



论文

华北陆块东南缘新元古代基性岩浆活动: 徐淮地区辉绿岩床群岩石地球化学、年代学和 Hf 同位素证据

王清海^{①*}, 杨德彬^②, 许文良^②

① 吉林大学东北亚国际地质研究与教学中心, 长春 130026;

② 吉林大学地球科学学院, 长春 130061

* E-mail: wqh@jlu.edu.cn

收稿日期: 2010-11-10; 接受日期: 2011-01-17

国家自然科学基金项目(批准号: 40772037, 90814003)资助

摘要 华北陆块东南缘徐淮地区侵位于元古代不同层位地层中辉绿岩的系统年代学、岩石地球化学和锆石 Hf 同位素的研究结果表明, 辉绿岩中锆石发育弱的振荡环带, 具有高的 Th/U 比值(0.91~6.90), 指示锆石为岩浆成因。锆石 SHRIMP U-Pb 和 Q-ICP-MS U-Pb 定年结果显示, 该区绝大多数辉绿岩的侵位结晶年龄为 890 Ma, 即其形成于新元古代的早期。辉绿岩属于板内玄武岩系列岩石, 总体上略富集轻稀土元素(LREE)、富集大离子亲石元素(LILE)Rb, Ba, La, 略亏损高场强元素(HFSE)Th, Nb, Ta, Zr, Hf 等, 相对富集 Cr 和 Ni; 具有较高的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(2.26~14.74), 其单阶段模式年龄 $t_{\text{DM1}}=843\sim1321$ Ma、两阶段模式年龄 $t_{\text{DM2}}=808\sim1779$ Ma。综合研究暗示辉绿岩的原始岩浆起源于中元古代时期的过渡型地幔, 形成于华北陆块东南缘的板内陆缘伸展环境, 华北陆块东南缘存在新元古代早期的构造-岩浆活动事件。

关键词辉绿岩
地球化学
锆石 U-Pb 年代学
Hf 同位素
新元古代
徐淮地区

基性岩墙(床)群是古老克拉通内重要而独具特色的地质构造单元。作为一种特殊的构造-岩浆类型, 其发育表明具相当规模已固结的稳定、刚性陆块的存在, 且提供了早期地球深部岩浆源区和大陆岩石圈演化的信息, 记录了古陆块重要的裂解地质事件, 是超大陆再造的良好标志。近年来受到地学界的广泛关注, 是国际前寒武纪地质研究的热点之一^[1~7]。中国的华南陆块、塔里木陆块等前寒武纪的构造-岩浆事件研究结果表明, 其响应了中元古代晚期至新元

古代早、中期 Rodinia 超大陆的汇聚和裂解过程^[8~15], 而华北陆块中部陆-陆碰撞带、南缘熊耳火山岩增生带和北缘白云鄂博裂谷带分别记录了早-中元古代 Columbia(Nuna)超大陆的拼合、增生和裂解事件^[16~18], 但缺少可靠的新元古代时期的构造-岩浆事件记录。因此, 对华北陆块是否记录了 Rodinia 超大陆的汇聚和裂解过程仍存在着较大的争议^[19~23]。本文在前人研究的基础上, 对出露于徐淮地区的基性岩(床)进行了岩石地球化学、年代学和 Hf 同位素的详细研究, 研

英文引用格式: Wang Q H, Yang D B, Xu W L. Neoproterozoic basic magmatism in the southeast margin of North China Craton: Evidence from whole-rock geochemistry, U-Pb and Hf isotopic study of zircons from diabase swarms in the Xuzhou-HuaiBei area. Sci China Earth Sci, 2011, doi: 10.1007/s11430-011-4237-7

究结果对探讨华北陆块是否响应 Rodinia 超大陆的聚合和裂解等具有重要意义。

1 区域地质

华北陆块是世界最古老的克拉通之一, 其南接秦岭-大别-苏鲁造山带, 北邻中亚造山带, 主要由太古宙-早元古代变质基底和其后的沉积盖层组成。华北陆块可划分为东部陆块、西部陆块以及位于二者之间的中部碰撞带^[24-26]。虽然对东、西部陆块初始碰撞时间和各自组成的认识仍存在争议, 但一般认为其最终的拼合发生在元古代晚期的 1.85 Ga^[27-32]。古生代以来, 西部陆块相对比较稳定, 而东部陆块构造-岩浆活动比较频繁^[33]。

研究区位于华北克拉通东部陆块东南缘, 安徽北部的淮北地区和江苏西北部的徐州地区(徐淮地区)。区内出露的地层以元古界和下古生界为主, 并遭受了褶皱变形, 以复式的逆冲板片状产出, 且构成了夹于北部丰沛-兰陵隆起, 南部西阳集隆起之间的徐州-宿州弧形构造带^[34]。该区元古代不同层位地层中发育似层状的巨型基性岩(床)群, 侵入的最新层位是上震旦统金山寨组底部。基性岩床与围岩同步褶皱, 并出露在背、向斜构造的两翼, 以辉绿岩和石英辉绿岩为主, 岩床与围岩接触面清楚, 与围岩层面呈平行或极低角度的微斜交, 皆为顺岩层侵入, 呈板层状或楔状, 厚度 10~200 m, 地表以 NNE 向断续展布, 长度>10 km(图 1)。碳酸盐岩围岩普遍遭受较弱的大理岩化或局部矽卡岩化, 岩床顶部常发育有杏仁状构造, 部分岩体边部见有柱状节理, 地表球状风化明显(图 2(a)~(c))。

2 样品描述和分析方法

2.1 样品描述

样品分别采自徐淮地区栏杆北约 4 km 的桂山侵入位于望山组的辉绿岩, 地理坐标: 33°58.551'N, 117°18.320'E, 样品编号: XZ1-1, 3, 5; 汴塘燕子埠侵入位于倪园组-九顶山组的辉绿岩, 地理坐标: 34°29.652'N, 117°41.762'E, 样品编号: XZ3-1, 2, 4; 吴桥(黄集)东北约 7 km 的黄山侵入位于九顶山组的辉绿岩, 地理坐标: 34°10.671'N, 117°43.128'E, 样品编号: XZ5-1, 3, 6, 7(图 1)。

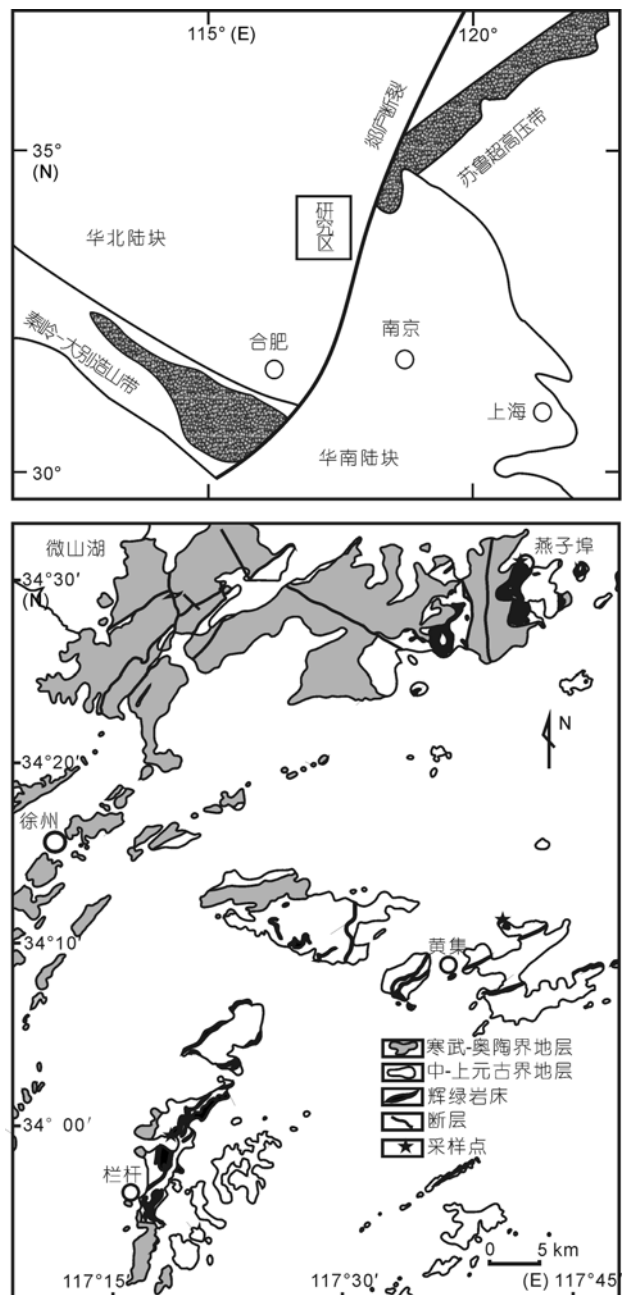


图 1 华北陆块东南缘徐淮地区地质略图

岩床表面风化强烈, 球状风化明显, 呈黄褐色(图 2(a), (c)). 新鲜面灰黑色, 岩性主要为辉绿岩和石英辉绿岩, 辉绿结构, 块状构造、杏仁状构造。主要组成矿物为斜长石和辉石, 含有少量的石英、角闪石、黑云母和磁铁矿等(图 2(d)). 斜长石大多具有晶带较宽的双晶, 无环带构造, 绿泥石化和钠黝帘石化蚀变较强, 主要为基性拉长石(An_{65-70}), 约占矿物总量的 40%~



图2 徐淮地区辉绿岩床的产状及岩石结构照片

(a), (c) 岩体表面的球状风化. (b) 岩体的柱状节理. (d) 岩石的辉绿结构, 正交偏光; Py, 普通辉石; Pl, 斜长石

60%, 辉石主要为普通辉石(Wo_{37-44} , En_{23-45} , Fs_{14-31}), 含量 30%~50%, 普通角闪石<5%, 黑云母<3%. 石英辉绿岩中见有石英与碱性长石交生形成的文象构造, 石英含量 5%~15%. 厚度较小的岩床, 其边部到内部的结构和成分变化不明显, 厚度较大的岩床, 边部的岩石为中-细粒辉绿结构, 内部为粗-中粒辉绿结构, 斜长石中有偏碱性钠长石($An_{1.3-2.7}$)出现.

2.2 分析方法

将新鲜无蚀变的样品用机械粉碎至 80 目, 进行重力分选, 再进行磁选和重液分选. 在双目显微镜下挑选出锆石颗粒, 将其与标准锆石(Temora-417 Ma)和校正样品 M257 一起粘贴在环氧树脂表面, 抛光后使其露出内部结构, 并将待测锆石进行透射光、反射光、阴极发光和背散射扫描电子显微镜显微照相. 锆石的制靶和显微图像的采集在中国地质科学院地质研究所完成.

锆石 SHRIMP U-Pb 同位素分析在中国地质科学

院地质研究所北京离子探针中心的 SHRIMP-II 离子探针上用标准测定程序条件进行. 有关实验条件、锆石原位微区年龄测定的流程及常用实验参数参见文献[35]. 对阴极发光或/和背散射图像进行分析, 选择吸收程度或形态上明显不同的区域进行测试, 束斑直径为 20~30 μm , 普通铅校正用测定的 ^{204}Pb 进行(普通铅组成由 417 Ma 时 stacey-kramers 模式给出). 采用 Squid 程序进行 SHRIMP U-Pb 测定数据的处理, 给定的同位素比值和年龄的误差在 1σ 水平.

锆石 ICP-MS U-Pb 年龄、Lu-Hf 同位素的同时原位测定在中国科学院地质与地球物理研究所引进的 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)、Agilent 7500a 型四极杆电感耦合等离子体质谱仪(Q-ICP-MS)和 193 nm 激光剥蚀取样系统上联机进行. 仪器的基本情况、运行条件和详细的分析流程见文献[36]. 测定过程中, 激光束直径为 63 μm , 激光剥蚀时间为 26 s, 激光束脉冲速率为 6~8 Hz, 能量为 100 mJ. 为保证数据精度, 激光剥蚀物质采用 4:6

(Pb:Hf)的比例分别送入 Q-ICP-MS 和 MC-ICP-MS 进行 U-Pb 年龄和 Lu-Hf 同位素测定. 测定时 U-Pb 年龄采用标准锆石 91500 作外标进行校正. 分馏校正和结果的计算采用 GLITTER 4.0 软件. 样品校正后的同位素比值标准偏差设定为 2%. 各样品的加权平均年龄计算及谐和图的绘制采用 Isoplot(ver 3.0)程序. ^{176}Hf 有 2 个同质异位素 ^{176}Lu 和 ^{176}Yb , 其中 ^{176}Lu 对 ^{176}Hf 的干扰采用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu}=0.02655$; ^{176}Yb 对 ^{176}Hf 的干扰采用分馏系数值 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb}=0.5887$ 进行校正. 每个分析点的 β_{Yb} 和 β_{Hf} 则利用对该分析点实测得出的平均值进行校正.

主量元素和微量元素分析在西北大学大陆动力

学国家重点实验室完成. 主量元素采用玻璃熔片大型 X 射线荧光光谱法(XRF)分析; 微量元素采用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)进行分析.

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 定年

三个辉绿岩样品中分离出的部分锆石的阴极发光(CL)图像可以看出, 锆石晶形不完整, 半透明或不透明, 多数呈板状, 少量呈柱状, 具有弱的震荡环带或无内部构造(图 3). 样品 XZ3-1 中锆石的颜色较其他两个测试样品的颜色深, 不透明, 这与其 U 和 Th

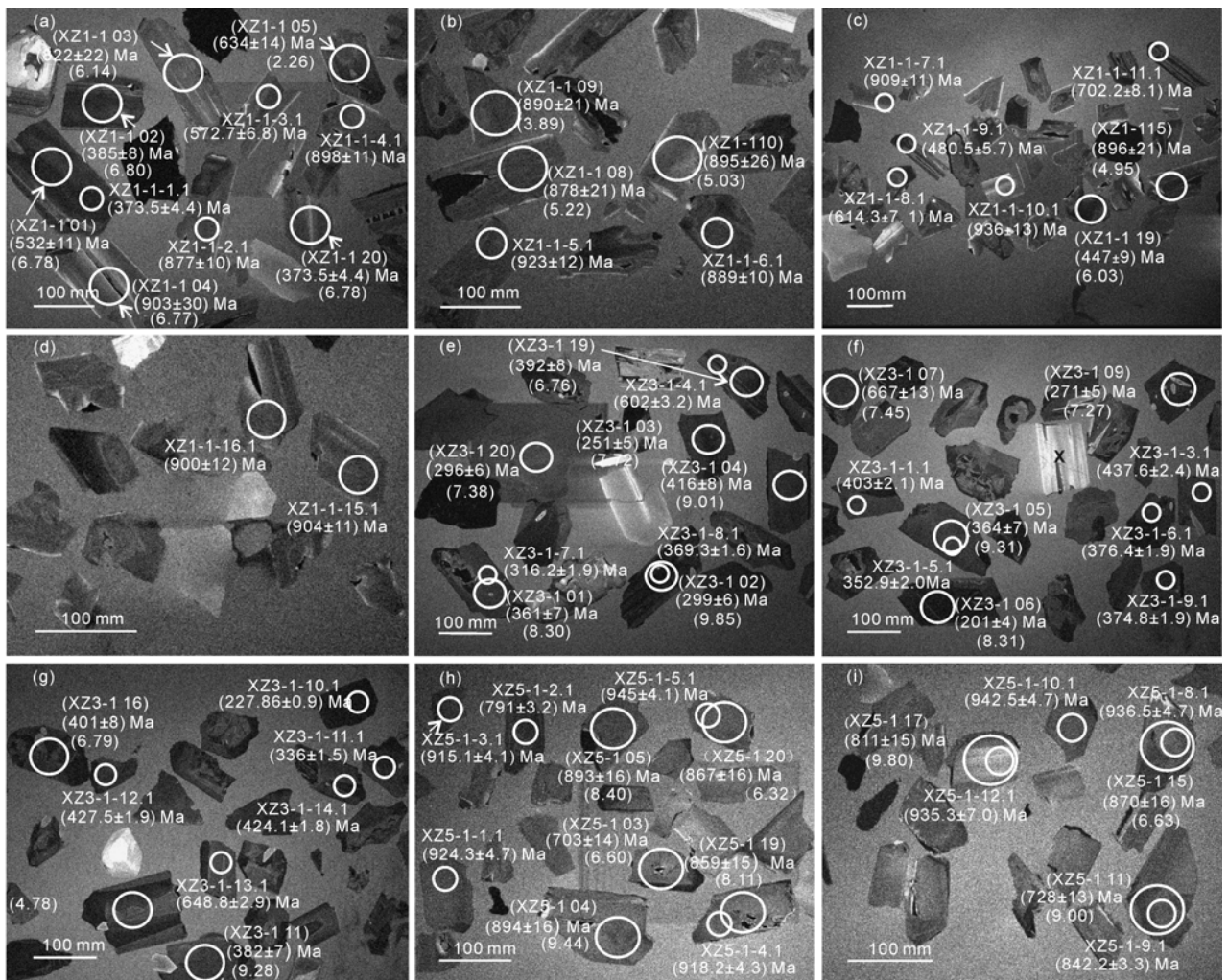


图 3 辉绿岩中锆石阴极发光(CL)图像

图像中 63 μm 圆圈表示 ICP-MS U-Pb 年龄和 Hf 同位素测试点, 30 μm 圆圈表示 SHRIMP U-Pb 年龄测试点; 括号内数据表示 ICP-MS U-Pb 法的测点编号、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄和 $\delta_{\text{Hf}}(t)$ 值, 其他为 SHRIMP U-Pb 法的测点编号和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄

含量较高有关。锆石的特征及其 Th/U 比值(0.91~6.90)表明所测定的锆石均为岩浆成因(表 1, 2)。为获得锆石所记载的年龄谱系, 对研究区三个辉绿岩样品(编号 XZ1-1, XZ3-1, XZ5-1)中分离出的锆石分别进行了 SHRIMP 和 ICP-MS 分析。

3.1.1 锆石 SHRIMP U-Pb 定年

锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果列于表 1 和图 4, 部分结果标定于图 3。测年结果显示, 研究区辉绿岩中锆石 SHRIMP U-Pb 年龄谱系相对较复杂。

样品 XZ1-1 中锆石的 16 个测点中 10 个分析结果集中在谐和线上, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 867~936 Ma, 加权平均年龄为 $(896.6 \pm 16.3) \text{ Ma}$ (MSWD=3.34)。这 10 个测点的 U, Th 含量相对较低, $\text{Pb}^*/^{238}\text{U} > 0.14$ 。分析点 1.1, 3.1, 8.1, 11.1, 12.1 位于谐和线下部并不同程度偏离谐和线, 测点 9.1 与谐和线斜交, 这 6 个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄谐和性较差, 其 U 和 Th 含量较高, $\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ 比值较小, 且 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄随 $\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ 比值的降低而减小(表 1, 图 4)。试验和实际地质情况研究表明, 锆石中的 U 和 Th 含量愈高, 其衰变能力愈强, 易造成锆石晶格的损伤而导致锆石中放射性成因铅发生不同程度的丢失, 使 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的计算结果变小, 造成年龄的谐和性差^[37,38]。因此, 这 6 个测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄偏低的原因与锆石中放射性成因铅丢失及后期地质作用对锆石 U-Pb 同位素体系的影响有关。而集中于谐和线上的 10 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄 $(896.6 \pm 16.3) \text{ Ma}$ 可代表辉绿岩的结晶年龄。

样品 XZ3-1 中锆石的 14 个测点分析结果均位于谐和线下部并不同程度偏离谐和线, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄谐和性较差, U 和 Th 含量较高, $\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ 比值较小, 放射性成因铅丢失严重, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄偏低, 但这些不谐和数据点构成一条不一致曲线, 其上、下交点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 $(887 \pm 66), (190 \pm 40) \text{ Ma}$ (MSWD=2.0), 由于上交点附近缺乏年龄点, 造成其年龄值误差较大(表 1, 图 4)。但结合其岩石组合特征与其他两测试样品具有一致性的特点, 887 Ma 应大致代表其结晶年龄。

样品 XZ5-1 中锆石的 12 个测点, 除测点 2.1, 9.1 位于谐和线下部并不同程度偏离谐和线, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄谐和性较差, U 和 Th 含量较高, $\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ 比值相对较小, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄偏低外, 其余

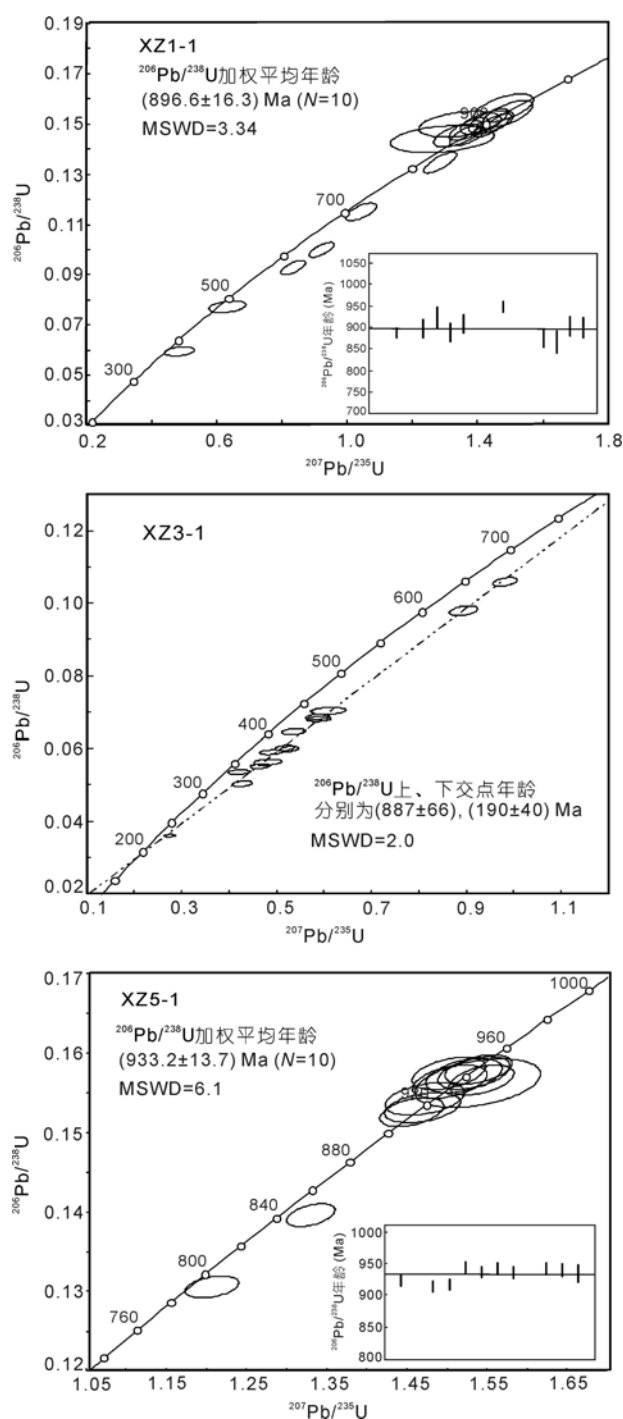


图 4 辉绿岩中锆石 SHRIMP U-Pb 年龄谐和图

10 个测点的分析结果均集中在谐和线上, 这 10 个测点的 U 和 Th 含量相对较低, $\text{Pb}^*/^{238}\text{U} > 0.14$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄谐和性较好, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(933.2 \pm 13.7) \text{ Ma}$ (MSWD=6.1)。图 4 可以看

表 1 徐淮地区辉绿岩中锆石 SHRIMP U-Pb 定年数据

样品测点号	$^{206}\text{Pb}_c$ (%)	U ($\mu\text{g g}^{-1}$)	Th ($\mu\text{g g}^{-1}$)	^{232}Th $/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*$ ($\mu\text{g g}^{-1}$)	同位素比值						年龄(Ma)		
						$^{207}\text{Pb}^*$ $/^{206}\text{Pb}^*$	误差 (%)	$^{207}\text{Pb}^*$ $/^{235}\text{U}$	误差 (%)	$^{206}\text{Pb}^*$ $/^{238}\text{U}$	误差(%)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$
XZ1-1, 辉绿岩, 10 个测点(不包括测点 1.1, 3.1, 8.1, 9.1, 11.1, 12.1), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为(896.6 \pm 16.3) Ma, MSWD=3.34														
XZ1-1-1.1	1.42	1762	6248	3.66	91.6	0.0591	3.7	0.486	3.9	0.0596	1.2	373.5 \pm 4.4	569 \pm 81	327.9 \pm 4.6
XZ1-1-2.1	0.09	523	1897	3.75	65.5	0.0684	1.2	1.374	1.8	0.1457	1.3	877 \pm 10	881 \pm 26	838 \pm 12
XZ1-1-3.1	0.16	927	4454	4.96	74.1	0.0651	1.3	0.834	1.8	0.0929	1.2	572.7 \pm 6.8	778 \pm 28	521.9 \pm 6.9
XZ1-1-4.1	0.00	420	1486	3.66	53.9	0.0701	1.0	1.445	1.6	0.1495	1.3	898 \pm 11	931 \pm 21	870 \pm 12
XZ1-1-5.1	0.26	397	1256	3.27	52.7	0.0703	1.6	1.493	2.1	0.1540	1.4	923 \pm 12	938 \pm 33	889 \pm 14
XZ1-1-6.1	0.19	488	1317	2.79	62.2	0.0673	1.3	1.373	1.8	0.1479	1.3	889 \pm 10	847 \pm 27	864 \pm 12
XZ1-1-7.1	0.10	556	2618	4.86	72.4	0.0687	1.2	1.433	1.7	0.1514	1.3	909 \pm 11	888 \pm 25	856 \pm 11
XZ1-1-8.1	0.22	1078	3912	3.75	92.8	0.0669	1.2	0.922	1.7	0.1000	1.2	614.3 \pm 7.1	834 \pm 24	526.4 \pm 6.8
XZ1-1-9.1	1.06	1320	4625	3.62	88.7	0.0593	3.4	0.633	3.6	0.0774	1.2	480.5 \pm 5.7	578 \pm 75	428.2 \pm 5.9
XZ1-1-10.1	0.33	185	699	3.90	24.9	0.0687	2.1	1.480	2.5	0.1562	1.5	936 \pm 13	890 \pm 42	914 \pm 15
XZ1-1-11.1	0.28	863	2274	2.72	85.6	0.0657	1.4	1.042	1.9	0.1151	1.2	702.2 \pm 8.1	796 \pm 30	637.4 \pm 8.5
XZ1-1-12.1	0.06	605	2904	4.96	69.9	0.0693	1.0	1.285	1.6	0.1346	1.3	813.9 \pm 9.6	907 \pm 21	756 \pm 10
XZ1-1-13.1	0.29	507	1937	3.94	63.5	0.0667	1.8	1.337	2.2	0.1454	1.3	875 \pm 11	828 \pm 37	829 \pm 12
XZ1-1-14.1	0.96	199	734	3.82	24.8	0.0651	4.8	1.292	5.0	0.1439	1.5	867 \pm 12	778 \pm 100	867 \pm 16
XZ1-1-15.1	0.25	473	1697	3.71	61.4	0.0688	1.9	1.428	2.3	0.1505	1.3	904 \pm 11	893 \pm 40	856 \pm 12
XZ1-1-16.1	0.91	352	958	2.81	45.8	0.0652	3.6	1.347	3.8	0.1499	1.4	900 \pm 12	779 \pm 75	855 \pm 15
XZ3-1, 辉绿岩, 其上交点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为(887 \pm 66) Ma, MSWD=2.0														
XZ3-1-1.1	0.30	1480	3636	2.54	82.3	0.0603	1.9	0.536	2.0	0.0645	0.53	403.0 \pm 2.1	613 \pm 41	376.8 \pm 3.5
XZ3-1-2.1	0.27	1646	3587	2.25	78.2	0.0612	1.7	0.4651	1.8	0.0551	0.50	346.0 \pm 1.7	646 \pm 37	313.0 \pm 2.9
XZ3-1-3.1	0.32	1290	2360	1.89	78.1	0.0629	2.4	0.609	2.5	0.0702	0.56	437.6 \pm 2.4	704 \pm 51	384.9 \pm 4.5
XZ3-1-4.1	0.00	1185	1998	1.74	99.6	0.0662	1.3	0.894	1.4	0.0979	0.56	602.0 \pm 3.2	814 \pm 27	530.9 \pm 5.5
XZ3-1-5.1	0.28	2007	4755	2.45	97.3	0.0621	2.5	0.482	2.5	0.0563	0.58	352.9 \pm 2.0	679 \pm 53	327.1 \pm 3.5

续(表 1)

样品测点号	$^{206}\text{Pb}_c$ (%)	U ($\mu\text{g g}^{-1}$)	Th ($\mu\text{g g}^{-1}$)	^{232}Th $/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*$ ($\mu\text{g g}^{-1}$)	同位素比值						年龄(Ma)		
						$^{207}\text{Pb}^*$ $/^{206}\text{Pb}^*$	误差 (%)	$^{207}\text{Pb}^*$ $/^{235}\text{U}$	误差 (%)	$^{206}\text{Pb}^*$ $/^{238}\text{U}$	误差 (%)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$
XZ3-1-6.1	0.18	1717	3764	2.26	88.9	0.0625	1.5	0.518	1.6	0.0601	0.52	376.4 \pm 1.9	690 \pm 32	332.6 \pm 3.1
XZ3-1-7.1	0.26	1412	2216	1.62	61.1	0.0617	1.9	0.428	2.0	0.0503	0.63	316.2 \pm 1.9	664 \pm 41	297.6 \pm 3.6
XZ3-1-8.1	0.38	2403	6795	2.92	122	0.0600	2.0	0.488	2.0	0.0590	0.45	369.3 \pm 1.6	605 \pm 43	328.7 \pm 8.3
XZ3-1-9.1	0.11	1318	3405	2.67	67.9	0.0638	1.5	0.527	1.6	0.0599	0.51	374.8 \pm 1.9	735 \pm 31	342.3 \pm 3.2
XZ3-1-10.1	0.36	6708	44805	6.90	208	0.0554	1.7	0.275	1.8	0.0360	0.40	227.9 \pm 0.9	427 \pm 39	187.7 \pm 1.0
XZ3-1-11.1	0.43	2034	5589	2.84	93.9	0.0570	2.3	0.421	2.3	0.0535	0.47	336.0 \pm 1.5	493 \pm 51	306.0 \pm 2.5
XZ3-1-12.1	0.38	1965	2871	1.51	116	0.0620	1.7	0.587	1.7	0.0686	0.46	427.5 \pm 1.9	676 \pm 36	387.0 \pm 3.7
XZ3-1-13.1	0.09	1185	1254	1.09	108	0.0672	0.96	0.982	1.1	0.1059	0.46	648.8 \pm 2.9	845 \pm 20	604.2 \pm 5.5
XZ3-1-14.1	0.33	2163	4004	1.91	127	0.0628	1.7	0.589	1.8	0.0680	0.45	424.1 \pm 1.8	702 \pm 37	285.0 \pm 2.8
XZ5-1, 辉绿岩, 10 个测点(不包括测点 2.1, 9.1); $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为(933.2 \pm 13.7) Ma, MSWD=6.1														
XZ5-1-1.1	0.17	644	994	1.60	85.4	0.0693	1.3	1.473	1.4	0.1542	0.54	924.3 \pm 4.7	907 \pm 26	879.0 \pm 8.5
XZ5-1-2.1	0.10	1418	2260	1.65	159	0.0671	1.0	1.207	1.1	0.1306	0.43	791.0 \pm 3.2	839 \pm 22	719.1 \pm 5.4
XZ5-1-3.1	0.06	896	1374	1.58	117	0.0693	1.0	1.456	1.1	0.1525	0.49	915.1 \pm 4.1	906 \pm 21	845.9 \pm 7.1
XZ5-1-4.1	0.13	801	991	1.28	105	0.0696	1.2	1.470	1.3	0.1531	0.50	918.2 \pm 4.3	917 \pm 25	855.5 \pm 8.4
XZ5-1-5.1	0.08	1045	1869	1.85	142	0.0707	10	1.539	1.1	0.1579	0.47	945.0 \pm 4.1	949 \pm 20	885.0 \pm 6.9
XZ5-1-6.1	0.00	844	1185	1.45	113	0.0715	0.95	1.543	1.1	0.1566	0.49	937.6 \pm 4.3	971 \pm 19	899.3 \pm 7.9
XZ5-1-7.1	0.04	684	982	1.48	92.5	0.0692	1.1	1.502	1.2	0.1574	0.53	942.1 \pm 4.6	906 \pm 23	869.5 \pm 8.4
XZ5-1-8.1	0.06	599	877	1.51	80.5	0.0698	1.1	1.504	1.3	0.1564	0.54	936.5 \pm 4.7	921 \pm 23	873.7 \pm 8.6
XZ5-1-9.1	0.03	1376	1939	1.46	165	0.0691	0.82	1.330	0.92	0.1396	0.42	842.2 \pm 3.3	903 \pm 17	783.8 \pm 5.6
XZ5-1-10.1	0.00	639	905	1.46	86.4	0.0707	1.1	1.534	1.2	0.1574	0.53	942.5 \pm 4.7	948 \pm 22	894.0 \pm 8.6
XZ5-1-11.1	0.00	585	697	1.23	79.0	0.0702	1.1	1.521	1.3	0.1571	0.56	940.7 \pm 4.9	935 \pm 23	899.2 \pm 9.6
XZ5-1-12.1	0.15	249	218	0.91	33.4	0.0715	1.9	1.538	2.1	0.1561	0.80	935.3 \pm 7.0	970 \pm 39	930.0 \pm 17.0

表 2 徐淮地区辉绿岩中锆石 Q-ICP-MS U-Pb 定年数据

样品测点号	U ($\mu\text{g g}^{-1}$)	Th ($\mu\text{g g}^{-1}$)	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	同位素比值						年龄 (Ma)					
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
XZ1-1, 辉绿岩, 8 个测点(不包括测点 01, 02, 03, 05, 07, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 19); $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为(890±14) Ma, MSWD=0.16															
XZ1-1 01	717	1917	2.67	0.0687	0.0009	0.8164	0.0108	0.0861	0.0018	891	22	606	6	532	11
XZ1-1 02	988	3489	3.53	0.0687	0.0010	0.5844	0.0083	0.0616	0.0013	891	21	467	5	385	8
XZ1-1 03	342	1397	4.09	0.0687	0.0035	1.2893	0.0630	0.1360	0.0039	890	55	841	28	822	22
XZ1-1 04	313	1216	3.89	0.0681	0.0050	1.4127	0.0997	0.1504	0.0054	871	88	894	42	903	30
XZ1-1 05	821	2769	3.37	0.0688	0.0018	0.9819	0.0249	0.1034	0.0023	893	23	695	13	634	14
XZ1-1 06	386	1610	4.17	0.0684	0.0012	1.3837	0.0241	0.1465	0.0031	882	20	882	10	881	17
XZ1-1 07	1151	4064	3.53	0.0689	0.0009	0.4563	0.0060	0.0480	0.0010	897	22	382	4	302	6
XZ1-1 08	308	1052	3.41	0.0686	0.0027	1.3810	0.0512	0.1459	0.0037	886	38	881	22	878	21
XZ1-1 09	339	1284	3.78	0.0686	0.0026	1.4012	0.0504	0.1480	0.0037	887	37	889	21	890	21
XZ1-1 10	330	1028	3.12	0.0691	0.0042	1.4212	0.0820	0.1490	0.0047	902	69	898	34	895	26
XZ1-1 11	493	1838	3.73	0.0727	0.0044	1.0690	0.0605	0.1066	0.0033	1006	66	738	30	653	19
XZ1-1 12	412	1587	3.85	0.0689	0.0016	1.2598	0.0274	0.1327	0.0028	894	20	828	12	803	16
XZ1-1 13	748	2490	3.33	0.0691	0.0019	0.7619	0.0196	0.0799	0.0018	903	24	575	11	496	11
XZ1-1 14	755	3346	4.43	0.0692	0.0012	0.8545	0.0144	0.0896	0.0018	903	19	627	8	553	11
XZ1-1 15	514	1859	3.61	0.0690	0.0027	1.4200	0.0534	0.1491	0.0037	900	39	897	22	896	21
XZ1-1 16	1225	4025	3.29	0.0681	0.0030	0.6898	0.0282	0.0734	0.0019	872	45	533	17	457	11
XZ1-1 17	459	2060	4.48	0.0691	0.0025	1.1245	0.0384	0.1180	0.0028	902	35	765	18	719	16
XZ1-1 18	473	1969	4.16	0.0689	0.0016	1.4180	0.0316	0.1493	0.0032	896	21	897	13	897	18
XZ1-1 19	1082	3447	3.19	0.0686	0.0017	0.6796	0.0162	0.0718	0.0015	888	22	527	10	447	9
XZ1-1 20	418	1641	3.93	0.0688	0.0018	1.4101	0.0352	0.1486	0.0032	894	23	893	15	893	18
XZ3-1, 辉绿岩, 其上交点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为(890±77) Ma, MSWD=6.5															
XZ3-1 01	1282	2118	1.65	0.0610	0.0008	0.4838	0.0058	0.0576	0.0011	640	23	401	4	361	7
XZ3-1 02	2005	2746	1.37	0.0589	0.0007	0.3861	0.0046	0.0476	0.0009	564	23	331	3	299	6
XZ3-1 03	1741	3927	2.26	0.0598	0.0011	0.3270	0.0055	0.0397	0.0008	597	20	287	4	251	5
XZ3-1 04	1495	2082	1.39	0.0639	0.0008	0.5868	0.0071	0.0666	0.0013	738	22	469	5	416	8
XZ3-1 05	1436	4253	2.96	0.0631	0.0008	0.5057	0.0058	0.0582	0.0012	711	23	416	4	364	7
XZ3-1 06	2832	11395	4.02	0.0589	0.0007	0.2567	0.0029	0.0317	0.0006	562	24	232	2	201	4
XZ3-1 07	997	1865	1.87	0.0704	0.0016	1.0576	0.0223	0.1090	0.0023	941	20	733	11	667	13
XZ3-1 08	1712	8434	4.93	0.0675	0.0008	0.3779	0.0045	0.0406	0.0008	854	22	326	3	257	5
XZ3-1 09	1548	4412	2.85	0.0606	0.0009	0.3585	0.0049	0.0429	0.0009	625	22	311	4	271	5
XZ3-1 10	1249	1978	1.58	0.0655	0.0010	0.8789	0.0128	0.0973	0.0020	791	20	640	7	599	12

样品测点号	U ($\mu\text{g g}^{-1}$)	Th ($\mu\text{g g}^{-1}$)	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	同位素比值						年龄(Ma)					
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
XZ3-1 11	1573	2486	1.58	0.0614	0.0008	0.5165	0.0061	0.0611	0.0012	653	23	423	4	382	7
XZ3-1 12	1179	1487	1.26	0.0652	0.0012	0.7712	0.0140	0.0858	0.0018	782	19	580	8	530	10
XZ3-1 13	1436	4306	3.00	0.0647	0.0012	0.4554	0.0079	0.0511	0.0010	763	19	381	5	321	6
XZ3-1 14	1133	2865	2.53	0.0677	0.0012	0.7942	0.0130	0.0852	0.0017	858	19	594	7	527	10
XZ3-1 15	1670	5289	3.17	0.0656	0.0021	0.3984	0.0118	0.0441	0.0010	792	29	340	9	278	6
XZ3-1 16	1497	4418	2.95	0.0630	0.0009	0.5565	0.0080	0.0641	0.0013	707	21	449	5	401	8
XZ3-1 17	1373	2452	1.79	0.0657	0.0025	0.5048	0.0182	0.0558	0.0013	796	38	415	12	350	8
XZ3-1 18	1799	3007	1.67	0.0649	0.0028	0.6450	0.0266	0.0721	0.0018	770	46	505	16	449	11
XZ3-1 19	1420	2516	1.77	0.0646	0.0009	0.5578	0.0072	0.0627	0.0013	761	22	450	5	392	8
XZ3-1 20	1534	2001	1.30	0.0685	0.0011	0.4440	0.0067	0.0471	0.0010	883	20	373	5	296	6
XZ5-1, 辉绿岩, 16 个测点(不包括测点 03, 11, 17, 18); $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为(889.6 \pm 7.9) Ma, MSWD=0.93															
XZ5-1 01	841	1251	1.49	0.0684	0.0008	1.4054	0.0151	0.1490	0.0028	882	21	891	6	895	16
XZ5-1 02	319	387	1.21	0.0692	0.0018	1.3938	0.0338	0.1461	0.0033	905	22	886	14	879	18
XZ5-1 03	1220	2725	2.23	0.0668	0.0016	1.0608	0.0226	0.1152	0.0024	832	20	734	11	703	14
XZ5-1 04	788	1173	1.49	0.0688	0.0011	1.4106	0.0216	0.1488	0.0029	892	19	893	9	894	16
XZ5-1 05	749	980	1.31	0.0684	0.0009	1.4005	0.0164	0.1485	0.0028	880	21	889	7	893	16
XZ5-1 06	782	1066	1.36	0.0694	0.0009	1.4352	0.0165	0.1500	0.0028	911	21	904	7	901	16
XZ5-1 07	682	1026	1.50	0.0679	0.0008	1.4079	0.0153	0.1505	0.0028	865	21	892	6	904	16
XZ5-1 08	778	1005	1.29	0.0683	0.0009	1.4154	0.0173	0.1503	0.0028	878	20	895	7	903	16
XZ5-1 09	671	1014	1.51	0.0676	0.0010	1.4083	0.0188	0.1511	0.0029	857	20	892	8	907	16
XZ5-1 10	718	972	1.35	0.0692	0.0010	1.4366	0.0198	0.1505	0.0029	906	19	904	8	904	16
XZ5-1 11	1334	2142	1.61	0.0644	0.0009	1.0614	0.0137	0.1195	0.0023	756	20	735	7	728	13
XZ5-1 12	792	1128	1.42	0.0689	0.0010	1.4201	0.0193	0.1496	0.0029	894	19	897	8	899	16
XZ5-1 13	544	711	1.31	0.0682	0.0009	1.4072	0.0176	0.1496	0.0028	875	20	892	7	899	16
XZ5-1 14	514	700	1.36	0.0684	0.0012	1.3913	0.0227	0.1475	0.0029	882	19	885	10	887	16
XZ5-1 15	777	1294	1.66	0.0677	0.0011	1.3497	0.0204	0.1445	0.0028	861	19	867	9	870	16
XZ5-1 16	662	801	1.21	0.0670	0.0012	1.3400	0.0219	0.1452	0.0029	836	19	863	9	874	16
XZ5-1 17	1027	1734	1.69	0.0655	0.0011	1.2110	0.0188	0.1340	0.0026	791	19	806	9	811	15
XZ5-1 18	1086	1709	1.57	0.0639	0.0014	1.0130	0.0197	0.1150	0.0024	737	19	710	10	702	14
XZ5-1 19	960	1415	1.47	0.0674	0.0009	1.3241	0.0155	0.1426	0.0027	849	20	856	7	859	15
XZ5-1 20	855	1373	1.61	0.0670	0.0011	1.3298	0.0192	0.1440	0.0028	836	19	859	8	867	16

出, 这 10 个测点可分为两组, 一组由 3 个测点组成, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (918.8 ± 12.0) Ma (MSWD=1.12) 另一组由 7 个测点组成, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (940.5 ± 11.7) Ma (MSWD=0.54) (表 1, 图 4). 与其他两测试样品相比, 918.8 Ma 更接近该辉绿岩的结晶年龄.

3.1.2 锆石 Q-ICP-MS U-Pb 定年

锆石 Q-ICP-MS U-Pb 定年结果列于表 2 和图 5, 部分结果标定于图 3. 选择 3 个辉绿岩样品(编号 XZ1-1, XZ3-1, XZ5-1)中分离出的颗粒较大、吸收程度较均匀的锆石颗粒分别进行了 20 个点的测试.

样品 XZ1-1 中锆石的 20 个测点的分析结果表明, 8 个测点位于谐和线上, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 878~903 Ma, 加权平均年龄为 (890 ± 14) Ma (MSWD=0.16). 这 8 个测点的 U, Th 含量相对较低, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄谐和性较好. 其余分析点均位于谐和线下部并不同程度偏离谐和线, 其 U 和 Th 含量相对较高, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄谐和性较差 (表 2, 图 5). 因此, 集中于谐和线上的 8 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄 (890 ± 14) Ma 可代表辉绿岩的结晶年龄.

样品 XZ3-1 中锆石的 20 个测点分析结果均位于谐和线下部并不同程度偏离谐和线, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄谐和性较差, U 和 Th 含量均较高, 放射性成因铅丢失严重, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄偏低, 但这些不谐和数据点构成一条不一致曲线, 其上、下交点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 (890 ± 77) , (118 ± 54) Ma (MSWD = 6.5), 由于上、下交点附近缺乏年龄点, 导致其年龄值误差较大 (表 2, 图 5). 研究区经历了中生代时期构造热事件的影响, 因此, 上交点年龄 (890 ± 77) Ma 可能代表了基性岩床的形成年龄, 而下交点年龄 (118 ± 54) Ma 则更可能代表的是后期构造热事件的改造年龄.

样品 XZ5-1 中锆石的 20 个测点中有 16 个测点集中分布在谐和线上, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (889.6 ± 7.9) Ma (MSWD=0.93). 其余 4 个测点中 1 个与谐和线斜交、3 个位于谐和线之下 (其中 1 个偏离谐和线、2 个接近谐和线), 这 4 个测点 U 和 Th 含量较高, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄偏低 (表 2, 图 5). 锆石的形态、结构特征研究表明, 样品 XZ5-1 中的锆石均为岩浆成因锆石 (图 3), 因此, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为

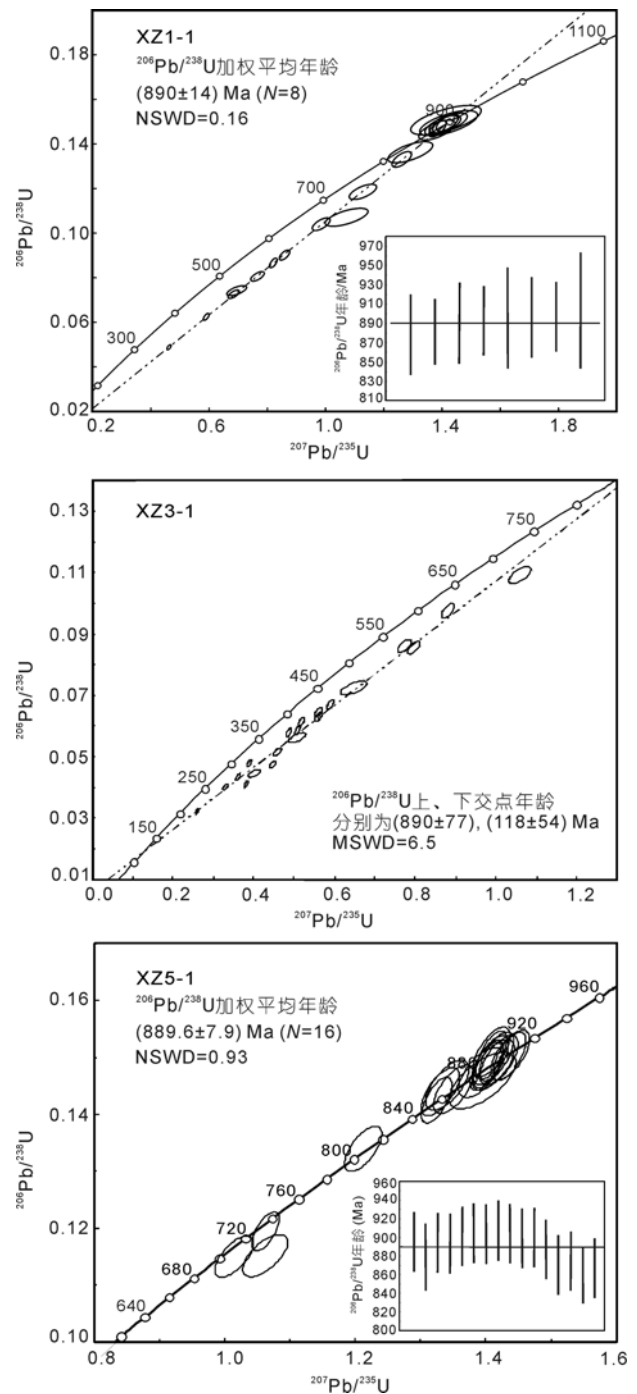


图 5 辉绿岩中锆石 ICP-MS U-Pb 年龄谐和图

(889.6 ± 7.9) Ma 可代表辉绿岩床的结晶年龄.

3.2 主量元素特征

徐淮地区基性岩床群的岩石化学分析结果表明, 辉绿岩中 SiO_2 含量为 46.45%~48.46%, $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 为

3.05%~4.46%, $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$, Al_2O_3 为 11.56%~13.38%, TFe_2O_3 为 13.04%~18.38%, MgO 为 4.61%~6.76%, CaO 为 6.55%~12.61%, $\text{Mg}^\#$ 为 0.36~0.52(表 3). 与鲁西中元古代基性岩墙群相比^[39], 其更偏基性, 钾、钠含量多数偏低, 铝的含量偏低, 镁、铁含量相近, 钙含量个别偏高. 在 SiO_2 -($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)图解上(图 6), 表现为玄武岩. 在 TiO_2 - K_2O - P_2O_5 图上投影在大陆拉斑玄武岩区(II'区)和大洋玄武岩区(I区)(图 7), 表明徐淮地区辉绿岩属于玄武岩系列岩石, 形成于华北陆块东南缘的板内陆缘环境.

3.3 微量元素特征

辉绿岩的微量元素分析结果显示(表 3), 其稀土元素总量相对较低, ΣREE 为 65.50×10^{-6} ~ 147.17×10^{-6} , $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 为 3.23~3.91, La_N/Yb_N 为 2.64~3.42,

表明稀土元素的分馏程度不高. 稀土元素球粒陨石标准化配分模式为轻稀土略富集的右倾型曲线. 研究区侵位于倪园组-九顶山组的辉绿岩(样品编号: XZ3, XZ5)的 δEu 值为 0.96~1.01, 无 Eu 异常; 而侵位于望山组的辉绿岩(XZ1)的稀土元素总量略低于侵位于倪园组-九顶山组的辉绿岩(XZ3, XZ5), 其 δEu 值为 1.13~1.16, 具弱的正 Eu 异常(图 8), 可能与岩石中含有少量的斜长石斑晶有关.

微量元素原始地幔标准化蛛网图上(图 9), 侵位于望山组的辉绿岩与侵位于倪园组-九顶山组的辉绿岩具有不同的特点, 前者富集大离子亲石元素(LILE)Rb, Ba, La, Eu, 尤其 Sr 明显富集, 而略亏损高场强元素(HFSE)Th, U, Nb, Ta, Zr, Hf 等; 后者略富集高场强元素 Th, U 和大离子亲石元素 La, 亏损高场强元素 Nb, Zr, Hf 和大离子亲石元素 Ba, Sr, 其中 Sr

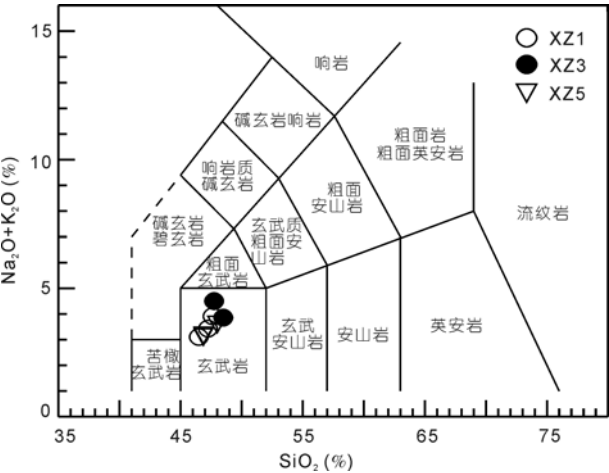


图 6 辉绿岩的 SiO_2 -($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)图解

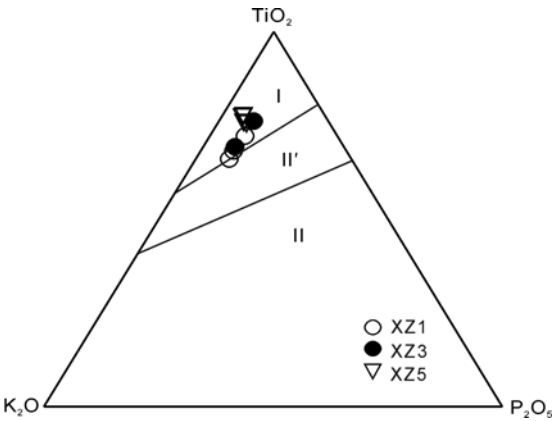


图 7 辉绿岩的 K_2O - TiO_2 - P_2O_5 图解

I, 大洋环境玄武岩类; II, 大陆碱性玄武岩; II', 大陆拉斑玄武岩

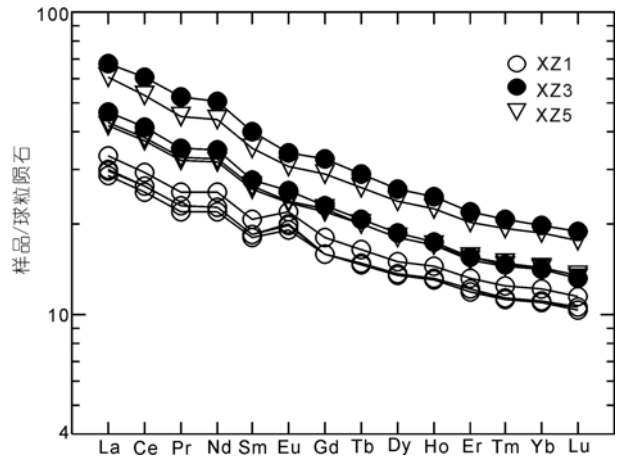


图 8 辉绿岩的球粒陨石标准化稀土元素配分模式图

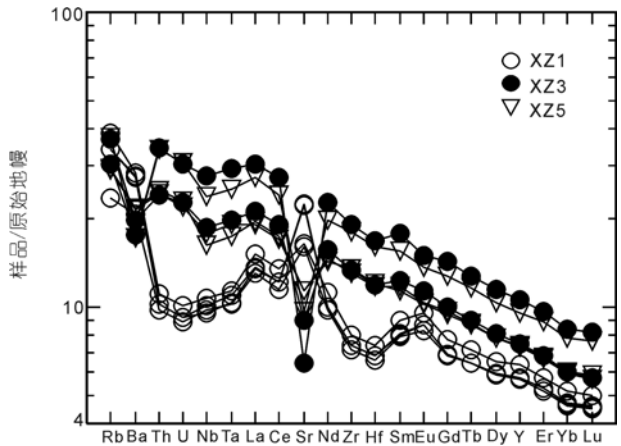


图 9 辉绿岩的原始地幔标准化微量元素蛛网图

表 3 徐淮地区辉绿岩的主量元素和微量元素组成^{a)}

样品编号	XZ1-1	XZ1-3	XZ1-5	XZ3-2	XZ3-4	XZ5-3	XZ5-6	XZ5-7
SiO ₂	47.55	47.15	46.45	47.71	48.46	47.89	46.85	46.82
TiO ₂	2.00	1.77	1.76	2.62	3.74	3.50	3.32	3.48
Al ₂ O ₃	12.85	13.38	13.00	12.80	12.16	11.56	12.07	11.95
TFe ₂ O ₃	14.23	13.07	13.04	15.65	16.54	17.89	18.23	18.38
MnO	0.21	0.21	0.21	0.23	0.19	0.23	0.22	0.22
MgO	6.57	6.32	6.76	5.98	5.02	4.61	5.43	5.45
CaO	10.30	12.02	12.61	8.35	6.55	8.27	8.83	8.71
Na ₂ O	3.10	2.75	2.56	3.57	3.06	2.75	2.26	2.30
K ₂ O	0.80	0.63	0.49	0.89	0.79	0.83	0.80	0.79
P ₂ O ₅	0.23	0.19	0.19	0.26	0.38	0.30	0.25	0.22
LOI	2.15	2.45	2.64	1.99	3.31	1.68	1.38	1.44
Total	99.99	99.94	99.71	100.05	100.20	99.51	99.64	99.76
K ₂ O/Na ₂ O	0.26	0.23	0.19	0.25	0.26	0.30	0.35	0.34
Na ₂ O+K ₂ O	3.90	3.38	3.05	4.46	3.85	3.58	3.06	3.09
Mg [#]	0.50	0.52	0.53	0.46	0.40	0.36	0.40	0.40
Be	0.54	0.51	0.46	0.91	1.34	1.18	0.88	0.92
Sc	46.7	42.9	46.6	36.5	37.4	40.4	41.0	41.8
V	376	342	347	399	315	548	748	765
Cr	36.4	83.2	91.2	81.0	10.7	3.36	16.6	19.7
Co	49.4	46.3	46.6	47.4	36.2	49.2	54.7	54.6
Ni	50.4	56.3	61.8	57.5	7.51	16.4	46.8	52.3
Cu	101	98.7	99.4	46.5	12.4	34.5	64.7	63.3
Zn	95.9	116	109	120	87.7	118	120	122
Ga	16.5	16.2	16.5	19.1	22.1	20.9	20.1	20.1
Rb	24.8	21.7	14.9	23.5	19.4	23.9	18.8	18.5
Sr	345	471	337	190	136	203	239	238
Y	28.8	25.8	25.7	33.9	48.0	43.5	33.3	33.8
Zr	90.0	82.4	79.5	149	213	201	145	150
Nb	7.58	6.77	6.92	13.3	19.8	16.8	11.5	12.7
Cs	0.18	0.46	0.26	0.40	0.41	0.46	0.73	0.72
Ba	200	194	144	138	122	119	151	149
Hf	2.29	2.10	2.02	3.68	5.20	4.91	3.61	3.72
Ta	0.47	0.42	0.42	0.81	1.20	1.03	0.71	0.78
Pb	1.56	1.82	1.73	1.84	1.31	1.46	2.63	2.39
Th	0.94	0.87	0.83	2.04	2.93	2.90	2.11	2.06
U	0.21	0.19	0.19	0.47	0.64	0.65	0.48	0.46
Ge	1.52	1.61	1.63	1.55	1.54	1.65	1.51	1.54
Li	26.6	27.7	28.2	30.1	43.2	33.6	35.2	35.7
Zr/Nb	11.9	12.2	11.5	11.2	10.8	11.9	12.5	11.8
Y/Nb	3.8	3.8	3.7	2.6	2.4	2.6	2.9	2.7
Zr/Y	3.1	3.2	3.1	4.4	4.4	4.6	4.4	4.5
Th/Ta	2.0	2.0	2.0	2.5	2.4	2.8	3.0	2.6
La	10.3	9.26	8.93	14.5	21.0	18.8	13.3	13.0
Ce	23.8	21.4	20.4	33.6	49.0	42.6	30.9	30.2
Pr	3.08	2.78	2.66	4.34	6.41	5.51	4.03	3.95
Nd	15.2	13.5	13.1	21.1	30.5	26.5	19.7	19.3
Sm	4.00	3.57	3.51	5.44	7.84	6.88	5.18	5.05
Eu	1.60	1.45	1.40	1.89	2.51	2.27	1.73	1.71
Gd	4.62	4.09	4.08	5.93	8.46	7.54	5.75	5.62
Tb	0.77	0.69	0.69	0.97	1.38	1.25	0.94	0.94
Dy	4.82	4.32	4.33	5.96	8.39	7.60	5.79	5.75

续(表 3)

样品编号	XZ1-1	XZ1-3	XZ1-5	XZ3-2	XZ3-4	XZ5-3	XZ5-6	XZ5-7
Ho	1.03	0.93	0.93	1.25	1.76	1.60	1.22	1.22
Er	2.76	2.49	2.47	3.26	4.60	4.25	3.18	3.24
Tm	0.40	0.36	0.37	0.47	0.67	0.62	0.47	0.48
Yb	2.53	2.29	2.28	2.96	4.13	3.88	2.93	2.97
Lu	0.37	0.34	0.33	0.43	0.60	0.57	0.42	0.43
ΣREE	75.26	67.48	65.50	102.09	147.17	129.92	95.51	93.80
ΣLREE	57.95	51.97	50.01	80.86	117.19	102.62	74.81	73.15
ΣHREE	17.31	15.51	15.48	21.23	29.98	27.30	20.70	20.65
LREE/HREE	3.35	3.35	3.23	3.81	3.91	3.76	3.62	3.54
(La/Yb) _N	2.74	2.73	2.64	3.31	3.42	3.27	3.07	2.95
δEu	1.14	1.16	1.13	1.01	0.94	0.96	0.96	0.98
Nb*	0.5118	0.5524	0.6633	0.7354	0.9778	0.8585	0.7047	0.7893
La/Yb	4.1	4.0	3.9	4.9	5.1	4.9	4.6	4.4
La/Yb _N	2.0	2.0	1.9	2.4	2.5	2.4	2.2	2.2

a) $\text{TFeO}=0.9 \times \text{TFe}_2\text{O}_3$, $\text{Nb}^*=2\text{Nb}_\text{N}/(\text{K}_\text{N}+\text{La}_\text{N})$; 主量元素单位: %; 微量元素单位: 10^{-6}

明显亏损, 反映出两者受地壳的混染程度不同.

3.4 锆石 Hf 同位素特征

样品 XZ1-1 中锆石的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值变化范围较大, 分别为 0.095205~0.232980 和 0.002607~0.006757, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282374~0.282531, 以 890 Ma 计算, 锆石初始 Hf 同位素成分 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 2.26~8.30. 表 4 给出 Hf 同位素单阶段模式年龄(t_{DM1})和两阶段模式年龄(t_{DM2}), 后者, 因样品辉绿岩主要来源于岩石圈地幔, 在计算两阶段模式年龄时采用铁镁质下地壳的 Lu/Hf 比($f_{\text{Lu/Hf}}=0.34$)进行计算. 该样品 t_{DM1} 为 1134~1411 Ma, t_{DM2} 为 1386~1924 Ma(表 4, 图 10(a)).

样品 XZ3-1 中锆石的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值变化范围较大, 分别为 0.133446~0.444859 和 0.003556~0.011857, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282411~0.282657, 以 890 Ma 计算, 锆石初始 Hf 同位素成分 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 4.65~9.97. t_{DM1} 为 1088~1336 Ma, t_{DM2} 为 1236~1712 Ma(表 4, 图 10(b)).

样品 XZ5-1 中锆石的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值变化范围较大, 分别为 0.151670~0.345568 和 0.004709~0.009560, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282467~0.282792, 以 890 Ma 计算, 锆石初始 Hf 同位素成分 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 4.93~14.74. t_{DM1} 为 843~1306 Ma, t_{DM2} 为 808~1687 Ma(表 4, 图 10(c)).

4 讨论

4.1 辉绿岩的形成时代

Rodinia 超大陆的汇聚和裂解是中、新元古代一次重要的地球动力学事件. 近年来, Rodinia 超大陆的构型和演化以及中国不同陆块在其中位置的研究, 受到地学界广泛的关注^[4,7,11~15,20~23]. 中国大陆由多陆块组成的特点决定了其形成与演化过程的复杂性. 华北陆块经历 1.95 Ga 西部陆块聚合和 1.85 Ga 东、西陆块碰撞、1.78~1.45 Ga 南缘增生和 1.6~1.2 Ga 的北缘裂解^[17,26,29~32,40], 新元古代构造-岩浆活动相对较弱, 地表缺乏岩浆热事件记录.

徐淮地区侵位于元古代不同层位地层中(望山组、倪园组、九顶山组)的巨型基性岩(床)群-辉绿岩中锆石的特征和其高的 Th/U 比值(0.91~6.90), 暗示锆石为岩浆结晶成因. 该区 3 个辉绿岩样品中锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果显示, 样品 XZ1-1 中集中在谐和线上的 10 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (896.6 ± 16.3) Ma; 样品 XZ3-1 的上交点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 (887 ± 66) Ma; 样品 XZ5-1 中集中在谐和线上的 10 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (933.2 ± 13.7) Ma, 其中一组由 3 个测点组成, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (918.8 ± 12.0) Ma. Q-ICP-MS U-Pb 定年结果显示, 样品 XZ1-1 中位于谐和线上的 8 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (890 ± 14) Ma; 样品 XZ3-1 的上交点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 (890 ± 77) Ma; 样品 XZ5-1

表 4 徐淮地区辉绿岩中锆石 Hf 同位素分析结果^{a)}

样品测点号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma_m$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	t_{DM1}	t_{DM2}	$f_{\text{Lu/Hf}}$
XZ1-1 01	0.131612	0.003406	0.282465	0.000028	-10.9	6.78	1.0	1189	1522	-0.90
XZ1-1 02	0.219946	0.006120	0.282511	0.000020	-9.2	6.80	0.7	1213	1519	-0.82
XZ1-1 03	0.144168	0.004469	0.282465	0.000022	-10.9	6.14	0.8	1226	1579	-0.87
XZ1-1 04	0.153104	0.004753	0.282487	0.000024	-10.1	6.77	0.9	1201	1523	-0.86
XZ1-1 05	0.203146	0.005578	0.282374	0.000024	-14.1	2.26	0.9	1411	1924	-0.83
XZ1-1 06	0.170865	0.005228	0.282477	0.000016	-10.4	6.12	0.6	1234	1581	-0.84
XZ1-1 07	0.232980	0.006418	0.282473	0.000019	-10.6	5.30	0.7	1285	1654	-0.81
XZ1-1 08	0.165503	0.005197	0.282451	0.000020	-11.4	5.22	0.7	1274	1661	-0.84
XZ1-1 09	0.146775	0.004252	0.282397	0.000016	-13.2	3.89	0.6	1321	1779	-0.87
XZ1-1 10	0.134524	0.004114	0.282427	0.000017	-12.2	5.03	0.6	1270	1678	-0.88
XZ1-1 11	0.156347	0.004574	0.282495	0.000021	-9.8	7.14	0.7	1183	1489	-0.86
XZ1-1 12	0.116754	0.003491	0.282438	0.000024	-11.8	5.80	0.9	1231	1609	-0.89
XZ1-1 13	0.095205	0.002607	0.282426	0.000025	-12.2	5.87	0.9	1219	1602	-0.92
XZ1-1 14	0.183815	0.005536	0.282518	0.000024	-9.0	7.40	0.8	1180	1466	-0.83
XZ1-1 15	0.104194	0.003043	0.282407	0.000020	-12.9	4.95	0.7	1262	1685	-0.91
XZ1-1 16	0.196171	0.005092	0.282491	0.000021	-9.9	6.70	0.8	1207	1528	-0.85
XZ1-1 17	0.199590	0.006757	0.282504	0.000024	-9.5	6.19	0.9	1248	1575	-0.80
XZ1-1 18	0.161908	0.004829	0.282433	0.000021	-12.0	4.79	0.7	1289	1699	-0.85
XZ1-1 19	0.131406	0.003329	0.282442	0.000024	-11.7	6.03	0.8	1220	1589	-0.90
XZ1-1 20	0.153638	0.004820	0.282531	0.000018	-8.5	8.30	0.6	1134	1386	-0.85
XZ3-1 01	0.315075	0.008146	0.282587	0.000019	-6.5	8.30	0.7	1161	1386	-0.75
XZ3-1 02	0.343175	0.009036	0.282646	0.000020	-4.5	9.85	0.7	1091	1247	-0.73
XZ3-1 03	0.444859	0.011857	0.282633	0.000022	-4.9	7.72	0.8	1231	1438	-0.64
XZ3-1 04	0.280036	0.007218	0.282591	0.000018	-6.4	9.01	0.6	1119	1323	-0.78
XZ3-1 05	0.374150	0.008905	0.282628	0.000021	-5.1	9.31	0.7	1117	1295	-0.73
XZ3-1 06	0.314548	0.007776	0.282581	0.000021	-6.8	8.31	0.7	1157	1385	-0.77
XZ3-1 07	0.141899	0.003661	0.282488	0.000016	-10.0	7.45	0.6	1162	1462	-0.89
XZ3-1 08	0.369614	0.009510	0.282657	0.000022	-4.1	9.97	0.8	1088	1236	-0.71
XZ3-1 09	0.441986	0.011540	0.282615	0.000024	-5.6	7.27	0.8	1252	1478	-0.65
XZ3-1 10	0.133446	0.003556	0.282411	0.000019	-12.8	4.78	0.7	1275	1700	-0.89
XZ3-1 11	0.294830	0.007793	0.282609	0.000022	-5.8	9.28	0.8	1111	1298	-0.77
XZ3-1 12	0.228794	0.006287	0.282584	0.000021	-6.7	9.29	0.7	1100	1297	-0.81
XZ3-1 13	0.215265	0.005875	0.282479	0.000019	-10.4	5.82	0.7	1255	1607	-0.82
XZ3-1 14	0.176840	0.004836	0.282428	0.000023	-12.1	4.65	0.8	1295	1712	-0.85
XZ3-1 15	0.345615	0.008856	0.282540	0.000027	-8.2	6.21	1.0	1272	1572	-0.73
XZ3-1 16	0.224651	0.005703	0.282504	0.000028	-9.5	6.79	1.0	1209	1521	-0.83
XZ3-1 17	0.379281	0.010236	0.282539	0.000032	-8.3	5.34	1.1	1336	1650	-0.69
XZ3-1 18	0.188792	0.005041	0.282485	0.000024	-10.1	6.54	0.9	1214	1543	-0.85
XZ3-1 19	0.226683	0.005945	0.282507	0.000023	-9.4	6.76	0.8	1213	1523	-0.82
XZ3-1 20	0.349863	0.008485	0.282567	0.000026	-7.3	7.38	0.9	1210	1468	-0.74
XZ5-1 01	0.214614	0.006682	0.282467	0.000020	-10.8	4.93	0.7	1306	1687	-0.80
XZ5-1 02	0.164242	0.005053	0.282555	0.000027	-7.7	9.01	0.9	1105	1322	-0.85
XZ5-1 03	0.195464	0.005464	0.282494	0.000027	-9.8	6.60	0.9	1215	1538	-0.84
XZ5-1 04	0.173766	0.005061	0.282567	0.000027	-7.2	9.44	0.9	1085	1284	-0.85
XZ5-1 05	0.250280	0.007230	0.282575	0.000032	-7.0	8.40	1.1	1148	1376	-0.78
XZ5-1 06	0.266324	0.008041	0.282550	0.000032	-7.9	7.04	1.1	1221	1498	-0.76
XZ5-1 07	0.214226	0.006499	0.282493	0.000027	-9.9	5.95	1.0	1256	1596	-0.80
XZ5-1 08	0.247050	0.007495	0.282543	0.000030	-8.1	7.14	1.1	1211	1489	-0.77
XZ5-1 09	0.216665	0.006439	0.282650	0.000028	-4.3	11.56	1.0	996	1094	-0.81
XZ5-1 10	0.225800	0.006884	0.282519	0.000032	-8.9	6.65	1.1	1227	1533	-0.79
XZ5-1 11	0.232894	0.007005	0.282588	0.000027	-6.5	9.00	1.0	1118	1323	-0.79

续(表 4)

样品测点号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma_m$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	t_{DM1}	t_{DM2}	$f_{\text{Lu/Hf}}$
XZ5-1 12	0.285606	0.008937	0.282582	0.000026	-6.7	7.65	0.9	1201	1444	-0.73
XZ5-1 13	0.228347	0.007167	0.282515	0.000024	-9.1	6.32	0.8	1246	1562	-0.78
XZ5-1 14	0.151670	0.004709	0.282495	0.000028	-9.8	7.07	1.0	1188	1496	-0.86
XZ5-1 15	0.263547	0.008024	0.282538	0.000026	-8.3	6.63	0.9	1241	1535	-0.76
XZ5-1 16	0.220290	0.006620	0.282598	0.000035	-6.2	9.58	1.3	1088	1271	-0.80
XZ5-1 17	0.240301	0.006935	0.282609	0.000032	-5.8	9.80	1.1	1080	1252	-0.79
XZ5-1 18	0.185268	0.005291	0.282563	0.000032	-7.4	9.13	1.1	1100	1311	-0.84
XZ5-1 19	0.266124	0.007770	0.282575	0.000033	-6.9	8.11	1.2	1167	1402	-0.77
XZ5-1 20	0.345568	0.009560	0.282792	0.000036	0.7	14.74	1.3	843	808	-0.71

a) 表中锆石 Hf 同位素组成的计算参数为: ^{176}Lu 衰变常数 $\lambda=1.865\times10^{-11}\text{ a}^{-1}$; 球粒陨石和亏损地幔的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 分别为 0.0332, 0.282772, 0.0384, 0.28325; 铁镁质下地壳的 $f_{\text{Lu/Hf}}=-0.34$; t_{DM1} , t_{DM2} 单位为 Ma; t 为锆石的形成年龄($t=890\text{ Ma}$)

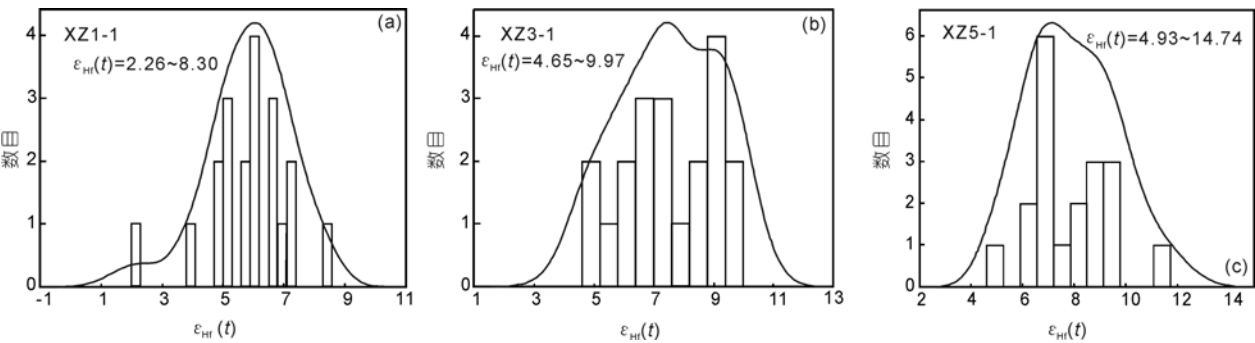


图 10 辉绿岩中锆石的 Hf 同位素组成

中集中分布在谐和线上的 16 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(889.6\pm7.9)\text{ Ma}$. 3 个样品中除样品 XZ3-1 的上交点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄, 由于上交点附近缺乏年龄点, 导致其年龄值误差较大; 样品 XZ5-1 中锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果与 Q-ICP-MS U-Pb 定年结果相比偏大, 可能是样品中普通铅 $^{206}\text{Pb}_c$ 含量较低, 而放射铅 $^{206}\text{Pb}^*$, $^{207}\text{Pb}^*$ 含量相对较多引起的外, 其余测年结果在误差范围内完全一致, 可以认为 $890\text{ Ma}\pm$ 代表了该区辉绿岩的侵位结晶年龄, 即徐淮地区辉绿岩形成于新元古代的早期.

研究区新元古界最上部震旦系(不整合于望山组之上)的金山寨组底部紫红色含砾石英砂岩中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 的测年结果中既有 2.5 和 1.8 Ga 地质事件的记录, 又有 (925 ± 10) , $(825\pm11)\text{ Ma}$ 岩浆事件记录(另文发表), 说明其源区存在新元古代早期的岩浆热事件, 这进一步佐证了研究区(华北陆块东南缘)存在新元古代早期的构造-岩浆事件.

本文的测试结果与柳永清等^[41]对徐淮地区栏杆侵位于元古界赵圩组和倪园组中的辉绿岩所含锆石及杨进辉等^[42]对辽东半岛南部金州出露于元古界桥

头组中的辉绿岩所含锆石的 SHRIMP U-Pb 测年结果中存在的新元古代早期的岩浆活动记录相吻合, 而未获得中元古代末期的测年数据. 研究区是否存在中元古代末期和/或新元古代初期两期岩浆活动, 尚有待于进一步研究, 但这些证据表明华北陆块的胶辽-徐淮地区在中元古代末期-新元古代初期发育有一定规模的基性岩浆活动.

4.2 岩浆源区

研究区侵位于望山组的辉绿岩(XZ1)明显富集 Sr, 而侵位于倪园组-九顶山组的辉绿岩(XZ3, XZ5)明显亏损 Sr, 这种差别主要是岩浆遭受陆壳物质混染程度不同所致. 微量元素原始地幔标准化蛛网图上 Nb, P 的负异常及 Nb*异常值为 0.51~0.98 表明研究区辉绿岩经受过陆壳的混染. $\text{Nb}^*=2\text{Nb}_N/(\text{K}_N+\text{La}_N)$, $\text{Nb}^*<1$ 表明铌亏损, 且岩石经受过同化混染^[43]. 侵位于望山组的辉绿岩(XZ1)的 Nb*值为 0.51~0.66, 而侵位于倪园组-九顶山组的辉绿岩(XZ3, XZ5)的 Nb*值为 0.71~0.98, 前者遭受混染的程度高于后者, 是导致前者富集 Sr 的原因(表 3). 另外, 辉绿岩样品的手标本

和薄片观察及分析结果均显示辉绿岩有较低程度的后期蚀变, 蚀变过程中 K, Na 和部分低场强元素(LFSE: Cs, Rb, Sr, Ba 等)可能发生不同程度的迁移. 侵位于望山组的辉绿岩(XZ1)的烧失量(LOI>2.15%)明显大于侵位于倪园组-九顶山组的辉绿岩(XZ3, XZ5)(表 3), 表明前者的蚀变程度强于后者, 亦可能使前者富集 Sr.

基性岩墙(床)群作为深源岩浆浅侵位的构造岩浆活动, 是基性岩浆快速侵位到先存裂隙内的产物, 与围岩的交代作用很弱, 地壳混染不是影响其岩石化学特征的主要机制, 基性岩墙(床)的地球化学特征, 特别是受后期蚀变影响较小的高场强元素(HFSE: Ti, Zr, Y, Nb, Ta, Hf, Th)和稀土元素(REE)等不活泼元素的地球化学特征基本上反映了岩浆源区的性质.

徐淮地区辉绿岩总体上富集大离子亲石元素(LILE)Rb, Ba, La, 略亏损高场强元素(HFSE)Th, Nb, Ta, Zr, Hf 等, 且相对富集 Cr 和 Ni, 其微量元素分配特征和稀土元素配分曲线特征反映岩浆源区相对比较深, 可能主要来自上地幔. 辉绿岩中 $Zr/Nb=10.8\sim 12.5$, $Y/Nb=2.4\sim 3.8$, $La_N/Yb_N=2.0\sim 2.5$ (表 3), 这些元素比值或指数对应于过渡型地幔的元素指数^[44], 暗示岩浆来源于过渡型地幔. Zr-Y, Zr-Nb 和 Th/Ta-La/Yb 图解^[44,45]上亦表明岩浆来源于过渡型地幔(图 11~13).

近年来, 锆石微区原位 Hf 同位素示踪研究受到广泛的重视. 锆石是一种非常稳定的副矿物, Hf 含量较高, 是 Hf 的主要载体矿物, 而 Lu 的含量极低, 由

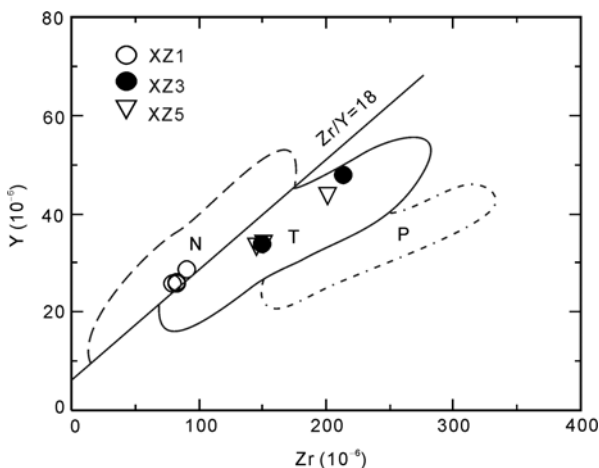


图 11 徐淮地区辉绿岩 Zr-Y 图解^[44]

P, 富集型地幔; N, 亏损型地幔; T, 过渡型地幔

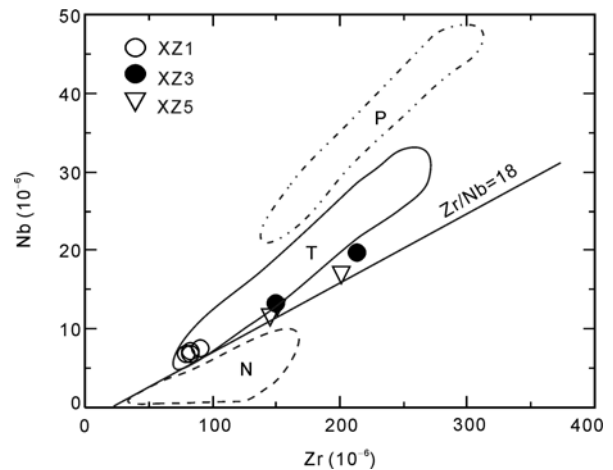


图 12 徐淮地区辉绿岩 Zr-Nb 图解^[44]

P, 富集型地幔; N, 亏损型地幔; T, 过渡型地幔

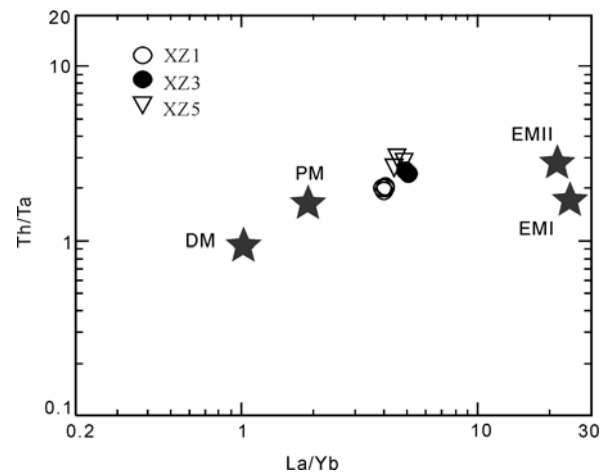


图 13 徐淮地区辉绿岩 Th/Ta-La/Yb 图解^[45]

DM, 亏损地幔; PM, 普通地幔; EM I, 富集地幔 I 型; EM II, 富集地幔 II 型

Lu 衰变而成的 ^{176}Hf 很少, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值非常低, 导致锆石形成后没有太多的放射性同位素子体的积累, 较高的 Hf 同位素体系封闭温度使得 Hf 同位素成分容易保留, 且受后期岩浆热事件的影响较少. 所测样品的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 基本可以代表其形成时体系的 Hf 同位素组成, 记录并保留岩浆源区性质^[46~48].

徐淮地区辉绿岩中岩浆锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $2.26\sim 14.74$ (图 10), 在 Hf 同位素特征图解上分布于球粒陨石与亏损地幔 Hf 同位素演化线之间, 1.8 Ga 古老地壳的演化线之上(图 14). Hf 同位素单阶段模式年龄($t_{\text{DM1}}=843\sim 1321$ Ma)和两阶段模式年龄($t_{\text{DM2}}=808\sim 1779$ Ma)与辉绿岩侵入体的形成年龄($890\text{ Ma}\pm$)相比,

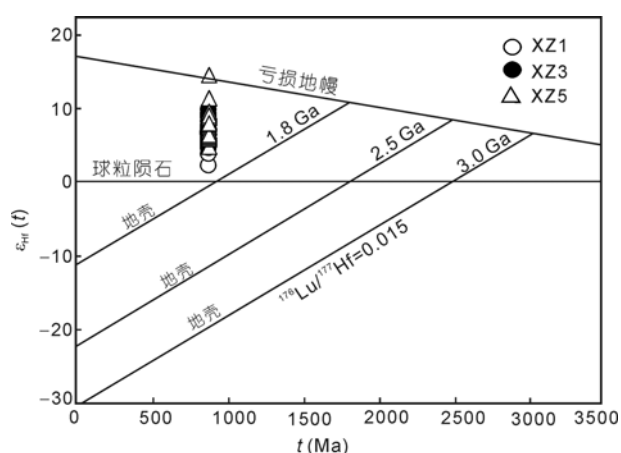


图 14 徐淮地区辉绿岩的 Hf 同位素特征

仅测点 XZ5-1.20 的单阶段模式年龄($t_{DM1}=843$ Ma)和两阶段模式年龄($t_{DM2}=808$ Ma)小于侵入体的形成年龄(890 Ma \pm), 其余测点的 Hf 模式年龄均大于其形成年龄, 但并不远大于其形成年龄, 表明辉绿岩原始岩浆不是来源于亏损地幔, 亦非富集性地幔, 而是中元古代时期的过渡型地幔或略富集性地幔^[48]。

4.3 构造背景

20 世纪 90 年代初, Rodinia 超大陆的概念被提出后, 国际地学界在超大陆的古地理再造方面做了大量的探索性研究, 并取得了众多研究成果. 新的研究成果表明 Rodinia 超大陆最终聚合的时间大致为 900 Ma^[7,49,50], Grenville 期造山带是各陆块拼合的主要对比标志, 该超大陆的裂解发生在新元古代, 裂解过程具有明显的时、空分布不均一性及较大的穿时性, 地幔柱可能是导致超大陆裂解过程的主要机制^[51-54]. 新元古代超大陆复原图的构建, 各种超大陆的拼合方案不断被修正和完善, 并得到古地磁资料的印证^[55-57]. 虽然在超大陆重建的早期方案中未能标出中国各主要陆块的具体位置, 但由于中国存在明显的中、新元古代构造-岩浆活动, 在时间上与 Grenville 期造山运动相近或类似, 因而, 很多地学家对中国主要陆块的中、新元古代构造史和在 Rodinia 超大陆中的位置作了深入的研究和探索. 因对其认识不同, 所得出的全球古大陆再造格局也全然不同^[4,7,23,58,59]。

晋宁运动对中国大陆地壳的形成和演化过程有着极其重要的影响, 并可能是全球性广义的 Grenville 造山运动在中国的具体表现. 在 Rodinia 超大陆形成过程中晋宁运动使扬子地块与江南古陆拼合, 形

成统一的华南陆块^[60]. 江南造山带及扬子地块西北缘存在的俯冲带和火山弧(约 950~900 Ma)为晋宁期造山运动的产物, 是对 Rodinia 超大陆汇聚的响应^[11-12,49,50,60,61]. Rodinia 超大陆裂解事件在华南陆块表现强烈, 扬子地块周缘和内部广泛分布新元古代花岗岩、基性岩墙(床)和大规模地壳抬升去顶以及随后裂谷形成是华南陆块参与 Rodinia 超大陆裂解的证据, 其形成与 Rodinia 超大陆下存在 860~750 Ma 超级地幔柱有关^[13-15,51-54]. 因此, 华南陆块中、新元古代的地质演化与 Rodinia 超大陆的聚合-裂解密切相关, 华南陆块是 Rodinia 超大陆的一部分。

徐淮地区辉绿岩的主量元素在 $K_2O-TiO_2-P_2O_5$ 图上的投影(图 7)属于板内大陆边缘向大洋过度环境下形成的玄武岩系列岩石, 微量元素的 Zr/Y-Zr 图解显示该辉绿岩形成于板内向岛弧过度的环境(图 15). 这与其围岩为大陆边缘浅海沉积环境的分析结果一致, 表明其形成于华北陆块东南缘的板内陆缘环境. 结合辉绿岩的锆石 U-Pb 定年结果(890 Ma \pm), 证明华北陆块东南缘新元古代早期处于大陆伸展环境, 并存在新元古代早期的构造热岩浆事件。

本文获得的反映与大陆伸展有关的侵入于徐淮地区元古代地层中辉绿岩的形成年龄为 890 Ma \pm , 虽然与华南陆块新元古代形成于同造山阶段的玄武质岩石的形成时间接近^[62], 但其与同时期代表 Grenville 期 Rodinia 超大陆汇聚过程的华南陆块及世界其他古陆块发育的构造-岩浆事件在构造属性和岩浆活动的时间序列上存在明显差异^[5-10,13,49,50]. 由

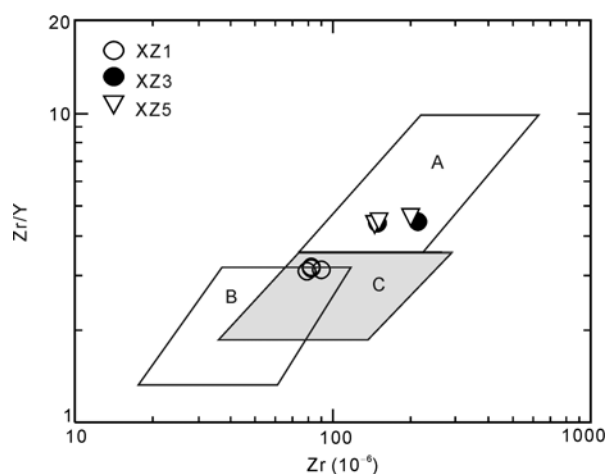


图 15 徐淮地区辉绿岩的 Zr/Y-Zr 图

A, 板内玄武岩; B, 岛弧玄武岩; C, 大洋中脊玄武岩

于目前所鉴定出的有关华北陆块内部中元古代晚期至新元古代早期构造-岩浆活动事件证据不充分,近年来,重新构建的 Rodinia 超大陆复原图或未标出华北陆块的具体位置或将华北陆块边缘化,置于 Rodinia 超大陆外围,与西伯利亚古陆临近^[4,7,23].但本文鉴定出的华北陆块东南缘存在的新元古代早期的岩浆活动事件以及前人发现的中元古代晚期至新元古代早期华北陆块南、北缘和华北陆块内部的构造-岩浆事件的存在^[4,19~22,39],证明华北陆块在 Rodinia 超大陆的汇聚与裂解期间,存在构造-岩浆活动事件,但华北陆块是否经历 Rodinia 超大陆的汇聚与裂解以及是否是 Rodinia 超大陆的组成部分尚需进一步研究.

此外,本文研究结果表明,华北克拉通局部地区在新元古代初期(700~900 Ma)也曾有岩浆作用的发生.因此,应该谨慎使用 700~900 Ma 岩浆岩石的存在与否来界定地质体的华南和华北陆块属性.

致谢 感谢审稿专家提出的宝贵意见.

参考文献

- 1 Tarney J. Geochemistry and significance of mafic dikes warms in the Proterozoic. In: Condie K C, ed. Proterozoic Crustal Evolution. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1992. 151-179
- 2 Hoek J D, Seitz H M. Continental mafic dykes warms as tectonic indicators: An example from the Vestfold Hills, East Antarctica. Precambrian Res, 1995, 75: 121-139
- 3 李江海, 何文渊, 钱祥麟. 元古代基性岩墙群的成因机制、构造背景及其古板块再造意义. 高校地质学报, 1997, 3: 272-281
- 4 陆松年, 李怀坤, 陈志宏, 等. 新元古时期中国古大陆与罗迪尼亚超大陆的关系. 地学前缘, 2004, 11: 515-523
- 5 Gladkochub D P, Wingate M T D, Pisarevsky S A, et al. Mafic intrusions in southwestern Siberia and implications for a Neoproterozoic connection with Laurentia. Precambrian Res, 2006, 147: 260-278
- 6 Pisarevsky S A, Bylund G. Palaeomagnetism of 935 Ma mafic dykes in southern Sweden and implications for the Sveconorwegian Loop. Geophys J Int, 2006, 166: 1095-1104
- 7 Li Z X, Bogdanova S V, Collins A S, et al. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis. Precambrian Res, 2008, 160: 179-210
- 8 Chen Y, Xu B, Zhan S, et al. First mid-Neoproterozoic paleomagnetic results from the Tarim Basin (NW China) and their geodynamic implications. Precambrian Res, 2004, 133: 271-281
- 9 Zhang C L, Li Z X, Li X H, et al. Neoproterozoic bimodal intrusive complex in the southwestern Tarim Block, northwest China: Age, geochemistry and implications for the rifting of Rodinia. Int Geol Rev, 2006, 48: 112-128
- 10 Lu S N, Li H K, Zhang C L, et al. Geological and geochronological evidence for Precambrian evolution of the Tarim Platform and surroundings. Precambrian Res, 2008, 160: 94-107
- 11 李献华, 李正祥, 周汉文, 等. 川西南关刀山岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、元素和 Nd 同位素地球化学——岩石成因与构造意义. 中国科学: D 辑, 2002, 32(增刊): 60-68
- 12 Greentree M R, Li Z X, Li X H, et al. Late Mesoproterozoic to earliest Neoproterozoic basin record of the Sibao orogenesis in western South China and relationship to the assembly of Rodinia. Precambrian Res, 2006, 51: 79-100
- 13 林广春, 李献华, 李武显. 川西新元古代基性岩墙群的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、元素和 Nd-Hf 同位素地球化学: 岩石成因与构造意义. 中国科学: 地球科学, 2006, 36: 630-645

5 结论

(1) 徐淮地区辉绿岩中锆石 SHRIMP 和 Q-ICP-MS U-Pb 定年结果为 890 Ma±, 表明辉绿岩形成于新元古代早期.

(2) 该区辉绿岩属于板内玄武岩系列岩石, 且形成于华北陆块东南缘的板内陆缘环境; 其稀土元素总量相对较低, 略富集轻稀土元素(LREE), Eu 异常不明显; 总体上富集大离子亲石元素(LILE)Rb, Ba, La, 略亏损高场强元素(HFSE)Th, Nb, Ta, Zr, Hf 等, 相对富集 Cr 和 Ni; 具有较高的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(2.26~14.74), 结合其单阶段模式年龄和两阶段模式年龄, 暗示其原始岩浆起源于中元古代时期的过渡型地幔.

(3) 华北陆块东南缘新元古代早期处于大陆伸展环境, 并存在新元古代早期的构造-岩浆活动事件. 因此, 应该谨慎使用 700~900 Ma 岩石的存在与否来界定华南和华北陆块.

- 14 Zhou J B, Li X H, Ge W, et al. Age and origin of middle Neoproterozoic mafic magmatism in southern Yangtze Block and relevance to the break-up of Rodinia. *Gond Res*, 2007, 12: 184–197
- 15 Li X H, Li W X, Li Z X, et al. 850–790 Ma bimodal volcanic and intrusive rocks in northern Zhejiang, South China: A major episode of continental rift magmatism during the breakup of Rodinia. *Lithos*, 2008, 102: 341–357
- 16 Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, et al. Review of global 2.1–1.8 Ga orogens: Implications for a pre-Rodinia supercontinent. *Earth Sci Rev*, 2002, 59: 125–162
- 17 Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. Assembly, accretion and breakup of the Paleo-Mesoproterozoic Columbia Supercontinent: Records in the North China Craton. *Gond Res*, 2003, 6: 417–434
- 18 Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. A Paleo-Mesoproterozoic supercontinent: Assembly, growth and breakup. *Earth-Sci Rev*, 2004, 67: 91–123
- 19 王涛, 张国伟, 裴先治, 等. 北秦岭新元古代北北西向碰撞造山带存在的可能性及两侧陆块的汇聚与裂解. *地质通报*, 2002, 21: 516–522
- 20 彭澎, 刘文军, 翟明国. 华北陆块对 Rodinia 超大陆的响应及其特征. *岩石矿物学杂志*, 2002, 21: 343–355
- 21 Chen D, Liu L, Sun Y, et al. Determination of the Neoproterozoic Shicaogou syncollisional granite in the Eastern Qinling Mountains and its geochemical implications. *Acta Geol Sin*, 2004, 78: 73–82
- 22 Shao J, Zhai M, Zhang L G, et al. Identification of five stages of dike swarms in the Shangxi-Hebei-Inner Mongolia border area and its tectonic implications. *Acta Geol Sin*, 2004, 78: 320–330
- 23 Zhang S, Li Z X, Wu H. New Precambrian palaeomagnetic constraints on the position of the North China Block in Rodinia. *Precambrian Res*, 2006, 144: 213–238
- 24 Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, et al. Thermal evolution of the Archaean basement rocks from the eastern part of the North China Craton and its bearing on tectonic setting. *Int Geol Rev*, 1998, 40: 706–721
- 25 Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, et al. Petrology and *P-T* path of the Fuping mafic granulites: Implications for tectonic evolution of the central zone of the North China Craton. *J Metamorph Geol*, 2000, 18: 375–391
- 26 Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, et al. Metamorphism of basement rocks in the Central Zone of the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic tectonic evolution. *Precambrian Res*, 2000, 103: 55–88
- 27 Kröner A, Wilde S A, Zhao G C, et al. Zircon geochronology and metamorphic evolution of mafic dykes in the Hengshan Complex of northern China: Evidence for late Palaeoproterozoic extension and subsequent high-pressure metamorphism in the North China Craton. *Precambrian Res*, 2006, 146: 45–67
- 28 Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, et al. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: Lithological, geochemical, structural and *P-T* path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Res*, 2001, 107: 45–73
- 29 Wilde S A, Zhao G C, Sun M. Development of the North China Craton during the late Archean and its final amalgamation at 1.8 Ga: Some speculation on its position within a global Paleoproterozoic Supercontinent. *Gond Res*, 2002, 5: 85–94
- 30 Kusky T M, Li J H. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton. *J Asian Earth Sci*, 2003, 22: 383–397
- 31 Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. *Precambrian Res*, 2005, 136: 172–202
- 32 Zhai M G, Liu W J. Palaeoproterozoic tectonic history of the North China Craton: A review. *Precambrian Res*, 2003, 122: 183–199
- 33 Lu S H, Zhao G C, Wang H C, et al. Precambrian metamorphic basement and sedimentary cover of the North China Craton: A review. *Precambrian Res*, 2008, 160: 77–93
- 34 王桂梁, 姜波, 曹代勇, 等. 徐州-宿州弧形双冲——叠瓦扇逆冲断层系统. *地质学报*, 1998, 72: 228–236
- 35 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. *地质论评*, 2002, 48(增刊): 26–30
- 36 谢烈文, 张艳斌, 张辉煌, 等. 锆石/斜锆石 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素以及微量元素成分的同时原位测定. *科学通报*, 2008, 53: 220–228
- 37 Cherniak D J, Watson E B. Pb diffusion in zircon. *Chem Geol*, 2000, 172: 5–24
- 38 Chen F K, Siebel W, Satir M. Zircon U-Pb and Pb-isotope fractionation during stepwise HF acid leaching and geochronological implications. *Chem Geol*, 2002, 191: 155–164
- 39 侯贵廷, 李江海, 金爱文, 等. 鲁西前寒武纪基性岩墙群. *地质学报*, 2005, 79: 190–200
- 40 He Y H, Zhao G C, Sun M, et al. Geochemistry, isotope systematics and petrogenesis of the volcanic rocks in the Zhongtiao Mountain: An alternative interpretation for the evolution of the southern margin of the North China Craton. *Lithos*, 2008, 102: 158–178
- 41 柳永清, 高林志, 刘燕学, 等. 徐淮地区新元古代初期镁铁质岩浆事件的锆石 U-Pb 定年. *科学通报*, 2005, 50: 2514–2521
- 42 杨进辉, 吴福元, 张艳斌, 等. 辽东半岛南部三叠纪辉绿岩中发现新元古代年龄锆石. *科学通报*, 2004, 49: 1877–1882

- 43 McDonough W F, Sun S S. Isotopic and geochemical systematics in Tertiary-recent basalts from Southeastern Australia and implication for the sub-continental lithosphere. *Geochim Cosmochim Acta*, 1985, 49: 2051–2067
- 44 LeRoex A P, Dick H J, Reid A M, et al. Geochemistry, mineralogy and petrogenesis of lavas erupted along the southwest Indian Ridge between the Bouvet triple junction and 11° east. *J Petrol*, 1983, 24: 267–318
- 45 Condie K C. Sources of Proterozoic mafic dykes warms: Constraints from Th/Ta and La/Yb ratios. *Precambrian Res*, 1997, 81: 3–14
- 46 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. *Lithos*, 2002, 61: 237–269
- 47 杨德彬, 许文良, 裴福萍, 等. 蚌埠隆起区古元古代钾长花岗岩的成因: 岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素的制约. *地球科学*, 2009, 34: 148–164
- 48 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. *岩石学报*, 2007, 23: 185–220
- 49 Ye M F, Li X H, Li W X, et al. SHRIMP zircon U-Pb geochronological and whole-rock geochemical evidence for an early Neoproterozoic Sibaoan magmatic arc along the southeastern margin of the Yangtze Block. *Gond Res*, 2007, 12: 144–156
- 50 Li X H, Li W X, Li Z X, et al. Amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks in South China: Constraints from SHRIMP U-Pb zircon age, geochemistry and Nd-Hf isotopes of the Shuangxiwu volcanic rocks. *Precambrian Res*, 2009, 174: 117–128
- 51 Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al. The breakup of Rodinia: Did it start with a mantle plume beneath South China? *Earth Planet Sci Lett*, 1999, 173: 171–181
- 52 Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: Evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia. *Precambrian Res*, 2003, 122: 85–109
- 53 Wang X C, Li X H, Li W X, et al. Ca. 825 Ma komatiitic basalts in South China: First evidence for >1500°C mantle melts by a Rodinian mantle plume. *Geology*, 2007, 35: 1103–1106
- 54 Wang X C, Li X H, Li W X, et al. The Bikou basalts in the northwestern Yangtze Block, South China: Remnants of 820–810 Ma continental flood basalts. *Geol Soc Am Bull*, 2008, 120: 1478–1492
- 55 Li Z X, Evans D A D, Zhang S. A 90° spin on Rodinia: Possible causal links between the Neoproterozoic supercontinent, superplume, true polar wander and low-latitude glaciation. *Earth Planet Sci Lett*, 2004, 220: 409–421
- 56 Hoffman P F. Did the breakout of Laurentia turn Gondwanaland inside-out? *Science*, 1991, 252: 1409–1412
- 57 Condie K C. Continent growth during formation of Rodinia at 1.35–0.9 Ga. *Gond Res*, 2001, 4: 5–16
- 58 郑永飞. 新元古代超大陆构型中华南的位置. *科学通报*, 2004, 49: 715–717
- 59 凌文黎, 程建萍. Rodinia 研究意义、重建方案与华南晋宁期构造运动. *地质科技情报*, 2000, 19: 7–11
- 60 Wang X L, Zhao G C, Zhou J C, et al. Geochronology and Hf isotopes of zircon from volcanic rocks of the Shuangqiaoshan Group, South China: Implications for the Neoproterozoic tectonic evolution of the eastern Jiangnan orogen. *Gond Res*, 2008, 14: 355–367
- 61 Li Z X, Li X H, Zhou H W, et al. Grenvillian continental collision in South China: New SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia. *Geology*, 2002, 30: 163–166
- 62 李献华, 王选策, 李武显, 等. 华南新元古代玄武质岩石成因与构造意义: 从造山运动到陆内裂谷. *地球化学*, 2008, 37: 382–398