

渤海海域庙西北凸起中生代花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其地质意义

赵国祥, 王清斌, 杨波, 王飞龙, 刘丰

ZHAO Guoxiang, WANG Qingbin, YANG Bo, WANG Feilong, LIU Feng

中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300452

Tianjin Branch, Bohai Oilfield Research Institute, CNOOC China Limited, Tianjin 300452, China

摘要: 为了解渤海海域首个未变质花岗岩潜山油藏的形成演化, 对庙西北凸起潜山花岗岩进行年代学及地球化学研究, 讨论其岩石成因、源区性质和构造背景。庙西北凸起潜山二长花岗岩及花岗闪长岩均为钙碱性系列岩石, 其锆石呈双锥柱状晶形, 自形程度较高, 测年数据证实岩浆结晶锆石年龄为 155.4 ± 2.5 Ma, 分析样品都具有重稀土元素亏损、轻稀土元素富集的特征, Eu 正异常, 富集大离子亲石元素(如 Pb、Sr), 亏损高场强元素(如 Th、Nb、Zr)。综合分析认为, 在早—中侏罗世受扬子板块及佳蒙地块挤压, 地壳快速缩短增厚, 由于升温使其下地壳部分发生熔融, 最终上涌侵入, 形成庙西北凸起潜山过铝质 S 型花岗岩。

关键词: 庙西北凸起; 花岗岩; 潜山; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年; 燕山期; 地球化学

中图分类号: P534.5; P597+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2017)07-1204-14

Zhao G X, Wang Q B, Yang B, Wang F L, Liu F. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of Mesozoic granite in Miaoxibei uplift, Bohai Sea area, and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(7):1204-1217

Abstract: For the purpose of better understanding of the formation, evolution and tectonic environment of the first unmetamorphosed granite oil pool in Bohai Sea area, the authors carried out a study of granite buried hill of Miaoxibei uplift. Based on petrography, LA-ICP-MS zircon U-Pb ages and whole-rock major and trace elements, the authors investigated the petrogenesis, magma source and tectonic setting. LA-ICP-MS zircon U-Pb data of the granite yielded weighted age of 155.4 ± 2.5 Ma, the granite is of calc-alkaline suite with positive Eu anomaly, both samples have the characteristics of depletion of heavy rare earth elements and enrichment of light rare earth elements, and the granite is strongly enriched in large ion lithophile elements (LILEs, e.g., Pb, Sr) but depleted in high field strength elements (HFSEs, e.g. Th, Nb, Zr). It is thus held that the crust experienced shortening and thickening rapidly because of the pressure of Yangtze plate and the Jiamusi Mongolia block during the early Middle Jurassic, and that, due to the rising temperature, the lower crust was subjected to partial melting, which eventually surged and invaded, resulting in the formation of peraluminous S-type granite in the Miaoxibei uplift buried hill.

Key words: Miaoxibei uplift; granite; buried hill; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; Yenshanian; geochemistry

渤海海域是渤海湾盆地的一部分, 由北部下辽河拗陷、西南部黄骅拗陷和南部济阳拗陷的延伸部分和渤中拗陷组成, 是盆地自古近纪以来由水域变陆域演化过程中仅存的水域部分^[1-3]。新生代盆地

为中生代末以来叠置在华北中—古生界基底上发育的克拉通裂谷断陷盆地, 对海域内中生代火山岩的研究, 能深入地揭示盆地发育前的大地构造动力学背景。海域内中生代火成岩从基性、中性到酸性

收稿日期: 2016-07-21; 修订日期: 2017-05-27

资助项目: 国家科技重大专项《近海隐蔽油气藏勘探技术》(编号: 2011ZX05023-006-002) 和中国海洋石油总公司勘探部生产科研项目《蓬莱9-1构造潜山储层特征及成因机理研究》(编号: 2012-0047532)

作者简介: 赵国祥(1986-), 男, 硕士, 工程师, 从事区域油气勘探研究。E-mail: zhaogx@cnooc.com.cn

均有,以中、酸性为主,为碱性或亚碱性的钙碱性系列,普遍富 K 和 Al^[4],受西伯利亚板块和扬子板块碰撞、西太平洋依泽奈崎-库拉板块向亚洲大陆的俯冲作用及郯庐断裂的影响,整个中生代火山活动频繁^[5-9]。区域研究认为,火山岩分布主要受郯庐断裂、秦皇岛-老铁山断裂、塘沽-埕北断裂的控制,火山岩类型主要为安山岩、玄武岩、火山凝灰岩等^[1,4,10]。

然而,受限于海域内的钻井数量,有关中生代火山岩整体研究程度偏低,缺乏系统的地球化学研究,对岩体形成时代的认识也不同。以研究区庙西北凸起蓬莱 9-1 构造花岗岩为例,前人研究认为,该花岗岩为一套元古宙或太古宙混合花岗岩^[11-12],与锦州 25-1 南变质花岗岩具有相似的构造演化,但后期钻井揭示,该区花岗岩并未发生变质作用,重力、磁力资料也将其解释为中生代火山岩^[4]。因此利用锆石 U-Pb 同位素测定技术,重新测定构造区花岗岩的年龄十分必要。在前人工作的基础上,本次对渤海海域庙西北凸起蓬莱 9-1 构造潜山花岗岩进行了锆石 U-Th-Pb 同位素测定,以及主量、微量和稀土元素分析,解释其侵入时代、源区性质及成岩背景,为进一步认识庙西北凸起花岗岩岩浆活动、构造演化及油气成藏提供重要资料。

1 区域地质背景

庙西北凸起位于渤海海域东部,是海域内唯一的独立构造单元渤中坳陷的一部分。该凸起夹持于渤东凹陷和庙西凹陷之间,是受东南侧北东向边界大断裂(庙西 1 号断裂)控制的半背斜构造,长条状,走向为 NNE 向,面积约 242km²(图 1),总体显示为北西较深,向南东逐渐变浅过渡为斜坡的不对称碟状坳陷^[1,12-14]。凸起位于郯庐断裂渤海段渤中段东部,作为 NE 走向的辽东湾段和 NNE 走向的莱州湾段之间的转折地带,始新世时被北京-蓬莱断裂带错切,因此研究区受郯庐断裂带和张家口-蓬莱断裂带的双重影响^[15]。多期断裂活动使研究区潜山长期遭受风化剥蚀,新近系直接超覆或披覆于潜山之上,同时受庙西北凸起东界大断层控制,研究区次生断层发育。

钻井揭示,庙西北凸起地层自上而下划分为平原组、明化镇组、馆陶组、中生界和元古宇。新近系

岩性以砂泥岩互层为主,中生界为花岗岩,元古宇则以石英片岩为主。

通过对庙西北凸起 A 井及 B 井(井点位置见图 1-C)174 块中生界岩心样品镜下鉴定,结合粉晶 X 衍射分析及主量元素成分分析结果进行 CIPW 计算,在剔出蚀变样品后,QAP 图解投点显示,中生代花岗岩主要为花岗闪长岩,少量二长花岗岩。其中 A 井主要为二长花岗岩,呈灰白色,具花岗结构和二长结构(图 2-b),块状构造。岩石主要矿物组成为石英、钾长石、斜长石、黑云母或角闪石。B 井则为花岗闪长岩,呈灰白色,局部钾化区域显示红色斑块,具半自形粒状结构,块状构造(图 2-a)。主要矿物组成为石英、钾长石、斜长石、角闪石、黑云母。斜长石含量占长石总量的 65%~90%,多为更长石、中长石,聚片双晶发育,蚀变严重,暗色矿物以角闪石为主,多发生绿泥石化。此外,在 B 井酸性侵入岩中还发现少量基性岩脉,主要为辉绿岩(图 2-c)。

2 分析方法

本文对 4 块庙西北凸起花岗岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,样品采自 A 井 1400m、1500m 深度及 B 井 1387.6m、1555m 深度(井位见图 1)。锆石分选在河北省地质调查局廊坊实验室完成,将样品粉碎至 200 目,依次用磁力和重力进行分选,最后在双目镜下挑选出用于定年的锆石。锆石制靶及反射光、透射光、阴极发光(CL)图像照相在北京锆年领航科技公司完成。LA-ICPMS 锆石 U-Pb 同位素测定在南京大学内生金属矿床成矿机制国家重点实验室测定,采用 Agilent7500 型 ICP-MS 和德国 Lambda Physik 公司的 Com Pex102 ArF 准分子激光器(工作物质 ArF,波长 193nm),以及 MicroLas 公司的 GeoLas 200M 光学系统联机进行。激光束斑直径为 30 μm,激光剥蚀样品的深度为 20~40 μm,利用氦气作为剥蚀物质的载气,采样方式为单点剥蚀,数据采集选用一个质量峰一点的跳峰方式,每完成 4~5 个测点的样品测定,加测标样 1 次。在所测锆石样品分析 15~20 个点前后各测 2 次 NISTSRM 610,锆石年龄采用标准锆石 91500 作为外标标准物质,用 NISTSRM 610 校正微量元素含量。每个锆石测试点的 U-Pb 年龄由 Glitter4.4.1^[16]程序计算,获得的同位素比值、年

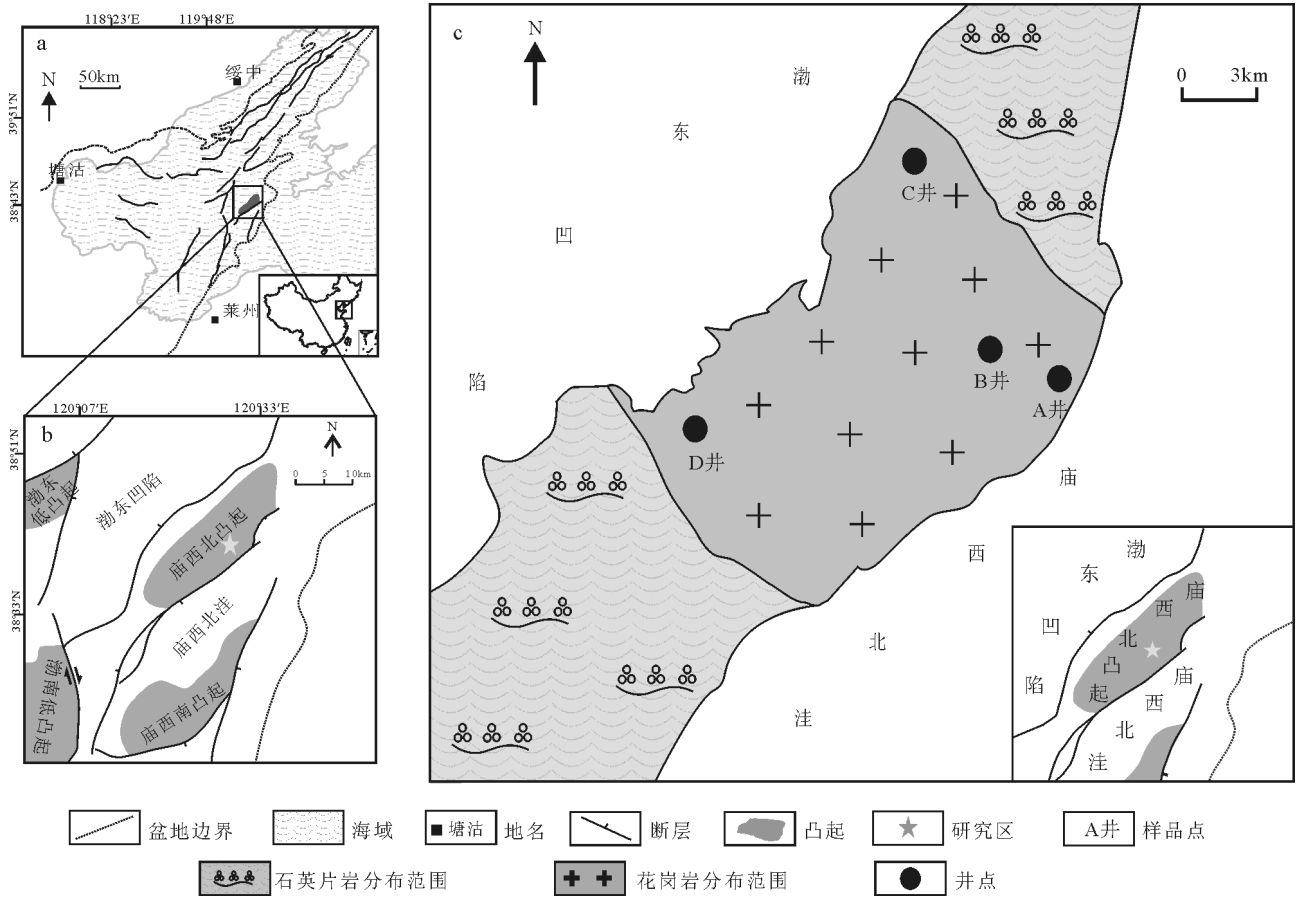


图1 渤海海域庙西北凸起区域地质图

Fig. 1 Simplified geological map of Miaoxibei uplift place in Bohai Sea area

龄及误差值、普通铅校正用Excel和ComPbCorr#_151程序计算,年龄计算及U-Pb谐和图的绘制由Isoplot程序完成^[17]。

元素分析样品采自A、B、C、D四口井不同深度岩心及岩屑(井位见图1),样品的主量、微量和

稀土元素分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。其中,主量元素分析采用X射线荧光光谱法分析,使用仪器为AB104-L, PW2404X射线荧光光谱仪;微量及稀土元素分析采用ICP-MS方法,利用酸溶法将样品溶液制备

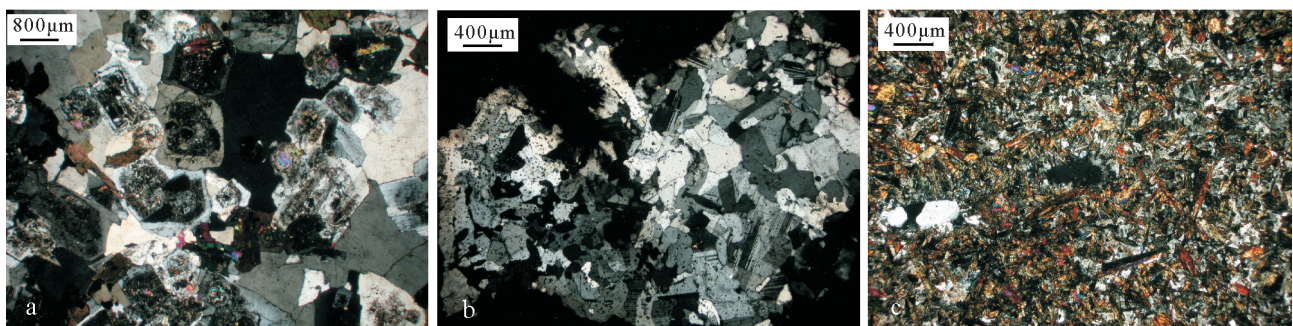


图2 研究区潜山典型岩石类型特征

Fig. 2 Typical lithology of the buried hill in the study area
a—花岗闪长岩,B井,1350m,正交偏光;b—二长花岗岩,A井,1365m,正交偏光;c—辉绿岩,B井,1390m,正交偏光

好后,用 Element 等离子体质谱分析仪分析,分析误差小于 10%。

3 测定结果

3.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素测定

研究区测定 2 件二长花岗岩样品(A 井 1405m, 1500m)及花岗闪长岩样品(B 井 1387.6m, 1555m), 年龄数据舍弃了测试过程中受老核或后期裂隙影响的偏年轻和偏老的数据。对 A 井 1405m 样品测定了 22 颗锆石、22 个分析点。U-Pb 分析结果表明

(表 1),校正后的锆石有效数据点为 16 个,其所测锆石的阴极发光图像、测定点位和相应的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 视年龄如图 3-a 所示。锆石阴极发光图像显示,锆石为双锥柱状晶形,自形程度较高,具有明显的岩浆振荡环带,个别颗粒中心存在明显的核部,为继承性锆石的残留。所测锆石颗粒的 Th、U 含量变化不大,分别为 $49.93 \times 10^{-6} \sim 801.83 \times 10^{-6}$ 和 $61.77 \times 10^{-6} \sim 1497.96 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.08~1.85, 锆石颗粒阴极发光特征及 Th/U 值均反映出岩浆锆石特征^[18]。所测 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果

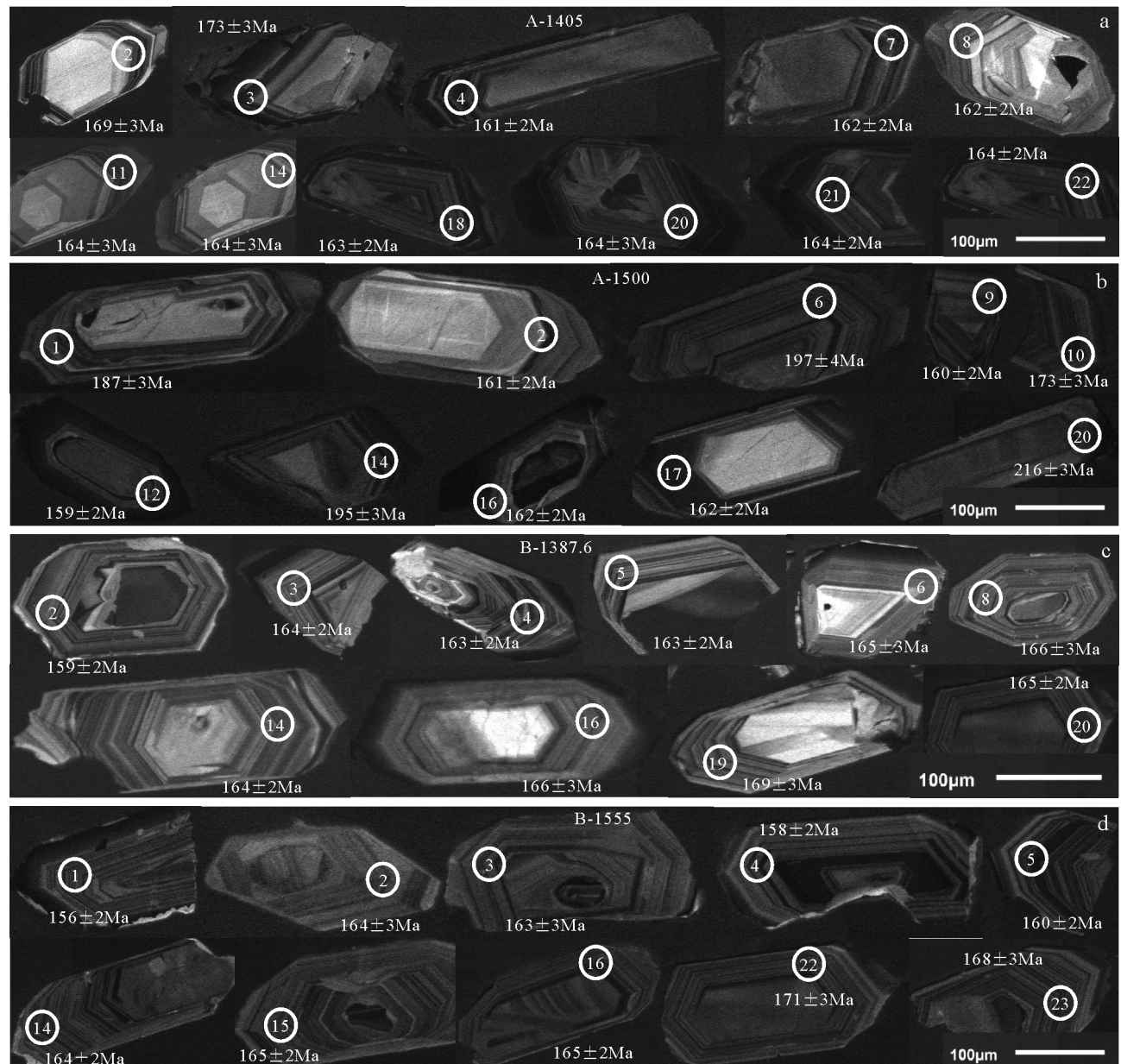


图 3 庙西北凸起花岗岩典型锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images of selected zircons for granite from Miaoxibeil uplift

见表1、图4-a。16个分析数据点在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图上均落在谐和线或其附近,获得的16个 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄数据集中于 $159\pm 2\sim 178\pm 3\text{Ma}$ 之间,给出的年龄加权平均值为 $164.2\pm 1.9\text{Ma}$ ($n=16$, MSWD=0.60)。

对A井1500m样品测定了20颗锆石、20个分析点。 U - Pb 分析结果表明(表1),校正后的锆石有效数据点为13个,其所测锆石的阴极发光图像、测定点位和相应的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 视年龄如图3-b所示。1405m样品的锆石颗粒阴极发光特征及 Th/U 值也反映出岩浆锆石的特征。所测LA-ICP-MS锆石 U - Th - Pb 同位素分析结果见表1、图4-b。13个数据点在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图上均落在谐和线或其附近,13个 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值变化较大,在 $159\pm 2\sim 216\pm 3\text{Ma}$ 之间,其年龄集中段(150~170Ma)

给出的年龄加权平均值为 $160.6\pm 1.7\text{Ma}$ ($n=6$, MSWD=0.5)。

对B井1387.6m样品测定了24颗锆石、24个分析点。 U - Pb 分析结果表明(表1),校正后的锆石有效数据点为16个,锆石的阴极发光图像、测定点位和相应的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 视年龄如图3-c所示。与二长花岗岩相似的锆石阴极发光图像显示,锆石为双锥柱状晶形,自形程度较高,所测锆石颗粒的 Th 、 U 含量分别为 $48.34\times 10^{-6}\sim 292.25\times 10^{-6}$ 和 $127.86\times 10^{-6}\sim 690.52\times 10^{-6}$, Th/U 值为0.27~1.43,为岩浆锆石特征。所测LA-ICP-MS锆石 U - Th - Pb 同位素分析结果见表1、图4-c。16个数据点在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图上均落在谐和线或其附近,16个 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中于 $155\pm 3\sim 170\pm 3\text{Ma}$ 之间,给出的年龄加权平均值分别为

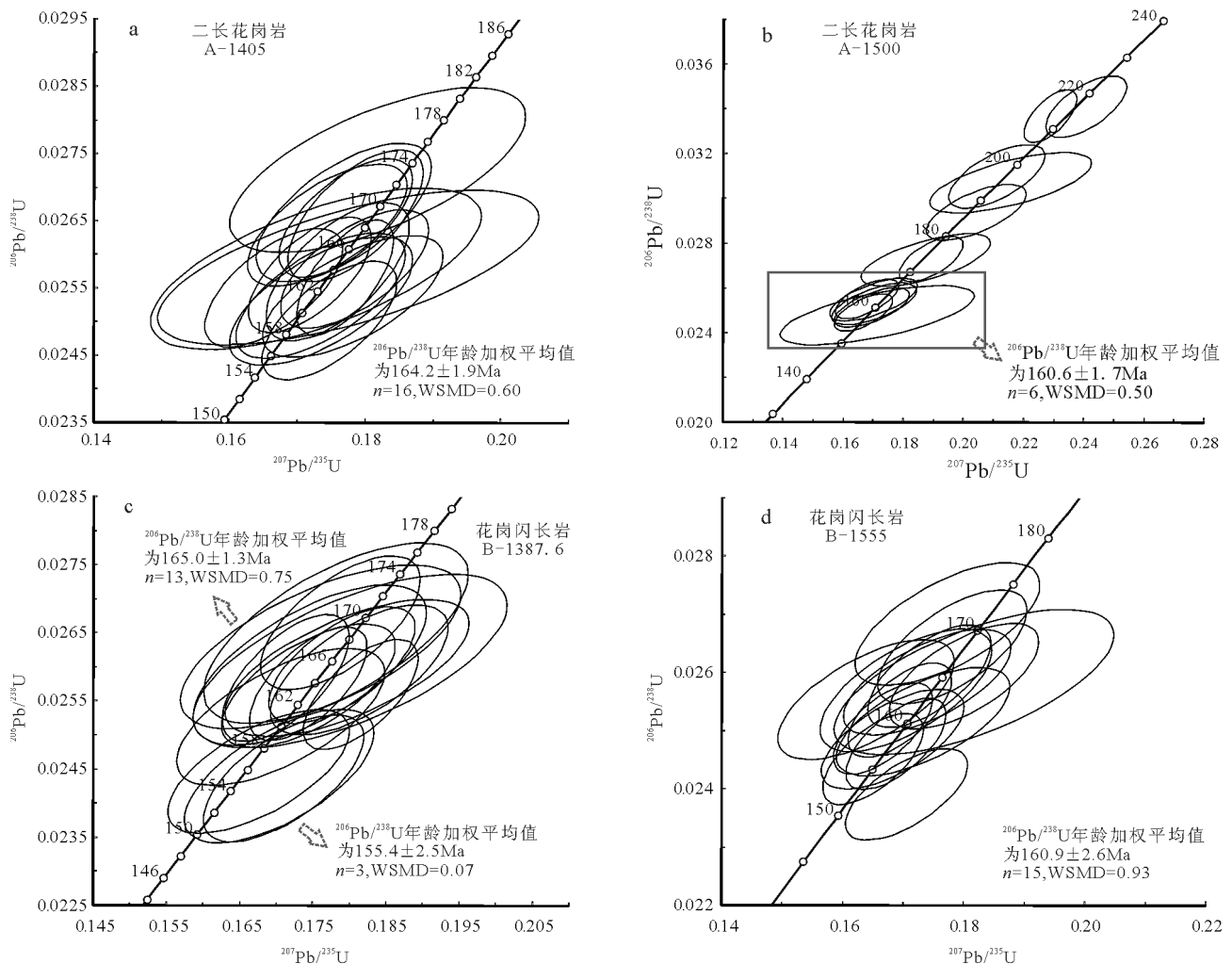


图4 锆石 U - Pb 谐和图

Fig. 4 Zircon U - Pb concordia diagrams

表 1 渤海海域庙西北凸起中生代花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 测年数据

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb dating data for Mesozoic granite of Miaoxibei uplift in Bohai Sea area

测试 点号	含量/ 10^{-6}		Th/U	同位素比值								年龄/Ma							
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1 σ
A-1405-2	155	402	0.39	0.0489	0.0011	0.1786	0.0041	0.0266	0.0004	0.0014	0.0000	141	54	167	3	169	3	27.3	0.8
A-1405-3	132	170	0.77	0.0486	0.0024	0.1818	0.0089	0.0273	0.0005	0.0032	0.0002	127	114	170	8	173	3	65	3
A-1405-4	239	387	0.62	0.0498	0.0016	0.1735	0.0055	0.0253	0.0004	0.0047	0.0002	188	77	162	5	161	2	95	5
A-1405-7	128	353	0.36	0.0497	0.0015	0.1734	0.0051	0.0254	0.0004	0.0044	0.0002	179	71	162	4	162	2	89	4
A-1405-8	320	615	0.52	0.0475	0.0012	0.1665	0.0042	0.0255	0.0004	0.0031	0.0001	74	57	156	4	162	2	62	3
A-1405-9	192	342	0.56	0.0485	0.0011	0.1771	0.0040	0.0266	0.0004	0.0039	0.0001	123	54	166	3	169	2	79	2
A-1405-10	341	569	0.60	0.0509	0.0012	0.1747	0.0041	0.0250	0.0004	0.0025	0.0001	234	54	163	4	159	2	50	1
A-1405-11	114	62	1.85	0.0499	0.0033	0.1775	0.0115	0.0258	0.0005	0.0065	0.0003	188	150	166	10	164	3	132	7
A-1405-14	142	157	0.90	0.0486	0.0029	0.1727	0.0100	0.0258	0.0005	0.0062	0.0005	128	134	162	9	164	3	125	10
A-1405-15	135	310	0.44	0.0482	0.0014	0.1768	0.0053	0.0266	0.0004	0.0024	0.0001	107	69	165	5	169	3	49	2
A-1405-16	366	282	1.30	0.0509	0.0016	0.1781	0.0054	0.0254	0.0004	0.0074	0.0005	236	73	166	5	162	2	148	10
A-1405-17	98	411	0.24	0.0478	0.0013	0.1744	0.0048	0.0264	0.0004	0.0069	0.0006	91	65	163	4	168	2	139	11
A-1405-18	802	1498	0.54	0.0500	0.0007	0.1770	0.0029	0.0257	0.0004	0.0031	0.0001	196	35	166	3	163	2	63	2
A-1405-20	550	755	0.73	0.0495	0.0012	0.1759	0.0043	0.0258	0.0004	0.0013	0.0001	172	57	165	4	164	3	26	1
A-1405-21	134	328	0.41	0.0502	0.0013	0.1784	0.0045	0.0258	0.0004	0.0063	0.0004	203	59	167	4	164	2	128	8
A-1405-22	50	650	0.08	0.0485	0.0010	0.1718	0.0037	0.0257	0.0004	0.0059	0.0005	123	51	161	3	164	2	119	9
A-1500-1	180	417	0.43	0.0501	0.0017	0.2041	0.0068	0.0294	0.0005	0.0013	0.0001	201	82	189	6	187	3	25	1
A-1500-2	188	484	0.39	0.0488	0.0017	0.1701	0.0057	0.0253	0.0004	0.0062	0.0006	138	81	159	5	161	2	124	12
A-1500-4	432	1108	0.39	0.0492	0.0008	0.2288	0.0036	0.0337	0.0005	0.0009	0.0000	158	37	209	3	214	3	17.4	0.4
A-1500-6	146	268	0.55	0.0496	0.0016	0.2110	0.0065	0.0310	0.0006	0.0007	0.0000	175	79	194	5	197	4	13.1	0.6
A-1500-7	155	78	1.98	0.0501	0.0039	0.1712	0.0132	0.0248	0.0005	0.0027	0.0002	199	179	160	11	158	3	55	3
A-1500-9	246	457	0.54	0.0489	0.0015	0.1694	0.0051	0.0251	0.0004	0.0061	0.0006	143	72	159	4	160	2	123	12
A-1500-10	60	169	0.36	0.0499	0.0024	0.1874	0.0088	0.0273	0.0005	0.0038	0.0004	190	111	174	8	173	3	77	7
A-1500-11	284	780	0.36	0.0503	0.0011	0.1892	0.0044	0.0273	0.0004	0.0015	0.0001	208	53	176	4	174	3	31	2
A-1500-12	153	383	0.40	0.0485	0.0011	0.1667	0.0040	0.0249	0.0003	0.0039	0.0002	124	57	157	3	159	2	79	3
A-1500-14	74	56	1.32	0.0509	0.0027	0.2155	0.0110	0.0307	0.0006	0.0009	0.0000	235	121	198	9	195	3	18.6	0.6
A-1500-16	139	278	0.50	0.0484	0.0017	0.1700	0.0060	0.0255	0.0004	0.0044	0.0003	117	83	159	5	162	2	88	6
A-1500-17	270	164	1.65	0.0477	0.0012	0.1678	0.0043	0.0255	0.0004	0.0011	0.0000	82	59	157	4	162	2	23	0.4
A-1500-20	189	391	0.48	0.0512	0.0012	0.2408	0.0055	0.0341	0.0006	0.0007	0.0000	252	56	219	5	216	3	14.5	0.4
B-1387.6-2	122	384	0.32	0.0487	0.0012	0.1788	0.0045	0.0267	0.0004	0.1788	0.0045	133	59	167	4	170	3	3324	76
B-1387.6-3	267	555	0.48	0.0491	0.0009	0.1744	0.0033	0.0258	0.0003	0.1744	0.0033	153	43	163	3	164	2	3248	56
B-1387.6-4	292	474	0.62	0.0514	0.0009	0.1815	0.0032	0.0256	0.0003	0.1815	0.0032	261	39	169	3	163	2	3371	55
B-1387.6-5	90	304	0.30	0.0490	0.0017	0.1706	0.0058	0.0253	0.0004	0.1706	0.0058	147	82	160	5	161	3	3183	100
B-1387.6-6	107	182	0.59	0.0502	0.0019	0.1797	0.0068	0.0260	0.0004	0.1797	0.0068	202	92	168	6	165	3	3340	117
B-1387.6-8	48	128	0.38	0.0486	0.0019	0.1746	0.0065	0.0260	0.0005	0.1746	0.0065	128	90	163	6	166	3	3252	112
B-1387.6-13	275	691	0.40	0.0481	0.0010	0.1713	0.0035	0.0258	0.0004	0.1713	0.0035	104	48	161	3	164	2	3196	61
B-1387.6-14	76	269	0.28	0.0492	0.0014	0.1744	0.0048	0.0257	0.0004	0.0079	0.0005	155	67	163	4	164	2	158	9
B-1387.6-16	212	149	1.43	0.0500	0.0025	0.1801	0.0088	0.0261	0.0005	0.0018	0.0001	196	116	168	8	166	3	36	2
B-1387.6-19	96	272	0.35	0.0487	0.0021	0.1781	0.0074	0.0265	0.0005	0.0007	0.0001	135	99	166	6	169	3	14	1
B-1387.6-20	72	269	0.27	0.0507	0.0014	0.1814	0.0050	0.0260	0.0004	0.0037	0.0002	225	64	169	4	165	2	75	4
B-1387.6-21	78	160	0.49	0.0485	0.0022	0.1760	0.0078	0.0263	0.0005	0.0020	0.0001	125	103	165	7	167	3	40	2
B-1387.6-22	143	331	0.43	0.0499	0.0011	0.1790	0.0041	0.0260	0.0004	0.0066	0.0003	188	54	167	4	166	2	133	7
B-1555-1	293	737	0.40	0.0488	0.0010	0.1650	0.0034	0.0245	0.0003	0.0066	0.0003	139	49	155	3	156	2	133	7
B-1555-2	127	364	0.35	0.0481	0.0017	0.1704	0.0058	0.0257	0.0004	0.0013	0.0001	104	80	160	5	164	3	26	1
B-1555-3	100	429	0.23	0.0465	0.0017	0.1638	0.0060	0.0255	0.0004	0.0034	0.0002	25	78	154	5	163	3	69	4

续表1

测试 点号	含量/10 ⁶		Th/U	同位素比值						年龄/Ma									
	Th	U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1 σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1 σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1 σ
B-1555-4	136	336	0.40	0.0491	0.0014	0.1682	0.0048	0.0249	0.0004	0.0068	0.0004	152	69	158	4	158	2	137	8
B-1555-5	112	329	0.34	0.0500	0.0017	0.1733	0.0059	0.0252	0.0004	0.0068	0.0006	193	82	162	5	160	2	138	11
B-1555-7	595	908	0.66	0.0518	0.0013	0.1705	0.0041	0.0239	0.0003	0.0074	0.0006	274	58	160	4	152	2	148	12
B-1555-8	374	655	0.57	0.0485	0.0010	0.1694	0.0035	0.0254	0.0003	0.0059	0.0003	123	49	159	3	161	2	118	6
B-1555-9	380	714	0.53	0.0483	0.0010	0.1666	0.0033	0.0250	0.0003	0.0057	0.0003	113	48	156	3	159	2	116	7
B-1555-11	358	577	0.62	0.0494	0.0010	0.1688	0.0034	0.0248	0.0003	0.0048	0.0003	167	47	158	3	158	2	96	5
B-1555-14	171	191	0.90	0.0488	0.0016	0.1739	0.0057	0.0258	0.0004	0.0064	0.0004	139	78	163	5	164	2	128	8
B-1555-15	225	514	0.44	0.0503	0.0014	0.1800	0.0051	0.0259	0.0004	0.0078	0.0007	210	67	168	4	165	2	157	13
B-1555-16	102	457	0.22	0.0487	0.0012	0.1743	0.0042	0.0259	0.0004	0.0064	0.0004	135	57	163	4	165	2	129	9
B-1555-21	40	152	0.27	0.0511	0.0027	0.1816	0.0094	0.0258	0.0005	0.0025	0.0002	244	124	169	8	164	3	51	4
B-1555-22	227	474	0.48	0.0479	0.0017	0.1773	0.0062	0.0268	0.0004	0.0076	0.0009	95	80	166	5	171	3	152	19
B-1555-23	122	294	0.42	0.0489	0.0014	0.1781	0.0050	0.0264	0.0004	0.0042	0.0003	141	67	166	4	168	3	85	5

155.4 ± 2.5Ma ($n=3$, MSWD=0.07) 和 165.0 ± 1.3Ma ($n=13$, MSWD=0.75)。

B井1555m样品测定了23颗锆石、23个分析点, U-Pb分析结果表明(表1), 校正后的锆石有效数据点为15个, 其所测锆石的阴极发光图像、测定点位和相应的²⁰⁶Pb/²³⁸U视年龄如图3-d所示。所测样品的Th/U值为0.22~0.9, 同样为岩浆锆石特征。LA-ICP-MS锆石U-Th-Pb同位素分析结果见表1、图4-d。15个数据点在²⁰⁶Pb/²³⁸U-²⁰⁷Pb/²³⁵U谐和图上均落在谐和线上或其附近, 15个²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄集中于152 ± 2~171 ± 3Ma之间, 给出的年龄加权平均值为160.9 ± 2.6Ma ($n=15$, MSWD=0.93)。

3.2 地球化学特征

表2列出了庙西北凸起所测花岗岩样品的主量、微量、稀土元素测定结果及计算所得的有关参数, 其中花岗闪长岩样品采自B井、C井、D井(具体深度见表2, C、D井井位坐标见图1), 二长花岗岩样品采自A井(具体深度见表2)。

3.2.1 主量元素

花岗闪长岩与二长花岗岩主量元素具有相似性, 其平均SiO₂含量分别为68.60%和69.67%; ALK(K₂O+Na₂O)含量分别为7.79%和8.19%; 两者A/NCK值分别为1.62和1.47, 说明样品均为铝过饱和; SiO₂-(Na₂O+K₂O)图解(图5-a)中^[19], 样品点均落于亚碱性区域内; SiO₂-FeO*/MgO图解(图略)中^[20], 样品点落于钙碱性区域内, 花岗闪长岩和二长花岗岩里特曼指数(σ)分别为1.79~2.90和1.84~

3.30, 均为钙碱性系列; A/CNK-A/NK图解(图5-b)显示, 样品均为(强)过铝质。此外, 蓬莱9-1构造花岗闪长岩的烧失量为0.2%~4.7%, 二长花岗岩烧失量为0.9%~2.7%, 说明样品经历了强烈的剥蚀作用。

在Harker图解上, 花岗闪长岩与二长花岗岩表现出不同的演化特征(图略)。花岗闪长岩中MgO、TFeO含量与SiO₂含量呈负相关, 而二长花岗岩中MgO、TFeO含量与SiO₂含量呈弱的正相关或相关性差, 说明花岗闪长岩形成过程中, 铁镁质矿物对其有一定的贡献。

3.2.2 微量及稀土元素

花岗闪长岩样品稀土元素总量(Σ REE)介于110 × 10⁻⁶~191 × 10⁻⁶之间, 平均值为145 × 10⁻⁶; 轻稀土元素(LREE)含量介于94 × 10⁻⁶~172 × 10⁻⁶之间, 平均值为127 × 10⁻⁶; 重稀土元素(HREE)含量介于6 × 10⁻⁶~10 × 10⁻⁶之间, 平均值为8 × 10⁻⁶; LREE/HREE值介于11.39~20.93之间, 平均值为16.17, 说明轻、重稀土元素分异明显。二长花岗岩样品稀土元素总量介于57 × 10⁻⁶~123 × 10⁻⁶之间, 平均值为87 × 10⁻⁶; LREE含量变化范围介于49 × 10⁻⁶~110 × 10⁻⁶之间, 平均值为76 × 10⁻⁶; HREE含量变化范围介于3 × 10⁻⁶~6 × 10⁻⁶之间, 平均值为4%; LREE/HREE值介于13.93~20.72之间, 平均值为17.64, 同样说明轻、重稀土元素分异明显。2种岩性样品(Ce/Yb)_N值显示, 两者整体具有重稀土元素亏损、轻稀土元素富集的特征, 且 δ Eu均大于1, 说明Eu具有正异常。

2种样品在球粒陨石标准化稀土元素配分模式

表 2 庙西北凸起中生代花岗岩主量、微量和稀土元素分析数据

Table 2 Major, trace and rare earth element data for Mesozoic granite of Miaoxibei uplift

元素	B井/m				C井/m								D井/m					
	1387.4	1492.5	1493.6	1498	1499.4	1502	1503.95	1505.6	1511.9	1514.85	1518.37	1518.6	1602.85	1603.77	1604	1605.5	1605.79	1640.76
SiO ₂	68.20	68.55	68.91	68.59	68.51	68.74	68.80	69.05	66.57	69.48	70.41	71.77	67.65	68.34	68.64	67.73	67.81	68.19
Al ₂ O ₃	15.00	17.19	16.28	16.19	15.72	16.36	16.58	16.31	14.84	15.69	15.80	14.93	16.32	16.51	16.74	16.45	16.25	15.79
TFe ₂ O ₃	2.44	2.06	2.62	3.23	3.86	3.31	2.74	2.71	2.83	2.51	2.29	2.12	3.64	3.15	2.96	3.31	3.42	3.35
MgO	0.65	0.37	0.48	0.52	0.53	0.51	0.48	0.54	0.48	0.48	0.37	0.43	0.51	0.59	0.55	0.62	0.57	0.83
CaO	3.10	1.78	2.13	2.42	2.35	2.70	2.58	2.50	3.05	1.23	2.19	2.30	0.65	0.89	0.64	0.75	0.74	3.06
Na ₂ O	4.99	5.51	4.53	4.92	4.68	4.86	4.78	4.89	4.12	4.61	4.68	4.41	5.10	4.52	4.60	4.51	4.94	4.44
K ₂ O	2.89	2.94	3.41	2.52	2.44	2.89	3.31	2.98	2.89	3.17	2.79	2.76	3.27	3.33	3.48	3.85	3.54	2.72
MnO	0.07	0.04	0.06	0.08	0.23	0.08	0.07	0.07	0.27	0.06	0.05	0.06	0.09	0.13	0.05	0.15	0.07	0.08
TiO ₂	0.19	0.22	0.23	0.23	0.23	0.22	0.19	0.23	0.10	0.20	0.20	0.20	0.26	0.28	0.28	0.27	0.24	0.30
P ₂ O ₅	0.09	0.10	0.09	0.10	0.09	0.10	0.08	0.10	0.09	0.15	0.09	0.09	0.12	0.14	0.13	0.13	0.13	0.13
FeO	1.15	1.00	0.95	1.45	1.30	0.90	1.45	1.45	1.50	0.90	0.95	0.95	2.55	1.90	1.95	1.65	1.75	1.70
烧失量	2.30	1.24	1.25	1.19	1.34	0.20	0.37	0.59	4.71	2.39	1.12	0.91	2.35	2.11	1.91	2.22	2.27	1.09
总量	97.63	98.76	98.73	98.79	98.64	99.77	99.62	99.37	95.24	97.57	98.87	99.07	97.62	97.87	98.07	97.76	97.71	98.88
ALK	7.88	8.45	7.94	7.44	7.12	7.75	8.09	7.87	7.01	7.78	7.47	7.17	8.37	7.85	8.08	8.36	8.48	7.16
AKI	0.53	0.49	0.49	0.46	0.45	0.47	0.49	0.48	0.47	0.50	0.47	0.48	0.51	0.48	0.48	0.51	0.52	0.45
K/Na	0.58	0.53	0.75	0.51	0.52	0.59	0.69	0.61	0.70	0.69	0.60	0.63	0.64	0.74	0.76	0.85	0.72	0.61
A/NKC	1.37	1.68	1.62	1.64	1.66	1.57	1.55	1.57	1.48	1.74	1.64	1.58	1.81	1.89	1.92	1.81	1.76	1.55
δ	2.46	2.79	2.43	2.16	1.99	2.33	2.54	2.38	2.08	2.29	2.04	1.79	2.84	2.43	2.55	2.83	2.90	2.04
La	33.40	27.20	25.40	30.50	23.70	29.30	29.60	45.90	35.20	36.80	33.80	25.50	26.30	28.90	39.80	40.70	44.80	27.20
Ce	60.50	50.00	46.70	54.90	43.10	52.70	52.90	79.40	62.70	62.20	63.30	44.70	49.90	51.70	71.00	71.20	76.00	50.10
Pr	6.89	5.45	5.48	6.10	4.76	6.20	5.83	8.74	6.68	7.12	7.45	4.92	5.34	5.74	7.86	7.96	8.88	6.12
Nd	24.30	20.50	21.20	23.50	18.90	24.60	21.40	33.00	24.60	27.70	29.30	19.00	20.80	21.80	31.20	31.60	35.50	25.60
Sm	3.35	3.39	3.56	3.19	2.71	3.74	2.98	4.21	3.42	3.96	4.50	2.75	2.85	2.82	4.44	3.99	4.63	3.80
Eu	1.17	1.25	1.68	1.22	0.97	1.33	1.22	1.44	4.68	2.63	1.45	1.10	1.22	1.02	1.25	1.84	1.65	1.43
Gd	2.60	2.55	3.11	2.74	2.37	2.89	2.69	3.25	5.25	3.73	3.44	2.91	2.53	2.16	3.52	3.72	3.76	3.73
Tb	0.32	0.31	0.42	0.35	0.28	0.38	0.31	0.40	0.36	0.39	0.48	0.37	0.26	0.26	0.42	0.41	0.40	0.49
Dy	1.70	1.69	2.20	1.87	1.70	2.18	1.62	2.20	1.77	2.01	2.56	1.86	1.26	1.45	1.79	1.88	1.77	2.45
Ho	0.31	0.29	0.43	0.31	0.30	0.34	0.26	0.32	0.29	0.33	0.42	0.32	0.25	0.26	0.33	0.33	0.30	0.46
Er	0.81	0.77	1.20	0.92	0.86	1.07	0.73	1.03	1.01	1.02	1.20	0.96	0.70	0.70	0.92	0.90	0.86	1.20
Tm	0.13	0.12	0.19	0.17	0.15	0.17	0.13	0.18	0.13	0.17	0.22	0.15	0.12	0.12	0.15	0.16	0.13	0.19
Yb	0.84	0.98	1.41	1.00	0.92	1.39	0.73	0.98	0.99	1.00	1.18	0.97	0.66	0.80	1.07	0.99	0.85	1.16
Lu	0.13	0.13	0.18	0.18	0.14	0.19	0.11	0.14	0.13	0.14	0.18	0.12	0.11	0.13	0.15	0.15	0.13	0.15
Li	9.94	18.70	19.90	25.80	19.30	24.60	21.40	22.30	16.40	16.00	17.30	13.20	10.30	11.20	9.15	12.00	14.90	20.30
Be	0.76	1.80	1.42	1.61	1.69	1.84	1.40	1.36	1.44	1.47	1.41	1.20	1.17	1.55	1.89	1.45	1.58	1.44
Sc	2.52	2.70	3.04	2.79	2.66	2.79	2.64	2.96	3.03	2.99	3.17	2.55	3.06	3.01	3.27	3.24	3.33	3.37
V	30.60	23.90	27.10	27.90	26.20	31.70	25.60	27.30	35.10	23.80	27.90	25.00	34.70	37.80	38.40	40.70	39.90	44.80
Cr	6.20	128.00	11.20	11.80	11.80	11.60	9.37	10.10	12.00	12.40	10.10	10.40	11.50	11.00	10.90	12.70	14.90	12.80
Co	3.01	3.49	3.69	3.56	9.03	3.89	3.39	3.77	3.57	2.81	3.44	2.80	4.09	3.41	3.83	4.43	4.54	4.83
Ni	4.49	5.70	5.81	4.46	5.24	5.15	4.24	4.28	5.35	4.26	3.84	4.10	3.17	2.54	3.03	3.94	4.38	4.71
Cu	8.29	11.00	13.20	12.00	15.30	15.40	10.10	9.37	20.20	16.30	10.50	9.60	13.50	13.30	9.59	14.20	18.80	13.90
Zn	40.90	59.00	53.10	54.90	49.40	82.80	43.80	58.20	120.00	70.20	53.90	45.80	50.00	45.20	47.50	55.90	55.30	57.60
Ga	16.00	20.50	17.70	20.10	17.60	21.10	18.00	20.80	19.10	20.00	20.50	17.70	18.30	19.00	19.20	21.30	21.30	19.60
Rb	71.70	81.80	84.70	73.80	61.90	82.70	75.30	79.40	94.60	115.00	75.10	69.10	83.90	89.30	104.00	103.00	98.30	68.00
Sr	843	797	783	783	679	909	808	846	820	649	845	751	539	489	485	642	740	904
Y	9.03	8.86	12.90	9.97	9.00	11.50	7.96	10.30	9.27	10.50	13.40	10.40	7.29	7.19	9.72	9.72	8.80	13.50
Nb	6.22	11.40	8.47	6.92	6.46	8.09	5.62	6.68	5.67	7.64	8.86	7.06	6.22	6.07	8.14	6.74	7.69	8.49
Mo	0.34	0.72	0.75	0.87	1.87	0.77	0.40	0.46	1.03	0.87	0.26	0.43	0.45	0.19	0.23	0.84	1.06	0.43
Cd	0.49	0.06	0.08	0.02	0.04	0.07	0.09	0.08	0.37	0.10	0.05	0.06	0.04	0.04	0.06	0.07	0.08	0.03
In	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.01	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.01	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03

续表2-1

元素	B井/m				C井/m								D井/m					
	1387.4	1492.5	1493.6	1498	1499.4	1502	1503.95	1505.6	1511.9	1514.85	1518.37	1518.6	1602.85	1603.77	1604	1605.5	1605.79	1640.76
Sb	0.19	0.12	0.34	0.28	0.37	0.29	0.13	0.15	7.59	2.99	0.12	0.12	0.44	0.21	0.31	0.59	0.34	0.14
Cs	0.77	1.43	1.34	1.16	1.14	1.11	0.95	1.19	1.55	1.91	0.93	0.75	1.69	1.40	2.12	1.53	1.62	1.70
Ba	1265	841	1498	706	723	861	1021	1002	6392	3087	888	816	1347	1018	1076	2142	1728	1174
Ta	0.42	0.55	0.63	0.47	0.44	0.58	0.38	0.46	0.41	0.53	0.52	0.48	0.44	0.45	0.61	0.53	0.59	0.72
W	0.35	8.04	0.36	0.31	0.26	0.15	0.10	0.10	0.84	1.39	0.16	0.09	0.34	0.56	2.05	0.78	0.60	0.13
Tl	0.46	0.49	0.52	0.47	0.62	0.45	0.41	0.43	1.59	1.10	0.38	0.39	0.52	0.47	0.61	0.63	0.56	0.35
Pb	18.80	19.50	24.70	21.40	326.00	24.20	20.60	23.50	177.00	63.40	28.20	21.40	24.00	15.50	16.10	28.10	21.60	19.90
Bi	0.06	0.09	0.13	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03	0.04	0.06	0.03	0.03	0.11	0.06	0.05	0.05	0.04	0.02
Th	4.02	3.57	3.97	6.34	3.22	3.95	3.31	7.97	3.50	4.06	4.41	2.80	3.99	3.60	4.35	4.66	5.50	3.13
U	2.77	5.67	7.40	3.53	3.95	8.14	3.68	1.90	1.42	2.23	0.80	0.51	1.38	1.12	1.00	1.14	1.37	0.80
Zr	43.90	70.10	53.60	62.70	58.00	67.20	46.90	52.60	36.50	46.30	43.00	36.50	35.90	32.70	31.40	26.70	26.60	31.70
Hf	1.34	2.37	1.95	2.01	1.88	2.27	1.54	1.80	1.09	1.39	1.56	1.18	1.39	1.15	1.24	0.89	1.13	1.18
δEu	1.21	1.30	1.54	1.26	1.17	1.24	1.32	1.19	3.38	2.09	1.13	1.19	1.39	1.26	0.97	1.46	1.21	1.16
ΣREE	145.48	123.50	126.05	136.91	109.86	137.98	128.47	191.49	156.48	159.69	162.88	116.04	119.59	125.04	173.62	175.54	188.45	137.57
LREE	129.61	107.79	104.02	119.41	94.14	117.87	113.93	172.69	137.28	140.41	139.80	97.97	106.41	111.98	155.55	157.29	171.46	114.25
HREE	6.84	6.85	9.13	7.53	6.72	8.61	6.58	8.50	9.93	8.78	9.68	7.67	5.89	5.87	8.35	8.53	8.19	9.82
LREE/HREE	18.94	15.74	11.39	15.86	14.00	13.69	17.31	20.33	13.82	15.98	14.44	12.78	18.06	19.08	18.63	18.43	20.93	11.63
元素	A井/m																	
	1300	1320	1330	1340	1350	1360	1370	1380	1390	1410	1420	1435	1450	1460	1470	1475	1485	1500
SiO ₂	71.73	70.54	69.92	72.12	71.91	70.86	70.93	71.08	71.40	68.86	69.10	67.36	66.99	69.24	69.69	67.37	68.68	69.21
Al ₂ O ₃	13.27	14.56	14.25	14.18	13.85	14.13	14.58	14.30	14.63	16.01	15.47	15.32	14.95	14.83	15.26	16.28	15.85	15.60
Fe ₂ O ₃ ^T	4.14	3.78	4.02	2.41	3.11	3.35	2.92	3.11	2.11	2.30	2.59	3.87	4.38	3.71	2.38	2.12	1.91	2.19
MgO	0.38	0.44	0.52	0.49	0.53	0.54	0.46	0.45	0.46	0.45	0.52	0.50	0.67	0.57	0.51	0.46	0.39	0.44
CaO	1.56	1.77	1.96	1.76	1.52	1.47	1.72	1.30	1.25	2.19	2.14	2.02	2.41	2.26	2.14	2.49	2.30	1.97
Na ₂ O	3.51	3.91	4.02	3.86	3.91	3.60	3.98	4.03	4.16	4.38	4.13	4.08	4.39	3.84	4.18	4.42	4.44	4.41
K ₂ O	3.76	3.91	3.79	3.85	3.69	4.31	4.08	4.06	4.24	4.29	4.24	4.13	4.11	3.93	4.12	4.55	4.06	4.50
MnO	0.05	0.06	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.09	0.09	0.06	0.06	0.05	0.07
TiO ₂	0.10	0.11	0.12	0.12	0.13	0.11	0.11	0.14	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.14	0.14	0.13	0.13	0.11
P ₂ O ₅	0.05	0.06	0.08	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.04	0.07	0.06	0.07	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05
FeO	3.55	3.00	3.10	1.60	2.20	2.50	2.50	2.60	1.35	1.15	1.75	2.75	3.45	2.70	1.70	1.30	1.00	1.30
烧失量	1.44	0.85	1.22	1.06	1.20	1.47	1.07	1.38	1.50	1.22	1.49	2.36	1.62	1.27	1.42	2.00	2.06	1.42
总量	98.55	99.15	98.74	98.91	98.75	98.49	98.90	98.59	98.46	98.74	98.45	97.56	98.20	98.67	98.53	97.95	97.88	98.55
ALK	7.27	7.82	7.81	7.71	7.60	7.91	8.06	8.09	8.40	8.67	8.37	8.21	8.50	7.77	8.30	8.97	8.50	8.91
AKI	0.55	0.54	0.55	0.54	0.55	0.56	0.55	0.57	0.57	0.54	0.54	0.54	0.57	0.52	0.54	0.55	0.54	0.57
K/Na	1.07	1.00	0.94	1.00	0.94	1.20	1.03	1.01	1.02	0.98	1.03	1.01	0.94	1.02	0.99	1.03	0.91	1.02
A/NKC	1.50	1.52	1.46	1.50	1.52	1.51	1.49	1.52	1.52	1.47	1.47	1.50	1.37	1.48	1.46	1.42	1.47	1.43
δ	1.84	2.22	2.27	2.04	2.00	2.25	2.33	2.33	2.48	2.91	2.68	2.77	3.01	2.30	2.58	3.30	2.81	3.03
La	13.90	12.60	12.40	14.20	17.50	16.40	18.80	13.40	21.90	25.10	17.10	20.40	18.60	19.70	27.60	27.00	28.50	24.70
Ce	26.30	23.90	23.10	25.90	32.60	30.50	35.00	24.50	38.30	46.20	32.30	37.40	33.90	36.70	49.90	50.30	52.00	45.10
Pr	2.90	2.83	2.67	2.92	3.71	3.37	3.83	2.71	3.82	5.16	3.72	4.16	3.90	4.13	5.52	5.64	5.69	5.12
Nd	11.20	9.83	9.12	10.50	12.80	11.50	13.30	10.30	13.50	18.10	13.10	15.40	14.30	14.90	19.30	19.80	20.00	17.70
Sm	1.76	1.50	1.27	1.71	2.05	1.86	1.97	1.40	1.91	2.62	1.99	2.18	1.98	2.28	2.39	2.84	2.70	2.69
Eu	0.78	0.77	0.82	0.82	0.84	0.85	0.85	0.70	0.76	0.93	0.68	0.83	0.71	0.84	0.90	0.99	1.09	0.96
Gd	1.21	1.25	0.91	1.17	1.33	1.16	1.20	1.03	1.44	1.78	1.44	1.53	1.60	1.61	1.83	2.07	1.97	1.93
Tb	0.20	0.17	0.16	0.19	0.20	0.19	0.16	0.12	0.15	0.24	0.21	0.19	0.20	0.22	0.20	0.21	0.24	0.25
Dy	1.09	0.65	0.79	0.99	0.95	0.82	1.04	0.64	0.99	1.19	1.14	1.13	1.09	1.19	1.23	1.12	1.40	1.24
Ho	0.19	0.15	0.13	0.16	0.19	0.18	0.16	0.15	0.18	0.20	0.17	0.22	0.23	0.20	0.22	0.26	0.24	0.25
Er	0.62	0.47	0.47	0.47	0.46	0.49	0.45	0.44	0.48	0.60	0.56	0.59	0.54	0.71	0.65	0.67	0.73	0.74
Tm	0.10	0.07	0.07	0.08	0.09	0.08	0.09	0.06	0.07	0.12	0.11	0.10	0.12	0.10	0.11	0.13	0.12	0.12
Yb	0.59	0.48	0.47	0.57	0.69	0.52	0.65	0.44	0.50	0.63	0.73	0.63	0.76	0.70	0.81	0.89	1.05	0.92
Lu	0.08	0.08	0.08	0.09	0.12	0.11	0.08	0.10	0.07	0.10	0.13	0.09	0.10	0.10	0.14	0.13	0.16	0.15
Li	17.00	20.90	23.20	18.00	19.90	23.90	21.40	20.30	25.50	20.90	22.70	22.00	26.10	22.80	19.00	16.00	24.80	23.60

续表 2-2

元素	A 井/m																	
	1300	1320	1330	1340	1350	1360	1370	1380	1390	1410	1420	1435	1450	1460	1470	1475	1485	1500
Be	1.42	1.18	1.44	1.18	1.82	1.57	1.05	1.59	1.31	1.50	1.63	1.47	1.82	1.60	2.36	1.86	2.07	2.24
Sc	2.26	2.28	2.06	2.25	2.20	2.30	2.23	2.26	2.12	2.08	2.49	2.48	2.71	2.60	1.97	2.23	2.40	2.46
V	34.30	19.00	23.40	25.60	23.30	22.60	25.40	20.20	15.90	18.80	18.30	20.60	21.00	18.10	18.10	18.90	18.10	22.40
Cr	12.60	8.64	6.78	10.90	10.00	11.60	15.20	9.91	14.80	9.12	22.50	20.50	16.00	13.10	8.32	6.74	14.00	8.14
Co	4.29	3.52	3.10	3.65	9.46	3.00	3.06	2.56	2.71	3.09	5.02	6.12	4.45	3.45	2.43	2.41	3.10	3.47
Ni	5.03	4.71	3.60	4.53	8.84	4.54	5.31	3.14	4.57	3.68	6.25	5.52	4.62	3.77	3.23	2.78	3.82	4.04
Cu	8.67	9.02	6.07	9.42	7.85	6.84	8.60	5.45	7.25	7.60	12.00	11.50	8.68	6.51	8.55	6.71	6.12	6.71
Zn	39.50	42.40	40.40	45.00	40.30	66.90	61.50	43.30	48.10	48.80	51.70	60.10	48.70	45.30	41.70	38.70	42.30	51.90
Ga	15.50	17.10	16.70	17.20	16.80	15.60	18.10	18.00	17.70	19.40	18.60	19.20	18.90	20.10	21.40	21.20	21.70	20.50
Rb	88.50	89.20	93.50	97.70	103.00	105.00	99.30	108.00	97.80	97.80	112.00	97.00	110.00	117.00	122.00	112.00	117.00	116.00
Sr	617	646	665	634	615	766	627	575	746	818	678	724	758	780	746	713	850	733
Y	5.64	5.12	4.71	5.03	5.95	5.67	5.26	4.26	5.21	6.19	6.41	6.18	6.49	6.67	7.39	7.36	7.52	7.78
Nb	4.68	4.60	4.65	5.41	5.66	5.57	6.12	5.25	4.89	5.41	6.37	5.17	5.70	6.27	7.18	7.27	6.47	6.84
Mo	0.87	0.76	0.61	1.25	1.25	1.64	3.01	1.01	0.78	1.16	2.78	2.28	1.89	1.14	1.15	0.93	1.44	0.54
Cd	0.08	0.04	0.03	0.01	0.04	0.11	0.04	0.06	0.04	0.07	0.05	0.05	0.07	0.04	0.03	0.08	0.04	0.17
In	0.02	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
Sb	0.39	0.17	0.15	0.33	0.14	0.27	0.30	0.23	0.24	0.18	0.51	0.44	0.33	0.29	0.23	0.20	0.31	0.92
Cs	1.05	0.89	0.97	1.05	1.15	1.31	1.16	1.29	1.13	1.16	1.33	1.33	1.61	1.50	1.30	1.12	1.19	1.46
Ba	1384	1258	1317	1261	1424	1703	1270	1271	1658	1682	1332	1446	1447	1500	1536	1447	1813	1516
Ta	0.31	0.29	0.29	0.34	0.53	0.37	0.38	0.29	0.38	0.39	0.46	0.38	0.35	0.40	0.60	0.55	0.53	0.50
W	5.85	2.35	5.54	4.46	86.10	2.79	2.89	2.29	2.26	3.30	7.36	18.10	5.90	2.93	2.49	1.72	3.13	3.48
Tl	0.52	0.50	0.49	0.57	0.54	0.56	0.54	0.64	0.57	0.53	0.70	0.61	0.68	0.64	0.76	0.64	0.73	0.63
Pb	22.90	18.80	18.50	20.50	22.10	23.50	20.90	19.00	20.10	21.60	28.10	23.60	25.70	24.60	28.90	23.10	30.00	30.80
Bi	0.03	0.03	0.01	0.03	0.02	0.02	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.02	0.04	0.02	0.03	0.03
Th	2.23	2.40	1.66	2.01	2.55	2.33	2.62	2.17	3.24	3.69	3.29	3.71	2.82	3.17	4.06	4.64	4.06	3.61
U	0.63	0.67	0.49	0.85	0.74	1.19	0.68	0.56	0.61	0.74	1.37	1.41	0.72	0.80	1.18	0.76	1.04	0.72
Zr	35.50	22.00	22.50	24.00	33.60	27.90	32.30	26.30	37.30	40.70	43.30	34.60	39.10	42.70	43.80	41.00	50.60	45.90
Hf	1.35	0.94	1.27	1.23	1.53	1.20	1.42	1.27	1.78	1.80	1.92	1.27	1.44	1.67	1.92	1.90	2.10	2.26
δEu	1.63	1.71	2.33	1.77	1.56	1.78	1.69	1.78	1.41	1.31	1.23	1.40	1.22	1.33	1.32	1.25	1.45	1.29
ΣREE	66.56	59.86	57.16	64.79	79.48	73.69	82.85	60.25	89.27	109.15	79.78	91.03	84.51	90.05	118.19	119.41	123.40	109.64
LREE	56.84	51.43	49.38	56.05	69.50	64.48	73.75	53.01	80.19	98.11	68.89	80.37	73.39	78.55	105.61	106.57	109.98	96.27
HREE	4.08	3.31	3.07	3.71	4.02	3.54	3.84	2.98	3.87	4.86	4.48	4.48	4.63	4.83	5.19	5.48	5.90	5.59
LREE/HREE	13.93	15.53	16.07	15.09	17.28	18.24	19.23	17.81	20.72	20.20	15.39	17.95	15.84	16.26	20.37	19.45	18.63	17.21

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素为 10^{-6}

图(图 6)和原始地幔标准化蛛网图(图 7)中分布规律一致,所有样品的稀土元素配分曲线整体形态一致,表现出轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的右倾平滑曲线, Eu 明显正异常。从原始地幔标准化蛛网图可以看出,大离子亲石元素(LILE)富集程度较强,在蛛网图中表现为明显的峰,如 Pb、Sr;而高场强元素(HFSE)则表现出一定的亏损,在蛛网图中为明显的谷,如 Th、Nb、Zr 等。

4 讨论

4.1 花岗岩形成年代

受限于海域内钻井数量和年代分析数据不足,

火山岩中缺乏古生物证据,海域内火山岩年代学一直存在争议。前人认为,研究区花岗岩年代为太古代,但本文采用精确度较高的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,对构造区花岗岩进行系统的年代学测定,得到的二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄加权平均值为 $164.2 \pm 1.9\text{Ma}$ (样品 A-1405)和 $160.6 \pm 1.7\text{Ma}$ (样品 A-1500),花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄加权平均值为 $155.4 \pm 2.5\text{Ma}$ 、 $165.0 \pm 1.3\text{Ma}$ (样品 B-1387.6)、 $160.9 \pm 2.6\text{Ma}$ (样品 B-1555)。根据本次锆石阴极发光图像,锆石具有明显的韵律环带,反映锆石是在岩浆房形成的。对于这类锆石有学者认为,最年轻颗粒的年龄最接

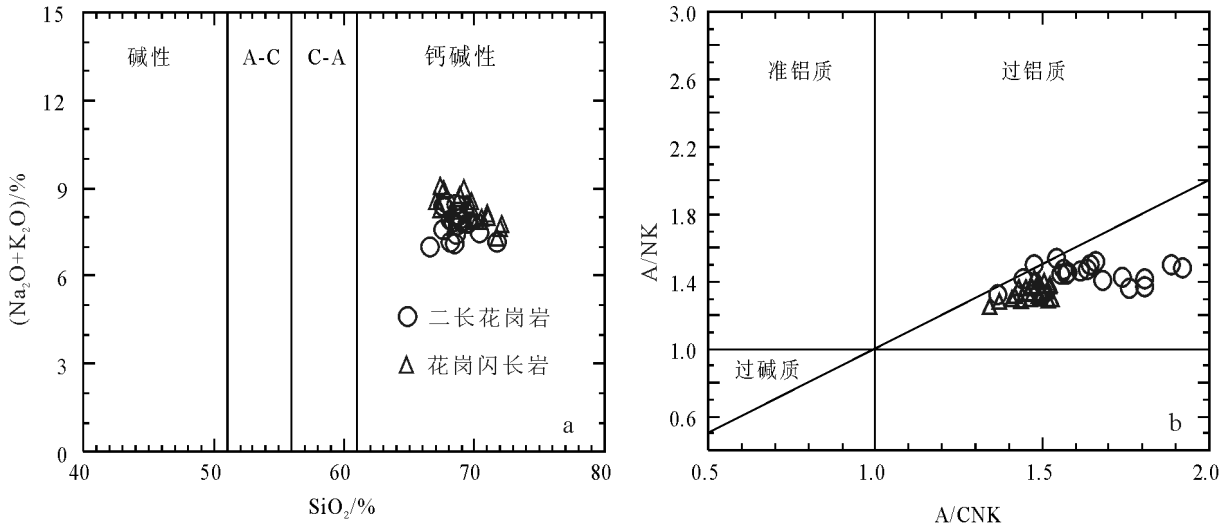


图5 庙西北凸起中生代花岗岩岩石类型判别图
 Fig. 5 Whole-rock SiO₂ versus (Na₂O+K₂O) (a) and A/CNK-A/NK (b) diagrams for Mesozoic granite of Miaoxibei uplift
 a—SiO₂-(Na₂O+K₂O)图解; b—A/CNK-A/NK图解。
 A-C—碱性-钙碱性; C-A—钙碱性-碱性

近火山喷发的年龄,可以用最年轻锆石的年龄代表火山的喷发年龄^[21]。本次研究获得的最年轻锆石U-Pb年龄为155.4±2.5Ma,该年龄被解释为岩浆结晶年龄,故潜山花岗岩形成时期为早、中侏罗世,为海域内首个中生界花岗岩潜山油藏。

受印支运动和燕山运动影响,华北板块在中生代发生广泛的火山活动,与之有关的火山岩许多学者进行了研究^[22-26],认为晚印支运动形成的

碱性岩局地分散在华北板块,早燕山期的高Sr、低Y火山岩广泛分布于华北板块,晚燕山期火山岩则受控于郯庐断裂及大兴安岭-太行山脉。但对于渤海湾盆地,尤其是渤海海域之前对于火山岩的研究大多限于新生代火山岩^[27-29],有学者对济阳坳陷中生界火山岩做了系统研究,将凹陷内中生界火山岩划分为6个时期^[30]。本次研究所确定的花岗岩形成时期与华北地区早—中侏罗世(燕山早期)侵入岩形

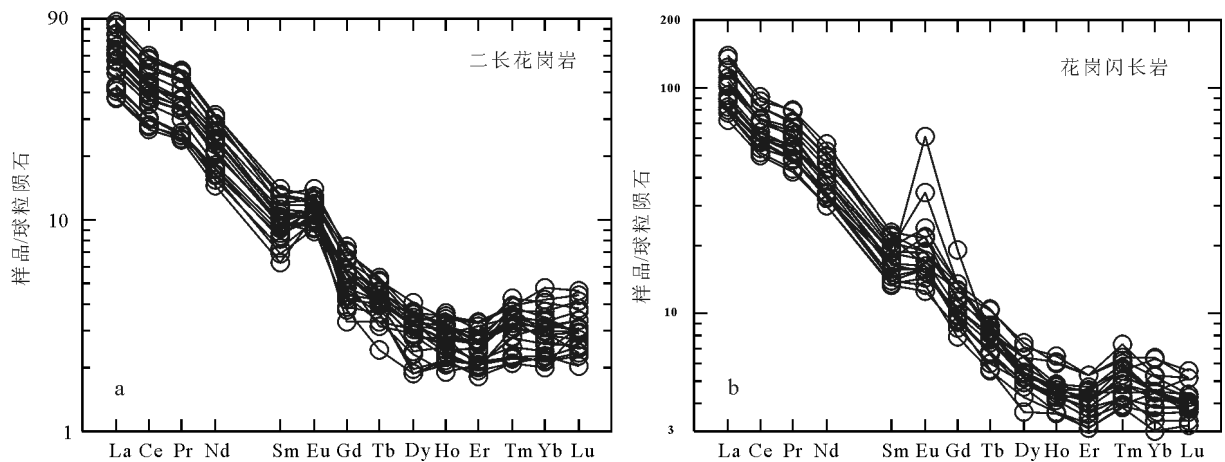


图6 庙西北凸起中生代花岗岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图解
 (球粒陨石标准化值据参考文献[20])
 Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns for Mesozoic granite of Miaoxibei uplift

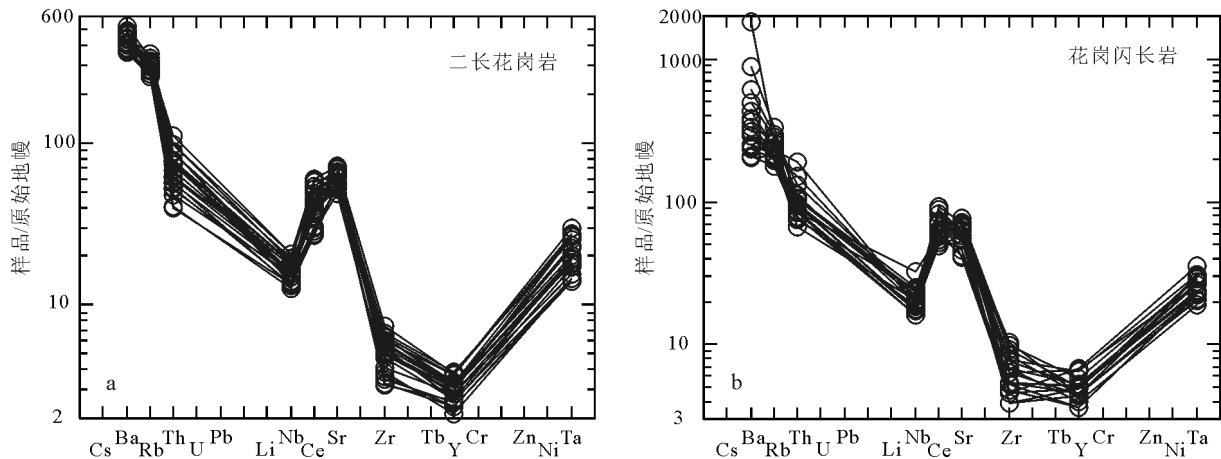


图7 庙西北凸起中生代花岗岩微量元素原始地幔标准化蛛网图
(原始地幔标准化值据参考文献[20])

Fig. 7 Primitive-mantle-normalized trace element patterns
for Mesozoic granite of Miaoxibei uplift

成时代中的第二个集中时段(155~175Ma, SHRIMP)吻合,意味着渤海海域中生代盆地演化与华北地区中生代火山活动有着密切关系。

4.2 源岩特征及花岗岩类型

原始地幔标准化蛛网图上,重稀土元素富集、轻稀土元素亏损,Sm/Nd值为0.15,正Eu异常,表明岩浆主要来源于上地壳物质的部分熔融,低稀土元素含量及高LREE/HREE值显示,源岩可能为角闪岩或榴辉岩,高Sr/Y值显示,在岩浆源区斜长石已经不稳定并开始熔融,残留相不存在或很少存在斜长石。区域地质研究也证实,花岗岩可能为下地壳来源。基于该认识,笔者认为,本区花岗岩是在早一中侏罗世地壳物质发生熔融上升侵入形成的。

花岗岩成因分类目前使用最广的是MISA型(即M、I、S和A型),对于不同成因类型花岗岩的划分前人给出大量的文献^[31-33]。根据这些划分原则,研究区两类花岗岩均为过铝质S型花岗岩,主要表现为:①铝饱和指数(A/CNK)介于1.13~1.92之间,均大于1.1,这与高分异I型花岗岩及铝质A型花岗岩存在差异^[34];②研究区花岗岩SiO₂含量较小,K/Na值较高,相对富钾与I型花岗岩相区分,同时TiO₂和P₂O₅含量均大于0.1,碱铝指数(AKI)平均值(0.58)低于A型花岗岩下限值;③右倾球粒陨石标准化曲线配分样式,低Zr、Nb、Zn含量及低于350×10⁻⁶的Zr+Nb+Ce+Y含量值,说明构造区花岗岩不

同于A型花岗岩^[31];④P₂O₅含量随SO₂含量增加基本保持不变,符合S型花岗岩特征^[35]。

4.3 构造意义

华北板块经历了印支运动的改造后,在燕山期进入新的构造演化时期,其形成的南北成带、东西分块的区域构造格局发生了明显改变^[30]。早、中侏罗世由于受扬子板块碰撞后持续效应的影响及构造应力的改变,使整个区域内火山岩发育。其侵入岩主要分布在燕山带的两侧,岩石类型以花岗岩、花岗闪长岩为主;喷出岩主要见于燕山、阴山、山东、辽西等地,以安山岩和玄武岩为主,火山作用主要集中在东部隆起区的断陷盆地内。研究区所获得的锆石U-Pb年龄证实,海域内在燕山期同样有明显的火山活动迹象,花岗岩(Y+Nb)-Rb判别图解^[36](图8-a)显示,构造区花岗岩均位于火山弧花岗岩(VAG)区;R1-R2因子判别图解^[37](图8-b)显示,研究区花岗岩形成于造山晚期和同碰撞的形成环境。基于这些图解推断,早一中侏罗世(燕山期早期)大洋板壳俯冲导致地幔橄榄岩发生熔融形成玄武质岩浆,岩浆底侵到下地壳,使下地壳增厚发生部分重融,最终形成花岗岩,正Eu异常也证实地壳增厚^[38],晚期下地壳分离导致软流圈物质上涌,花岗质岩浆侵入形成。

这同整个华北地区区域背景吻合,侏罗纪前后扬子地块及佳蒙地块的影响,导致华北地台发

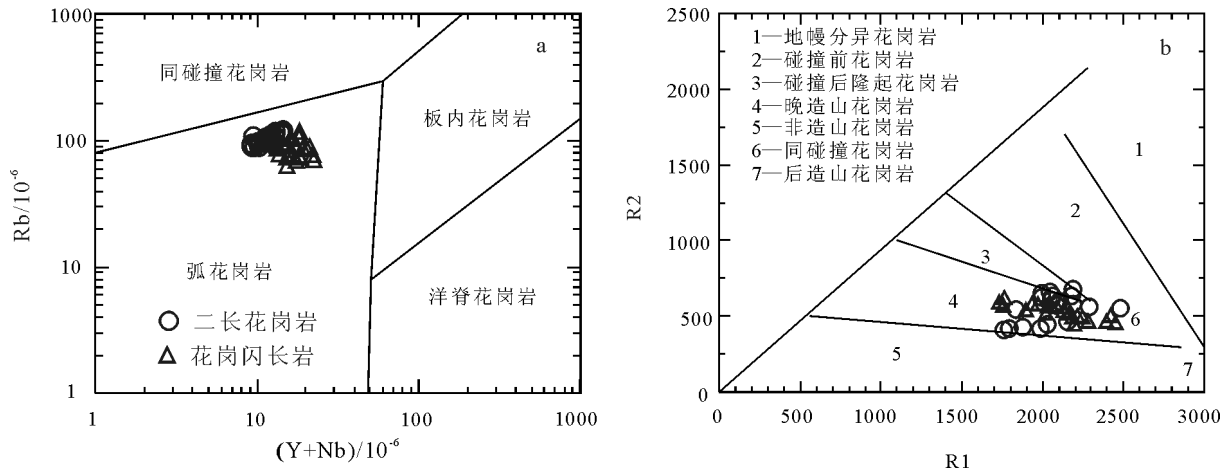


图8 庙西北凸起中生代花岗岩(Y+Nb)-Rb(a)和R1-R2(b)判别图解

Fig. 8 (Y+Nb)-Rb (a) and R1-R2 (b) discrimination diagrams

for Mesozoic granite of Miaoxibei uplift

育一套高Sr、低Y的钙碱性火山岩,目前大多数学者认为,这是由于地壳增厚导致下地壳熔融形成的^[25,39-41]。越来越多的学者开始将中国东部燕山期这套火山岩认定为埃达克质岩或C型埃达克质岩^[25,30,39,42-43]。研究区花岗岩在地球化学特征上与这套埃达克质岩具有很好的可比性,实验岩石学资料证实,埃达克岩是在适当的温度(850~1150℃)和压力(1.0~4.0GPa)条件下由玄武质岩石部分熔融形成的^[44-45]。张旗等^[25]认为,晚侏罗世—早白垩世中国东部的埃达克岩呈面型分布,推测同样是大范围地壳加厚事件的产物。

综合研究认为,渤海海域在燕山期由于受扬子板块及佳蒙地块挤压,形成一套背景为同碰撞时期的火山弧环境的花岗岩,碰撞作用导致地壳快速缩短增厚,致使下地壳物质由于升温发生熔融上涌侵入,从而形成正Eu异常,重稀土元素亏损、轻稀土元素富集的过铝质S型花岗岩的形成,首次证实海域内燕山期同样存在东部高原现象。

5 结论

(1)蓬莱9-1构造花岗岩分花岗闪长岩及二长花岗岩2类,测得的锆石U-Pb年龄表明花岗岩形成年代为早、中侏罗世,为渤海海域首个证实的中生代花岗岩油藏。

(2)地球化学分析认为,构造区花岗岩均具有高钾、富碱、强过铝质,重稀土元素亏损、轻稀土元

素富集特征,正Eu异常,源岩为角闪岩或榴辉岩,是下地壳基性岩部分熔融形成的。

(3)渤海海域在燕山期同样受扬子板块及佳蒙地块挤压,发育一套与渤海湾盆地全区可对比的S型花岗岩或埃达克岩,首次证实海域内燕山期存在东部高原现象。

致谢:感谢南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室各位专家的悉心指导,成文过程中得到中国石油大学蔡晓唱硕士、吉林大学于森博士、白冰硕士的大力支持,评审专家提出了许多宝贵的建设性意见,在此一并致以衷心感谢。

参考文献

- [1] 夏庆龙, 田立新, 周心怀, 等. 渤海海域构造形成演化与变形机制[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012.
- [2] 李德生. 渤海湾含油气盆地的地质和构造特征[J]. 石油学报, 1980, 1(1): 6-20.
- [3] 朱夏, 陈焕疆, 孙兆才, 等. 中国新生代构造与含油气盆地[J]. 地质学报, 1983, 3: 235-242.
- [4] 朱伟林, 米立军, 龚再升, 等. 渤海海域油气成藏与勘探[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [5] 侯贵廷, 钱祥麟, 宋新民. 渤海湾盆地形成机制研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1998, 34(4): 503-509.
- [6] 万天丰. 中国东部中、新生代板内变形构造应力场及其应用[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [7] 宗国洪, 施央申, 王秉海. 济阳盆地中生代构造特征及油气[J]. 地质论评, 1998, 44(3): 289-294.
- [8] 赵越, 徐守礼. 沿大型走滑断裂系的隆升[J]. 地质科学, 1996, 31(1): 1-14.
- [9] Maruyama S, Seno T. Orogeny and relative plate motions: Example of the Japanese island[J]. Tectonophysics, 1986, 2:305-329.

- [10]漆家福,张一伟,陆克政,等.渤海湾新生代断裂盆地的伸展模式及其动力学过程[J].石油实验地质,1995,17(4):316-323.
- [11]张云慧,刘福平,金芳红.沙垒田、庙西北凸起前第三纪地层研究[J].中国海上油气,2001,15(6):381-387.
- [12]官大勇,王应斌,王永利,等.渤海海域PL花岗岩潜山油藏储集层特征[J].大庆石油地质与开发,2012,31(2):48-51.
- [13]王昕,周心怀,徐国盛,等.渤海海域蓬莱9-1花岗岩潜山大型油气田储层发育特征与主控因素[J].石油与天然气地质,2015,36(2):262-270.
- [14]李建平,周心怀,王国芝.蓬莱9-1潜山岩性组成及其对储层发育的控制[J].地球科学(中国地质大学学报),2014,39(10):1421-1430.
- [15]宗奕,梁建设,刘丽芳.庙西凹陷构造特征[J].岩性油气藏,2012,24(1):36-39,79.
- [16]Van Achterbergh E, Ryan C, Jackson S, et al. Appendix 3 data reduction software for LA-ICP-MS in "Laser-Ablation-ICPMS in the Earth Sciences" [J]. Mineralogical Association of Canada Short Course, 2001, 29:239-243.
- [17]Ludwig K R. ISOPLOT 3.00: A Geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronological center special publication, Berkeley, 2003.
- [18]Hoskin P W O, Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003, 53(1): 27-62.
- [19]Peccerillo A, Taylor A R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamou area, Northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1976, 58: 63-81.
- [20]Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313-345.
- [21]宋彪,乔秀夫.辽北辉绿岩墙(床)群及二道沟组玄武岩锆石年龄及其构造意义[J].地学前缘(中国地质大学(北京),北京大学),2008,15(3):250-262.
- [22]Ge X Y, Li X H, Chen Z G, et al. Geochemistry and petrogenesis of Jurassic high Sr/low Y granitoids in eastern China: Constraints on crustal thickness[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47: 961-968.
- [23]刘红涛,孙世华,刘建明,等.华北克拉通北缘中生代高铯花岗岩类:地球化学与源区性质[J].岩石学报,2002,18(3):257-274.
- [24]Ma C, Li Z, Ehlers C, et al. A post-collisional magmatic plumbing system: Mesozoic granitoid plutons from the Dabieshan high pressure and ultrahigh pressure metamorphic zone, east central China[J]. Lithos, 1998, 45: 431-456.
- [25]张旗,王焰,钱青,等.中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义[J].岩石学报,2001,17(2):236-244.
- [26]Zhang H F, Zheng J P. Geochemical characteristics and petrogenesis of Mesozoic basalts from the North China Craton: a case study in Fuxin, Liaoning Province[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48: 924-930.
- [27]Qi J F, Li X G, Yu F S, et al. Cenozoic structural deformation and expression of the "Tan-Lu Fault Zone" in the West Sag of Liaohai Depression, Bohaiwan basin province[J]. China Earth Sciences, 2013, 56: 1707-1721.
- [28]杜韞华,代贤忠,刘继昌.鲁北新生代隐伏火山岩及其石油地质意义[J].岩石学报,1990,3:43-52.
- [29]赫英,王定一,廖永胜.胜利油田火山岩类、盆地演化及其CO₂-Au成藏成矿效应[J].地质科学,36(4):454-464.
- [30]于建国,韩文功,王金铎.中国东部断陷盆地中—新生代构造演化——以济阳凹陷为例[M].北京:石油工业出版社,2009.
- [31]李小伟,莫宣学,赵志丹,等.关于A型花岗岩判别过程中若干问题的讨论[J].地质通报,2010,29(Z1):279-285.
- [32]Chappell B W. Aluminium saturation in I and S type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. Lithos, 1999, 46: 535-551.
- [33]Clemens J D. S-Type granitic magmas—petrogenetic issues: Models and evidence[J]. Earth Science Reviews, 2003, 61: 1-18.
- [34]Lieggeois J P, Black R. Alkaline magmatism subsequent to collision in the Pan-African belt of the Adrar des Iforas (Mali)[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1987, 30: 381-401.
- [35]Wolf M B, Landon D. Apatite dissolution into peraluminous haplogranitic melts: an experimental study of solubilities and mechanism[J]. Geochimica et Cosmochim Acta, 1994, 58: 4127-4115.
- [36]Föster H J, Tischendorf G, Trumbull R B. An evaluation of the Rb VS (Y+Nb) discrimination diagram to infer tectonic setting of silicic igneous rock[J]. Lithos, 1997, 40: 261-293.
- [37]Batchelor R A, Bowden P. Petrogenetic Interpretation of Granitoid Rock Series Using Multicationic Parameters[J]. Chemical Geology, 1985, 48: 43-55.
- [38]吴福元,孙德有.中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄[J].长春科技大学学报,1999,29(4):313-318.
- [39]赵海玲,邓晋福,贺怀宇,等.造山带陆壳增厚的一个岩石学记录:以济南辉长岩及其包体研究为例[J].地学前缘,1998,5(4):251-256.
- [40]李承东,张旗,苗来成.冀北中生代高Sr低Y和低Sr低Y型花地球化学、成因及其与成矿作用的关系[J].岩石学报,2004,20(2):269-284.
- [41]李伍平,李献华,路风香.辽西中侏罗世高Sr低Y型火山岩的成因及其地质意义[J].岩石学报,2001,17(2):523-532.
- [42]王焰,张旗.八达岭花岗岩杂岩的组成、地球化学特征及其意义[J].岩石学报,2001,17(4):533-540.
- [43]王强,赵振华,许继锋,等.扬子地块东部燕山期埃达克质(adakite-like)岩与成矿[J].中国科学(D辑),2002,32(S2):127-136.
- [44]Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. Nature, 1990, 347: 662-665.
- [45]Petford N, Atherton M P. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: the Cordillera Blanca Batholith, Peru[J]. Journal of Petrology, 1996, 37: 1491-1521.