

内蒙古赤峰金厂沟梁金矿区花岗岩类年代学、地球化学特征及其地质意义*

段培新¹ 李长民² 刘翠^{1**} 邓晋福¹ 赵国春¹

DUAN PeiXin¹, LI ChangMin², LIU Cui^{1**}, DENG JinFu¹ and ZHAO GuoChun¹

1. 中国地质大学地球科学与资源学院,北京 100083

2. 中国地质大学长城学院,保定 071000

1. Faculty of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Great Wall College, China University of Geosciences, Baoding 071000, China

2014-02-28 收稿, 2014-06-15 改回.

Duan PX, Li CM, Liu C, Deng JF and Zhao GC. 2014. Geochronology and geochemistry of the granites from the Jinchanggouliang gold deposit area in the Inner Mongolia and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 30(11): 3189–3202

Abstract This paper studies the granitic rocks of Jinchanggouliang, Xitaizi and Duimiangu in Chifeng area, Inner Mongolia. Jinchanggouliang granitic rocks are mainly composed of gneissose monzonitic granite, the zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of it gave an age of 249.9 ± 1.4 Ma, i. e., Early Triassic. These rocks are all plotted in the area of CCG in the diagrams for discrimination of tectonic settings. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of Xitaizi porphyritic monzonitic granite gave an age of 216.7 ± 1.8 Ma, i. e., Late Triassic. In the diagrams for discrimination of tectonic settings, they are plotted in the area of POG. Duimiangu granitic rocks are composed of beschtauite and quartz monzonite, which intruded in Early Cretaceous, the center phase are beschtauite, while the edge phase are quartz monzonite. In the diagrams for discrimination of tectonic settings, they are plotted in the VAG area. Combined with previous studies and the regional geology, in the Late Triassic, Paleo-Asian Ocean had been ending, and this area had stay in the end of a continental collision orogenic intra continental orogenic stage. This paper puts forward the controlling role of the batholith to the later mineralization, that the plate which is formed before the mineralization provides the necessary conditions for the later mineralization, it reasonably explains the distribution gold in the area of Jinchanggouliang gold field, and may have an universal significance.

Key words Granitoid of Jinchanggouliang; Zircon U-Pb age; Triassic; Post-batholith metallogenic model; Inner Mongolia

摘要 本文对内蒙赤峰地区金厂沟梁金矿区内的金厂沟梁、西台子、对面沟花岗质岩体开展了相关研究。金厂沟梁岩体岩性主要为片麻状二长花岗岩, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果为 249.9 ± 1.4 Ma, 为早三叠世。构造环境判别为大陆碰撞造山(CCG)。西台子岩体岩性为似斑状二长花岗岩, 其 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果为 216.7 ± 1.8 Ma, 为晚三叠世, 构造环境判别图解中位于后造山(POG)区域。对面沟岩体为早白垩世, 其中心相岩性是石英二长斑岩, 边缘相是石英二长岩, 在构造环境判别图中均属于火山弧环境。结合区域地质资料和前人研究成果, 推测古亚洲洋构造域在晚三叠世已到末期, 从而进入大陆碰撞造山的末期陆内造山阶段。本文提出岩基对后期成矿的控制作用, 认为早于成矿时期所形成的板状侵入体为后期成矿提供必要条件, 较为合理的解释金厂沟梁地区金矿分布的成因, 并可能具有普遍意义。

关键词 金厂沟梁地区花岗岩; 锆石 U-Pb 年龄; 三叠纪; 岩基后成矿模式; 内蒙古

中图法分类号 P588.121; P597.3

* 本文受中国地质调查局项目(1212011121075、1212010911028、12120114020901、1212011220921、1212011121266、12120113094100)、973项目(2011CB808901)和科技部国际科技合作项目(2010DFB23390)联合资助。

第一作者简介: 段培新, 女, 1990年生, 硕士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: duanpeixin1990@126.com

** 通讯作者: 刘翠, 女, 1973年生, 博士, 副教授, 岩石学, E-mail: liucui@cugb.edu.cn

1 引言

一直以来,华北克拉通北缘以其特殊的地理位置和丰富的矿产资源而受到众多研究者的青睐(曹从周等, 1986; 任纪舜等, 1990; 程裕淇, 1994; 伍家善等, 1998; 邓晋福和莫宣学, 1999; Zhai *et al.*, 2000; 赵国春等, 2002; 赵国春, 2009; Sengör *et al.*, 1996; Tang, 1990; 罗照华和邓晋福, 1997; 李锦轶等, 2007; Miao *et al.*, 2008)。任纪舜等(1990)、邓晋福和莫宣学(1999)、翟明国和卞爱国(2000)认为该区域古老陆核经历晚太古代和早元古代两次克拉通化过程,最终通过东西陆块俯冲等一系列演化过程形成目前多微陆块拼合的华北陆块结晶基底。受复杂的区域构造演化影响,区域内大量发育不同时代,不同类型花岗岩和与其有成生联系的矿床,是中国重要的金矿化集中区之一(Hart *et al.*, 2002; 毛景文等, 2005; 聂凤军等, 2007)。汤中立和李小

虎(2006)、汤中立等(2007)进行大量的实际观测认为大型内生金属矿床常常与小岩体有关。然而,大量矿床或者矿点经常分布在花岗质岩基周围和内部(郭少丰, 2010),比如都山岩体,喀喇沁岩体。许多岩基的形成时间大大早于成矿时间,但是,传统上认为花岗质岩基是连通源区的巨型侵入体,后期成矿物质及致矿侵入体是如何灌入岩基? 至今仍不清楚,未得到很好的解释;本文选择以金厂沟梁金矿区的岩基为例,研究其对金厂沟梁金矿的控制作用,试图揭示岩基对后期成矿物质的控制作用。

2 研究背景

金厂沟梁金矿区位于内蒙古赤峰市与辽宁省西部朝阳市交界处的敖汉旗境内,地理坐标: $120^{\circ}17'E, 41^{\circ}58'N$,其大地构造位置位于华北克拉通北缘,努鲁儿虎隆起东北部的龙潭地块内。努鲁儿虎隆起的北侧是东西向的赤峰-开原断

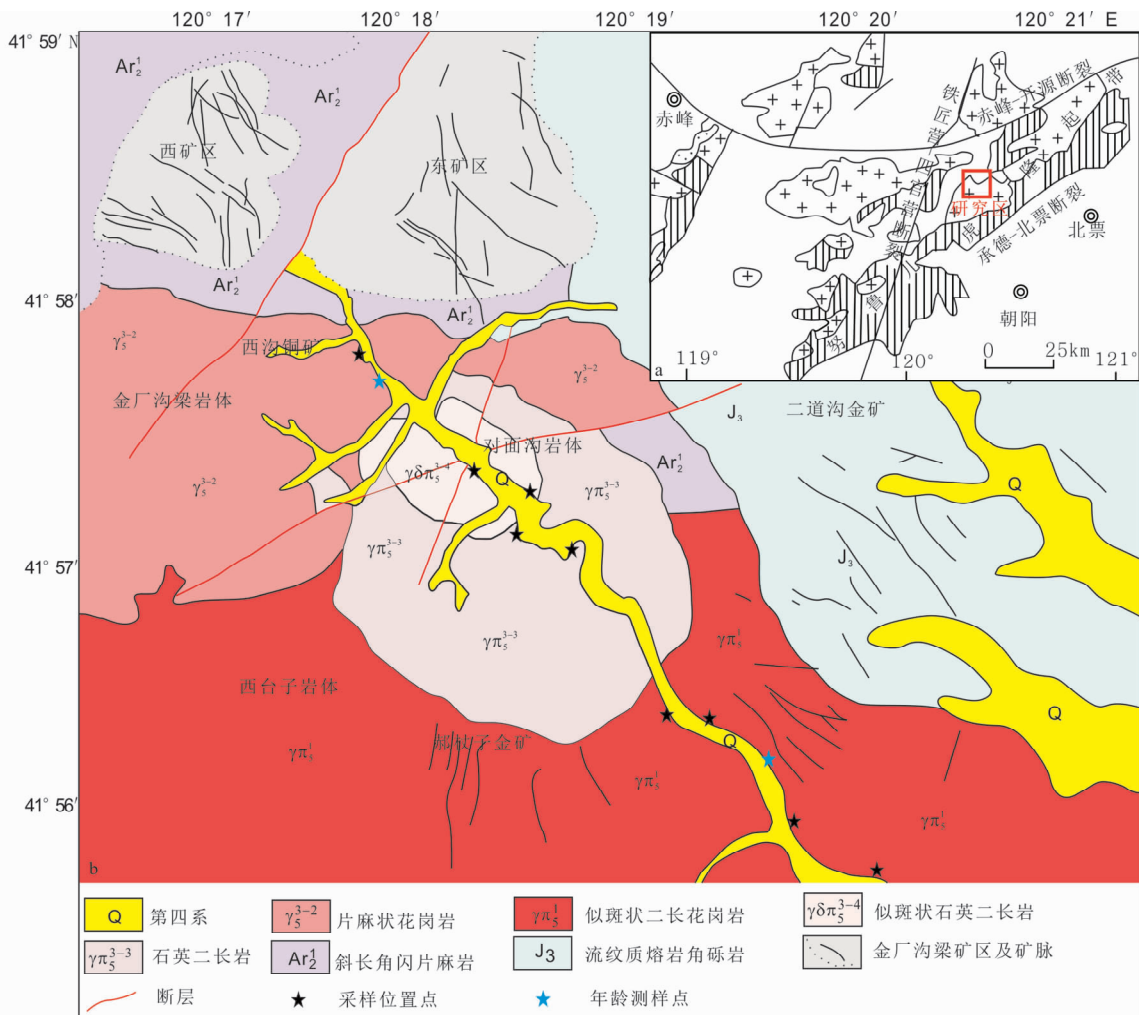


图1 研究区构造位置图(a 据 Yang *et al.*, 2003 修改)及金厂沟梁地区研究区简图(b 据苗来成等, 2003 修改)

Fig. 1 Tectonic location of study area (a, after Yang *et al.*, 2003) and simplified geological maps of Jinchanggouliang area (b, after Miao *et al.*, 2003)

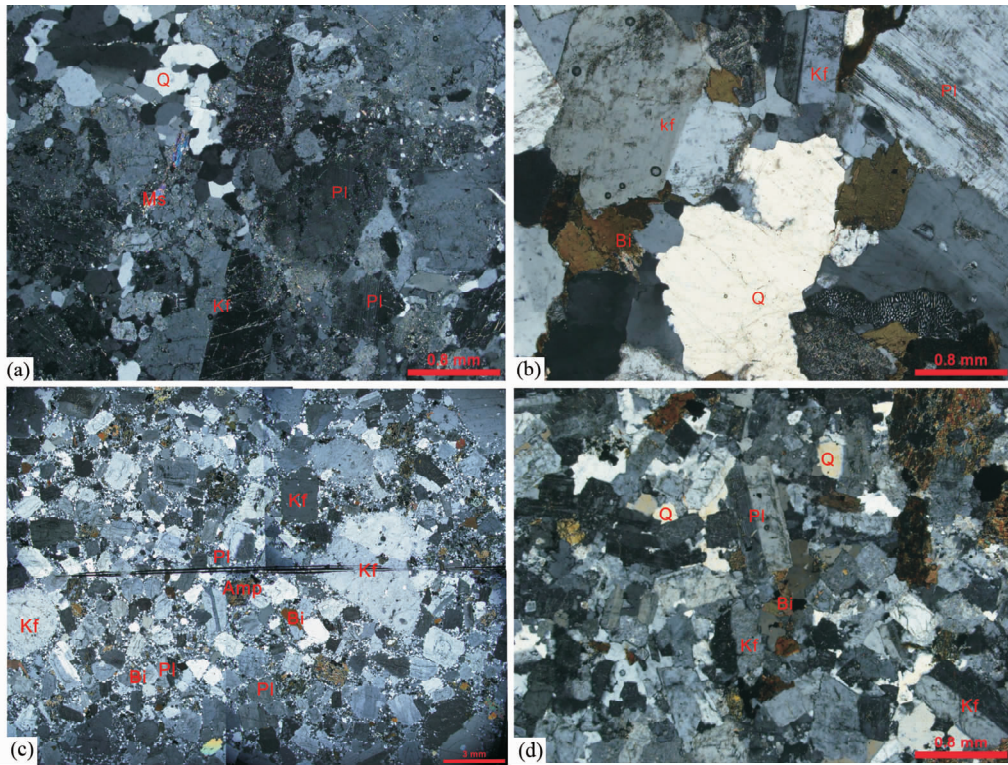


图2 金厂沟花岗岩类镜下显微照片

(a)-金厂沟梁片麻状二长花岗岩(XG01);(b)-西台子似斑状二长花岗岩(FS04);对面沟中心部位石英二长斑岩(c)和边缘部位石英二长岩(d)。Q-石英;Pl-斜长石;Kf-钾长石;Ms-白云母;Bi-黑云母;Amp-角闪石

Fig. 2 Photographs showing macrostructure features of granitoid from Jinchanggouliang

(a)-Jinchanggouliang gneissose monzonitic granite; (b)-Xitaizi porphyritic monzonitic granite; Duimianguou beschtuite (c) and quartz monzonite (d). Q-quartz; Pl-plagioclase; Kf-K-feldspar; Ms-muscovite; Bi-biotite; Amp-amphibole

裂,南侧为北东向承德-北票断裂,西侧是铁匠营-四官营断裂(图1a)。隆起地块内出露的地层主要为太古界建平群变质岩的小塔子组下段和大营子组,零星分布着中新元古的常州组,团山子组和大红峪组以及上古生代地层。中生代的侏罗白垩的火山碎屑岩分布在隆起的东南部和西部地区。隆起带内出露大量的花岗质侵入岩,主要包括元古代碱性花岗岩-环斑花岗岩、中泥盆世碱性岩-闪长岩、石炭纪闪长岩-石英闪长岩-花岗闪长岩、二叠纪花岗岩及侏罗-白垩纪花岗岩等。

金厂沟梁金矿的围岩由建平群的角闪斜长片麻岩、黑云斜长片麻岩及各种混合岩化片麻岩组成,研究区的东侧出露侏罗纪蓝旗组英安-流纹质火山岩,在一些沟壑中覆盖第四系沉积物(图1b)。研究区出露三种侵入岩体:金厂沟梁片麻状二长花岗岩分布在矿区的南侧,岩体呈东西向展布,长约4km,西边宽约2000m,东边宽约500m,出露面积约6.5km²;最南端出露西台子中粗粒似斑状二长花岗岩,呈岩基状分布,出露面积约为120km²,岩基的西侧与金厂沟梁岩体相接;苗来成等(2003)认为这两个岩体为同期侵入的相同岩体,另外一些学者则认为两个不同期次的岩体,并且岩体侵入的先后顺序存在争议;研究区中间为对面沟复式岩体,呈近椭圆形的小岩株产出,出露面积为6km²,中心偏北

侧的为石英二长斑岩,南侧为中细粒石英二长岩。

金厂沟梁金矿床矿体赋存在建平群小塔子组片麻岩中,分为东西两个矿区,西矿区的储量占其总量的90%以上,其金矿脉走向近南北向和北西向,以构造蚀变岩型为主,部分石英脉型;西沟铜矿产出于金厂沟梁片麻状二长花岗岩,为小型铜矿;郝杖子小型金矿赋存在西台子岩体中,矿脉走向近南北,主要以石英脉型和蚀变岩型为主;二道沟金矿位于研究区东部的侏罗火山岩中,矿脉走向呈东西向,北西向分布,以石英脉型为主,也在爆破角砾岩中产矿;对面沟岩体中存在金矿化矿点,但品位较低,未能达到开采级别,从图中(图1b)可看出金厂沟梁-二道沟金矿田的矿脉走向均围绕对面沟岩体呈放射状分布。

沿贯穿金厂沟梁镇的北金线公路对金厂沟梁地区花岗质岩体进行样品采集,采样位置见图1b,所采样品较新鲜。岩石主要类型为金厂沟梁片麻状二长花岗岩(测年位置点:41°57'53"N,120°17'36"E)、西台子似斑状二长花岗岩(测年位置点:41°56'02"N,120°19'57"E)和对面沟复式岩体。

3 岩相学特征

金厂沟梁岩体为片麻状二长花岗岩(图2a),中细粒半

表1 金厂沟梁片麻状二长花岗岩与西台子似斑状二长花岗岩锆石 LA-ICP-MS 定年分析结果

Table 1 Results of zircon LA-ICP-MS U-Pb age of Jinchanggouliang gneissose mozonitic granite and Xitaizi porphyritic mozonitic granite

测点号	U Th		Th/U	普通 Pb 校正同位素比值 ($\pm 1\sigma$)						普通 Pb 校正同位素年龄 (Ma) ($\pm 1\sigma$)					
	($\times 10^{-6}$)			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	比值	误差		比值	误差	比值	误差	比值	误差	比值	误差	比值	误差	比值	误差
金厂沟梁片麻状花岗岩															
xg01-1	37	75	2.05	0.0473	0.0058	0.2458	0.0312	0.0352	0.0004	61.21	266.63	223.15	25.44	222.78	2.46
xg01-2	53	70	1.31	0.0506	0.0122	0.2406	0.0517	0.0347	0.0010	233.40	468.46	218.91	42.32	220.03	5.93
xg01-3	142	187	1.31	0.0539	0.0012	0.2935	0.0076	0.0392	0.0003	368.57	50.00	261.30	6.00	248.17	1.62
xg01-4	194	328	1.69	0.0518	0.0015	0.2829	0.0096	0.0396	0.0004	279.69	66.66	252.93	7.58	250.19	2.21
xg01-5	159	489	3.08	0.0528	0.0025	0.2896	0.0144	0.0396	0.0003	320.43	112.03	258.23	11.30	250.38	1.68
xg01-6	1123	1059	0.94	0.0533	0.0004	0.2908	0.0029	0.0396	0.0003	342.65	19.44	259.20	2.31	250.17	1.87
xg01-7	107	102	0.96	0.0546	0.0037	0.2982	0.0203	0.0397	0.0006	394.50	155.54	265.02	15.90	251.09	3.46
xg01-8	709	709	1.00	0.0534	0.0005	0.2921	0.0050	0.0396	0.0004	346.35	22.22	260.18	3.97	250.24	2.77
xg01-9	128	350	2.74	0.0536	0.0019	0.2920	0.0117	0.0396	0.0008	353.76	79.62	260.17	9.18	250.19	5.11
xg01-10	99	300	3.03	0.0524	0.0009	0.2850	0.0059	0.0396	0.0006	301.91	40.74	254.64	4.65	250.25	3.70
xg01-11	760	463	0.61	0.0535	0.0009	0.2914	0.0037	0.0395	0.0005	350.06	32.41	259.67	2.92	249.78	2.93
xg01-12	46	77	1.68	0.0524	0.0056	0.2976	0.0345	0.0400	0.0008	305.62	244.42	264.55	27.01	252.75	5.00
xg01-13	588	352	0.60	0.0543	0.0007	0.2960	0.0069	0.0396	0.0007	383.39	27.78	263.25	5.41	250.12	4.64
xg01-14	159	484	3.04	0.0551	0.0021	0.4253	0.0166	0.0560	0.0005	416.72	83.33	359.81	11.80	351.16	2.87
xg01-15	111	218	1.96	0.0522	0.0013	0.2511	0.0077	0.0349	0.0005	300.06	57.40	227.44	6.28	220.83	3.07
xg01-16	90	146	1.61	0.0497	0.0034	0.2824	0.0232	0.0398	0.0005	188.97	165.72	252.54	18.41	251.36	3.36
xg01-17	336	1671	4.98	0.0531	0.0012	0.2878	0.0038	0.0394	0.0010	331.54	54.63	256.80	3.01	249.25	6.05
xg01-18	211	300	1.42	0.0539	0.0012	0.2940	0.0085	0.0396	0.0005	364.87	47.22	261.73	6.67	250.14	3.33
xg01-19	636	558	0.88	0.0512	0.0006	0.2784	0.0054	0.0395	0.0005	255.62	19.44	249.40	4.32	249.66	3.22
西台子似斑状二长花岗岩															
fs04-1	307	321	1.04	0.0530	0.0017	0.2895	0.0123	0.0394	0.0005	327.84	106.47	258.20	9.65	249.42	2.93
fs04-2	244	258	1.06	0.0511	0.0005	0.2417	0.0036	0.0344	0.0005	242.66	22.22	219.81	2.93	217.88	2.82
fs04-3	369	570	1.54	0.0524	0.0014	0.2467	0.0091	0.0340	0.0005	305.62	62.96	223.93	7.38	215.62	3.08
fs04-4	413	659	1.60	0.0526	0.0010	0.2482	0.0126	0.0342	0.0013	309.32	8.33	225.13	10.26	216.57	8.03
fs04-5	428	1052	2.46	0.0527	0.0009	0.2474	0.0066	0.0340	0.0004	316.73	37.04	224.48	5.36	215.64	2.58
fs04-6	402	616	1.53	0.0557	0.0011	0.3015	0.0086	0.0392	0.0007	442.64	42.59	267.56	6.73	248.01	4.54
fs04-7	437	762	1.74	0.0550	0.0010	0.2976	0.0060	0.0396	0.0007	409.31	40.74	264.54	4.69	250.27	4.30
fs04-8	285	415	1.46	0.0521	0.0018	0.2442	0.0077	0.0341	0.0007	300.06	77.77	221.83	6.29	216.21	4.19
fs04-9	450	737	1.64	0.0533	0.0007	0.2513	0.0050	0.0342	0.0007	342.65	25.00	227.63	4.04	216.82	4.39
fs04-10	228	314	1.37	0.0541	0.0006	0.2546	0.0065	0.0342	0.0008	372.28	60.18	230.35	5.30	216.63	5.06
fs04-11	187	262	1.40	0.0495	0.0025	0.2388	0.0147	0.0343	0.0008	172.31	113.87	217.42	12.03	217.11	4.70
fs04-12	393	579	1.47	0.0532	0.0006	0.2523	0.0057	0.0344	0.0007	344.50	27.78	228.45	4.65	218.21	4.12
fs04-13	310	415	1.34	0.0509	0.0006	0.2414	0.0062	0.0343	0.0007	235.25	29.63	219.56	5.10	217.64	4.05
fs04-14	430	1033	2.40	0.0528	0.0007	0.2495	0.0057	0.0343	0.0007	320.43	25.00	226.19	4.62	217.48	4.44
fs04-15	373	505	1.35	0.0504	0.0007	0.2389	0.0072	0.0343	0.0007	213.04	26.85	217.48	5.93	217.31	4.18
fs04-16	217	308	1.42	0.0528	0.0012	0.2890	0.0121	0.0396	0.0009	320.43	19.44	257.79	9.51	250.43	5.75
fs04-17	256	315	1.23	0.0515	0.0022	0.2440	0.0078	0.0344	0.0006	264.88	99.99	221.68	6.38	217.99	3.87
fs04-18	385	390	1.01	0.0521	0.0005	0.2452	0.0062	0.0341	0.0008	300.06	-5.56	222.68	5.02	216.39	4.92
fs04-19	154	175	1.14	0.0511	0.0021	0.2405	0.0136	0.0339	0.0007	242.66	99.06	218.85	11.10	215.21	4.17
fs04-20	337	607	1.80	0.0527	0.0013	0.2476	0.0065	0.0341	0.0004	316.73	53.70	224.64	5.27	216.06	2.28

自形结构,弱片麻状构造,矿物略显定向。主要由斜长石(35%)、钾长石(20%)、石英(35%),少量次生白云母组成,副矿物有磁铁矿、锆石、榍石、磷灰石等,蚀变矿物有绢云母、绿泥石和粘土矿物等。斜长石具有聚片双晶,呈板柱状,颗粒大小一般在1至2mm左右,双晶结合面有强烈绢云母化和粘土化;钾长石自形程度较差,粒径为1~2mm左右;石英呈填隙状紧密排列。

西台子岩体为中粗粒似斑状二长花岗岩(图2b),似斑状结构,块状构造。主要由碱性长石(35%)、斜长石(30%)、石英(23%)、黑云母及角闪石(5%)组成,副矿物有磁铁矿、磷灰石、榍石及锆石等。碱性长石多为斑晶,含量约为50%,主要为正长石、条纹长石以及微斜长石等,偏光显微镜下可见简单双晶和格子双晶,呈宽板状,颗粒较大约为3mm×10mm;斜长石呈半自形粒状,粒径约为1mm,聚片双

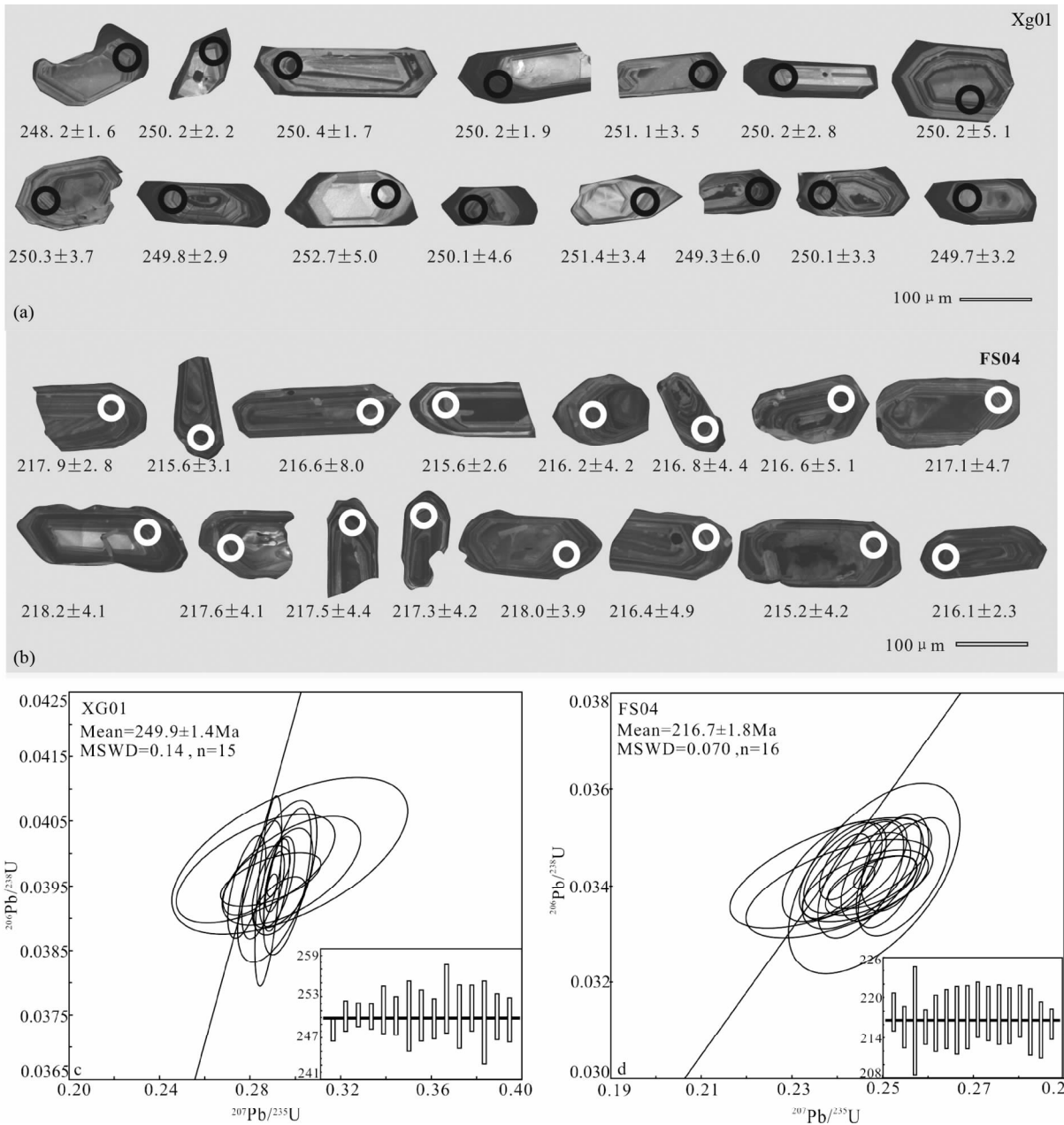


图3 金厂沟梁片麻状二长花岗岩和西台子似斑状二长花岗岩锆石阴极发光图(a,b)及U-Pb谐和年龄图(c,d)

Fig.3 Cathodoluminescence images (a, b) and U-Pb concordia diagrams (c, d) of zircons from Jinchanggouliang gneissose mozonitic granite and Xitaizi porphyritic mozonitic granite

晶发育,一般作为基质成分,多蚀变为绢云母和粘土矿物;石英颗粒大小不均一,波状消光明显,表面干净。在斑晶周围可看到石英和长石形成的蠕虫结构。

对面沟复式岩体中心为石英二长斑岩(图2c),斑状结构,块状构造,主要由斜长石(40%)、碱长石(35%)、石英(10%)组成,角闪石和黑云母总计占12%,副矿物有磁铁矿、锆石、榍石等,斜长石斑晶具有聚片双晶、卡钠复合双晶,多呈板状,生长环带明显;斑晶占70%左右,钾长石斑晶多为自形-半自形,具有简单双晶,还可见少量角闪石斑晶,粒径

约1~3mm,基质组成与斑晶成分类似,但石英的含量明显增多。对面沟岩体的边缘为石英二长岩(图2d),细粒结构,块状构造,粒径0.1~0.8mm,主要由斜长石(40%)、石英(10%)、碱长石(35%)组成,角闪石占5%,黑云母占5%。

4 分析方法

锆石单矿物分选在廊坊区域地质矿产调查研究所完成,岩石经过粉碎,筛分和淘洗后,再次重选和电磁选,最

后在实体显微镜下逐粒挑选获得锆石样品。然后用 DEVCON 环氧树脂将锆石颗粒固定于靶脱,然后磨光至颗粒中部,对锆石靶进行镀金,拍摄阴极发光图像。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄测试在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成。实验所用仪器为 Finnigan Naptune 型多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)及与之配套的 Newwave UP213 激光剥蚀系统。在样品测定前,用酒精轻擦样品表面,除去可能的污染。采样方式为单点剥蚀,采用的激光斑束直径为 $30\mu\text{m}$ 斑束,激光剥蚀采用氦气作为剥蚀物质的载气,氩气为补偿气以调节灵敏度。测试采用标准锆石 GJ1 和 Plesovioe 作为外标进行同位素的分馏校正,每分析 10 个样品点,分析两次 GJ1 和一次 Plesovioe。数据处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal v4.6 完成,锆石年龄和谐图和频率直方图由 Isoplot3.0 程序获得。详细实验测试过程见侯可军的相关文章介绍(侯可军等,2009)。测试结果见表 1。

岩石的主微量元素分析在武汉综合岩矿测试中心实验室完成,在 XRF-1800 型 X 荧光光谱仪上进行主量元素分析,分析精度优于 2%。痕量元素分析采用等离子直读光谱仪(ICAP6300)和电感耦合等离子体质谱仪(X7)。分析结果见表 2。

5 分析结果

5.1 锆石 U-Pb 年龄

本文采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年法对金厂沟梁片麻状二长花岗岩样品(XG01)和西台子似斑状二长花岗岩样品(FS04)进行测年工作,结果见表 1。

金厂沟梁片麻状二长花岗岩的锆石自形程度较好,呈柱状,长度介于 $90\sim 200\mu\text{m}$ 之间,长宽比为 $2:1\sim 3:1$,在透射光下均为无色,透明-半透明,具较典型的振荡环带结构(图 3),所测锆石的 Th 含量为 $70\times 10^{-6}\sim 1671\times 10^{-6}$,U 含量为 $36\times 10^{-6}\sim 1123\times 10^{-6}$,Th/U 比值介于 $0.6\sim 4.98$,均大于 0.4,属于典型的岩浆成因锆石(Rubatto, 2002; 吴元保和郑永飞, 2004; Schulz *et al.*, 2006)。金厂沟梁片麻状花岗岩样品的 19 个测点,剔除 4 个不和谐点,其余 15 个测点均投影于谐和线上或其附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄变化于 $248\sim 252\text{Ma}$ 间,加权平均年龄为 $249.9\pm 1.4\text{Ma}$ (MSWD = 0.14),属于早三叠世。

西台子似斑状二长花岗岩的锆石与金厂沟梁岩体的锆石类似,呈长柱状,长宽比为 $2:1\sim 4:1$,在透射光和反射光下无色,透明-半透明,具典型的振荡环带结构,锆石 Th 含量为 $175\times 10^{-6}\sim 1052\times 10^{-6}$,U 含量为 $154\times 10^{-6}\sim 450\times 10^{-6}$,Th/U 比值介于 $1.01\sim 2.46$,同样大于 0.4,属于典型的岩浆成因锆石,剔除 4 个不和谐测试结果外,其余 16 个测点均位于谐和线附近,锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄介于 $215\sim$

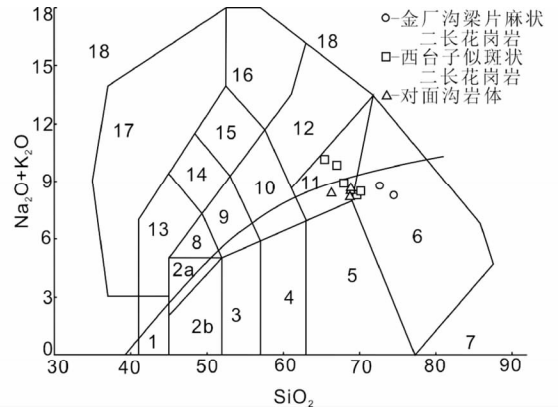


图 4 金厂沟梁地区花岗岩 TAS 分类

图中曲线为碱性 A 和亚碱性 SUB 分界线. 6-花岗岩; 11-石英二长岩

Fig. 4 TAS classification of the granites in the Jinchanggouliang

The division line between alkaline A and sub-alkaline. 6-granite; 11-quartz monzonite

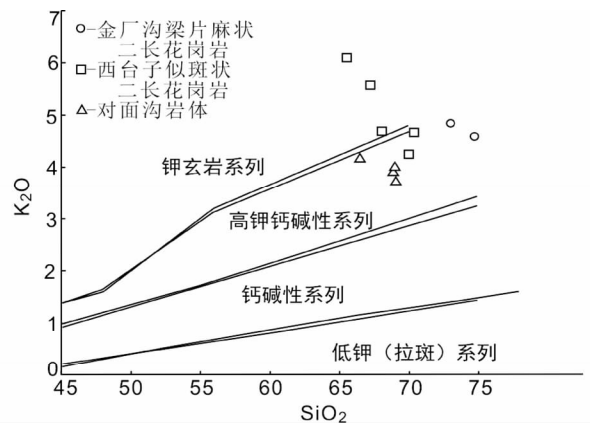


图 5 金厂沟梁地区花岗岩 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图解(据 Peccerillo and Taylor, 1976)

Fig. 5 SiO_2 vs. K_2O diagram of the granites in the Jinchanggouliang (after Peccerillo and Taylor, 1976)

218Ma 之间,加权平均年龄为 $216.7\pm 1.8\text{Ma}$ (MSWD = 0.07),表示其结晶年龄,为晚三叠世。

5.2 花岗岩地球化学特征

早三叠世的金厂沟梁片麻状二长花岗岩 SiO_2 的含量为 $71.80\%\sim 73.68\%$, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量为 $8.17\%\sim 8.64\%$, Al_2O_3 含量为 $14.76\%\sim 15.88\%$,岩石分异指数 DI 介于 $91.86\sim 92.25$ (见表 2)。在 TAS 图解中(图 4)样品点落入花岗岩范围; $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图解中(图 5),属于高钾钙碱系列;其铝饱和指数(A/CNK)为 $1.23\sim 1.26$,在标准矿物计算中出现刚玉,属于过铝质花岗岩(图 6);其 Peacock 指数显示为碱钙性(AC)(图 7)。痕量元素蛛网图显示,亏损 Ba、Nb、Ta、Ce、P、Ti 等元素,富集 Rb、K、Pb 等大离子亲石元素以及 Th 和 Hf

表2 金厂沟梁地区花岗岩主量元素(wt%)和微量元素($\times 10^{-6}$)数据

Table 2 Major (wt%) and trace ($\times 10^{-6}$) elements data of the granitoids in the Jinchanggouliang

样品号	Xg01	Xg02	Fs01-1	Fs01-3	Fs02-2	Fs04	Fs05	Xg04-1	Xg06	Xg07	Xg08
岩石类型	片麻状二长花岗岩		似斑状二长花岗岩				石英二长斑岩		石英二长岩		
岩体名称	金厂沟梁岩体		西台子岩体				对面沟岩体				
SiO ₂	71.80	73.68	69.10	69.55	67.39	66.53	64.79	68.32	68.32	68.01	65.58
TiO ₂	0.24	0.10	0.50	0.43	0.55	0.47	0.57	0.35	0.35	0.40	0.44
Al ₂ O ₃	15.88	14.76	14.57	14.67	15.40	15.65	15.67	15.47	15.77	15.53	16.27
FeO ^T	0.88	0.88	3.03	2.65	3.41	2.97	3.73	2.40	2.62	2.52	3.49
MnO	0.00	0.01	0.06	0.05	0.06	0.05	0.07	0.04	0.03	0.04	0.04
MgO	0.27	0.27	0.96	0.90	0.93	0.98	1.25	1.42	1.08	1.23	1.55
CaO	0.58	0.62	2.09	2.01	2.25	2.27	2.32	2.22	2.15	2.52	2.51
Na ₂ O	3.88	3.67	3.96	3.72	4.07	4.24	4.03	4.69	4.57	4.13	4.15
K ₂ O	4.76	4.50	4.19	4.62	4.63	5.52	6.03	3.88	3.70	3.91	4.12
P ₂ O ₅	0.03	0.03	0.16	0.15	0.20	0.16	0.19	0.16	0.16	0.16	0.25
LOI	1.18	1.04	0.83	0.84	0.50	0.49	0.64	0.49	0.66	1.15	0.93
Total	100.77	100.59	100.61	100.62	100.26	100.14	100.31	100.18	100.34	100.85	100.56
DI	91.86	92.25	83.14	84.12	82.24	83.97	82.32	82.76	82.73	80.95	78.53
R1	2298	2562	2146	2171	1870	1557	1373	1920	2003	2098	1849
R2	393	375	564	554	595	605	625	617	600	644	674
A/CNK	1.26	1.23	0.98	0.99	0.97	0.92	0.90	0.97	1.02	0.99	1.03
A/NK	1.38	1.35	1.32	1.32	1.32	1.21	1.19	1.30	1.37	1.41	1.44
La	17.8	14.0	70.0	47.7	31.0	53.0	63.9	30.7	22.6	27.4	33.1
Ce	37.4	19.9	113	81.0	76.9	88.8	109	51.7	46.9	46.5	59.1
Pr	4.56	3.00	12.21	9.04	7.45	10.0	11.6	6.13	4.32	5.70	7.06
Nd	16.2	11.0	39.5	30.8	27.5	33.4	38.8	21.1	15.5	20.5	24.8
Sm	3.06	2.43	6.07	4.98	5.52	5.29	5.78	3.59	2.41	3.13	3.99
Eu	0.61	0.55	1.04	0.97	1.05	1.13	1.07	0.82	0.64	0.81	1.00
Gd	2.13	1.98	4.59	3.93	4.95	3.78	4.33	2.68	1.63	2.40	2.96
Tb	0.32	0.33	0.68	0.60	0.74	0.60	0.64	0.35	0.23	0.32	0.37
Dy	1.66	1.64	3.44	3.15	3.99	3.29	3.32	1.64	1.19	1.63	1.73
Ho	0.31	0.31	0.70	0.62	0.78	0.59	0.68	0.32	0.23	0.32	0.34
Er	0.82	0.83	1.94	1.68	2.15	1.68	1.85	0.93	0.66	0.82	0.92
Tm	0.14	0.15	0.34	0.29	0.35	0.31	0.30	0.14	0.11	0.14	0.14
Yb	0.88	0.94	2.04	1.74	1.97	1.77	1.85	0.92	0.70	0.79	0.89
Lu	0.13	0.15	0.31	0.27	0.28	0.24	0.29	0.14	0.09	0.11	0.14
Y	6.27	8.42	17.8	15.3	18.7	15.8	17.0	7.83	5.32	8.10	8.74
Sc	1.62	1.17	4.72	4.44	5.11	4.89	6.00	5.02	4.84	5.82	7.25
V	8.37	6.28	39.8	35.2	42.6	38.2	48.5	51.4	51.3	54.6	70.1
Cr	1.25	0.84	6.52	5.71	5.30	5.92	7.37	22.3	23.5	29.4	23.1
Co	0.52	0.49	6.20	5.35	7.28	5.93	8.14	6.25	6.26	6.91	8.41
Ni	1.71	1.74	4.89	4.17	5.58	4.90	5.77	14.4	14.5	14.2	12.6
Rb	171	190	158	134	145	160	187	91.0	102	107	110
Zr	171	83.0	237	183	208	209	265	139	140	154	166
Nb	18.0	10.8	22.5	20.9	23.8	19.7	22.4	10.1	10.3	10.1	9.80
Cs	3.18	3.13	2.96	2.28	2.02	2.10	2.28	1.26	1.66	2.27	3.57
Hf	5.71	3.29	8.22	6.40	7.24	7.00	8.54	6.01	6.32	5.88	8.51
Ta	0.82	0.89	2.01	1.82	1.44	1.63	1.76	0.75	0.78	0.85	0.70
Pb	20.2	17.9	20.6	21.7	20.4	21.4	25.3	14.7	14.3	14.8	16.8
Th	12.5	11.4	25.0	21.6	18.5	16.3	24.6	10.3	9.60	9.10	10.2
U	1.18	1.52	2.73	3.00	2.20	1.67	2.86	2.42	1.15	1.74	1.38
Ba	754	417	667	785	848	946	1041	1185	1288	1344	1651
Ga	22.3	22.1	21.0	18.8	20.3	21.3	21.3	20.1	19.3	19.6	23.6
Sr	290	200	306	306	362	344	361	754	765	713	875
Au	2.10	11.6	0.60	0.40	0.50	0.60	0.80	2.10	0.60	0.80	1.40
Ag	0.11	0.10	0.06	0.06	0.04	0.04	0.07	0.21	0.06	0.04	0.15
Cu	31.2	637	9.85	8.86	13.8	23.2	36.6	157	106	15.7	349
Mo	0.12	1.14	1.13	0.78	0.67	5.00	2.89	0.63	0.64	1.04	0.97
ΣREE	86.00	57.30	256.3	186.7	164.7	203.9	243.4	121.2	97.12	110.6	136.5
(La/Yb) _N	13.65	10.03	23.19	18.47	10.60	20.15	23.26	22.53	21.63	23.35	24.97
Eu/Eu*	0.69	0.75	0.58	0.65	0.60	0.74	0.63	0.78	0.93	0.87	0.85
LREE/HREE	12.5	8.07	17.3	14.2	9.82	15.6	17.3	16.0	19.0	15.9	17.2

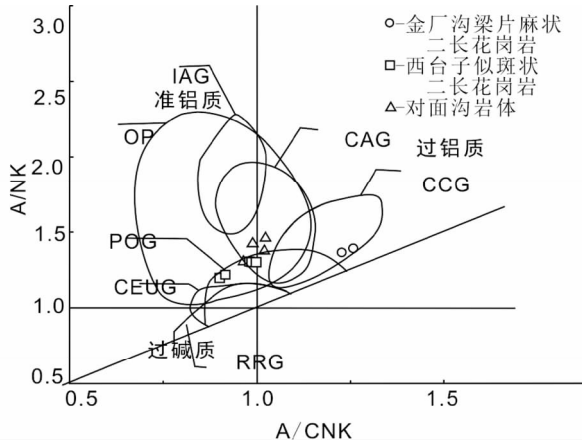


图6 金厂沟梁地区花岗岩 A/CNK-A/NK 图解(据 Maniar and Piccoli, 1989)

IAG-岛弧花岗岩类; CAG-大陆弧花岗岩类; CCG-大陆碰撞花岗岩类; POG-后造山花岗岩类; RRG-与裂谷有关的花岗岩类; OP-大洋斜长花岗岩; CEUG-与大陆的造陆抬升有关的花岗岩类

Fig. 6 The A/CNK-A/NK diagram of the granites in the Jinchanggouliang (after Maniar and Piccoli, 1989)

IAG-island arc granitoids; CAG-continental arc granitoids; CCG-continental collision granitoids; POG-post-orogenic granitoids; RRG-rift-related granitoids; CEUG-continental epeirogenic uplift granitoids; OP-oceanic plagiogranites

(图 8a), Yb 含量的平均值为 0.91×10^{-6} , Sr 含量的平均值为 245×10^{-6} , 具低 Sr 低 Yb 特征(张旗等, 2006)。样品稀土总量较低 ($\Sigma\text{REE} = 57.30 \times 10^{-6} \sim 86.00 \times 10^{-6}$), 富集轻稀土, LREE/HREE 的平均值为 10.27, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 的平均值为 11.84, 稀土元素的配分模式图为右倾型, 轻稀土较陡, 重稀土相对平缓, 具轻微负 Eu 异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.69 \sim 0.75$), 可能表明与岩浆平衡的液相线矿物为斜长石(图 8b)。

晚三叠世的西台子似斑状二长花岗岩 SiO_2 的含量介于 64.79% ~ 69.55% 之间, 相对金厂沟梁岩体偏低, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量为 8.15% ~ 10.06%, Al_2O_3 含量介于 14.57% ~ 15.67%, 岩石的分异指数较高, $\text{DI} = 82.24 \sim 84.12$ (表 2)。在 TAS 图解中(图 4), 样品落入石英二长岩和花岗岩的接触界限附近; SiO_2 - K_2O 图解中(图 5), 部分落入高钾钙碱系列, 其余落入钾玄岩系列; 铝饱和指数 (A/CNK) 介于 0.90 ~ 0.99, 属于准铝质(图 6), Peacock 指数显示为碱钙性(AC)-碱性(A)(图 7)。其微量元素特征与金厂沟梁岩体相似, 在微量元素蛛网图中(图 8a), 样品亏损 Ba、Nb、Ta、Sr、P、Ti 等元素, 富集 Rb、Th、K、Pb、Nd、Hf 等元素, Yb 的平均值 1.87×10^{-6} , Sr 的平均值 335×10^{-6} , 为低 Sr 低 Yb 花岗岩。稀土总量较高 ($\Sigma\text{REE} = 164.7 \times 10^{-6} \sim 256.3 \times 10^{-6}$), 轻稀土明显富集, 轻重稀土比值介于 9.82 ~ 17.34 之间, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 的平均值为 19.13, 稀土元素配分模式图呈右倾型, 轻稀土的斜率较大, 重稀土相对平缓, 具有轻微负 Eu 异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.58 \sim 0.74$)。曲线形态与金厂沟梁岩体的类似, 但总体高于金

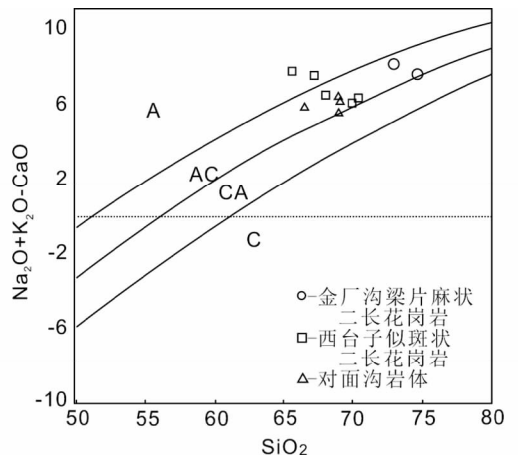


图7 金厂沟梁地区花岗岩 SiO_2 - $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}-\text{CaO})$ 图解(据 Frost *et al.*, 2001)

Fig. 7 SiO_2 vs. $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}-\text{CaO})$ diagram of the granites in the Jinchanggouliang (after Frost *et al.*, 2001)

厂沟梁岩体(图 8b)。

对面沟复式岩体的中心与边缘岩体的地球化学性质相近, SiO_2 的含量介于 65.58% ~ 68.32%, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量较高且稳定(8.04% ~ 8.57%), 富铝(15.47% ~ 16.27%), 岩石的分异指数较高(表 2), 在 TAS 图解中(图 4), 均落在石英二长岩范围内; SiO_2 - K_2O 图解中(图 5), 落入高钾钙碱性系列; 铝饱和指数的平均值为 1, 位于准铝质与过铝质的边界(图 6)。在 SiO_2 - $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}-\text{CaO})$ 图解中(图 7), 落入碱钙性(AC)区域。其微量元素特征与西台子岩体相比较, 差别较大, 样品亏损 Rb、Nb、Ta、Sm、Ti 等元素, 富集 Ba、K、Pb、Sr, 等大离子亲石元素(图 8a), Yb 的平均值 0.83×10^{-6} , Sr 的平均值 777×10^{-6} , 属于高 Sr 低 Yb 型。其稀土总量介于 $97.12 \times 10^{-6} \sim 136.5 \times 10^{-6}$ 之间, 具有轻稀土富集, 重稀土亏损的特点, 轻重稀土比值为 16.03 ~ 19.03, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 的平均值为 23.12, 在稀土元素配分曲线中呈右缓倾斜, 负 Eu 异常不明显(图 8b)。

6 讨论

6.1 金厂沟梁金矿区花岗岩类的时代

金厂沟梁金矿区花岗质岩体侵入先后顺序存在较大争议, 王建平等(1992)、牛树银等(2011)根据早期得到的年龄认为西台子岩体早于金厂沟梁岩体形成, 是第一期侵入花岗岩, 刘宗秀等(2002)认为金厂沟梁岩体与对面沟岩体是一个多期次侵入的复式岩体, 而付乐兵等(2010)、苗来成等(2003)认为该区金厂沟梁岩体与西台子岩体为同期侵入的相同岩体。

据前文所述, 金厂沟梁片麻状二长花岗岩样品采自金厂沟梁铜矿矿区外围岩体(图 1b), 王建平等(1992)通过钾长

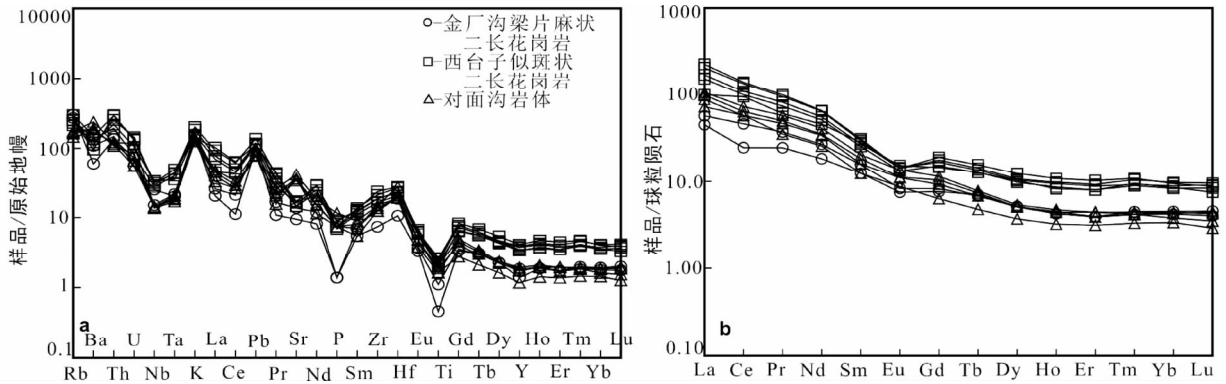


图8 金厂沟梁地区花岗岩原始地幔标准化微量元素蛛网图(a)与球粒陨石标准化稀土元素配分图(b)(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 8 Primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of the granites in the Jinchanggouliang (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

石 K-Ar 法测年, 获得 135.36Ma 年龄; 周乃武(2000) 对该岩体中黑云母进行 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 定年, 获得 127.71Ma 年龄; 侯万荣(2011) 利用锆石 LA ICP-MS 测试方法获得年龄为 $258.6 \pm 1.6\text{Ma} \sim 261.61 \pm 0.94\text{Ma}$ 。由于该矿区发育多期岩浆作用, 早形成的岩体难免会受到后期岩浆作用的改造和影响。如对面沟岩体(见下文)和矿区东部的侏罗火山(碎屑)岩所代表的岩浆事件均可能影响金厂沟梁岩体 K-Ar 同位素体系的封闭温度, 故本文认为王建平等(1992)和周乃武(2000)获得的年龄可能反映的是后期的岩浆(热)事件的年龄, 不能代表金厂沟梁岩体的结晶年龄。侯万荣(2011)采用的测年方法和单位与本文一样, 但是进行测年的样品位置与本文测年样品位置相对接近但仍有些偏差(侯万荣具体采样位置: $120^{\circ}17'25''\text{E}, 41^{\circ}57'57''\text{N}$, $120^{\circ}17'32''\text{E}, 41^{\circ}58'01''\text{N}$; 本文采样位置: $120^{\circ}17'36''\text{E}, 41^{\circ}57'53''\text{N}$), 并且其测试的锆石明显带有熔蚀, 锆石形态不规则, 年龄的谐和度一般(详见侯万荣, 2011)。本文的锆石形态较为完整, 长宽比较大, 发育明显结晶环带, 基本没有熔蚀, 打点位置尽量避免锆石核部, 选择边缘环带发育的地方进行测试, 获得年龄 $249.9 \pm 1.4\text{Ma}$, 属于早三叠世。

西台子似斑状二长花岗岩样品采自金厂沟梁公路东侧(图 1b), 样品露头新鲜。前人对西台子岩体进行较多测试工作, 采用方法有所不同, 王建平等(1992)对岩体中黑云母进行 K-Ar 法测年, 获得 187.9Ma 年龄, 苗来成等(2003)使用 SHRIMP 锆石测年方法得到年龄 $218 \pm 4\text{Ma}$, 侯万荣(2011)利用锆石 LA ICP-MS 测试方法测得该岩体年龄为 $226.8 \pm 0.87\text{Ma}$ 。其中 K-Ar 法的同位素年龄可能反映后期的岩浆事件, 而苗来成对西台子岩体的 SHRIMP 测试结果与侯万荣的年龄有所区别, 相差近 10Ma, 侯万荣的打点位置更多选择锆石中心部位, 无岩浆环带, 并且其年龄的谐和度一般, 故本文对西台子岩体进行测试, 采样位置与其一致, 锆石形态完好, 并选择具有典型岩浆环带的锆石进行测试, 打点位置选择在边缘环带位置上获得锆石年龄与苗来成等(2003)所测年龄

在误差范围内一致, 本文得到年龄为 $216.7 \pm 1.8\text{Ma}$ (MSWD = 0.07), 属于晚三叠世。

王建平等(1992)测得对面沟岩体边缘的石英二长岩 U-Pb 年龄为 125.51Ma, 采用 K-Ar 法测得中心部位的石英二长斑岩年龄为 121.5Ma。侯万荣(2011)采用 LA ICP-MS 锆石 U-Pb 法测得边缘岩石年龄 $138.7 \pm 1.2\text{Ma}$; 中心为 $140.86 \pm 0.71\text{Ma} \sim 142.65 \pm 0.44\text{Ma}$, 所测试样品位置与本文中对面沟岩体的采样位置近乎一致, 采用目前相对较准确的测试方法, 与前人的测试结果相近, 故本文认为对面沟岩体的形成年龄为早白垩世。

综上, 金厂沟梁片麻状花岗岩形成时间为早三叠世, 西台子似斑状花岗岩形成于晚三叠世, 对面沟岩体形成于早白垩世。金厂沟梁岩体的形成时间早于西台子岩体, 并且野外地质特征显示金厂沟梁片麻状花岗岩具明显的片麻理, 石英等矿物明显拉长, 而西台子岩体中矿物颗粒较大, 未发生矿物拉长现象, 应当为后期侵入岩体。

6.2 构造环境

中蒙边境中段(包括内蒙古中部地区和河北北部地区)夹于中朝板块与西伯利亚板块之间, 在中生代受多种构造体系的制约(唐克东等, 1995; 童英等, 2010; 许文良等, 2013), 如古亚洲洋构造域的作用, 蒙古-鄂霍茨海俯冲-碰撞造山作用, 古太平洋板块的向西俯冲的影响等。在古亚洲洋的演化阶段, 其闭合的时限一直是地质界关注和研究的热点。对该地区两大板块拼合以及古亚洲洋最终关闭的时限则有更多不同认识: 晚志留世-泥盆纪(Sengör *et al.*, 1993), 中晚泥盆世(Tang, 1990), 晚泥盆世-早石炭世(邵济安, 1991)二叠纪(Windley *et al.*, 2007), 二叠纪-三叠纪(李锦轶等, 2007; Miao *et al.*, 2008; Xiao *et al.*, 2003)。燕山期该地区的大地构造背景目前也存在较多争议, 吴利仁(1985), 周新民和李武显(2000)认为其形成与太平洋板块有关, 邓晋福等(2000, 2006)认为该地区在燕山期早期受到了太平洋俯冲的影响,

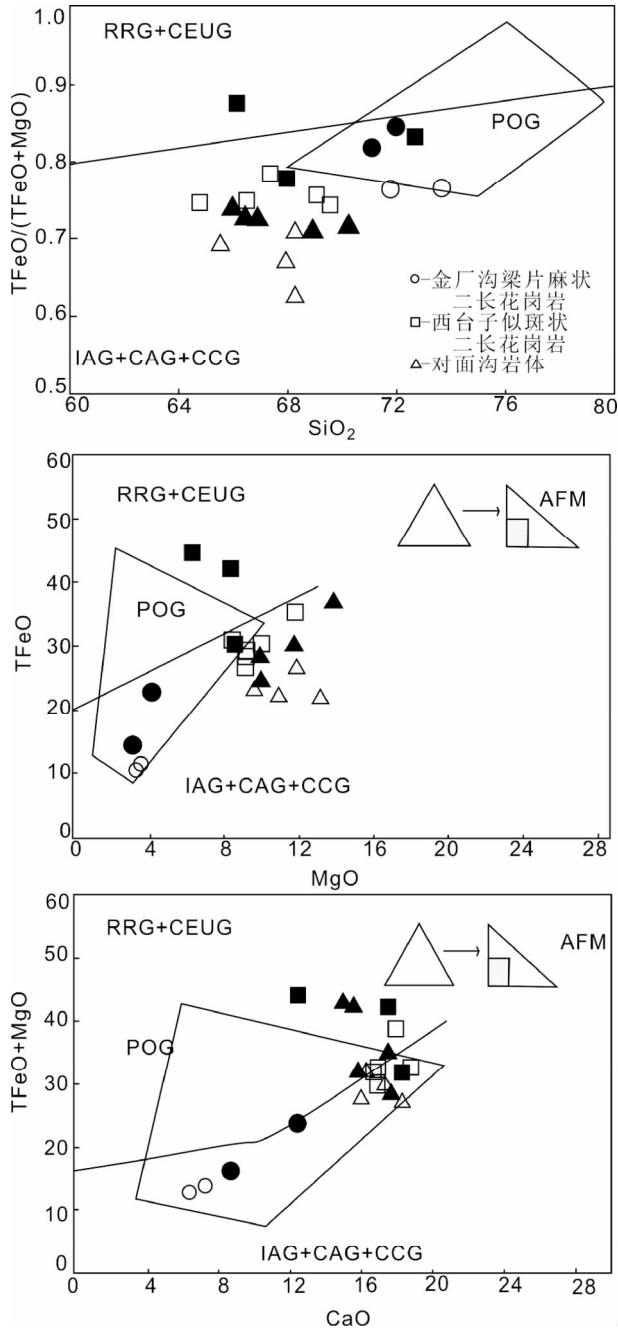


图9 金厂沟梁地区花岗岩类主元素构造环境判别图解 (据 Maniar and Piccoli, 1989)

实心点数据引自侯万荣(2011)

Fig. 9 Discrimination of the granites of the area of Jinchangouliang (after Maniar and Piccoli, 1989)

The black spot data cited from Hou (2011)

晚期叠加了伸展作用,邵济安等(1999)认为其形成环境为陆内拉张,与古太平洋俯冲无关。

Maniar and Piccoli(1989)的一系列图解可以根据主元素的特征判别构造环境(图9),由于金厂沟梁地区的花岗岩类 K_2O 的含量均大于 1.1%,可以排除大洋斜长花岗岩范围,金

厂沟梁岩体在 $SiO_2-FeO^T/(FeO^T + MgO)$ 二元图, $(Al_2O_3-Na_2O-K_2O)-FeO^T-MgO$ 三元图, $(Al_2O_3-Na_2O-K_2O)-(FeO^T + MgO)-CaO$ 三元图,这三组图解中落入 IAG + CAG + CCG 的范围内,其 A/CNK 值均大于 1.15,显示 CCG 型;西台子岩体在这三组图解中同时具有第一类(IAG + CAG + CCG)和第二类(RRG + CEUG)特点,将其归为 POG 型;对面沟岩体在 $(Al_2O_3-Na_2O-K_2O)-(FeO^T + MgO)-CaO$ 三元图中显示为 POG 型,其余图解中均落入 IAG + CAG + CCG 范围,其 A/CNK 值均小于 1.05,显示为 IAG。

金厂沟梁岩体中的矿物颗粒定向排列指示其形成于挤压环境,并且具有大陆碰撞花岗岩的特征,指示着此时该区古亚洲洋演化已经由火山弧环境进入到陆陆碰撞的转化阶段;西台子岩体显示造山晚期的特点,样品落于高钾钙碱性和钾玄岩区域,为典型的大陆碰撞造山带的特点,指示该地区于晚三叠世处于陆陆碰撞造山的末期——陆内造山阶段(邓晋福等,1994);对面沟岩体显示大陆弧火山岩的特征,并且样品中镁含量较低,稀土元素配分图中无明显的负 Eu 异常(图8),可推断其形成于活动大陆边缘靠近内陆一侧的火成岩弧内带(邓晋福等,2007)。

6.3 岩石形成温度

花岗岩中锆石含量很多,前人对不同成分岩石部分熔融所产生的熔体进行实验,结果表明在不同成分的岩浆中,锆的饱和程度取决于岩浆温度和岩浆成分,因此锆石锆饱和温度计是限定地壳深熔成因花岗岩的重要工具(Waston and Harrison, 1983)。未饱和锆石的温度可以代表锆石结晶温度的下限,而残留锆石较多的花岗岩反映的是最高温度(吴福元等,2007)。锆石是较早从岩浆中结晶的副矿物,因此锆石饱和温度接近液相线的温度(King *et al.*, 1997)。根据前人实验结果,Miller 对锆石在岩浆中溶解度方程进一步修正得到如下公式进行计算(Miller *et al.*, 2003):

$$T_{Zr} = 12900 / [2.95 + 0.85M + \ln D_{Zr}^{锆石/熔体}]$$

T 为绝对温度, M 是阳离子含量的比值,由公式 $(Na + K + 2Ca)/(Al + Si)$ 来计算, D 为锆在由化学计算的锆石中的浓度与熔体中的浓度的比值,用纯锆石中的 Zr 含量 (496000×10^{-6}) ,及全岩的 Zr 含量分别代表锆石中的含量和熔体中的含量。

依据上述公式计算,金厂沟梁片麻状花岗锆石形成温度为 747 ~ 809°C,西台子似斑状二长花岗岩锆石形成温度为 784 ~ 809°C,对面沟岩体的锆石温度为 759 ~ 777°C。金厂沟梁岩体与西台子的岩体温度相对比较一致,对面沟岩体的结晶温度比前两者略低,可能标志着其结晶时的位置更浅或有挥发分的加入。

6.4 成矿模式与找矿意义

从金厂沟梁矿区分布图看(图1b),矿田内金厂沟梁金矿、二道沟金矿、郝杖子金矿的矿脉均围绕对面沟岩体分布,

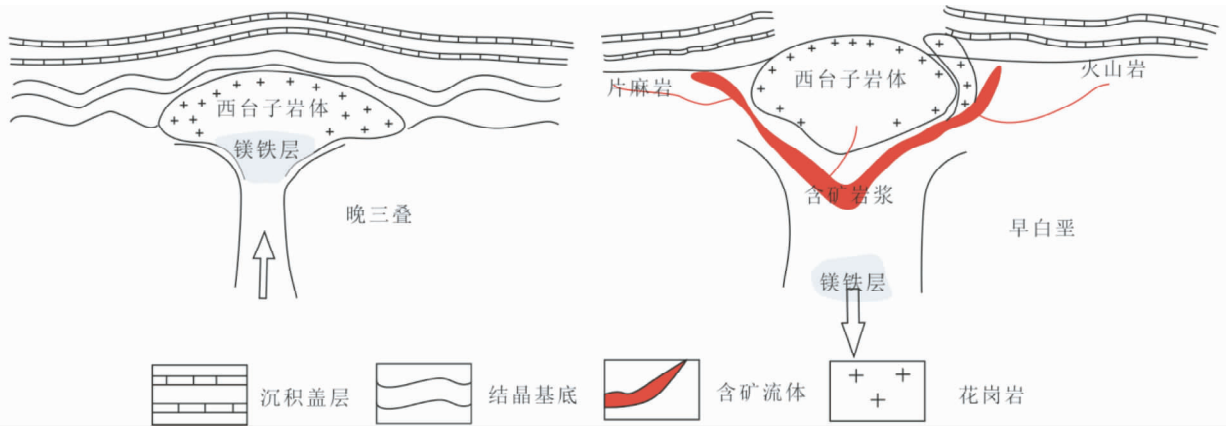


图 10 岩基后成矿模式图(以金厂沟梁地区为例)

Fig. 10 Post-batholith metallogenic model (a study for Jinchanggouliang)

而对面沟岩体内部只有轻微矿化,但其南部的西台子岩体,东部的火山(碎屑)岩,北部的建平群老地层中均分布大量金矿点。根据航磁二阶导数分析,岩株状的对面沟岩体在深部向 NE 侧伏,金厂沟梁金矿床产于侧伏的舌状凸起的尖端(王建平等,1992);前人对该区域矿化研究得到小型铜钼矿床的辉钼矿 Re-Os 年龄为 $131.45 \pm 0.93\text{Ma}$ (侯万荣,2011),金厂沟梁金矿田中与矿脉相穿插的黑云粗安岩脉的锆石年龄为 $131.7 \pm 1.1\text{Ma}$ (侯万荣,2011),蚀变富钾矿物测得 K-Ar 年龄介于 $121.71 \sim 117.13 \sim 100.02\text{Ma}$ 之间(王建平等,1992),由此可推测该区域矿化时期为早白垩世。

理论上,成因相关的不同地质现象之间可能存在五种联系:时间联系、空间联系、热力学联系、运动学联系和动力学联系(罗照华等,2008)。对面沟岩体与矿脉的分布很容易让人联想到其与成矿有关,但其面积很小,这么一个小岩体是如何使其周围形成大型-中型矿床的?作为岩基的西台子岩体与该区域成矿时间相差 80Ma,它的形成与成矿很难建立直接关系。但是通过前人资料可观察到,每个与成矿有关的小岩体周围都会有类似西台子岩体这样的大岩基,此种模式非常类似郭少丰,罗照华等(2010)定义的岩基后成矿作用。

为此,本文尝试提出以下成岩-成矿模式(图 10)。西台子岩体的岩浆在晚三叠世熔融其围岩建平群老地层的镁铁质成分以及壳幔混合的镁铁质成分,形成一个新的镁铁质层,在其冷却过程中,镁铁质层的角闪岩相向榴辉岩相转变,当其完全转变成榴辉岩时,密度增加使得岩石圈重力不稳定;西台子岩体在侵位过程中使其上部盖层抬升,同时也对四周造成挤压,形成断裂等构造,为后期大规模成矿提供了通道。

上覆岩浆早已冷却结晶形成盖层,致密的岩体作为屏蔽层,其内部可能有部分残余岩浆未能上升到地表,下部的铁镁质层由于成分转变导致重力不稳定,在滨太平洋构造域俯冲的触发下,铁镁层下降,发生拆沉作用,拆沉作用引发的近场应力场,叠加在处于后造山阶段具有挤压性质的远场应力场,提供了金矿良好的储集空间,含矿流体与岩浆混合,流

体降低岩浆的密度,岩浆保护含矿流体中的成矿物质两者耦合成一个复杂的体系。伴随岩石圈减薄,其热力学环境发生很大变化,很可能导致含矿流体与岩浆沿西台子岩体下方通道上升。

根据透岩浆成矿理论(罗照华等,2009),熔浆体系与含矿流体体系因需要而耦合在一起形成一个复杂的混合体系,当其解耦时可以在不同的条件下发生成矿作用,可以将透岩浆流体成矿体系进一步划分为正岩浆成矿体系、接触带成矿体系、远程热液成矿体系、火山热液成矿体系等。

研究区处于华北克拉通北缘这一特殊的地理位置,晚三叠世-早侏罗世为区域构造域体制的转折时期,导致该区域断裂发育广泛,含矿流体可以快速逸出并沿着有利通道向远离源的方向运动,含矿流体大部分从岩浆中分离出来,在构造裂隙中形成破碎带蚀变岩成矿亚体系,部分与岩浆系统一起冷却形成细脉浸染型矿体,均属于远程热液成矿体系,导致研究区内金矿大部分都为蚀变岩型金矿。

研究区内的矿床形成以燕山期为主成矿期,在这个时期里拆沉作用导致岩石圈的大量减薄是岩浆与含矿流体上升的触发机制,该地区的矿床是以西台子岩体为屏蔽层的岩基后成矿模式。因此今后在该区域的金矿勘探应重点关注燕山期的岩浆活动,尤其是与三叠纪岩浆作用所形成的岩基叠加的部位,更有利于金矿发育。

7 结论

(1) 锆石 LA ICP-MS U-Pb 测得金厂沟梁片麻状花岗岩年龄为 $249.9 \pm 1.4\text{Ma}$,属于早三叠世;西台子似斑状二长花岗岩年龄为 $216.7 \pm 1.8\text{Ma}$,为晚三叠世。

(2) 金厂沟梁片麻状花岗岩富碱,过铝质,Peacock 指数为碱钙型,富集大离子亲石元素,亏损高场强元素,低 Sr 低 Y,稀土配分曲线为右倾型,弱负 Eu 异常;西台子岩体属于钾玄岩-高钾钙碱性系列,准铝质,Peacock 指数为碱钙型-碱型,

富集 K、Pb 等, 亏损 Nb, 低 Sr 低 Y, 稀土配分曲线类似金厂沟梁岩体, 但各元素含量整体略高, 具弱负 Eu 异常; 对面沟岩体富碱, 准铝质, Peacock 指数为碱钙型, 富集 Ba、K、Sr 等, 亏损 Rb、Nb 等元素, 高 Sr 低 Yb, 稀土配分曲线右缓倾斜, 无负 Eu 异常。

(3) 早三叠世 (249.9Ma 左右) 的金厂沟梁岩体具有陆陆碰撞花岗岩的特征, 指示着此时该区古亚洲洋演化已经由火山弧环境进入到陆陆碰撞的转化阶段; 晚三叠世 (216.7Ma) 的西台子岩体显示造山晚期的特点, 样品落于高钾钙碱性和钾玄岩区域, 为典型的大陆碰撞造山带的特点, 指示该地区于晚三叠世处于陆陆碰撞造山的末期——陆内造山阶段, 表明古亚洲洋构造域行将结束; 对面沟岩体显示大陆弧火山岩的特征, 推断其形成于活动大陆边缘靠近内陆一侧的火成岩弧内带, 应当与古太平洋西向俯冲有关。

(4) 研究区金矿勘探应当关注燕山期的小岩体 (岩脉) 分布区, 并重点关注西台子岩体深部, 以及该区域几个金矿之间深部通道的联系, 能有助于推测其他成矿位置。

致谢 在野外地质调查过程中得到金陶公司的大力支持; 单矿物分选和岩石碎样在廊坊区调所进行, 李林庆主任给予了很多帮助; LA ICP-MS 锆石 U-Pb 测年在中国地质科学院完成, 侯可军老师给予了指导与帮助; 主元素、痕量元素和稀土元素测试由武汉综合岩矿测试中心实验室完成; 罗照华教授对论文进行了认真的评阅和修改, 提出了十分宝贵的建设性意见, 使得论文的质量和认识得到大幅提升; 二位匿名审稿人也提出了宝贵的意见; 在此一并表示衷心的感谢!

谨以此文庆贺邓晋福先生 80 华诞暨从事地质工作 60 周年!

References

- Cao CZ, Yang FL, Tian CL *et al.* 1986. The ophiolite in Hegenshan district, Nei Mongol and Siberian plates. In: Tang KD (ed.). Contributions to the Project of Plate Tectonics in Northern China (No. 1). Beijing: Geological Publishing House, 64 – 86 (in Chinese)
- Cheng YQ. 1994. Outline of Regional Geology of China. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 517 (in Chinese with English abstract)
- Deng JF, Zhao HL, Lai SC, Liu HX and Luo ZH. 1994. Generation of muscovite/two-mica granite and intracontinental subduction. Earth Science, 19(2): 139 – 147 (in Chinese with English abstract)
- Deng JF and Mo XX. 1999. The Yanshanian lithosphere-asthenosphere catastrophe and metallogenic environment in East China. Mineral Deposits, 18(4): 309 – 315 (in Chinese with English abstract)
- Deng JF, Zhao GC, Zhao HL *et al.* 2000. Yanshanian igneous petrotectonic assemblage and orogenic-deep processes in East China. Geological Review, 46(1): 41 – 48 (in Chinese with English abstract)
- Deng JF, Su SG, Liu C *et al.* 2006. Discussion on the lithospheric thinning of the North China craton: Delamination or thermal erosion and chemical metasomatism? Earth Science Frontiers, 13(2): 105 – 119 (in Chinese)
- Deng JF, Luo ZH, Su SG *et al.* 2007. The Petrogeny, Tectonic Setting and Metallogenesis. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 30 (in Chinese)
- Frost BR, Barnes CG, Collis WJ, Arculus RJ, Ellis DJ and Frost CD. 2001. A geochemical classification for granitic rocks. Journal of Petrology, 42(11): 2033 – 2048
- Fu LB, Wei JH, Wei QR *et al.* 2010. Petrogenesis and geodynamic setting of Late Triassic dykes of Jinchanggouliang, eastern Inner Mongolia. Earth Science, 35(6): 933 – 946 (in Chinese with English abstract)
- Guo SF. 2010. Metallogenic processing of post-batholith gold deposits: A study for Dushan complex. Ph. D. Dissertation. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese)
- Hart CJ, Goldfarb RJ, Qiu YM *et al.* 2002. Gold deposits of the northern margin of the North China Craton: Multiple Late Paleozoic-Mesozoic mineralizing events. Mineralium Deposita, 37(3–4): 326 – 351
- Hou KJ, Li YH and Tian YR. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS. Mineral Deposits, 28(4): 481 – 492 (in Chinese with English abstract)
- Hou WR. 2011. Contrast study on the Hadamengou gold deposit and Jinchanggouliang gold deposit, Inner Mongolia. Ph. D. Dissertation. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese)
- King PL, White AJR, Chappell BW and Allen CM. 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia. Journal of Petrology, 38(3): 371 – 391
- Li JY, Gao LM, Sun GH, Li YP and Wang YB. 2007. 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. Acta Petrologica Sinica, 23(3): 565 – 582 (in Chinese with English abstract)
- Liu ZX, Wei CD, Zhao CG *et al.* 2002. Discussion on genesis and geological-geochemical feature of Jinchanggouliang-Erdaogou gold mineralogenic field. Global Geology, 21(1): 13 – 17 (in Chinese with English abstract)
- Luo ZH and Deng JF. 1997. Characteristics of magmatic activities and orogenic process of Taihangshan intraplate orogen. Earth Science, 22(3): 279 – 284 (in Chinese with English abstract)
- Luo ZH, Lu XX, Guo SF *et al.* 2008. Metallogenic systems on the transmagmatic fluid theory. Acta Petrologica Sinica, 24(12): 2669 – 2678 (in Chinese with English abstract)
- Luo ZH, Lu XX, Chen BH *et al.* 2009. Introduction to the Metallogenic Theory on the Transmagmatic Fluids. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Luo ZH, Lu XX, Xu JY *et al.* 2010. Petrographic indicators of the ore-bearing intrusions. Acta Petrologica Sinica, 26(8): 2247 – 2254 (in Chinese with English abstract)
- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. Geological Society of America Bulletin, 101(5): 635 – 643
- Mao JW, Xie GQ, Zhang ZH *et al.* 2005. Mesozoic large-scale metallogenic pulses in North China and corresponding geodynamic settings. Acta Petrologica Sinica, 21(1): 169 – 188 (in Chinese with English abstract)
- Miao LC, Fan WM, Zhai MG *et al.* 2003. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology of the granitoid intrusions from Jinchanggouliang-Erdaogou gold orefield and its significance. Acta Petrologica Sinica, 19(1): 71 – 80 (in Chinese with English abstract)
- Miao LC, Fan WM, Liu DY *et al.* 2008. Geochronology and geochemistry of the Hegenshan ophiolitic complex: Implications for late-stage tectonic evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling Orogenic Belt, China. Journal of Asian Earth Sciences, 32(5–6): 348 – 370
- Miller CF, McDowell SM and Mapes RW. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance. Geology, 31(6): 529 – 532
- Nie FJ, Zhang WY, Du AD *et al.* 2007. Re-Os isotopic dating on molubdenite separates from the Xiaodonggou porphyry Mo deposit, Inner Mongolia. Acta Petrologica Sinica, 81(7): 898 – 905 (in

- Chinese with English abstract)
- Niu SY, Wang BD, Zhang JZ *et al.* 2011. Structural controls on the Jinchanggouliang gold deposit in Inner Mongolia and ore prospecting at depth. *Geotectonica et Metallogenia*, 35 (3): 348 – 354 (in Chinese with English abstract)
- Peccerillo R and Taylor SR. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63 – 81
- Ren JS, Chen YY, Niu BG *et al.* 1990. Tectonic Evolution and Mineralization of the Continental Lithosphere in the East China and Adjacent Regions. Beijing: Science Press, 1 – 218 (in Chinese)
- Rubatto D. 2002. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. *Chemical Geology*, 184(1 – 2): 123 – 138
- Schulz B, Klemm R and Brätz H. 2006. Host rock compositional controls on zircon trace element signatures in metabasites from the Australoalpine basement. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(3): 697 – 710
- Sengör AMC, Natal' in BA and Burtman VS. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364(6435): 299 – 307
- Shao JA. 1991. Crustal Evolution in the Middle Part of the Northern Margin of Sino-Korean Plate. Beijing: Peking University Press, 1 – 136 (in Chinese)
- Shao JA, Zhao GL and Wang Z. 1999. Tectonic setting of Mesozoic volcanism in Da Hingan Mountains, northeastern China. *Geological Review*, 45 (S1): 422 – 430 (in Chinese)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313 – 345
- Tang KD. 1990. Tectonic development of the Paleozoic foldbelts on the northern margin of the Sino-Korean craton. *Tectonics*, 9(2): 249 – 260
- Tang KD, Wang Y, He GQ and Shao JA. 1995. Continental margin tectonics in the East China and adjacent regions. *Acta Geologica Sinica*, 69(1): 16 – 30 (in Chinese with English abstract)
- Tang ZL and Li XH. 2006. Small intrusions forming large deposits in two types of magma. *Mineral Deposits*, 25 (Suppl. 1): 35 – 38 (in Chinese)
- Tang ZL, Yan HQ, Jiao JG *et al.* 2007. Regional metallogenic controls of small-intrusion-hosted Ni-Cu (PGE) ore deposits in China. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 92 – 103 (in Chinese)
- Tong Y, Hong DW, Wang T, Shi XJ, Zhang JJ and Zeng T. 2010. Spatial and temporal distribution of granitoids in the middle segment of the Sino-Mongolian border and its tectonic and metallogenic implications. *Acta Geoscientia Sinica*, 31 (3): 395 – 412 (in Chinese with English abstract)
- Wang JP, Liu YS, Dong FX *et al.* 1992. *The Analysis of Tectonic Controlling of Gold Factory Beam in the Inner Mongolia*. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 20 (in Chinese)
- Waston EB and Harrison TM. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295 – 304
- Windley BF, Alexeiev D and Xiao W. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 31 – 47
- Wu FY, Li XH, Yang JH and Zheng YF. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (6): 1217 – 1238 (in Chinese with English abstract)
- Wu JS, Geng YS, Shen QH *et al.* 1998. *Archean Geological Characteristics and Tectonic Evolution of China Korea Paleo-Continent*. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 217 (in Chinese)
- Wu LR. 1985. Mesozoic granitoids in East China. *Acta Petrologica Sinica*, 1(1): 1 – 10 (in Chinese with English abstract)
- Wu YB and Zheng YF. 2004. Genesis of zircon and its constraints on the interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589 – 1604 (in Chinese)
- Xiao WJ, Windley BF, Hao J and Zhai MG. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt. *Tectonics*, 22(6): 1 – 20
- Xu WL, Wang F, Pei FP *et al.* 2013. Mesozoic tectonic regimes and regional ore-forming background in NE China: Constraints from spatial and temporal variations of Mesozoic volcanic rock associations. *Acta Petrologica Sinica*, 29 (2): 339 – 353 (in Chinese with English abstract)
- Yang JH, Wu FY and Wilde SA. 2003. A review of the geodynamic setting of large-scale Late Mesozoic gold mineralization in the North China Craton: An association with lithospheric thinning. *Ore Geology Reviews*, 23(3): 125 – 152
- Zhai MG and Bian AG. 2000. The amalgamation of the supercontinent of North China Craton at the end of the Neo-Archaean and its breakup during Late Palaeoproterozoic and Meso-Proterozoic. *Science in China (Series D)*, 30(Suppl. 1): 129 – 137 (in Chinese)
- Zhang Q, Wang Y, Li CD *et al.* 2006. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2249 – 2269 (in Chinese with English abstract)
- Zhao GC, Sun M and Wilde SA. 2002. The North China craton basement tectonic units feature and piece in the Early Proterozoic. *Science in China (Series D)*, 32(7): 538 – 549 (in Chinese)
- Zhao GC. 2009. Metamorphic evolution of major tectonic units in the basement of the North China Craton: Key issues and discussion. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (8): 1772 – 1792 (in Chinese with English abstract)
- Zhou NW. 2000. Sequence of Gold (Copper) Mineralization Times in Jinchanggouliang Gold Deposit. *Gold Journal*, 2(3): 180 – 185 (in Chinese)
- Zhou XM and Li WX. 2000. Causes of Late Paleozoic volcanic rock in southeastern China. *Progress in Natural Science*, 10(3): 240 – 247 (in Chinese)

附中文参考文献

- 曹从周, 杨芳林, 田昌裂等. 1986. 内蒙古贺根山地区蛇绿岩及中朝板块和西伯利亚板块之间的缝合带位置. 见: 唐克东编. 中国北方板块构造论文集(第1集). 北京: 地质出版社, 64 – 86
- 程裕淇. 1994. 中国区域地质概论. 北京: 地质出版社, 1 – 517
- 邓晋福, 赵海玲, 赖绍聪, 刘厚祥, 罗照华. 1994. 白云母/二云母花岗岩形成与陆内俯冲作用. *地球科学*, 19(2): 139 – 147
- 邓晋福, 莫宣学. 1999. 中国东部燕山期岩石圈-软流圈系统大灾变与成矿环境. *矿床地质*, 18(4): 309 – 315
- 邓晋福, 赵国春, 赵海玲等. 2000. 中国东部燕山期火成岩构造组合与造山-深部过程. *地质论评*, 46(1): 41 – 48
- 邓晋福, 苏尚国, 刘翠等. 2006. 关于华北克拉通燕山期岩石圈减薄的机制与过程的讨论: 是拆沉, 还是热侵蚀和化学交代? *地学前缘*, 13(2): 105 – 119
- 邓晋福, 罗照华, 苏尚国等. 2007. 岩石成因、构造环境与成矿作用. 北京: 地质出版社, 1 – 30
- 付乐兵, 魏俊浩, 魏启荣等. 2010. 内蒙古金厂沟梁地区晚三叠世脉岩地球化学特征及成岩动力学背景. *地球科学*, 35(6): 933 – 946
- 郭少丰. 2010. 岩基后金矿的成矿作用——以都山岩体为例. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术. *矿床地质*, 28(4): 481 – 492

- 侯万荣. 2011. 内蒙古哈达门沟金矿床与金厂沟梁金矿床对比研究. 博士学位论文. 北京: 中国地质科学院
- 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
- 刘宗秀, 魏存弟, 赵春光等. 2002. 金厂沟梁-二道沟金矿田地质地球化学特征及成因探讨. 世界地质, 21(1): 13-17
- 罗照华, 邓晋福. 1997. 太行山带造山带岩浆活动特征及其造山过程反演. 地球科学, 22(3): 279-284
- 罗照华, 卢欣祥, 郭少丰等. 2008. 透岩浆流体成矿体系. 岩石学报, 24(12): 2669-2678
- 罗照华, 卢欣祥, 陈必河等. 2009. 透岩浆流体成矿作用导论. 北京: 地质出版社
- 罗照华, 卢欣祥, 许俊玉等. 2010. 成矿侵入体的岩石学标志. 岩石学报, 26(8): 2247-2254
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡等. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景. 岩石学报, 21(1): 169-188
- 苗来成, 范蔚茗, 翟明国等. 2003. 金厂沟梁-二道沟金矿田内花岗岩类侵入体锆石的离子探针 U-Pb 年代学及意义. 岩石学报, 19(1): 71-80
- 聂凤军, 张万益, 杜安道等. 2007. 内蒙古小东沟斑岩型钼矿床辉钼矿-钼同位素年龄及地质意义. 地质学报, 81(7): 898-905
- 牛树银, 王宝德, 张建珍等. 2011. 内蒙古金厂沟梁金矿的构造特征及深部找矿预测. 大地构造与成矿学, 35(3): 348-354
- 任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵等. 1990. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿. 北京: 科学出版社, 1-218
- 邵济安. 1991. 中朝板块北缘中段地壳演化. 北京: 北京大学出版社, 1-136
- 邵济安, 赵国龙, 王忠等. 1999. 大兴安岭中生代火山活动构造背景. 地质论评, 45(增刊1): 422-430
- 唐克东, 王莹, 何国琦, 邵济安. 1995. 中国东北及邻区大陆边缘构造. 地质学报, 69(1): 16-30
- 汤中立, 李小虎. 2006. 两类岩浆的小岩体成大矿. 矿床地质, 25(增刊1): 35-38
- 汤中立, 闫海卿, 焦建刚等. 2007. 中国小岩体镍铜(铂族)矿床的区域成矿规律. 地学前缘, 14(5): 92-103
- 童英, 洪大卫, 王涛, 史兴俊, 张建军, 曾涛. 2010. 中蒙边境中段花岗岩时空分布特征及构造和找矿意义. 地球学报, 31(3): 395-412
- 王建平, 刘永山, 董法先等. 1992. 内蒙古金厂沟梁金矿构造控矿分析. 北京: 地质出版社, 1-20
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报, 23(6): 1217-1238
- 伍家善, 耿元生, 沈其韩等. 1998. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化. 北京: 地质出版社, 1-217
- 吴利仁. 1985. 中国东部中生代花岗岩类. 岩石学报, 1(1): 1-10
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报, 49(16): 1589-1604
- 许文良, 王枫, 裴福萍等. 2013. 中国东北中生代构造体制与区域成矿背景: 来自中生代火山岩组合时空变化的制约. 岩石学报, 29(2): 339-353
- 翟明国, 卞爱国. 2000. 华北克拉通新太古代末超大陆拼合及古元古代末-中元古代裂解. 中国科学(D辑), 30(增刊1): 129-137
- 张旗, 王焰, 李承东等. 2006. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义. 岩石学报, 22(9): 2249-2269
- 赵国春, 孙敏, Wilde SA. 2002. 华北克拉通基底构造单元特征及早元古代拼合. 中国科学(D辑), 32(7): 538-549
- 赵国春. 2009. 华北克拉通基底主要构造单元变质作用演化及其若干问题讨论. 岩石学报, 25(8): 1772-1792
- 周乃武. 2000. 金厂沟梁金(铜)矿田成矿时代的理顺. 黄金学报, 2(3): 180-185
- 周新民, 李武显. 2000. 中国东南部晚中生代火成岩成因: 岩石圈消减和玄武岩底侵相结合的模式. 自然科学进展, 10(3): 240-247