冀北梁头岩体年代学和地球化学特征及对古亚洲洋闭合时限的启示

王金芳[1,2,3],刘辰雨[1],陆泽芊[1],李康硕[1],
宋宇桐[1],李英杰[1,2,3],陈公正[1,2,3]

1)河北地质大学地球科学学院,石家庄,050031;
2)河北省战略性关键矿产资源重点实验室,石家庄,050031;
3)河北省战略性关键矿产研究协同创新中心,石家庄,050031

www.geojournals.cn/georev

内容提要:华北板块北缘古亚洲洋闭合时间一直存在较大分歧,冀北张北梁头二长花岗岩体位于华北克拉通北缘中段,毗邻古亚洲洋构造域东南缘,对揭示古亚洲洋闭合时限具有重要启示。笔者等以梁头岩体为研究对象,开展了岩石学、地球化学、锆石U-Pb年代学和Hf同位素研究,探讨了其形成时代、岩石成因和构造环境。锆石LA-ICP-MS U-Pb测年表明,梁头岩体的侵位年龄为262.5±2.6 Ma,形成时代为晚二叠世。岩石学和岩石地球化学研究表明,梁头岩体具有较高的SiO_2(70.27% ~ 73.89%),Na_2O(4.2% ~ 4.55%),K_2O(3.87% ~ 4.64%),Sr(417×10^{-6} ~ 827×10^{-6})含量,较低的Yb(0.286×10^{-6} ~ 0.518×10^{-6}),Y(2.74×10^{-6} ~ 6.98×10^{-6})含量。岩石富集Sr等大离子亲石元素和LREE,亏损Ti、P、Nb、Ta等高场强元素和HREE,轻重稀土分馏明显(La_N/Yb_N=15.6 ~ 67.3),具有弱的正Eu异常。该岩石显示高锶低钇中酸性岩(Adakite,埃达克质岩)的地球化学特征,形成于陆缘弧环境,为陆弧岩浆岩。锆石的$\varepsilon_{Hf}(t)$值为-17.50 ~ -11.12,模式年龄t_{DM2}为1989~2390 Ma。结合华北克拉通北缘晚石炭世—早二叠世陆弧岩浆岩的时空分布与演化特征,梁头陆缘弧二长花岗岩体的存在表明古亚洲洋在晚二叠世(262.5±2.6 Ma)可能仍处于向华北克拉通北缘的俯冲消减过程中,古亚洲洋闭合时间可能应在晚二叠世末。

关键词:二长花岗岩;陆缘弧环境;晚二叠世;古亚洲洋闭合;华北板块北缘

冀北张北地区位于华北克拉通北缘基底隆起带,毗邻古亚洲洋构造域东南缘,为华北克拉通北缘与中亚造山带东南缘接合部位(图1a,b)。古亚洲洋在晚古生代末的闭合过程多被认为是通过古亚洲洋板块向南俯冲于华北板块(包括华北克拉通北缘及其北侧的早古生代增生带)之下来完成,中亚造山带东南缘的索伦—西拉木伦缝合带则被认为是华北板块北缘与西伯利亚板块南缘的碰撞对接带(Sengor et al., 1993; Xiao Wenjiao et al., 2003, 2009;孙德有等,2004;李锦轶等,2007,2019; Chen Bin et al., 2009;刘建峰等,2016,2022)。华北克拉通北缘冀北基底隆起区晚古生代侵入岩体出露较为广泛,蕴涵着晚古生代古亚洲洋板块的俯冲消亡演化过程与信息,识别和研究与晚古生代古亚洲洋板片向华北克拉通北缘之下俯冲消减作用有关的陆缘弧岩浆岩,对了解古亚洲洋板块与华北克拉通北缘相互作用过程和古亚洲洋的闭合时间具有重要意义(Xiao Wenjiao et al., 2003, 2009;李晓勇等,2004;李锦轶等,2007,2019; Zhang Shuanhong et al., 2009a;王惠初等,2007,2012;马旭等,2009,2012;肖庆辉等,2020)(图1b,图2a)。然而,华北板块与西伯利亚板块之间的古亚洲洋何时消亡,一直是中亚造山带东段构造演化长期争议的重大地质问题和焦点,在一定程度上也制约着华北克拉通北缘基底隆起带晚古生代构造岩浆演化的研究与认识。一种观点认为古亚洲洋在“晚泥盆世—早石炭世初闭合”(施光海等,2004;罗红玲等,2009;徐备等,2014,2018;邵济安等,2015,2017)。另一种主流的观点认为古亚洲洋在“二叠纪末(最晚至早三叠世初)最终闭合”(Sengor et al., 1993;陈斌等,2001; Xiao

注:本文为国家自然科学基金资助项目“内蒙古西乌旗迪彦庙蛇绿岩年代学、地球化学及大地构造意义”(编号:41502211)和河北省科学技术研究与发展计划项目“中亚成矿带东段大型—超大型矿床成矿找矿研究”(编号:12276709D)的成果。
收稿日期:2023-11-06;改回日期:2024-02-05;网络首发:2024-02-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2024.02.025
作者简介:王金芳,女,1983年生,硕士,副教授,硕士研究生导师,长期从事岩石学和地球化学研究;Email: wjfb1983@163.com。

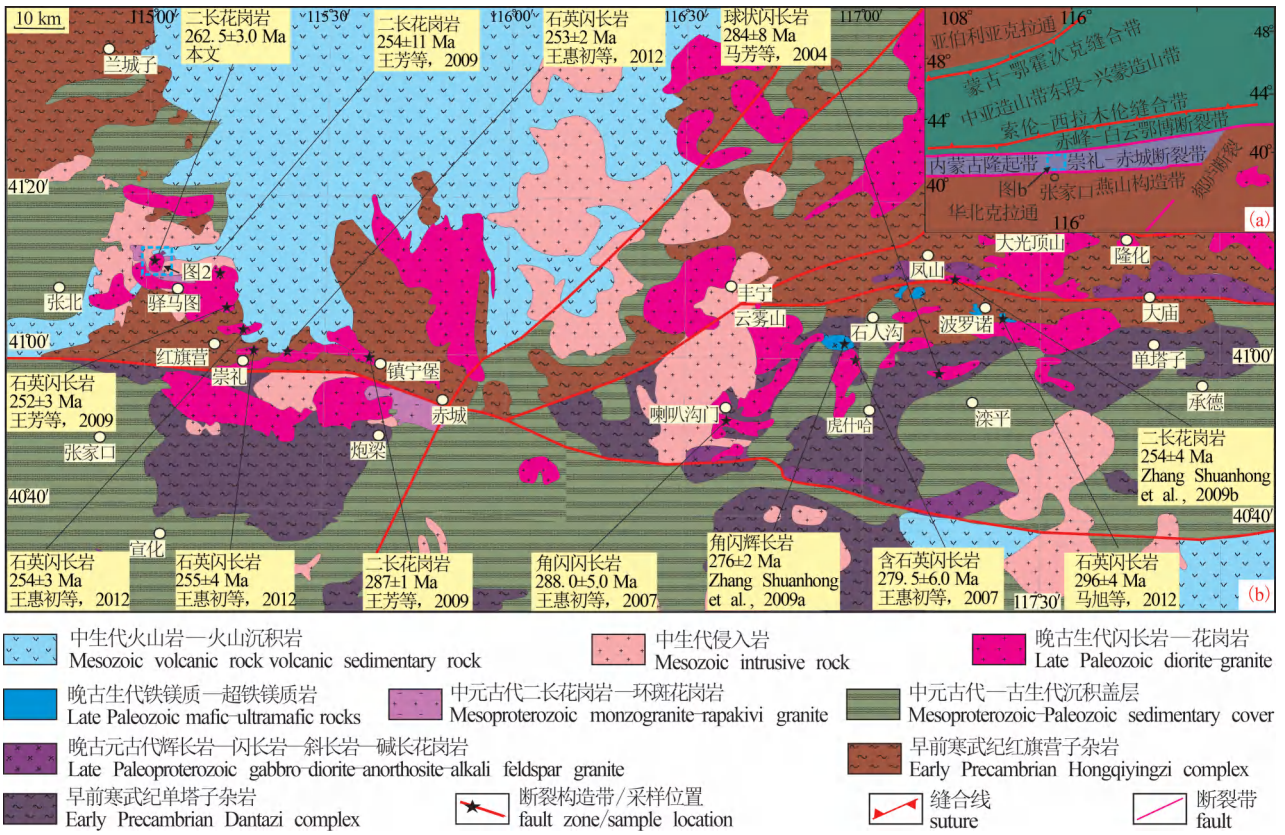

图 1 冀北张北梁头二长花岗岩区域构造图(a)和区域地质图(b)

Fig. 1 Tectonic map (a) and regional geological map(b) of the Liangtou monzogranite in Zhangbei County, northern Hebei

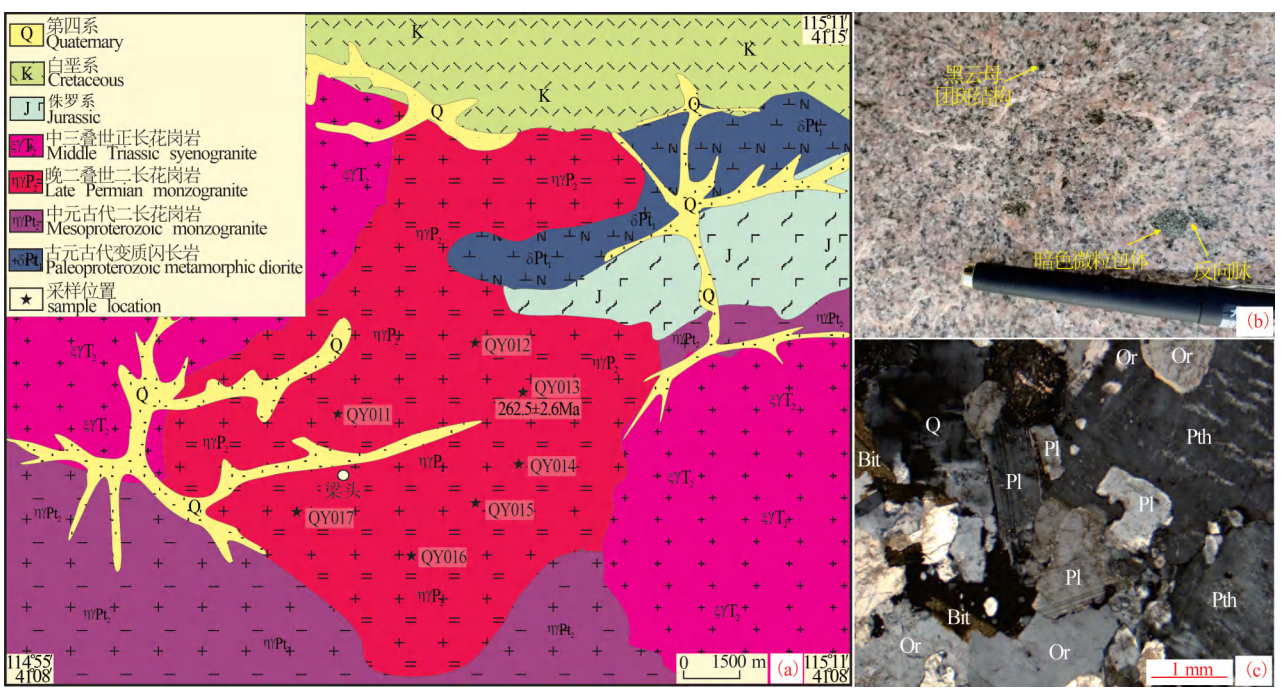

图 2 冀北梁头二长花岗岩地质简图(a)、野外照片(b)和显微照片(c)

Fig. 2 Geological map (a), field photos (b) and photomicrograph (c) of the Liangtou monzogranite in northern Hebei Province

Wenjiao et al., 2003; 孙德有等, 2004; Windley et al., 2007; Chen Bin et al., 2009; 邓晋福等, 2015; 李锦轶等, 2019; 刘建峰等, 2022)。近年, 吕洪波等(2018)在狼山发现晚白垩世蛇绿岩, 提出了古亚洲洋是在晚白垩世于狼山—阴山一线最终闭合, 而狼山—阴山以北至白云鄂博一带是古亚洲洋中的一个地体。

目前, 华北克拉通北缘中段东部冀北丰宁—隆化—承德地区晚石炭世—早二叠世花岗岩类研究较多, 冀北基底隆起区晚二叠世花岗岩类及其形成构造环境的研究比较薄弱, 古亚洲洋晚古生代向华北克拉通北缘的俯冲消减作用与"二叠纪末"闭合时间仍需要进一步的大洋俯冲构造岩浆事件与陆缘弧岩浆岩石学证据及年代学约束。作者近年在冀北张北地区晚古生代侵入岩体地质调查研究过程中, 识别和填绘出梁头二长花岗岩体, 1∶25 万张北县幅区域地质调查将该岩体划归为华力西期花岗岩[1], 缺少地球化学和精确的年代学等资料。因此, 笔者等选取目前研究比较薄弱的华北克拉通北缘中段西部冀北张北地区梁头岩体进行岩石学、地球化学、Hf 同位素组成和锆石 U-Pb 年代学研究, 讨论其形成时代、岩石成因和构造环境, 以期能够为晚古生代期间古亚洲洋向华北克拉通北缘的俯冲消减作用和闭合时间提供一些岩石地球化学约束与参考。

1　区域地质背景和岩石学特征

冀北基底隆起区在区域大地构造位置上属于华北克拉通北缘隆起带, 北部以赤峰—白云鄂博断裂带与古亚洲洋构造域东南段相接, 南部以尚义—崇礼—赤城—平泉断裂带与燕山构造带相连(图 1a)。华北克拉通北缘隆起带是华北克拉通北缘的一个重要长条形隆起构造单元, 俗称内蒙古隆起带或内蒙古地轴(图 la)。冀北和张北基底隆起区新太古代—古元古代变质表壳岩和变质杂岩广泛出露, 总体呈近东—西向带状分布, 以古元古代红旗营子岩群变质表壳岩组合为代表, 主要为一套遭受了低角闪岩相变质的杂砂岩夹中基性火山岩和碳酸盐岩建造, 可见含石墨和石榴子石的黑云斜长片麻岩(变粒岩)夹含石榴石的斜长角闪岩等, 未变质盖层仅发育侏罗纪以来的火山—沉积建造, 缺失古生代的沉积地层(图 1b)。该区古元古代晚期—中元古代花岗质侵入岩体广泛出露(王金芳等, 2024)。近年在华北克拉通北缘冀北基底隆起带内的太古宙—古元古代古老结晶基底岩系中, 陆续识别和发现了大量的晚古生代—早中生代侵入岩体以及一些喷出岩, 其构成整体平行于华北克拉通北缘赤峰—白云鄂博断裂带边界呈东西向分布的晚古生代—早中生代岩浆岩带。

冀北张北梁头岩体出露区, 分布有古元古代变质闪长岩, 中元古代二长花岗岩, 晚二叠世二长花岗岩, 中三叠世正长花岗岩, 侏罗系—白垩系火山岩以及第四系(图 1b, 图 2a)。梁头二长花岗岩体侵位于古元古代变质闪长岩和中元古代二长花岗岩之中, 被中三叠世正长花岗岩所侵入, 被侏罗系—白垩系火山岩以及第四系所覆盖(图 2a)。梁头岩体呈不规则岩株状产出 , 出露面积约 90 km^2, 总体向南倾伏, 倾角 65°~80°。该侵入岩体边部粒度明显较细, 中部粒度相对较粗, 两者呈渐变过渡关系。岩石风化面灰褐色, 新鲜面浅肉红色, 细粒—中粒结构、自形—半自形结构, 块状构造, 主要矿物成分为石英(25%~30%)、斜长石(30%~35%)和钾长石(30%~40%), 次要矿物主要为黑云母(4%~6%)(图 2b, c)。钾长石主要为条纹长石和正长石, 可见交代包掳斜长石; 斜长石多为更—中长石, 聚片双晶发育, 偶见环带结构; 石英呈他形粒状分布; 黑云母呈叶片状。副矿物主要为榍石、磁铁矿、钛铁矿、锆石和绿帘石等。

梁头岩体中发育微小的暗色微粒包体(图 2b), 包体总体无定向、不均匀分布, 多呈灰黑色, 浑圆状、椭圆状和水滴状, 直径多在 1~5 cm, 岩浆结构特征明显。包体具有明显的塑性变形, 与寄主岩之间多呈渐变过渡接触关系, 包体中可见浅肉红色二长花岗岩反向脉(图 2b)。在二长花岗岩中, 肉眼可观察到黑云母暗色矿物聚集形成的团斑结构(矿物集合体)(图 2b)。在显微标志上, 二长花岗岩中可观察到矿物不平衡现象, 如钾长石的包晶结构(较大的钾长石晶体中包含斜长石和钾长石等)(图 2c)。微小的暗色微粒岩浆包体的发育和寄主岩的宏观—微观特征, 显示梁头岩体形成过程中可能经历了岩浆混合作用。

2　分析测试方法

2.1　主量、微量和稀土元素

本次研究工作采集了 7 件岩石地球化学样品(图 2a), 委托河北省廊坊区域地质矿产研究所实验室承担了岩石样品的测试分析工作。首先, 将采集的岩石样品分别粉碎粗碎至厘米级块体并用纯化水冲洗后烘干、粉碎至 80 μm。岩石样品主量元素的

测试分析工作，经过了将80 μm备测试粉末样品称量后加$Li_2B_4O_7$(1∶8)助熔剂混合，并在融样机加热至1150°C使其在金铂坩埚中熔融成均一玻璃片体，进而使用X射线荧光光谱仪(Axiosmax)分析，其中TFe_2O_3、P_2O_5、MnO检测限为0.005%，TiO_2、K_2O、CaO检测限为0.01%，SiO_2、Al_2O_3、Na_2O、MgO检测限为0.015%；FeO用容量法进行测试分析，检测限为0.1%；分析误差小于1%。该样品微量元素的测试分析，需要将80 μm备测试粉末样品称量后放置于聚四氟乙烯溶样罐并加入HF+HNO_3，并在干燥箱中将高压消解罐保持在190 °C温度72 h后再经过赶酸、溶液定容为稀溶液，进而使用X Serise 2电感耦合等离子体质谱分析(ICP-MS)进行测试分析，微量元素和稀土元素的检测下限为$n\times10^{-9}$，分析误差小于5%。

2.2 锆石U-Pb测年

采样地理位置为N41°11′23″ E115°03′46″(图2a)，样品编号为QY013。锆石样品QY013的挑选工作，委托了河北省廊坊区域地质调查研究所实验室来承担。岩石样品QY013的测试锆石经过了岩石样品破碎成粉末、重液和磁选法分离分选和双目镜下晶形相对完好、无裂纹—包裹体和无色透明的锆石挑选过程。委托北京锆年领航科技有限公司实验室承担了测试锆石样品制靶和锆石

表1 冀北张北梁头二长花岗岩(QY013)LA-ICP-MS锆石U—Th—Pb测试结果

Table 1 LA-ICP-MS U—Th—Pb dating results of zircons from the Liangtou monzogranite in Zhangbei County, northern Hebei

测点号	元素含量(×10⁻⁶)			Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)						谐和度(%)
	Pb	Th	U		$n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$		$n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$		$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		$n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$		$n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$		$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		
					测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	
01	492.1	1027	2831	0.36	0.05286	0.00277	0.2942	0.0158	0.04083	0.00051	280.2	109.8	262.3	12.2	257.8	3.4	99
02	773.7	1549	4088	0.38	0.07004	0.00303	0.4148	0.0176	0.04272	0.00054	908.6	94.3	350.7	12.5	269.7	3.1	92
03	619.3	1335	3535	0.38	0.05463	0.00257	0.3153	0.0159	0.04226	0.00047	379.5	100.1	277.8	12.4	266.8	3.0	97
04	582.6	2577	3134	0.82	0.06017	0.00332	0.3449	0.0177	0.04167	0.00055	579.9	119.6	298.5	13.8	263.1	3.7	91
05	621.8	999.5	3563	0.28	0.06143	0.00271	0.3471	0.0146	0.04139	0.00049	626.6	95.4	301.6	10.7	261.4	2.9	96
06	358.5	782.8	2052	0.38	0.05676	0.00326	0.3144	0.0175	0.04063	0.00058	430.2	119.7	280.2	13.9	256.7	4.2	94
07	788.4	2385	4441	0.54	0.06581	0.00312	0.3632	0.0179	0.03994	0.00053	759.8	99.5	312.6	12.5	252.4	3.3	95
08	596.7	1074	3257	0.33	0.06088	0.00349	0.3724	0.0346	0.04486	0.00221	609.7	120.2	313.9	23.7	283.0	12.6	93
09	448.0	882.7	2588	0.34	0.05334	0.00263	0.3118	0.0155	0.04205	0.00066	320.3	100.4	275.4	12.1	265.5	3.8	98
10	427.1	736.3	2360	0.31	0.06113	0.00341	0.3593	0.0227	0.04342	0.00121	599.8	119.9	313.8	17.6	273.5	6.9	91
11	822.4	2072	4537	0.46	0.06419	0.00323	0.3688	0.0178	0.04179	0.00039	739.6	110.2	318.5	12.8	263.9	3.2	97
12	758.6	2743	4193	0.65	0.05822	0.00235	0.3292	0.0126	0.04113	0.00052	520.5	87.3	288.1	10.4	259.8	3.4	93
13	478.9	1389	2600	0.53	0.05803	0.00278	0.3354	0.0166	0.04231	0.00058	495.1	95.8	294.6	11.7	267.1	4.1	93
14	353.6	950.8	1957	0.49	0.05377	0.00413	0.2991	0.0239	0.04215	0.00087	280.4	139.7	264.3	17.7	266.1	5.7	99
15	450.4	810.1	2417	0.34	0.06586	0.00479	0.3814	0.0265	0.04198	0.00075	749.7	149.5	324.7	18.6	265.1	4.9	96
16	615.4	1105	3253	0.34	0.05303	0.00231	0.3309	0.0147	0.04539	0.00061	320.3	92.9	289.1	11.2	286.1	3.6	99
17	379.5	1364	2078	0.66	0.05312	0.00352	0.3142	0.0202	0.04199	0.00076	339.6	129.6	279.4	14.5	265.1	4.8	97
18	472.0	1213	2699	0.45	0.05549	0.00288	0.3074	0.0158	0.04116	0.00072	390.1	110.1	274.3	12.9	260.4	4.3	97
19	549.2	1321	3195	0.41	0.05592	0.00264	0.3023	0.0137	0.03977	0.00063	427.8	97.5	267.2	11.3	251.4	4.1	96
20	552.0	1089	3243	0.34	0.06029	0.00342	0.3308	0.0157	0.04008	0.00078	569.6	119.7	289.6	11.8	253.3	5.4	91

注：实验测试在由北京锆年领航科技有限公司完成。

阴极发光(CL)图像分析等工作。将 QY013 测试锆石样品和标样(TEM)一起用环氧树脂固定于样品靶上抛光制靶,进而开展阴极发光、透射光和单偏光照相等工作。锆石的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测试分析工作,委托了北京锆年领航科技有限公司实验室来承担,采用 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪和 193 nm 激光取样系统(LA-MC-ICP-MS)。使用 TEMORA 标准锆石作为锆石标样。选用 ISOPLOT 程序(3.0 版本)计算了锆石 U-Pb 年龄加权平均值,绘制了锆石 U-Pb 年龄谐和图。

2.3　锆石 Hf 同位素分析

锆石原位微区 Hf 同位素的测试分析,委托了北京锆年领航科技有限公司实验室来承担。该项测试分析过程中采用了与 U-Pb 年龄测定相同的激光器与质谱仪,选用 GJ-1 作为外标计算 Hf 同位素比值,并使用 ICP-MSDataCal 9.2 程序对 QY013 样品的 Hf 同位素测试分析数据进行了处理。测试分析过程中 QY013 样品的锆石原位 Hf 同位素测试分析点与锆石 U-Pb 年龄的测试分析点处在同一测试锆石晶体颗粒中相同的晶域(图 3a),并利用同一测试锆石的$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄数据对 QY013 样品的 Hf 同位素初始比值($n(^{176}Hf)/n(^{177}Hf)$)i 和 $\varepsilon_{Hf}(t)$值等参数进行了计算。笔者等计算采用的^{176}Lu 衰变常数 λ 为 1.867×10^{-11}/a,球粒陨石的 $n(^{176}Hf)/n(^{177}Hf)$ 值为 0.282772、$n(^{176}Lu)/n(^{177}Hf)$ 值为 0.03321,亏损地幔的 $n(^{176}Hf)/n(^{177}Hf)$ 值为 0.28325、$n(^{176}Lu)/n(^{177}Hf)$ 值为 0.0384,平均地壳的 $f_{Lu/Hf}$ 为-0.55,$n(^{176}Lu)/n(^{177}Hf)_{平均地壳}$ 为 0.015(Griffin et al., 2002)。

3　分析测试结果

3.1　锆石 U-Pb 定年

如表 1 和图 3 所示,QY013 样品的 20 颗单颗粒锆石分别测试分析一个点,共获得了 20 个测试分析数据。代表性锆石阴极发光图像如图 3a,单颗粒锆石的测试分析点和测试点获得的 U—Th—Pb 含量、$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$表面年龄值等测试结果如表 1 和图 3b。QY013 样品的单颗粒测试锆石晶体以长宽比 1.5∶1~2.5∶1 的自形—半自形柱状为主,晶棱、晶面、岩浆结晶振荡环带和条带结构清晰,反映测试锆石为酸性岩浆成因。锆石的 Th/U 值为 0.28~0.66,平均值为 0.44,为岩浆锆石特征。QY013 样品单颗粒测试锆石获得的 $n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$表面年龄变化于 251~286 Ma 之间,年龄加权平均值为 262.5±2.6 Ma (MSWD=2.1)(图 3b,表 1),代表了该二长花岗岩体的侵位结晶年龄。

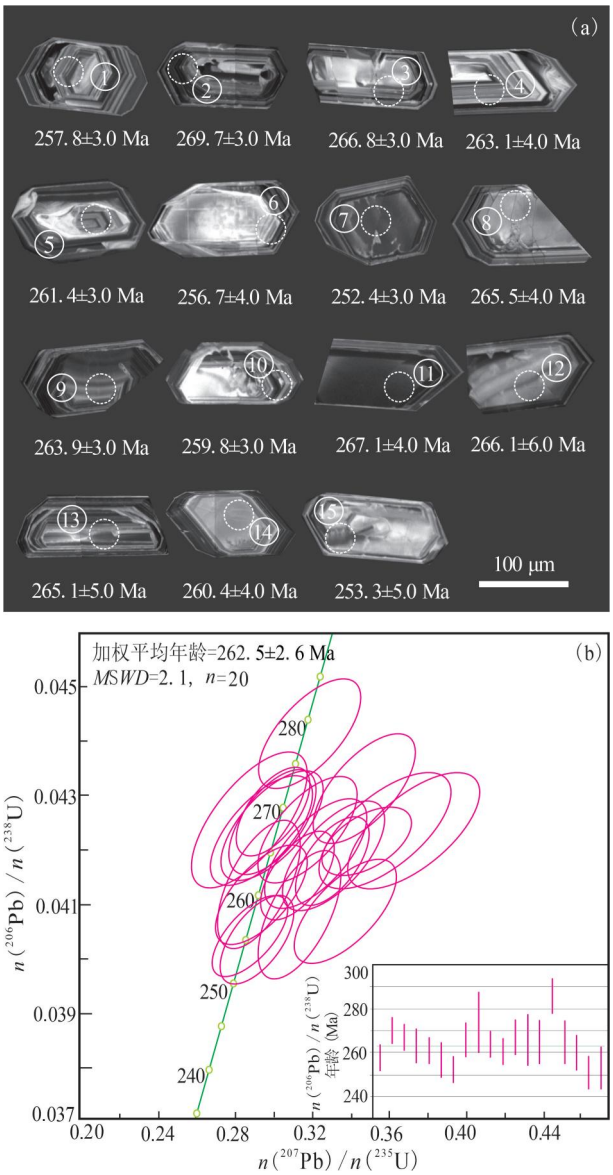

图 3 冀北梁头二长花岗岩(QY013)代表性锆石阴极发光图像(a)和锆石 U-Pb 年龄(b)

Fig. 3 Cathodoluminescent images (a) and the U-Pb ages (b) of zircons from the Liangtou monzogranite in northern Hebei

实线圆为锆石 U-Pb 测点,虚线圆为锆石 Lu—Hf 测点

The solid circle is the zircon U-Pb measure point and the dotted circle is the zircon Lu—Hf point

3.2　地球化学特征

3.2.1　主量元素

梁头二长花岗岩体的主量元素分析结果如表 2 所示,岩石 SiO_2 含量为 70.27%~73.89%(>56%);Na_2O 和 K_2O 含量分别为 4.20%~4.55%(>4%)和 3.87%~4.64%,Na_2O+K_2O值为8.42%~9.05%

表 2 冀北张北梁头二长花岗岩的主量(%)、微量($\times10^{-6}$)和稀土元素($\times10^{-6}$)分析结果

Table 2 Major element(%), trace element($\times10^{-6}$) and REE($\times10^{-6}$) analyses of the Liangtou monzogranite in Zhangbei County, northern Hebei

样品号	QY011	QY012	QY013	QY014	QY015	QY016	QY017	样品号	QY011	QY012	QY013	QY014	QY015	QY016	QY017
SiO_2	73.89	72.30	71.88	72.87	72.65	73.65	70.27	Er	0.327	0.563	0.558	0.440	0.465	0.424	0.716
TiO_2	0.16	0.25	0.28	0.23	0.23	0.19	0.35	Tm	0.0381	0.0710	0.0661	0.0512	0.0594	0.0513	0.0862
Al_2O_3	14.17	14.41	14.47	14.27	14.28	14.15	15.03	Yb	0.286	0.440	0.425	0.341	0.338	0.340	0.518
Fe_2O_3	0.97	0.98	1.04	0.87	0.88	0.47	1.02	Lu	0.0464	0.0671	0.0690	0.0602	0.0475	0.0631	0.0773
FeO	0.17	0.67	0.72	0.55	0.63	0.60	0.92	ΣREE	45.79	125.8	133.5	112.6	123.0	103.8	189.2
MnO	0.017	0.023	0.028	0.017	0.023	0.014	0.031	δEu	1.60	1.21	1.19	1.34	1.21	1.29	1.16
MgO	0.23	0.48	0.53	0.38	0.45	0.40	0.70	$(La/Yb)_N$	15.55	50.87	54.83	59.94	67.31	54.63	65.20
CaO	0.84	1.24	1.31	1.20	1.31	1.30	1.59	Y	2.74	5.19	5.02	4.05	4.22	3.85	6.98
Na_2O	4.40	4.36	4.34	4.22	4.34	4.55	4.40	Ba	747	1203	1200	1243	1059	972	1578
K_2O	4.46	4.49	4.56	4.64	4.33	3.87	4.64	Rb	99.2	71.8	74.6	69.3	70.5	63.7	78.9
P_2O_5	0.066	0.103	0.112	0.086	0.095	0.071	0.140	Sr	417	644	675	641	637	600	827
烧失	0.43	0.37	0.40	0.34	0.46	0.43	0.48	Zr	90.4	145	149	137	125	102	171
总量	99.82	99.74	99.74	99.73	99.76	99.77	99.67	Hf	3.28	4.61	4.66	4.28	3.87	3.54	4.90
La	6.68	33.2	35.3	30.4	34.0	27.8	50.5	Nb	7.47	8.24	8.82	7.27	7.69	8.67	9.96
Ce	29.2	58.1	61.3	52.1	56.6	48.0	87.0	Ta	0.623	0.516	0.491	0.428	0.452	0.503	0.564
Pr	1.41	6.07	6.46	5.42	5.84	4.96	9.34	Th	12.6	6.68	7.16	6.56	6.63	8.08	8.24
Nd	4.99	20.0	21.5	17.4	18.9	16.3	30.2	U	1.79	1.14	1.17	1.12	1.05	1.25	1.14
Sm	0.842	2.67	2.85	2.31	2.45	2.09	3.92	Pb	41.3	36.8	38.0	38.5	35.7	35.8	41.3
Eu	0.450	1.01	1.07	0.965	0.940	0.857	1.44	Ga	22.2	21.4	21.4	19.9	20.5	21.4	21.8
Gd	0.842	2.34	2.50	2.03	2.22	1.90	3.50	Cr	2.34	4.16	5.15	4.55	5.34	3.54	3.77
Tb	0.0965	0.241	0.248	0.203	0.220	0.178	0.350	Co	1.74	2.56	2.56	2.02	2.25	1.66	3.37
Dy	0.483	0.930	0.927	0.722	0.776	0.701	1.26	Ni	1.86	2.58	3.27	2.58	2.85	2.21	3.50
Ho	0.0863	0.172	0.157	0.124	0.138	0.120	0.216	Cs	1.24	1.34	1.85	1.41	1.95	1.28	1.67

(富碱),K_2O/Na_2O 值为 0.85~1.10;MgO 含量为 0.23%~0.70%(<3%);Al_2O_3 含量为 14.15%~15.03%;CaO 含量为 0.84%~1.59%;P_2O_5 含量为 0.066%~0.14%。在 SiO_2—(Na_2O+K_2O)(TAS)分类图解中,该岩体 7 个样品均投在亚碱性系列与碱性系列过渡区域靠近亚碱性系列的花岗岩区(图

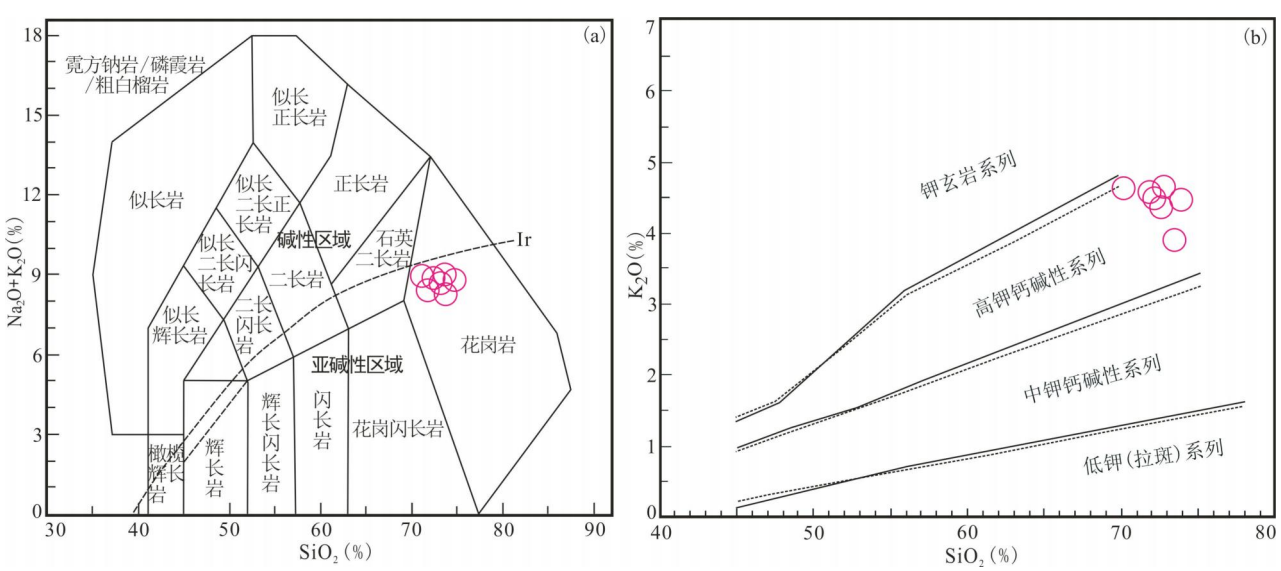

图 4 梁头二长花岗岩 TAS 分类图(a)(据 Middlemost, 1994)和 SiO_2—K_2O 分类图解(b)(据 Peccerillo and Taylor, 1976)

Fig. 4 Total alkalis vs. silica (TAS) diagram (a) (after Middlemost, 1994) and SiO_2—K_2O classification diagram (b) (after Peccerillo and Taylor, 1976) of the Liangtou monzogranite

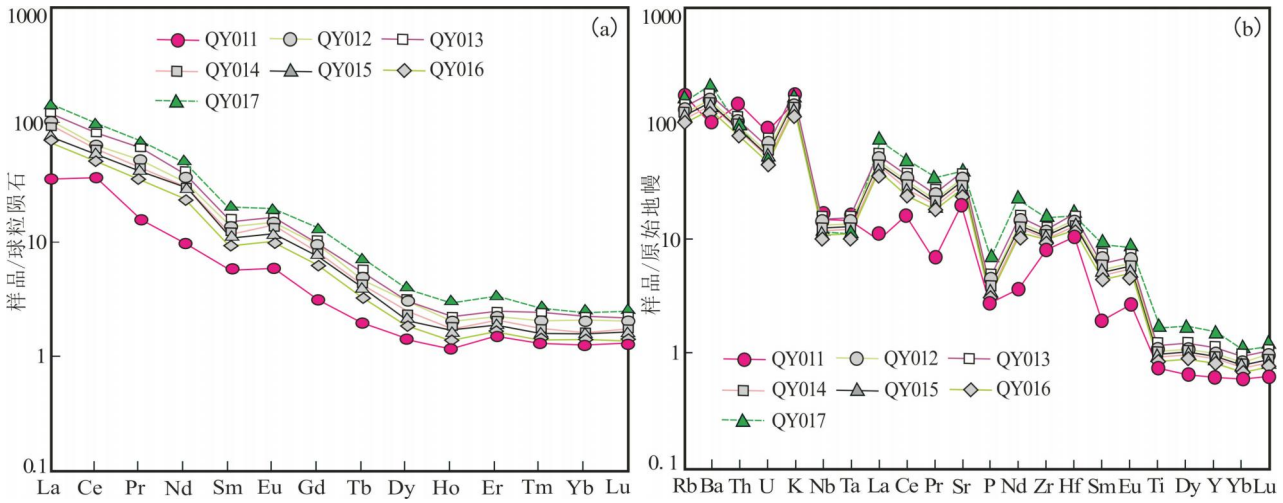

图 5 梁头二长花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式(a)(标准化值据 Boynton,1984)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)(标准化值据 Sun 和 McDonough,1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a) (normalization values after Boynton,1984) and Primitive mantle-normalized trace element spider diagram (b) (normalization values after Sun and McDonough, 1989) of the Liangtou monzogranite

4a)。该二长花岗岩的里特曼指数 σ 平均值为 1.72,为钙碱性岩。如图 4b 所示,该二长花岗岩 7 个样品投点均落在 SiO_2—K_2O 分类图解中的高钾钙碱性系列区域内。岩石的 A/CNK 平均值为 1.07,为弱过铝质岩石。

3.2.2　稀土元素

如表 2 所示,梁头二长花岗岩 7 个样品的稀土元素总量ΣREE 变化于 45.79×10^{-6} ~ 189.17×10^{-6} 之间;Yb 含量为 0.286×10^{-6} ~ 0.518×10^{-6},均<1.90×10^{-6};Y 含量为 2.74×10^{-6} ~ 6.98×10^{-6},均<18.0×10^{-6}。岩石样品显示富集轻稀土元素、亏损重稀土元素、轻重稀土高度分馏的右倾分布模式(图 5a)。该岩石的 $(La/Yb)_N$ 值为 15.55 ~ 67.31 (平均值 52.62),其中轻稀土分异更为显著,$(La/Sm)_N$ 值为 5.00 ~ 8.74,重稀土分异相对较弱,$(Gd/Yb)_N$ 值为 2.34 ~ 5.41。岩石具有弱的正铕异常,δEu 为 1.16 ~ 1.60 (图 5a,表 2)。

3.2.3　微量元素

梁头二长花岗岩体具有明显的高 Sr 和高 Sr/Y 值,Sr 含量为 417×10^{-6} ~ 827×10^{-6}(>400×10^{-6}),平均值 635×10^{-6};Sr/Y 值为 118 ~ 158,平均值 142(表 2)。该二长花岗岩显示贫 Ti—P—Ta—Nb 而富集 Rb—Sr—K 等微量元素(表 2,图 5b)。如图 5b 所示,该岩石 7 个样品的微量元素分布曲线近于一致,均显示右倾式分布,具有明显的 K、Sr 正异常和 Ti、P、Ta、Nb 负异常。

3.3　锆石 Hf 同位素组成

在 U-Pb 定年的基础上,笔者等利用 LA-MC-ICP-MS 对二长花岗岩 QY013 样品的 20 颗成岩锆石进行了 Lu—Hf 同位素组成测定,分析结果见表 3。二长花岗岩 QY013 样品 20 颗测试锆石获得的 $n(^{176}Lu)/n(^{177}Hf)$ 值介于 0.000655 ~ 0.002010 之间(平均值 0.001149)(表 3)。除 1 颗测试锆石的 $n(^{176}Lu)/n(^{177}Hf)$ 值(0.002010)等于或略大于 0.002 之外,该岩石其余 19 颗测试锆石的 $n(^{176}Lu)/n(^{177}Hf)$ 值均<0.002(表 3),反映测试样品锆石形成后的放射性成因 Hf 积累和后期岩浆热事件影响不明显,获得的 $n(^{176}Lu)/n(^{177}Hf)$ 值反映了二长花岗岩 QY013 样品锆石形成时的 Hf 同位素比值。

如表 3 所示,二长花岗岩样品 20 颗测试锆石获得的 Hf 同位素组成比较均一,$n(^{176}Hf)/n(^{177}Hf)$ 值介于 0.282114 ~ 0.282297 之间(平均值 0.282205),$[n(^{176}Hf)/n(^{177}Hf)]_i$ 介于 0.282108 ~ 0.282291 之间(平均值 0.282200)。将锆石 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄代入计算获得的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值介于 -17.50 ~ -11.12 之间,平均值为 -14.45。在 $\varepsilon_{Hf}(t)$—年龄图(图 6)解上,20 个分析点均落到 1.8 Ga 至 2.5 Ga 地壳演化线上。对应的 t_{DM1}(单阶段亏损地幔 Hf 模式年龄)为 1362 ~ 1614 Ma(平均值 1480Ma),t_{DM2}(平均地壳两阶段Hf模式年龄)为

表 3 冀北张北梁头二长花岗岩(QY013)锆石 Lu—Hf 同位素分析结果

Table 3 Lu—Hf isotopic analytical results of the zircons from Liangtou monzogranite in Zhangbei County, northern Hebei

点号	年龄(Ma)	$\frac{n(^{176}Yb)}{n(^{177}Hf)}$	$\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}$	$\frac{n(^{176}Hf)}{n(^{177}Hf)}$	2σ	$\left[\frac{n(^{176}Hf)}{n(^{177}Hf)}\right]_i$	$\varepsilon_{Hf}(0)$	$\varepsilon_{Hf}(t)$	t_{DM1}(Ma)	t_{DM2}(Ma)	$f_{Lu/Hf}$
01	257.8	0.042852	0.001465	0.282257	0.000019	0.282250	−18.2	−12.81	1420	2084	−0.96
02	269.7	0.056132	0.001721	0.282241	0.000023	0.282232	−18.8	−13.17	1453	2116	−0.95
03	266.8	0.018078	0.000655	0.282150	0.000022	0.282146	−22.0	−16.27	1538	2308	−0.98
04	263.1	0.030943	0.001096	0.282184	0.000020	0.282179	−20.8	−15.21	1508	2239	−0.97
05	261.4	0.051752	0.001657	0.282229	0.000023	0.282221	−19.2	−13.75	1466	2145	−0.95
06	256.7	0.026721	0.001060	0.282146	0.000021	0.282141	−22.1	−16.67	1559	2326	−0.97
07	252.4	0.022992	0.000906	0.282170	0.000017	0.282165	−21.3	−15.93	1520	2275	−0.97
08	283.0	0.055727	0.002010	0.282292	0.000021	0.282282	−17.0	−11.12	1390	1997	−0.94
09	265.5	0.030734	0.000996	0.282212	0.000023	0.282208	−19.8	−14.12	1464	2173	−0.97
10	273.5	0.034321	0.001289	0.282114	0.000021	0.282108	−23.3	−17.50	1614	2390	−0.96
11	263.9	0.030960	0.001142	0.282176	0.000019	0.282171	−21.1	−15.48	1521	2257	−0.97
12	259.8	0.027359	0.000990	0.282170	0.000021	0.282165	−21.3	−15.74	1523	2270	−0.97
13	267.1	0.025992	0.000973	0.282245	0.000018	0.282240	−18.6	−12.95	1418	2100	−0.97
14	266.1	0.024401	0.000986	0.282209	0.000018	0.282204	−19.9	−14.26	1469	2181	−0.97
15	265.1	0.036858	0.001121	0.282222	0.000023	0.282217	−19.4	−13.82	1456	2154	−0.97
16	286.1	0.028345	0.001047	0.282228	0.000018	0.282223	−19.2	−13.17	1445	2128	−0.97
17	265.1	0.048254	0.001458	0.282297	0.000022	0.282291	−16.8	−11.22	1362	1989	−0.96
18	260.4	0.017511	0.000672	0.282183	0.000020	0.282180	−20.8	−15.24	1493	2239	−0.98
19	251.4	0.034854	0.001336	0.282212	0.000020	0.282206	−19.8	−14.52	1478	2186	−0.96
20	253.3	0.012525	0.000416	0.282165	0.000019	0.282163	−21.5	−15.98	1507	2280	−0.99

注：$\varepsilon_{Hf}(t)=10000\cdot\left\{\frac{\left[\frac{n(^{176}Hf)}{n(^{177}Hf)}\right]_S-\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_S\cdot(e^{\lambda t}-1)}{\left[\frac{n(^{176}Hf)}{n(^{177}Hf)}\right]_{CHUR,0}-\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_{CHUR}\cdot(e^{\lambda t}-1)}-1\right\}$；$T_{DM1}=\frac{1}{\lambda}\cdot\ln\left\{1+\frac{\left[\frac{n(^{176}Hf)}{n(^{177}Hf)}\right]_S-\left[\frac{n(^{176}Hf)}{n(^{177}Hf)}\right]_{DM}}{\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_S-\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_{DM}}\right\}$

$T_{DM\,2CC}=T_{DM1}-(T_{DM1}-t)\cdot\frac{f_{CC}-f_S}{f_{CC}-f_{DM}}$；$f_{Lu/Hf}=\frac{\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_S}{\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_{CHUR}}-1$

其中：$\lambda(^{176}Lu)=1.865\times10^{-11}$/a（Schere et al., 2001）；$\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_S$ 和 $\left[\frac{n(^{176}Hf)}{n(^{177}Hf)}\right]_S$ 为样品测量值；$\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_{CHUR}=0.0332$，$\left[\frac{n(^{176}Hf)}{n(^{177}Hf)}\right]_{CHUR,0}=0.282772$（Blichert-Toft et al., 1997）；$\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_{DM}=0.0384$，$\left[\frac{n(^{176}Hf)}{n(^{177}Hf)}\right]_{DM}=0.28325$（Griffin et al., 2000）；

$\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_{平均地壳}=0.015$；$f_{CC}=\frac{\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_{平均地壳}}{\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_{CHUR}}-1$；$f_S=f_{Lu/Hf}$；$f_{DM}=\frac{\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_{DM}}{\left[\frac{n(^{176}Lu)}{n(^{177}Hf)}\right]_{CHUR}}-1$；$t$ 为锆石结晶年龄。

1989~2390 Ma（平均值 2192 Ma）（表 3）。

4 讨论

4.1 形成时代

梁头二长花岗岩体的测年锆石颗粒呈自形—半自形柱状，振荡环带发育，具有典型的酸性岩浆成因锆石特征，新获得 262.5±2.6 Ma 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄表明其形成于晚二叠世。该二长花岗岩体的形成时代与华北克拉通北缘区域内晚二叠世的海流图二长花岗岩、白花沟石英闪长岩、红旗营石英闪长岩和光岭山二长花岗岩等侵入岩体锆石 U-Pb 年龄基本相吻合（马芳等，2004；Zhang Shuanhong et al., 2009a, 2009b；王芳等，2009；王惠初等，2012；马旭等，2012）（图 1b）。例如，王芳等（2009）在崇礼—赤城地区海流图二长花岗岩和白花沟石英闪长岩中分别获得 254±11 Ma 和 252±3 Ma 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄（图 1b）。王惠初等（2012）在崇礼—赤城地区红旗营石英闪长岩中获得锆石 U-Pb

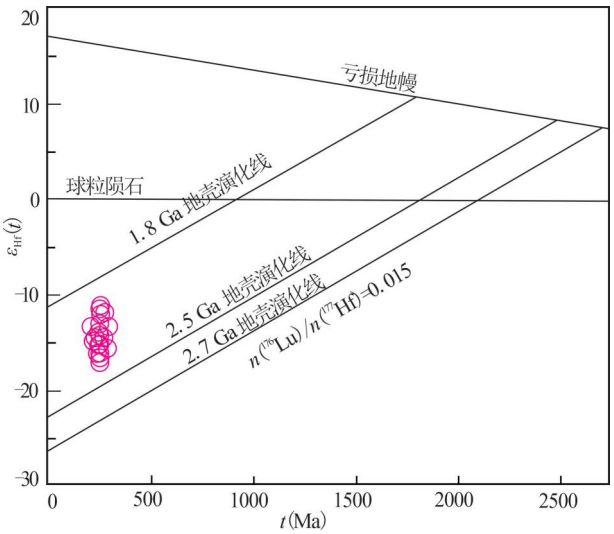

图 6 梁头二长花岗岩 $\varepsilon_{Hf}(t)$—年龄图解

Fig. 6 $\varepsilon_{Hf}(t)$—age diagrams of the Liangtou monzogranite

年龄分别为 253±2 Ma、254±3 Ma 和 255±4 Ma(图 1b)。Zhang Shuanhong 等(2009b)在光岭山二长花岗岩中获得了 254±4 Ma 的锆石 U-Pb 年龄(图 1b)。河北省区域地质矿产调查研究所❷在崇礼—赤城地区海流图二长花岗岩中获得 Rb-Sr 等时线年龄为 259.9±9.37 Ma。因此,笔者等在梁头二长花岗岩体中获得的 262.5±2.6 Ma 锆石 U-Pb 年龄,反映了冀北张北地区存在晚二叠世岩浆作用事件。

4.2　岩石成因

在岩石的矿物组合上,梁头二长花岗岩中未出现 S 型花岗岩所富含的夕线石、堇青石、石榴子石、红柱石和原生白云母等特征性高铝矿物,而是与 I 型和 A 型花岗岩的榍石、磁铁矿和绿帘石等矿物组合相一致。与 S 型花岗岩常具有较高的 P_2O_5 含量(>0.20%)和 P_2O_5—SiO_2 正相关关系趋势不同,该区岩石的 P_2O_5 含量较低(0.066% ~ 0.14%),P_2O_5—SiO_2 为负相关趋势(表 3),显示出与 I 型和 A 型花岗岩相似的演化趋势(李献华等,2007;马旭等,2012)。岩石样品的 A/CNK 值小于 1.1,Na_2O 含量相对较高(4.20% ~ 4.55% > 3.20%),K_2O/Na_2O 值较低(0.85~1.10,部分<1),指示该岩石与 I 型花岗岩相近。在稀土和微量元素上,该岩石具有明显较高的 Sr(平均值 $635\times10^{-6}>400\times10^{-6}$)和较高的 Sr/Y 值(平均值 142>40);较低的 Yb(平均值 $0.384\times10^{-6}<1.90\times10^{-6}$)和 Y(平均值 $4.48\times10^{-6}<18.0\times10^{-6}$),相对亏损 Ti、P、Nb 和 Ta 等高场强元素,富集 Rb、Sr 和 K 等大离子亲石元素(表 2,图 5);稀土元素配分曲线为右倾型,弱的正铕异常(表 2,图 5),显示出 I 型花岗岩和高锶低钇中酸性岩(Adakite,埃达克质岩)或陆弧岩浆岩的岩石地球化学特征(Defant and Drummond,1990;史仁灯等,2003;张旗等,2004;马旭等,2012;王金芳等,2017,2018,2021a;范玉须等,2019;王强等,2020)。在 Y—Sr/Y 和 Yb_N—$(La/Yb)_N$ 判别图解中(图 7),梁头岩体 7 个样品落入埃达克岩区,显示其为高锶低钇二长花岗岩。

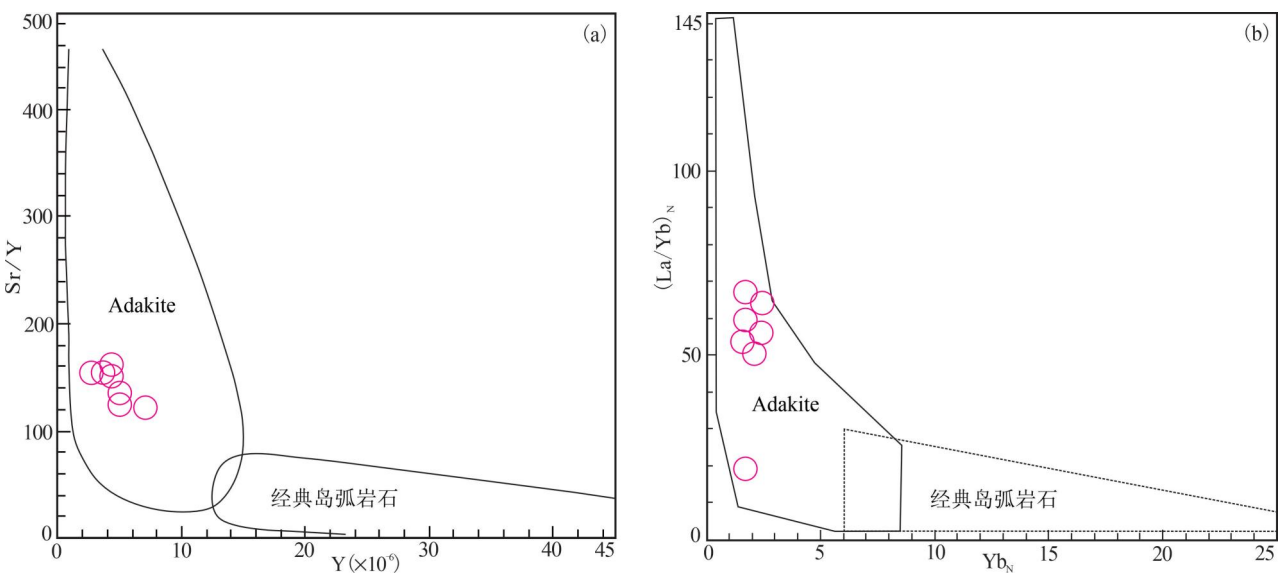

图 7 梁头二长花岗岩 Y—Sr/Y (a)和 Yb_N—$(La/Yb)_N$(b)判别图解 (据 Defant 和 Drummond, 1990)

Fig. 7 Y—Sr/Y (a) and Yb_N—$(La/Yb)_N$(b) discriminant diagrams of the Liangtou monzogranite (after Defant and Drummond, 1990)

在锆石 Hf 同位素组成特征上,负的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值多暗示岩石可能主要来自于古老地壳岩石的部分熔融或者富集地幔的部分熔融作用(Griffin et al., 2002;吴福元等,2007)。梁头岩体的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为-17.50~-11.12,其 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值既表现出相对较大的负值,又显示出较大的变化范围。对于该岩石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为相对较大的负值以及对应的 t_{DM2} 为 2390~1989 Ma,通常最可能解释为其主要来源于古老地壳物质。然而,该岩石的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值又显示较大的变化范围(最高达 6.38 个 ε 单位),反映其锆石 Hf 同位素成分具有明显的不均一性。一般认为,锆石 Hf 同位素的 $n(^{176}Hf)/n(^{177}Hf)$ 值通常不会随岩浆分离结晶作用或部分熔融作用而变化,引起岩浆熔体中锆石 Hf 同位素的 $n(^{176}Hf)/n(^{177}Hf)$ 值的明显改变或锆石 Hf 同位素成分的不均一性,需要一个更具放射成因 Hf 的幔源与有较少放射成因 Hf 的壳源两个端元之间"幔源—壳源"相互作用的开放系统,即锆石 Hf 同位素的不均一性很可能指示了地幔组分的参与(Kemp et al., 2007;Bolhar et al., 2008;邱检生等,2008)。因此,该岩石的 Hf 同位素组成特征显示其可能并非单纯起源于古老地壳物质,在成岩过程中很可能存在着地幔源组分的参与。该岩石与华北克拉通北缘区域内晚石炭世—早二叠世的凌营花岗闪长岩、五道营子闪长岩、天桥石英闪长岩、光岭山二长花岗岩和晚二叠世的海流图二长花岗岩、白花沟石英闪长岩等岩石的锆石 Hf 同位素特征相类似,均表现出变化范围相对较大较低的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值和较老的模式年龄,既暗示古老地壳岩石可能为花岗岩体的主要物源,又暗示可能有地幔的部分熔融作用参与(张旗等,2001;王芳等,2009;马旭等,2012)。例如,凌营早二叠世花岗闪长岩 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为-23.2~-17.7,t_{DM2} 为 2758~2425 Ma,岩浆来源于古老地壳的部分熔融和少量富集地幔物质的混合(Zhang Shuanhong et al., 2009b)。白花沟晚二叠世石英闪长岩 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为-10.6~-7.8,t_{DM2} 为 1940~1769 Ma,岩浆主要源于古老地壳岩石的部分熔融,并有富集地幔的部分熔融参与(王芳等,2009)。

综上所述,在华北克拉通北缘区域内石炭纪—二叠纪侵入岩体的成岩过程中很可能存在着地幔组分的参与,其地幔组分的参与形式既可能为地幔部分熔融形成的幔源岩浆与其诱发华北克拉通地壳物质部分熔融形成的长英质岩浆在地壳深部混合形成的壳幔混源岩浆,也可能为地幔部分熔融形成的幔源岩浆先期侵入到(增生在)华北克拉通下地壳底部的新生地壳与古老基底地壳构成混合地壳的部分熔融(张旗等,2001;Zhang Shuanhong et al., 2009a, 2009b)。而且,梁头晚二叠世岩体和华北克拉通北缘区域内其它二叠纪侵入岩体的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值和 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值,远高于华北克拉通下地壳的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值(-44~-32),而与汉诺坝玄武岩中麻粒岩包体的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值(-18~-8)相类似,也从另一个方面暗示华北克拉通北缘区域内梁头等二叠纪岩体可能并非单纯起源于区内古老的华北克拉通下地壳的部分熔融,而是存在着地幔源组分的参与(张旗等,2001;王芳等,2009)。对于梁头岩体表现出埃达克质岩的高 Sr/Y 值等地球化学特征,可能反映其岩浆源区有石榴石、角闪石和/或辉石的残留,揭示其形成可能经历了晚古生代古亚洲洋俯冲过程中幔源玄武岩浆底侵(增生)—地壳加厚和与底侵幔源玄武岩浆有关的古老下地壳部分熔融、岩浆混合(史仁灯等,2003;马旭等,2012;王金芳等,2020,2021b)。该岩体中发育微小的暗色微粒岩浆包体、反向脉、黑云母团斑结构和矿物不平衡结构(图 2b,c),可能从岩相学上反映了这种岩浆混合作用。

4.3 构造环境

在 Rb—(Yb+Ta)和 Rb—(Y+Nb)构造环境判别图解上(图 8),梁头二长花岗岩体 7 个样品均投在火山弧花岗岩区域,反映其形成于陆缘弧构造环境。该岩体的陆缘弧构造环境与华北克拉通北缘区域内晚石炭世—早二叠世海流图二长花岗岩、波罗诺石英闪长岩、镇宁堡二长花岗岩、凌营花岗闪长岩、五道营子闪长岩、天桥石英闪长岩、光岭山二长花岗岩等岩体的构造环境特征相一致(Zhang Shuanhong et al., 2009a, 2009b;王芳等,2009;马旭等,2012)。例如,晚石炭世—早二叠世凌营花岗闪长岩、五道营子闪长岩、天桥石英闪长岩和光岭山二长花岗岩等岩体,在 Rb—(Y+Nb)和 R_1—R_2 构造环境判别图解上均落在岛弧花岗岩区域内(Zhang Shuanhong et al., 2009b)。再如,晚石炭世—早二叠世海流图二长花岗岩、波罗诺石英闪长岩、镇宁堡二长花岗岩等岩体在 Rb—(Y+Nb) 和 Y—Nb 构造环境判别图解中,均落在弧花岗岩区域内(王芳等,2009;马旭等,2012)(图 8)。梁头晚二叠世二长花岗岩体的陆缘弧构造环境与华北克拉通北缘区域内晚石炭世—早二叠世岩体之陆缘弧构造环境的一致性,表明华北克拉通北缘不仅在晚石炭世—早二叠世处于古亚洲洋板片向华北克拉通之下俯冲形成的安第斯型活动大陆边缘弧环境,而在晚二叠世

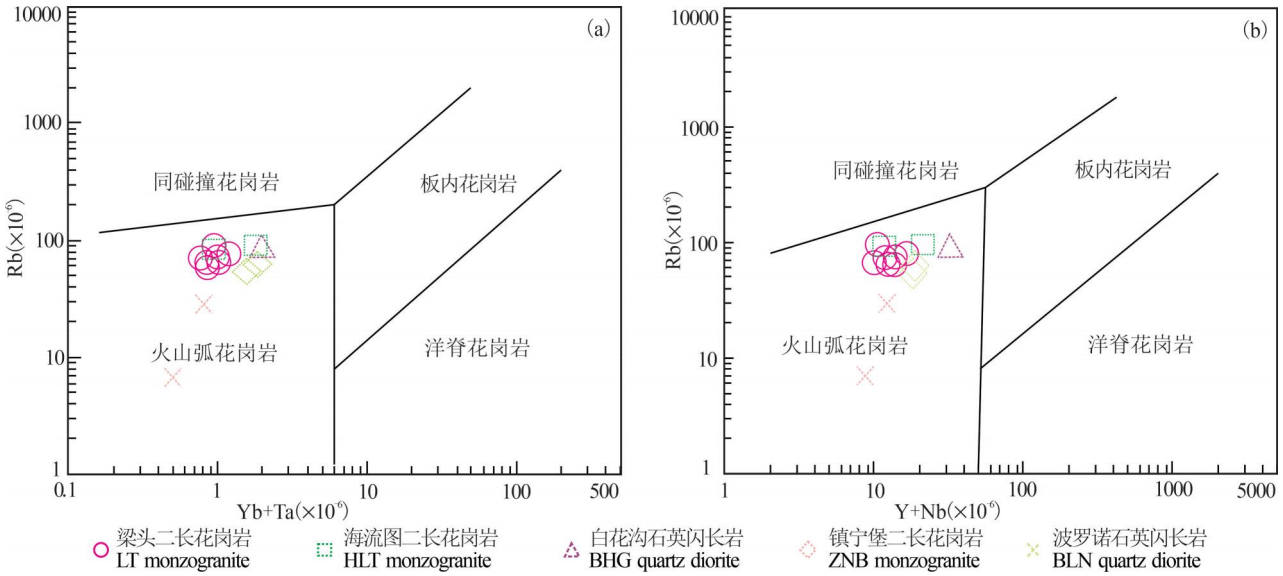

图 8 梁头二长花岗岩 Rb—(Yb+Ta)(a)和 Rb—(Y+Nb)(b)构造判别图解

(底图据 Pearce, 1984; 部分数据引自王芳等,2009;马旭等,2012)

Fig. 8 Rb—(Yb+Ta)(a) and Rb—(Y+Nb)(b) tectonic discriminant diagrams of the Liangtou monzogranite

(after Pearce, 1984; part data from Wang Fang et al., 2009&; Ma Xu et al., 2012#)

(262.5±2.6 Ma)古亚洲洋可能仍处于向华北克拉通北缘的俯冲消减过程中,古亚洲洋的闭合时间可能应在晚二叠世末(Xiao Wenjiao et al., 2003;李晓勇等,2004;李锦轶等,2007;王惠初等,2007,2012;Zhang Shuanhong et al., 2009a;刘建峰等,2022;李英杰等,2023)。

5　结论

(1)冀北梁头二长花岗岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 262.5±2.6 Ma,形成时代为晚二叠世,反映了晚二叠世岩浆事件。

(2)梁头岩体形成于洋—陆俯冲的活动大陆边缘弧环境,属于陆弧岩浆岩,为古亚洲洋板片向华北克拉通北缘之下的俯冲作用产物。

(3)梁头陆缘弧二长花岗岩体可能反映古亚洲洋在晚二叠世(262.5±2.6 Ma)仍处于向华北克拉通北缘的俯冲消减过程中,古亚洲洋的闭合时间可能应在晚二叠世末。

致谢:感谢审稿专家和责任编辑提出的宝贵、详细的修改意见。

注　释　/　Notes

❶ 河北省区域地质矿产调查研究所. 2004. 1∶250000 张北县幅地质图.

Regional Geological and Mineral Resources Survey Institute of Hebei Province. 2004. 1∶250000 Geological Map of the Zhangbeixian.

❷ 河北省区域地质矿产调查研究所. 1996. 1∶50000 下山岔幅地质图.

Regional Geological and Mineral Resources Survey Institute of Hebei Province. 1996. 1∶50000 Geological Map of the Xiashancha.

参　考　文　献　/　References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

陈斌, 赵国春, Simon Wilde. 2001. 内蒙古苏尼特左旗南两类花岗岩同位素年代学及其构造意义. 地质论评, 47(4): 361~367.

邓晋福, 冯艳芳, 狄永军, 刘翠, 肖庆辉, 苏尚国, 赵国春, 孟斐, 车如风. 2015. 古亚洲构造域侵入岩时—空演化框架. 地质论评, 61(6): 1211~1224.

范玉须, 李廷栋, 肖庆辉, 程杨, 李岩, 郭灵俊, 罗鹏跃. 2019. 内蒙古西乌珠穆沁旗晚二叠世花岗岩的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义. 地质论评, 65(1): 248~266.

李锦轶, 高立明, 孙桂华, 李亚萍, 王彦斌. 2007. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束. 岩石学报, 23(3): 565~582.

李锦轶, 刘建峰, 曲军峰, 郑荣国, 赵硕, 张进, 孙立新, 李永飞, 杨晓平, 王励嘉, 张晓卫. 2019. 中国东北地区主要地质特征和地壳构造格架. 岩石学报, 35(10): 2989~3016.

李献华, 李武显, 李正祥. 2007. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义. 科学通报, 52(9): 981~991.

李晓勇, 范蔚茗, 郭锋, 王岳军, 李超文. 2004. 古亚洲洋对华北陆缘岩石圈的改造作用: 来自于西山南大岭组中基性火山岩的地球化学证据. 岩石学报, 20(3): 557~566.

李英杰, 王金芳, 董培培, 李红阳, 张夏炜, 王帅. 2023. 内蒙古西乌旗米斯庙蛇绿岩的识别及其地质意义. 岩石学报, 39(5):

1305~1321.
刘建峰, 李锦轶, 孙立新, 殷东方, 郑培玺. 2016. 内蒙古巴林左旗九井子蛇绿岩锆石 U-Pb 定年: 对西拉木伦河缝合带形成演化的约束. 中国地质, 43(6): 1947~1962.
刘建峰, 李锦轶, 赵硕, 张进, 郑荣国, 张文龙, 吕前露, 郑培玺. 2022. 中亚造山带东南部晚古生代—早中生代地壳增生和古亚洲洋演化: 来自内蒙古东南部林西—东乌旗地区岩浆岩的证据. 岩石学报, 38(8): 2181~2215.
吕洪波, 冯雪东, 王俊, 朱晓青, 董晓朋, 张海春, 章雨旭. 2018. 狼山发现蛇绿混杂岩—华北克拉通与中亚造山带碰撞边界的关键证据. 地质论评, 64(4): 777~805.
罗红玲, 吴泰然, 赵磊. 2009. 华北板块北缘乌梁斯太 A 型花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 定年及构造意义. 岩石学报, 25(3): 515~526.
马旭, 陈斌, 牛晓露. 2009. 冀东晚古生代东湾子岩体的岩石成因研究. 岩石学报, 25(8): 1975~1988.
马旭, 陈斌, 陈家富, 牛晓露. 2012. 华北克拉通北缘晚古生代岩体的成因和意义: 岩石学、锆石 U-Pb 年龄、Nd—Sr 同位素及锆石原位 Hf 同位素证据. 中国科学: 地球科学, 42(12): 1830~1850.
马芳, 穆治国, 刘玉琳. 2004. 河北滦平球状闪长岩年代学及其地质意义. 地质论评, 50(4): 360~364.
邱检生, 肖娥, 胡建, 徐夕生, 蒋少涌, 李真. 2008. 福建北东沿海高分异Ⅰ型花岗岩的成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd—Hf 同位素制约. 岩石学报, 24(11): 2468~2484.
邵济安, 何国琦, 唐克东. 2015. 华北北部二叠纪陆壳演化. 岩石学报, 31(1): 47~55.
邵济安, 王友, 唐克东. 2017. 有关内蒙古西拉木伦带古生代—早中生代构造环境的讨论. 岩石学报, 33(10): 3002~3010.
施光海, 苗来成, 张福勤, 简平, 范蔚茗, 刘敦一. 2004. 内蒙古锡林浩特 A 型花岗岩的时代及区域构造意义. 科学通报, 49(4): 384~389.
史仁灯, 杨经绥, 吴才来. 2003. 柴北缘早古生代岛弧火山岩中埃达克质英安岩的发现及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 22(3): 229~236.
孙德有, 吴福元, 张艳斌, 高山. 2004. 西拉木伦河—长春—延吉板块缝合带的最后闭合时间—来自吉林大玉山花岗岩体的证据. 吉林大学学报(地球科学版), 34(2): 174~180.
王芳, 陈福坤, 侯振辉, 彭澎, 翟明国. 2009. 华北陆块北缘崇礼—赤城地区晚古生代花岗岩类的锆石年龄和 Sr—Nd—Hf 同位素组成. 岩石学报, 25(11): 3057~3074.
王强, 郝露露, 张修政. 2020. 汇聚板块边缘的埃达克质岩: 成分和成因. 中国科学: 地球科学, 50(12): 1845~1873.
王惠初, 赵风清, 李惠民, 孙立新, 苗来成, 冀世平. 2007. 冀北闪长质岩石的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄: 晚古生代岩浆弧的地质记录. 岩石学报, 23(3): 597~604.
王惠初, 初航, 相振群, 陆松年, 赵凤清, 任云伟. 2012. 华北克拉通北缘崇礼—赤城地区的红旗营子(岩)群: 一套晚古生代的变质杂岩. 地学前缘, 19(5): 100~113.
王金芳, 李英杰, 李红阳, 董培培. 2017. 内蒙古梅劳特乌拉蛇绿岩中埃达克岩的发现及其演化模式. 地质学报, 91(8): 1776~1795.
王金芳, 李英杰, 李红阳, 董培培. 2018. 内蒙古乌兰沟埃达克岩锆石 U-Pb 年龄及构造环境. 地质通报, 37(10): 1933~1943.
王金芳, 李英杰, 李红阳, 董培培. 2020. 古亚洲洋俯冲板片断离与后造山伸展: 贺根山缝合带火山岩年代学和地球化学证据. 地质学报, 94(12): 3561~3580.
王金芳, 李英杰, 李红阳, 董培培. 2021a. 二连—贺根山缝合带晚石炭世埃达克岩的发现及古亚洲洋洋内俯冲作用. 中国地质, 48(2): 520~535.
王金芳, 李英杰, 李红阳, 董培培. 2021b. 贺根山缝合带阿萨格图钾玄质火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄、地球化学特征及构造意义. 地质论评, 67(4): 918~935.
王金芳, 宋宇桐, 李康硕, 陆泽芊, 刘辰雨, 李英杰, 陈公正. 2024. 冀北古元古代东瓦窑杂岩体的发现及其对华北克拉通伸展事件的制约. 地质通报, 43(1): 46~60.
吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu—Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23(2): 185~220.
肖庆辉, 刘勇, 许立权, 丁孝忠, 张玉清, 程杨, 李岩, 范玉须, 贺国奇. 2020. 白云鄂博洋板块地质与成矿作用初探. 地球科学, 45(7): 2258~2278.
徐备, 赵盼, 鲍庆中, 周永恒, 王炎阳, 罗志文. 2014. 兴蒙造山带前中生代构造单元划分初探. 岩石学报, 30(7): 1841~1857.
徐备, 王志伟, 张立杨, 王智慧, 杨振宁, 贺跃. 2018. 兴蒙陆内造山带. 岩石学报, 34(10): 2819~2844.
张旗, 王元龙, 王焰. 2001. 燕山期中国东部高原下地壳组成初探: 埃达克质岩 Sr、Nd 同位素制约. 岩石学报, 17(4): 505~513.
张旗, 许继峰, 王焰, 肖龙, 刘红涛, 王元龙. 2004. 埃达克岩的多样性. 地质通报, 23(9~10): 959~965.
Bolhar R, Weaver S D, Whitehouse M J, Palin J M, Woodhead J D, Cole J W. 2008. Sources and evolution of arc magmas inferred from coupled O and Hf isotope systematics of plutonic zircons from the Cretaceous Separation Point Suite (New Zealand). Earth Planet Sci., 268: 312~324.
Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies/Henderson P. Rare earth element geochemistry. Elsevier, 63~114.
Chen Bin, Zhao Guochun, Simon Wilde. 2001&. Subduction—and collision—related granitoids from southern Sonidzuoqi, Inner Mongolia: Isotopic ages and tectonic implications. Geological Review, 47(4): 361~367.
Chen Bin, Jahn B M, Tian W. 2009. Evolution of the Solonker suture zone: Constraints from zircon U-Pb ages, Hf isotopic ratios and whole—rock Nd—Sr isotope compositions of subduction—and collision—related magmas and forearc sediments. Journal of Asian Earth Sciences, 34(3): 245~257.
Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. Nuture, 347(18): 662~665.
Deng Jinfu, Feng Yanfang, Di Yongjun, Liu Cui, Xiao Qinghui, Su Shangguo, Zhao Guochun, Meng Fei, Che Rufeng. 2015&. The intrusive spatial—temporal evolutional framework in the Paleo—Asian tectonic domain. Geological Review, 61(6): 1211~1224.
Fan Yuxu, Li Tingdong, Xiao Qinghui, Cheng Yang, Li Yan, Guo Lingjun, Luo Pengyue. 2019&. Zircon U-Pb ages, geochemical characteristics of Late Permian granite in West Ujimqin Banner, Inner Mongolia, and tectonic significance. Geological Review, 65(1): 248~266.
Griffin W L, Wang X, Jackson S E, Pearson N J. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In—situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes. Lithos, 61(3~4): 237~269.
Kemp A I S, Hawkesworth C J, Foster G L, Paterson B A, Woodhead J D, Hergt J M, Gray C M, Whitehouse M J. 2007. Magmatic and crustal differentiation history of granitic rocks from Hf—O isotopes in zircon. Science, 315: 980~983.

Li Jinyi, Gao Liming, Sun Guihua, Li Yaping, Wang Yanbin. 2007&. Shuangjingzi Middle Triassic syn — collisional crust—derived granite in the east Inner Mongoloia and its constraint on the timing of collision between Siberian and Sino—Korean paleo—plates. Acta Petrologica Sinica, 23(3): 565~582.

Li Jinyi, Liu Jianfeng, Qu Junfeng, Zheng Rongguo, Zhao Shuo, Zhang Jin, Sun Lixin, Li Yongfei, Yang Xiaoping, Wang Lijia, Zhang Xiaowei. 2019&. Major geological features and crustal tectonic framework of Northeast China. Acta Petrologica Sinica, 35(10): 2989~3016.

Li Xianhua, Li Wuxian, Li Zhengxiang. 2007#. On the genetic classification and tectonic implications of the Early Yanshanian granitoids in the Nanling range, South China. Chinese Science Bulletin, 52(14): 1873~1885.

Li Xiaoyong, Fan Weiming, Guo Feng, Wang Yuejun, Li Chaowen. 2004&. Modification of the lithospheric mantle beneath the northern North China block by the Paleo—Asian Ocean: geochemical evidence from mafic volcanic rocks of the Nandaiing Formation in the Xishan area, Beijing. Acta Petrologica Sinica. 20(3): 557~566.

Li Yingjie, Wang Jinfang, Dong Peipei, Li Hongyang, Zhang Xiawei, Wang Shuai. 2023&. Discovery and significance of the Misimiao ophiolite in XiUjimqin Banner, Inner Mongolia. Acta Petrologica Sinica, 39(5): 1305~1321.

Liu Jianfeng, Li Jinyi, Sun Lixin, Dongfang, Zheng Peixi. 2016&. Zircon U-Pb dating of the Jiujingzi ophiolite in Bairin Left Banner, Inner Mongolia: Constraints on the formation and evolution of the Xar Moron River suture zone. Geology in China, 43(6): 1947~1962.

Liu Jianfeng, Li Jinyi, Zhao Shuo, Zhang Jin, Zheng Rongguo, Zhang Wenlong, Lu Qianlu, Zheng Peixi. 2022&. Crustal accretion and Paleo—Asian Ocean evolution during Late Paleozoic—Early Mesozoic in southeastern Central Asian Orogenic Belt: evidence from magmatism in Linxi—Dongwuqi area, southeastern Inner Mongolia. Acta Petrologica Sinica, 38(8): 2181~2215.

Lu Hongbo, Feng Xuedong, Wang Jun, Zhu Xiaoqing, Dong Xiaopeng, Zhang Haichun, Zhang Yuxu. 2018&. Ophiolitic mélanges found in mount Langshan as the crucial evidence of collisional margin between North China Craton and Central Asian Orogenic Belt. Geological Review, 64(4): 777~805.

Luo Hongling, Wu Tairan, Zhao Lei. 2009&. Zicron SHRIMP U-Pb dating of Wuliangsitai A-type granite on the northern margin of the North China Plate and tectonic significance. Acta Petrologica Sinica, 25(3): 515~526.

Ma Fang, Mu Zhiguo, Liu Yulin. 2004&. Geochronology and geologic significance of the orbicular dioritic rocks in Luanping, Hebei Province. Geological Review, 50(4): 360~364.

Ma Xu, Chen Bin, Niu Xiaolu. 2009&. Genesis of the Late Paleozoic Dongwanzi pluton, eastern Hebei. Acta Petrologica Sinica, 25(8): 1975~1988.

Ma Xu, Chen Bin, Chen Jiafu, Niu Xiaolu. 2012#. Zircon SHRIMP U-Pb age, geochemical, Sr—Nd isotopic, and in-situ Hf isotopic data of the late Carboniferous—Early Permian plutons in the northern margin of the North China Craton. Science China: China Earth Sciences, 42(12): 1830~1850.

Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. Earth Science Reviews, 37(3~4): 215~224.

Pearce J A, Lippard S J and Roberts S. 1984. Characteristics and tectonic significance of supra—subduction zone ophiolites. In: Kokelaar B P and Howells MF(eds.). Marginal Basin Geology. Geological Society of London Special Publication, 16: 77~94.

Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc—alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. Contributions to Mineralogy and Petrology, 58: 63~81.

Qiu Jiansheng, Xiao E, Hu Jian, Xu Xisheng, Jiang Shaoyong and Li Zhen. 2008&. Ptrogenesis of highly fractionated I—type granites in the coastal area of northeastern Fujian Province: Constraints from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Nd—Hf isotopes. Acta Petrologica Sinica, 24(22): 2468~2484.

Sengor A M C, Natal`in B A, Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasis. Nature, 364: 299~307.

Shao Jian, He Guoqi, Tang Kedong. 2015&. The evolution of Permian continental crust in northern part of North China. Acta Petrologica Sinica, 31(1): 47~55.

Shao Jian, Wang You, Tang Kedong. 2017&. A reflection on the Xarmoron tectonomagmatic belt, Inner Mongolia, China. Acta Petrologica Sinica, 33(10): 3002~3010.

Shi Guanghai, Miao Laicheng, Zhang Fuqin, Jian Ping, Fan Weiming, Liu Dunyi. 2004#. The age and its district tectonic implications on the Xilinhaote A-type granites, Inner Mongolia. Chinese Science Bulletin, 49(4): 384~389.

Shi Rendeng, Yang Jingsui and Wu Cailai. 2003&. The discovery of adakitic dacite in Early Palaeozoic island arc volcanicrocks on the northern margin of Qaidam Basin and its geological significance. Acta Petrologica et Mineralogica, 22(3): 229~236.

Sun Deyou, Wu Fuyuan, Zhang Yanbin, Gao Shan. 2004&. The final closing time of the west Lamulun river—Changchun—Yenji palte suture zone: Evidence from the Dayushan granitic pluton, Jilin Province. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 34(2): 174~180.

Sun W D, McDonough W F. 1989. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society of London, Special Publication, 42: 313~345.

Wang Fang, Chen Fukun, Hou Zhenhui, Peng Peng, Zhai Mingguo. 2009&. Zircon ages and Sr—Nd—Hf isotopic composition of late Paleozoic granitoids in the Chongli—Chicheng area, northern margin of the North China Craton block. Acta Petrologica Sinica, 25(11): 3057~3074.

Wang Huichu, Zhao Fengqing, Li Huimin, Sun Lixin, Miao Laicheng, Ji Shiping. 2007&. Zircon SHRIMP U-Pb age of the dioritic rocks from northern Hebei: the geological records of late Paleozoic magmatic arc. Acta Petrologica Sinica, 23(3): 597~604.

Wang Huichu, Chu Hang, Xiang Zhenqun, Lu Songnian, Zhao Fengqing, Ren Yunwei. 2012&. The Hongqiyingzi Group in the Chongli—Chicheng area, northern margin of the North China Craton: A suite of late Paleozoic metamorphic complex. Earth Science Frontiers, 19(5): 100~113.

Wang Jinfang, Li Yingjie, Li Hongyang, Dong Peipei. 2017&. Discovery of Early Permian intra—oceanic arc adakite in the Meilaotewula ophiolite, Inner Mongolia and its evolution model. Acta Geologica Sinica, 91(8): 1776~1795.

Wang Jinfang, Li Yingjie, Li Hongyang, Dong Peipei. 2018&. Zircon U-Pb dating and tectonic setting of the Wulan´gou adakite in Inner Mongolia. Geological Bulletin of China, 37(10): 1933~1943.

Wang Jinfang, Li Yingjie, Li Hongyang, Dong Peipei. 2020&. Paleo—Asian Ocean subducted slab breakoff and post orogenic extension:

Evidence from geochronology and geochemistry of volcanic rocks in the Hegenshan suture zone. Acta Geologica Sinica, 94(12): 3561~3580.

Wang Jinfang, Li Yingjie, Li Hongyang, Dong Peipei. 2021a&. Discovery of the Late Carboniferous adakite in the Erenhot—Hegenshan suture zone and intra—oceanic subduction of the Paleo—Asian Ocean. Geology in China, 48(2): 520~535.

Wang Jinfang, Li Yingjie, Li Hongyang, Dong Peipei. 2021b&. The Asagetu shoshonitic volcanic rocks in the Hegenshan Suture: Zircon LA-ICP-MS U-Pb ages, geochemical features and its tectonic significance. Geological Review, 67(4): 918~935.

WangJinfang, Song Yutong, Li Kangshuo, Lu Zeqian, Liu Chenyu, Li Yingjie, Chen Gongzheng. 2024&. Discovery of the Paleoproterozoic complex at Dongwayao in northern Hebei and its constraint on the extensional event of the North China Craton. Geological Bulletin of China, 43(1): 46~60.

Wang Qiang, Hao Lulu, Zhang Xiuzheng. 2020#. Adakitic rocks at convergent plate boundaries: Compositions and petrogenesis. Science China Earth Sciences, 63(12): 1 992~2 016.

Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, Gao Shan. 2007&. Lu—Hf isotopic systematics and their applications in petrology. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 185~220.

Xiao Qinghui, Liu Yong, Xu Liquan, Ding Xiaozhong, Zhang Yuqing, Cheng Yang, Li Yan, Fan Yuxu, He Guoqi. 2020&. Preliminary study on geology and mineralization of the Bayan Obo Ocean Plate. Earth Science, 45(7): 2258~2278.

XiaoWenjiao, Windley B F, Hao J. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt. Tectonics, 22(6): 1069~1089.

XiaoWenjiao, Windley B F, Huang B C. 2009. End—Permian to mid—Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altaids; implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia. Int. J. Earth Sci., 98: 1189~1217.

Xu Bei, Zhao Pan, Bao Qingzhong, Zhou Yongheng, Wang Yanyang, Luo Zhiwen. 2014&. Preliminary study on the pre—Mesozoic tectonic unit division of the Xing—Meng Orogenic Belt (XMOB). Acta Petrologica Sinica, 30(7): 1841~1857.

Xu Bei, Wang ZhiWei, Zhang Liyang, Wang ZhiHui, Yang Zhenning, He Yue. 2018&. The Xing—Meng Intracontinent Orogenic Belt. Acta Petrologica Sinica, 34(10): 2819~2844.

Zhang Qi, Wang Yuanlong and Wang Yan. 2001&. Preliminary study on components of the lower crust in East China Plateau during Yanshanian Period: Constraints on the Sr and Nd isotopic compositrons of adakite—like rocks. Acta Petrologica Sinica, 17(4): 505~513.

Zhang Qi, Xu Jifeng, Wang Yan, Xiao Long, Liu Hongtao, Wang Yuanlong. 2004&. Dversity of adakite. Geological Bulletin of China, 23(9~10): 959 ~965.

Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Kröner A, Liu Xiaoming, Xie Liewen, Chen Fukun. 2009a. Early Permian plutons from the northern North China block: constraints on continental arc evolution and convergent margin magmatism related to the Central Asian Orogenic Belt. International Journal of Earth Sciences, 98: 1441~1467.

Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Song Biao. 2009b. Contrasting late Carboniferous and late Permian—middle Triassic intrusive suites from the northern margin of the North China craton: geochronology, petrogenesis, and tectonic implications. Geological Society of America Bulletin, 121: 18~200.

Geochronology and geochemistry of the Liangtou pluton in northern Hebei ——Implications for the Paleo-Asian Ocean closure

WANG Jinfang[1, 2, 3], LIU Chenyu[1], LU Zeqian[1], LI Kangshuo[1], SONG Yutong[1], LI Yingjie[1, 2, 3], CHEN Gongzheng[1, 2, 3]

1) *College of Earth Sciences, Hebei GeoUniversity, Shijiazhuang*, 050031;

2) *Hebei Key Laboratory of Strategic Critical Mineral Resources, Shijiazhuang*, 050031;

3) *Hebei Collaborative Innovation Center for Strategic Critical Mineral Research, Shijiazhuang*, 050031

Objectives: The closure time of the Paleo—Asian Ocean (PAO) on the northern margin of North China Plate is still unclear. The Liangtou monzogranite in Zhangbei area of northern Hebei Province is located in the central part of the northern margin of the North China Craton (NNCC), and has important implications for the PAO closure. This study carried out zircon LA-ICP-MS U-Pb geochronology and geochemistry on the monzogranite to discuss its origin, in order to provide new evidence for the closure time of the PAO.

Methods: Based on petrology, geochemistry, LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic composition, this paper discusses the petrogenesis and tectonic setting of the Liangtou pluton, and the closure time of the PAO.

Results: The zircon U-Pb LA-ICP-MS dating shows that the age of the monzogranite is 262.5±2.6 Ma, indicating that the pluton was emplaced in the Late Permian. The rock has higher SiO_2 (70.27%~73.89%), Na_2O (4.2%~4.55%), K_2O (3.87%~4.64%), Sr (417×10^{-6}~827×10^{-6}), and lower Yb (0.286×10^{-6}~$0.518\times$

10^{-6}), Y ($2.74\times10^{-6}\sim6.98\times10^{-6}$) contents. The zircon $\varepsilon_{Hf}(t)$ values range from −17.50 to −11.12, with two-stage model ages (t_{DM2}) of 1989~2390 Ma.

Conclusions: The Liangtou pluton belongs to adakitic rock and arc magmatite formed in the active continental margin arc setting. It indicates that the PAO may still be in the process of subduction towards the NNCC during the Late Permian(262.5±2.6 Ma), and its final closure time may have been at the end of the Late Permian.

Keywords: monzogranite; continental margin—arc setting; Late Permian; Paleo—Asian Ocean closure; northern North China Plate

Acknowledgements: This paper was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41502211), Project of Hebei Science and Technology Research and Development Plan (No. 12276709D)

First author: WANG Jinfang, female, born in 1983, master, associate professor, is mainly engaged in petrology and geochemistry; Email: wjfb1983@163.com

Manuscript received on: 2023-11-06; Accepted on: 2024-02-05; Published online on: 2024-02-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2024.02.025　　**Edited by**: ZHANG Yuxu

《地质学报》(英文版)进入科睿唯安期刊引证报告 Q1 区

2024 年 6 月 20 日,科睿唯安发布了最新的期刊引证报告(Journal Citation Reports,简称 JCR)。由中国科学技术协会主管,中国地质学会主办的学术期刊《地质学报》(英文版)最新影响因子为 3.5,总被引频次 6980,在 JCR 地学综合学科(Geosciences, Multidisciplinary)中的 253 本期刊中并列排名第 58 位,首次进入 Q1 区。

在此,中国地质科学院/中国地质学会期刊处感谢多年来支持中国地质学会主办期刊的主编、编委、作者、审稿专家和读者朋友。期刊处全体人员将不忘初心,再接再厉,不断提高办刊质量,提高服务水平与影响力,持续发表高质量创新学术成果,为科技强国和世界一流学会建设贡献力量。

期刊处