

渤海海域蓬莱 9-1 构造潜山中生代花岗岩元素地球化学特征及其地质意义

冯冲,王清斌,杨波,赵国祥,刘晓健

中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津,300452

内容提要:渤海海域蓬莱 9-1 大型油田是国内首次发现的中生代花岗岩潜山油藏,该岩体的地球化学特征和成因研究为渤海湾盆地中生界构造环境和陆壳生长机制提供了重要的线索。应用 LA-ICP-MS 获得蓬莱 9-1 潜山花岗岩体锆石 U-Pb 年龄为 164 ± 2 Ma,代表岩体的形成时代。 $\omega(\text{SiO}_2)$ 范围 62.22%~70.86%, $\omega(\text{K}_2\text{O})$ 范围 3.29%~4.36%, $\omega(\text{CaO})$ 范围 1.71%~4.10%,碱度率 AR 为 2.13~3.06,含铝指数 A/CNK 介于 0.89~1.07 之间,表明该岩体为准铝-弱过铝范围的高钾钙碱性 I 型花岗岩;REE 配分模式程较陡的右倾模式,富集轻稀土元素(LREE)、强烈亏损重稀土元素(HREE),大离子亲石元素(LILE)富集、高场强元素 HFSE 贫化,总体具有消减带地球化学特征,表明岩浆源区与消减带组分存在密切相关; δEu 略微正异常,高 Sr、Sr/Y、La/Yb 和低 Y、Yb、Mg[#] 特征具有增厚基性下地壳部分熔融形成埃达克岩的特征; R_1 - R_2 判别图解和(Y+Nb)-Rb 构造图解指示其形成于碰撞后的拉张阶段。综合分析,蓬莱 9-1 潜山花岗岩体为碰撞造山过程地壳增厚背景下,后碰撞阶段由于地幔上隆致使具消减带组分的下地壳物质发生部分熔融所致。其形成标志着渤海湾盆地中生代陆块汇聚碰撞的强烈主碰撞阶段已经结束,并在 164Ma 期间进入到由主碰撞挤压转向后碰撞伸展演化阶段,为进一步精细确定渤海湾盆地中生代陆块汇聚碰撞造山过程提供了新的依据。

关键词:后碰撞花岗岩;LA-ICP-MS;锆石 U-Pb 定年;地球化学;蓬莱 9-1 潜山

渤海湾盆地是中国东部岩石圈最薄的地区,在中国东部大地构造研究中具有重要的理论意义(Hou Guiting et al., 2001)。渤海湾盆地的构造演化及成因机制研究一直是中国东部大地构造研究的热点(Li Hongge et al., 1999)。中国东部燕山期岩浆活动异常发育,岩浆的系列、演化、成因以及岩浆活动与太平洋板块相互关系等方面已经做过广泛的讨论(Isozaki, 1997; Yin Changjian et al., 2000; Chen Debing et al., 2001; Zhang Qi et al., 2002; Zhang Qi et al., 2013; Li Wuping et al., 2001; Chen Peirong et al., 2004; Cai Jianhui et al., 2005; Wu Guang et al., 2008; Wu et al., 2003; Gong Jian, 2010; Yu Xuefeng et al., 2012; Lin Bolei et al., 2013; Luo Xiandong et al., 2014; Lan Chaoli et al., 2014)。但是有关中国东部燕山期花岗岩的成因仍存在较大争议,主要存在 4 种观点:①与太平洋板块向西俯冲有关,包括俯冲消减诱发的玄武岩底侵和洋壳熔融等(Isozaki, 1997; Wu Fuyuan et al.,

2003; Wu F Y et al., 2007; Yu Xuefeng et al., 2012; Lin Bolei et al., 2013; Luo Xiandong et al., 2014; ②陆-陆碰撞或碰撞造山造成地壳增厚下地壳部分熔融或拆陈有关(Zhang Qi et al., 2001a; Li Wuping et al., 2001; Gong Jian, 2010; Wu Guang et al., 2008); ③与板内拉张作用有关(Chen Peirong et al., 2004; Li Xiaoyong et al., 2004); ④地幔柱或地幔上涌有关(Chen Debing et al., 2001; Cai Jianhui et al., 2005)。不同的观点关系到燕山期中中国东部构造体制和时限问题的认识。但以上讨论仅限于渤海湾盆地周缘的陆上部分的研究,渤海海域中生代潜山花岗岩元素地球化学特征和侵入时代未见相关报道。渤海湾盆地蓬莱 9-1 油田是国内首次发现的大型中生界花岗岩油藏,潜山油层厚度大、含油面积大,其潜山储量超亿吨,是渤海海域近几年发现的最大油田(Xia Qinglong et al., 2013)。17 口探井的钻探获得了大量宝贵的岩心、岩屑和壁心等实物资料,为研究该盆地演化、岩石圈深部过程和构

注:本文为“十二五”国家油气重大专项(2011ZX05023)资助。

收稿日期:2014-08-14;改回日期:2014-11-03;责任编辑:黄敏。

作者简介:冯冲,男,1985 年生,工程师,主要从事石油地质与元素地球化学相关研究。Email: fengchong@cnooc.com.cn。

造环境提供了难得的岩石学材料。本文在详细描述蓬莱 9-1 构造的地质和岩相学特征的基础上,结合锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学,探讨其成因和构造背景,揭示该岩体与中国东部 C 型埃达克岩 (Zhang Qi et al., 2001b) 或中国东部燕山期高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩 (Li Wuping et al., 2001) 相似的地球化学特征,其成因可能是燕山期中侏罗世华南与华北克拉通碰撞造山后期地壳增厚背景下的松弛阶段,由于地幔上隆致使具消减带组分的下地壳物质发生部分熔融所致,侵位时代与胶东玲珑花岗岩体、辽西海棠山花岗岩体以及苏北的荆山花岗岩体时代相近 (Li Junjian et al., 2005; Xu Wenliang et al., 2004; Wu Fuyuan et al., 2006), 对应燕山期中国东部岩石圈减薄的开始 (Wu Fuyuan et al., 2003; Zhao Yue et al., 2004)。这一研究对深入认识渤海湾盆地中生代构造演化和壳幔相互作用过程具有重要意义,并且对确定花岗岩侵入模式、储层预测和井位部署也具有一定的指导意义。

1 岩体地质与岩相学特征

蓬莱 9-1 构造位于渤海东部海域庙西北凸起上

(图 1), 主体整体埋深较浅, 构造区内次生断层发育, 且紧邻渤东凹陷与庙西北凹陷, 潜山长期遭受风化剥蚀, 其中鞍部岩性为中生界花岗岩岩体, 南高点和北高点为中上元古界中-轻变质片岩、石英岩; 新近系明化镇、馆陶组地层为披覆于潜山之上的大型半背斜。

根据岩相观察、岩石薄片鉴定以及地震反射特征, 该区侵入岩体为大规模侵入形式的花岗岩, 未显示任何定向性, 未发生变质。以花岗闪长岩为主, 局部分布二长花岗岩和石英二长闪长岩。花岗闪长岩由石英、碱性长石、斜长石、黑云母、角闪石等矿物组成, 斜长石约占 45%~60%, 暗色矿物约 8%~10%, 具花岗结构, 块状构造 (图 2a、图 2b)。二长花岗岩中斜长石约 35%~45%, 暗色矿物占 5%~10%, 具二长结构 (图 2c)。石英二长闪长岩中斜长石含量约占 50%~65%, 暗色矿物约占 10%~15%, 粒状结构 (图 2d)。

2 样品与测试方法

2.1 样品采集

蓬莱 9-1 构造潜山花岗岩体的岩石化学及锆

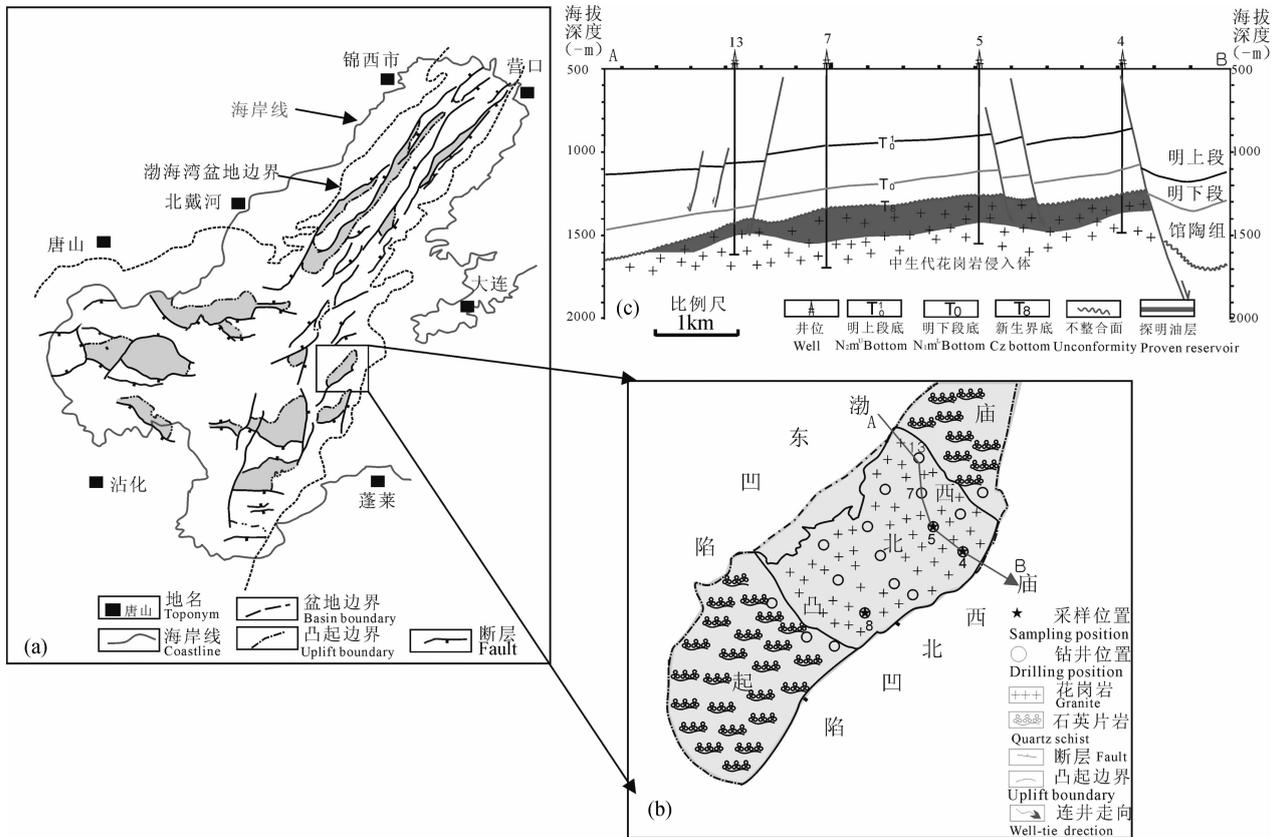


图 1 渤海海域蓬莱 9-1 构造位置以及潜山顶部和剖面地质简图

Fig. 1 The planimetric and section geological map of Penglai 9-1 Buried Hill in Bohai Bay

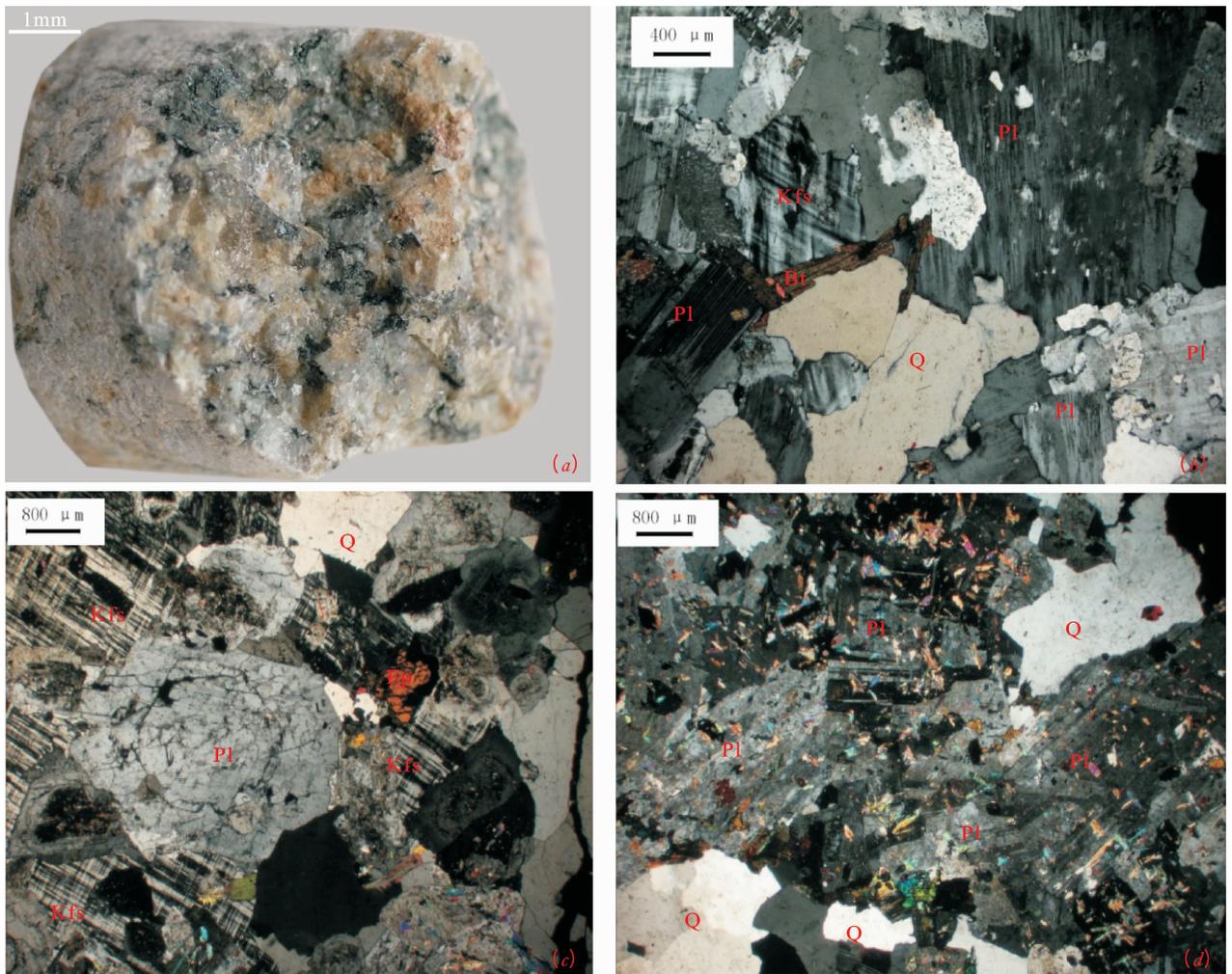


图2 渤海海域蓬莱9-1构造花岗岩的岩石标本及显微特征

Fig. 2 Rock sample and microscopic feature of Penglai 9-1 granite in Bohai Bay

(a)—PL16 1650m 花岗闪长岩,粒状结构,块状构造;(b)—PL15 井 1410m 花岗闪长岩,半自形—他形粒状结构,25(+);(c)—PL2 井, 1437.85m 细粒黑云二长花岗岩,二长结构,见斜长石环带结构 12.5(+);(d)—PL5 井 1550m,石英二长闪长岩,斜长石表面黝帘石化 12.5(+);Q—石英;Kfs—钾长石;PI—斜长石;Bt—黑云母;Ep—绿帘石

(a)—Well PL16, 1650m, granodiorite, granular texture, block structure; (b)—well PL15, 1410m, granodiorite, hypidiomorphic-anhedral texture, granular structure 25(+); (c)—well PL2, 1437.85m, fine-grained biotite monzonitic granite, monzonitic texture, plagioclase band structure 12.5(+); (d)—well PL5, 1550m, quartz monzodiorite, saussurite on the surface of plagioclase, 12.5(+); Q—quartz; Kfs—potassium feldspar; PI—plagioclase; Bt—biotite; Ep—epidote

石测年样品均来自于蓬莱9-1构造钻井获得的新鲜岩屑资料(图1)。综合考虑潜山顶面风化淋滤对岩体化学成分影响,基于岩心、岩屑、壁心、薄片等岩石学分析并结合测井响应特征,选取10件潜山基岩带样品,其中编号PL4/1345/1350/1355样品为PL4井不同深度的三件二长花岗岩样品;编号PL8/1385/1405/1425/1445样品为PL8井不同深度的四件花岗闪长岩样品;编号PL5/1560/1565/1570为5井不同深度的三件石英二长闪长岩样品。另选取PL8井1件(样品编号为PL8/1585)锆石U-Pb定年样品。

2.2 锆石U-Pb测年

锆石分选工作由河北廊坊区域地质调查所实验室完成,样品破碎至80~120目,经淘洗粉尘、去除磁性矿物、重液分选等程序,在双目镜下人工挑出锆石;由北京锆年领航科技有限公司完成锆石与标样环氧树脂浇铸,制成薄片、抛光,拍透反射照片及阴极发光照片等程序;由渤海石油研究院储层地化室分析对锆石CL图像进一步精选出作U-Pb同位素定年的锆石。最终,在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室采用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪对圈定锆石微区进行了U、Th、Pb同

位素含量测试。测试仪器为 Agilent 7500a 型,激光剥蚀系统为 New Wave 公司生产的 UP213 固体激光剥蚀系统。实验中采用剥蚀直径为 $25\mu\text{m}$ 的激光束斑。样品的同位素比值处理采用 GLITTER (VER4.4.1, Macquarie university) 程序,并采用 LAM-ICP-MS Common Lead Correction (Ver3.15) 程序对数据进行普通铅校正,年龄计算及谐和图采用 ISOPLOT (Ver3.25) 完成,所有数据点年龄值的误差均为 1σ ,采用 ^{206}Pb 和 ^{238}U 的年龄,其加权平均值具有 95% 置信度 (Anderson, 2002)。

2.3 岩石化学分析

全岩主量元素和微量元素分析测试在北京核工业地质研究院实验室完成,主量元素分析采用 X 射线荧光光谱仪 (PW2404X),测试依据参照 GB/T14506.28-2010 硅酸盐岩石化学分析方法(第 28 部分:16 个主次成分测定)和 GB/T14506.14-2010 硅酸盐岩石化学分析方法(第 14 部分:氧化亚铁量测定),分析误差优于 2%~5%;微量元素及稀土元素采用酸溶法制备样品,在 Finnigan MAT 制造的 HR-ICP-MS (Element I) 进行 44 个微量元素的测试,测试方法和依据参照 GB/14506.30-2010

硅酸盐岩石化学分析方法(第 30 部分:44 个元素测定),分析精度参照 GSR-1 和 GSR-2 国家标准,当元素含量大于 10×10^{-6} 时,其精度优于 5%,当含量小于 10×10^{-6} 时,其精度优于 10%。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学结果

蓬莱 9-1 潜山中生界花岗闪长岩的锆石阴极发光 CL 图像(图 3)中,大部分均为长柱状、无色透明自形晶,显示岩浆结晶岩浆振荡环带 (Wu Yuanbao et al., 2004),粒度多为 $80\sim 150\mu\text{m}$,个别锆石内有不规则状残留锆石并具有变质结晶特征 (Hoskin et al., 2003; Pidgeon, 1992)。实验采用 $25\mu\text{m}$ 的激光束斑对 32 颗锆石进行 LA-ICP-MS 定年分析,共测试 34 个点位(图 3),测试数据见表 1。在锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图解上,不一致曲线的上交点,年龄代表了锆石的结晶年龄。锆石年龄明显可以分为两组:第一组年龄 28 个测点锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄较为一致(图 4),测点的年龄相对集中于 $159\sim 175\text{Ma}$ 间,获得的平均加权年龄为 $164\pm 2\text{Ma}$,由此给出的结晶年龄为 164Ma ,代表了

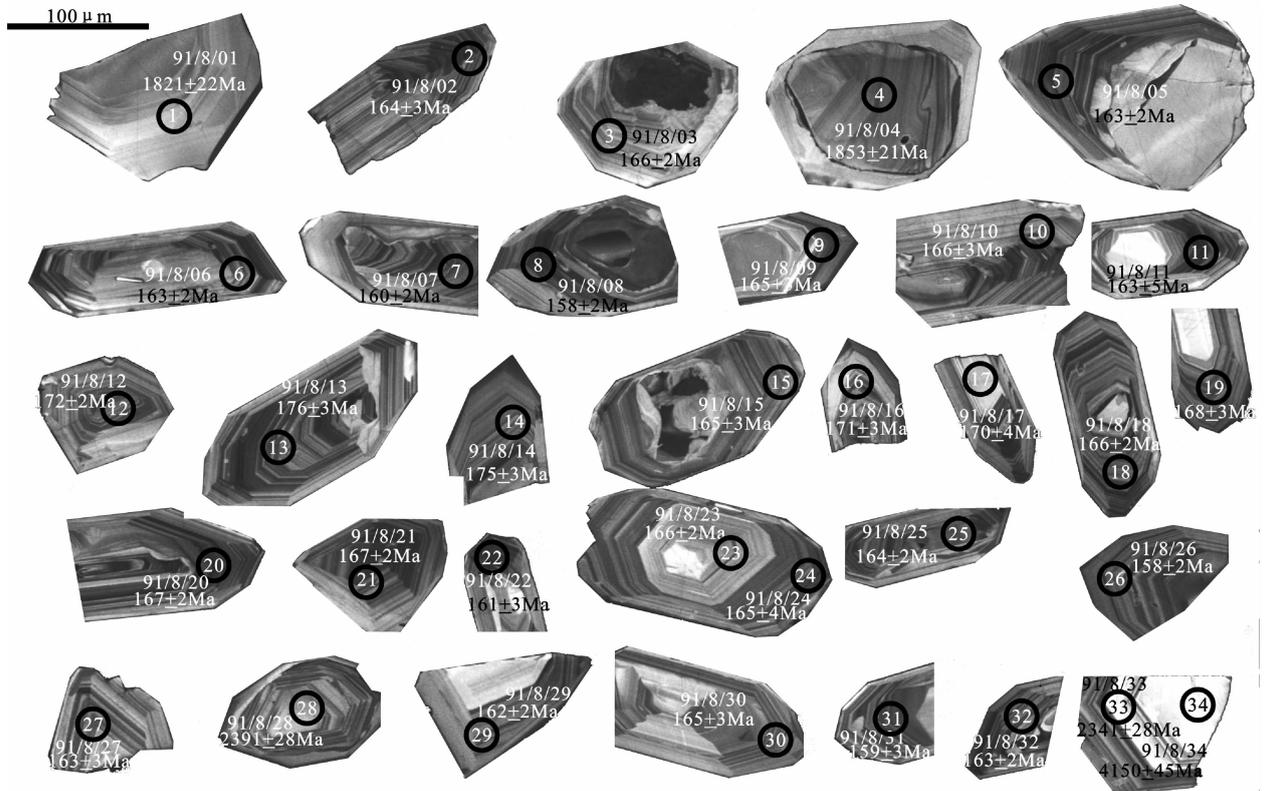


图 3 渤海海域蓬莱 9-1 构造花岗闪长岩代表性单颗粒锆石的阴极发光 (CL) 图像及其表面年龄 (Ma)

Fig 3 CL images and apparent ages (Ma) of single-grain zircon in Penglai 9-1 granodiorite in Bohai Bay

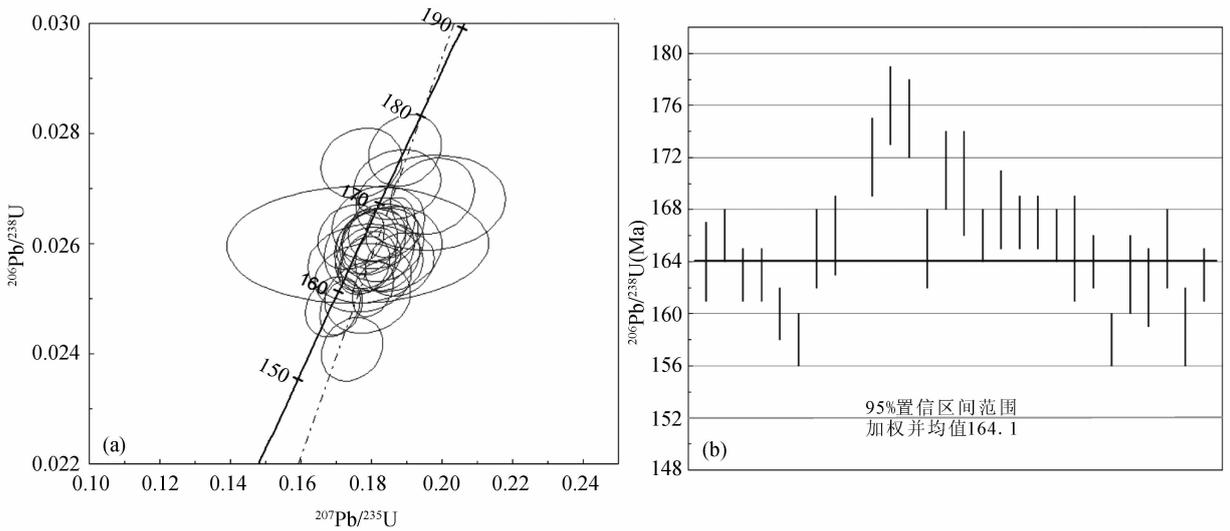


图 4 渤海海域蓬莱 9-1 构造花岗岩闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄(a)谐和图和(b)加权平均值图

Fig. 4 LA-ICP-MS zircon U-Pb age concordant image(a)and weighted mean age(b)of Penglai 9-1 granodiorite in Bohai Bay

该岩体的形成年龄;第二组年龄共有 4 个测点,获得锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 1821Ma、1853Ma、2341Ma 和 2391Ma,代表的是继承性锆石年龄,可能反映了围岩年龄或热变质事件发生时间(Wu Yuanbao et al., 2002)。

3.2 花岗岩地球化学特征

3.2.1 主量元素

在岩浆岩 Q-A-P 分类图(图 5a)中,根据 Streckeisen(1976)的分类标准,样品集中分布在石英二长闪长岩、花岗闪长岩到二长花岗岩三个区域。 $\omega(\text{SiO}_2)$ 范围 62.22%~70.86%,平均 67.42%; ω

(Na_2O) 范围 3.60%~4.79%,平均 4.31%, ω (K_2O) 范围 3.29%~4.36%,平均 3.69%; Na_2O (平均 4.31%)的含量大于 K_2O (3.69%)的含量, ω ($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)范围 7.72%~8.38%,平均 7.72%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}=0.84\sim 1.46$,平均 1.19;岩石的 ω (CaO)范围 1.47%~4.18%,平均 2.65%;里特曼指数 σ 为 2.26~3.31,碱度率 AR 范围 2.13~3.06;总铁含量 $\text{FeO}^T=3.35\%\sim 5.52\%$,平均 4.00, Fe_2O_3 (平均 2.59%)大于 FeO (平均 1.66%),显示岩浆结晶时氧逸度较高; MgO 含量介于 0.50%~0.79%之间,平均 0.63%,镁数 $\text{Mg}^\# =$

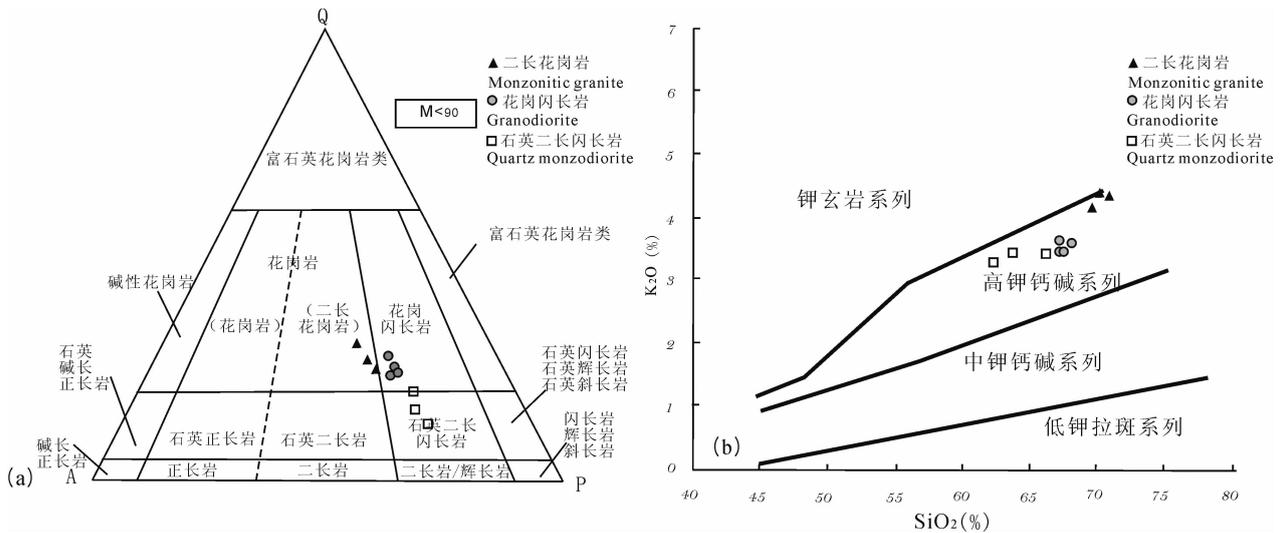


图 5 渤海海域蓬莱 9-1 构造潜山花岗岩岩体的(a)Q-A-P 图解(据 Streckeisen, 1976)和(b)SiO₂-K₂O 图解(据 Le Maitre et al., 1989)

Fig. 5 (a)Q-A-P diagram(after Streckeisen, 1976)和(b)SiO₂-K₂O diagram (after Le maitre et al., 1989)of Penglai 9-1 granodiorite in Bohai Bay

14.84~28.55, 平均 22.32(玄武质地壳部分熔融作用产生的熔体 $Mg^{\#} < 45$, Rapp et al., 1995); 低 Ti, TiO_2 含量为 0.11%~0.22%, 平均 0.18%。在 SiO_2 - K_2O 岩石分类图中大部分落入高钾钙碱性系列范围(图 5b), 含铝指数 A/CNK 介于 0.89~1.07 之间, 为准铝-弱过铝范围(图 6a), 在 Na_2O - K_2O 岩石分类图大部分落入 I 型花岗岩范围, 二长花岗岩部分落入 A 型花岗岩范围(图 6b), 反映源区以火成岩为主。主量元素分析表明蓬莱 9-1 构造花岗岩侵入体应属于高钾钙碱性、弱过铝质 I 型花岗岩, 从石英二长闪长岩-花岗闪长岩-二长花岗岩, 随着 SiO_2 含量增加, 碱度率 AR 和 K_2O 同步升高(表 2 和图 5b), 显示了钙碱性岩浆的演化趋势。

3.2.2 稀土元素

蓬莱 9-1 花岗岩侵入体 REE 总量为 $73.20 \times 10^{-6} \sim 163.38 \times 10^{-6}$, 平均 113.25×10^{-6} , 其中轻稀土元素(LREE)含量 $68.79 \times 10^{-6} \sim 154.46 \times 10^{-6}$, 重稀土元素(HREE)含量 $4.02 \times 10^{-6} \sim 8.92 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 稀土元素之比为 16.30~20.72, 在稀土元素球粒陨石标准化配分图解中(图 7a), 所有三种岩性样品具有一致的稀土配分曲线, 表现出富集 LREE, 强烈亏损 HREE 的配分模式。(La/Yb)_N 比值为 18.01~27.16, 指示轻重稀土元素分馏较强, (La/Sm)_N 比值在 5.14~6.19, 指示 LREE 富集, (Gd/Yb)_N 比值在 1.57~2.19, 指示 HREE 弱分馏。Y = $5.98 \times 10^{-6} \sim 11.80 \times 10^{-6}$ (<

18×10^{-6}), δEu 略微正异常, 介于 1.12~1.59 之间, 平均 1.30, 表现出和典型埃达克岩相似的稀土配分特征(Defant et al., 1990; Dong Shenbao et al., 2004)。

3.2.3 微量元素

在原始地幔标准化微量元素配分图(图 7b)上, 岩石富集 Rb、K、Sr、Ba 等大离子亲石元素(LILE)和 Ce 等 LREE, 亏损 Nb、Ta、Zr、P、Ti 等高场强元素(HFSE), 显示具有俯冲带消减带地球化学特征(Zhang Chengli et al., 2004), Th-U 槽的出现表明源岩侵位过程受古老下地壳熔融或混染, 同时, 所有样品强烈富集 Sr ($615 \times 10^{-6} \sim 1319 \times 10^{-6}$, 平均 942.6×10^{-6}), 高 Sr/Y 比值(99.65~150.74, 平均 114.41), 落入埃达克岩特征范围(图 8a、8b)。与正常岛弧钙碱性火山岩相比, 虽然两者都亏损高场强元素(HFSE), 但也有明显不同, 因为岛弧火山岩一般具有 Rb 正异常和明显的 Sr 负异常, Sr/Y 比值低(Wu Guang et al., 2003)。

综合上述蓬莱 9-1 构造潜山中生代花岗岩体的主量、稀土和微量元素分析数据, 并结合下节将表述的岩石成因分析, 与 Defant 等(1990)定义的典型埃达克岩(O 型埃达克岩)和张旗等(2001b)定义的 C 型埃达克岩或中国东部燕山期高 Sr 低 Y 型中酸性岩(Li Wuping et al., 2001)加以比较(表 3), 可以看出在 SiO_2 、 Al_2O_3 、Sr、Y 和 Yb 含量、LREE 特征及 La/Yb 等方面等方面, 蓬莱 9-1 花岗岩体与 O 型和

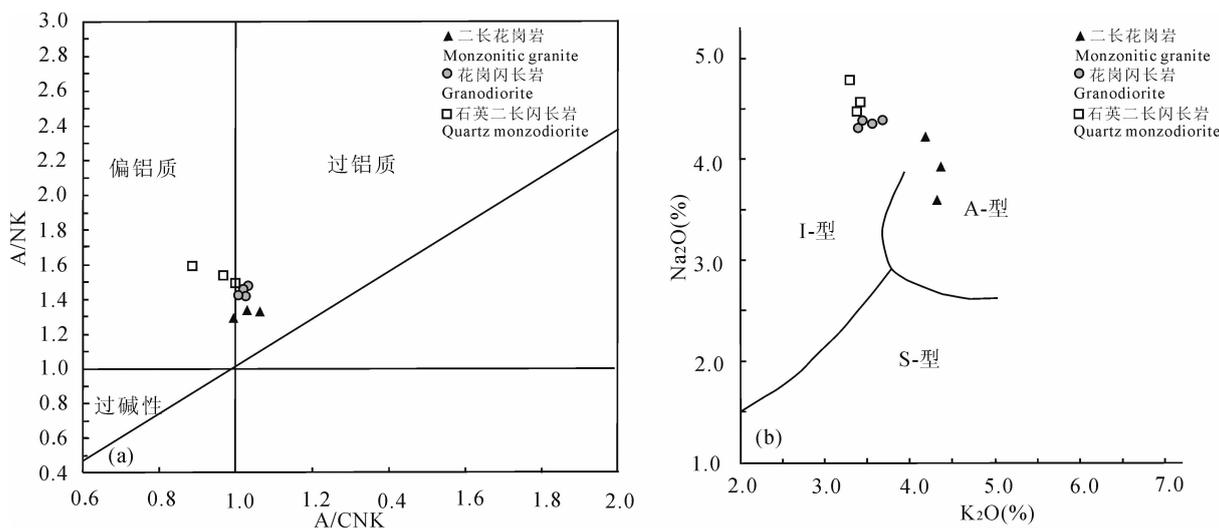


图 6 渤海海域蓬莱 9-1 构造潜山花岗岩岩体的(a)A/CNK-A/NK 图解(据 Maniar et al., 1989)和 (b) Na_2O - K_2O 图解(据 Collins et al. 1982)

Fig. 6 (a)A/CNK-A/NK diagram(after Maniar et al., 1989)和(b) Na_2O - K_2O diagram (after Collins et al. 1982) of Penglai 9-1 granite in Bohai Bay

表2 渤海海域蓬莱9-1构造花岗岩主量元素(%)和微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果Table 2 Major(%) and trace element($\times 10^{-6}$) analysis results for the PL9-1 granite in Bohai Bay

| 样品编号 | 二长花岗岩 | | | 花岗闪长岩 | | | | 石英二长闪长岩 | | |
|----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | PL4/1345 | PL4/1350 | PL4/1355 | PL8/1385 | PL8/1405 | PL8/1425 | PL8/1445 | PL5/1560 | PL5/1565 | PL5/1570 |
| SiO ₂ | 69.81 | 70.86 | 70.37 | 67.91 | 68.12 | 67.38 | 67.35 | 62.22 | 66.30 | 63.86 |
| TiO ₂ | 0.14 | 0.11 | 0.12 | 0.19 | 0.19 | 0.20 | 0.22 | 0.19 | 0.19 | 0.19 |
| Al ₂ O ₃ | 14.83 | 14.13 | 14.92 | 15.67 | 15.71 | 15.96 | 16.02 | 18.28 | 16.85 | 16.61 |
| Fe ₂ O ₃ | 2.43 | 3.35 | 2.46 | 2.38 | 2.26 | 2.28 | 2.30 | 2.63 | 2.92 | 2.93 |
| FeO | 1.75 | 2.50 | 1.90 | 1.40 | 1.50 | 1.30 | 1.45 | 1.50 | 1.60 | 1.70 |
| MnO | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.05 | 0.05 | 0.07 | 0.07 | 0.09 |
| MgO | 0.52 | 0.54 | 0.50 | 0.69 | 0.79 | 0.72 | 0.77 | 0.59 | 0.60 | 0.61 |
| CaO | 1.93 | 1.47 | 1.71 | 2.50 | 2.52 | 2.40 | 2.53 | 4.10 | 3.23 | 4.15 |
| Na ₂ O | 4.23 | 3.60 | 3.95 | 4.34 | 4.37 | 4.38 | 4.38 | 4.79 | 4.48 | 4.55 |
| K ₂ O | 4.15 | 4.31 | 4.36 | 3.38 | 3.55 | 3.66 | 3.45 | 3.29 | 3.36 | 3.41 |
| P ₂ O ₅ | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.68 | 0.08 | 0.09 | 0.09 | 0.10 | 0.09 | 0.08 |
| LOI | 1.78 | 1.47 | 1.47 | 2.16 | 2.34 | 2.87 | 2.82 | 3.38 | 1.83 | 3.33 |
| 总量 | 101.69 | 102.46 | 101.87 | 101.38 | 101.49 | 101.29 | 101.43 | 101.14 | 101.52 | 101.51 |
| Mg [#] | 18.97 | 14.84 | 17.69 | 25.86 | 28.55 | 27.75 | 28.08 | 21.30 | 20.06 | 20.15 |
| σ | 2.62 | 2.26 | 2.53 | 2.38 | 2.48 | 2.62 | 2.49 | 3.31 | 2.63 | 2.98 |
| AR | 3.00 | 3.06 | 3.00 | 2.48 | 2.54 | 2.56 | 2.46 | 2.13 | 2.28 | 2.24 |
| Rb | 97.10 | 103.00 | 103.00 | 86.40 | 83.80 | 87.50 | 83.40 | 70.50 | 73.60 | 72.30 |
| Sr | 742.00 | 615.00 | 728.00 | 856.00 | 932.00 | 845.00 | 947.00 | 1319.00 | 1132.00 | 1310.00 |
| Ba | 1431.00 | 1424.00 | 1758.00 | 1459.00 | 1746.00 | 1713.00 | 1918.00 | 1978.00 | 2116.00 | 2025.00 |
| Th | 2.28 | 2.55 | 2.69 | 4.40 | 3.63 | 4.37 | 6.31 | 3.88 | 5.52 | 3.27 |
| U | 0.86 | 0.74 | 0.68 | 2.88 | 2.85 | 1.58 | 4.13 | 0.98 | 1.40 | 0.65 |
| Nb | 5.14 | 5.66 | 5.51 | 6.35 | 6.86 | 6.48 | 5.98 | 6.88 | 5.99 | 5.80 |
| Ta | 0.39 | 0.53 | 0.39 | 0.48 | 0.49 | 0.52 | 0.41 | 0.53 | 0.47 | 0.48 |
| Zr | 33.30 | 33.60 | 26.70 | 50.20 | 40.20 | 44.20 | 47.70 | 27.40 | 22.80 | 21.00 |
| Hf | 1.67 | 1.53 | 1.25 | 2.40 | 1.77 | 1.69 | 1.82 | 1.12 | 1.11 | 1.04 |
| Co | 3.42 | 9.46 | 3.01 | 4.12 | 3.85 | 3.89 | 4.79 | 2.64 | 3.75 | 3.56 |
| Ni | 3.81 | 8.84 | 3.47 | 5.86 | 4.80 | 4.54 | 4.73 | 5.87 | 4.18 | 4.35 |
| Cr | 8.16 | 10.00 | 10.70 | 8.21 | 5.85 | 7.79 | 6.94 | 5.87 | 4.67 | 5.09 |
| V | 23.40 | 23.30 | 26.10 | 22.50 | 23.10 | 23.20 | 27.40 | 25.70 | 23.30 | 23.40 |
| Sc | 2.13 | 2.20 | 2.31 | 3.03 | 3.00 | 3.10 | 3.81 | 3.08 | 3.10 | 2.77 |
| Li | 19.80 | 19.90 | 21.10 | 12.60 | 15.50 | 14.00 | 16.30 | 18.40 | 20.90 | 19.40 |
| Cs | 1.03 | 1.15 | 1.11 | 1.08 | 1.06 | 1.17 | 1.31 | 1.13 | 1.09 | 1.19 |
| Ga | 17.70 | 16.80 | 18.40 | 19.50 | 20.00 | 19.80 | 20.80 | 20.40 | 21.10 | 20.40 |
| In | 0.03 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| Cu | 6.80 | 7.85 | 7.02 | 7.51 | 6.21 | 6.71 | 9.40 | 6.01 | 7.02 | 6.83 |
| Pb | 23.00 | 22.10 | 23.80 | 21.80 | 23.50 | 21.80 | 24.60 | 21.00 | 18.00 | 16.00 |
| Zn | 45.50 | 40.30 | 44.90 | 43.30 | 45.50 | 52.40 | 57.60 | 47.30 | 58.30 | 57.40 |
| La | 17.40 | 17.50 | 21.40 | 30.20 | 25.40 | 30.60 | 33.90 | 38.10 | 30.00 | 28.80 |
| Ce | 32.30 | 32.60 | 38.40 | 54.70 | 45.50 | 54.90 | 61.30 | 71.50 | 56.50 | 54.70 |
| Pr | 3.55 | 3.71 | 4.33 | 6.10 | 5.19 | 6.23 | 6.92 | 8.15 | 6.53 | 6.32 |
| Nd | 12.80 | 12.80 | 15.90 | 22.20 | 19.00 | 22.90 | 24.90 | 30.40 | 24.40 | 22.80 |
| Sm | 2.06 | 2.05 | 2.27 | 3.22 | 2.74 | 3.33 | 3.53 | 4.78 | 3.68 | 3.24 |
| Eu | 0.86 | 0.84 | 1.03 | 1.00 | 0.93 | 1.05 | 1.10 | 1.53 | 1.43 | 1.33 |
| Gd | 1.32 | 1.33 | 1.53 | 2.00 | 1.77 | 2.13 | 2.21 | 3.10 | 2.41 | 2.44 |
| Tb | 0.17 | 0.20 | 0.23 | 0.28 | 0.26 | 0.30 | 0.31 | 0.49 | 0.37 | 0.37 |
| Dy | 1.03 | 0.95 | 1.14 | 1.54 | 1.38 | 1.61 | 1.68 | 2.14 | 1.65 | 1.78 |
| Ho | 0.20 | 0.19 | 0.18 | 0.27 | 0.25 | 0.28 | 0.29 | 0.38 | 0.33 | 0.32 |
| Er | 0.64 | 0.46 | 0.53 | 0.78 | 0.73 | 0.80 | 0.86 | 1.23 | 0.94 | 1.00 |
| Tm | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.12 | 0.11 | 0.12 | 0.13 | 0.18 | 0.13 | 0.14 |
| Yb | 0.69 | 0.69 | 0.62 | 0.86 | 0.79 | 0.84 | 0.88 | 1.23 | 1.05 | 0.92 |
| Lu | 0.09 | 0.12 | 0.12 | 0.13 | 0.12 | 0.12 | 0.13 | 0.17 | 0.15 | 0.16 |
| Y | 6.29 | 5.95 | 6.54 | 8.18 | 7.66 | 8.48 | 8.99 | 11.80 | 9.62 | 8.69 |
| La _N /Yb _N | 18.01 | 18.09 | 24.80 | 25.28 | 23.18 | 26.29 | 27.66 | 22.22 | 20.49 | 22.38 |

续表 2

| 样品编号 | 二长花岗岩 | | | 花岗闪长岩 | | | | 石英二长闪长岩 | | |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | PL4/1345 | PL4/1350 | PL4/1355 | PL8/1385 | PL8/1405 | PL8/1425 | PL8/1445 | PL5/1560 | PL5/1565 | PL5/1570 |
| δEu | 1.49 | 1.46 | 1.59 | 1.12 | 1.21 | 1.13 | 1.12 | 1.14 | 1.38 | 1.39 |
| Y/Yb | 9.08 | 8.57 | 10.57 | 9.54 | 9.75 | 10.16 | 10.23 | 9.59 | 9.16 | 9.41 |
| Rb/Sr | 0.13 | 0.17 | 0.14 | 0.10 | 0.09 | 0.10 | 0.09 | 0.05 | 0.07 | 0.06 |
| Nb/Ta | 13.32 | 10.68 | 14.24 | 13.20 | 14.09 | 12.46 | 14.59 | 12.96 | 12.74 | 11.98 |
| K/Rb | 354.80 | 347.37 | 351.41 | 324.76 | 351.67 | 347.23 | 343.41 | 387.40 | 378.98 | 391.54 |
| Nb/U | 5.97 | 7.62 | 8.07 | 2.20 | 2.41 | 4.10 | 1.45 | 6.99 | 4.28 | 8.90 |
| Ce/Pb | 1.40 | 1.48 | 1.61 | 2.51 | 1.94 | 2.52 | 2.49 | 3.40 | 3.14 | 3.42 |
| Ba/Sr | 1.93 | 2.32 | 2.41 | 1.70 | 1.87 | 2.03 | 2.03 | 1.50 | 1.87 | 1.55 |
| Zr/Hf | 19.94 | 21.96 | 21.36 | 20.92 | 22.71 | 26.15 | 26.21 | 24.46 | 20.54 | 20.19 |

注： $\delta Eu = Eu_N / (Sm_N \times Gd_N)^{1/2}$, $Mg = 100 \times Mg^{2+} / (Mg^{2+} + Fe^{2+})$ 。

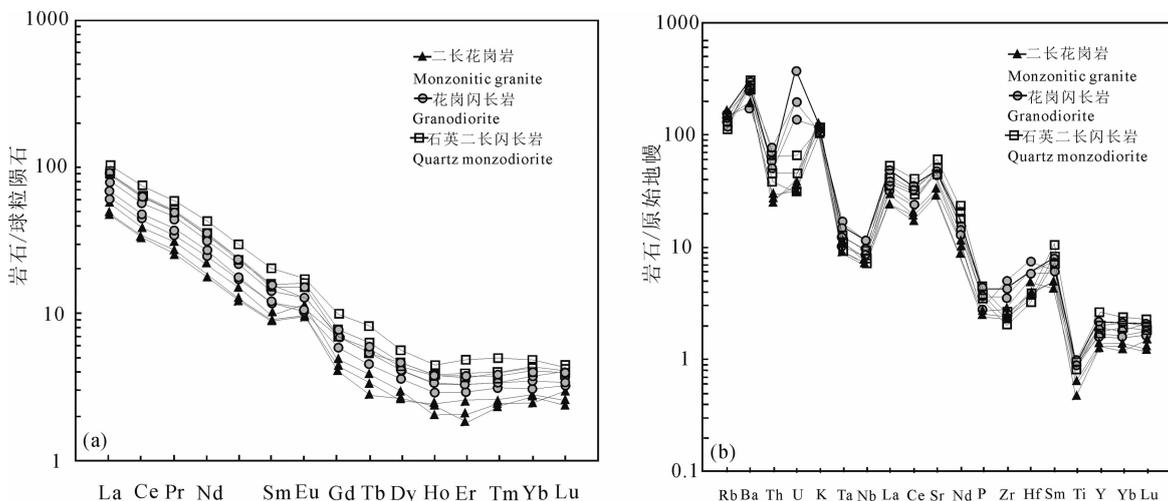


图 7 渤海海域蓬莱 9-1 构造潜山花岗岩体 (a) 球粒陨石标准化稀土元素配分图解 (球粒陨石标准化数据引自 Boynton, 1984) 和 (b) 原始地幔不相容元素蜘蛛网图解 (原始地幔标准化数据引自 Sun et al., 1989)

Fig. 7 (a) REE chondrite-normalized distribution pattern (chondrite-normalized data come from Boynton, 1984) and (b) spidergram of primitive mantle normalized incompatible elements (data from sun et al., 1989) of Penglai 9-1 granite in Bohai Bay

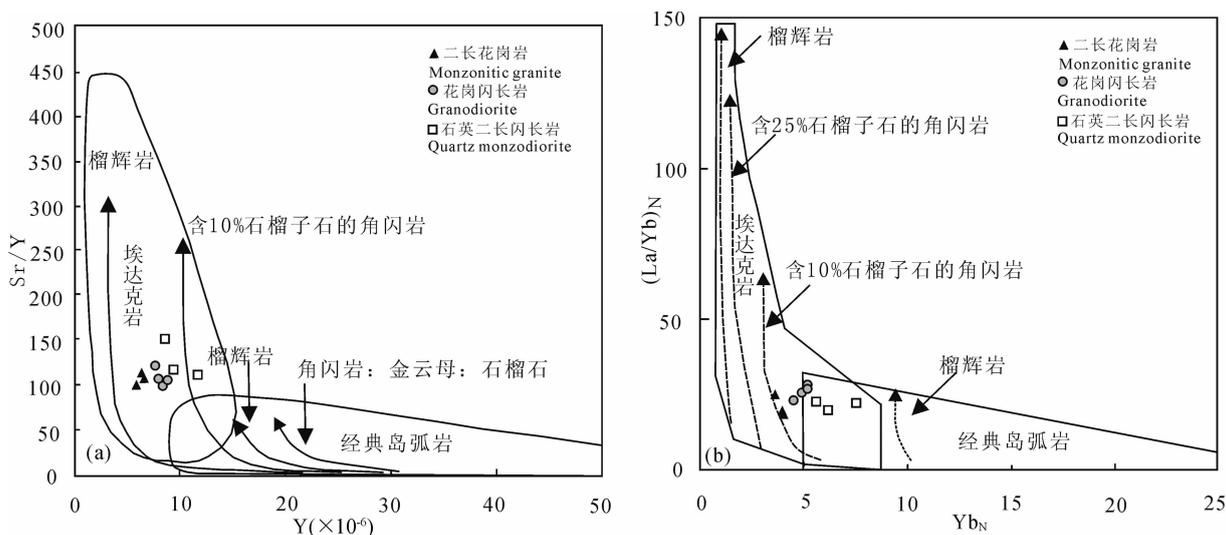


图 8 渤海海域蓬莱 9-1 构造潜山花岗岩体 (a) Y-Sr/Y 图解 (原图据 Defant et al., 1990; Chen Guochao et al., 2013) 和 (b) $Yb_N - (La/Yb)_N$ 图解 (原图据 Drummond et al., 1990)

Fig. 8 (a) Y-Sr/Y diagram (Defant et al., 1990; Chen Guochao et al., 2013) and (b) $Yb_N - (La/Yb)_N$ diagram (after Drummond et al., 1990) of Penglai 9-1 granite in Bohai Bay

表 3 渤海海域蓬莱 9-1 花岗岩体与两类埃达克岩石地球化学特征对比

Table 3 Geochemical characteristics comparison between the Penglai 9-1 granite in Bohai Bay and the adakites

| | 典型埃达克岩(O型埃达克岩) | 中国东部燕山期高 Sr 低 Y 型 中酸性火成岩(C型埃达克岩) | 蓬莱 9-1 花岗岩体 |
|------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| 岩石组合 | 安山岩、英安岩、流纹岩、 花岗闪长岩和英云闪长岩 | 安粗岩,粗安岩,粗面岩,闪长岩、 花岗闪长岩,石英二长岩和正长岩 | 花岗闪长岩、二长花岗岩、 二长闪长岩 |
| 岩石系列 | 钙碱性,次为低钾拉斑系列 | 高钾钙碱系列,次为钙碱性和橄榄粗玄系列 | 高钾钙碱系列 |
| SiO ₂ | ≥56% | >56% | 62.2%~70.8% |
| Al ₂ O ₃ | ≥15% | >15% | 14.1%~18.3% |
| MgO | <3% | <3% | 0.5%~0.79% |
| Na ₂ O/K ₂ O | >2 | =1 或 >1 或 <1 | 0.84~1.46 |
| Sr | >400×10 ⁻⁶ | >400×10 ⁻⁶ | (615~1319)×10 ⁻⁶ |
| Y | ≤18×10 ⁻⁶ | ≤18×10 ⁻⁶ | (5.9~11.8)×10 ⁻⁶ |
| Yb | ≤1.9×10 ⁻⁶ | ≤1.9×10 ⁻⁶ | (0.62~1.23)×10 ⁻⁶ |
| REE 分布 | LREE 富集 | LREE 富集 | LREE 富集 |
| δEu | 正异常 | 无异常或负异常不明显 | 1.12~1.59 |
| La/Yb | >20 | 24~76 | 25.1~38.5 |
| Sr/Y | <20~40 | 46~132 | 99.6~150.7 |
| 源区 | 消减的 MORB 底侵玄武岩 | 中基性麻粒岩或角闪岩 | 中基性麻粒岩 |
| 构造环境 | 俯冲带 | 板块内部 | 板块内部 |

注:表中 O 型和 C 型埃达克岩参数来源(Cai Jianhui et al., 2005; Zhang Qi et al., 2001b)。

C 型埃达克岩均具有极其相似的、独特的地球化学共性。但是 Na₂O/K₂O、Sr/Y 比值以及构造环境则明显不同于 O 型埃达克岩,而与 C 型埃达克岩特征或中国东部燕山期高 Sr 低 Y 型中酸性岩更为相似(Zhang Qi et al., 2001b)。

4 讨论

4.1 侵位时代对比

前人关于研究表明中国东部中生代花岗岩的时代分布主要是在 130~160Ma,其中山西运城地区 139~141 Ma,河北、山东主要以 160~130 Ma 的岩体为主,胶东地区 160~130Ma(Zhang Qi, 2013)。渤海湾盆地东缘的房山岩体花岗闪长岩 U-Pb 谐和线年龄值为 103.7±1.4Ma(Cai Jianhui et al., 2005);南缘胶东地区玲珑花岗岩岩浆锆石 SHRIMP U-Pb 年龄范围 160~152 Ma,加权平均 157.7Ma(Li Junjian et al., 2005)和苏北地区蚌埠荆山花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄范围 164~158 Ma,平均 160.2±1.3Ma(Xu Wenliang et al., 2004);北缘辽西东南部海棠山岩体粗粒二长花岗岩样品锆石 U-Pb 年龄分布在 152~176Ma(Wu Fuyuan et al., 2006)。综上所述,蓬莱 9-1 潜山花岗岩体锆石 U-Pb 年龄 164±2Ma,与中国东部胶东地区、辽西地区和苏北地区花岗岩上时空吻合度较高,均为中侏罗世燕山期形成的花岗岩,并且处于燕山运动 A 幕(时限 160±5Ma)和中间幕(时限 165~156Ma)的过渡时间(Zhao Yue et al., 2004)。

4.2 岩石成因及源区性质

4.2.1 岩石成因

蓬莱 9-1 花岗岩具有高 Sr、低 Y, HREE 亏损, δEu 略微正异常,在微量元素原始地幔标准化蜘蛛网图中 Nb、Ta、Ti、Zr、P 显著亏损的埃达克岩相似地球化学特点。因此,埃达克质岩石的成因模型用来解释这些岩石的形成,其成因模式有 3 种:①俯冲洋壳的熔融;②增厚下地壳铁镁质岩石的熔融;③拆沉下地壳的熔融(Wu Guang et al., 2003)。首先,蓬莱 9-1 花岗闪长岩体比典型的埃达克质岩明显高的 K₂O 含量,所以蓬莱 9-1 花岗闪长岩体也不太可能由俯冲板片熔融模型来解释(Chen Guochao et al., 2013)。来自太平洋板块的古地磁资料显示,太平洋板块在 120Ma 之前沿着东亚大陆边缘迅速向北方运动,120~75Ma 为 NNW 向运动,与东亚大陆边缘的俯冲作用发生在 75Ma,因此该地区花岗岩的成因与太平洋板块的西向俯冲没有直接的因果关系(Engebretson et al., 1985; Li Xiaoyong et al., 2003),而更可能起源于陆内伸展构造背景下继承早期俯冲组分改造的源区。其次,蓬莱 9-1 花岗岩体的 Mg[#] 和 MgO 含量并不高, MgO 含量介于 0.49%~0.79%,平均 0.63%, Mg[#] = 14.84~28.55,平均 22.32,一般情况下,直接来自下地壳熔融的埃达克质岩浆的 Mg[#] 值相对较低,但是如果形成的埃达克质岩浆在上升过程中与地幔楔发生交代作用可以使此值快速升高(Chen Guochao et al., 2013),较低的 Mg[#] 表明地壳未发生拆沉作用。另

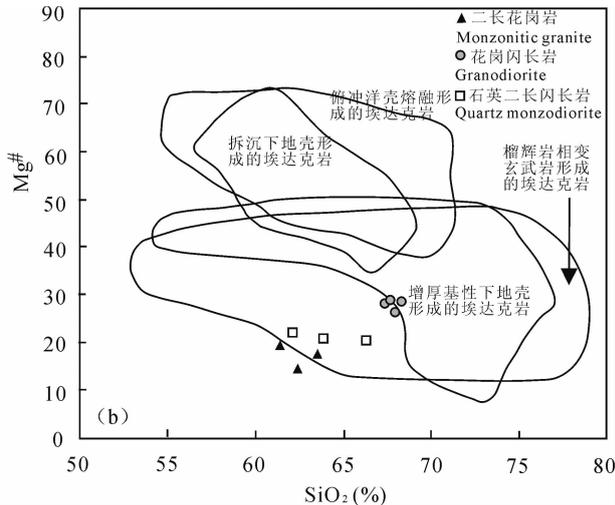
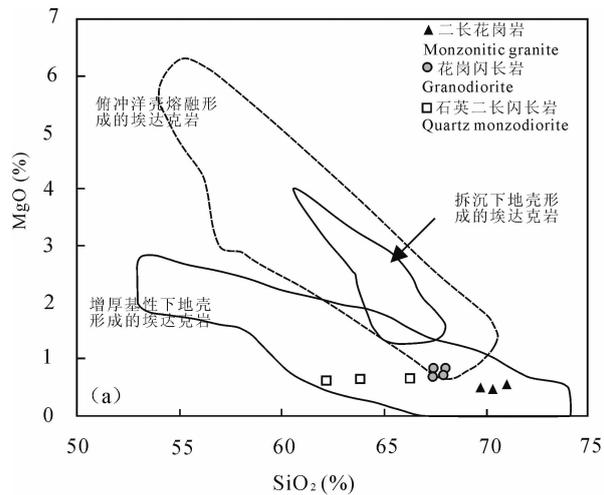


图9 渤海海域蓬莱9-1构造潜山花岗岩体的(a)SiO₂-Mg[#]图解(增厚下地壳、拆沉下地壳熔融、俯冲洋壳熔融产生的埃达克岩范围引自陈国超等,2013);(b)SiO₂-MgO图解(俯冲洋壳熔融、增厚下地壳熔融、拆沉下地壳熔融产生熔体范围据Wu Guang et al.,2008)

Fig.9 (a) SiO₂-Mg[#] diagram of Penglai 9-1 granite in Bohai Bay(the formed melt scope of thickened lower crust-driven adakites,lower crust-derived adakites ,subduction-derived adakites are cited from Chen Guochao et al.,2013);(b) SiO₂-MgO diagram(the formed melt scope of thickened lower crust-driven adakites,lower crust-derived adakites ,subduction-derived adakites are cited from Wu Guang et al.,2008)

外,在 SiO₂-Mg[#] 和 SiO₂-MgO 图解(图 9a、9b)和表 3 可以看出,同加厚下地壳熔融形成的埃达克质岩相似(Atherton et al.,1993; Zhang Qi et al.,2001b)。无 Eu 负异常的中酸性火成岩标志着—个加厚地壳的存在,或者说明具山根的造山环境,其形成于加厚地壳或造山带山根的底部(Deng Jinfu et al.,1994;Chen Guochao et al.,2013)。

4.2.2 源区性质

蓬莱9-1花岗岩样品在 Y-Sr/Y 图解和 Yb_N-(La/Yb)_N 图解上有都落入源区残余矿物相主要为角闪石和石榴子石的区域(图 8a 和图 8b),结合上述岩体微量元素特征和岩石成因研究,推测其可能来自于具消减带组分的增厚下地壳部分熔融的产物。Sr 在石榴子石、角闪石和单斜辉石中的分配系数很小,分别为 0.015、0.058 和 0.2,而在斜长石中的分配系数很大(Qin Jiangfeng et al.,2007; Yang Jinhui et al.,2003),蓬莱9-1花岗岩的 Sr 正异常和高 Sr/Y 比值表明在岩浆源区斜长石已不稳定并开始熔融,δEu 略微正异常也表明源区不存在或很少存在斜长石。石榴子石强烈富集 HREE,而角闪石更富集中稀土元素 MREE(Green,1994),因此当石榴子石作为主要残留相时,熔体表现为 HREE 强烈亏损,这时 Y/Yb>10,当角闪石为主要残留相时,熔体表现为 HREE 相对平坦,Y/Yb≈

10(Ge Xiaoyue et al.,2002),而蓬莱9-1花岗岩的相关地球化学参数为:Y/Yb≈8.57~10.57,平均 9.61,这暗示蓬莱9-1花岗闪长岩的残留相主要为角闪石。CI 型球粒原始的 Nb/Ta 比值 17.3~17.6,原始地幔的 Nb/Ta 比值 17.5,亏损地幔 Nb/Ta 比值 15.5,大陆地壳的 Nb/Ta 比值 10~14(Sun et al.,1989;McDough et al.,1995;Weyer et al.,2003;Chen Guochao et al.,2013)。由有关矿物的分配系数实验岩石学得知,Nb/Ta 分馏或者 Nb/Ta 高主要来自于金红石的部分熔融作用,不含金红石的榴辉岩部分熔融形成的岩浆中 Nb-Ta 基本不分馏(Rudnick et al.,2000;Foley et al.,2002),而蓬莱9-1花岗岩体的 Nb=5.14×10⁻⁶~6.85×10⁻⁶、Ta=0.39×10⁻⁶~0.53×10⁻⁶,Nb/Ta 比值 10.68~14.59,平均值 13.13,低 Nb/Ta 比值表明金红石可能没有参与部分熔融。由以上论述,推测蓬莱9-1花岗岩的源区残留相主要以角闪石为主,很少石榴子石和金红石,没有斜长石,说明其在碰撞过程地壳加厚过程中,具消减带组分的基性下地壳物质由于地幔上隆发生部分熔融,达到含石榴石角闪石的高压麻粒岩相的产物。

4.3 构造及石油地质意义

4.3.1 构造意义

蓬莱9-1花岗岩体原始地幔蛛网图具富集

LILE, 贫化 HFSE, Nb、P、Ti 明显亏损的后碰撞高钾钙碱性花岗岩图谱特征 (Zhang Chengli et al., 2004), 主量元素具有高钾钙碱性及准铝质特征 (A/CNK 介于 0.89~1.07) 与 Barbarin (1999) 花岗岩分类对比, 相当于壳幔混合起源的碰撞后高钾钙碱性花岗岩 (KCG)。此外, 大部分样品在花岗岩成因 R_1 - R_2 判别图解 (Batchelor et al., 1985) 和 $(Y+Nb)$ -Rb 图解 (Pearce et al., 1984; Forster et al., 1997) 落入后造山花岗岩的和岛弧花岗岩区域内 (图 10a, 10b), 也指示该岩体的形成可能是由于碰撞过程导致地壳快速缩短增厚背景下, 于碰撞后期相对“松弛阶段” (Zhang Chengli et al., 2004; Wang Tao et al., 2009; Yuan Jing et al., 2011; Huang He, 2011), 由于地幔上隆致使卷入有碰撞之前形成的消减带组分的下地壳物质温度升高而发生部分熔融所致。其形成标志着渤海湾盆地中生代陆块汇聚碰撞的强烈主碰撞阶段已经结束, 并在 164Ma 期间进入到由主碰撞挤压转向后碰撞伸展演化阶段, 与 Wu Fuyuan et al. (2003) 提出的 160 Ma 左右应于中国东部岩石圈减薄开始较为一致, 为进一步精细确定渤海湾盆地中生代陆块汇聚碰撞造山和演化过程提供了新的依据。而晚中生代 120~130 Ma 的早白

垩世是中国东部岩浆、成矿等作用最为强烈的时期, 很可能对应岩石圈减薄的最大时期, 其后进入热衰减时期, 并出现以碱性玄武岩为代表的新生代岩浆活动 (Wu Fuyuan et al., 2003), 由此推断燕山期 164~120Ma 期间该地区经历了从后碰撞区域拉长到岩石圈最大减薄的过程。

4.3.2 石油地质意义

蓬莱 9-1 潜山花岗岩地球化学研究精确细分了侵入体的岩石类型, 潜山岩性的准确识别对确定花岗岩侵入模式、储层预测和井位部署具有重要意义。花岗岩体岩性平面分布多表现出明显的环带状模式 (Cai Jianhui et al., 2005), 即从早至晚 (从岩体的边缘至内部), SiO_2 、 K_2O 、 Na_2O 含量增大, 蓬莱 9-1 花岗岩侵入体的地震反射特征研究也显示侵入体为“漏斗”形态, 而潜山鞍部钻井揭示岩体自然伽马 Gr 值和钾长石百分含量分布却有从东侧断层到西侧倾末端有减小的趋势, 这一特征与岩石类型从东到西由二长花岗岩渐变为花岗闪长岩相一致, 由此推断在潜山东侧控边断层下降盘可能存在“另一半”侵入岩体; 南北两个变质岩“山头”的 PL3 井、PL6 井、PL9 井和 PL12 井均未钻遇有效储层和油气显示, 而鞍部 PL1 井、PL2 井、PL4 井等 10 余口钻井均不

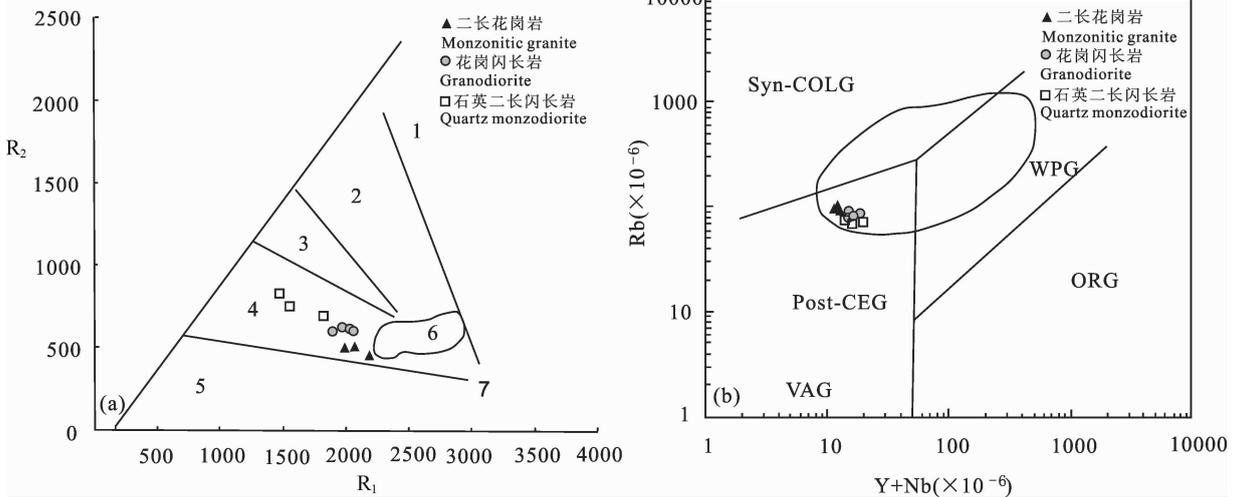


图 10 渤海海域蓬莱 9-1 构造潜山花岗岩体 (a) 花岗岩成因 R_1 - R_2 因子判别图解 (原图据 Batchelor et al., 1985, ①地幔斜长花岗岩; ②破坏性活动板块边缘 (板块碰撞前) 花岗岩; ③板块碰撞后隆起期花岗岩; ④晚造山期花岗岩; ⑤非造山区 A 型花岗岩; ⑥同碰撞 (S 型) 花岗岩; ⑦造山期后 A 型花岗岩) 和 (b) $(Y+Nb)$ -Rb 图解 (原图据 Pearce et al., 1984. 图中 Post-CEG 区域据 Forster 等 1997 资料圈定; ORG—洋脊花岗岩; WPG—板内花岗岩; Syn-COLG—同碰撞花岗岩; Post-CEG—后碰撞伸展花岗岩)

Fig. 10 (a) R_1 - R_2 distinguishing diagram of Penglai 9-1 granite in Bohai Bay (after Batchelor et al. 1985) and (b) $(Y+Nb)$ -Rb diagram [after Pearce et al., 1984. The base map is after Pearce et al. (1984) and the range of the post-CEG is after Forster et al. (1997); VAG—volcanic arc granites; ORG—ocean ridge granite; WPG—within plate granites; syn-COLG—syn-collision granites; post-CEG—post collision extension granites]

同程度钻遇花岗岩风化壳型储层和油气显示,表明潜山的岩性对储层具有明显的控制作用,因而放弃在南北两个“山头”高点布井,后期将钻探目标部署在潜山的鞍部。此外,蓬莱 9-1 潜山花岗岩锆石 U-Pb 年代学研究精确厘定了蓬莱 9-1 花岗岩体的侵位时代($164 \pm 2\text{Ma}$),是渤海海域发现的首个中生代花岗岩潜山,也是国内首个大型花岗岩潜山油藏(Xia Qinglong et al., 2013),开辟了渤海潜山油气勘探的新领域。

5 结论

通过对渤海湾盆地蓬莱 9-1 构造潜山花岗岩的元素地球化学研究,并结合单颗粒锆石的内部结构和 U-Pb 年龄成果,得出如下几点结论:

(1) 蓬莱 9-1 潜山花岗岩体锆石 U-Pb 年龄为 $164 \pm 2\text{Ma}$,属于燕山期中侏罗世形成的侵入岩体,是渤海海域首次发现的中生代花岗岩;

(2) 蓬莱 9-1 构造花岗岩侵入体岩石类型以花岗闪长岩为主,局部分布二长花岗岩和石英二长闪长岩,三者地球化学性质相似,属于准铝—弱过铝高钾钙碱性系列 I 型花岗岩,具有增厚基性下地壳部分熔融形成的 C 型埃达克岩的特征;

(3) 蓬莱 9-1 花岗岩的源区残留相主要以角闪石为主,很少石榴子石和金红石,没有斜长石,可能是由于碰撞过程地壳加厚过程中,由于地幔上隆致使具消减带组分的下地壳物质发生部分熔融,产生埃达克质的熔体和含石榴石角闪石的残余相;

(4) 蓬莱 9-1 潜山花岗岩体可能为中生代板块后碰撞阶段由于地壳增厚致使具消减带组分的下部地壳基性物质部分熔融后侵入的产物,其形成标志着渤海湾盆地中生代陆块汇聚碰撞的强烈主碰撞阶段已经结束,并在 164Ma 期间进入到由主碰撞挤压转向后碰撞伸展演化阶段,对应燕山期中国东部岩石圈减薄的开始。

致谢:感谢责任编辑和审稿专家多次提出宝贵修改意见,在此表示衷心的感谢。

References

- Anderson T. 2002. Correction of common Pb in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1/2): 59~79.
- Atherton M P, Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362: 144~146.
- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46: 605~626.
- Batchelor R A and Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. *Chem. Geol.*, 48: 43~55.
- Boynton M V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: Henderson P (ed). *Rare earth element geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 63~114.
- Cai Jianhui, Yan Guohan, Mu Baolei., Ren Kangxu, Song Biao, Li Fengtang. 2005. Zircon U-Pb age, Sr-Nd-Pb isotopic compositions and trace element of Fangshan complex in Beijing and their petrogenesis significance. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 776~788 (in Chinese with English abstract).
- Chen Debing, Fan Yujie, Zhao Hongwu. 2001. Analysis of the genesis of Mesozoic volcanic formations in northeast china and adjacent area *Geology and Resources*, 10(2): 65~70 (in Chinese with English abstract).
- Chen Guochao, Pei Xianzhi, Li Ruibao, Li Zuochen, Pei Lei, Liu Zhanqing, Chen Youxin, Liu Chengjun, Gao Jingmin, Wei Fanghui. 2013. Zircon U-Pb geochronology, geochemical characteristics and geological significance of Cocoe A' Long Quartz Diorites body from the Hongshuichuan area in East Kunlun. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(2): 178~195 (in Chinese with English abstract).
- Chen Peirong, Zhou Xinmin, Zhang Wenlan, Li Huimin, Fan Chunfang, Sun Tao, Chen Weifeng, Zhang Min. 2004. Petrogenesis and significance of early Yanshan syenite and granite complex in eastern area of Nanling Mountain. *SCIENCE IN CHINA Ser. D Earth Sciences*, 34(6): 493~503 (in Chinese without English abstract).
- Collins W J, Beams S D, White A J R, Chapell B W. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80: 189~200.
- Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magma by the partial melting of young subduction lithosphere. *Nature*, 347: 662~665.
- Deng Jinfu, Zhao Hailing, Lai Shaocong, Liu Houxiang, Luo Zhaohua. 1994. Generation of Muscovite/Two-Mica Granite and intracontinental subduction. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 19(2): 139~147 (in Chinese with English abstract).
- Dong Shenbao, Tian Wei. 2004. The nomenclature, characteristics and petrogenesis of adakite. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(2): 585~594 (in Chinese with English abstract).
- Drummond M S, Defant M J. 1990. A model for trondhjemitic-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons. *Journal of Geophysical Research*, 95(B13): 21503~21521.
- Engelbreton D C, Cox A and Gordon R G. 1985. Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific basin. *Geol Soc Spec Paper*, 206: 1~59.
- Foley S, Tiepolo M and Vannucci R. 2002. Growth of early continental crust controlled by melting of amphibolite in

- subduction zone. *Nature*, 417: 837~840.
- Forster H J, Tischendorf G, Trumbull R B. 1997. An evaluation of Rb vs(Y+Nb) discrimination diagram to infer tectonics setting of silicic igneous rocks. *Lithos*, 40: 261~293.
- Ge Xiaoyue, Li Xianhua, Chen Zhigang, Li Wuping. 2002. Geochemistry and petrogenesis of Yanshanian high Sr and low Y intermediate-acid igneous rocks in northern China; Constraints on China eastern crustal thickness, 47(6): 474~480. *Chinese Science Bulletin*, 47(6): 474~480 (in Chinese without English abstract).
- Gong Jian. 2010. The implication of Mesozoic-Cenozoic magmatism to Jiyang Depression and its surrounding tectonics. *Journal of Oil and Gas Technology*, 32(1): 161~173 (in Chinese with English abstract).
- Green T H. 1994. Experimental studies of trace-element partitioning applicable to igneous petrogenesis Sedona 16 years later. *Chemical geology*, 117: 1~36.
- Hoskin P W O, Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 53: 27~55.
- Hou Guiting, Qian Xianglin, Cai Dongsheng. 2001. The tectonic evolution of Bohai Basin in Mesozoic and Cenozoic Time. *Acta Scientiarum Naturarum Universitatis Pekinensis*, 37(6): 854~863 (in Chinese with English abstract).
- Huang he, Zhang Zhaochong, Zhang Dongyang, Du Hongxing, Ma Letian, Kang Jianli, Xue Chunji. 2011. Petrogenesis of late Carboniferous to early Permian granitoid plutons in the Chinese South Tianshan: Implications for crustal accretion. *Acta Geologica Sinica*, 85(8): 1305~1333 (in Chinese with English abstract).
- Isozaki Y. 1997. Jurassic accretion tectonics of Japan. *The Island Arc*, 6: 25~51.
- Le Maitre RW, Bateman P, Dudek A, Keller J, Lameyre J, Le Bas M. J, Sabine P A, Schmid R, Sorensen H, Streckeisen A, Woolley A R & Zanettin B. 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of terms; Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Blackwell Scientific Publications, Oxford, U. K., 55~56.
- LAN Chaoli, LIAO Baofang, WANG Zhikun, LIU Danjiang, YANG Minghui, CUI Zhiyuan. 2014. Characteristics and Growth Mechanism of Fractures within the Ordovician Buried Carbonate Hill in Nanpu Sag Offshore Bohai Bay Basin. *Acta Geologica Sinica*, 89(2): 252~261.
- Li Hongge, Du Xudong. 1999. Mesozoic tectonic characteristics and its evolution in the central and western regions of Bohai Bay. *Journal of the University of Petroleum, China*, 23(3): 1~5 (in Chinese without English abstract).
- Li Junjian, Luo Zhenkuan, Liu Xiaoyang, Xu Weidong, Chen Anshu. 2005. Constraints to the evolution of Jiaobei terrane from SHRIMP U-Pb zircon data of post-metallogenic granite porphyry vein in Linglong gold deposit, Shandong Province, East China. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(2): 317~323 (in Chinese with English abstract).
- Li Wuping, Li Xianhua, Lu Fengxiang. 2001. Genesis and geological significance for the middle Jurassic high Sr and low Y type volcanic rocks in Fuxin area of west Liaoning, northeastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 523~532 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaoyong, Fan Weiming, Fuo Feng, Wang Yuejun, Li Chaowen, Peng Touping. 2004. Genesis of Donglanggou Formation potassic volcanics in Xishan, Beijing; Implication for geodynamic mechanism. *Geochimica*, 33(4): 353~360 (in Chinese with English abstract).
- Lin Bolei, Li Bile. 2013. Geochemistry, U-Pb dating, Lu-Hf isotopic analysis and geological significance of linglong granite in jiaodong peninsula. *Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition)*, 40(2): 147~160 (in Chinese with English abstract).
- Luo Xiandong, Yang Xiaoyong, Duan Liuan, Sun Weidong. 2014. Geochemical and geochronological study of the gold-related Guojialing pluton and Shangzhuang pluton in Jiaobei Block. *Acta Geologica Sinica*, 88(10): 1875~1888 (in Chinese with English abstract).
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonics decimation of granitoids. *Geological society of American bulletin*, 101: 635~643.
- McDonugh W F, Sun S S. 1995. The composition of the Earth. *Chem Geol*, 120(3/4): 223~253.
- Pearce J A, Harries N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25: 956~983.
- Pidgeon R T. 1992. Recrystallisation of oscillatory-zoned zircon: Some geochronological and petrological implications. *Contrib Mineral Petrol*, 110: 463~472.
- Qin Jiangfeng, Lai Shaocong, Li Yongfei. 2007. Genesis of the indosinian Guangtoushan adakitic biotite plagiogranite in the Mianxian-Lueyang (Mianlue) suture, South Qinling, China, and its tectonic implications. *Geological Bulletin of China*, 26(4): 466~472 (in Chinese with English abstract).
- Rapp R P, Weston E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8~32 kba; implication for continental melon and crust mantle recycling. *Journal of petrology*, 36: 891~931.
- Rudnick R L, Barth M, Horn I, McDonough W F. 2000. Rutile-bearing refractory eclogites; Missing link between continents and depleted mantle. *Science*, 287(5451): 278~281.
- Streckeisen A L. 1976. To each plutonic rock its proper name. *Earth Science Reviews*, 12, 1~33.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D and Norry M J (Editors). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society of London, Special Publication, 42: 313~345.
- Wang Tao, Wang Zongqi, Yan Zhen, Yan Quanren, Li Yingli, Xiang Zhongjin. 2009. Geochemical characteristic and Zircon

- SHRIMP U-Pb Dating of Sehe Granite in Shanyang County, Shanxi Province and its geological Significance. *Acta Geologica Sinica*, 83(11):1657~1666(in Chinese with English abstract).
- Weyer S, Muenker C, Mezger M. 2003. Nb/Ta, Zr/Hf and REE in the depleted mantle: Implication for the differentiation history of the crust mantle system. *Earth planet Sci let*, 205(3):309~324.
- Wu Fuyuan, Ge Wenchun, Sun Deyou, Guo Chunli. 2003. Discussions on the lithospheric thinning in eastern China. *Earth Science Frontiers*(China University of Geosciences, Beijing), 10(3):51~60(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Yang Jinhui, Zhang Yanbin, Liu Xiaoming. 2006. Emplacement ages of the Mesozoic granites in southeastern part of the Western Liaoning Province. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2):315~325(in Chinese with English abstract).
- Wu F. Y., Yang J H., Lo C H., Wilde S A., Sun D Y., Jahn B. M. 2007. The Heilongjiang Group: A Jurassic accretionary complex in the Jiamusi Massif at the western Pacific margin of northeastern China. *Island Arc*, 16:156~172.
- Wu Guang, Li Zhongquan, LI Zhitong. 2003. Geochemical characteristics and genesis of the Early Mesozoic Volcanic rocks in West Liaoning Area. *Journal of Mineral Petrol*, 23(3):14~20(in Chinese with English abstract).
- Wu Guang, Chen Yanjing, Sun Fengyue, Li Jingchun, Li Zhitong, Wang Xiling. 2008. Geochemistry of the Late Jurassic granitoids in the northern end area of Da Hinggan Mountains and their geological and prospecting implications. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4):899~910(in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao, Chen Daogong, Xia Qunke, Tu Xianglin, Chenghao. 2002. Analysis of trace element in micro area of eclogite Zircon in Dabie mountain Yellow Town; trace element characteristics of eclogite facies metamorphic zircon. *Chinese Science Bulletin*, 47(11):859~863(in Chinese without English abstract).
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004. Genetic mineralogy of zircon and its constraints on the interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 46(16):1589~1602(in Chinese without English abstract).
- Xia Qinglong, Zhou Xinhui, Wang Xin, Liu Pengbo, Guan Dayong. 2013. Geological characteristic and discovery significance of large-scale and compound oilfield of Penglai 9-1 in Bohai. *Acta Petrologica Sinica*, 34(S2), 15~22(in Chinese with English abstract).
- Xu Wenliang, Wang Qinghai, Yang Debin. 2004. SHRIMP zircon U-Pb age and its geological significance of the Jin Mountain "Mixed granite" in Bengbu. *SCIENCE IN CHINA Ser. D Earth Sciences*, 34(5):423~428(in Chinese without English abstract).
- Yang Jinhui, Zhu Meifei, Liu Wei, Zhai Mingguo. 2003. Geochemistry and petrogenesis of Guojialing granodiorites from the northwestern Jiaodong Peninsula, eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4):692~700(in Chinese with English abstract).
- abstract).
- Yin Changjian, Peng Yujing, Jin Ke. 2000. Mesozoic volcanism in the eastern part of Northeast China and transpacific plate. *Regional Geology of China*, 19(3):303~311(in Chinese with English abstract).
- Yu Xuefeng, Li Hongkui, Shan Wei. 2012. Study on coupling between Yanshannian tectonic thermal events and gold mineralization in Jiaodong Ore concentrating area in Shandong Province. *Acta Geologica Sinica*, 86(12):1946~1956(in Chinese with English abstract).
- Yuan Jing, Xiao Long, Wan Chuanhui, Gao Rui. 2011. Petrogenesis of Fangmapiing-Sanyanlong granites in southern Songpan-Garzê Fold Belt and its tectonic implication. *Acta Geologica Sinica*, 85(2):195~206(in Chinese with English abstract).
- Zhang Chengli, Liu Liang, Zhang Guowei, Wang Tao, Liu Danling, Yuan Honglin, Liuxiaoming, Yan Yunxiang. 2004. Determination of Neoproterozoic post-collisional granites in the north Qinling Mountains and its tectonic significance. *Earth Science Frontiers*(China University of Geosciences, Beijing), 11(3):33~41(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Qian Qing, Wang Erqi. 2001a. An east china plateau in mid-late Yanshanian period; implication from adakites. *Chinese Journal Of Geology*, 6(2):248~255(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Qian Qing, Yang Jinhui, Wang Yuanlong, Zhao Taiping, Guo Guangjun. 2001b. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2):236~244(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Liu Wei, Wang Yuanlong. 2002. Adakite: Its characteristics and implications. *Geological Bulletin Of China*, 21(7):431~435(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi. 2013. Is the Mesozoic magmatism in eastern China related to the westward subduction of the Pacific plate? *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 23(1):113~118(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yue, Zhang Shuanhong, Xu Gang, Yang Zhenyu, Hu Jianmin. 2004. The Jurassic major tectonic events of the Yanshanian intraplate deformation belt. *Geological Bulletin Of China*, 23(9/10):854~863.(in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 蔡剑辉, 阎国翰, 牟保磊, 任康绪, 宋彪, 李凤棠. 2005. 北京房山岩体锆石 U-Pb 年龄和 Sr, Nd, Pb 同位素与微量元素特征及成因探讨. *岩石学报*, 21(3):776~788.
- 陈德兵, 范玉杰, 赵宏武. 2001. 中国北东部及邻区中生代火山岩成因分析. *地质与资源*, 10(2):65~70.
- 陈国超, 裴先治, 李瑞保, 李佐臣, 裴磊, 刘战庆, 陈有妍, 刘成军, 高景民, 魏方辉. 2013. 东昆仑洪水川地区科科鄂阿龙岩体锆石年代学、地球化学及其地质意义. *地质学报*, 2013, 87(2):178~195.
- 陈培荣, 周新民, 张文兰, 李惠民, 范春方, 孙涛, 陈卫锋, 张敏. 2004.

- 南岭东段燕山早期正长岩—花岗岩杂岩的成因和意义. 中国科学 D 辑(地球科学), 34(6): 493~503.
- 邓晋福, 赵海玲, 赖绍聪, 刘厚祥, 罗照华. 1994. 白云母/二云母花岗岩形成与陆内俯冲作用. 地球科学(中国地质大学学报), 19(2): 139~147.
- 董申保, 田伟. 2004. 埃达克岩的原义、特征与成因. 地学前缘, 11(2): 585~594.
- 葛小月, 李献华, 陈志刚, 李伍平. 2002. 中国东部燕山期高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩的地球化学地质及其成因: 对中国东部地壳厚度的约束. 科学通报, 47(6): 474~480.
- 宫健. 2010. 中新世岩浆活动对济阳拗陷及其周缘构造的指示意义. 石油天然气学报, 32(1): 161~173.
- 侯贵廷, 钱祥麟, 蔡东升. 2001. 渤海湾盆地中、新生代构造演化研究. 北京大学学报(自然科学版), 37(6): 854~863.
- 黄河, 张招崇, 张东阳, 杜红星, 马乐天, 康健丽, 薛春纪. 2011. 中国南天山晚石炭世—早二叠世花岗岩侵入岩的岩石成因与地壳增生. 地质学报, 85(8): 1305~1333.
- 兰朝利, 廖保方, 王志坤, 刘丹江, 杨明慧, 崔志员. 2015. 渤海湾盆地南堡凹陷滩海潜山裂缝特征及其形成机制. 地质学报, 89(2): 252~261.
- 李洪革, 杜旭东. 1999. 渤海湾地区中西部中生代构造特征及演化. 石油大学学报, 23(3): 1~5.
- 李俊建, 罗镇宽, 刘晓阳, 徐卫东, 陈安蜀. 2005. 玲珑金矿区成矿后花岗岩斑岩脉的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄对胶北地体演化的制约. 地学前缘, 12(2): 317~323.
- 李伍平, 李献华, 路凤香. 2001. 辽西中侏罗世高 Sr 低 Y 型火山岩的成因及其地质意义. 岩石学报, 17(4): 523~532.
- 李晓勇, 范蔚茗, 郭锋, 王岳军, 李超文, 彭头平. 2004. 北京西山东狼牙沟钾质火山岩成因及其动力学机制. 地球化学, 33(4): 353~360.
- 林博磊, 李碧乐. 2013. 胶东玲珑花岗岩的地球化学、U-Pb 年代学、Lu-Hf 同位素及地质意义. 成都理工大学学报(自然科学版), 40(2): 147~160.
- 罗贤冬, 杨晓勇, 段留安, 孙卫东. 2014. 胶北地块与金成矿有关的郭家岭岩体和上庄岩体年代学及地球化学研究. 地质学报, 88(10): 1875~1888.
- 秦江锋, 赖绍聪, 李永飞. 2007. 南秦岭勉县—略阳缝合带印支期光头山埃达克质花岗岩的成因及其地质意义. 地质通报, 26(4): 466~472.
- 王涛, 王宗起, 闫臻, 闫全人, 张英利, 向忠金. 2009. 山阳色河花岗岩地球化学特征和锆石 SHRIMP U-Pb 年代学. 地质学报, 83(11): 1657~1666.
- 吴福元, 葛文春, 孙德有, 郭春丽. 2003. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题. 地学前缘, 10(3): 51~60.
- 吴福元, 杨进辉, 张艳斌, 柳小明. 2006. 辽西东南部中生代花岗岩时代. 岩石学报, 22(2): 315~325.
- 吴元保, 陈道公, 夏群科, 涂湘林, 程昊. 2002. 大别山黄镇榴辉岩锆石的微区微量元素分析: 榴辉岩相变质锆石的微量元素特征. 科学通报, 47(11): 859~863.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报, 46(16): 1589~1602.
- 武广, 李忠权, 李之彤. 2003. 辽西地区早中生代火山岩地球化学特征及成因探讨. 矿物岩石, 2003, 23(3): 14~20.
- 武广, 陈衍景, 孙丰月, 李景春, 李之彤, 王希令. 2008. 大兴安岭北段晚侏罗世花岗岩类地球化学及其地质和找矿意义. 岩石学报, 24(4): 899~910.
- 夏庆龙, 周心怀, 王昕, 刘朋波, 官大勇. 2013. 渤海蓬莱 9-1 大型复合油田地质特征与发现意义. 石油学报, 34(增 2): 15~22.
- 许文良, 王清海, 杨德彬. 2004. 蚌埠荆山“混合花岗岩”SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 中国科学(D), 34(5): 423~428.
- 杨进辉, 朱美妃, 刘伟, 翟明国. 2003. 胶东地球郭家岭花岗岩闪长岩的地球化学特征及成因. 岩石学报, 19(4): 692~700.
- 殷长建, 彭玉鲸, 靳克. 2000. 中国东北东部中生代火山活动与泛太平洋板块. 中国区域地质, 19(3): 303~311.
- 于学峰, 李洪奎, 单伟. 2012. 山东胶东矿集区燕山期构造热事件与金矿成矿耦合探讨. 地质学报, 86(12): 1946~1956.
- 袁静, 肖龙, 万传辉, 高睿. 2011. 松潘—甘孜南部放马坪—三岩龙花岗岩的成因及其构造意义. 地质学报, 85(2): 195~206.
- 张成立, 刘良, 张国伟, 王涛, 陈丹玲, 袁洪林, 柳小明, 晏云翔. 2004. 北秦岭新元古代后碰撞花岗岩的确定及其构造意义. 地学前缘, 11(3): 33~41.
- 张旗, 钱青, 王二七. 2001a. 燕山中晚期的中国东高原: 埃达克岩的启示. 地质科学, 36(2): 248~255.
- 张旗, 王焰, 钱青, 杨进辉, 王元龙, 赵太平, 郭光军. 2001b. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造—成矿意义. 岩石学报, 17(2): 236~244.
- 张旗, 王焰, 刘伟, 王元龙. 2002. 埃达克岩的特征及其意义. 地质通报, 21(7): 431~435.
- 张旗. 2013. 中国东部中生代岩浆活动与太平洋板块向西俯冲有关? 岩石矿物学杂志, 23(1): 113~118.
- 赵越, 张拴宏, 徐刚, 杨振宇, 胡健民. 2004. 燕山板内变形带侏罗纪主要构造事件. 地质通报, 23(9/10): 854~863.

Geochemical Characteristic of Mesozoic Granite of the Penglai 9-1 Buried Hill, Bohai Bay and Its Geological Significance

FENG Chong, WANG Qingbin, YANG Bo, ZHAO Guoxiang, LIU Xiaojian
Tianjin Branch of CNOOC, Ltd, Tianjin, 300452

Abstract

The large Penglai 9-1 oilfield in the Bohai Bay Basin is the first discovered buried hydrocarbon reservoir of the Mesozoic granite. The geochemical characteristics and origin of the rocks provide important clues for the mechanism of Mesozoic tectonic environment of and continental crust growth of Bohai Bay Basin. A new age of 164 ± 2 Ma was obtained for the Penglai 9-1 granitic pluton by LA-ICP-MS, and represents the formation age of the pluton consisting mainly of quartz monzodiorite, granodiorite and monzonitic granite. The study of major elements shows that the $\omega(\text{SiO}_2) = 62.22\% \sim 70.86\%$, $\omega(\text{K}_2\text{O}) = 3.29\% \sim 4.36\%$, $\omega(\text{CaO}) = 1.71\% \sim 4.10\%$, $\text{AR} = 2.13 \sim 3.06$, $\text{A/CNK} = 0.89 \sim 1.07$, indicating that the pluton belongs to I-type granite of high-k calc-alkaline series. The chondrite-normalized REE patterns show a right-dipping mode, enrichment in LREE and LILE, depletion in HREE and HFSE. The geochemical characteristics of the subduction zone components (SZC) display its close relation to the source region of magma. The granite is characterized by high contents of Sr, Sr/Y and La/Yb, and low contents of Y, Yb and $\text{Mg}^\#$, showing characteristics of adakite rock resulting from partial melting of thickening lower crust. The $\text{R}_1\text{-R}_2$ discriminant diagram and $(\text{Y}+\text{Nb})$ vs Rb tectonic diagram reveal that the granite was formed in the post-collisional expansion stage. In conclusion, the Penglai 9-1 granite pluton were formed by partial melting of lower crustal materials including subduction materials in the crust thickening background due to the postcollisional extension. Its formation marks that the main collision of the Mesozoic continental convergent collision in the Bohai Bay basin had ended and entered post-collisional extension stage from the compression of the main collisional stage during the period of 164 Ma, providing new evidence to further determine the Mesozoic continental collision process in the Bohai Bay basin in detail.

Key words: post-collisional granite; LA-ICP-MS; zircon U-Pb dating; geochemistry; Penglai 9-1 Buried hill