锋,李曙光.北大别超高压榴辉岩的快速折返与缓慢冷却过程[J]. 岩石学报, 2009, 25(9): 2149-2156.
- LIU Yi-can, GU Xiao-feng, LI Shu-guang. Rapid Exhumation and Slow Cooling of Ultrahigh-pressure Eclogite in the North Dabie Complex Zone, Central China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(9): 2149-2156.
- [53] 古晓锋,刘贻灿,邓亮鹏.北大别罗田榴辉岩的同位素年代学和岩石成因及其在折返过程中的元素和同位素行为[J]. 科学通报, 2013, 58(22): 2132-2137.
- GU Xiao-feng, LIU Yi-can, DENG Liang-peng. Geochronology and Petrogenesis of Eclogite from the Luotian Dome, North Dabie Complex Zone (Central China), and Their Element and isotope Behavior During Exhumation[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(22): 2132-2137.
- [54] 古晓锋.北大别罗田榴辉岩的岩石地球化学和同位素年代学[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2012.
- GU Xiao-feng. Petrologic Geochemistry and Isotopic Geochronology of the Luotian Eclogites from the North Dabie Complex Zone Central China[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012.
- [55] 刘贻灿,邓亮鹏,古晓锋,等.北大别的多阶段高温变质作用与部分熔融及其地球动力学过程和大地构造意义[J]. 地质科学, 2014, 49(2): 355-367.
- LIU Yi-can, DENG Liang-peng, GU Xiao-feng, et al. Multistage High-T Metamorphism and Partial Melting of the North Dabie Complex Zone, Central China, and Their Geodynamic Processes and Tectonic Implication[J]. Chinese Journal of Geology, 2014, 49(2): 355-367.
- [56] 葛宁洁,李惠玉,秦礼萍,等.大别山麻粒岩和 TTG 片麻岩的 Sr、Nd、Pb 同位素地球化学[J]. 地质学报, 2001, 75(3): 379-384.
- GE Ning-jie, LI Hui-yu, QIN Li-ping, et al. Sr, Nd and Pb Isotopic Geochemistry of Granulites and TTG Gneisses from the North Dabie Mountains[J]. Acta

- Geologica Sinica, 2001, 75(3): 379-384.
- [57] LI Q L, LI S G, ZHENG Y F, et al. A High Precision U-Pb Age of Metamorphic Rutile in Coesite-bearing Eclogite from the Dabie Mountains in Central China: A New Constraint on the Cooling History[J]. Chemical Geology, 2003, 200(3/4): 255-265.
- [58] CHERNIAK D J. Pb Diffusion in Clinopyroxene[J]. Chemical Geology, 1998, 150(1/2): 105-117.
- [59] HUANG F, LI S G, DONG F, et al. High-Mg Adakitic Rocks in the Dabie Orogen, Central China: Implications for Foundering Mechanism of Lower Continental Crust[J]. Chemical Geology, 2008, 255(1/2): 1-13.
- [60] HE Y S, LI S G, HOEFS J, et al. Sr-Nd-Pb Isotopic Compositions of Early Cretaceous Granitoids from the Dabie Orogen: Constraints on the Recycled Lower Continental Crust[J]. Lithos, 2013, 156/157: 204-217.
- [61] ZINDLER A, HART S. Chemical Geodynamics[J]. Annual Reviews of Earth Planetary Sciences, 1986, 14: 493-571.
- [62] HART S R. A Large-scale Isotopic Anomaly in the Southern Hemisphere Mantle[J]. Nature, 1984, 309: 753-757.
- [63] ZHANG S B, ZHENG Y F, WU Y B, et al. Zircon U-Pb Age and Hf Isotope Evidence for 3.8 Ga Crustal Remnant and Episodic Reworking of Archean Crust in South China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 252(1/2): 56-71.
- [64] WANG Q, WYMAN D A, XU J F, et al. Early Cretaceous Adakitic Granites in the Northern Dabie Complex, Central China: Implications for Partial Melting and Delamination of Thickened Lower Crust[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2007, 71(10): 2609-2636.
- [65] 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.
- [66] ZHANG C, MA C Q, HOLTZ F. Origin of High-Mg Adakitic Magmatic Enclaves from the Meichuan Pluton, Southern Dabie Orogen (Central China): Implications for Delamination of the Lower Continental Crust and Melt-mantle Interaction[J]. Lithos, 2010, 119(3/4): 467-484.
- [67] HE Y S, LI S G, HOEFS J, et al. Post-collisional Granitoids from the Dabie Orogen: New Evidence for Partial Melting of a Thickened Continental Crust[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2011, 75(13): 3815-3838.

《地球科学与环境学报》2017 年度约稿函

尊敬的各位专家学者：

《地球科学与环境学报》(以下简称《学报》)自 1979 年创刊以来,得到了各位专家学者的大力支持,使期刊得到了快速发展。《学报》系地学综合性权威学术期刊,刊登的主要内容有基础地质与矿产地质、水资源与环境、工程地质、应用地球物理和地球信息科学等。为了不断提升《学报》的学术质量和影响力,特向各位专家学者约稿,诚盼各位专家学者能鼎力支持《学报》的发展。

《学报》目前的优势包括：

1. 中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)刊源；
2. 特约稿不收取版面费,并且刊出后向作者支付一定稿酬；
3. 发表周期短；
4. 对学术质量高、有重大基金项目支持的论文优先发表；
5. 刊登综述类论文；
6. 可同期刊登同一主题的系列成果。

联系地址：西安市南二环路中段长安大学杂志社《地球科学与环境学报》编辑部

邮政编码：710064

电 话：029-82334686

E-mail: dkyhxb@chd.edu.cn; jesechd@163.com

投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

《地球科学与环境学报》编辑部