

苏鲁造山带岩浆岩的锆石 U-Pb 定年及构造意义

姜慧超^{1,2}, 王绪诚², 周祖翼², 阙晓铭²

(1. 中国地质大学 海洋学院, 北京 100084; 2. 同济大学 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 锆石 U-Pb 定年和地球化学分析结果显示, 苏鲁造山带南缘连云港锦屏山片麻状花岗岩形成于 (806.0 ± 14.0) Ma, 海州群云台组变质火山岩形成于 (800.8 ± 7.8) Ma, 张八岭隆起的张八岭群西冷组变质火山岩形成于 (751.6 ± 7.1) Ma 和 (767.0 ± 15.0) Ma. 这些岩浆岩总体上具有高钾钙碱性系列、右倾型 REE(Rare Earth Elements)模式、Nb、Ta、Sr、P 和 Ti 强烈亏损、中等负钨异常、重稀土弱到中等亏损、低 Sr、高 Yb 等特点, 与浙闽型岩浆岩反映的区域伸展环境和下地壳部分熔融是一致的. 这次构造岩浆活动 820~740 Ma, 是晋宁期主碰撞造山后 Rodinia 超大陆裂解和岩石圈减薄演化的记录.

关键词: 岩浆岩; 新元古代; 锆石 U-Pb 定年; 地球化学; 构造环境

中图分类号: P 588.1

文献标识码: A

Zircon U-Pb Dating and Tectonic Relevance for Igneous Rocks in Sulu Orogen

JIANG Huichao^{1,2}, WANG Xucheng², ZHOU Zuji², QUE Xiaoming²

(1. China University of Geoscience, School of Ocean Sciences, Beijing 100084, China; 2. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A study of LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemical analysis is performed on Neoproterozoic igneous rocks from the southern part of Sulu orogenic belt to obtain their crystallization time and tectonic control. Zircon U-Pb dating results yield weighted mean crystallization ages of (806.0 ± 14.0) Ma for the gneissic granite from Jinping Mountain, (800.8 ± 7.8) Ma for metavolcanic rocks of the Yuntai Formation, Haizhou Group in the Lianyungang area, together with (751.6 ± 7.1) Ma and (767.0 ± 15.0) Ma for metavolcanic rocks of the Xileng Formation, Zhangbaling Group from the Zhangbaling belt. These igneous rocks are characterized with high K calc-alkaline series, medium

negative Eu anomaly and medium depletion of the HREE. They are predominately depleted in Nb, Ta, Sr, P and Ti, and the concentrations of high Yb and low Sr show the same characteristics as those for Zhejiang-Fujian type granite. These are correlated with the tectonic setting of extension and partial melting from the lower crust, corresponding to the Rodinia break-up and lithospheric thinning.

Key words: igneous rocks; Neoproterozoic; zircon U-Pb dating; geochemistry; tectonic setting

大别-苏鲁造山带, 因出露典型的高压/超高压岩石而成为研究俯冲碰撞过程的热点地区之一, 研究取得了丰富的成果^[1-4]. 由于造山折返和深层剥露作用, 所以通过造山带基底来研究这一地区前寒武纪构造事件成为可能, 比如新元古代 Rodinia 超大陆的形成和裂解就是其中之一. 陆松年等^[5]认为, 扬子板块约于 850 Ma 通过晋宁运动完成了由活动向稳定状态的转变, 南华纪裂解型岩浆岩及震旦系冰碛岩反映了超大陆新元古代的陆内拉张环境. 郑永飞等^[6]将华南新元古代岩浆岩归结为 820 Ma 和 750 Ma 两个时期, 其形成环境与区域裂解和地幔热量上涌有关. 本文选择苏鲁造山带南部的新元古代花岗岩(连云港锦屏山花岗岩)和火山岩(张八岭群西冷组与海州群云台组)如图 1 所示, 通过 LA-ICP-MS 激光剥蚀等离子质谱仪进行锆石 U-Pb 年代学和地球化学等分析, 并综合区域上现有的资料^[7-14], 分析了 Rodinia 超大陆裂解事件在苏鲁造山带南部的岩浆活动记录, 并为这一地区进行地层时代划分提供了新的年代约束.

1 区域地质背景

苏鲁造山带高压/超高压单元出露较为完整^[15],

收稿日期: 2011-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(40872138)

第一作者: 姜慧超(1969—), 男, 博士后, 高级工程师, 主要研究方向为油气田勘探和大陆边缘构造盆地分析工作.

E-mail: dkjyh@sohu.com

通讯作者: 王绪诚(1985—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为大陆边缘构造盆地分析. E-mail: xcxc407@126.com

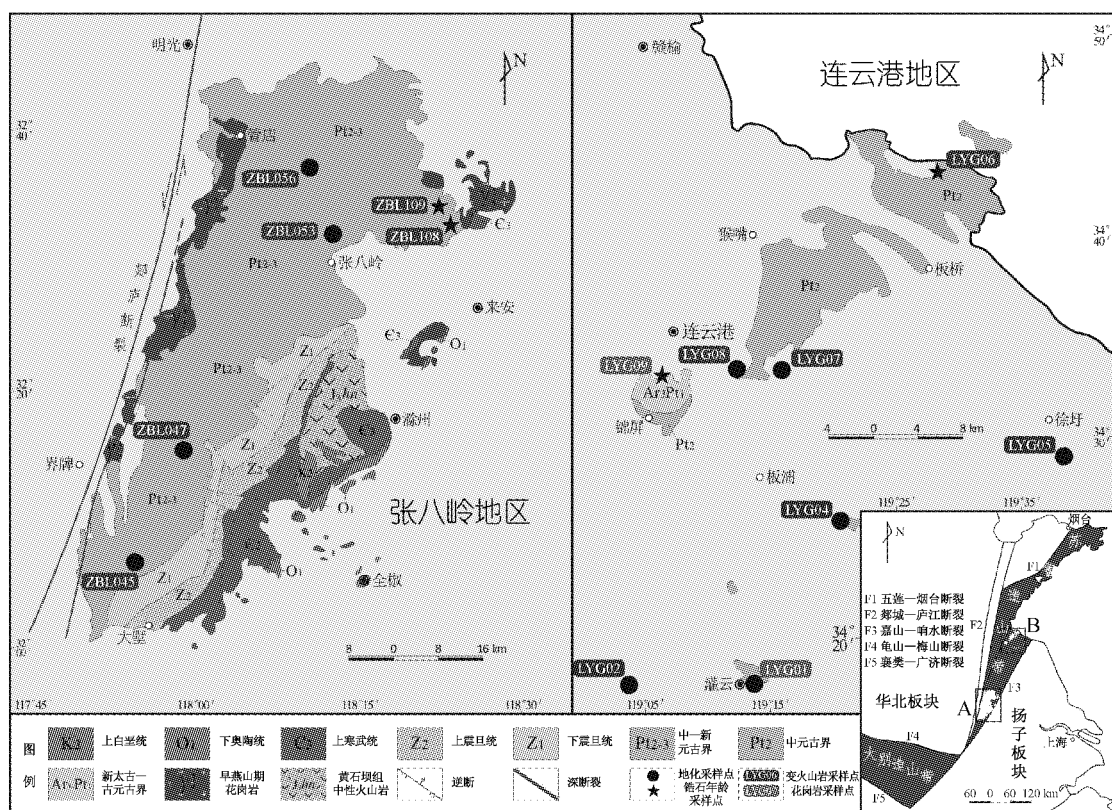


图 1 苏鲁造山带南部与张八岭地区地质简图及采样点分布

Fig.1 Geological sketch map and sample locations in the southern Sulu orogenic belt

包括南苏鲁高压低温变质岩带、南苏鲁高压中温变质岩带、北苏鲁超高压表壳变质岩带和北苏鲁超高压花岗变质岩带。南苏鲁高压蓝片岩带大致以响水—淮阴—庐江断裂为南界，海州—泗阳断裂组成其北界，包括张八岭（张八岭群）、连云港—灌云（海州群）等露头区见图 1，这一变质带以出现蓝闪石、冻蓝闪石和文石等高压矿物为特征。张八岭隆起位于郯庐断裂与滁河断裂之间，Liou 等^[16]把这一构造带划入蓝片岩带，区域上可以与大别造山带的宿松群、红安群以及苏鲁造山带的海州群相对比。张八岭隆起主要由张八岭群组成，传统上将其划入中元古代，包括西冷组 and 北将军组。北将军组主要分为三段：下段为厚层大理岩化的细晶灰岩，中段为砂质千枚岩、条带状绢云石英片岩和绿泥石英片岩，上段为绢云石英千枚岩、砂质千枚岩和绢云石英片岩；西冷岩组下段为石英角斑岩，中段为石英片岩及石英角斑质凝灰岩夹蓝片岩，上段为凝灰质千枚岩及凝灰质变粉砂岩等，西冷组是张八岭隆起的主体^[17]。张八岭隆起变质火山岩（原岩为细碧角斑岩）的 Rb-Sr 等时线年龄为 (730 ± 50) Ma，锆石 U-Pb 年龄为 864 Ma，区域上可与宿松群的石英角斑岩进行对比^[18]。汪迎平等^[19]报道了西冷组锆石蒸发法年龄为 (975 ± 31) Ma 和 (927 ± 24) Ma。位于连云港—灌云地区的海州群，

传统上将其划入中-新元古代，包括锦屏组和上部的云台组，区域上可与大别造山带的宿松群和红安群相对比^[13, 20]。锦屏组下部为白云片岩夹大理岩、大理岩、石英岩和磷灰岩等，中部为钙质云母片岩，上部为白色大理岩，地层中广泛分布有基性侵入岩；云台组由变质火山岩组成，以白云石英片岩、石英岩、蓝晶石英片岩和角闪片岩等为主。根据锆石 U-Pb 年龄 814~740 Ma，认为海州群锦屏组变质火山岩形成于新元古代^[13, 21]。汤加富等^[20]指出，云台组这套海相细碧-角斑岩可以与张八岭群的西冷组对比，根据锆石 U-Pb 年龄 (929 Ma) 将其划入新元古代；王秀丽等^[13]分别应用稀释法、蒸发法获得了云台组片岩中碎屑锆石的 U-Pb 年龄为 800~740 Ma，由此将云台组划入新元古代中期；Hacker 等^[14]测得连云港海州群片岩的锆石 U-Pb 上交点年龄为 795 Ma。

2 样品采集与分析方法

岩石样品采自连云港—灌云地区和张八岭隆起的新鲜露头，包括片麻状花岗岩和变质火山岩，每件样品重约 3~4 kg，其中 4 件用于锆石 U-Pb 分析，11 件样品用于全岩化学分析，这些样品的采样位置分

布见图1。样品破碎、矿物分选在河北省区域地质矿产调查研究所完成。将3~4 kg岩石经过常规的碎样筛分后,粉末样品用于全岩化学分析;筛分后的粒状碎屑物经过淘洗、磁选和重液分选后,双目镜下人工挑选颗粒较大、晶形较好的300个锆石颗粒用于锆石 U-Pb 分析。锆石制靶和阴极发光(CL)显微照相在中科院地质与地球物理研究所完成。

锆石 U-Pb 定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。使用的激光剥蚀等离子体质谱仪(LA-ICP-MS),其激光剥蚀系统为 GeoLas 2 005,等离子体质谱仪为 Agilent 7 500 a。激光能量为 70 MJ,频率为 8 Hz,激光束斑直径 32 μm 。分析使用 2 个质量监控样与 5 个锆石 U-Pb 待测样交替进行,同时包括样品 10 个微量元素的测试分析。测试分析中采用 He 作为剥蚀物质的载气,同位素比值校正根据标样锆石 91 500 $m(^{206}\text{Pb})/(m(^{238}\text{U}))$ 年龄值为 1 062 Ma^[22]。同位素数据处理采用 ICPMSDataCal(5.2) 软件进行,年龄计算及成图采用 ISOPLLOT(3.7) 软件^[23] 进行,加权平均年龄采用 $m(^{206}\text{Pb})/m(^{238}\text{U})$ 年龄,其加权平均的误差为 σ 。全岩化学分析在国土资源部武汉矿产资源监督检测中心完成,主量元素由 X 荧光光谱仪(Magix_pro2440)测试,微量和稀土元素由等离子直读光谱仪(JY38S)测试,测试分析结果见表1。

3 锆石 U-Pb 定年结果

变质火山岩 LYG06 采自连云港海州群云台组(N34°44.286', E119°25.383')的新鲜露头,主体岩性为浅灰绿色片岩。锆石颗粒大小为 80~200 μm ,无色透明或略带褐色,柱状锆石长宽比为 1:1~3:1。这些锆石发育振荡环带。根据 18 个锆石 22 激光点的分析结果如图 2 所示,除去一个 Pb 丢失的锆石年龄,其余数据均落在谐和线上或附近形成了两组等时线年龄及模式年龄的加权平均方差(M_{SWD})。其中一组包括环带与核的 $m(^{206}\text{Pb})/m(^{238}\text{U})$ 加权平均年龄为(800.8 \pm 7.8)Ma(M_{SWD} =3.4,样本数 $N=19$);另一组来自两个锆石核部的 $m(^{206}\text{Pb})/m(^{238}\text{U})$ 加权平均年龄为(885.0 \pm 19.0)Ma(M_{SWD} =0.008, $N=2$)。这些锆石的 U 质量分数为 $20\times 10^{-6}\sim 152\times 10^{-6}$, Th 为 $28.7\times 10^{-6}\sim 206.0\times 10^{-6}$,硅酸盐 $m(\text{Th})/m(\text{U})$ 值为 0.86~3.08,属于岩浆成因的锆石^[24]。

变质火山岩 ZBL108 采自张八岭滁州三湾村

(N32°33.888', E118°22.978'),主体岩性为糜棱岩化片岩,定向组构发育。其锆石颗粒大小为 80~200 μm ,无色透明或略带褐色,锆石呈短柱状,长宽比为 1:1~2:1,振荡环带发育。根据 21 个锆石 23 个激光点的分析结果见图 2,2 个颗粒存在明显的 Pb 丢失,其余锆石环带和核部的数据均落在谐和线上或附近。计算得 $m(^{206}\text{Pb})/m(^{238}\text{U})$ 平均年龄为(751.6 \pm 7.1)Ma(M_{SWD} =5.5, $N=21$)。锆石 U 含量为 $23.7\times 10^{-6}\sim 357.0\times 10^{-6}$, Th 为 $22.7\times 10^{-6}\sim 323.1\times 10^{-6}$ 硅酸盐 $m(\text{Th})/m(\text{U})$ 值为 0.70~2.06,表现为岩浆锆石的特点。

变质火山岩 ZBL109 采自张八岭滁州石桥水库附近(N32°33.925', E118°22.468'),岩性为灰色糜棱岩化长英质云母片岩。锆石颗粒大小为 60~120 μm ,无色透明或略带褐色,短柱状锆石长宽比约 1:1~2:1,这些锆石发育振荡环带。12 个锆石 16 个激光点的分析结果显示见图 2,10 个激光点存在明显的 Pb 丢失,其余数据均落在谐和线上或附近。计算 6 粒谐和锆石的 $m(^{206}\text{Pb})/m(^{238}\text{U})$ 平均年龄为(757.0 \pm 12.0)Ma(M_{SWD} =1.4, $N=6$),根据全部锆石获得了(767.0 \pm 15.0)Ma (M_{SWD} =14, $N=13$)的上交点年龄。这些锆石仍然是岩浆锆石,其 U 质量分数为 $62.4\times 10^{-6}\sim 283.0\times 10^{-6}$, Th 的质量分数为 $74.9\times 10^{-6}\sim 508.0\times 10^{-6}$,硅酸盐 $m(\text{Th})/m(\text{U})$ 值为 1.11~2.21。

片麻状花岗岩 LYG09 采自连云港锦屏山(N34°33.696', E119°08.108'),主体岩性为浅红色中粗粒片麻状花岗岩。锆石颗粒较大,粒径在 200 μm 以上,无色透明或略带褐色,柱状锆石的长宽比为 2:1~3:1,它们均发育振荡环带。根据 16 个锆石 22 个激光点的分析结果见图 2,锆石在谐和线上大致可以分成 3 组年龄,最大年龄(901 \pm 18)Ma 与最小年龄(747 \pm 14)Ma 尽管只有一个数据,但它们与晋宁期碰撞造山和火山岩形成时代比较一致。该样品理想的一组包括环带与核部的 $m(^{206}\text{Pb})/m(^{238}\text{U})$ 加权平均年龄为(806 \pm 14)Ma (M_{SWD} =9.7, $N=18$),代表了云台组岩浆活动的年龄或者与变质火山岩的地层年龄相当。定年锆石的 U 含量为 $13.8\sim 613.0\times 10^{-6}$, Th 的质量分数为 $21.9\times 10^{-6}\sim 132.0\times 10^{-6}$,硅酸盐 $m(\text{Th})/m(\text{U})$ 比为 0.86~2.06,表明是岩浆锆石的特点。

总体而言,张八岭隆起两个变质火山岩的锆石 U-Pb 年龄(751.6 \pm 7.1)Ma, (767 \pm 15)Ma 与肥东西山驿片麻状花岗岩获得的锆石 U-Pb 年龄 785 \pm 10

表 1 变质火山岩和花岗岩的全岩化学分析结果
Tab.1 Whole rock geochemical analyses of metavolcanic rocks and granites

参数	岩性 样号	花岗岩 LYG01	长英云母片岩		石英云母片岩		片岩 LYG07	云母片岩 LYG08	花岗岩 LYG09	长英质片岩		云母长英片岩		糜棱岩 ZBL109
			LYG02	LYG04	LYG05	LYG06				ZBL045	ZBL047	ZBL053	ZBL056	
质量 分 数/ %	Na ₂ O	2.92	4.84	4.61	2.43	4.09	4.76	2.37	3.91	2.75	6.66	5.21	5.09	4.18
	MgO	0.36	0.17	0.22	0.22	0.08	0.17	0.29	0.01	0.23	0.04	0.62	0.39	0.22
	Al ₂ O ₃	14.73	12.82	12.83	12.64	12.23	12.27	14.43	11.77	11.42	12.74	14.62	11.97	11.34
	SiO ₂	73.85	75.22	73.60	77.78	76.97	75.05	73.09	76.15	78.89	75.48	71.70	75.92	79.07
	P ₂ O ₅	0.07	0.04	0.04	0.02	0.01	0.04	0.05	0.01	0.02	0.01	0.08	0.08	0.02
	K ₂ O	3.73	3.10	3.24	3.69	4.71	3.96	5.94	5.18	3.23	3.71	2.57	1.43	3.16
	CaO	0.33	0.81	1.38	0.20	0.21	0.74	0.13	0.59	0.33	0.33	1.01	1.16	0.32
	TiO ₂	0.25	0.23	0.26	0.20	0.16	0.27	0.37	0.15	0.22	0.23	0.34	0.25	0.16
	MnO	0.08	0.08	0.11	0.06	0.02	0.09	0.02	0.04	0.05	0.01	0.10	0.09	0.05
	Fe ₂ O ₃	0.86	1.68	0.42	0.67	0.61	1.00	1.55	0.36	0.96	0.01	1.60	2.31	0.69
	FeO	0.87	0.30	0.90	0.47	0.33	0.70	0.38	1.37	0.37	0.32	0.70	0.32	0.12
	H ₂ O	1.67	0.39	0.61	1.30	0.38	0.29	1.19	0.23	1.17	0.22	1.16	0.75	0.39
	CO ₂	0.06	0.08	1.57	0.08	0.08	0.49	0.06	0.08	0.19	0.06	0.06	0.08	0.10
	ALK	6.65	7.94	7.85	6.12	8.8	8.72	8.31	9.09	5.98	10.37	7.78	6.52	7.34
质量 分 数/ 10 ⁻⁶	总计	99.78	99.76	99.79	99.76	99.88	99.83	99.87	99.85	99.83	99.82	99.77	99.84	99.82
	Ni	2.71	2.25	1.43	1.30	1.16	2.00	1.77	1.33	0.19	0.83	0.26	0.72	0.43
	Ga	19.50	15.50	16.70	17.30	17.80	19.20	18.20	25.80	15.40	12.60	20.30	14.20	15.20
	Nb	12.20	15.70	13.10	12.00	17.60	18.30	16.30	25.00	12.90	9.10	11.80	6.30	10.80
	Ta	1.11	1.80	1.65	1.12	1.83	1.75	1.47	2.18	0.74	0.58	0.70	0.36	0.93
	Th	8.31	8.05	9.21	8.11	9.81	6.69	7.27	17.20	7.21	5.65	6.42	4.21	6.36
	U	1.63	1.35	2.11	2.27	1.78	1.45	1.18	1.83	1.39	1.03	0.99	0.77	1.03
	Ba	1015.00	1256.00	801.00	1168.00	287.00	587.00	415.00	194.00	588.00	1045.00	1063.00	344.00	711.00
	Sr	32.70	148.00	125.00	41.00	19.40	53.50	17.00	13.00	24.70	60.00	208.00	134.00	46.50
	Cr	3.90	4.40	0.90	3.70	1.40	2.10	3.00	2.00	3.30	2.20	3.40	6.20	2.80
	Rb	120.00	62.30	65.50	105.00	97.00	95.00	174.00	134.00	74.10	46.50	67.90	38.70	63.20
	Zr	196.00	240.00	216.00	154.00	162.00	272.00	301.00	280.00	169.00	214.00	211.00	184.00	115.00
	Hf	5.80	6.90	6.40	5.00	4.90	8.40	9.90	8.40	4.50	6.30	5.90	4.60	3.10
质量 分 数/ 10 ⁻⁶	Y	26.44	32.89	32.81	12.72	26.11	29.64	20.88	66.65	26.57	37.72	18.47	41.16	27.16
	La	23.68	47.31	47.63	25.16	35.06	40.52	66.87	108.10	33.92	20.13	27.04	26.24	13.40
	Ce	52.09	86.70	89.59	52.15	69.52	80.68	101.20	203.40	67.66	42.75	54.31	51.65	43.11
	Pr	6.08	10.74	10.74	5.05	8.13	9.60	13.46	22.98	8.10	5.67	5.94	6.50	5.09
	Nd	22.88	41.19	41.79	16.69	28.51	34.17	50.10	83.35	31.51	23.18	22.01	27.53	21.16
	Sm	4.50	7.52	7.76	2.68	5.82	6.66	8.71	16.25	5.51	5.33	3.74	5.97	4.83
	Eu	0.88	1.46	1.77	0.60	0.59	1.12	1.48	0.90	1.22	1.05	1.05	1.28	0.76
	Gd	4.15	6.93	6.93	2.13	4.93	5.51	6.69	15.49	4.83	5.48	3.29	6.61	4.52
	Tb	0.69	1.04	1.06	0.34	0.79	0.92	0.88	2.42	0.73	0.96	0.51	1.12	0.78
	Dy	4.25	5.90	5.86	2.02	4.48	5.27	4.49	13.39	4.26	6.07	3.08	6.86	4.74
	Ho	0.95	1.29	1.30	0.47	0.97	1.13	0.88	2.78	0.96	1.39	0.68	1.56	1.07
	Er	2.97	3.63	3.60	1.56	2.74	3.13	2.50	7.04	2.67	4.17	2.02	4.55	3.13
	Tm	0.49	0.58	0.57	0.30	0.46	0.49	0.43	1.03	0.43	0.69	0.35	0.73	0.55
	Yb	3.41	3.77	3.48	2.11	3.09	2.92	2.83	5.88	2.83	4.57	2.56	4.84	3.68
	Lu	0.54	0.60	0.53	0.35	0.47	0.43	0.48	0.84	0.44	0.71	0.45	0.75	0.59
质量 分 数/ 10 ⁻⁶	稀土元素 合计/%	154.00	251.60	255.40	124.30	191.70	222.20	281.90	550.50	191.60	159.90	145.50	187.40	134.57
	轻/重稀土 元素比值	2.509	3.442	3.550	4.651	3.352	3.494	6.036	3.765	3.383	1.589	3.632	1.748	1.912
	δ(Eu)值/%	0.62	0.62	0.74	0.77	0.34	0.57	0.59	0.17	0.72	0.59	0.92	0.62	0.50

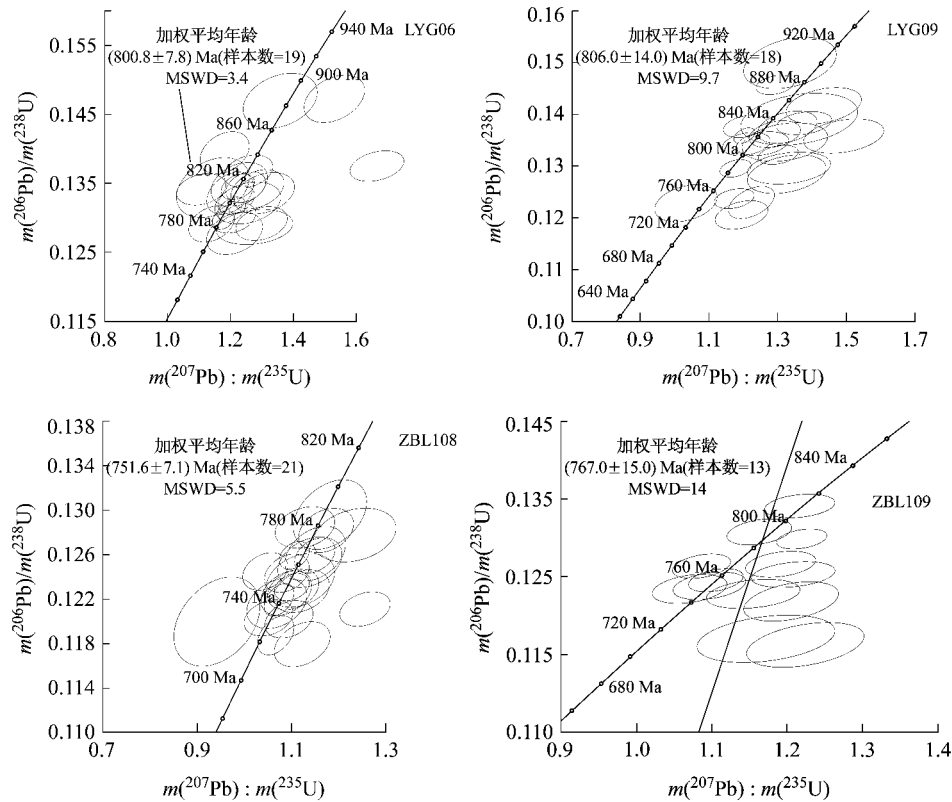


图2 海州群云台组变质火山岩(LYG06)、锦屏山片麻状花岗岩(LYG09)及张八岭群西冷组变质火山岩(ZBL108, ZBL109)的锆石 U-Pb 谐和图

Fig.2 U-Pb Concordia diagrams for metavolcanic rocks of Yuntai Formation (LYG06) and Xileng Formation (ZBL108, ZBL109), and for the granite (LYG09)

Ma^[25]是一致的,区域上代表了新元古代(750~785Ma)一次重要的构造岩浆事件,也表明张八岭群西冷组形成于新元古代而不是中元古代.对于连云港—灌云地区的海州群的变质火山岩,其锆石 U-Pb 年龄(800.8±7.8)Ma 与片麻状花岗岩的岩浆时代(806±14)Ma 是一致的,同时存在(747±14)Ma 零星的锆石 U-Pb 年代记录.综合前人^[26-28]从苏鲁造山带内新元古代岩浆岩获得的锆石 U-Pb 数据,包括7个花岗岩的年龄为(672±4)Ma、(742±9)Ma、(747±14)Ma、(752±9)Ma、(757±6)Ma、(758±5)Ma、(818±10)Ma 以及1个辉长岩年龄为(738±10)Ma,本文认为(820~740)Ma 是苏鲁造山带南部一次重要的构造岩浆活动期,这一构造期有别于晋宁期碰撞造山期获得的年龄记录901~885 Ma.此外,本文从海州群云台组测得的变质火山岩年龄(800.8±7.8)Ma 与前人获得的锆石 U-Pb 年龄相差不大800~740 Ma^[13, 21].

4 岩石化学与构造环境分析

全岩化学分析数据列于表1.综合前人等成

果^[12, 21, 26, 29],研究区新元古代的花岗岩和变质火山岩以高钾钙碱性系列为主,具有富 SiO₂ (含量 70%~80%)、富碱(K₂O 含量 2.5%~5.9%, Na₂O 含量 2.4%~6.7%)、低 MgO (含量 0.01%~0.62%) 以及低 Ni、Cr 等特点.这些岩浆岩表现出一致的轻稀土富集、重稀土亏损的右倾型配分模式, $m(\text{LREE})/m(\text{HREE})=1.748\sim6.036$,它们不同程度地显现负铈异常,花岗岩 $\delta(\text{Eu})$ (铈异常的程度)为 0.17~0.62,变质流纹岩 $\delta(\text{Eu})$ 为 0.34~0.92. 本文将连云港花岗岩与苏鲁造山带内同期花岗岩(816~693) Ma^[12, 26, 29] 一并进行构造环境分析,它们总体上显现伸展环境 A 型花岗岩的特点见图 3. 通过对本文以及苏鲁花岗岩数据^[12, 26, 29] 进行 ORG (大洋中脊花岗岩) 标准化,它们表现出 Rb、Th、Nb 富集、Ta、Ce、Y 亏损,以及 Ba 变化较大等特点见图 4,这种蛛网模式符合 Pearce 等^[30] 提出的碰撞后板内伸展环境下形成的花岗岩. 本文 11 件海州群云台组、张八岭群西冷组变质流纹岩及戚祥等^[21] 的 15 件云台组变质火山岩 814~781 Ma 也形成于与上述花岗岩类似的构造环境.

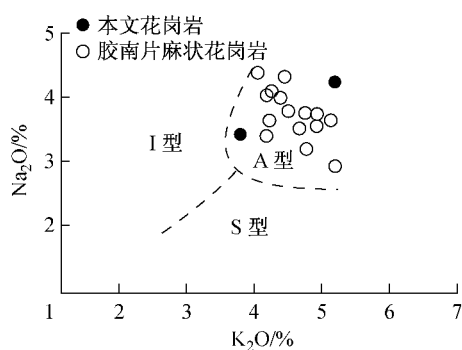
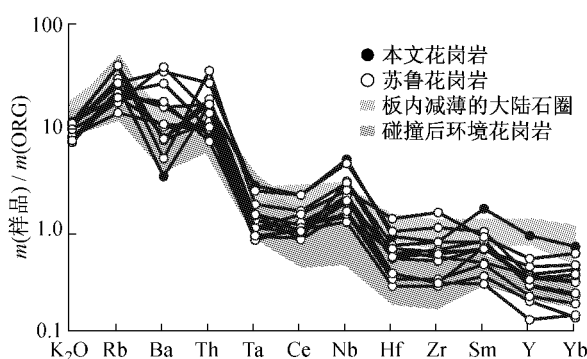
图 3 新元古代花岗岩的 K_2O - Na_2O 图解Fig. 3 The K_2O - Na_2O diagram of Neoproterozoic granites图 4 多元素洋中脊花岗岩标准化蛛网图解^[30]

Fig. 4 Ocean ridge granite (ORG) normalized multielements diagram of Neoproterozoic granites

5 结论

(1) 锆石 U-Pb 定年表明:连云港锦屏山片麻状花岗岩形成于 (806.0 ± 14.0) Ma, 海州群云台组变质火山岩形成于 (800.8 ± 7.8) Ma, 张八岭隆起的张八岭群西冷组形成于 (751.6 ± 7.1) Ma 和 (767.0 ± 15.0) Ma. 新元古代 $(820 \sim 740)$ Ma 是苏鲁造山带南部继晋宁主碰撞造山之后一次重要的构造岩浆活动期。

(2) 这些新元古代岩浆岩, 总体上具有高钾钙碱性系列、右倾型 REE 模式、Nb、Ta、Sr、P 和 Ti 强烈亏损、中等负钕异常、重稀土弱到中等亏损、低 Sr、高 Yb 等特点, 它们属于硅镁质下地壳发生部分熔融的产物, 形成于碰撞后的区域伸展构造环境。

(3) 苏鲁造山带南部新元古代的岩浆活动及其区域伸展环境, 是晋宁期主碰撞造山之后 Rodinia 超大陆进入区域裂解阶段的记录, 这种区域裂解在构造-岩浆活动上表现出间歇性特点。加之扬子板块两侧大量的新元古代花岗岩形成, 表明 Rodinia 超大陆

这种区域性裂解可能是建立在造山根大规模的拆离基础之上而发生和发展的。

参考文献:

- [1] Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, et al. U-Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie orogen [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1998, 161: 215.
- [2] Ratschbacher L, Hacker B R, Webb L E, et al. Exhumation of ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Cretaceous and Cenozoic unroofing and the Tan-Lu fault [J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(B6): 13303.
- [3] 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.
ZHENG Yongfei. A perspective view on ultrahigh-pressure metamorphism and continental collision in the Dabie-Sulu orogenic belt [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(20): 2129.
- [4] 索书田, 钟增球, 游振东. 大别地块超高压变质期后伸展变形及超高压变质岩石折返过程 [J]. 中国科学(D 辑), 2000, 30(1): 9.
SUO Shutian, ZHONG Zengqiu, YOU Zhendong. Extensional deformation of post ultrahigh-pressure metamorphism and exhumation process of ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie massif [J]. Science in China Series D-Earth Sciences, 2000, 2(1): 56.
- [5] 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 [J]. 地学前缘(中国地质大学, 北京), 2004, 11(3): 515.
LU Songnian, LI Huaikun, CHEN Zhihong, et al. Relationship between Neoproterozoic cratons of China and the Rodinia [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(3): 515.
- [6] 郑永飞, 张少兵. 华南前寒武纪大陆地壳的形成和演化 [J]. 科学通报, 2007, 52(1): 1.
ZHENG Yongfei, ZHANG Shaobing. Formation and evolution of Precambrian continental crust in South China [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(1): 1.
- [7] 许志琴, 刘福来, 戚学祥, 等. 南苏鲁超高压变质地体中罗迪尼亚超大陆裂解事件的记录 [J]. 岩石学报, 2006, 22(7): 1745.
XU Zhiqin, LIU Fulai, QI Xuexiang, et al. Record for Rodinia supercontinent breakup event in the south Sulu ultrahigh pressure metamorphic terrane [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(7): 1745.
- [8] Zheng Y F, Wu Y, Gong B, et al. Zircon U-Pb and oxygen isotope evidence for a large-scale ^{18}O depletion event in igneous rocks during the Neoproterozoic [J]. Geochim Cosmochim Acta, 2004, 68: 4145.
- [9] Liu F L, Xu Z Q, Liou J G, et al. SHRIMP U-Pb ages of ultrahigh-pressure and retrograde metamorphism of gneisses, southwestern Sulu terrain, eastern China [J]. Journal of Metamorphic Geology, 2004, 22: 315.
- [10] 薛怀民, 刘福来, 孟繁聪. 苏鲁造山带胶东区段花岗片麻岩类的常量与微量元素地球化学: 扬子克拉通北缘新元古代活

- 动大陆边缘的证据[J]. 岩石学报, 2006, 22(7): 1779.
- XUE Huaimin, LIU Fulai, MENG Fancong. Major and trace element geochemistry of granitic gneisses from Sulu orogen, eastern Shandong Peninsula: evidence for a Neoproterozoic active continental margin in the northern margin of the Yangtze craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(7): 1779.
- [11] 薛怀民, 刘福来, 孟繁聪. 苏鲁造山带胶南区段片麻岩原岩的成因: 地球化学及 Nd 同位素证据[J]. 岩石学报, 2007, 23(12): 3239.
- XUE Huaimin, LIU Fulai, MENG Fancong. Geochemical and Nd isotopic evidence for the genesis of the gneisses from the southern Shandong Peninsula, Sulu orogen [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(12): 3239.
- [12] 宋明春, 韩景敏, 宫述林. 苏鲁造山带大规模岩浆活动的证据: 新元古代多成因花岗质片麻岩[J]. 矿物岩石, 2007, 27(2): 22.
- SONG Mingchun, HAN Jingmin, GONG Shulin. Diversified origin granitic gneiss in the Sulu ultra-high pressure metamorphic belt: evidence for Neoproterozoic large scale magmatism[J]. *Mineral Petrol*, 2007, 27(2): 22.
- [13] 王秀丽, 李向辉, 陈福坤, 等. 苏鲁超高压造山带南部海州群锆石年龄及其地质意义[J]. 高校地质学报, 2006, 12(3): 365.
- WANG Xiuli, LI Xianghui, CHEN Fukun. Zircon ages of the Haizhou Group in the Southern part of the Sulu ultrahigh pressure orogenic belt and geological significances [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2006, 12(3): 365.
- [14] Hacker B, Wallis S R, Ratschbacher L, et al. High-temperature geochronology constraints on the tectonic history and architecture of the ultrahigh-pressure Dabie-Sulu Orogen [J]. *Tectonics*, 2006, 25, TC5006, doi: 10.1029/2005TC001937.
- [15] 许志琴, 张泽明, 刘福来, 等. 苏鲁高压-超高压变质带的折返构造及折返机制[J]. 地质学报, 2003, 77(4): 433.
- XU Zhiqin, ZHANG Zeming, LIU Fulai, et al. Exhumation structure and mechanism of the Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt, central China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(4): 433.
- [16] Liou J G, Wang X, Choi S G, et al. Alkaline amphiboles from late Archean gneiss of Wuhe Group, Anhui, central China: not an indication of high P/T metamorphism [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1992, 11: 205.
- [17] 吴跃东, 侯明金, 汤加富. 皖中张八岭地区构造地层序列的建立与主要特征[J]. 地层学杂志, 2004, 28(2): 152.
- WU Yuedong, HOU Mingjin, TANG Jiafu. The establishment of tectonic stratigraphic sequence in the Zhangbaling area, central Anhui and its main characteristics [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2004, 28(2): 152.
- [18] 桑宝梁, 陈跃志, 邵桂清. 安徽西南部宿松河塌浅变质石英角闪岩系的特征及铷钐年龄[J]. 岩石学报, 1987, 2(1): 56.
- SANG Baoliang, CHEN Yuezhi, SHAO Guqing. Characters of quartz-keratophyres formation and their Rb-Sr isotopic ages in south-western part of Anhui Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1987, 2(1): 56.
- [19] 汪迎平, 阎永奎. 皖东张八岭, 珠龙地区西冷岩组微古植物群初步研究[J]. 火山地质与矿产, 1995, 16(4): 75.
- WANG Yingping, YAN Yongkui. Preliminary research on microflora from Xileng Formation in the Zhangbaling and Zhulong regions of eastern Anhui[J]. *Volcanology & Mineral Resources*, 1995, 16(4): 75.
- [20] 汤加富, 侯明金, 高天山, 等. 宿松群, 红安群, 海州群的时代归属与讨论[J]. 地质通报, 2002, 21: 166.
- TANG Jiafu, HOU Mingjin, GAO Tianshan, et al. Age assignment of the Susong Group, Hong'an Group and Haizhou Group: a discussion [J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21: 166.
- [21] 戚学祥, 许志琴, 齐金忠, 等. 苏鲁高压-超高压变质地体南缘高压与超高压变质带原岩的接触关系及其地质意义[J]. 中国地质, 2005, 32(2): 276.
- QI Xuexiang, XU Zhiqin, QI Jinzhong, et al. Contact relationship between the high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic belts in the southern Sulu high-pressure-ultrahigh-pressure metamorphic terrane and its geological significance[J]. *Geology in China*, 2005, 32(2): 276.
- [22] Wiedenbeck M, Allé P, Corfu F, et al. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses[J]. *Geostandard Newslett*, 1995, 19: 1.
- [23] Ludwig K R. Isoplot/Ex Version 3. 00: a geochronological toolkit for microsoft excel [M]. Berkeley: Geochronology Center, 2003.
- [24] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1589.
- WU Yuanbao, ZHENG Yongfei. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age[J]. *Chinese Sciences Bulletin*, 2004, 49(16): 1589.
- [25] 童劲松, 储东如, 吴维平. 1:25 万区域地质调查报告(合肥幅)[R]. 合肥: 安徽地质调查院, 2007.
- TONG Jinsong, CHU Dongru, WU Weiping. Reports on 1: 250000 regional geological surveys (Heifei) [R]. Hefei: Geological Survey of Anhui Province, 2007.
- [26] Zhou J B, Zheng Y F, Wu Y B. Zircon U-Pb ages for Wulian granites in northwest Sulu and their tectonic implications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(4): 379.
- [27] Wu Y B, Zheng Y F, Zhou J B. Neoproterozoic granitoid in northwest Sulu and its bearing on the North China-South China Blocks boundary in east China [M]. *Geophysics Research Letter*, 2004.
- [28] 宋明春, 宫述林, 陈延贵. 苏鲁超高压变质带南部浅变质朋河石岩组地质特征及研究意义[J]. 地层学杂志, 2003, 27(3): 205.
- SONG Mingchun, GONG Shulin, CHEN Yangui. The epimetamorphic Pengheshi formation complex in the south of the Jiangsu-Shandong UHPM belt and its geological significance[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2003, 27(3): 205.
- [29] 黄洁, 郑永飞, 吴元保, 等. 苏鲁造山带五莲地区岩浆岩元素和同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 545.
- HUANG Jie, ZHENG Yongfei, WU Yuanbao, et al. Geochemistry of elements and isotopes in igneous rocks from the Wulian region in the Sulu orogen [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(3): 545.
- [30] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace elements discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25: 956.