



引文格式: 滕超, 高建伟, 张晓飞, 等. 内蒙古锡林浩特小乌兰沟地区晚石炭世二长花岗岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 西北地质, 2024, 57(5): 259–271. DOI: 10.12401/j.nwg.2022045

Citation: TENG Chao, GAO Jianwei, ZHANG Xiaofei, et al. Geochronology and Geochemical Features of the Late Carboniferous Monzogranite in Xiaowulangou of Xilinhot, Inner Mongolia and Their Geological Implications[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(5): 259–271. DOI: 10.12401/j.nwg.2022045

内蒙古锡林浩特小乌兰沟地区晚石炭世二长花岗岩年代学、地球化学特征及其地质意义

滕超¹, 高建伟¹, 张晓飞^{2,*}, 邵杰¹, 杨欣杰¹, 曹军¹, 李树才¹

(1. 中国地质调查局自然资源实物地质资料中心, 河北 三河 065201; 2. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037)

摘要: 笔者以锡林浩特小乌兰沟地区发育的晚石炭世二长花岗岩为研究对象, 开展了岩石学、锆石 U-Pb 同位素年代学、岩石地球化学等研究, 讨论其构造环境, 为进一步研究古亚洲洋闭合时限提供新的依据。LA-ICP-MS 锆石同位素 U-Pb 测年结果显示, 该花岗岩的侵位年龄为 (319.5 ± 1.2) Ma, 相当于晚石炭世。岩石地球化学研究表明, 该岩石具有高 Si、富 K、贫 Mg、贫 Ca、低 P 和 Ti 的特征, 属于高钾钙碱性、过铝质系列岩石; 岩石富含大离子亲石元素 Rb 和高场强元素 Th、Ta、Hf, 亏损 Sr、Ba、Nb; 稀土元素以略富集轻稀土、Eu 亏损为特征。地球化学特征反映其为 I 型花岗岩, 来源于下地壳的部分熔融。构造环境判别图解显示该岩体形成于活动大陆边缘环境, 表明研究区在晚石炭世期间仍存在洋壳的俯冲作用, 暗示古亚洲洋此时尚未闭合。

关键词: 锡林浩特; 晚石炭世; I 型花岗岩; 锆石 U-Pb 年龄; 活动陆缘环境; 古亚洲洋

中图分类号: P597; P588.12

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)05-0259-13

Geochronology and Geochemical Features of the Late Carboniferous Monzogranite in Xiaowulangou of Xilinhot, Inner Mongolia and Their Geological Implications

TENG Chao¹, GAO Jianwei¹, ZHANG Xiaofei^{2,*}, SHAO Jie¹, YANG Xinjie¹, CAO Jun¹, LI Shucan¹

(1. Cores and Samples Center of Natural Resources, China Geological Survey, Sanhe 065201, Hebei, China;

2. Development and Research Centre, China Geological Survey, Beijing 100037, China)

Abstract: This study carried out analyses of petrology, zircon U-Pb isotopic geochronology and rock geochemistry of the Late Carboniferous monzogranite in Xiaowulangou of Xilinhot, in order to make the discussion of tectonic environment and provide a new basis for studying the closure time of the Paleo-Asian Ocean. Based on the LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results, determines that the age of emplacement of the granite is (319.5 ± 1.2) Ma, and equivalent to Late Carboniferous. Petrological and geochemical data reveal that the rock is charac-

收稿日期: 2022-08-29; 修回日期: 2022-10-15; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 中国地质调查局项目“国家重大工程实物地质资料采集与应用服务”(DD20221814)、“实物地质资料采集更新与数字化应用”(DD20230138)、“内蒙古 1:5 万苏哈图等四幅区域地质调查”(1212011120710)联合资助。

作者简介: 滕超(1985-), 男, 高级工程师, 主要从事基础地质调查与研究工作。E-mail: tc.1985@163.com。

* 通讯作者: 张晓飞(1985-), 男, 博士, 主要从事区域地质矿产调查与研究工作。E-mail: zhangxiaofei521125@169.com。

terized by high silicon, high potassium, poor magnesium, low calcium, low phosphorus, and titanium, It belongs to the high-K calc-alkaline and peraluminous series of rocks; The rocks are rich in large Ionic lithophilic elements Rb and high field strength elements Th, Ta, Hf, while depleting Sr, Ba, Nb; Rare earth elements are characterized by slightly enriched light rare earth, Eu losses. The geochemical characteristics reflect that it is partial melting from the low crust. The tectonic environment discriminant diagrams show that this rock is I-type granite representing active continental margin, indicating that the subduction of the oceanic crust during the Late Carboniferous period still existed, which implying that the Paleo-Asian Ocean didn't close in Late Carboniferous.

Keywords: Xilinhot; Late Carboniferous; I-type granite; zircon U-Pb age; active continental margin environment; Paleo-Asian Ocean

内蒙古中部地区是西伯利亚板块与华北板块最终拼合的关键部位,该区中生代以前经历了漫长的演化历史,因此岩浆活动强烈(陈斌等, 2009; 黄波等, 2016)。近年来,一些学者(Tang, 1990; Chen et al., 2000; Xiao et al., 2003)对该地区晚古生代花岗岩的构造背景和岩石成因做了很多研究,对古亚洲洋缝合时限、西伯利亚板块与华北板块碰撞拼合等问题进行了探索,多数学者认为西伯利亚板块与华北板块最终沿索伦缝合带闭合。

对于古亚洲洋最终闭合的时限仍未达成共识,一种观点认为其闭合于晚泥盆世—早石炭世,兴蒙造山带在晚古生代处于伸展背景(徐备等, 1997; 任收麦等, 2002; 朱永峰等, 2004; Jahn et al., 2009; Jian et al., 2010; 周志广等, 2010; 方俊钦等, 2014; 邵济安等, 2014, 2015a);另一种观点认为古亚洲洋最终闭合于晚二叠世—早三叠世(陈斌等, 2001; Xiao et al., 2003; 尚庆华, 2004; 刘建峰等, 2009; 张拴宏等, 2010; Zhang et al., 2011)。争议的焦点主要是对华北板块北缘在晚古生代与中生代之交的构造属性认识不同,是碰撞后伸展还是俯冲?因此,针对兴蒙造山带晚古生代花岗岩的时代、地球化学特征及其构造环境方面的研究,对解决晚古生代岩浆形成过程具有重要的意义。

笔者基于对锡林浩特小乌兰沟地区晚石炭世二长花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年、岩石学、岩石地球化学方面的研究,探讨其形成时代、岩石成因和构造背景,以期为兴蒙造山带晚古生代构造演化、古亚洲洋闭合时限提供新的证据。

1 区域地质背景及岩石特征

锡林浩特地区位于华北板块与西伯利亚板块之间的兴蒙造山带,经历了古亚洲洋板块的俯冲,陆-陆

碰撞造山及碰撞之后的伸展张裂,形成大量不同构造环境下的沉积、岩浆岩岩石组合,这些岩石组合记录了古亚洲洋的构造演化历史(徐备等, 2001, 2014; Jian et al., 2008)。

研究区位于内蒙古中部锡林浩特东南部,大地构造位置位于贺根山蛇绿岩带和二道井增生杂岩带之间的宝力道弧岩浆岩带(图 1),前人将研究区归为索伦缝合带北侧的北部造山带,与古亚洲洋的演化密切相关。研究区出露的地层单元由老至新依次为中元古界锡林浩特岩群、志留系徐尼乌苏组、二叠系大石寨组、三叠系哈达陶勒盖组、白垩系白音高老组和梅勒图组。

区内古生代—中生代岩浆岩极其发育,包括华力西期、印支期、燕山期 3 个岩浆旋回,主要岩石类型有二长花岗岩、花岗闪长岩、闪长岩。晚石炭世二长花岗岩主要分布于研究区东北部巴润乌德南—小乌兰沟—希力敖包一线,呈岩基、岩株状大面积出露,近 NEE 向展布,出露面积约为 83.21 km²(图 1a)。新发现晚石炭世二长花岗岩侵入到中志留统徐尼乌苏组粉砂质板岩中;该岩体侵入石炭纪闪长岩、花岗闪长岩中,被后期早白垩世二长花岗岩、正长花岗岩侵入。主要岩石类型为中粒二长花岗岩、细中粒二长花岗岩,受后期脆性断裂影响,岩石局部碎裂化、硅化、片理化(图 2a、图 2b)。

岩相学特征:风化面呈灰白—土灰色,新鲜面呈灰棕—灰褐色,中粒—细中粒花岗结构,块状构造。岩石由钾长石(35%~40%)、石英(20%~25%)、斜长石(25%~30%)及少量黑云母和副矿物组成,粒状矿物的粒度以 2.0~5.0 mm 为主,部分为 0.2~2.0 mm,整体不规则密集分布。钾长石呈半自形板粒状、他形粒状,个别见有卡斯巴双晶,为具格子双晶的微斜长石和少量条纹长石所组成,较强土化;石英呈他形粒

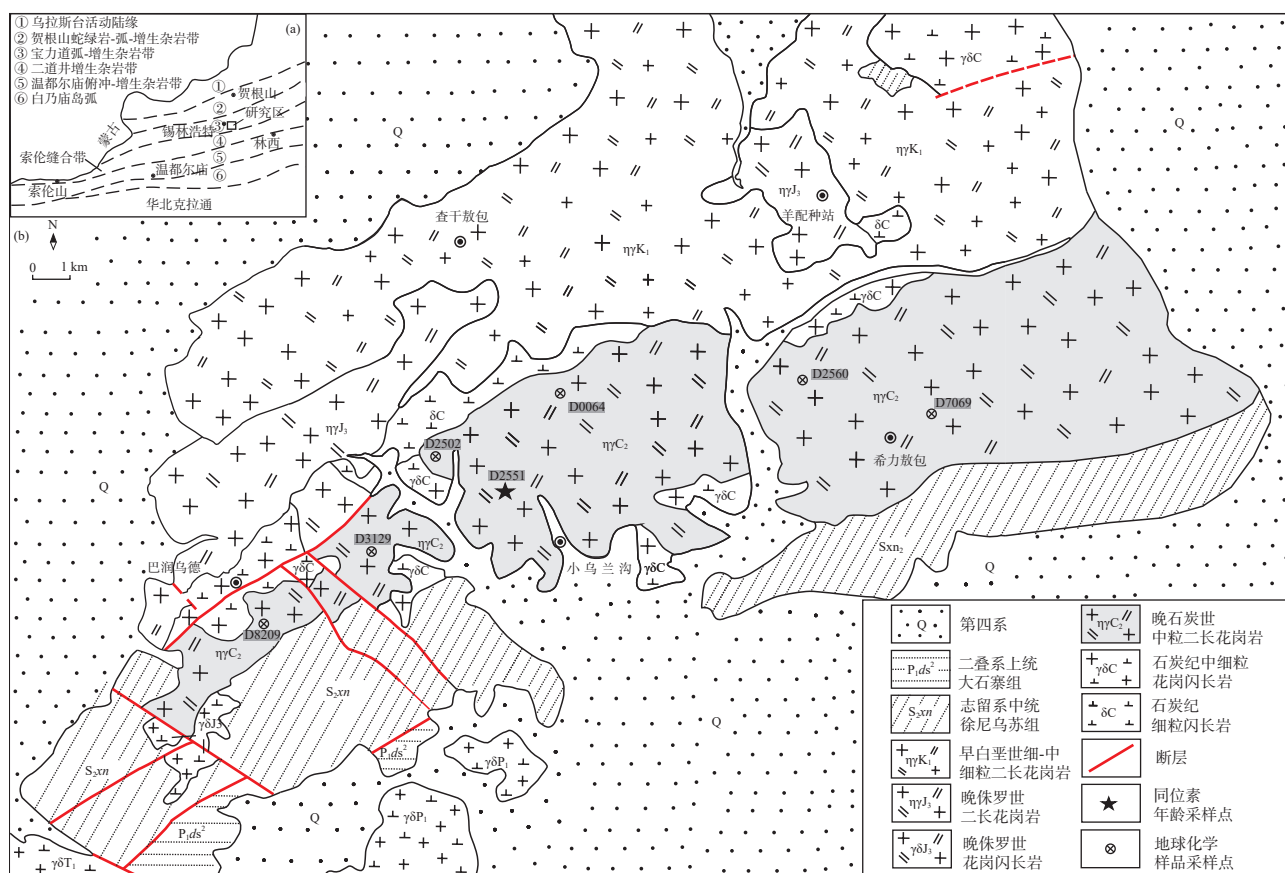
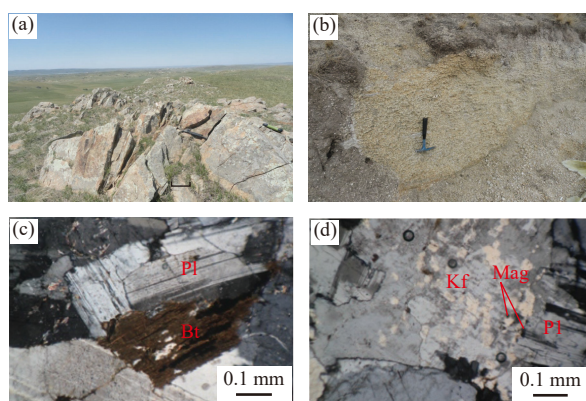


图1 研究区地质简图(a)和大地构造位置简图(b)(底图据 Xiao et al., 2003)

Fig. 1 (a) Geological sketch map and (b) simplified tectonic geological map of the study area



a、b.样品野外照片；c.显微特征(单偏光)；d.显微特征(正交偏光)；Kf.钾长石；Pl.斜长石；Bt.黑云母；Mag.磁铁矿

图2 小乌兰沟地区二长花岗岩宏观及显微特征

Fig. 2 Field outcrop and microscopic characteristics of the monzogranite

状,有的边缘局部粒化镶嵌生长;斜长石呈自形-半自形板柱状、板粒状,具较强绢云母化、高岭石等黏土矿化;黑云母呈片状、叶片状、宽片状,完全绿泥石化、弱绿帘石化。副矿物:黑色尘粒状、微粒状磁铁矿,磷灰石、锆石等,粒度 <0.1 mm,零散分布(图 2c、

图 2d)。

2 锆石 U-Pb 同位素年代学

2.1 测试方法

所采集的锆石测年样品来自小乌兰沟 WN 向 1393.4 高程点附近的新鲜露头,采样点地理坐标为 N 43°57'23"、E 116°53'19",样品编号为 b2551,样品岩性为细中粒二长花岗岩。锆石单矿物挑选在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成,样品质量约为 5 kg,经机械粉碎至 80~100 目,用浮选、电磁选方法进行分离,然后在双目镜下挑选出晶形和透明度较好的锆石颗粒用于年龄测定。锆石制靶、阴极发光 (CL) 照相在北京锆年领航科技有限公司完成。锆石 U-Pb 同位素定年在天津地质调查中心实验室激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪 (LA-MC-ICP-MS) 上完成。利用 193 nm FX 激光器对锆石进行剥蚀,激光束斑直径为 35 μ m,以氦气作为激光剥蚀物质的载气,送入 Neptune (MC-ICP-MS),利用动态变焦扩大色散使

质量数相差很大的 U-Pb 同位素可以同时接收,从而进行锆石 U-Pb 同位素测定。锆石标样采用 TEM (417 Ma) 标准锆石,数据处理采用 ICPMS DataCal 程序,加权平均年龄计算及谐和图的绘制采用 ISO-PLOT 3.0 程序(Ludwig, 2003)。所有数据点的年龄值误差均为 1σ , 采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,其年龄加权平均值具 95% 的置信度(Anderson, 2002)。

2.2 测试结果

选取细中粒二长花岗岩样品(b2551)进行 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析,锆石阴极发光

图像(图 3)显示,锆石晶形较好,整体呈长柱状、短柱状自形晶,长宽比值为 $1:1\sim 2:1$, 锆石颗粒内部均可见清晰的岩浆震荡环带结构。

从样品测试结果(表 1)可知,样品 16 个测试数据的 Th/U 值为 $0.60\sim 1.41$, 平均为 0.89, 均大于 0.30, 具岩浆锆石高 Th/U 特征。在锆石 U-Pb 年龄谐和图上(图 4), 所测锆石的同位素分析数据 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 值为 $318\sim 321$ Ma, 均落在谐和线上, 16 个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 (319.5 ± 1.2) Ma, 代表了岩体形成时代, 该套岩体归为晚石炭世。

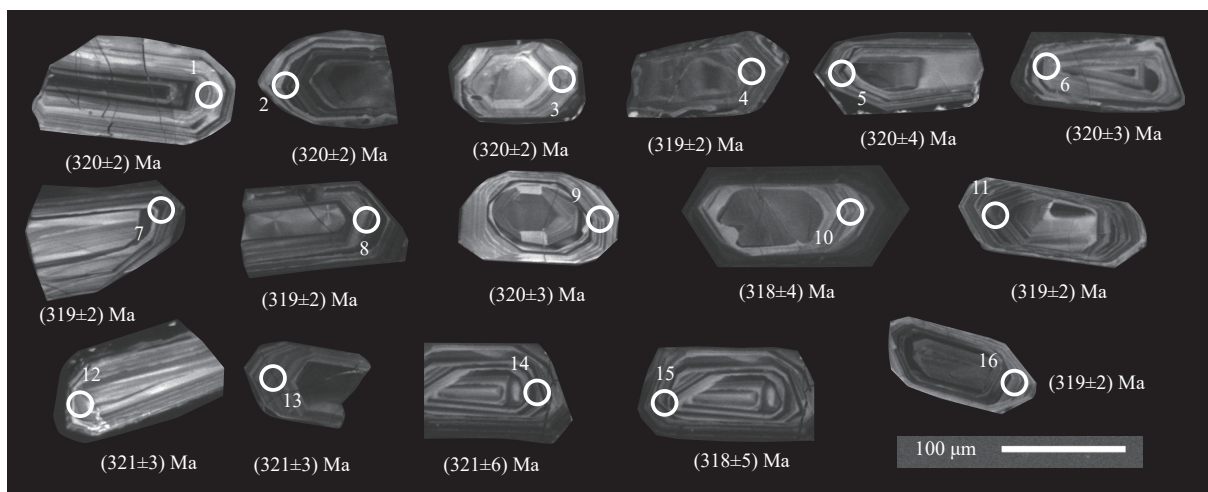


图3 小乌兰沟地区晚石炭世二长花岗岩锆石阴极发光图像

Fig. 3 CL images of zircons for the late Carboniferous monzogranite in Xiaowulangou area

表 1 小乌兰沟地区晚石炭世二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分析结果

Tab. 1 LA-ICP-MS zircons U-Th-Pb data for the late Carboniferous monzogranite in Xiaowulangou area

点号	含量 (10^{-6})		同位素比值						年龄 (Ma)					
	Pb	U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ
1	20	374	0.050 9	0.000 3	0.374 2	0.021 6	0.053 3	0.003 1	320	2	323	19	344	130
2	38	681	0.050 8	0.000 3	0.371 5	0.014 7	0.053 0	0.002 1	320	2	321	13	329	89
3	75	1 446	0.050 8	0.000 3	0.370 0	0.011 8	0.052 8	0.001 7	320	2	320	10	321	72
4	32	616	0.050 7	0.000 3	0.373 6	0.017 5	0.053 4	0.002 5	319	2	322	15	346	104
5	19	382	0.050 9	0.000 6	0.371 6	0.065 7	0.052 9	0.009 3	320	4	321	57	326	399
6	10	190	0.050 9	0.000 5	0.370 9	0.046 4	0.052 9	0.006 8	320	3	320	40	323	293
7	26	510	0.050 8	0.000 4	0.371 7	0.024 6	0.053 1	0.003 5	319	2	321	21	333	149
8	40	784	0.050 8	0.000 3	0.370 4	0.012 5	0.052 9	0.001 7	319	2	320	11	325	75
9	12	230	0.050 8	0.000 4	0.370 9	0.035 0	0.052 9	0.005 0	320	3	320	30	326	216
10	21	402	0.050 6	0.000 6	0.371 1	0.054 5	0.053 2	0.007 8	318	4	320	47	338	334
11	18	350	0.050 8	0.000 4	0.372 4	0.023 3	0.053 2	0.003 3	319	2	321	20	338	141
12	43	786	0.051 0	0.000 5	0.373 0	0.081 6	0.053 1	0.011 4	321	3	322	70	331	486
13	35	606	0.051 0	0.000 5	0.373 4	0.043 7	0.053 1	0.006 0	321	3	322	38	334	258
14	8	143	0.051 1	0.000 9	0.377 4	0.077 4	0.053 6	0.011 1	321	6	325	67	353	470
15	9	183	0.050 6	0.000 8	0.371 0	0.096 5	0.053 2	0.014 2	318	5	320	83	337	606
16	23	418	0.050 7	0.000 3	0.369 8	0.020 7	0.052 9	0.003 0	319	2	319	18	323	127

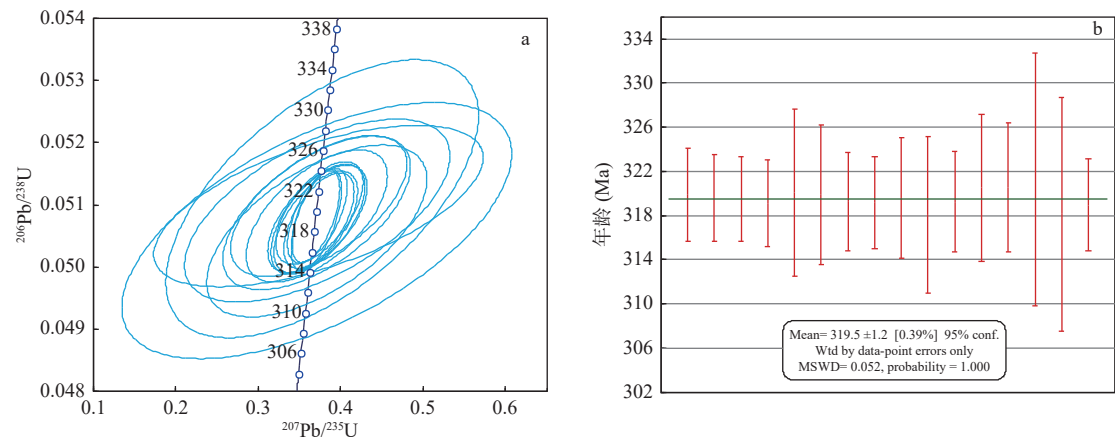


图4 小乌兰沟地区晚石炭世二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄谐和图 (a) 和加权平均年龄 (b)

Fig. 4 (a)Zircon U-Pb diagram and (b) weighted mean ages diagram for the late Carboniferous monzogranite in Xiaowulangou area

3 岩石地球化学特征

3.1 主量元素

从晚石炭世二长花岗岩的主量元素特征(表 2) 可知, 岩石中 SiO₂ 含量为 73.79%~77.40%, 平均为 75.81%。富含碱质, K₂O+Na₂O 值为 7.43%~9.34%, 平均为 8.24%; 钠小于钾, K₂O/Na₂O 值为 1.13~1.55, 平均为 1.26; 高铝, Al₂O₃ 值为 12.65%~14.88%, 平均为 13.05%; FeO^T/MgO 值为 2.72~10.92, 平均为 5.80; 铝

表 2 小乌兰沟地区二长花岗岩主量元素(%)分析结果

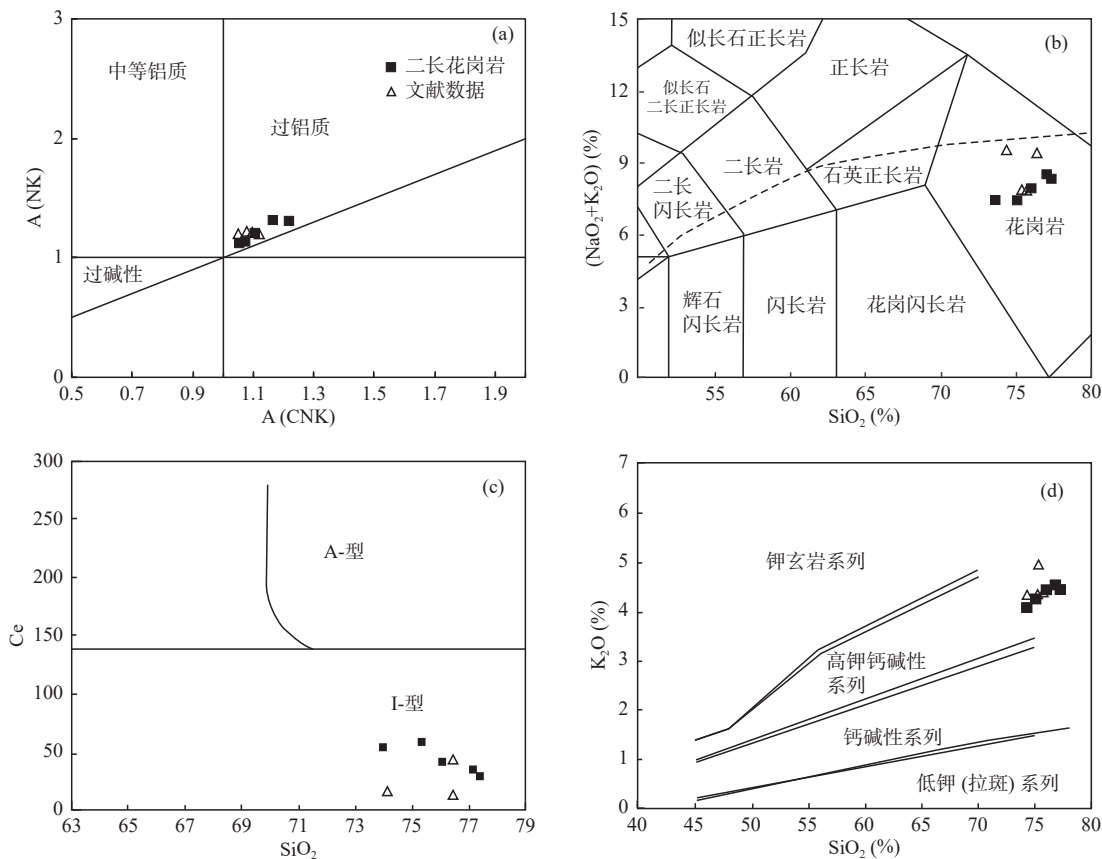
Tab. 2 Major elements (%)compositions of the monzogranite in Xiaowulangou area

样 号	岩 性	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O
D2551	细中粒二长花岗岩	77.10	0.06	12.78	0.37	0.29	0.039	0.07	0.39	3.89
D7069	细中粒二长花岗岩	77.40	0.05	12.65	0.34	0.24	0.028	0.05	0.28	3.93
D8209	中粒二长花岗岩	73.79	0.38	13.16	0.77	1.70	0.043	0.88	0.75	3.38
D3129	中粒二长花岗岩	75.19	0.28	12.96	1.29	0.97	0.037	0.38	0.39	3.22
D2560	中粒二长花岗岩	75.99	0.18	12.77	0.69	0.74	0.04	0.32	0.51	3.54
D0064	细中粒二长花岗岩	76.14	0.16	12.47	0.73	0.60	0.042	0.27	0.67	3.51
D2502	中粒二长花岗岩	76.30	0.14	12.62	0.62	0.62	0.033	0.29	0.57	3.32
WHEH-50-GSY01	二长花岗岩	74.11	0.05	14.88	0.47	0.05	0.03	0.07	0.34	4.56
WHEH-46-GSY01	二长花岗岩	76.31	0.06	13.18	0.17	0.19	0.08	0.08	0.35	3.56
样 号	岩 性	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁺	H ₂ O ⁺	烧失量	K ₂ O/Na ₂ O	A/CNK	FeO ^T /MgO	AR
D2551	细中粒二长花岗岩	4.59	0.012	0.34	0.14	0.38	1.18	1.06	8.90	4.62
D7069	细中粒二长花岗岩	4.44	0.012	0.47	0.12	0.57	1.13	1.07	10.92	4.67
D8209	中粒二长花岗岩	4.05	0.083	0.810	0.24	0.87	1.20	1.16	2.72	3.29
D3129	中粒二长花岗岩	4.27	0.055	0.680	0.29	0.90	1.33	1.22	5.61	3.56
D2560	中粒二长花岗岩	4.42	0.04	0.54	0.19	0.70	1.25	1.11	4.20	4.00
D0064	细中粒二长花岗岩	0.035	0.47	0.17	0.88	1.27	1.06	2.22	4.08	0.035
D2502	中粒二长花岗岩	0.033	0.49	0.16	0.63	1.43	1.09	2.18	4.13	0.033
WHEH-50-GSY01	二长花岗岩	0.03	—	—	—	1.05	1.12	0.71	4.18	0.03
WHEH-46-GSY01	二长花岗岩	0.05	—	—	—	1.55	1.06	2.38	5.07	0.05

注: —表示无数据; 样品D0064、D2502数据引自Zhang等(2020); 样品WHEH-50-GSY01、WHEH-46-GSY01数据引自袁建国等(2017)。测试单位为河北省区域地质矿产调查研究所实验室。

饱和指数(A/CNK)为 1.06~1.22, 平均为 1.10, 为过铝质岩石(图 5a); 里特曼指数 σ 值为 1.74~2.80, 平均为 2.08; 碱度率 AR 为 3.29~5.07, 平均为 4.18, 为钙碱性岩石。在 TAS 图中, 样品落入亚碱性系列的花岗岩

区域(图 5b); 在 SiO_2 -Ce 图解中, 样品均落入 I-型花岗岩中(图 5c); 在 SiO_2 - K_2O 图解中, 样品全部落入高钾钙碱性区域(图 5d)。主量元素显示其属高钾钙碱性、过铝质系列岩石。



底图 a 据 Maniar 等(1989); 底图 b 据 Cox 等(1979); 底图 d 据 Rickwood(1989)

图5 小乌兰沟地区晚石炭世二长花岗岩 A/CNK-A/NK(a)、TAS(b)、 SiO_2 -Ce(c)与 SiO_2 - K_2O (d)图解

Fig. 5 (a) A/CNK-A/NK, (b) TAS, (c) SiO_2 -Ce and (d) SiO_2 - K_2O diagrams for the late Carboniferous monzogranite in Xiaowulangou area

3.2 微量元素和稀土元素

区内晚石炭世二长花岗岩微量元素分析结果(表 3)和原始地幔标准化多元素图解(图 6a)显示, 微量元素总体含量较高, 具有一致的微量元素分配曲线, 富含大离子亲石元素 K、Rb 和高场强元素 Th、Hf、Ta, 相对亏损 Ba、Nb、Sr、Ti、P 等元素, 反映了俯冲带岩浆岩的地球化学特征; Rb、Th 等元素的相对富集, 指示本区岩浆的形成与壳源有关。Sr、Ba 的相对亏损可能由于斜长石的分离结晶作用或岩浆起源于斜长石稳定区导致。同时具有高 Rb/Sr(1.79~25.55)、低 Sr/Ba(0.09~0.55)的特点。

稀土元素配分曲线为相对平坦型, 略向右倾, 以略富集轻稀土、Eu 亏损为特征(图 6b); 稀土元素配分

曲线上表现为轻稀土元素区间略倾斜, 重稀土元素区间平缓, Eu 负异常明显, 暗示岩石经历了强烈的斜长石分离结晶作用或源区残留有大量的斜长石; 稀土元素分析结果(表 4)显示, 稀土总量(ΣREE)变化大, 含量为 $67.19 \times 10^{-6} \sim 200.21 \times 10^{-6}$, 平均为 121.11×10^{-6} ; LREE/HREE 值为 0.72~2.29, 平均为 1.50, δEu 值为 0.06~0.42, 平均为 0.23。

4 讨论

4.1 岩石成因

区内晚石炭世二长花岗岩主量元素显示出高 Si、富 K、贫 Mg、低 P 和 Ti 的特征, 其属于高钾钙碱性、

表 3 小乌兰沟地区二长花岗岩微量元素(10^{-6})分析结果

Tab. 3 Trace element (10^{-6}) compositions of the monzogranite in Xiaowulangou area

样号	岩性	Cs	Rb	Sr	Ba	Ga	Nb	Ta	Zr	Hf	Th
D2551	细中粒二长花岗岩	6.10	251.30	20.00	108.60	13.28	12.31	2.89	54.50	2.70	17.10
D7069	细中粒二长花岗岩	8.08	258.10	10.10	107.60	12.77	8.45	2.87	51.80	3.03	12.19
D8209	中粒二长花岗岩	5.10	155.00	86.40	565	16.00	10.60	0.79	199.00	7.390	16.80
D3129	中粒二长花岗岩	10.30	226.00	79.00	532	18.6	16.60	1.52	236.00	9.460	23.10
D2560	中粒二长花岗岩	8.31	229.17	51.51	294.21	14.33	15.31	1.96	121.93	5.08	20.13
D0064	细中粒二长花岗岩	18.41	238.70	65.00	290.30	10.94	30.84	1.73	93.60	4.40	17.04
D2502	中粒二长花岗岩	1.87	245.9	48.5	161.7	14.4	13.05	1.95	96.7	3.50	34.56
WHEH-50-GSY01	二长花岗岩	—	248.1	18.3	50	17	12.8	1.8	23.3	1.4	8.6
WHEH-46-GSY01	二长花岗岩	—	227.7	26.2	47.6	13.7	14.6	2.3	32.8	1.9	6.5

样号	岩性	V	Cr	Co	Ni	Li	Sc	U	Th/U	Rb/Sr	Sr/Ba
D2551	细中粒二长花岗岩	23.00	1.90	0.44	7.40	7.30	5.18	0.84	20.36	12.57	0.18
D7069	细中粒二长花岗岩	20.70	1.20	0.18	1.90	11.68	4.30	1.06	11.50	25.55	0.09
D8209	中粒二长花岗岩	66.50	27.30	4.47	5.29	38.9	8.37	0.95	17.68	1.79	0.15
D3129	中粒二长花岗岩	54.6	21.30	3.72	5	29.4	7.58	1.1	21.00	2.86	0.15
D2560	中粒二长花岗岩	40.90	10.97	1.98	4.95	22.93	5.91	1.28	15.73	4.45	0.18
D0064	细中粒二长花岗岩	33.80	3.80	1.29	3.10	39.89	3.70	1.59	10.72	3.67	0.22
D2502	中粒二长花岗岩	46.8	10.3	1.8	7.0	10.4	6.3	2.14	16.15	5.07	0.30
WHEH-50-GSY01	二长花岗岩	26.4	23.2	0.8	—	—	—	1.7	5.06	13.56	0.37
WHEH-46-GSY01	二长花岗岩	16.6	21.6	0.6	—	—	—	1.9	3.42	8.69	0.55

注: —表示无数据; 样品D0064、D2502数据引自Zhang等(2020); 样品WHEH-50-GSY01、WHEH-46-GSY01数据引自袁建国等(2017)。测试单位为河北省区域地质矿产调查研究所实验室。

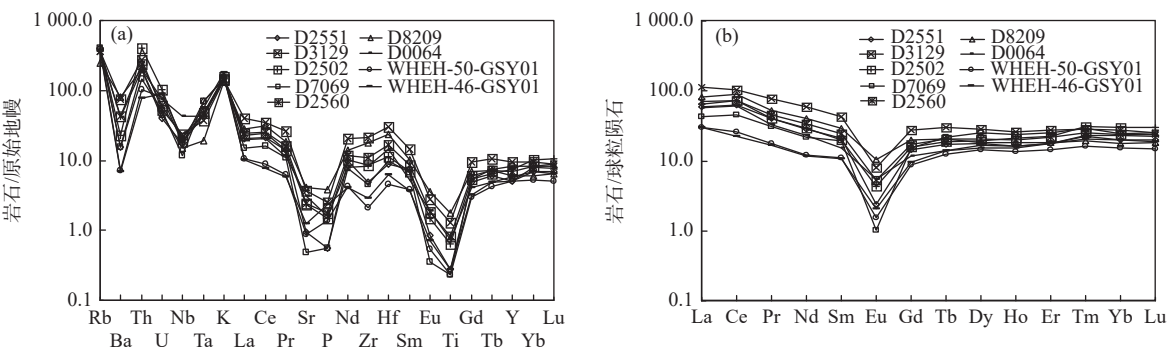


图6 小乌兰沟地区晚石炭世二长花岗岩微量元素原始地幔标准化图解 (a)和稀土元素球粒陨石标准化图解(b) (标准化数据据 Sun et al., 1989)

Fig. 6 (a) Multi-elements diagram of primitive mantle-normalized, and (b) chondrite-normalized REE patterns for the late Carboniferous monzogranite in Xiaowulangou area

过铝质系列岩石。微量元素上同样具有I型花岗岩的特征, 如较高的Zr、Ga、Nb、Y含量和较低的Sr、Ba含量, 其 $10\,000\times\text{Ga}/\text{Al}$ 均值为2.11, 与I型花岗岩平均值(2.1)一致, 低于S型和A型花岗岩平均值(2.28和

3.75)(Whalen et al., 1987)。大离子亲石元素Rb和高场强元素Th、Hf、Ta相对富集, Nb、P、Ti亏损, 表明岩浆应来源于下地壳, 形成于与俯冲作用有关的构造环境(刘建峰等, 2009)。由于高分异的I、S型花岗岩

表 4 小乌兰沟地区二长花岗岩稀土元素(10^{-6})分析结果

Tab. 4 REE (10^{-6}) compositionsof the monzogranite in Xiaowulangou area

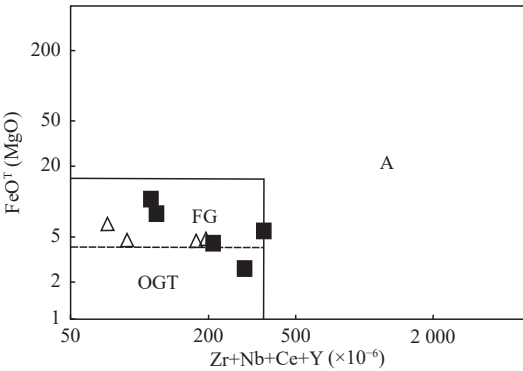
样号	岩性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho
D2551	细中粒二长花岗岩	14.02	38.34	3.90	13.40	3.27	0.14	2.93	0.64	4.53	0.93
D7069	细中粒二长花岗岩	10.17	28.03	2.97	10.26	2.95	0.06	3.18	0.81	6.37	1.36
D8209	中粒二长花岗岩	19.4	55.6	5.05	19	4.45	0.6	4.11	0.78	4.69	1.02
D3129	中粒二长花岗岩	27	62.6	7.32	27.5	6.52	0.46	5.59	1.13	7.18	1.48
D2560	中粒二长花岗岩	16.62	44.25	4.36	15.75	3.76	0.31	3.57	0.76	5.28	1.14
D0064	细中粒二长花岗岩	13.64	36.98	3.09	10.77	2.31	0.32	2.40	0.52	3.89	0.86
D2502	中粒二长花岗岩	15.50	43.97	3.81	13.57	3.05	0.25	3.21	0.70	4.99	1.21
WHEH-50-GSY01	二长花岗岩	7.14	15.74	1.71	5.65	1.69	0.09	1.8	0.46	3.63	0.77
WHEH-46-GSY01	二长花岗岩	7.1	13.72	1.61	5.45	1.64	0.12	1.94	0.52	4.26	0.93

样号	岩性	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Σ REE	LREE/HREE	δ Eu	$(La/Yb)_N$	Sm/Nd
D2551	细中粒二长花岗岩	2.97	0.57	3.39	0.51	23.08	112.62	1.85	0.14	2.97	0.24
D7069	细中粒二长花岗岩	4.20	0.75	4.13	0.65	37.21	113.10	0.93	0.06	1.77	0.29
D8209	中粒二长花岗岩	3.01	0.49	3.01	0.47	27.8	149.48	2.29	0.42	4.62	0.23
D3129	中粒二长花岗岩	4.61	0.73	4.64	0.65	42.8	200.21	1.91	0.23	4.17	0.24
D2560	中粒二长花岗岩	3.57	0.65	4.02	0.60	31.36	136.00	1.67	0.25	2.97	0.24
D0064	细中粒二长花岗岩	2.92	0.59	3.88	0.57	23.35	106.09	1.72	0.41	2.52	0.65
D2502	中粒二长花岗岩	3.73	0.79	5.06	0.78	33.89	134.50	1.47	0.24	2.20	0.69
WHEH-50-GSY01	二长花岗岩	2.41	0.42	2.6	0.38	22.7	67.19	0.91	0.16	1.97	0.91
WHEH-46-GSY01	二长花岗岩	2.95	0.53	3.37	0.48	26.2	70.82	0.76	0.21	1.51	0.92

注：样品D0064、D2502数据引自Zhang等, 2020；样品WHEH-50-GSY01、WHEH-46-GSY01数据引自袁建国等, 2017。测试单位为河北省区域地质矿产调查研究所实验室。

的诸多特征与 A 型花岗岩十分相似,因此有必要在化学成分方面对其类型加以区分。相对于 A 型花岗岩,高分异的 S 型花岗岩具有更高的 P_2O_5 含量和更低的 Na_2O 含量;高分异的 I 型花岗岩则具有更低的 FeO^T 含量($<1.00\%$)、 Ga/Al 值(王强等, 2000)。小乌兰沟晚石炭世二长花岗岩具有中等的 P_2O_5 含量(均值为 0.04%)和较高的 Na_2O 含量(均值为 3.66%)可区别于高分异的 S 型花岗岩;具有中等的 FeO^T 含量(均值为 1.14%)和较低 $10\,000\times Ga/Al$ 含量(均值为 2.11)仍可区别于 A 型花岗岩。

在 $FeO^T/MgO-(Zr+Nb+Ce+Y)$ 判别图解中(图 7),样品位于分异的 I 型花岗岩范围内。二长花岗岩不发育铁镁质碱性矿物,较低质量分数的 Zr、Nb、Y、La 和 Ce 也反应了其 I 型花岗岩并非 A 型(Wu et al., 2003; 刘群等, 2015)。Ba 含量为 $47.60\times 10^{-6}\sim 565\times 10^{-6}$,均值为 239.67×10^{-6} ,低于地壳含量 390×10^{-6} ,说明岩浆源区具有地壳重熔的特点。稀土元素配分曲线呈明显的“V”形,表明二长花岗岩具有典型的地壳



A.A 型花岗岩; FG.分异的 I 型花岗岩;
OGT.世界 I 型、S 型和 M 型花岗岩

图7 小乌兰沟地区晚石炭世二长花岗岩的成因类型判别图解(底图据 Whalen et al., 1987)

Fig. 7 Discriminant diagrams of genetic-types for the late Carboniferous monzogranite in Xiaowulangou area

重熔型岩浆来源的特征。二长花岗岩 Rb/Sr 值为 $1.79\sim 25.55$, Sr/Ba 值为 $0.09\sim 0.55$, 均位于壳源岩浆范围内(Tischendorf et al., 1985), 大离子亲石元素 Sr 均

值为 45×10^{-6} , 远低于地壳含量 (480×10^{-6})。岩石地球化学特征反映本区晚石炭世二长花岗岩来源于下地壳的部分熔融。

4.2 构造背景

前人关于华北板块北缘的构造背景及其与中亚造山带及古亚洲洋构造演化的关系一直存有较大争议。部分学者认为古亚洲洋在中晚泥盆世-早石炭世闭合(徐备等, 1997; 邵济安等, 2014, 2015b), 石炭纪—二叠纪为裂谷环境(唐克东等, 1991), 但大陆裂谷火成岩通常具有较高的 TiO_2 含量及 Nb、Ta 正异常, 这与本区岩浆岩的地球化学特征不一致。另一部分学者认为两大板块的最终碰撞发生在晚二叠世—早三叠世(任收麦等, 2002; Xiao et al., 2003; 尚庆华, 2004; Jian et al., 2010; 张拴宏等, 2010)。区域研究表明, 锡林浩特、西乌旗地区在晚石炭世至早二叠世期间发育强烈的岛弧岩浆作用, 形成了广泛的岛弧型花岗岩。例如, 锡林浩特毛登牧场花岗闪长岩 (330.6 ± 1.8) Ma 和二长花岗岩 (327.7 ± 2.6) Ma (袁建国等, 2017), 锡林浩特跃进地区酸性侵入岩 (310 ~ 330 Ma) (王树庆等, 2018); 西乌旗白音高勒石英闪长岩 (313 ~ 323 Ma) (鲍庆中等, 2007), 西乌旗南部石英闪长岩 (322 ± 3 Ma, 325 ± 3 Ma) (刘建峰等, 2009), 西乌旗猴头庙地区石英闪长岩 (325 ± 3 Ma, 323 ± 3 Ma) (马士委等, 2016)。锡林浩特地区早石炭世变质基性火山岩 (334.5 ± 3.5 Ma, 323.4 ± 2.4 Ma) 是一般岛弧环境岩浆活动的产物, 还未到成熟岛弧的程度(康健丽等, 2016)。苏尼特右旗温都尔庙地区早石炭世火山岩形成于岛弧环境向大陆边缘弧环境过渡的构造环境(张金凤等, 2016)。西乌旗达青牧场地区存在一套晚石炭世—早二叠世早期

的俯冲增生杂岩, 表明至少在晚石炭世古亚洲洋的俯冲仍在继续(Liu et al., 2013)。以上强烈的岛弧岩浆活动暗示古亚洲洋大洋板块俯冲活动在晚石炭世至早二叠世期间达到高潮, 但并未到碰撞造山的阶段。

Gorton 等(2000)利用不相容元素 Ta、Th 和 Yb 的含量及其比值有效地区分出大洋岛弧、活动大陆边缘和板内火山岩带 3 种不同的构造环境, 将 3 种构造环境中火成岩的 Th 含量逐步富集主要归因于弧的成分增加, 板内火山岩带 Th/Ta 值为 1~6, 活动大陆边缘 Th/Ta 值为 6~20, 大洋岛弧 Th/Ta 值大于 20~90。本区 Th/Ta 值为 2.83~21.27, 平均为 10.23, 表明本区晚古生代岩浆活动的构造环境具有活动大陆边缘的特征。岩浆相对富集 Rb、K 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、P 和 Ti 等高场强元素的特征也反映了岩浆形成于与俯冲带有关的陆缘环境或岛弧构造环境。在微量元素构造环境判别 Pearce 图解中(图 8), 大多样品落入火山弧花岗岩区域, 反映花岗岩形成于俯冲带的构造环境; 在主量元素构造环境判别 R_1 - R_2 图解中(图 9), 二长花岗岩基本落在破坏性活动板块边缘(板块碰撞前)与同碰撞过渡区域, 存在由俯冲向同碰撞过渡的趋势; 在微量元素比值 Th/Yb-Ta/Yb 判别图解中(图 10), 样品大多落在活动大陆边缘(陆缘弧)区域。

早石炭世至早二叠世, 古亚洲洋持续向北俯冲, 在苏左旗、锡林浩特和西乌旗地区发育强烈的岛弧岩浆作用, 形成了以小乌兰沟复式岩体为代表的岛弧型花岗岩(陈斌等, 2001; 鲍庆中等, 2007; 刘建峰等, 2009; Liu et al., 2013; Zhang et al., 2020)。古亚洲洋于晚古生代末期闭合(Chen et al., 2000; Xiao et al., 2003; Liu et

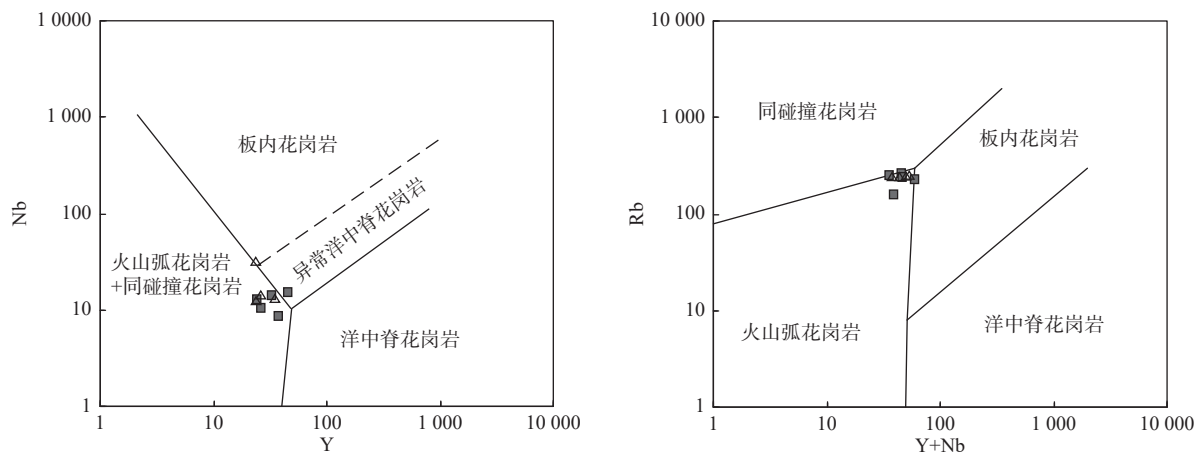
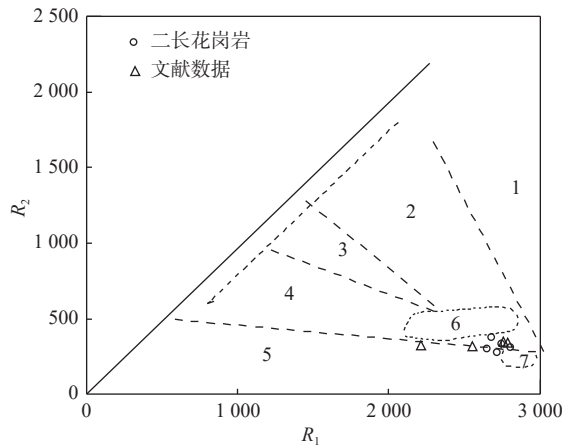


图8 晚石炭世二长花岗岩的 Nb-Y (a) 和 Rb-(Y+Nb) (b) 构造环境判别图(底图据 Pearce et al., 1984)

Fig. 8 (a) Nb-Y and (b) Rb-(Y+Nb) discrimination diagrams of tectonic environment for the late Carboniferous monzogranite



1.地幔分异产物; 2.板块碰撞前; 3.碰撞后隆起;
4.晚造山; 5.非造山; 6.同碰撞; 7.后造山

图9 晚石炭世二长花岗岩的 R_1 - R_2 构造环境判别图
(底图据 Batchelor et al., 1985)

Fig. 9 R_1 - R_2 discrimination diagram of tectonic environment for the late Carboniferous monzogranite

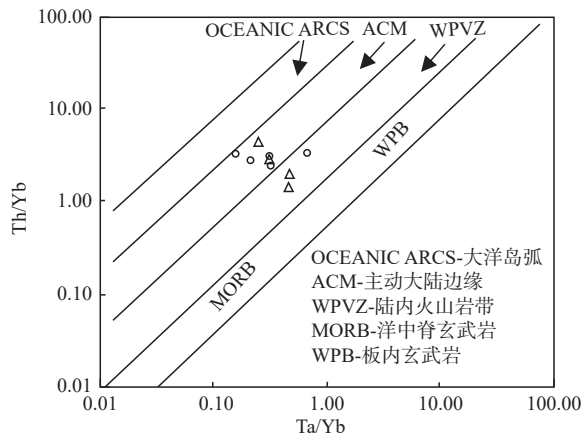


图10 晚石炭世二长花岗岩的 Th/Yb - Ta/Yb 判别图解
(底图据 Gorton et al., 2000)

Fig. 10 Th/Yb - Ta/Yb discrimination diagram for the late Carboniferous monzogranite

al., 2016), 形成了晚二叠世—早中三叠世的具同碰撞特征 S 型花岗岩、I 型花岗及与加厚地壳有关的埃达克岩组合 (Chen et al., 2000; 李锦铁等, 2007; 刘建峰等, 2014)。晚三叠世发育与碰撞造山后的岩石圈伸展作用有关的碱性—碱长 (A 型) 花岗岩和镁铁—超镁铁质杂岩 (张拴宏等, 2010; Liu et al., 2012; 李红英等, 2015), 标志着新的地壳构造演化阶段的开始 (李锦铁等, 2007)。

综上所述, 锡林浩特小乌兰沟地区晚石炭世二长花岗岩的年龄结果及地球化学特征表明: 在晚石炭世期间 (319.5±1.2) Ma, 研究区处于活动大陆边缘环境,

存在洋壳的俯冲作用, 推测古亚洲洋在晚石炭世期间尚未闭合。

5 结论

(1) 内蒙古锡林浩特小乌兰沟地区二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄为 (319.5±1.2) Ma, 表明其形成时代为晚石炭世。

(2) 晚石炭世二长花岗岩主量元素显示其属于高钾钙碱性、过铝质系列岩石, 并具有高硅、富钾、贫镁、贫钙、低磷和钛的特征; 岩石富含大离子亲石元素 Rb 和高场强元素 Th、Hf、Ta, 亏损 Sr、Ba、Nb; 稀土元素以略富集轻稀土、Eu 亏损为特征。岩石地球化学特征反映其为 I 型花岗岩, 为典型的壳源岩浆系列, 来源于下地壳的部分熔融。

(3) 经过构造判别分析认为晚石炭世二长花岗岩形成于活动大陆边缘的构造环境, 表明研究区在晚石炭世期间仍存在洋壳的俯冲作用, 古亚洲洋此时尚未闭合。

致谢: 感谢项目组成员在论文撰写过程中的大力支持, 岩石薄片鉴定工作由苏桂芬教授级高工完成, 审稿专家对本文进行了认真的审查并提出了宝贵的修改意见, 在此一并致以衷心的感谢。

参考文献 (References):

- 鲍庆中, 张长捷, 吴之理, 等. 内蒙古白音高勒地区石炭纪石英闪长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学及其意义 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2007, 37(1): 15-23.
- BAO Qingzhong, ZHANG Changjie, WU Zhili, et al. SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology of a Carboniferous Quartz-Diorite in Baiyingaole Area, Inner Mongolia and Its Implications [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2007, 37(1): 15-23.
- 陈斌, 马星华, 刘安坤, 等. 锡林浩特杂岩和蓝片岩的锆石 U-Pb 年代学及其对索伦缝合带演化的意义 [J]. 岩石学报, 2009, 25(12): 3123-3129.
- CHEN Bin, MA Xinghua, LIU Ankun, et al. Zircon U-Pb ages of the Xilinhot metamorphic complex and blueschist, and implications for tectonic evolution of the Solonker suture [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(12): 3123-3129.
- 陈斌, 赵国春, Simon WILDE. 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 [J]. 地质论评, 2001, 47(4):

361–367.

CHEN Bin, ZHAO Guochun, Simon WILDE. Subduction- and Collision-related Granitoids from Southern Sonidzuoqi, Inner Mongolia: Isotopic Ages and Tectonic Implications[J]. *Geological Review*, 2001, 47(4): 361–367.

方俊钦, 赵盼, 徐备, 等. 内蒙古西乌珠穆沁旗哲斯组宏体化石新发现和沉积相分析[J]. 岩石学报, 2014, 30(7): 1889–1898.

FANG Junqin, ZHAO Pan, XU Bei, et al. Sedimentary facies analyses and discovery of gastropods from Zhesi Formation in the south of West Ujimqin, Inner Mongolia and their significances[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(7): 1889–1898.

黄波, 付冬, 李树才, 等. 内蒙古贺根山蛇绿岩形成时代及构造启示[J]. 岩石学报, 2016, 32(1): 158–176.

HUANG Bo, FU Dong, LI Shucai, et al. The age and tectonic implications of the Hegenshan ophiolite in Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32(1): 158–176.

康健丽, 肖志斌, 王惠初, 等. 内蒙古锡林浩特早石炭世构造环境: 来自变质基性火山岩的年代学和地球化学证据[J]. 地质学报, 2016, 90(2): 383–397.

KANG Jianli, XIAO Zhibin, WANG Huichu, et al. Late Paleozoic Subduction of the Paleo Asian Ocean: Geochronological and Geochemical Evidence from the Meta basic Volcanics of Xilinhot, Inner Mongolia[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(2): 383–397.

李红英, 周志广, 张达, 等. 内蒙古西乌旗格尔楚鲁晚三叠世流纹岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2015, 34(3): 546–555.

LI Hongying, ZHOU Zhiguang, ZHANG Da, et al. Geochronology, geochemistry and geological significance of late Triassic Rhyolites in Geerchulu, Xi Ujimqin Qi, Inner Mongolia[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2015, 34(3): 546–555.

李锦轶, 高立明, 孙桂华, 等. 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[J]. 岩石学报, 2007, 23(3): 565–582.

LI Jinyi, GAO Liming, SUN Guihua, et al. Shuangjingzi middle Triassic syn-collisional crust-derived granite in the East Inner Mongolia and its constraint on the timing of collision between Siberian and Sino-Korean paleo-plates[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(3): 565–582.

刘建峰, 迟效国, 张兴洲, 等. 内蒙古西乌旗南部石炭纪石英闪长岩地球化学特征及其构造意义[J]. 地质学报, 2009, 83(3): 365–376.

LIU Jianfeng, CHI Xiaoguo, ZHANG Xingzhou, et al. Geochemical

Characteristic of Carboniferous Quartz Diorite in the Southern Xiwuqi Area, Inner Mongolia and Its Tectonic Significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(3): 365–376.

刘建峰, 李锦轶, 迟效国, 等. 内蒙古东南部早三叠世花岗岩带岩石地球化学特征及其构造环境[J]. 地质学报, 2014, 88(9): 1677–1690.

LIU Jianfeng, LI Jinyi, CHI Xiaoguo, et al. Petrological and geochemical characteristics of the early Triassic Granite Belt in southeastern Inner Mongolia and its tectonic setting[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(9): 1677–1690.

刘群, 王挽琼, 邱殿明, 等. 华北板块北缘中段早石炭世构造属性: 察哈尔右翼后旗高分异 I 型花岗岩地球化学的制约[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(4): 1121–1131.

LIU Qun, WANG Wanqiong, QIU Dianming, et al. Early Carboniferous Tectonic Attribute of the Central-Northern Margin of North China Craton: Constraints from Geochemistry of Highly Fractionated I-Type Granites in Cahayouhouqi Area[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2015, 45(4): 1121–1131.

马士委, 周志广, 柳长峰, 等. 内蒙古西乌旗地区晚石炭世石英闪长岩的岩石成因及构造意义[J]. 中国地质, 2016, 43(6): 1932–1946.

MA Shiwei, ZHOU Zhiguang, LIU Changfeng, et al. Petrogenesis and tectonic significance of Late Carboniferous quartz diorite in Xi Ujimqin Banner, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 2016, 43(6): 1932–1946.

任收麦, 黄宝春. 晚古生代以来古亚洲洋构造域主要块体运动学特征初探[J]. *地球物理学进展*, 2002, 17(1): 113–120.

REN Shoumai, HUANG Baochun. Preliminary Study on Post-Late Paleozoic Kinematics of the Main Blocks of the Paleo-Asian Ocean[J]. *Progress in Geophysics*, 2002, 17(1): 113–120.

邵济安, 唐克东, 何国琦. 内蒙古早二叠世构造古地理的再造[J]. 岩石学报, 2014, 30(7): 1858–1866.

SHAO Ji'an, TANG Kedong, HE Guoqi. Early Permian tectono-paleogeographic reconstruction of Inner Mongolia, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(7): 1858–1866.

邵济安, 何国琦, 唐克东. 华北北部二叠纪陆壳演化[J]. 岩石学报, 2015a, 31(1): 47–55.

SHAO Ji'an, HE Guoqi, TANG Kedong. The evolution of Permian continental crust in northern part of North China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015a, 31(1): 47–55.

邵济安, 田伟, 唐克东, 等. 内蒙古晚石炭世高镁玄武岩的成因和构造背景[J]. 地学前缘, 2015b, 22(5): 171–181.

SHAO Ji'an, TIAN Wei, TANG Kedong, et al. Petrogenesis and tectonic settings of the Late Carboniferous high Mg basalts of Inner Mongolia[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015b, 22(5):

- 171–181.
- 尚庆华. 北方造山带内蒙古中、东部地区二叠纪放射虫的发现及意义[J]. *科学通报*, 2004, 49(24): 2574–2579.
- SHANG Qinghua. Discovery and significance of Permian radiolarians in the central and eastern Inner Mongolia of the northern orogenic belt[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(24): 2574–2579.
- 唐克东, 张允平. 内蒙古缝合带的构造演化. 见: 肖序常, 汤耀庆编. 古中亚复合巨型缝合带南缘构造演化[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1991.
- TANG Kedong, ZHANG Yunping. The tectonic evolution of the Inner Mongolia suture zone. See: XIAO Xuchang, TANG Yaoqing eds. Tectonic evolution of the southern margin of the Paleo-Central Asian composite giant suture zone[M]. Beijing: Beijing Science and Technology Publishing House, 1991.
- 王强, 赵振华, 熊小林. 桐柏—大别造山带燕山晚期 A 型花岗岩的厘定[J]. *岩石矿物学杂志*, 2000, 19(4): 297–306.
- WANG Qiang, ZHAO Zhenhua, XIONG Xiaolin. The Ascertainment of Late-Yanshanian A-type Granite in Tongbai-Dabie Orogenic Belt[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2000, 19(4): 297–306.
- 王树庆, 胡晓佳, 杨泽黎, 等. 兴蒙造山带中段锡林浩特跃进地区石炭纪岛弧型侵入岩年代学、地球化学、Sr-Nd-Hf 同位素特征及其地质意义[J]. *地球科学*, 2018, 43(3): 672–695.
- WANG Shuqing, HU Xiaojia, YANG Zeli, et al. Geochronology, Geochemistry, Sr-Nd-Hf Isotopic Characteristics and Geological Significance of Carboniferous Yuejin Arc Intrusive Rocks of Xilinhot, Inner Mongolia[J]. *Earth Science*, 2018, 43(3): 672–695.
- 徐备, Charvet J, 张福勤. 内蒙古北部苏尼特左旗蓝片岩岩石学和年代学研究[J]. *地质科学*, 2001, 36(4): 424–434.
- XU Bei, Charvet J, ZHANG Fuqin. Primary Study on Petrology and Geochronology of Blueschists in Sunitezuoqi, Northern Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2001, 36(4): 424–434.
- 徐备, 赵盼, 鲍庆中, 等. 兴蒙造山带前中生代构造单元划分初探[J]. *岩石学报*, 2014, 30(7): 1841–1857.
- XU Bei, ZHAO Pan, BAO Qingzhong, et al. Preliminary study on the pre-Mesozoic tectonic unit division of the Xing-Meng Orogenic Belt (XMOB)[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(7): 1841–1857.
- 徐备, 陈斌. 内蒙古北部华北板块与西伯利亚板块之间中生代造山带的结构及演化[J]. *中国科学: 地球科学*, 1997, 27(3): 227–232.
- XU Bei, CHEN Bin. Framework and Evolution of the Middle Paleozoic Orogenic Belt between Siberian and North China Plates in Northern Inner Mongolia[J]. *Science in China (Series D-Earth Sciences)*, 1997, 27(3): 227–232.
- 张拴宏, 赵越, 刘建民, 等. 华北地块北缘晚古生代-早中生代岩浆活动期次、特征及构造背景[J]. *岩石矿物学杂志*, 2010, 29(6): 824–842.
- ZHANG Shuanhong, ZHAO Yue, LIU Jianmin, et al. Geochronology, geochemistry and tectonic setting of the Late Paleozoic-Early Mesozoic magmatism in the northern margin of the North China Block: A preliminary review[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2010, 29(6): 824–842.
- 张金凤, 白新会. 内蒙古苏尼特右旗温都尔庙地区早石炭世火山岩的发现及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2016, 32(9): 2780–2792.
- ZHANG Jinfeng, BAI Xinhui. The Early Carboniferous volcanic rocks in Ondor Sum area of Sonid Right Banner, Inner Mongolia: Discovery and its tectonic significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32(9): 2780–2792.
- 袁建国, 任永健, 姜振宁, 等. 内蒙古锡林浩特毛登牧场早石炭世花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. *现代地质*, 2017, 31(6): 1131–1146.
- YUAN Jianguo, REN Yongjian, JIANG Zhenning, et al. Zircon U-Pb Dating and Geochemistry of Granites in Early Carboniferous in Maodeng of Xilin Hot, Inner Mongolia and Their Geological Implications[J]. *Geoscience*, 2017, 31(6): 1131–1146.
- 周志广, 谷永昌, 柳长峰, 等. 内蒙古东乌珠穆沁旗满都胡宝拉格地区早-中二叠世华夏植物群的发现及地质意义[J]. *地质通报*, 2010, 29(1): 21–25.
- ZHOU Zhiguang, GU Yongchang, LIU Changfeng, et al. Discovery of Early-Middle Permian cathaysian flora in Manduhubolage area, Dong Ujimqin Qi, Inner Mongolia, China and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(1): 21–25.
- 朱永峰, 孙世华, 毛骞, 等. 内蒙古锡林格勒杂岩的地球化学研究: 从 Rodinia 聚合到古亚洲洋闭合后碰撞造山的历史记录[J]. *高校地质学报*, 2004, 10(3): 343–355.
- ZHU Yongfeng, SUN Shihua, MAO Qian, et al. Geochemistry of the Xilingele Complex, Inner Mongolia: A Historic Record from Rodinia Accretion to Continental Collision after Closure of the Paleo-Asian Ocean[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2004, 10(3): 343–355.
- Anderson T. Correction of common Pb in U-Pb analyses that donot report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 2002, 192(1–2): 59–79.
- Batchelor R A, Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. *Chemical Geo-*

- logy, 1985, 48(1): 43–55.
- Chen B, Jahn B M, Wilde S, et al. Two contrasting Paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 2000, 328: 157–182.
- Cox K G, Bell J D, Pankhurst R J. The Interpretation of Igneous Rocks[M]. London: George Allen and Unwin, 1979.
- Gorton M P, Schandl E S. From continents to island arcs: a geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks[J]. *Canadian Mineralogist*, 2000, 38: 1065–1073.
- Jahn B M, Litvinovsky B A, Zandievich A N, et al. Peralkaline granitoid magmatism in the Mongolian-Transbaikalian Belt: Evolution, petrogenesis and tectonic significance[J]. *Lithos*, 2009, 113(3–4): 521–539.
- Jian P, Liu D Y, Kröner A, et al. Evolution of a Permian intraoceanic arc-trench system in the Solonker suture zone, Central Asian Orogenic Belt, China and Mongolia[J]. *Lithos*, 2010, 118(1–2): 169–190.
- Jian P, Liu D Y, Kröner A, et al. Time Scale of the Early to Mid-Paleozoic Orogenic Cycle of the Longlived Central Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia of China: Implications for Continental Growth[J]. *Lithos*, 2008, 101(3–4): 233–259.
- Ludwig K R. Isoplot/EX, version 3.0 A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley: Geochronol Center Special Publication, 2003, 4: 1–70.
- Liu Y S, Wang X H, Wang D B, et al. Triassic high-Mg adakitic andesites from Linxi, Inner Mongolia: Insights into the fate of the Paleo-Asian ocean crust and fossil slab-derived melt-peridotite interaction[J]. *Chemical Geology*, 2012, 328: 89–128.
- Liu J F, Li J Y, Chi X G, et al. A late-Carboniferous to early early-Permian subduction-accretion complex in Daqing pasture, southeastern Inner Mongolia: Evidence of northward subduction beneath the Siberian paleoplate southern margin[J]. *Lithos*, 2013, 177: 285–296.
- Liu J F, Li J Y, Chi X G, et al. The tectonic setting of early Permian bimodal volcanism in Central Inner Mongolia: Continental rift, post-collisional extension, or active continental margin[J]. *International Geology Review*, 2016, 58: 737–755.
- Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101(5): 635–643.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 956–983.
- Rickwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 1989, 22: 247–263.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society of London, Special Publications*, 1989, 42(1): 313–345.
- Tang K D. Tectonic development of the Paleozoic foldbelts on the northern margin of the Sino-Korean Craton[J]. *Tectonics*, 1990, 9(2): 249–260.
- Tischendorf G, Paelchen. Zur Klassifikation von Granitoiden/Classification of granitoids[J]. *Zeitschrift fuer Geologische Wissenschaften*, 1985, 13(5): 615–627.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95: 407–419.
- Wu F Y, Jahn B, Wilde S A, et al. Highly Fractionated I-Type Granites in NE China(I): Geochronology and Petrogenesis[J]. *Lithos*, 2003, 66: 541–573.
- Xiao W J, Windley B F, Hao J, et al. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt[J]. *Tectonics*, 2003, 22(6): 1069–1089.
- Zhang X H, Wilde S A, Zhang H F, et al. Early Permian high-K calc-alkaline volcanic rocks from Inner Mongolia, North China: geochemistry, origin and tectonic implications[J]. *Journal of Geological Society*, 2011, 168: 525–543.
- Zhang X F, Pang Z S, Liu J L, et al. Geochronological and geochemical features of the Xiaowulangou complex plutons, Xilinhot, Inner Mongolia, and their geological significance[J]. *Geological Journal*, 2020, 55: 2269–2299.