

李宇浩, 杨 阳, 刘贻灿, 等. 大别造山带宿松变质带黄玉蓝晶石石英岩和云母石英片岩的时代和成因[J]. 地球科学与环境学报, 2026, 48(1): 1-19

LI Yu-hao, YANG Yang, LIU Yi-can, et al. Timing and Petrogenesis of the Topaz-kyanite Quartzite and Mica-quartz Schist from the Susong Metamorphic Zone in the Dabie Orogenic Belt, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2026, 48(1): 1-19.

DOI: 10.19814/j.jese.2025.09012

大别造山带宿松变质带黄玉蓝晶石石英岩和云母石英片岩的时代和成因

李宇浩^{1,2}, 杨 阳^{1,2}, 刘贻灿^{1,2*}, 吴 峥^{1,2,3}, 刘 琦^{1,2}

(1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026; 2. 中国科学技术大学 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 安徽 合肥 230026; 3. 安徽省地质调查院, 安徽 合肥 230001)

摘 要: 宿松变质带位于大别造山带的南部, 黄玉蓝晶石石英岩和相关的云母石英片岩是其中发育的特殊岩石类型, 其形成时代、成因与扬子板块中生代大陆俯冲密切相关。以宿松变质带蒲河黄玉蓝晶石石英岩和清水塘云母石英片岩为研究对象, 对其进行系统的野外地质调查、岩相学分析、全岩主量和微量元素分析、SHRIMP 锆石 U-Pb 定年。结果表明: 黄玉蓝晶石石英岩的两颗锆石核部 SHRIMP U-Pb 年龄分别为 (735±7) 和 (746±8) Ma, 锆石边部 SHRIMP U-Pb 加权平均年龄为 (217±7) Ma (平均标准权重偏差 (MSWD) 为 0.47, 分析点为 3 个); 云母石英片岩锆石核部 SHRIMP U-Pb 加权平均年龄为 (763±9) Ma (MSWD 值为 0.68, 分析点为 9 个), 锆石边部 SHRIMP U-Pb 年龄为 (219±6) Ma, 表明其原岩最大沉积时代均为新元古代, 并经历了三叠纪变质作用。黄玉蓝晶石石英岩 SiO₂ 含量 (质量分数, 下同) 为 69.09%~73.36%, Al₂O₃ 含量为 22.34%~25.64%, MgO 含量为 0.00%~0.02%, 球粒陨石标准化稀土元素配分模式具有轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的右倾特征, 微量元素组成上富集 U、Zr、Hf 等高场强元素; 云母石英片岩的 SiO₂ 含量为 80.53%~83.53%, Al₂O₃ 含量为 10.08%~12.93%, MgO 含量为 0.12%~0.29%, 轻、重稀土元素无明显分异, 存在中等 Eu 负异常, 富集 K、Pb、Ba 等大离子亲石元素, 亏损 Th、Ce、Ta、Ti 等高场强元素; 主量、微量元素地球化学特征揭示其原岩均为沉积岩并形成于被动大陆边缘环境。综上所述, 宿松变质带蒲河黄玉蓝晶石石英岩和清水塘云母石英片岩的原岩形成于 Rodinia 超大陆裂解相关的地质背景, 并参与了大别造山带印支期的大陆俯冲作用。

关键词: 地球化学; 黄玉蓝晶石石英岩; 云母石英片岩; 锆石 U-Pb 年龄; 岩石成因; Rodinia 超大陆裂解; 大别造山带

中图分类号: P581; P597⁺.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-6561(2026)01-0001-19

Timing and Petrogenesis of the Topaz-kyanite Quartzite and Mica-quartz Schist from the Susong Metamorphic Zone in the Dabie Orogenic Belt, China

LI Yu-hao^{1,2}, YANG Yang^{1,2}, LIU Yi-can^{1,2*}, WU Zheng^{1,2,3}, LIU Qi^{1,2}

(1. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026,

收稿日期: 2025-09-09; 修回日期: 2025-11-25

投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42372059)

* 通信作者: 刘贻灿 (1962-), 男, 安徽潜山人, 教授, 博士研究生导师, 理学博士, E-mail: liuyc@ustc.edu.cn.

Anhui, China; 2. State Key Laboratory of Lithospheric and Environmental Coevolution, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China; 3. Geological Survey of Anhui Province, Hefei 230001, Anhui, China)

Abstract: The Susong metamorphic zone represents a significant lithotectonic unit in the southern Dabie orogenic belt. Within this zone, the topaz-kyanite quartzite and associated mica-quartz schist are distinctive rock types, whose age and petrogenesis are genetically linked to the Mesozoic continental subduction of the Yangtze Plate. Based on samples of topaz-kyanite quartzite from Puhe and mica-quartz schist from Qingshitang in the Susong metamorphic zone, an integrated study was conducted employing field investigation, petrographic analysis, whole-rock major- and trace-element analysis, and SHRIMP zircon U-Pb dating. The results show that: two zircon cores from the topaz-kyanite quartzite yield SHRIMP U-Pb ages of (735 ± 7) and (746 ± 8) Ma, whereas the weighted mean SHRIMP U-Pb age of three zircon rims is (217 ± 7) Ma (mean squared weighted deviation (MSWD) is 0.47); for the mica-quartz schist, the weighted mean SHRIMP U-Pb age of nine zircon cores is (763 ± 9) Ma (MSWD is 0.68), and the zircon rim age is (219 ± 6) Ma; these data indicate that the protoliths of the topaz-kyanite quartzite and associated mica-quartz schist have maximum depositional ages in the Neoproterozoic and experiences Triassic metamorphism. The topaz-kyanite quartzite has SiO_2 contents of 69.09%–73.36%, Al_2O_3 contents of 22.34%–25.64%, and MgO contents of 0.00%–0.02%; it is enriched in light rare earth element (LREE) and depleted in heavy rare earth element (HREE), showing a right-sloping chondrite-normalized rare earth element (REE) pattern, and is enriched in high field strength element (HFSE) such as U, Zr and Hf; the mica-quartz schist has SiO_2 contents of 80.53%–83.53%, Al_2O_3 contents of 10.08%–12.93% and MgO contents of 0.12%–0.29%; it displays no pronounced fractionation between LREE and HREE, a moderate negative Eu anomaly, enrichment in large ion lithophile element (LILE) such as K, Pb and Ba, and depletion in HFSE (e.g., Th, Ce, Ta, Ti). The major- and trace-element characteristics suggest that their protoliths are sedimentary rocks formed in a passive continental margin setting. Integrated with previously published data, it is proposed that these protoliths originate in a tectonic setting related to the breakup of the Rodinia supercontinent and are subsequently incorporated into the Indosinian continental subduction.

Key words: geochemistry; topaz-kyanite quartzite; mica-quartz schist; zircon U-Pb age; petrogenesis; Rodinia supercontinent breakup; Dabie orogenic belt

0 引言

大别山作为中国中央造山带的重要组成部分,经历了复杂的构造-变质演化过程。自发现柯石英和金刚石以来^[1-3],该地区一直是地质学研究的热点,其复杂的地质构造和演化过程为研究大陆地壳深俯冲和折返过程中的物理-化学变化提供了独特的天然实验室^[4-5]。大别造山带为华南板块向华北板块俯冲所形成的陆-陆碰撞造山带,出露有世界上规模最大、保存最好的超高压变质地体之一。其中出露的石英岩和石英片岩既是俯冲带高压—超高压变质作用的重要岩石类型,又是指示原岩沉积-构造

演化过程的关键信息载体^[6-9]。这些岩石不仅记录了从原岩沉积、变质改造到后期构造抬升等关键地质过程,更是理解超高压变质带流体活动、元素迁移规律和超大陆活动的理想研究对象^[10-13]。岩石中蕴含的主量、微量元素特征,矿物组合变化和地质年代学信息等能够为揭示陆-陆碰撞事件和超高压变质带的构造演化过程提供有力约束^[14-19]。

宿松变质带是大别造山带的重要组成部分,出露了不同时代的多种变质岩岩石类型,峰期变质作用总体表现为绿帘角闪岩相^[7,10,16,20-24],局部有可能达到高压—超高压条件^[7,25-26]。其中,蒲河黄玉蓝晶石石英岩和清水塘蓝刚玉蓝晶石石英岩、云母石

英片岩因发现有“类白片岩”矿物组合^[25-26],已成为研究区广为关注的特殊岩石组合类型。值得注意的是,根据黄玉蓝晶石石英岩的高温高压实验研究结果,蓝晶石+黄玉组合可在1 000 ℃~1 200 ℃和3.10~3.77 GPa条件下稳定存在,由此可以推断黄玉蓝晶石石英岩经历了超高压变质作用^[26]。如果这一结论成立,它们有可能代表一类特殊的榴辉岩相岩石,为外来岩片^[7]。此外,Wu等对宿松变质带的含石榴石云母石英片岩、石墨白云母石英片岩和白云质大理岩3种具有代表性的变质沉积岩进行了多项研究,发现其经历了晚三叠纪与大陆俯冲相关的变质作用,原岩的形成与新元古代扬子板块北缘的Rodinia超大陆裂谷作用有关^[23]。尽管前人已经取得了很重要研究成果,但蒲河黄玉蓝晶石石英岩与清水塘云母石英片岩的研究仍存在若干关键问题尚不明确,主要集中于时代归属与岩石成因的争议,这直接影响了对研究区岩石组成及其演化方面的解读,难以判别它们的岩石成因是否与新元古代Rodinia超大陆裂解有关,以及是否参与了扬子板片三叠纪大陆俯冲作用。

本文针对大别造山带宿松变质带蒲河黄玉蓝晶石石英岩和清水塘云母石英片岩两种特殊岩石类型,开展了初步的岩石学、元素地球化学和SHRIMP锆石U-Pb年代学研究,并结合前人已发表成果,探讨了该地区在Rodinia超大陆裂解过程的响应,以期揭示华南板块在Rodinia超大陆演化中发挥的作用提供新的地质证据。

1 区域地质背景和样品特征

大别造山带作为中国东部重要的地质构造单元,西起桐柏—秦岭地区,东至郟—庐断裂带(图1),是三叠纪华南板块向北俯冲并与华北板块陆-陆碰撞形成的^[3,19,27-30]。造山带自北向南依次发育有北淮阳带、北大别高温超高压杂岩带、中大别中温超高压变质带、南大别低温榴辉岩带及宿松变质带五大构造岩石单元,其间分别被晓天—磨子潭断裂、五河—水吼断裂、花凉亭—弥陀断裂与太湖—山龙断裂分割^[8,27,31]。

宿松变质带又称宿松变质杂岩带,位于南大别低温榴辉岩带与前陆带之间,北以太湖—山龙断裂为界(图2),包括原“宿松群”的大新屋组、柳坪组、虎踏石组、蒲河组及原“张八岭群”等的相关变质岩石。主要岩石类型有(含石榴子石)花岗片麻岩、石榴云母石英片岩、石英岩、变质砂岩、大理岩以及变

玄武岩或斜长角闪岩和变质磷矿岩等^[7,32-33],并零星出露异剥钙榴岩、石墨片岩、浅粒岩、变质辉长岩以及变蛇纹岩等^[21,34]。宿松变质带总体表现为绿帘角闪岩相变质作用,主体属于俯冲板片的后缘并较晚折返^[21-22]。蒲河黄玉蓝晶石石英岩和清水塘蓝刚玉蓝晶石石英岩、云母石英片岩主要产出于原“宿松群”蒲河组中(图2)。

黄玉蓝晶石石英岩(样品编号为20SS2和1909SS2)采自宿松变质带西部的蒲河地区(图2),呈灰白色块状构造[图3(a)],发育弱面理,呈细粒半自形粒状变晶结构,主要由蓝晶石+石英+金红石+白云母+黄玉+叶腊石+黄铁矿等矿物组成。其中,样品20SS2的主要矿物组成为石英(体积分数为35%~40%)、蓝晶石(10%~15%)、黄玉(8%~13%)、斜长石(25%~30%),并含有少量角闪石、绿帘石、锆石、褐帘石等副矿物[图4(a)、(b)]。云母石英片岩(样品编号为23SS6和112QST1)采自凉亭东部的清水塘地区(图2),产出于变质花岗岩中[图3(b)],主要矿物由钠长石、(多硅)白云母、石英、绢云母、绿帘石等组成。其中,样品23SS6的主要矿物组成为石英(体积分数为60%~65%)、云母(30%~35%)、长石(5%~10%),并含有少量绿泥石、方解石、黄铁矿、磁铁矿等副矿物[图4(c)、(d)]。

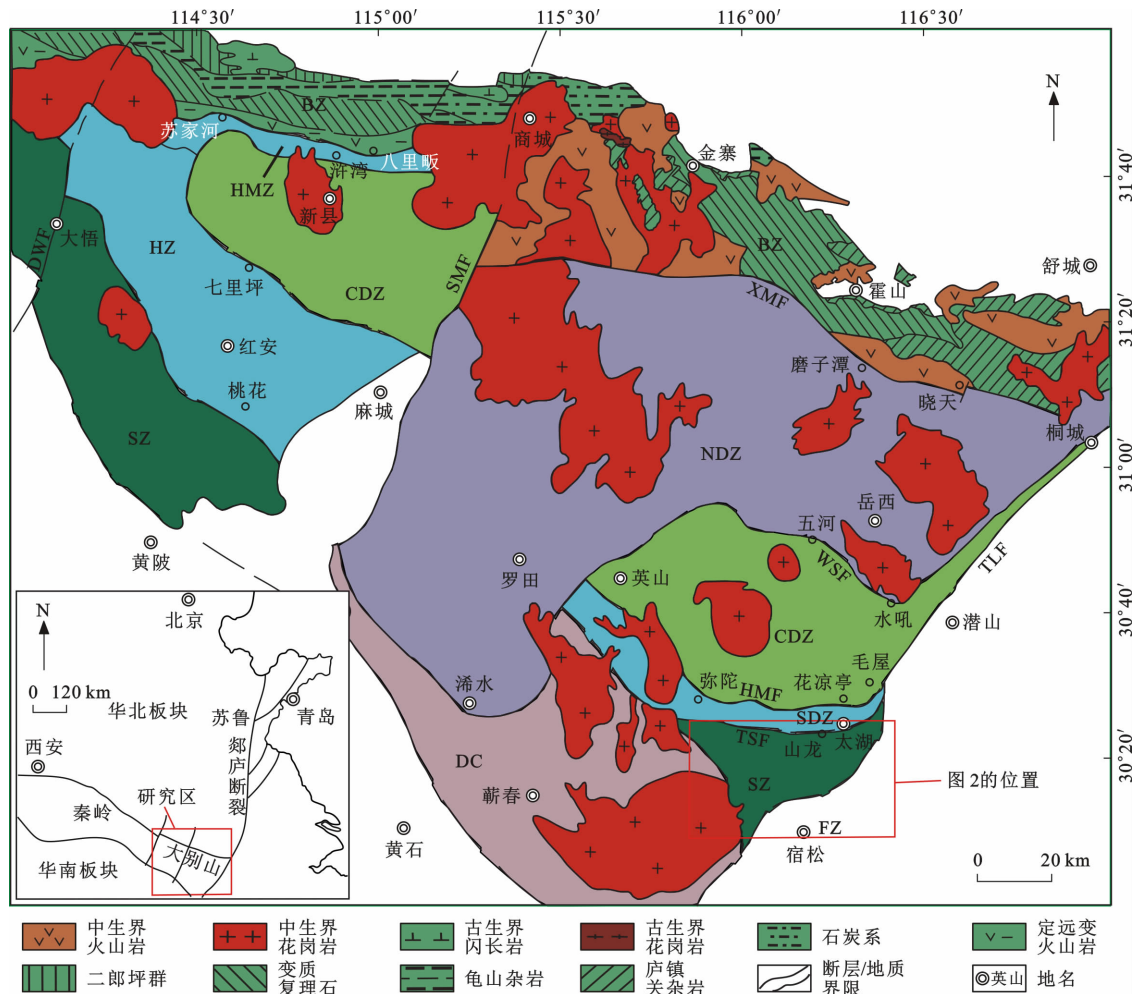
2 分析方法

2.1 全岩主量、微量元素分析

黄玉蓝晶石石英岩和云母石英片岩的全岩主量、微量元素分析在河北省区域地质调查研究所实验室内完成。在进行全岩主量、微量元素分析前,样品均研磨成粒径小于200目的粉末。

主量元素分析流程为:称取1g新鲜样品粉末置于已在高温下恒重的瓷坩埚中;将坩埚移入马弗炉,持续升温至950 ℃~1 000 ℃,并在此温度范围内灼烧约12 h;冷却后称重,计算灼烧损失量,即获得烧失量(Loss on Ignition, LOI);随后,将灼烧后样品与定量预干燥的四硼酸锂、氟化锂混合,滴加数滴3%的溴化锂溶液(作为脱模剂)并烘干;混合物在Shimazu熔样机中于1 050 ℃~1 100 ℃熔融,制备成均质玻璃熔片;熔片最终使用XRF-1800型X射线荧光光谱仪进行主量元素测定。通过对样品及标准物质进行长期重复分析,确认其分析精度优于1%。

微量元素分析流程为:准确称取40 mg全岩粉



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 为宿松变质带; FZ 为前陆带; HMZ 为洪湾混杂岩带; HZ 为红安低温榴辉岩带; DC 为角闪岩相大别杂岩带; 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; TLF 为郟—庐断裂; SMF 为商(城)—麻(城)断裂; DWF 为大悟断裂; 底图引自文献[31]

图 1 大别造山带地质简图

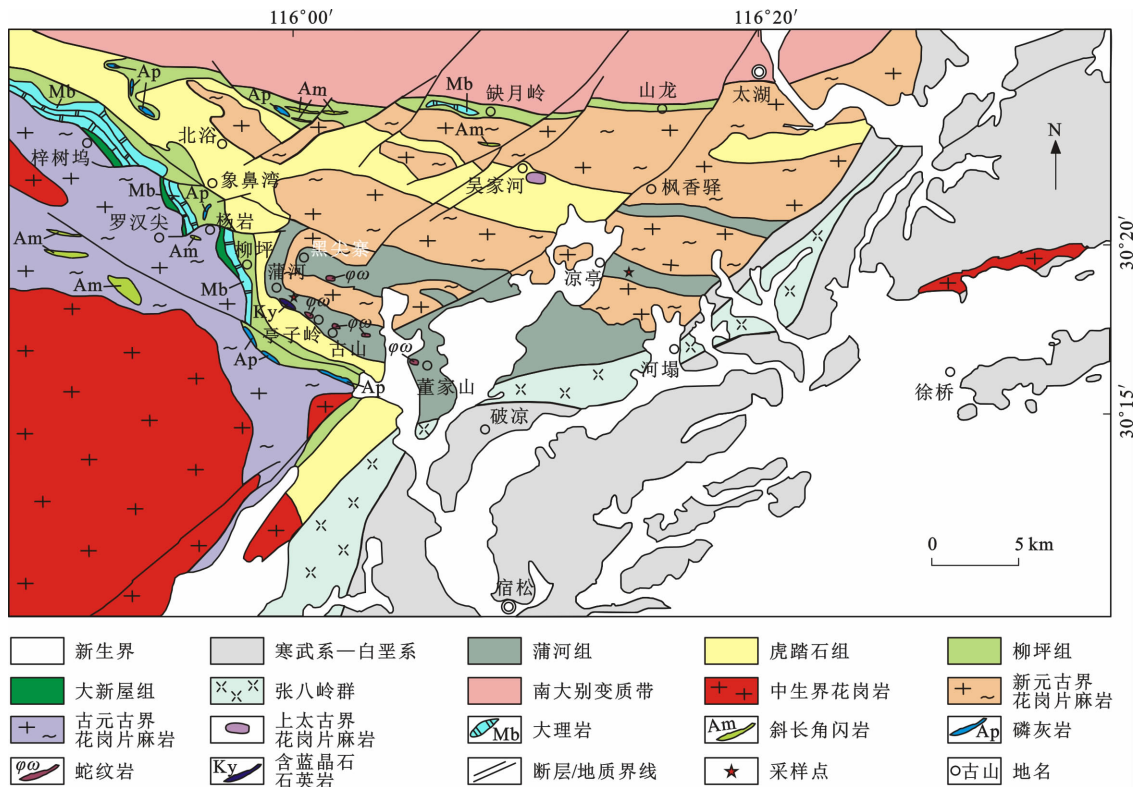
Fig. 1 Schematic Geological Map of the Dabie Orogenic Belt

末样品置于洁净干燥的聚四氟乙烯(Teflon)消解罐内;加入 0.5 mL 的 1:1 硝酸溶液及 1.5 mL 的氢氟酸溶液,密封罐盖并套上热缩套管后,旋紧耐酸合金钢外套;将消解罐置于恒温烘箱中,逐步升温至 200 °C 并保持 5 d 进行密闭酸消解;消解完成后开盖,将溶液低温蒸至近干;向残渣中加入 2 mL 的 1:1 硝酸溶液,重新密闭,于烘箱中保温过夜(约 12 h)进行复溶;冷却后将溶液完全转移至 50 mL 容量瓶中,加入 1 mL 含量(质量分数,下同)为 500×10^{-9} 的 In 内标溶液,最后用 1% 的硝酸溶液定容至刻度并混匀,所得溶液采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)仪进行微量元素测定。分析精度优于 5%。

2.2 锆石 U-Pb 年代学分析

黄玉蓝晶石石英岩(样品 20SS2)和云母石英片

岩(样品 23SS6)锆石颗粒的分选工作在河北省区域地质调查研究所实验室进行。首先,取约 2 kg 岩石样品,经破碎与筛分后,综合运用淘洗、磁选、重液分离及人工挑选,最终获取晶形完好、无明显裂隙的锆石单矿物颗粒。后续的锆石制靶及阴极发光(Cathodoluminescence, CL)图像采集在北京离子探针中心完成。将待测样品锆石与标准锆石 TEM 共同镶嵌于环氧树脂靶上,经抛光处理以暴露锆石内部结构;随后进行阴极发光成像及透反射光学显微镜观察,并在选定区域标记分析点位,以备 SHRIMP U-Pb 定年。SHRIMP 锆石 U-Pb 定年分析在北京离子探针中心利用 SHRIMP II 型高分辨率离子微探针完成,具体实验流程参照 Compston 等描述的方法^[35-36]。分析条件设定为:一次氧离子流强度为 3~5 nA,束斑直径约 25 μm ,每个分析点位采集 5 组扫



底图引自文献[34]

图 2 宿松变质带地质简图

Fig. 2 Schematic Geological Map of the Susong Metamorphic Zone



(a) 黄玉蓝晶石石英岩

(b) 云母石英片岩

图 3 黄玉蓝晶石石英岩和云母石英片岩的野外照片

Fig. 3 Field Photographs of Topaz-kyanite Quartzite and Mica-quartz Schist

描数据。分析过程中,分别采用 M257 (年龄 $t=561.3$ Ma, U 含量为 840×10^{-6}) 和 TEMORA ($t=417$ Ma) [36-38] 作为标准锆石对未知样品的 U、Th 含量及年龄进行标定。单点分析误差类型为 1σ 。最终数据使用 Isoplot3.00 程序 [39] 进行整合处理。

3 结果分析

3.1 全岩主量、微量元素特征

大别造山带宿松变质带蒲河黄玉蓝晶石石英岩

和清水塘云母石英片岩的全岩主量、微量元素分析结果见表 1。黄玉蓝晶石石英岩的 SiO_2 含量 (69.09%~73.36%) 较低, Al_2O_3 含量高达 22.34%~25.64%, TFe_2O_3 含量 (0.05%~0.13%) 和 MgO 含量 (0.00%~0.02%) 显著较低, 而 TiO_2 含量 (1.23%~1.43%) 相对较高, 碱金属 (K_2O 含量为 0.04%~0.06%, Na_2O 含量为 0.06%~0.08%) 和钙质 (CaO 含量为 0.05%~0.08%) 则近乎缺失。球粒陨石标准化稀土元素配分模式 [图 5

表1 黄玉蓝晶石石英岩和云母石英片岩的主量、微量元素分析结果

Table 1 Analysis Results of Major and Trace Elements for Topaz-kyanite Quartzites and Mica-quartz Schists

样品编号	20SS2	1909SS2	23SS6	112QST1	样品编号	20SS2	1909SS2	23SS6	112QST1
$w(\text{SiO}_2)/\%$	69.09	73.36	83.53	80.53	$w(\text{Tm})/10^{-6}$	0.094	0.030	0.300	0.780
$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	25.64	22.34	10.08	12.93	$w(\text{Yb})/10^{-6}$	0.49	0.20	2.14	5.68
$w(\text{TiO}_2)/\%$	1.23	1.43	0.09	0.20	$w(\text{Lu})/10^{-6}$	0.085	0.040	0.370	0.860
$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)/\%$	0.12	0.02	0.64	0.19	$w(\text{Li})/10^{-6}$	8.65	7.66	9.61	3.38
$w(\text{FeO})/\%$	0.02	0.03	0.23	0.29	$w(\text{Be})/10^{-6}$	0.11	0.11	2.31	2.31
$w(\text{TFe}_2\text{O}_3)/\%$	0.13	0.05	0.90	0.48	$w(\text{Sc})/10^{-6}$	0.83	1.92	1.52	1.63
$w(\text{CaO})/\%$	0.08	0.05	0.06	0.04	$w(\text{V})/10^{-6}$	85.70	82.90	5.11	4.54
$w(\text{MgO})/\%$	0.02	0.00	0.29	0.12	$w(\text{Cr})/10^{-6}$	432.0	105.0	14.2	0.0
$w(\text{K}_2\text{O})/\%$	0.06	0.04	2.51	3.09	$w(\text{Co})/10^{-6}$	0.14	0.16	0.49	0.12
$w(\text{Na}_2\text{O})/\%$	0.08	0.06	0.61	0.63	$w(\text{Ni})/10^{-6}$	1.71	1.58	4.12	0.77
$w(\text{MnO})/\%$	0.01	0.00	0.01	0.00	$w(\text{Cu})/10^{-6}$	4.32	6.10	1.70	55.80
$w(\text{P}_2\text{O}_5)/\%$	0.11	0.08	0.01	0.02	$w(\text{Zn})/10^{-6}$	10.80	8.83	31.20	100.00
$w(\text{H}_2\text{O}^+)/\%$	3.09	1.82	2.16	1.63	$w(\text{Ga})/10^{-6}$	34.4	28.5	16.8	25.9
烧失量/ $\%$	3.40	2.46	1.73	1.73	$w(\text{Rb})/10^{-6}$	0.86	2.06	72.40	75.30
$w_{\text{total}}/\%$	99.86	99.87	99.82	99.76	$w(\text{Sr})/10^{-6}$	273.0	76.6	35.2	17.6
$w(\text{Y})/10^{-6}$	3.23	1.27	10.40	50.00	$w(\text{Zr})/10^{-6}$	138	155	150	539
$w(\text{La})/10^{-6}$	12.80	4.22	13.90	12.70	$w(\text{Nb})/10^{-6}$	7.50	8.71	7.90	19.40
$w(\text{Ce})/10^{-6}$	20.70	6.95	28.60	25.50	$w(\text{Cs})/10^{-6}$	0.42	0.11	3.13	1.40
$w(\text{Pr})/10^{-6}$	2.74	1.04	3.56	3.11	$w(\text{Ba})/10^{-6}$	58.9	43.7	1171.0	1565.0
$w(\text{Nd})/10^{-6}$	10.00	4.04	13.50	12.60	$w(\text{Hf})/10^{-6}$	4.25	4.33	5.80	8.67
$w(\text{Sm})/10^{-6}$	1.76	0.71	2.81	2.68	$w(\text{Ta})/10^{-6}$	0.29	0.44	0.57	0.81
$w(\text{Eu})/10^{-6}$	0.48	0.18	0.61	0.61	$w(\text{Pb})/10^{-6}$	19.30	9.41	22.60	18.30
$w(\text{Gd})/10^{-6}$	1.35	0.54	2.10	3.27	$w(\text{Th})/10^{-6}$	0.77	0.68	3.46	0.90
$w(\text{Tb})/10^{-6}$	0.20	0.07	0.35	0.71	$w(\text{U})/10^{-6}$	0.61	0.64	0.39	0.90
$w(\text{Dy})/10^{-6}$	1.03	0.38	2.08	5.89	La/Yb 值	26.2	21.1	6.5	2.2
$w(\text{Ho})/10^{-6}$	0.18	0.07	0.41	1.53	Eu 异常	0.94	0.89	0.77	0.63
$w(\text{Er})/10^{-6}$	0.47	0.19	1.49	4.94	DF 值	-3.93	-4.84	-5.40	-4.13

注:编号为 20SS2 和 1909SS2 的样品为黄玉蓝晶石石英岩,编号为 23SS6 和 112QST1 的样品为云母石英片岩; $w(\cdot)$ 为元素或化合物含量; w_{total} 为主量元素总含量。

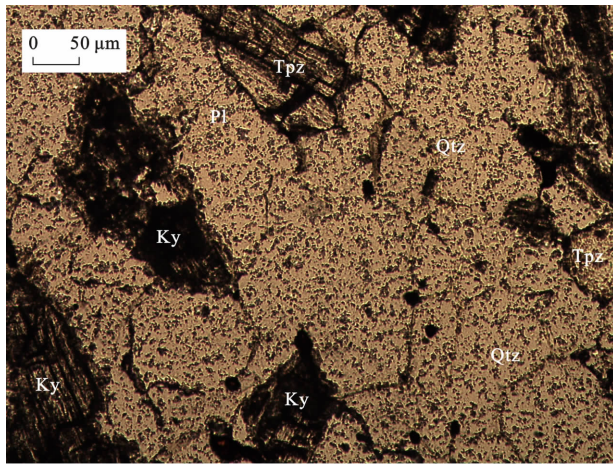
(a)]显示,黄玉蓝晶石石英岩的稀土元素配分模式接近,均表现为右倾型,轻、重稀土元素分异明显,La/Yb 值为 21.1~26.2,轻稀土元素(Light Rare Earth Element, LREE)适度富集,重稀土元素(Heavy Rare Earth Element, HREE)较亏损,分布曲线相对较为平缓, Eu 无明显异常, δEu 值为 0.89~0.94;原始地幔标准化微量元素蛛网图[图 5(b)]显示,样品曲线基本一致,明显具有大离子亲石元素(Large Ion Lithophile Element, LILE)(如 Rb、K)亏损、高场强元素(High Field Strength Element, HFSE)(如 U、Zr、Hf)富集的特征, Pb 明显富集, Eu 明显亏损。

云母石英片岩的 SiO_2 含量高达 80.53%~83.53%, Al_2O_3 含量为 10.08%~12.93%, K_2O 含量较高(2.51%~3.09%), TiO_2 含量(0.09%~

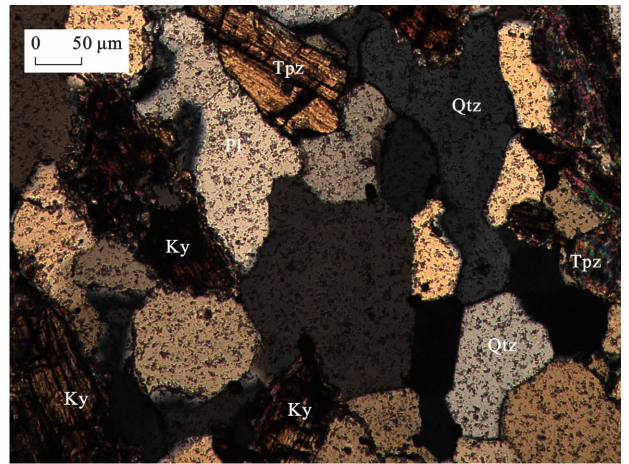
0.20%)、 TFe_2O_3 含量(0.48%~0.90%)和 MgO 含量(0.12%~0.29%)显著较低。云母石英片岩异常贫 Ca(CaO 含量为 0.04%~0.06%)、Na(Na_2O 含量为 0.61%~0.63%), $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值高达 4~5。球粒陨石标准化稀土元素配分模式[图 5(a)]显示,样品曲线基本一致,轻、重稀土元素无明显分异, La/Yb 值为 2.2~6.5, Eu 存在一定的负异常, δEu 值为 0.63~0.77;原始地幔标准化微量元素蛛网图[图 5(b)]显示,样品曲线基本一致,明显富集大离子亲石元素(如 K、Pb、Ba), 亏损高场强元素(如 Th、Ce、Ta、Ti)。

3.2 锆石 U-Pb 年代学特征

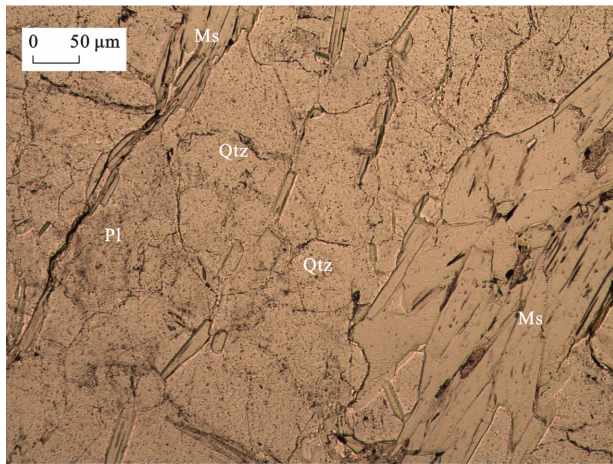
黄玉蓝晶石石英岩(样品 20SS2)中的锆石核部呈灰黑色,亮度低,部分边部呈无色透明,发光性明显不均一,多数锆石具有明显的核-边结构,多为棱



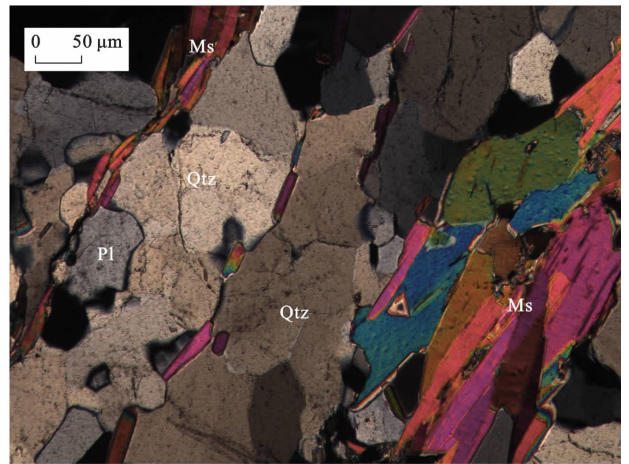
(a) 黄玉蓝晶石石英岩镜下特征(单偏光)



(b) 黄玉蓝晶石石英岩镜下特征(正交偏光)



(c) 云母石英片岩镜下特征(单偏光)



(d) 云母石英片岩镜下特征(正交偏光)

Ky 为蓝晶石;Ms 为白云母;Qtz 为石英;Tpz 为黄玉;Pl 为长石

图 4 黄玉蓝晶石石英岩和云母石英片岩的镜下照片

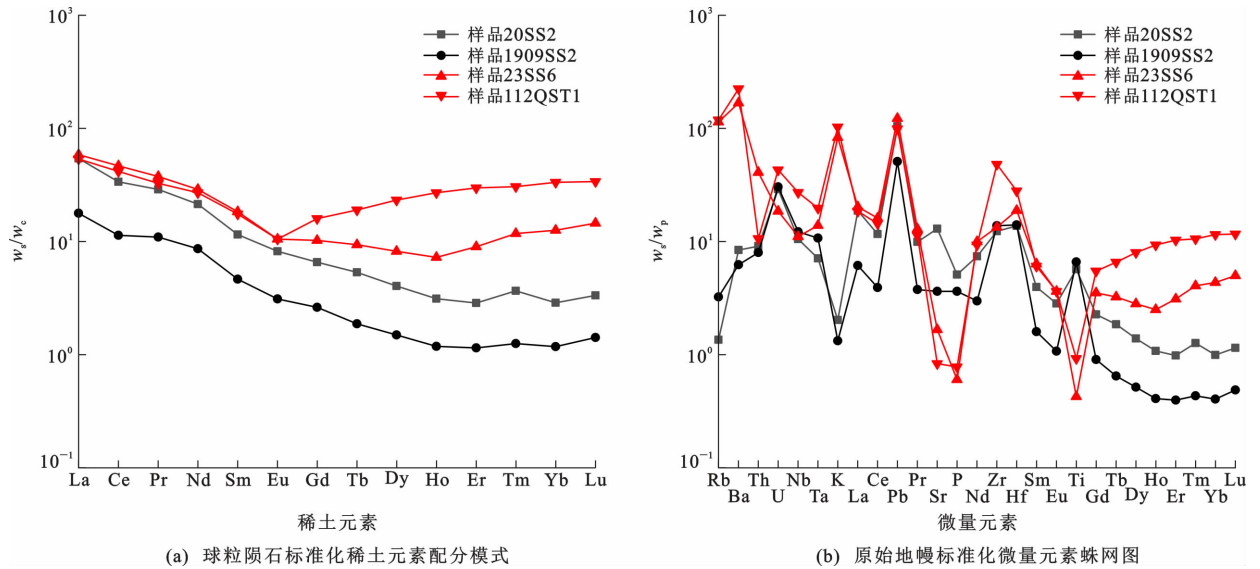
Fig. 4 Photomicrographs of Topaz-kyanite Quartzite and Mica-quartz Schist

柱状, 锆石颗粒呈自形一半自形结构, 长 $50 \sim 180 \mu\text{m}$, 宽 $30 \sim 70 \mu\text{m}$, 长宽比为 $1.5 : 1.0 \sim 3.5 : 1.0$ [图 6(a)]. 大多数锆石岩浆结晶环带结构不明显, 少数具有弱的结晶环带, 锆石核部具有较高的 Th/U 值 ($0.92 \sim 1.01$), 具有典型的岩浆锆石特征; 锆石的浅色增生薄边具有较低的 Th/U 值 (约 0.01), 指示为变质增生。

云母石英片岩 (样品 23SS6) 中的锆石颜色整体呈无色透明至灰黑色, 具有明显的核-边结构, 锆石颗粒呈自形一半自形结构、棱柱一次棱柱状, 磨圆度较高, 长 $110 \sim 250 \mu\text{m}$, 宽 $70 \sim 140 \mu\text{m}$, 长宽比为 $1.5 : 1.0 \sim 3.0 : 1.0$ [图 6(b)]. 多数锆石核部具有明显的岩浆结晶振荡环带和较高的 Th/U 值 (多为 $0.84 \sim 1.25$), 为典型的岩浆锆石; 锆石边部呈灰色, 具有较低的 Th/U 值 (0.03), 为变质增生, 且多数增生边较薄 ($< 20 \mu\text{m}$), 不适合用 SHRIMP 法进行定年分析。

本文对黄玉蓝晶石石英岩样品 20SS2 中的 11 颗锆石进行了 SHRIMP U-Pb 定年分析, 并获得 12 个年龄数据, 详细分析结果见表 2。分析点均落于年龄谐和曲线上 [图 7(a)]。其中, 锆石核部 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $746 \sim 703 \text{ Ma}$, 代表原岩最大沉积年龄; 锆石边部 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(217 \pm 7) \text{ Ma}$ (平均标准权重偏差 (Mean Squared Weighted Deviation, MSWD) 为 0.47 , 分析点为 3 个), 表明其经历了三叠纪变质事件; 此外, 还有两个锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 (283 ± 5) 和 $(353 \pm 7) \text{ Ma}$, 有可能是变质重结晶或 Pb 丢失年龄, 有待于进一步研究。

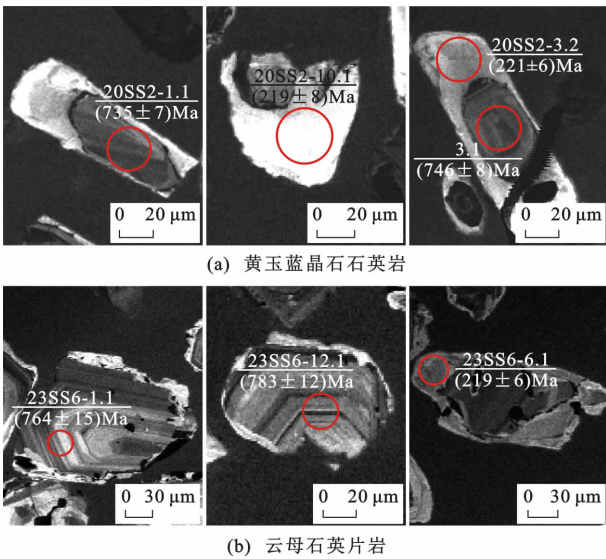
本文对云母石英片岩样品 23SS6 中的 12 颗锆石进行了 SHRIMP U-Pb 定年分析, 并获得 12 个年龄数据, 详细分析结果见表 2。分析点均落于年龄谐和曲线上 [图 7(b)]。其中, 锆石边部 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $(219 \pm 6) \text{ Ma}$, 代表其峰期变质年龄; 锆石核



w_s 为样品含量; w_c 为球粒陨石含量; w_p 为原始地幔含量; 原始地幔和球粒陨石标准化值引自文献[40]

图5 球粒陨石标准化稀土元素配分模式和原始地幔标准化微量元素蛛网图

Fig. 5 Chondrite-normalized REE Pattern and Primitive Mantle-normalized Trace Element Spider Diagram



图中横线上方为分析点编号, 横线下方为年龄

图6 代表性锆石的阴极发光图像

Fig. 6 CL Images of Representative Zircons

部 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为(763±9)Ma(MSWD值为0.68,分析点为9个),代表原岩最大沉积年龄;此外,还有两个锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为(273±10)和(425±12)Ma,有可能代表变质重结晶或Pb丢失年龄。

4 讨论

4.1 原岩沉积时代和变质时代

前人对于大别造山带宿松变质带蒲河黄玉蓝晶石石英岩和清水塘云母石英片岩的研究主要集中于变质温压条件和变质级别,并探究其与大陆深俯冲

之间的成因联系^[7-8,15-16,26],始终缺少年龄数据来限定它们的原岩时代和变质时代。本文聚焦于两种岩性的原岩形成年龄和变质年龄,首次对其进行年龄限定。此外,云母石英片岩广泛分布于宿松变质带,是研究陆-陆碰撞过程、俯冲-折返动力学机制和超大陆裂解事件等的重要对象。已有研究表明,宿松变质带总体表现为绿帘角闪岩相变质作用,代表三叠纪扬子俯冲板块的后缘部分^[21,34],然而其确切的三叠纪峰期变质时代与地质意义仍需不同地点、更多岩石类型样品的定年数据和岩石学研究来约束。

黄玉蓝晶石石英岩样品中3个碎屑锆石的变质增生边部分析点记录 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和年龄为221~213 Ma,加权平均年龄为(217±7)Ma(MWSD值为0.47)[图7(a)],且具有较低的Th/U值(<0.01),表明其经历了三叠纪变质作用,与大别造山带陆壳深俯冲时代^[30]一致;两个碎屑锆石核部分析点记录 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和年龄分别为(735±7)和(746±8)Ma[图6(a)],推测本文中的黄玉蓝晶石石英岩的最大沉积年龄约为740 Ma。

云母石英片岩样品中9个谐和度高的核部分析点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为(763±9)Ma(MSWD值为0.68)[图7(b)],代表了云母石英片岩的最大沉积年龄;变质增生边部分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为(219±6)Ma[图6(b)],表明云母石英片岩经历了三叠纪变质作用,参与了大别造山带的印支期大陆俯冲作用。

4.2 岩石成因及其对Rodinia超大陆裂解的启示

前人对宿松变质带黄玉蓝晶石石英岩及相关岩

表 2 黄玉蓝晶石石英岩和云母石英片岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 同位素分析结果

Table 2 Analysis Results of SHRIMP Zircon U-Pb Isotopes of Topaz-kyanite Quartzite and Mica-quartz Schist

分析点编号	$\omega(^{206}\text{Pb}_c)/\%$	$\omega(\text{U})/10^{-6}$	$\omega(\text{Th})/10^{-6}$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 值	$\omega(^{206}\text{Pb}^*)/10^{-6}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ 值	$^{207}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ 值	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ 值	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄/Ma
20SS2-1.1	0.14	201	197	1.01	20.900	0.064 3±0.001 2	1.070±0.023	0.120 7±0.001 3	735±7
20SS2-2.1	0.32	1 239	4 361	3.64	123.000	0.063 0±0.000 5	1.001±0.012	0.115 2±0.001 0	703±6
20SS2-3.1	0.08	195	174	0.92	20.600	0.064 5±0.001 0	1.091±0.022	0.122 6±0.001 3	746±8
20SS2-4.1	0.63	70	15	0.22	2.730	0.056 7±0.005 4	0.351±0.034	0.044 8±0.000 8	283±5
20SS2-5.1	0.07	309	236	0.79	31.300	0.063 5±0.000 8	1.032±0.018	0.117 8±0.001 2	718±7
20SS2-6.1	1.39	182	119	0.68	3.920	0.049 5±0.005 9	0.168±0.020	0.024 7±0.000 4	157±2
20SS2-7.1	2.48	162	13	0.09	8.030	0.046 2±0.007 4	0.358±0.057	0.056 3±0.001 2	353±7
20SS2-3.2	2.62	59	0	0.00	1.800	0.050 0±0.018 5	0.241±0.089	0.034 8±0.001 0	221±6
20SS2-8.1	2.59	105	1	0.01	3.130	0.049 0±0.011 3	0.228±0.052	0.033 6±0.000 9	213±6
20SS2-9.1	0.87	1 095	1 796	1.70	104.000	0.061 8±0.002 6	0.932±0.040	0.109 3±0.001 2	669±6
20SS2-10.1	3.59	29	0	0.01	0.893	0.036 0±0.024 1	0.170±0.114	0.034 6±0.001 3	219±8
20SS2-11.1	0.40	849	34	0.04	71.900	0.060 3±0.001 0	0.816±0.016	0.098 2±0.001 0	604±6
23SS6-1.1	0.63	64	74	1.21	6.910	0.061 2±0.003 6	1.062±0.067	0.125 8±0.002 6	764±15
23SS6-2.1	1.36	43	19	0.46	2.520	0.080 0±0.014 4	0.750±0.135	0.068 1±0.002 0	425±12
23SS6-3.1	5.63	40	11	0.28	1.560	0.071 0±0.023 4	0.420±0.139	0.043 2±0.001 6	273±10
23SS6-4.1	1.96	22	21	0.98	2.480	0.064 0±0.009 0	1.110±0.155	0.126 1±0.003 0	766±17
23SS6-5.1	0.67	61	49	0.84	6.580	0.064 4±0.005 3	1.100±0.105	0.124 3±0.004 1	755±24
23SS6-6.1	3.86	30	1	0.03	0.929	0.050 0±0.010 5	0.237±0.050	0.034 57±0.000 9	219±6
23SS6-7.1	0.19	158	95	0.62	17.200	0.062 9±0.001 8	1.093±0.035	0.125 9±0.001 9	765±11
23SS6-8.1		59	82	1.45	6.370	0.065 2±0.001 8	1.137±0.036	0.126 4±0.002 1	767±13
23SS6-9.1	0.27	89	120	1.38	9.640	0.064 4±0.001 9	1.112±0.038	0.125 3±0.002 0	761±11
23SS6-10.1	0.32	68	67	1.02	7.300	0.061 9±0.001 7	1.066±0.034	0.124 9±0.002 1	759±12
23SS6-11.1	0.25	70	75	1.10	7.430	0.064 4±0.002 1	1.087±0.040	0.122 5±0.002 1	745±12
23SS6-12.1	0.17	100	100	1.03	11.100	0.063 6±0.001 5	1.133±0.032	0.129 1±0.002 1	783±12

注:误差类型为 1σ ; $^{206}\text{Pb}_c$ 和 $^{206}\text{Pb}^*$ 分别表示普通铅和放射性成因铅;年龄用实测的 ^{204}Pb 含量进行普通铅校正。

石的原岩进行了初步研究并取得不同认识。例如,刘雅琴等认为黄玉蓝晶石石英岩为类白片岩,原岩为富铝质的黏土岩及黏土质砂岩^[41];康维国等认为黄玉蓝晶石石英岩与国外白片岩相似,原岩为沉积岩,甚至可能是蒸发环境下的镁质黏土^[42]。然而,江来利等根据中大别与榴辉岩相伴生的蓝晶石石英岩的矿物组合特点,认为其原岩是一种在榴辉岩相变质过程中被高压流体交代的细晶岩脉,而与宿松变质带黄玉蓝晶石石英岩不是同类岩石,与白片岩矿物组合也相差较大^[43]。Rolfo 等通过花凉亭白片岩的元素地球化学特征发现,其稀土元素分布特征与大别山等地区的奥长花岗质和浅色花岗质岩石高度一致,认为其原岩应为火成岩^[44]。

基于上述对蓝晶石石英岩及相关岩石原岩性质的不同认识,本文对黄玉蓝晶石石英岩与云母石英片岩的原岩性质进行了地球化学判别。Shaw 提出可根据公式 $I_{\text{DF}} = 10.44 - 0.21\omega(\text{SiO}_2) - 0.32$

$\omega(\text{TFe}_2\text{O}_3) - 0.98\omega(\text{MgO}) + 0.55\omega(\text{CaO}) + 1.46\omega(\text{Na}_2\text{O}) + 0.54\omega(\text{K}_2\text{O})$ 对变质岩原岩进行判别分析^[45]。其中, I_{DF} 为 DF 值,其为正值表示原岩为火成岩,其为负值则表示原岩为沉积岩。该公式的应用条件为 SiO_2 含量高于 53.5%。根据上述公式计算得到黄玉蓝晶石石英岩(样品 20SS2、1909SS2)和云母石英片岩(样品 23SS6、112QST1)的 DF 值分别为 -3.93、-4.84、-5.40、-4.13,均为负值(表 1),指示其原岩可能均为副变质岩。

变质岩原岩恢复时, SiO_2 等易迁移组分可能会对结果产生干扰;相比之下,沉积岩在 Ni 含量相近的情况下,通常表现出比火成岩更高的 Zr/TiO₂ 值。因此,通过采用相对稳定的 Zr、Ti 和 Ni 元素可以构建 Zr/TiO₂-Ni 图解,用于推断原岩类型。在 Zr/TiO₂-Ni 图解[图 8(a)]、(al+fm)-(c+alk)-Si 图解[图 8(b)]、TiO₂-SiO₂ 图解[图 8(c)]中,黄玉蓝晶石石英岩和云母石英片岩样品均落入沉积岩

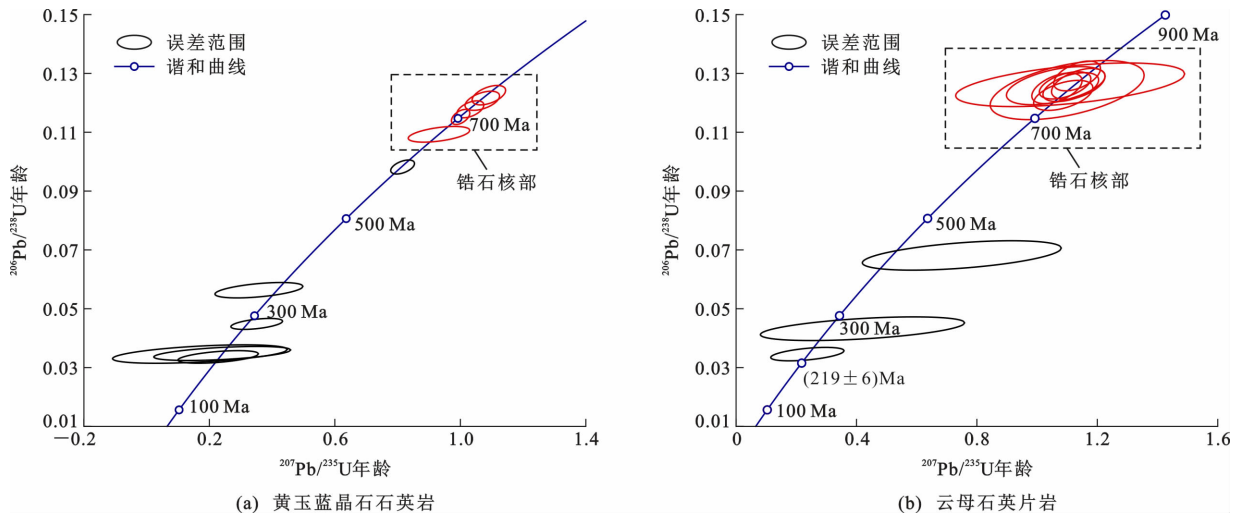


图7 年龄谐和曲线

Fig. 7 Concordia Diagrams of Ages

区,指示其均为副变质岩。在 A-C-FM 图解[图 8 (d)]中,样品均落入黏土质及基性火山岩区域,表明其原岩可能是蒸发环境下的镁质黏土,也可能是原始基性火成碎屑物质原地风化而形成的含燧石膨润土^[42]。综上所述,黄玉蓝晶石英岩和云母石英片岩的原岩均为沉积岩,即副变质岩。

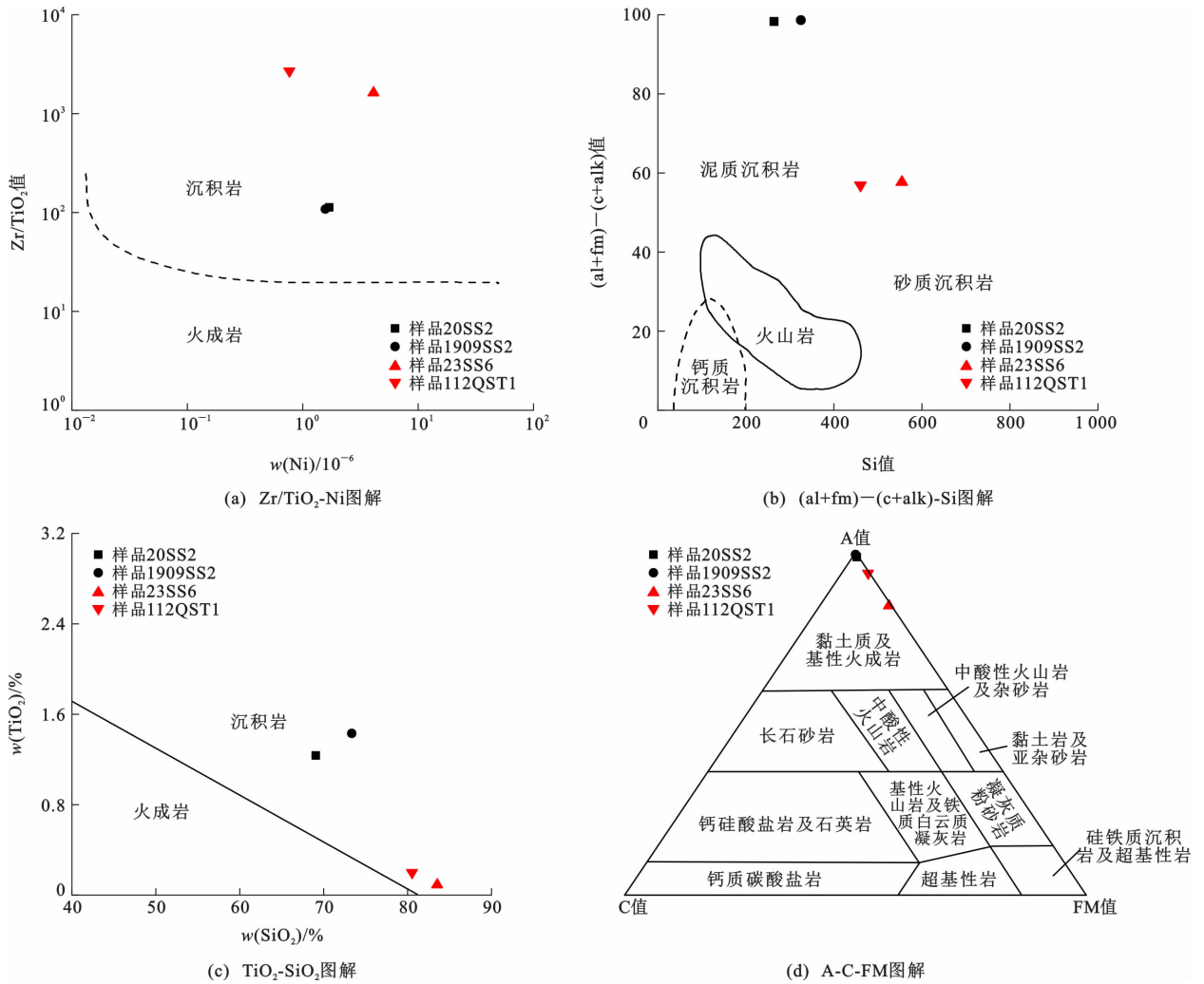
4.2.1 源区物质特征

黄玉蓝晶石英岩的 SiO_2 含量(69.09%~73.36%)显著低于典型石英岩,而 Al_2O_3 异常富集(含量为 22.34%~25.64%),这与含有大量蓝晶石(Al_2SiO_5)有关。这种“低 Si、超高 Al”岩石的原岩应为极度富 Al 的沉积岩(如高岭石质黏土岩或铝土矿)。极低的 TFe_2O_3 含量(0.05%~0.13%)和 MgO 含量(0.00%~0.02%)排除了基性物质混染的可能,而 TiO_2 相对富集(含量为 1.23%~1.43%)则与岩石中含有金红石相关。近乎缺失的碱金属(K_2O 含量为 0.04%~0.06%, Na_2O 含量为 0.06%~0.08%)和钙质(CaO 含量为 0.05%~0.08%)表明在变质过程中经历了彻底的脱碱和脱钙作用,这种极端化学分异可能发生在俯冲条件下,并与俯冲带流体活动密切相关^[46]。

黄玉蓝晶石英岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式[图 5(a)]显示,轻稀土元素适度富集,重稀土元素较亏损,整体上分布曲线相对较为平缓。这与河流和边缘海沉积物的稀土元素特征(轻稀土元素富集且轻稀土元素曲线斜率较大、重稀土元素分布平缓)相似,指示其原岩沉积物在海水中时间充足,导致沉积物元素与海水之间交换充分。原始地幔标准化微量元素蛛网图[图 5(b)]显示,黄玉蓝晶

石英岩明显具有大离子亲石元素 Rb 和 K 亏损的特征,暗示原岩经历过强烈的化学风化作用,导致碱金属元素几乎被完全淋滤。这种特征与古老风化壳(如铝土矿)或长期海相改造的富铝沉积物一致,符合大别山作为扬子板块北缘被动大陆边缘的沉积背景。高场强元素(如 U、Zr 和 Hf)具有明显富集的特征,Pb 明显富集,Eu 明显亏损。U、Pb 的富集能够揭示氧化性流体的活动,在俯冲带深部 U^{6+} 易溶于含水流体而迁移,随后在还原条件下沉淀。Eu 亏损可能继承自原岩长石的风化流失,也可能与高压条件下斜长石分解导致的 Eu^{2+} 进入流体相关。

云母石英片岩的 SiO_2 含量高达 80.53%~83.53%,表明岩石经历了强烈的石英富集过程。这种超常的石英富集可能源于两种机制:一是原岩为成熟度极高的石英砂岩(如滨海相沉积),在变质过程中进一步纯化;二是变质分异导致硅质强烈富集,常见于强烈剪切变形带中的硅质活化和再沉淀。 Al_2O_3 含量为 10.08%~12.93%,与典型泥质岩(Al_2O_3 含量为 15%~25%)相比显著偏低,但 K_2O 含量(2.51%~3.09%)较高,这种“高 Si、富 K”的组合暗示原岩可能是含钾长石碎屑的石英砂岩,在变质过程中长石分解转化为白云母,而黏土矿物提供的铝质有限。极低的 TiO_2 含量(0.09%~0.20%)、 TFe_2O_3 含量(0.48%~0.90%)和 MgO 含量(0.12%~0.29%)反映原岩中缺乏铁镁矿物和副矿物,可能形成于稳定克拉通背景下的纯净沉积环境。异常贫 Ca(CaO 含量为 0.04%~0.06%)、Na(Na_2O 含量为 0.61%~0.63%)的特征排除了火山物质参与的可能,而 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值高达 4~5



图(a)底图引自文献[47];图(b)底图引自文献[48], al, fm, c, alk 及 Si 均指代尼格里参数;图(c)引自文献[49];图(d)底图引自文献[47], A 值为 $x(\text{Al}_2\text{O}_3) / (x(\text{Al}_2\text{O}_3) + x(\text{CaO}) + x(\text{FeO}) + 2x(\text{Fe}_2\text{O}_3) + x(\text{MgO}))$, C 值为 $x(\text{CaO}) / (x(\text{Al}_2\text{O}_3) + x(\text{CaO}) + x(\text{FeO}) + 2x(\text{Fe}_2\text{O}_3) + x(\text{MgO}))$, FM 值为 $(x(\text{FeO}) + 2x(\text{Fe}_2\text{O}_3) + x(\text{MgO})) / (x(\text{Al}_2\text{O}_3) + x(\text{CaO}) + x(\text{FeO}) + 2x(\text{Fe}_2\text{O}_3) + x(\text{MgO}))$, 其中 $x(\cdot)$ 为元素摩尔分数

图 8 原岩判别图解

Fig. 8 Discrimination Diagrams of Protolith

则进一步证实了钾长石或云母类矿物的控制作用。这种特殊的地球化学特征可能指示其形成于扬子板块北缘被动大陆边缘的浅海相高成熟沉积,在俯冲变质过程中经历了以下改造:①强烈剪切导致硅质活化和石英动态重结晶;②钾长石变质分解形成白云母;③贫钙流体活动带出碳酸盐组分。与典型泥质片岩相比,这种“高 Si、低 Al”的特征更接近化学沉积岩端元,可能代表大别造山带中一种特殊的变质石英岩-云母片岩过渡类型。

云母石英片岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式[图 5(a)]基本一致,轻、重稀土元素无明显分异, La/Yb 值为 2.2~6.5,表明原岩可能为成熟度较高的陆源碎屑沉积岩(如石英砂岩或杂砂岩),其稀土元素组成受控于稳定克拉通物源(如古老花岗质基

底)的均一化混合。弱分异特征反映沉积过程中经历了长期搬运和分选,导致重矿物(如锆石、独居石)与轻稀土元素载体(如黏土矿物)的均衡混合。 δEu 值为 0.63~0.77,具有中等 Eu 负异常,表明其原岩可能经历了斜长石的分离结晶或来源于经历了斜长石分离的源区。原始地幔标准化微量元素蛛网图[图 5(b)]显示,云母石英片岩明显富集大离子亲石元素(如 K、Pb 和 Ba),反映原岩富含云母类矿物和钾长石,可能为泥质-粉砂质沉积岩(如页岩或杂砂岩)。其中, Ba 与 K 的富集可能继承自原生钾长石或重晶石(BaSO_4),而 Pb 的富集暗示原岩经历氧化性风化或含有有机质吸附。高场强元素(如 Th、Ce、Ta 和 Ti)亏损,指示原岩中缺乏基性火山物质或未经过显著的地幔物质添加。Th/Ce 值低(0.04~

0.12)进一步排除酸性火山岩贡献,支持成熟陆源沉积主导;元素 Zr 和 Hf 富集,直接关联于碎屑锆石的残留,反映物源来自古老长英质岩石(如花岗质基底),且沉积-变质过程中锆石抗风化、抗溶解的特性得以保留;Th/La 值为 0.06~0.25,进一步支持沉积成因;K、Ba 的富集可能受变质流体中富钾碱性流体(如白云母化)的渗透影响,而 Pb 的富集常与硫化物的流体搬运相关,暗示俯冲带或折返期流体活动;Th、Ta、Ti 的亏损表明变质流体未显著改变这些元素的原始分布(因高场强元素在流体中溶解度极低),而 Zr、Hf 的保留进一步证实其未经历极端超高压变质(否则锆石可能溶解再沉淀);该元素组合(大离子亲石元素富集+高场强元素亏损+Zr、Hf 富集)是稳定克拉通边缘成熟沉积(如扬子板块北缘古生代浅海相沉积)的典型标志,与活动大陆边缘(火山碎屑混杂)或岛弧环境(高场强元素亏损,但 Th 富集)显著不同;Pb/K 值异常高,可能反映俯冲带氧化性流体对 Pb 的迁移富集,为大别造山带深部流体循环提供证据。这些特征明确指示云母石英片岩的原岩为扬子板块北缘成熟陆源沉积岩(富黏土和长英质碎屑),在俯冲-变质过程中受到选择性流体改造(大离子亲石元素再活化,但高场强元素保留),其地球化学特征是解析大别造山带前造山沉积环境和造山过程流体-岩石相互作用的理想载体。

4.2.2 构造环境

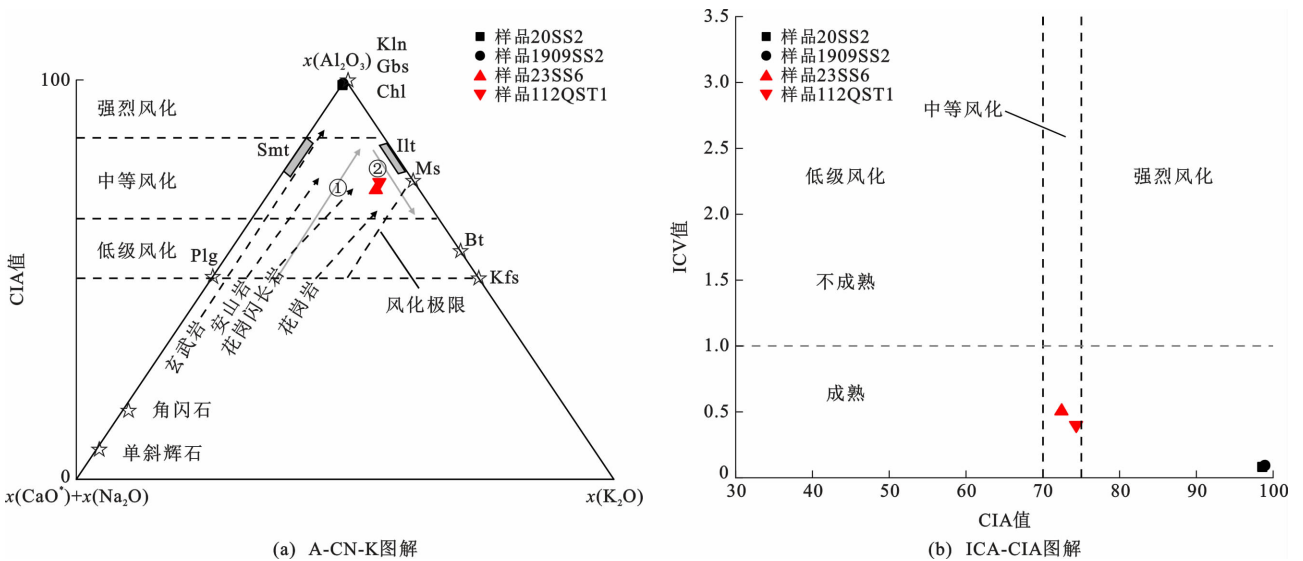
沉积岩的全岩化学成分通常保留了丰富的沉积物来源(或物源)记录,能够探讨上地壳源的组成以及沉积物的性质和分布之间的关系^[50]。由于富含斜长石和钾长石的岩石及其风化产物中黏土矿物是上地壳派生矿物的主要成分^[51],所以 A-CN-K 体系有助于评价新鲜岩石成分和研究其风化趋势。化学蚀变指数(Chemical Index of Alteration, CIA)是衡量沉积物源区化学风化强度的经典地球化学指标,尤其适用于古气候重建和源区分析。高化学蚀变指数反映了风化过程中不稳定阳离子(如 Ca^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+})被显著淋失,而稳定组分(如 Al^{3+} 、 Ti^{4+})在残积物中相对富集的过程^[52];相反,低化学蚀变指数表明几乎没有化学变化,因此可能反映了凉爽或干旱的环境。化学蚀变指数为 50~65 反映寒冷干燥气候条件下低等化学风化程度;化学蚀变指数为 65~80 反映温暖湿润气候条件下中等化学风化程度;化学蚀变指数为 85~100 反映炎热潮湿气候条件下的强烈风化程度。成分变异指数(Index of Compositional Variability, ICV)最初是针对泥岩建

立的,其原理基于泥岩中黏土矿物在成岩及低级变质作用中易于发生再结晶和矿物相变,但这类变化通常在等化学条件下进行。尽管矿物组合可能显著改变,元素仅发生局部再分配,而整体化学成分并未经历大规模带入或迁出,因而原始沉积物的成分特征得以保存^[53]。成分变异指数可以用来判断碎屑沉积岩源物质的成熟度。未成熟岩石具有较高的成分变异指数(>1.0),指示单一的风化循环,表明其含黏土矿物较少,属构造活动时期的初始沉积;而成熟岩石具有较低的成分变异指数(<1.0),指示风化、侵蚀和再沉积的多个循环,表明其含黏土矿物较多,可能经历了再沉积作用或是强烈风化条件下的初始沉积。基于此,在宿松杂岩带的变沉积岩研究中,综合运用化学蚀变指数与成分变异指数来评价其原始化学风化程度与成分成熟度,具有合理的地球化学依据。

由 A-CN-K 图解可知,黄玉蓝晶石石英岩和云母石英片岩均落在“风化极限”线的左侧[图 9(a)]。黄玉蓝晶石石英岩样品交代前化学蚀变指数为 98~99,表明其原岩经历了强烈风化,初始矿物(如长石、云母等)几乎完全分解为高岭石、三水铝石等次生黏土矿物,反映了炎热潮湿气候条件。云母石英片岩样品交代前化学蚀变指数为 72~75,表明其原岩经历了中等风化,反映了温暖湿润的气候条件。由 ICA-CIA 图解可知,黄玉蓝晶石石英岩样品的成分变异指数为 0.08~0.09,云母石英片岩样品的成分变异指数为 0.40~0.51[图 9(b)],表明黄玉蓝晶石石英岩与云母石英片岩可能形成于两种成因背景:一是经历了多旋回的沉积再循环过程;二是在炎热潮湿的气候条件下,原始物质经历了强烈的化学风化并随之发生沉积。成分变异指数显示的成熟特征表明两种岩石可能形成于高温多雨的热带—亚热带气候(如古大洋周边),或长期稳定的陆地表面(如古老克拉通内部)。

变质沉积岩的主量元素在判断原岩类型、构造环境和源区方面均具有重要作用。ACF 图解和 A'FK 图解在分析变质岩化学特征、判别原岩类型方面具有重要作用。将黄玉蓝晶石石英岩和云母石英片岩样品数据置于 ACF 图解和 A'FK 图解(图 10)上进行投点,发现黄玉蓝晶石石英岩和云母石英片岩样品落在富铝黏土和页岩区域。

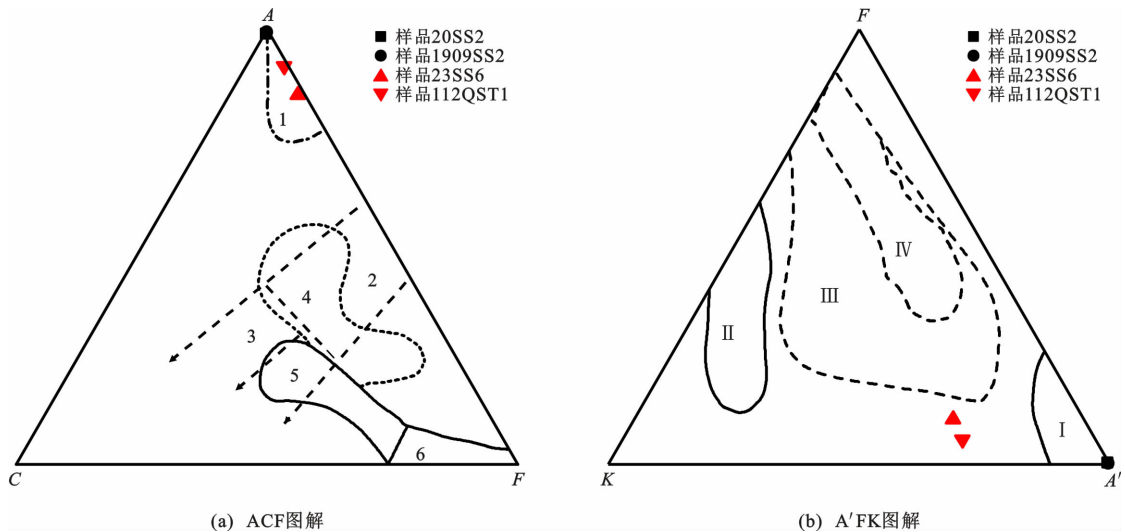
微量元素中的稳定元素(如 Th、Sc、Zr)能够有效反映沉积岩的物源特征^[54-55]。其中, Th/Sc 值是判断原岩成分的重要参数,其在沉积过程中基本保



图(a)引自文献[51];图(b)引自文献[56];图(a)中,灰色箭头①表示风化趋势,灰色箭头②表示钾交代;Plg为斜长石,Smt为蒙脱石,Kln为高岭石,Gbs为三水铝石,Chl为绿泥石,Ilt为伊利石,Ms为白云母,Bt为黑云母,Kfs为钾长石;CIA值为 $100x(\text{Al}_2\text{O}_3)/(x(\text{Al}_2\text{O}_3) + x(\text{Na}_2\text{O}) + x(\text{CaO}^*) + x(\text{K}_2\text{O}))$,其中 CaO^* 为经过校正扣除碳酸盐矿物和磷酸盐矿物中 CaO 后,硅酸盐矿物中剩余 CaO ;ICV 值为 $(x(\text{Fe}_2\text{O}_3) + x(\text{K}_2\text{O}) + x(\text{Na}_2\text{O}) + x(\text{CaO}^*) + x(\text{MgO}) + x(\text{MnO}) + x(\text{TiO}_2))/x(\text{Al}_2\text{O}_3)$

图 9 风化作用判别图解

Fig. 9 Discrimination Diagrams of Weathering



图(a)底图引自文献[47]; $A = x(\text{Al}_2\text{O}_3) + x(\text{Fe}_2\text{O}_3) - (x(\text{Na}_2\text{O}) + x(\text{K}_2\text{O}))$, $C = x(\text{CaO})$, $F = x(\text{MgO}) + x(\text{FeO}) + x(\text{MnO})$, $A' = x(\text{Al}_2\text{O}_3) + x(\text{Fe}_2\text{O}_3) - (x(\text{Na}_2\text{O}) + x(\text{K}_2\text{O}) + x(\text{CaO}))$, $K = x(\text{K}_2\text{O})$;1 为富铝黏土和页岩,2 为黏土和页岩(碳酸盐含量为 0%~35%) (断线之内),3 为泥灰岩(碳酸盐含量为 35%~65%) (箭头线之间),4 为杂砂岩(点线之内),5 为玄武岩和安山质岩(实线之内),6 为超镁铁质岩。图(b)底图引自文献[47];I 为富铝黏土,II 为长英质岩石,III 为黏土,IV 为杂砂岩

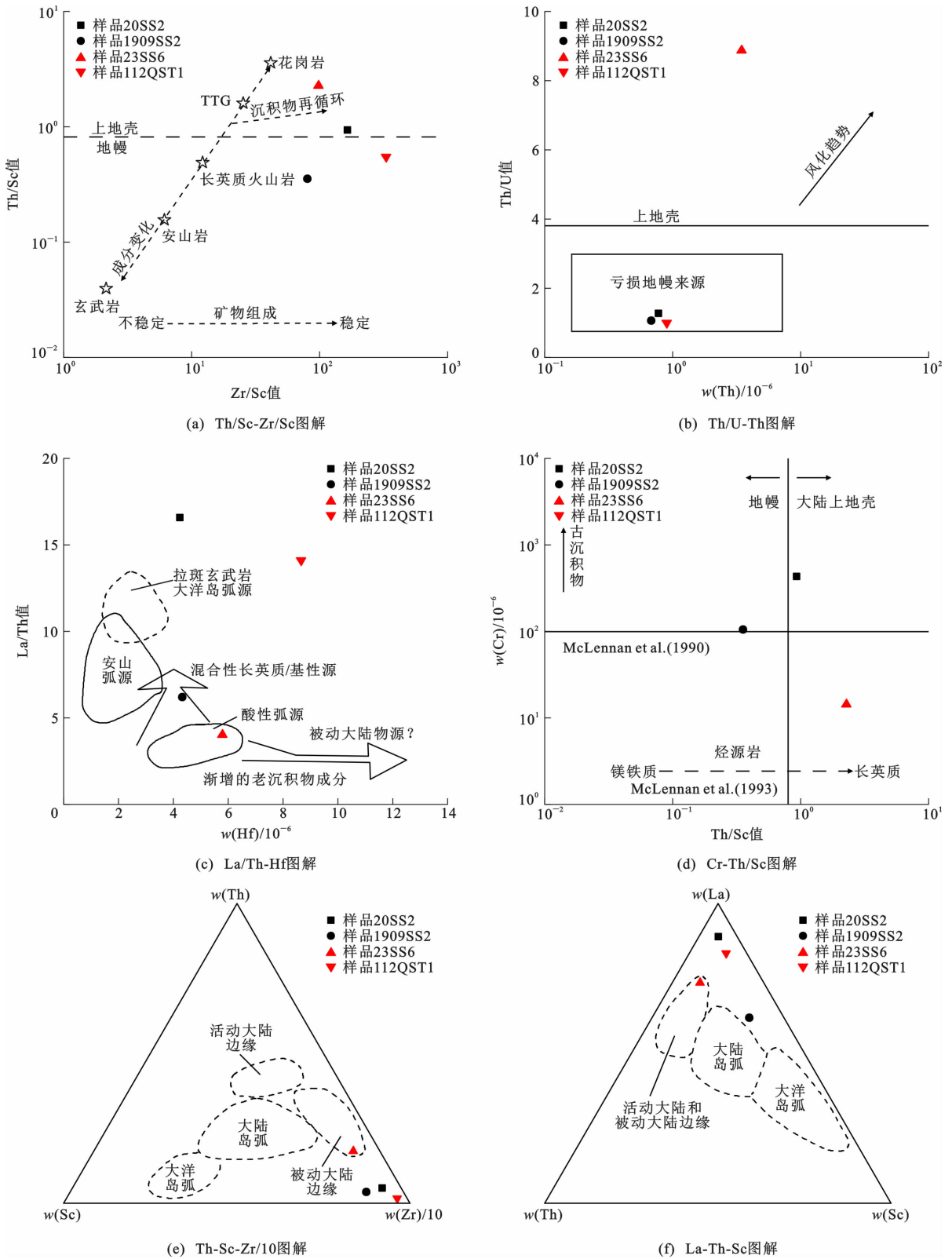
图 10 ACF 图解和 A'FK 图解

Fig. 10 Diagrams of ACF and A'FK

持不变;而 Zr/Sc 值则能指示锆石的富集程度,并随着沉积物的搬运和再循环逐渐升高^[57-58]。因此, Th/Sc 值和 Zr/Sc 值是分析沉积岩物源组成的可靠地球化学指标,能够有效区分不同性质的源区岩石^[58]。在 Th/Sc-Zr/Sc 图解^[59][图 11(a)]中,黄玉蓝晶石石英岩和云母石英片岩均未显示出与母岩成

分的相关关系。样品沿沉积物再循环趋势线分布,表明其化学分异不受母岩成分变化的控制,沉积物在沉积过程中受到分选作用或者再循环作用的影响,使得 Zr 元素在沉积物中优先富集。

McLennan 等提出将 Th/U-Th 图解[图 11(b)]用于限定沉积岩的物源^[58]。Th 性质稳定,U



图(a)、(b)底图引自文献[58],图(c)底图引自文献[60],图(d)底图引自文献[61],图(e)底图引自文献[62],图(f)底图引自文献[62];图(a)中,TTG表示英云闪长岩(Tonalite)、奥长花岗岩(Trondhjemite)和花岗闪长岩(Granodiorite)组合;图(d)中,McLennan et al. (1990)表示应用 $w(\text{Cr}) = 100 \times 10^{-6}$ 来进行分类(引自文献[63]),McLennan et al. (1993)表示应用 Th/Sc 值来示踪物源和沉积再循环作用(引自文献[58])

图 11 源区成分和构造环境判别图解

Fig. 11 Discrimination Diagrams of Source Composition and Tectonic Setting

则在风化和再循环作用中较易移动,大陆上地壳(Upper Continental Crust, UCC)岩石的 Th/U 平均值为 3.8。氧化环境下的风化和再沉积作用会导致 U^{4+} 被氧化为更易溶解的 U^{6+} , 在沉积过程中 U 会溶解和流失,从而导致 Th/U 值升高。黄玉蓝晶石石英岩具有较低的 Th/U 值,反映其源区可能来自亏损地幔;云母石英片岩也具有较低的 Th/U 值,反映其源区可能也来自亏损地幔。其中,黄玉蓝晶石石英岩样品 23SS6 的 Th/U 值超过 8.5,表明其受到风化作用的影响。

La/Th-Hf 图解^[60]通常用于恢复原岩的再循环或其他成因过程。由图 11(c)可知,黄玉蓝晶石石英岩和云母石英片岩在空间上呈分散分布,反映了沉积物具有较高的成分成熟度,暗示其沉积位置距离物源区较远,且经历了明显的沉积再循环过程,其中可能还掺入了古老的沉积组分。

Cr-Th/Sc 图解是评价物源区地球化学特征的重要工具^[61],合并了 McLennan 等的分类^[59,63]。从图 11(d)可以看出:黄玉蓝晶石石英岩和云母石英片岩都表现出地幔到大陆上地壳的亲趋势;而云母石英片岩样品 23SS6 落入长英质区域,样品 112QST1 的 Th/Sc 值为 0.55, Cr 含量为 0,故未在图中体现,但明显落入镁铁质区域。与云母石英片岩相比,黄玉蓝晶石石英岩具有更高的 Cr 和不相容元素(如轻稀土元素)含量,这是物源和强风化^[63]共同作用的结果,与其具有高化学蚀变指数的特征相一致。

在利用沉积岩的地球化学组成来推断沉积岩盆地的构造背景方面,不活泼微量元素特别有效^[64-65]。从 Th-Sc-Zr/10 图解[图 11(e)]和 La-Th-Sc 图解[图 11(f)]可以看出:黄玉蓝晶石石英岩样品主要落在被动大陆边缘的周边区域,个别接近大陆岛弧区域;云母石英片岩样品主要落在被动大陆边缘范围内和周边区域。结合沉积位置距离物源区较远的特征[图 11(c)],上述结论暗示华南陆块北缘为主要物源区。

元古代沉积盆地的形成和演化受板块构造作用影响,并常与超大陆的聚合和裂解过程密切相关^[66-67]。宿松变质带的原岩形成时代主要集中在晚太古代、古元古代、中元古代和新元古代^[34]。而新元古代年龄通常被认为与 Rodinia 超大陆裂解有关。李俊辉等通过对宿松变质带进行年代学、岩相学和微量元素分析,发现 760~750 Ma 宿松地区发生有陆内裂谷岩浆活动^[68]。刘贻灿等通过对宿松变质

带俯冲岩片花岗质岩石进行野外地质调查以及岩石学、元素-同位素地球化学和锆石年代学研究,发现宿松变质带花岗片麻岩的原岩时代包括晚太古代(2.7~2.5 Ga)和新元古代(830~770 Ma)两大类,其中新元古代花岗片麻岩的原岩是由经历了约 2.0 Ga 变质作用的晚太古代岩石在新元古代大陆裂解过程中发生重熔作用形成的^[24]。本文研究的原岩最大沉积时代约为 740 Ma 的黄玉蓝晶石石英岩、原岩最大沉积时代约为 770 Ma 的云母石英片岩与上述新元古代年代学记录一致,证明原“宿松群”的部分岩石属于 Rodinia 超大陆的一部分,为宿松变质带及扬子板块北缘参与了新元古代 Rodinia 超大陆的裂解提供了新的约束。此外,黄玉蓝晶石石英岩和云母石英片岩所记录的三叠纪变质年龄(219~217 Ma),表明其参与了大别造山带印支期的大陆俯冲作用。

5 结 语

(1)本文首次限定了大别造山带宿松变质带蒲河黄玉蓝晶石石英岩和清水塘云母石英片岩原岩的最大沉积时代为 763~746 Ma,并提供了三叠纪(219~217 Ma)变质作用的年代学依据。

(2)蒲河黄玉蓝晶石石英岩和清水塘云母石英片岩原岩为沉积岩,主要为富铝黏土和页岩,形成于与 Rodinia 超大陆裂解过程有关的盆地环境中,并参与了大别造山带印支期的大陆俯冲作用。

(3)蒲河黄玉蓝晶石石英岩具有中等 Si,较高 Al,富集 U、Zr、Hf 等高场强元素,亏损 Rb、K 等大离子亲石元素,中等 Eu 负异常等特征,与古老风化壳或长期海相改造的富铝沉积物特征一致,符合大别造山带作为扬子板块北缘被动大陆边缘的沉积背景。

(4)清水塘云母石英片岩具有较高 Si、K,较低 Al,富集 K、Pb、Ba 等大离子亲石元素,亏损 Th、Ce、Ta、Ti 等高场强元素等特征,显示其形成于扬子板块北缘被动大陆边缘的高成熟沉积,并在俯冲变质过程中经历了改造作用。

北京离子探针中心颌颀强研究员和杨淳女士等在锆石 SHRIMP 分析测试过程中给予了支持和帮助,在此一并表示衷心感谢!

参 考 文 献 :

References :

[1] OKAY A I, XU S T, SENGÖR A M C. Coesite from

- the Dabie Shan Eclogites, Central China[J]. *European Journal of Mineralogy*, 1989, 1(4): 595-598.
- [2] WANG X M, LIOU J G, MAO H K. Coesite-bearing Eclogite from the Dabie Mountains in Central China [J]. *Geology*, 1989, 17(12): 1085-1088.
- [3] XU S T, OKAY A I, JI S Y, et al. Diamond from the Dabie Shan Metamorphic Rocks and Its Implication for Tectonic Setting[J]. *Science*, 1992, 256: 80-82.
- [4] 郑永飞. 超高压变质与大陆碰撞研究进展: 以大别—苏鲁造山带为例[J]. *科学通报*, 2008, 53(18): 2129-2152.
- ZHENG Yong-fei. A Perspective View on Ultrahigh-pressure Metamorphism and Continental Collision in the Dabie-Sulu Orogenic Belt[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(18): 2129-2152.
- [5] 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.
- [6] 徐树桐, 江来利, 刘贻灿, 等. 大别山区(安徽部分)的构造格局和演化过程[J]. *地质学报*, 1992, 66(1): 1-14, 97.
- XU Shu-tong, JIANG Lai-li, LIU Yi-can, et al. Tectonic Framework and Evolution of the Dabie Mountains in Anhui, Eastern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1992, 66(1): 1-14, 97.
- [7] 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 Framework and Evolution of the Dabie Mountains[M]. Beijing: Science Press, 1994.
- [8] 徐树桐, 刘贻灿, 江来利, 等. 大别山造山带的构造几何学和运动学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2002.
- XU Shu-tong, LIU Yi-can, JIANG Lai-li, et al. Architecture and Kinematics of the Dabie Mountains Orogen[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2002.
- [9] 刘贻灿, 张成伟. 深俯冲地壳的折返: 研究现状与展望[J]. *中国科学: 地球科学*, 2020, 50(12): 1748-1769.
- LIU Yi-can, ZHANG Cheng-wei. Exhumation of Deeply Subducted Crust: Review and Outlook[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2020, 50(12): 1748-1769.
- [10] 吴维平, 徐树桐, 江来利, 等. 中国东部大别山超高压变质杂岩中的石英硬玉岩带[J]. *岩石学报*, 1998, 14(1): 60-70.
- WU Wei-ping, XU Shu-tong, JIANG Lai-li, et al. Quartz-jadeitite in Ultrahigh-pressure Metamorphic Belt in the Dabie Mountains, Eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1998, 14(1): 60-70.
- [11] SCHERTL H P, MARESCH W V, STANEK K P, et al. New Occurrences of Jadeitite, Jadeite Quartzite and Jadeite-lawsonite Quartzite in the Dominican Republic, Hispaniola: Petrological and Geochronological Overview[J]. *European Journal of Mineralogy*, 2012, 24(2): 199-216.
- [12] ZHANG Y F, WU Y, WANG C, et al. Experimental Constraints on the Genesis of Jadeite Quartzite from Shuanghe, Dabie Mountain Ultra-high Pressure Metamorphic Terrane[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 57(1): 104-116.
- [13] YUI T F, FUKUYAMA M. A Revisit to the Yorii Jadeite-quartz Rock, the Kanto Mountains, Central Japan: Implications for Petrogenesis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 108: 58-67.
- [14] 张树业, 胡克, 刘晓春, 等. 中国中部元古代蓝片岩—白片岩—榴辉岩带: 古陆内板块裂撞带的三位一体特征[J]. *矿物岩石地球化学通讯*, 1989, 8(2): 101-104.
- ZHANG Shu-ye, HU Ke, LIU Xiao-chun, et al. The Neoproterozoic Blueschist-whiteschist-eclogite Belt in Central China: The Trinity Feature of Intra-cratonic Plate Rifting-collision Zone[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 1989, 8(2): 101-104.
- [15] 翟明国, 从柏林, 陈晶, 等. 大别山区变质岩中蓝晶石的几种退变质反应及其所指示的动力学过程[J]. *岩石学报*, 1995, 11(3): 257-272.
- ZHAI Ming-guo, CONG Bo-lin, CHEN Jing, et al. Some Retrograde Metamorphic Reactions in Metamorphic Rocks in Dabie Mountains, Central China and Their Implication for Metamorphic Kinetics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1995, 11(3): 257-272.
- [16] 魏春景, 单振刚. 安徽省大别山南部宿松杂岩变质作用研究[J]. *岩石学报*, 1997, 13(3): 356-368.
- WEI Chun-jing, SHAN Zhen-gang. Metamorphism of the Susong Complex from the Southern Dabie Mountains, Anhui Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1997, 13(3): 356-368.
- [17] LIOU J G, WANG Q, ZHANG R Y, et al. Ultrahigh-P Metamorphic Rocks and Their Associated Lithologies from the Dabie Mountains, Central China: A Field Trip Guide to the 3rd International Eclogite Field Symposium [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1995, 40(S): 1-40.
- [18] HERMANN J, RUBATTO D. Subduction of Continental Crust to Mantle Depth: Geochemistry of Ultra-

- high-pressure Rocks [J]. *Treatise on Geochemistry (Second Edition)*, 2014, 4: 309-340.
- [19] 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.
- [20] 石永红, 王次松, 康涛, 等. 安徽省宿松变质杂岩岩石学特征和锆石 U-Pb 年龄研究 [J]. *岩石学报*, 2012, 28(10): 3389-3402.
- SHI Yong-hong, WANG Ci-song, KANG Tao, et al. Petrological Characteristics and Zircon U-Pb Age for Susong Metamorphic Complex Rocks in Anhui Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(10): 3389-3402.
- [21] LI Y, LIU Y C, YANG Y, et al. New U-Pb Geochronological Constraints on Formation and Evolution of the Susong Complex Zone in the Dabie Orogen [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2017, 91(5): 1915-1918.
- [22] 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 Yi-can, 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.
- [23] WU Z, YANG Y, LIU Y C, et al. Detrital Zircon Geochronology and Provenance of Metasedimentary Rocks from the Susong Complex Zone in the Dabie Orogen [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2023, 97(5): 1335-1354.
- [24] 刘贻灿, 杨阳, 姜为佳, 等. 大别造山带在大陆裂解、地壳的俯冲-折返及山根垮塌期间的多期部分熔融作用 [J]. *地球科学*, 2019, 44(12): 4195-4202.
- LIU Yi-can, YANG Yang, JIANG Wei-jia, et al. Diverse Partial Melting During Continental Rifting, Subduction-exhumation and Mountain-root Collapse in the Dabie Orogen, Central China [J]. *Earth Science*, 2019, 44(12): 4195-4202.
- [25] 荆延仁, 张良田, 毕治国, 等. 安徽太湖、宿松一带白片岩的发现及其地质意义 [J]. *中国区域地质*, 1991, 10(2): 131-134.
- JING Yan-ren, ZHANG Liang-tian, BI Zhi-guo, et al. The Discovery of Whiteschist in the Taihu-Susong Area, Anhui, and Its Geological Significance [J]. *Regional Geology of China*, 1991, 10(2): 131-134.
- [26] 刘雅琴, 胡克. 中国中部高铝质超高压变质岩 [J]. *岩石学报*, 1999, 15(4): 548-556.
- LIU Ya-qin, HU Ke. Ultra-high-pressure Metamorphic Rocks of Aluminium-rich in Central China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1999, 15(4): 548-556.
- [27] 周安泰, 石永红, 赵俊先, 等. 大别造山带宿松变质杂岩变质演化过程 [J]. *地球科学与环境学报*, 2018, 40(6): 727-738.
- ZHOU An-tai, SHI Yong-hong, ZHAO Jun-xian, et al. Metamorphic Evolution of Susong Metamorphic Complex in Dabie Orogenic Belt, China [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2018, 40(6): 727-738.
- [28] 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): 1069-1075.
- 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): 1069-1075.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] ZHAI M G, CONG B L, ZHAO Z Y, et al. Petrological-tectonic Units in the Coesite-bearing Metamorphic Terrain of the Dabie Mountains, Central China and Their Geotectonic Implications [J]. *Journal of South-east Asian Earth Sciences*, 1995, 11(1): 1-13.
- [33] 杨阳, 刘贻灿, 李远. 大别山宿松变质带 ~1.38 Ga 花岗质岩浆作用的厘定及其对 Columbia 超大陆裂解的启示 [J]. *大地构造与成矿学*, 2024, 48(5): 1078-1089.
- YANG Yang, LIU Yi-can, LI Yuan. The Finding of ~1.38 Ga Granitic Magmatism from the Susong Metamorphic Zone in the Dabie Orogen and Its Implications for the Breakup of the Columbia Supercontinent [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2024, 48(5): 1078-1089.

- [34] 刘贻灿, 杨 阳. 大别造山带的野外实践和研究方法 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2022.
LIU Yi-can, YANG Yang. Field Practice and Investigation on the Dabie Orogen [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2022.
- [35] COMPSTON W, WILLIAMS I S, MEYER C. U-Pb Geochronology of Zircons from Lunar Breccia 73217 Using a Sensitive High Mass-resolution Ion Microprobe [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1984, 89(2): 525-534.
- [36] WILLIAMS I S. U-Th-Pb Geochronology by Ion Microprobe [C] // MCKIBBEN M A, SHANKS III W C, RIDLEY W I. Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes. Houston: Society of Economic Geologists, 1997: 1-35.
- [37] BLACK L P, KAMO S L, ALLEN C M, et al. TEMORA 1: A New Zircon Standard for Phanerozoic U-Pb Geochronology [J]. *Chemical Geology*, 2003, 200(1/2): 155-170.
- [38] NASDALA L, HOFMEISTER W, NORBERG N, et al. Zircon M257: A Homogeneous Natural Reference Material for the Ion Microprobe U-Pb Analysis of Zircon [J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2008, 32(3): 247-265.
- [39] LUDWIG K R. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [R]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 2003.
- [40] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42: 313-345.
- [41] 刘雅琴, 张树业, 康维国. 华中高压变质带中蓝晶石黄玉岩的特征及与白片岩的对比 [J]. *长春地质学院学报*, 1992, 22(2): 144-149, 161.
LIU Ya-qin, ZHANG Shu-ye, KANG Wei-guo. Characteristics of Kyanite-topaz Rocks and Their Comparison with White-schist in the High-pressure Metamorphic Belt in Central China [J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 1992, 22(2): 144-149, 161.
- [42] 康维国, 张树业, 刘晓春, 等. 华中陆壳高压变质带上蓝晶石黄玉岩类的发现及其地质特征 [J]. *中国科学: B 辑*, 1992, 11(9): 981-986.
KANG Wei-guo, ZHANG Shu-ye, LIU Xiao-chun, et al. Discovery and Geological Characteristics of Kyanite-topaz Rocks in the High-pressure Metamorphic Belt of the Central China Continental Crust [J]. *Science in China: Series B*, 1992, 11(9): 981-986.
- [43] 江来利, 徐树桐, 吴维平, 等. 大别山东段超高压变质岩带蓝晶石石英岩中的白片岩组合 [J]. *科学通报*, 1998, 43(14): 1540-1544.
JIANG Lai-li, XU Shu-tong, WU Wei-ping, et al. Discovery of White Schist Assemblages in Kyanite Quartzite from the Ultrahigh-pressure Metamorphic Belt in the Eastern Segment of the Dabie Mountains [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(14): 1540-1544.
- [44] ROLFO F, COMPAGNONI R, XU S T, et al. First Report of Felsic Whiteschist in the Ultrahigh-pressure Metamorphic Belt of Dabie Shan, China [J]. *European Journal of Mineralogy*, 2000, 12(4): 883-898.
- [45] SHAW D M. The Origin of the Apsley Gneiss, Ontario [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1972, 9(1): 18-35.
- [46] SCHMIDT M W, POLI S. Devolatilization During Subduction [J]. *Treatise on Geochemistry (Second Edition)*, 2014, 4: 669-701.
- [47] 王仁民, 贺高品, 陈珍珍, 等. 变质岩原岩图解判别法 [M]. 北京: 地质出版社, 1987.
WANG Ren-min, HE Gao-pin, CHEN Zhen-zhen, et al. Methods for Identifying Protoliths of Metamorphic Rocks Using Diagrams [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987.
- [48] SIMONEN A J P. Stratigraphy and Sedimentation of the Svecofennic, Early Archean Supracrustal Rocks in Southwestern Finland [J]. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 1953, 160: 1-64.
- [49] WINCHESTER J A, PARK R G, HOLLAND J G. The Geochemistry of Lewisian Semipelitic Schists from the Gairloch District, Wester Ross [J]. *Scottish Journal of Geology*, 1980, 16(2/3): 165-179.
- [50] MCLENNAN S M. Rare Earth Elements in Sedimentary Rocks: Influence of Provenance and Sedimentary Processes [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1989, 21(1): 169-200.
- [51] NESBITT H W, YOUNG G M. Formation and Diagenesis of Weathering Profiles [J]. *The Journal of Geology*, 1989, 97(2): 129-147.
- [52] NESBITT H W, YOUNG G M. Prediction of Some Weathering Trends of Plutonic and Volcanic Rocks Based on Thermodynamic and Kinetic Considerations [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(7): 1523-1534.
- [53] COX R, LOWE D R, CULLERS R L. The Influence of Sediment Recycling and Basement Composition on Evolution of Mudrock Chemistry in the Southwestern United States [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*,

- 1995,59(14):2919-2940.
- [54] SCHOENBORN W A, FEDO C M. Provenance and Paleoweathering Reconstruction of the Neoproterozoic Johnnie Formation, Southeastern California[J]. *Chemical Geology*,2011,285(1/2/3/4):231-255.
- [55] SINGH P. Geochemistry and Provenance of Stream Sediments of the Ganga River and Its Major Tributaries in the Himalayan Region, India[J]. *Chemical Geology*,2010,269(3/4):220-236.
- [56] NESBITT H W, YOUNG G M. Early Proterozoic Climates and Plate Motions Inferred from Major Element Chemistry of Lutites[J]. *Nature*,1982,299:715-717.
- [57] ASIEDU D K, SUZUKI S, NOGAMI K, et al. Geochemistry of Lower Cretaceous Sediments, Inner Zone of Southwest Japan: Constraints on Provenance and Tectonic Environment[J]. *Geochemical Journal*,2000,34(2):155-173.
- [58] MCLENNAN S M, HEMMING S, MCDANIEL D K, et al. Geochemical Approaches to Sedimentation, Provenance, and Tectonics[C]//JOHANSSON M J, BASU A. Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments. Boulder: Geological Society of America, 1993:21-40.
- [59] 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.
- [60] FLOYD P A, LEVERIDGE B E. Tectonic Environment of the Devonian Gramscatho Basin, South Cornwall: Framework Mode and Geochemical Evidence from Turbiditic Sandstones[J]. *Journal of the Geological Society*,1987,144(4):531-542.
- [61] JENCHEN U. Petrography and Geochemistry of the Triassic El Tranquilo Group, Deseado Massif, Patagonia, Argentina: Implications for Provenance and Tectonic Setting[J]. *Journal of South American Earth Sciences*,2018,88:530-550.
- [62] BHATIA M R, CROOK K A W. Trace Element Characteristics of Graywackes and Tectonic Setting Discrimination of Sedimentary Basins[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*,1986,92(2):181-193.
- [63] MCLENNAN S M, TAYLOR S R, MCCULLOCH M T, et al. Geochemical and Nd-Sr Isotopic Composition of Deep-sea Turbidites: Crustal Evolution and Plate Tectonic Associations[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*,1990,54(7):2015-2050.
- [64] HOLAIL H M, MOGHAZI A K M. Provenance, Tectonic Setting and Geochemistry of Greywackes and Siltstones of the Late Precambrian Hammamat Group, Egypt[J]. *Sedimentary Geology*,1998,116(3/4):227-250.
- [65] YANG H M, KYSER K, ANSDELL K. Geochemical and Nd Isotopic Compositions of the Metasedimentary Rocks in the La Ronge Domain, Trans-Hudson Orogen, Canada: Implications for Evolution of the Domain[J]. *Precambrian Research*,1998,92(1):37-64.
- [66] ERIKSSON P G, CONDIE K C, TIRSGAARD H, et al. Precambrian Clastic Sedimentation Systems[J]. *Sedimentary Geology*,1998,120(1/2/3/4):5-53.
- [67] BARLEY M E, BEKKER A, KRAPEŽ B. Late Archean to Early Paleoproterozoic Global Tectonics, Environmental Change and the Rise of Atmospheric Oxygen[J]. *Earth and Planetary Science Letters*,2005,238(1/2):156-171.
- [68] 李俊辉,于洋,韦龙猛,等. 大别山造山带宿松岩群锆石 U-Pb 年龄和 Nd 同位素特征:宿松地体物源和属性[J]. *地球科学与环境学报*,2016,38(1):21-33.
LI Jun-hui, YU Yang, WEI Long-meng, et al. Zircon U-Pb Ages and Nd Isotopic Characteristics of Susong Group in Dabie Orogenic Belt: Source and Provenance of Susong Terrene[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*,2016,38(1):21-33.