

doi:10.3799/dqkx.2010.108

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

付乐兵¹, 魏俊浩¹, 魏启荣¹, 谭俊¹, 李艳军¹, 李闫华², 王明志¹, 蒋永建¹

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 宜昌地质矿产研究所, 湖北宜昌 443005

摘要: 金厂沟梁位于张家口—赤峰—朝阳金矿集区东端, 区内发育大量规模不等的脉岩, 岩性以闪长岩、闪长玢岩为主。对其进行了锆石 U-Pb 年龄、主微量元素及 Sr-Nd 同位素分析。脉岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄值可分为三组: 2 458~2 524 Ma、253±6 Ma (MSWD=3.0) 及 228±1 Ma (MSWD=0.26)。2.5 Ga 锆石反映成岩过程中有古老地壳物质参与, 253 Ma 锆石可能与古亚洲洋闭合时的岩浆事件有关, 228 Ma 则为脉岩的形成年龄。脉岩 SiO₂ (51.22%~68.48%)、MgO (1.35%~8.13%) 含量变化较大, 且具有高 Na₂O+K₂O、Al₂O₃ 及低的 TiO₂、P₂O₅ 含量等特征。岩石 LREE 及 LILE 富集, HFSE 亏损。脉岩 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 比值较为一致 (0.704 95~0.705 92), 而 ε_{Nd}(t) (-0.2~-9.5) 及 T_{2DM} (1.02~1.77 Ga) 值变化范围较大。主微量元素及同位素研究表明, 部分熔融的岩石圈地幔熔体底侵到壳幔边界, 诱发古老地壳物质的部分熔融, 随后发生的幔源熔体与壳源熔体的混合是脉岩最可能的源区过程。主微量元素构造判别图解指示岩石形成于陆弧向板内演化的构造环境; 结合区域上同时代脉岩群、碱性岩带及 A² 型花岗岩的侵位, 认为晚三叠世华北板块北缘已完成与蒙古弧地体的碰撞并进入造山后伸展阶段。

关键词: 脉岩; 三叠纪; 造山后伸展; 地球化学; 地质年代; 内蒙古。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2010)06-0933-14

收稿日期: 2010-03-30

Petrogenesis and Geodynamic Setting of Late Triassic Dykes of Jinchanggouliang, Eastern Inner Mongolia

FU Le-bing¹, WEI Jun-hao¹, WEI Qi-rong¹, TAN Jun¹, LI Yan-jun¹, LI Yan-hua², WANG Ming-zhi¹, JIANG Yong-jian¹

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, Yichang 443005, China

Abstract: Jinchanggouliang region, which consists of Jinchanggouliang, Erdaogou and Xiaerdaogou gold deposits, is located in the north of North China Craton (NCC) and south of Inner Mongolia-Daxinganling orogenic belt. Numerous early Mesozoic diorites and diorite porphyries occurred and yielded LA-ICP-MS zircon U-Pb age of 228±1 Ma (MSWD=0.26) in the region. Both diorites and diorite porphyries are dominated by shoshonitic rocks, which contain SiO₂ ranging from 51.22% to 68.48% and MgO from 1.35% to 8.13%, and are characterized by high contents of Na₂O+K₂O and Al₂O₃ but low concentrations of P₂O₅. These rocks are enriched in LREE, LILE but depleted in HFSE. All samples possess uniform (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i isotopic ratios (0.704 95-0.705 92) but relatively wider range of ε_{Nd}(t) (-0.2 to -9.5) and T_{2DM} ages (1.02-1.77 Ga). These results indicate that the magma source derived from mixing of lithospheric mantle and lower crust melt. Diagrams of major and trace elements reveal that dykes formed in transitional environment between land arc and intra-plate. Combined with some new discoveries in the neighborhood, such as dyke swarms, alkaline intrusive complex and A²-type granite, this study proposes that NCB had completed the collision with Siberia plate in Late Triassic and the north of NCC went into a post-orogenic extension stage.

基金项目: 教育部创新团队发展计划 (No. IRT0755); 全国危机矿山接替资源找矿项目 (No. 200714010); 中国地质大学 (武汉) 地质过程与矿产资源国家重点实验室基金; 中国地质大学 (武汉) 研究生学术探索基金 (No. CUGYJS0812)。

作者简介: 付乐兵 (1984-), 男, 在读博士研究生, 主要从事矿床地球化学研究工作。E-mail: fulebing1212@126.com

Key words: dykes; Triassic; post-orogenic extension; geochemistry; geochronology; Inner Mongolia.

高钾钙碱性—钾玄质系列中基性脉岩在近年来的研究中受到普遍关注。脉岩作为原生岩浆或母岩浆的代表可以反演岩浆源区物质组成(Scarrow *et al.*, 1998, Xu *et al.*, 2007; 何世平等, 2008)和岩浆的演化历史(Fowler and Henney, 1996; Mayborn *et al.*, 2008), 其就位时的张性构造裂隙配置方式更可以反映当时的构造应力场特征(Poland *et al.*, 2004)甚至造山带的构造演化(Yang *et al.*, 2004)。此外, 脉岩与金矿床在时空上的密切联系也是研究重点之一(Rock and Aroves, 1988; Li *et al.*, 2006; Mao *et al.*, 2008)。不同时代不同地区产出的脉岩其成因大致可以概括为如下三类: (1) 富集地幔的部分熔融, 富集源区可能与俯冲作用释放的熔/流体交代有关(Guo *et al.*, 2004; Tan *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2008), 也可能源于陆下岩石圈地幔的长期富集(Canning *et al.*, 1996; Chen and Zhai, 2003)。 (2) 基性岩浆的地壳混染(Currie and Williams, 1993)。 (3) 岩浆混合作用, 混合端元为底

侵玄武质岩浆与超钾质岩石圈地幔熔体(Thompson *et al.*, 1990; Xu *et al.*, 2007), 或者是地幔来源的玄武质熔体与地壳来源的富硅熔体(Prelevic *et al.*, 2004; Tan *et al.*, 2008)。

金厂沟梁地区位于张家口—赤峰—朝阳金成矿带东端, 区内产出金厂沟梁、小二道沟及二道沟等中—大型金矿床(图 1b)。其所处的张家口—赤峰—朝阳金成矿带北以西拉木伦河断裂与兴蒙造山带相接, 南东以承德—北票断裂为界与华北克拉通及辽西火山岩盆地毗邻(图 1a), 处于地幔隆起与地幔凹陷的过渡带上(王喻, 1996; 陈义贤等, 1997), 构造位置特殊。该成矿带与金矿伴生的脉岩仅柴胡栏子—红花沟闪长岩脉(K-Ar 年龄 237~225 Ma; 余全等, 2000)、安家营子流纹斑岩脉(锆石 U-Pb 年龄 126±2 Ma; 李永刚等, 2003)有少量的年代学及全岩地球化学数据, 而同处于该带的二道沟成矿前闪长岩仅报道锆石 U-Pb 年龄(126±1 Ma; 苗来成等, 2003), 金厂沟梁仅报道全岩地球化学数据(陈军强等, 2005)。区内脉岩研究

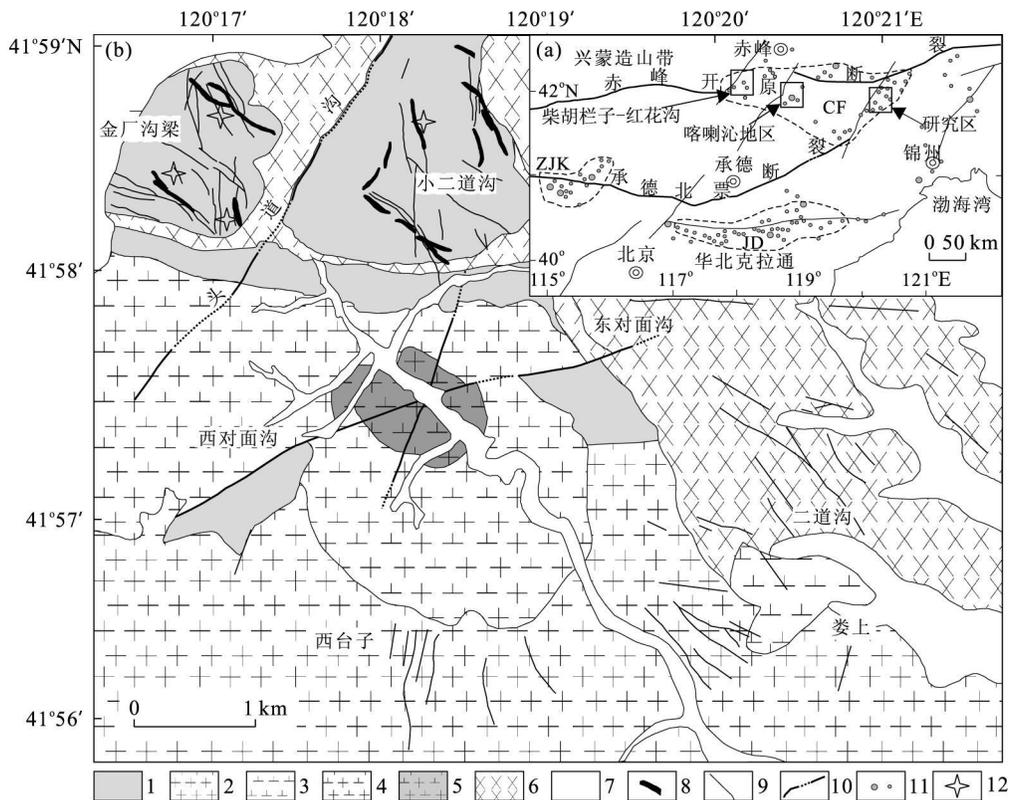


图 1 赤峰—张家口构造位置图(a)(据 Hart *et al.*, 2002 修改)及金厂沟梁—二道沟地区地质简图(b)(据苗来成等, 2003 修改)

Fig. 1 Tectonic location of Zhangjiakou-Chifeng (a) and geological map of Jinchanggouliang-Erdaogou area (b)

1. 太古宙小塔子沟组片麻岩; 2. 西台子二长花岗岩; 3. 娄上辉石闪长岩; 4. 对面沟岩体边缘相; 5. 对面沟岩体中心相; 6. 中生代火山岩; 7. 第四系; 8. 脉岩; 9. 金矿脉; 10. 断裂; 11. 金矿点; 12. 采样位置; ZJK. 张家口金矿集中区; JD. 冀东金矿集中区; CF. 赤峰金矿集中区

相对较少,已有年龄跨度大、部分岩石地球化学数据缺少年代学限定等因素不仅限制了对该区脉岩的成因认识,也在一定程度上制约了该区中生代构造演化及金成矿地球动力学背景等科学问题的深入理解.本次研究选取金厂沟梁地区广为发育的成矿前闪长岩、闪长玢岩进行锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年并开展系统的主微量元素地球化学和 Sr-Nd 同位素研究工作,探讨脉岩侵位时代、成因及成岩动力学背景,并结合前人研究对本区早中生代构造演化进行讨论.

1 地质概况与样品

金厂沟梁地区出露的地层主要为太古宙小塔子沟组片麻岩及第四系松散沉积物,片麻岩作为主要的赋矿围岩分布于金厂沟梁及小二道沟金矿区,第四系松散沉积物间或出现(图 1b).北东向的头道沟断裂将金厂沟梁矿区分为东西两部分,对面沟断裂则将对面沟岩体一分为二.中生代陆相侵入岩—火山岩广泛发育于矿区的南部及东南侧,岩浆多次活动是其典型特征.西台子二长花岗岩呈中等规模岩株侵位于太古宙变质岩中并被上侏罗统火山岩覆盖,锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 218 ± 4 Ma(苗来成等,2003).娄上含辉石石英闪长岩呈椭圆形小岩株侵位于侏罗纪火山岩中,锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 161 ± 1 Ma(苗来成等,2003).对面沟岩体中心相为似斑状花岗闪长岩,边缘相为细粒花岗闪长岩,二者间为渐变过渡关系,前人用不同方法获得该岩体年龄介于 $131 \sim 125$ Ma 之间(王志等,1989; Lin *et al.*, 1993).此外,区内发育大量脉岩,主要有闪长玢岩、细晶闪长岩—石英闪长岩、黑云粗安岩等,呈北西—北东向侵入太古宙变质岩中并被早白垩世金矿脉切穿(成矿年龄介于 $126 \sim 118$ Ma,王建平等,1992; Lin *et al.*, 1993; 苗来成等,2003).

样品采自金厂沟梁矿区、小二道沟金矿区井下巷道及外围地表采石场的新鲜露头(图 1b),脉岩走向 $230^\circ \sim 345^\circ$,倾角 $75^\circ \sim 80^\circ$,地表出露宽度 $0.3 \sim 2.0$ m 不等,被矿脉切割,属成矿前脉岩.测试样品岩性为闪长岩(SCJ1、SCJ3 和 SCJ4)及闪长玢岩(SCJ6、SCJ7、SCJ8、SCB1、SCB2 和 SCB3).闪长岩为细粒半自形结构、块状构造.其主要造岩矿物特征:斜长石多呈自形一半自形板状,大小 $0.16 \text{ mm} \times 0.60 \text{ mm} \sim 0.32 \text{ mm} \times 1.60 \text{ mm}$,普遍发育聚片双晶,含量 $40\% \sim 60\%$;角闪石以自形柱状为主,大小 $0.08 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm} \sim 0.4 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm}$,含量 $30\% \sim 40\%$;黑云母多

呈自形片状,约 $1\% \sim 2\%$;另有少量石英($<3\%$),副矿物有磷灰石、磁铁矿、锆石等.闪长玢岩为斑状结构:斑晶含量约 $15\% \sim 20\%$,为斜长石($0.16 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm} \sim 0.4 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm}$,含量 $10\% \sim 15\%$),角闪石($0.2 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm} \sim 0.8 \text{ mm} \times 3.2 \text{ mm}$,含量 $3\% \sim 6\%$)以及少量黑云母($1\% \sim 2\%$);基质主要由斜长石($50\% \sim 65\%$)、角闪石($15\% \sim 20\%$)组成;另见磷灰石、磁铁矿、锆石等副矿物.

2 分析测试

锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年样品 GSJ2 采自金厂沟梁矿区 15 号脉 15 中 15-4 穿脉(对应的全岩分析样品为 SCJ3).锆石样品破碎和挑选由河北省廊坊区域地质矿产调查研究所实验室完成.之后将锆石颗粒置于环氧树脂中,磨蚀和抛光至锆石核心出露,进行阴极发光(CL)显微照像,结合反射光和透射光,观察锆石内部结构.锆石原位微区测试在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室激光剥蚀等离子体质谱(LA-ICP-MS)仪上完成,激光束斑直径为 $32 \mu\text{m}$,实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气.U-Th-Pb 同位素组成分析以锆石 91500 作为外标,NIST610 作为内标,稀土元素以锆石 91500 作为外标, ^{29}Si 作为内标,详细分析流程和原理参见文献 Liu *et al.* (2009).实验获得的数据采用 Andersen(2002)的方法进行同位素比值的校正,以扣除普通 Pb 的影响.采用的年龄为 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,其加权平均值的误差为 2σ .

主量元素在宜昌地质矿产研究所岩矿测试室采用 XRF 玻璃熔片法完成,分析精度优于 1.4% ;微量元素组成在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室采用 ICP-MS 方法测定,精度优于 5% (Huang *et al.*, 2007).

Sr 和 Nd 同位素比值测定在宜昌地质矿产研究所 MAT261 多接收质谱仪上完成,全流程本底 Sr 为 1×10^{-9} g, Nd 为 2.13×10^{-10} g.采用国际标样 NBS987(Sr)和实验室标准 ZK-bzNd(Nd)控制仪器工作状态.精度 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 优于 1% , $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 优于 0.5% .衰变常数采用 $\lambda(^{87}\text{Rb}) = 1.42 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$, $\lambda(^{147}\text{Sm}) = 6.54 \times 10^{-12} \text{ a}^{-1}$.

3 锆石 U-Pb 年龄

LA-ICP-MS U-Pb 同位素测试结果列于表 1 和

表 1 金厂沟梁脉岩 (GSJ2) 锆石 U-Pb 和全岩 Sr-Nd 同位素分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data and Sr-Nd isotopic compositions of dikes (GSJ2) from Jinchangouliang

测试点号	Th (10 ⁻⁶)	U (10 ⁻⁶)	U-Th-Pb 同位素比值												年龄 (Ma)				
			Th/U (10 ⁻⁶)	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	²⁰⁷ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ	1σ			
GSJ2-1	322	359	0.90	0.053 24	0.001 49	0.264 56	0.009 14	0.036 16	0.000 35	0.014 81	0.000 21	339	63	238	7	229	2	297	4
GSJ2-2	165	178	0.92	0.059 01	0.007 80	0.314 32	0.040 53	0.039 11	0.000 85	0.016 44	0.000 66	567	291	278	31	247	5	330	13
GSJ2-3	392	510	0.77	0.053 87	0.001 35	0.268 06	0.007 97	0.036 02	0.000 35	0.013 36	0.000 54	366	57	241	6	228	2	268	11
GSJ2-4	295	302	0.98	0.054 38	0.001 68	0.271 32	0.008 95	0.036 06	0.000 37	0.013 57	0.000 25	387	69	244	7	228	2	272	5
GSJ2-5	118	269	0.44	0.053 00	0.003 51	0.298 22	0.019 22	0.041 14	0.000 75	0.015 98	0.000 79	329	151	265	15	260	5	320	16
GSJ2-6	153	212	0.72	0.053 71	0.001 83	0.263 37	0.008 68	0.035 75	0.000 36	0.012 04	0.000 25	359	77	237	7	226	2	242	5
GSJ2-7	141	180	0.78	0.052 57	0.001 93	0.260 30	0.010 02	0.035 89	0.000 43	0.011 70	0.000 26	310	84	235	8	227	3	235	5
GSJ2-8	371	612	0.61	0.166 67	0.001 21	9.347 13	0.146 92	0.404 67	0.003 06	0.116 40	0.001 28	2524	12	2373	14	2191	14	2226	23
GSJ2-9	373	452	0.82	0.051 40	0.001 08	0.255 46	0.007 16	0.035 92	0.000 30	0.010 94	0.000 14	259	48	231	6	227	2	220	3
GSJ2-10	155	259	0.60	0.055 56	0.002 10	0.272 42	0.012 31	0.035 56	0.000 48	0.011 99	0.000 28	435	84	245	10	225	3	241	6
GSJ2-11	181	272	0.66	0.059 07	0.002 13	0.315 72	0.014 19	0.038 72	0.000 51	0.014 69	0.000 36	569	79	279	11	245	3	295	7
GSJ2-12	150	249	0.60	0.049 86	0.001 60	0.246 80	0.009 57	0.036 03	0.000 35	0.010 91	0.000 22	189	75	224	8	228	2	219	4
GSJ2-13	205	999	0.21	0.053 45	0.000 97	0.299 64	0.008 23	0.040 62	0.000 45	0.016 30	0.000 39	348	41	266	6	257	3	327	8
GSJ2-14	77	1 086	0.07	0.160 27	0.001 04	9.362 61	0.199 01	0.421 42	0.003 10	0.118 94	0.001 81	2 458	11	2 374	20	2 267	14	2 272	33
GSJ2-15	47	93	0.50	0.052 16	0.003 00	0.261 60	0.015 76	0.036 33	0.000 50	0.012 39	0.000 43	292	132	236	13	230	3	249	9
GSJ2-16	539	1 707	0.32	0.051 54	0.000 72	0.286 82	0.007 18	0.040 19	0.000 29	0.013 84	0.000 17	265	32	256	6	254	2	278	3
样号	岩性	Rb(10 ⁻⁶)	Sr(10 ⁻⁶)	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2σ	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	Sm(10 ⁻⁶)	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	Nd(10 ⁻⁶)	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	1σ	ε _{Nd} (t)	T _{DM} (Ga)				
SCJ3	闪长岩	57.71	669.90	0.248 3	0.706 540	50	0.705 74	6.29	0.1017	37.44	0.512 483	3	-0.3	1.02					
SCJ4	闪长岩	54.57	499.80	0.314 8	0.706 780	50	0.705 76	6.14	0.105 2	35.33	0.512 491	2	-0.2	1.02					
SCJ6		50.96	1 416.00	0.103 8	0.706 260	60	0.705 92	4.44	0.096 9	27.72	0.512 035	3	-8.9	1.72					
SCJ7		75.10	1 033.00	0.209 7	0.706 050	40	0.705 37	4.37	0.102 2	25.86	0.512 012	6	-9.5	1.77					
SCJ8	闪长玢岩	54.99	1 234.00	0.128 5	0.706 290	50	0.705 87	4.46	0.101 1	26.68	0.512 026	3	-9.2	1.75					
SCB1		84.54	664.00	0.367 0	0.706 540	60	0.705 35	4.03	0.107 8	22.58	0.512 318	6	-3.7	1.30					
SCB2		88.73	705.10	0.362 8	0.706 670	50	0.705 49	4.08	0.109 4	22.57	0.512 319	2	-3.7	1.30					
SCB3		88.66	601.50	0.424 9	0.706 410	10	0.705 03	3.97	0.109 6	21.93	0.512 331	3	-3.5	1.28					

注: ε_{Nd}(t) 值计算采用 (¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{CHUR} = 0.196 7, (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{CHUR} = 0.512 638, t 代表成岩年龄 (228 Ma); 同位素亏损地幔模式年龄 (T_{DM2}) 计算采用 (¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{DM} = 0.213 7 及 (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{DM} = 0.513 15.

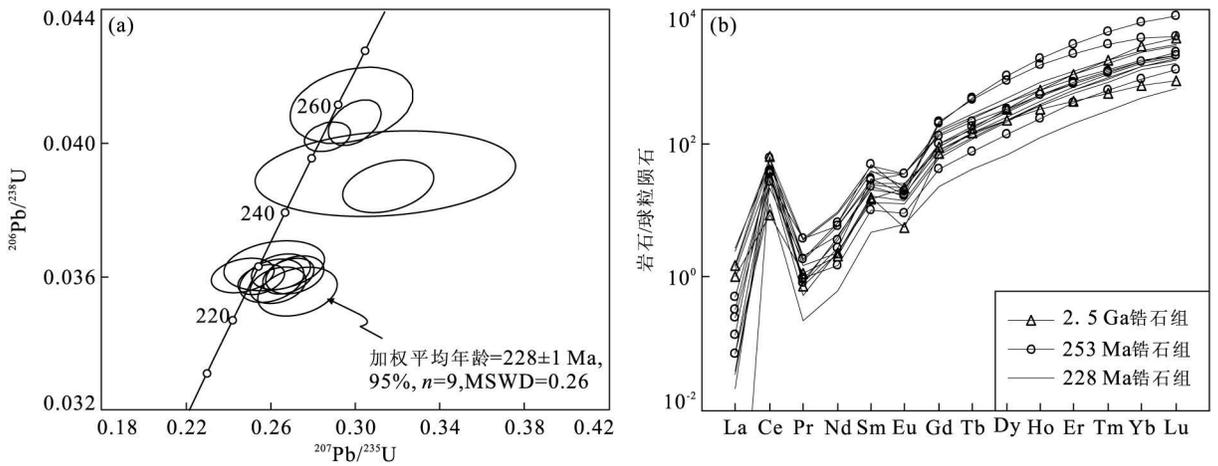


图 2 金厂沟梁成矿前闪长岩(GSJ²)锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图(a)及球粒陨石标准化稀土配分图解(b)

Fig.2 Concordia plots for zircons of dioritic dike (GSJ²) from Jinchanggouliang (a) and chondrite normalized REE patterns (b)
 加权平均年龄为去掉 2、5、8、11、13、14 和 16 号测点外 9 粒岩浆锆石的加权结果;球粒陨石值据 Sun and McDonough (1989)

图 2. 闪长岩(GSJ²)中锆石为无色—浅黄色透明状, 颗粒以短柱状、近等粒状为主, 粒长 60~150 μm. 样品 GSJ² 成功测定了 15 颗锆石中的 16 个点, 包括 9 个岩浆型锆石点和 7 个继承型锆石点. 岩浆型锆石发育典型的振荡环带, Th/U 比值介于 0.40~0.98 之间(表 1), 明显大于变质锆石 Th/U 比值(<0.1; Griffin *et al.*, 2004). 继承型锆石主要发育熔蚀边结构、冷杉叶状结构及变质增生结构(图略), Th/U 比值介于 0.07~0.92 之间(表 1). 岩浆型锆石测点间相关性高, 在谐和曲线上成群分布, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄介于 225~230 Ma 之间, 加权年龄为 228 ± 1 Ma (MSWD=0.26, n=9)(图 2a), 该年龄代表了脉岩的侵位年龄. 继承型锆石谐和度也较高, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄主要介于 245~260 Ma 之间, 加权年龄为 253 ± 6 Ma (MSWD=3.0, n=5), 这一时间可能与晚二叠世至早三叠世时期古亚洲洋闭合导致的造山运动时间一致, 且该期岩浆事件在华北克拉通已有许多年龄记录(Huang *et al.*, 2007). 另外, 继承型锆石中还发现两颗 2.5 Ga 锆石, 反应岩浆源区有古老地壳物质的参与. 锆石稀土组成示于图 2b, 岩浆型锆石与继承型锆石均具有轻稀土亏损、重稀土富集、正 Ce 异常及弱负 Eu 异常等特征.

4 岩石地球化学特征

4.1 主量元素

脉岩主量元素分析结果见表 2. 岩石 SiO₂ (51.22%~68.48%)、MgO (1.35%~8.13%) Mg[#] (39.3%~69.2%) 含量变化较大. Na₂O+K₂O 含量

较高(5.16%~8.28%), K₂O/Na₂O 比值介于 0.5~1.8. 脉岩具高 Al₂O₃ (13.67%~17.50%)、低 TiO₂ (0.51%~1.16%) 和 P₂O₅ (0.13%~0.37%) 等特征, 其 TiO₂ 含量(平均 0.79%)甚至低于与大洋俯冲有关的大陆边缘弧钾玄岩(含量为 0.85%; Morrison, 1980). 在 Nb/Y-Zr/TiO₂ 图解中, 样品主要位于拉斑玄武岩—碱性玄武岩及安山岩—粗安岩的过渡区域内(图 3a). 在 Ta/Yb-Th/Yb 判别图解中, 除样品 J26-13-5-2 属钙碱性岩石外, 其他均位于钾玄质系列范围内(图 3b). Harker 图解显示, 随 SiO₂ 含量增加, TiO₂、FeO_T、MnO、MgO、CaO 和 P₂O₅ 等氧化物含量呈线性降低, 而 Na₂O+K₂O 及 Al₂O₃ 含量则分别呈轻微的升高和降低趋势(图略). 脉岩上述主量元素特征与 Morrison (1980) 总结的钾玄质岩石地球化学特征 (Na₂O+K₂O > 5%, Na₂O/K₂O > 0.6, TiO₂ < 1.3%, Al₂O₃ = 14%~19%, Fe₂O₃/FeO > 0.5) 基本吻合.

4.2 稀土和微量元素

脉岩稀土和微量元素分析结果列于表 2. 岩石 ΣREE 较高, 为 141.87 × 10⁻⁶~220.65 × 10⁻⁶. 轻重稀土分馏强烈, 其 LREE 总量为 60.72 × 10⁻⁶~189.61 × 10⁻⁶, HREE 总量为 20.83 × 10⁻⁶~108.12 × 10⁻⁶, LREE/HREE=5.0~6.1. 球粒陨石标准化的稀土配分模式为 LREE 富集的右倾斜型(图 4b). 脉岩 (La/Yb)_n 比值主体介于 11.11~22.07 之间(样品 J26-711-3 为 32.12), 基本无铈异常(Eu/Eu* 为 0.72~1.13).

微量元素方面, 脉岩大离子亲石元素 Rb、Sr、Ba 含量较高, 分别为 51 × 10⁻⁶~392 × 10⁻⁶, 313 ×

表2 金厂沟梁脉岩主量元素(%),微量及稀土元素(10^{-6})分析结果

Table 2 Major (%) and trace elements (10^{-6}) compositions of dikes from Jinchanggouliang

岩性	闪长岩													
	SCJ1	SCJ3	SCJ4	J26-211-1*	Je91-11-2*	Jc13-1-1*	SCJ6	SCJ7	SCB1	SCB2	SCB3	J26-13-5-2*	J26-711-3*	Jc91-4*
SiO ₂	56.44	62.02	64.22	61.72	54.64	60.90	51.22	54.58	60.43	60.47	58.93	56.80	68.48	54.52
TiO ₂	1.04	0.83	0.80	0.51	0.81	0.55	0.83	0.87	0.62	0.64	0.65	1.16	0.51	1.06
Al ₂ O ₃	16.87	15.21	14.92	15.43	15.00	15.17	15.00	15.36	13.82	13.88	13.67	16.69	14.73	17.50
Fe ₂ O ₃	2.50	1.93	1.40	1.29	2.07	1.99	3.89	4.66	2.31	2.34	2.05	2.02	1.09	2.98
MnO	0.05	0.08	0.08	0.10	0.11	0.19	0.16	0.11	0.08	0.09	0.11	0.19	0.06	0.05
MgO	3.82	3.68	3.58	4.71	8.13	4.65	4.92	5.75	3.72	3.76	4.01	3.10	1.35	5.24
FeO	4.42	3.04	3.41	4.71	3.04	2.40	3.01	3.27	3.72	3.70	4.01	6.71	1.72	4.12
CaO	2.76	3.33	2.52	4.47	5.94	4.90	8.42	3.57	4.15	4.30	4.47	1.18	1.88	3.10
Na ₂ O	5.30	3.60	3.77	3.93	3.68	3.80	3.24	2.06	3.28	3.88	3.17	2.85	3.80	5.15
K ₂ O	2.59	2.80	2.66	1.95	1.79	1.73	3.03	3.10	3.23	3.29	3.80	4.98	4.18	3.13
P ₂ O ₅	0.33	0.29	0.29	0.15	0.19	0.13	0.37	0.37	0.19	0.18	0.18	0.29	0.13	0.33
LOI	2.80	2.03	1.83	2.03	2.04	2.91	5.30	5.89	4.08	3.77	5.09	3.25	1.42	2.96
Total	98.93	98.84	99.47	99.31	98.98	99.32	99.29	99.59	99.13	99.40	99.25	99.22	99.35	100.14
Mg#	50.5	57.9	57.7	66.8	69.2	66.4	57.4	57.9	58.3	57.7	59.0	39.3	47.1	57.9
Na ₂ O+K ₂ O	7.89	6.40	6.43	5.88	5.47	5.53	6.17	5.16	7.07	7.17	6.97	7.83	7.98	8.28
Sc	16.26	10.12	9.86	—	—	—	14.56	14.45	13.47	14.11	14.70	—	—	—
V	150	83	83	—	—	—	106	108	108	118	118	—	—	—
Cr	15	119	113	—	—	—	302	321	170	180	177	—	—	—
Co	21	18	17	—	—	—	26	29	17	18	18	—	—	—
Ni	22	77	97	—	—	—	190	264	64	72	66	—	—	—
Rb	138	59	54	54	52	45	51	75	84	87	84	152	113	392
Sr	444	640	476	624	646	550	1199	1003	616	655	569	313	411	680
Y	15.03	17.25	16.81	100.42	14.12	9.93	14.12	14.57	12.99	13.25	12.96	15.06	11.45	15.58
Zr	161	262	249	115	141	106	164	163	140	135	127	151	214	158
Nb	7.88	12.42	12.66	4.33	4.61	4.08	10.16	10.14	9.27	9.39	9.51	7.39	13.42	9.28
Ba	565	1060	1006	638	533	400	982	723	1179	1245	1121	2127	1043	1060
La	29.97	45.80	44.53	15.41	20.97	14.03	36.09	31.42	30.05	29.13	29.44	27.02	47.92	28.09
Ce	61.04	88.29	85.99	32.40	45.52	27.73	69.10	61.92	55.56	54.95	55.36	58.16	82.82	57.54
Pr	7.72	10.21	10.11	3.77	5.37	3.27	8.02	7.31	6.42	6.22	6.23	7.00	9.00	6.71
Nd	30.96	37.28	36.31	15.41	22.08	12.48	29.02	26.53	23.26	22.92	22.85	29.37	31.56	27.01
Sm	5.39	6.39	6.38	3.22	4.54	2.52	4.67	4.57	4.22	4.10	4.17	5.31	5.03	5.11
Eu	1.54	1.64	1.56	0.88	1.32	0.69	1.36	1.16	1.21	1.22	1.19	1.78	1.04	1.59
Gd	4.27	5.14	5.04	2.65	3.57	2.37	3.90	3.81	3.46	3.55	3.47	4.16	3.62	4.06
Tb	0.56	0.70	0.66	0.40	0.55	0.33	0.51	0.50	0.46	0.48	0.47	0.58	0.47	0.61
Dy	3.06	3.55	3.51	2.01	2.84	1.86	2.82	2.71	2.59	2.55	2.54	2.92	2.37	3.27
Ho	0.58	0.65	0.64	0.40	0.57	0.36	0.53	0.52	0.49	0.49	0.49	0.59	0.42	0.62
Er	1.61	1.74	1.69	1.00	1.41	0.82	1.44	1.33	1.35	1.35	1.35	1.56	1.09	1.49
Tm	0.23	0.24	0.22	0.15	0.22	0.13	0.20	0.17	0.19	0.19	0.18	0.26	0.17	0.23
Yb	1.50	1.54	1.45	0.94	1.35	0.74	1.30	1.14	1.20	1.26	1.22	1.57	1.07	1.39
Lu	0.23	0.23	0.22	0.15	0.2	0.09	0.19	0.16	0.18	0.18	0.18	0.26	0.17	0.21
Hf	3.97	6.49	6.15	2.91	3.25	2.03	4.09	3.93	3.76	3.71	3.34	3.6	3.57	3.76
Ta	0.53	0.92	0.96	0.36	0.34	0.29	0.68	0.65	0.65	0.63	0.64	0.42	1.11	0.59
Pb	7.00	27.84	21.24	18.69	15.03	28.11	15.03	15.43	15.07	14.95	25.15	4.83	18.96	5.10
Th	4.33	16.65	16.85	6.73	6.39	4.22	6.35	6.01	8.33	8.12	7.91	3.84	29.37	4.91
U	1.56	3.91	4.15	2.18	1.7	1.37	1.47	1.39	1.81	1.81	1.75	0.93	3.85	1.35
REE	148.68	203.41	198.31	78.79	110.52	67.42	159.17	143.26	130.63	128.62	129.15	140.52	186.75	137.91
(La/Yb) _n	14.31	21.28	22.07	11.71	11.11	13.60	19.90	19.75	17.94	16.57	17.31	12.37	32.12	14.55
Eu/Eu*	0.96	0.86	0.82	0.90	0.97	0.86	0.95	0.84	0.95	0.97	0.94	1.13	0.72	1.04
Zr/Hf	40.63	40.27	40.42	39.64	43.25	52.13	40.14	41.60	37.15	36.42	37.96	42.07	60.07	42.11
Nb/Ta	14.81	13.48	13.23	11.95	13.72	13.87	14.95	15.64	14.31	14.82	14.90	17.68	12.13	15.70
Nb/U	5.06	3.18	3.05	1.98	2.71	2.98	6.93	7.28	5.13	5.20	5.42	7.95	3.48	6.89

标注* 样品资料引自陈军强等(2005)资料;“-”代表未报道。

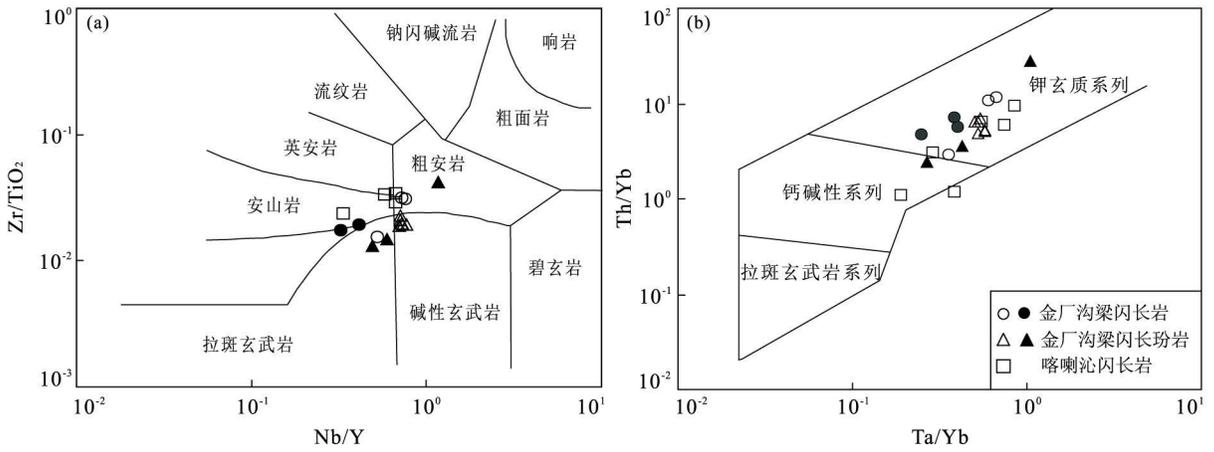


图 3 脉岩的 Nb/Y-Zr/TiO₂(据 Winchester and Floyd, 1976)(a)和 Ta/Yb-Th/Yb(据 Pearce, 1983)(b)判别图解

Fig. 3 Nb/Y-Zr/TiO₂ (a) and Ta/Yb-Th/Yb (b) diagrams of dikes

空心圆圈和空心三角为本文数据;实心圆圈和实心三角数据引自陈军强等(2005);喀喇沁闪长岩数据引自韩庆军等(2000)

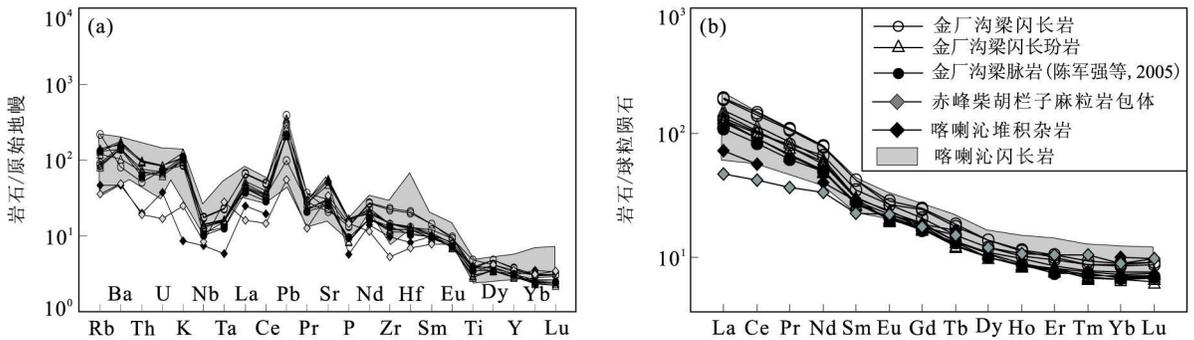


图 4 脉岩原始地幔标准化微量元素蛛网图(a)及球粒陨石标准化稀土配分曲线(b)(原始地幔和球粒陨石标准据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 4 Primitive mantle normalized trace element distributions (a) and chondrite normalized REE patterns (b)

空心圆圈和空心三角为本文数据;金厂沟梁脉岩(陈军强等, 2005)为 6 组数据平均值;柴胡栏子麻粒岩包体为余宏全等(2006), 12 组数据平均值;喀喇沁堆积杂岩为 Shao et al. (1999), 22 组数据平均值;喀喇沁闪长岩数据引自韩庆军等(2000)

$10^{-6} \sim 1.199 \times 10^{-6}$ 和 $400 \times 10^{-6} \sim 2.127 \times 10^{-6}$ 。放射性元素 Th ($3.84 \times 10^{-6} \sim 29.37 \times 10^{-6}$)、U ($0.93 \times 10^{-6} \sim 3.91 \times 10^{-6}$) 含量也较高。高场强元素 Nb、Ta 含量明显偏低, 为 $4.08 \times 10^{-6} \sim 13.42 \times 10^{-6}$ 和 $0.29 \times 10^{-6} \sim 1.11 \times 10^{-6}$ 。相容元素含量 ($Cr = 15 \times 10^{-6} \sim 321 \times 10^{-6}$, $Ni = 22 \times 10^{-6} \sim 264 \times 10^{-6}$, $Co = 17 \times 10^{-6} \sim 29 \times 10^{-6}$) 变化较大, 且与 SiO_2 构成较为明显的负相关关系(图略)。原始地幔标准化的微量元素比值蛛网图上, 脉岩呈现明显的 Nb、Ta、Ti 负异常和 Pb 正异常(图 4a)。

4.3 Sr-Nd 同位素

表 1 列出了脉岩的 Sr-Nd 同位素测试结果。从表 1 可以看出, Sr 同位素比值较为一致, 其 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值介于 $0.70605 \sim 0.70670$, ($^{87}Sr/^{86}Sr$)_i 比值则变化于 $0.70503 \sim 0.70592$ 。Nd 同位素比值变化较大, $^{143}Nd/^{144}Nd$ 比值为 $0.512012 \sim 0.512491$,

$\epsilon_{Nd}(t)$ ($t=228 \text{ Ma}$) 及 T_{2DM} 值也相应具较大变化范围, 分别为 $-0.2 \sim -9.5$ 和 $1.02 \sim 1.77 \text{ Ga}$ 。在 $\epsilon_{Nd}(t) - (^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 图解中样品点落入地幔演化线及附近区域, 表现出 PM-EMI 线性演化趋势, 与周新华等(2001)获得的区域上中生代火山岩同位素变化趋势极为一致(图 5)。

5 分析与讨论

5.1 脉岩成因

研究区脉岩高 $(La/Nb)_n$ 比值 ($3.2 \sim 4.7$), 高 Ba、Sr、Pb 元素含量, 继承或捕获锆石的存在, 低 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值 ($-8.9 \sim -9.5$) 及老 T_{2DM} 年龄 ($1.72 \sim 1.77 \text{ Ga}$) 都指示了古老地壳物质可能是脉岩源区物质的重要组成部分。韩庆军等(2000)通过模拟计算

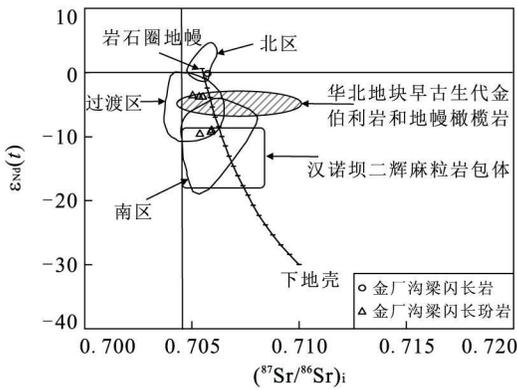


图 5 金厂沟梁脉岩 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解

Fig. 5 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagrams of dikes from Jinchang-Gouliang

数据来源同图 3, $t = 228 \text{ Ma}$. 北区、南区及过渡区范围据周新华等 (2001), 分别代表西拉木伦河以北、赤峰开原断裂以南及两者之间的中生代火山岩同位素组成; 华北克拉通北缘早古生代金伯利岩和地幔橄榄岩据郑建平和路凤香 (1999) 及张宏福和杨岳衡 (2007); 汉诺坝二辉麻粒岩包体据张国辉等 (1998). 图中带短横线曲线为岩浆混合模拟趋势线, 短横线代表 5% 增量. 混合端元参数如下: Sr 、 Nd 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 在岩石圈地幔中分别为 630×10^{-6} 、 24×10^{-6} 、0.705、0.59 (陈斌等, 2008; Zhang *et al.*, 2009), 下地壳中分别为 300×10^{-6} 、 24×10^{-6} 、0.710、-30 (Jahn *et al.*, 1999)

认为早中生代喀喇沁闪长岩起源于太古宙下地壳的部分熔融. 但实验岩石学研究表明: 不论下地壳熔融程度如何, 其产物以 $\text{Mg}^{\#} < 45$ 为特征 (Rapp and Watson, 1995), 这显然与本区脉岩 $\text{Mg}^{\#}$ 值主体大于 50 的事实不符. 此外, 在冀西北和承德一带具有大陆地幔特征的辉长岩 (曾经是华北最下部地壳的前寒武纪高压麻粒岩地体) 并未经历过部分重熔 (翟明国和樊祺诚, 2002). 因此, 古老地壳物质作为岩浆的主要或唯一来源的可能性不大. 研究区脉岩一致的低 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 比值 (0.705 03~0.705 92)、部分脉岩相对高的 $\text{Mg}^{\#}$ (69.2)、高 Cr (321×10^{-6})、 Ni (264×10^{-6}) 元素含量特征可能指示了地幔物质的参与, 而在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解中, 闪长岩及闪长玢岩的数据点即位于地幔演化线及附近区域且具有 PM-EMI 的演化趋势 (图 5). 可见, 壳幔混源是脉岩最可能的源区组成. 但源区的地幔端元到底是富集的岩石圈地幔还是软流圈地幔呢? 脉岩的 Sr-Nd 同位素变化特征 (图 5) 显示, 部分脉岩的 Sr-Nd 同位素组成与早古生代金伯利岩和地幔橄榄岩所反映的华北克拉通下岩石圈地幔同位素值相近 (郑建平和路凤香, 1999; 张宏福和杨岳衡, 2007), 其 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (-0.2~-9.5) 范围也基本上位于韩宝福等 (2004) 根据古元古代富集地幔推算的华北克拉通早

中生代岩石圈地幔 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 ($\epsilon_{\text{Nd}}(220) = -8.9$) 和陈斌等 (2008) 根据小张家口纯橄岩 (堆晶岩) 得出的富集岩石圈地幔 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 ($\epsilon_{\text{Nd}}(220) = -1$) 之间. 因此, 源区的地幔端元可能系早中生代克拉通下富集的岩石圈地幔. 另外, 起源于岩石圈地幔的古生代金伯利岩及三叠纪小张家口辉石岩均经历了不同程度的地壳混染 (张宏福和杨岳衡, 2007; 陈斌等, 2008), 其与金厂沟梁脉岩同位素之间不同程度的相似性也反过来证明地壳物质在脉岩成岩过程中起到了很重要的作用 (图 5).

区域上同时代幔源岩浆活动无疑会对本区脉岩的岩浆起源和演化提供有效约束. 内蒙古赤峰市喀喇沁地区及柴胡栏子金矿区 (图 1a) 早中生代辉石闪长岩-闪长岩 (全岩 K-Ar 年龄为 219 Ma, 邵济安等, 2000) 中发育大量的基性麻粒岩包体 (Shao *et al.*, 2000; 余宏全等, 2006). 包体中变质成因锆石 U-Pb 年龄为 251 Ma, 紫苏辉石 K-Ar 年龄为 237~221 Ma (Shao *et al.*, 2000). 全岩氧同位素变化于 +5‰~+8.1‰, 反映包体原岩应属岩浆成因范围 (余宏全等, 2006). Shao *et al.* (1999) 在喀喇沁-黑里河一带闪长岩中发现完整的堆积岩剖面, 同位素年代学显示其形成于 237~220 Ma (邵济安等, 2000). 陈斌等 (2008) 报道的张家口地区 (图 1a) 辉石岩、纯橄岩杂岩体也属堆晶成因, 成岩年龄为 $220 \pm 5 \text{ Ma}$ (田伟等, 2007). 同一构造环境中同时代的基性麻粒岩捕掳体与镁铁质堆晶岩的共存指示了地幔物质底侵作用的发生 (Liu *et al.*, 2004; Fan *et al.*, 2005). 喀喇沁晚三叠世闪长岩形成时代、主量、稀土及微量元素的含量和变化趋势 (除 Hf 外) (韩庆军等, 2000) 与金厂沟梁地区脉岩极为一致, 该闪长岩中发育的堆晶岩 (Shao *et al.*, 1999) 及赤峰柴胡栏子基性麻粒岩包体 (余宏全等, 2006) 的稀土和微量元素也与本区脉岩基本相似 (图 3, 6). 因此喀喇沁地区的早中生代岩浆活动对本区脉岩成因有很好的指示意义. 部分熔融的岩石圈地幔熔体底侵到壳幔边界, 诱发古老地壳物质的部分熔融, 随后发生的幔源熔体与壳源熔体的混合可以很好地解释区内脉岩的各类地球化学特征: 脉岩高 $\text{Mg}^{\#}$ (69.2)、高 Cr (321×10^{-6})、高 Ni (264×10^{-6}) 元素含量、高 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-0.2)、低 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 比值 (0.705 03~0.705 92) 及区域上堆晶岩中富铬金云母、高铝辉石等矿物的存在 (Shao *et al.*, 1999) 指示了地幔物质的贡献, 高 $(\text{La}/\text{Nb})_n$ 比值 (3.2~4.7)、高 Pb 含量 (4.83×10^{-6} ~ 28.11×10^{-6})、2.5 Ga 左右继承或

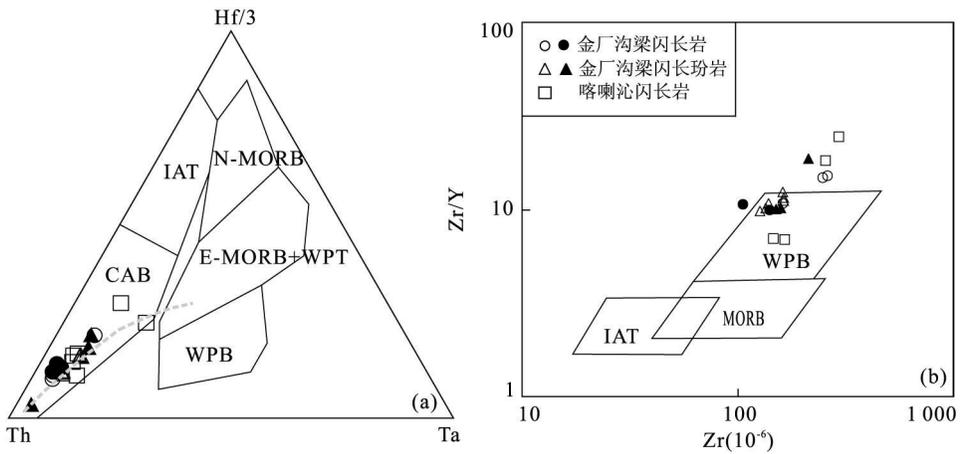


图 6 脉岩 Hf/3-Th-Ta(据 Wood *et al.*, 1979)(a)及 Zr-Zr/Y(据 Pearce and Norry, 1979)(b)构造判别图解

Fig. 6 Hf/3-Th-Ta (a) and Zr-Zr/Y (b) diagrams to describe tectonic location of dikes

数据来源同图 3: N-MORB. N 型洋中脊玄武岩; E-MORB+WPB. E 型洋中脊玄武岩和板内拉斑玄武岩; WPB. 板内碱性玄武岩; CAB. 岛弧钙碱性玄武岩; IAT. 岛弧拉板玄武岩

捕获锆石的存在、低 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ ($-8.9 \sim -9.5$) 及较大的 $T_{2\text{DM}}$ 年龄 ($1.72 \sim 1.77 \text{ Ga}$) 则反映了地壳物质的加入. 此外, $\text{Mg}^\#$ ($39.3 \sim 69.2$) 及 Cr ($15 \times 10^{-6} \sim 321 \times 10^{-6}$)、 Ni ($22 \times 10^{-6} \sim 264 \times 10^{-6}$) 等微量元素含量极大的变化范围(表 2), SiO_2 与 TiO_2 、 TFeO 、 MnO 、 MgO 、 CaO 和 P_2O_5 等氧化物间良好的线性关系, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaO}-\text{Na}_2\text{O}/\text{CaO}$ 、 $\text{SiO}_2/\text{CaO}-\text{Na}_2\text{O}/\text{CaO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}-\text{SiO}_2/\text{MgO}$ 、 $\text{MgO}/\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}/\text{K}_2\text{O}$ 同分母氧化物比值相关图(图略)上明显的线性关系也为源区的岩浆混合提供了佐证. 同位素模拟显示, 地壳物质在脉岩源区中的比例变化于 $3\% \sim 33\%$ (图 5). 因此, 上升的岩石圈地幔熔体诱发古老地壳的部分熔融, 两种熔体的混合成为脉岩最可能的源区过程.

5.2 地球动力学背景

兴蒙造山带属中亚-蒙古造山带的东段, 其间分布有许多微地块(蒙古弧地体). 随着古亚洲洋的不断收缩, 这些地块向西伯利亚板块和华北板块靠近并导致其间先后碰撞拼合, 最终蒙古弧地体和华北板块相互碰撞形成一个整体(孙德有等, 2004). 尽管越来越多的古生物、地磁及岩浆活动证据表明, 位于索伦山-西拉木伦河北侧-长春-吉林-延吉的缝合带应系最终的缝合带(刘伟等, 2003; Shang, 2004; 孙德有等, 2004; Li, 2006; 李锦轶等, 2007; 赵磊, 2008), 但最终闭合的时间仍存在争议(吴福元和曹林, 1999; Zhang *et al.*, 2008). 脉岩主量、微量元素分析表明其类似于钾玄质岩石, 其产出的构造背景可能为与弧相关的构造环境或板内环境(Müller

et al., 1992). 金厂沟梁地区脉岩在 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Zr}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Zr}/\text{TiO}_2-\text{Ce}/\text{P}_2\text{O}_5$ 判别图解中样品点全部落入陆弧-碰撞弧后过渡区(图略), Hf/3-Th-Ta(图 6a) 判别图解上样品点则显示出钙碱性火山弧区向板内环境演化的趋势, Zr-Zr/Y 图解(图 6b) 中显示岩石主体位于板内环境. 结合区域上山西大同(邵济安等, 2003)及赤峰红花沟(余宏全等, 2000)等地同时代煌斑岩和闪长岩脉岩群的出现, 笔者认为晚三叠世华北克拉通北缘应处于一种造山后的伸展构造背景, 而研究区脉岩第二组锆石 $253 \pm 6 \text{ Ma}$ 的加权年龄很可能代表了蒙古弧地体与华北克拉通最终闭合时的岩浆事件.

近来研究表明华北克拉通北缘发育一条近东西向的印支期碱性岩带, 并被认为是拉张环境下岩石圈地幔熔融作用的产物(Yan *et al.*, 1999; 牟保磊等, 2001). 同时代的壳源花岗岩也极为发育, 如冀西北谷咀子岩体(236 Ma ; Miao *et al.*, 2002)、金厂沟梁-二道沟地区西台子岩体(218 Ma ; 苗来成等, 2003)及林西双井子花岗岩($237 \sim 229 \text{ Ma}$; 李锦轶等, 2007), 这些花岗岩与碱性岩的时空分布极为一致, 因此花岗岩很可能是拉张环境下地壳物质重熔的产物(苗来成等, 2003). 在辽西地区, Yan *et al.* (2006)对北漂组进行碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果表明, 沉积盆地中碎屑锆石年龄值集中在 $194 \pm 3 \text{ Ma} \sim 234 \pm 4 \text{ Ma}$ 之间, 这无疑指示该时代盆地周缘遭受了强烈的隆升、剥蚀及坍塌. 河北平泉 220 Ma A2 型花岗岩的存在(韩宝福等, 2004)更确证了这一时期造山后的伸展构造背景.

上述讨论结果表明,晚三叠世的华北克拉通已完成与蒙古弧地体的碰撞,进入造山后伸展阶段,拉张背景下部分熔融的岩石圈地幔熔体底侵到壳幔边界,诱发古老地壳物质的部分熔融,随后发生的幔源熔体与壳源熔体的混合成为脉岩最可能的形成过程。

6 结论

(1) 金厂沟梁地区闪长岩及闪长玢岩形成于 $228 \pm 1 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.26$), $253 \pm 6 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 3.0$) 的继承或捕获锆石组可能反映了蒙古弧地体与华北克拉通碰撞闭合时的岩浆事件。脉岩主体为钾玄质系列, SiO_2 、 MgO 含量变化大, 富 K_2O 、 Al_2O_3 , 低 TiO_2 、 P_2O_5 , LILE 及 LREE 富集, HFSE 亏损, Sr 同位素较为稳定而 Nd 同位素变化较大。

(2) 早中生代, 拉张背景下部分熔融的岩石圈地幔熔体底侵到壳幔边界, 诱发古老地壳物质的部分熔融, 随后发生的幔源熔体与壳源熔体的混合成为脉岩最可能的形成过程。

(3) 脉岩形成于陆弧向板内演化的伸展构造环境。结合区域上同时代脉岩群、碱性岩带及 A2 型花岗岩的发现, 本文认为晚三叠世华北板块已进入造山后阶段。

致谢: 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄分析得到了中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室陈海红和郑曙老师的大力支持; 成文过程中陆建培、姚春亮老师, 张刚阳博士, 肖广玲和彭丽娜同学给予了极大帮助; 邵济安教授及匿名审稿人仔细审阅本文并提出建设性修改意见; 野外工作中内蒙古金陶股份有限公司提供了便利的条件, 特此一并致谢。

References

Andersen, T., 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79. doi: 10.1016/S0009-2541(02)00195-X

Canning, J. C., Henney, P. J., Morrison, M. A., et al., 1996. Geochemistry of Late Caledonian minettes from northern Britain; implications for the Caledonian subcontinental lithospheric mantle. *Mineralogical Magazine*, 60(1): 221-236.

Chen, B., Tian, W., Liu, A. K., 2008. Petrogenesis of Xiaozhangjiakou mafic-ultramafic complex, North Hebei; constraints from petrological, geochemical and Nd-Sr isotopic data. *Geological Journal of China Universities*, 14(3):

295-303 (in Chinese with English abstract).

Chen, B., Zhai, M. G., 2003. Geochemistry of Late Mesozoic lamprophyre dykes from the Taihang Mountains, North China, and implications for the subcontinental lithospheric mantle. *Geological Magazine*, 140(1): 87-93. doi: 10.1017/S0016756802007124

Chen, J. Q., Sun, J. G., Piao, S. C., et al., 2005. Genesis and significance of dark dikes in the Jinchanggouliang mine area, Inner Mongolia; evidences from geochemistry of the major and trace elements. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 35(6): 707-713 (in Chinese with English abstract).

Chen, Y. X., Chen, W. J., Zhou, X. H., et al., 1997. Mesozoic volcanic rocks in Liaoxi and neighborhood—chronology, geochemistry and geological setting. Earthquake Publishing House, Beijing, 1-279 (in Chinese).

Currie, K. L., Williams, P. R., 1993. An Archean calc-alkaline lamprophyre suite, northeastern Yilgarn block, western Australia. *Lithos*, 31(1-2): 33-50. doi: 10.1016/0024-4937(93)90031-7

Fan, Q. C., Zhang, H. F., Sui, J. L., et al., 2005. Magma underplating and Hannuoba present crust-mantle transitional zone composition; xenolith petrological and geochemical evidence. *Science in China (Series D)*, 48(8): 1089-1105. doi: 10.1360/04yd0007

Fowler, M. B., Henney, P. J., 1996. Mixed Caledonian appinite magmas; implications for lamprophyre fractionation and high Ba-Sr granite genesis. *Contributions to Mineralogy Petrology*, 126(1-2): 199-215. doi: 10.1007/s004100050244

Griffin, W. L., Belousova, E. A., Shee, S. R., et al., 2004. Archean crustal evolution in the northern Yilarn craton: U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons. *Precambrian Research*, 131(3-4): 231-282. doi: 10.1016/j.precamres.2003.12.011

Guo, F., Fan, W. M., Wang, Y. J., et al., 2004. Origin of early Cretaceous calc-alkaline lamprophyres from the Sulu orogen in eastern China; implications for enrichment processes beneath continental collisional belt. *Lithos*, 78(3): 291-305. doi: 10.1016/j.lithos.2004.05.001

Han, B. F., Kagami, H., Li, H. M., 2004. Age and Nd-Sr isotopic geochemistry of the Guangtoushan alkaline granite, Hebei Province, China; implications for Early Mesozoic crust-mantle interaction in North China block. *Acta Petrologica Sinica*, 20(6): 1375-1388 (in Chinese with English abstract).

Han, Q. J., Shao, J. A., Zhou, R., 2000. Petrology, geochem-

- istry and petrogenesis of Early Mesozoic diorites in Harqin area, Inner-Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 16(3):385—391 (in Chinese with English abstract).
- Hart, C. J., Goldfarb, R. J., Qiu, Y. M., 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. doi: 10.1007/s00126—001—0239—2
- He, S. P., Wang, H. L., Chen, J. L., et al., 2008. La-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of basic dikes within Maxianshan rock group in the Central Qilian Mountains and its tectonic implications. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(1):35—45 (in Chinese with English abstract).
- Huang, H., Gao, S., Hu, Z. C., et al., 2007. Geochemistry of the high-Mg andesites at Zhangwu, western Liaoning: implication for delamination of newly formed lower crust. *Science in China (Series D)*, 50(12):1773—1786. doi:10.1007/s11430—007—0121—x
- Jahn, B. M., Wu, F. Y., Lo, C. H., et al., 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, Central China. *Chemical Geology*, 157(1—2):119—146. doi:10.1016/S0009—2541(98)00197—1
- Li, J. W., Vasconcelos, P., Zhou, M. F., et al., 2006. Geochronology of the Pengjiakuang and Rushan gold deposits, eastern Jiaodong gold province, northeastern China: implications for regional mineralization and geodynamic setting. *Economic Geology*, 101(5):1023—1038. doi:10.2113/gsecongeo.101.5.1023
- Li, J. Y., 2006. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific plate. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(3—4):207—224. doi:10.1016/j.jseaes.2005.09.001
- Li, J. Y., Gao, L. M., Sun, G. H., et al., 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).
- Li, Y. G., Zhai, M. G., Miao, L. C., et al., 2003. Relationship between intrusive rocks and gold mineralization of the Anjiayingzi gold deposit, Inner Mongolia and its implications for geodynamics. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4):808—816 (in Chinese with English abstract).
- Lin, B. Q., Shang, L., Shen, E. S., et al., 1993. Vein gold deposits of the Liaoxi uplift, North China platform. In: Maurice, Y. T., ed., IAGOD Quadrennial Symposium. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Science Publishers, Ottawa, 597—612.
- Liu, S., Hu, R. Z., Gao, S., et al., 2008. Zircon U-Pb geochronology and major, trace elemental and Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of mafic dykes in western Shandong Province, East China: constraints on their petrogenesis and geodynamic significance. *Chemical Geology*, 255(3—4):329—345. doi:10.1016/j.chemgeo.2008.07.006
- Liu, W., Yang, J. H., Li, C. F., 2003. Thermo-chronology of three major faults in the Chifeng area, Inner Mongolia of China. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4):717—728 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z. C., et al., 2009. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1—2):537—571. doi:10.1093/ptrology/egp082
- Liu, Y. S., Gao, S., Yuan, H. L., et al., 2004. U-Pb zircon ages and Nd, Sr, and Pb isotopes of lower crustal xenoliths from North China Craton: insights on evolution of lower continental crust. *Chemical Geology*, 211(1—2):87—109. doi:10.1016/j.chemgeo.2004.06.023
- Mao, J. W., Wang, Y. T., Li, H. M., et al., 2008. The relationship of mantle-derived fluids to gold metallogenesis in the Jiaodong Peninsula: evidence from D-O-C-S isotope systematics. *Ore Geology Reviews*, 33(3—4):361—381. doi:10.1016/j.oregeorev.2007.01.003
- Mayborn, K. R., Leshner, C. E., Connelly, J. N., 2008. Geochemical constraints on the late-stage evolution of basaltic magma as revealed by composite dikes within the Kangamiut dike swarm, West Greenland. *Lithos*, 104(1—4):428—438. doi:10.1016/j.lithos.2008.02.001
- Miao, L. C., Fan, W. M., Zhai, M. G., 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, L. C., Qiu, Y. M., McNaughton, N., et al., 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of granitoids from Dongping area, Hebei Province, China: constraints on tectonic evolution and geodynamic setting for gold metallogeny. *Ore Geology Reviews*, 19(3—4):187—204. doi:10.1016/S0169—1368(01)00041—5
- Morrison, G. W., 1980. Characteristics and tectonic setting of

- the shoshonite rock association. *Lithos*, 13 (1): 97—108. doi: 10.1016/0024-4937(80)90067-5
- Mu, B. L., Shao, J. A., Chu, Z. Y., et al., 2001. Sm-Nd age and Sr, Nd isotopic characteristics of the Fanshan potassic alkaline ultramafite-syenite complex in Hebei Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 17 (3): 358—365 (in Chinese with English abstract).
- Müller, D., Rock, N. M. S., Groves, D. I., 1992. Geochemical discrimination between shoshonitic and potassic volcanic rocks from in different tectonic settings; a plot study. *Mineralogy and Petrology*, 46 (4): 259—289. doi: 10.1007/BF01173568
- Pearce, J. A., 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In: Hawkesworth, C. J., Norry, M. J., eds., *Continental basalts and mantle xenoliths*. Shiva Publishing, Nantwich, 158—185.
- Pearce, J. A., Norry, M. J., 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks. *Contribution to Mineralogy Petrology*, 69 (1): 33—47. doi: 10.1007/BF00375192
- Poland, M. P., Fink, J. H., Tauxe, L., 2004. Patterns of magma flow in segmented silicic dikes at Summer Coon volcano, Colorado: AMS and thin section analysis. *Earth and Planetary Science Letters*, 219 (1—2): 155—169. doi: 10.1016/S0012-821X(03)00706-4
- Prelević, D., Foley, S. F., Cvetković, V., et al., 2004. Origin of minette by mixing of lamproite and dacite magmas in Veliki Majdan, Serbia. *Journal of Petrology*, 45 (4): 759—792. doi: 10.1093/petrology/egg109
- Rapp, R. P., Watson, E. B., 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8—32 kbar; implications for continental growth and crust-mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36 (4): 891—931. doi: 10.1093/petrology/36.4.891
- Rock, N. M. S., Groves, D. I., 1988. Do lamprophyres carry gold as well as diamonds? *Nature*, 332: 253—255. doi: 10.1038/332253a0
- Scarrow, J. H., Leat, P. T., Wareham, C. D., et al., 1998. Geochemistry of mafic dykes in the Antarctic Peninsula continental-margin batholith; a record of arc evolution. *Contribution to Mineralogy Petrology*, 131 (2—3): 289—305. doi: 10.1007/s004100050394
- Shang, Q. H., 2004. Occurrences of Permian radiolarians in central and eastern Nei Mongol (Inner Mongolia) and their geological significance to the northern China orogen. *Chinese Science Bulletin*, 49 (24): 2613—2619. doi: 10.1360/04wd0069
- Shao, J. A., Han, Q. J., Li, H. M., 2000. Discovery of the Early Mesozoic granulite xenoliths in North China Craton. *Science in China (Series D)*, 43 (Suppl. 1): 245—252. doi: 10.1007/BF02911949
- Shao, J. A., Han, Q. J., Zhang, L. Q., et al., 1999. Cumulate complex xenoliths in the Early Mesozoic in eastern Inner Mongolia. *Chinese Science Bulletin*, 44 (14): 1272—1279. doi: 10.1007/BF02885842
- Shao, J. A., Zhang, R. H., Han, Q. J., et al., 2000. Geochemistry of cumulate xenoliths and their host diorites from Harqin, eastern Nei Mongol. *Geochimica*, 29 (4): 331—336 (in Chinese with English abstract).
- Shao, J. A., Zhang, Y. B., Zhang, L. Q., et al., 2003. Early Mesozoic dike swarms of carbonatites and lamprophyres in Datong area. *Acta Petrologica Sinica*, 19 (1): 93—104 (in Chinese with English abstract).
- She, H. Q., Wang, Y. W., Li, Q. H., et al., 2006. The mafic granulite xenoliths and its implications to mineralization in Chaihulanzi gold deposit, Inner Mongolia, China. *Acta Geological Sinica*, 80 (6): 863—875 (in Chinese with English abstract).
- She, H. Q., Xu, G. Z., Zhou, R., et al., 2000. Tectonic and magmatic activities in Early Mesozoic and their controlling on gold mineralization in Honghuagou gold ore field, Inner Mongolia. *Geoscience*, 14 (4): 408—416 (in Chinese with English abstract).
- Sun, D. Y., Wu, F. Y., Zhang, Y. B., et al., 2004. The final closing time of the West Lamulun River-Changchun-Yanji plate suture zone; evidence from the Dayushan granitic pluton, Jilin Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 34 (2): 174—181 (in Chinese with English abstract).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A. D., Norry, M. J., eds., *Magmatism in the ocean basins*. *Geological Society Special Publications, London*, 42: 313—345. doi: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19
- Tan, J., Wei, J. H., Guo, L. L., et al., 2008. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and phenocryst EPMA of dikes, Guocheng, Jiaodong Peninsula; implications for North China craton lithosphere evolution. *Science in China (Series D)*, 51 (10): 1483—1500. doi: 10.1007/s11430-008-0079-3
- Tan, J., Wei, J. H., Li, Y. H., et al., 2007. Geochemical characteristics of Late Mesozoic dikes, Jiaodong Peninsula, North China craton; petrogenesis and geodynamic setting. *International Geology Review*, 49 (10): 931—946. doi: 10.2747/0020-6814.49.10.931

- Thompson, R. N., Leat, P. T., Dickin, A. P., et al., 1990. Strongly potassic mafic magmas from lithospheric mantle sources during continental extension and heating: evidence from Miocene minettes of Northwest Colorado, U.S.A. *Earth and Planetary Science Letters*, 98(2): 139—153. doi: 10.1016/0012-821X(90)90055-3
- Tian, W., Chen, B., Liu, C. Q., et al., 2007. Zircon U-Pb age and Hf isotopic composition of the Xiaozhangjiakou ultra-mafic pluton in northern Hebei. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 583—590 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. P., Liu, Y. S., Dong, F. X., et al., 1992. Study on ore-controlling tectonics of Jinchanggouliang gold deposits, Inner Mongolia. Geological Publishing House, Beijing, 8—11 (in Chinese).
- Wang, Y., 1996. Tectonic evolutionary processes of Inner Mongolia-Yanshan orogenic belt in eastern china during the late of late Paleozoic-mesozoic. Geological Publishing House, Beijing, 1—142 (in Chinese).
- Wang, Z., Xu, Z. X., Yang, F. H., 1989. Geology and genesis of Erdaogou gold deposit, Liaoning Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 19(3): 287—297 (in Chinese with English abstract).
- Winchester, J. A., Floyd, P. A., 1976. Geochemical magma type discrimination; application to altered and metamorphosed basic igneous rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 28(3): 459—469. doi: 10.1016/0012-821X(76)90207-7
- Wood, D. A., Joron, J. L., Treuil, M., 1979. Re-appraisal of the use of trace elements to classify and discriminate between magma series erupted in different tectonic settings. *Earth and Planetary Science Letters*, 45(2): 326—336. doi: 10.1016/0012-821X(79)90133-X
- Wu, F. Y., Cao, L., 1999. Some important problems of geology in northeastern Asia. *World Geology*, 18(2): 1—13 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. W., Zhang, B. L., Qin, K. Z., et al., 2007. Origin of lamprophyres by the mixing of basic and alkaline melts in magma chamber in Beiya area, western Yunnan, China. *Lithos*, 99(3—4): 339—362. doi: 10.1016/j.lithos.2007.06.011
- Yan, G. H., Mu, B. L., Xu, B. L., et al., 1999. Triassic alkaline intrusives in the Yanliao-Yinshan area; their chronology, Sr, Nd and Pb isotopic characteristics and their implication. *Science in China (Series D)*, 42(6): 582—587.
- Yan, Y., Lin, G., Xia, B., et al., 2006. U-Pb dating of single detrital zircon grains from Mesozoic sandstone in the Beipiao basin in the eastern Yan-Liao orogenic belt, China; provenance and correlation of tectonic evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(6): 669—681. doi: 10.1016/j.jseaes.2005.01.002
- Yang, J. H., Chung, S. L., Zhai, M. G., et al., 2004. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of mafic dikes from the Jiaodong Peninsula, China; evidence for vein-plus-peridotite melting in the lithospheric mantle. *Lithos*, 73(3—4): 145—160. doi: 10.1016/j.lithos.2003.12.003
- Zhai, M. G., Fan, Q. C., 2002. Mesozoic replacement of bottom crust in North China craton; an orogenic mantle-crust interaction. *Acta Petrologica Sinica*, 18(1): 1—8 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. H., Zhou, X. H., Sun, M., et al., 1998. Sr, Nd and Pb isotopic characteristics of granulite and pyroxenite xenoliths in Hannuoba basalts, Hebei Province, and their implications for geologic processes. *Acta Petrologica Sinica*, 14(2): 190—197 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. F., Yang, Y. H., 2007. Emplacement age and Sr-Nd-Hf isotopic characteristics of diamondiferous kimberlites from the eastern North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 285—294 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. H., Zhang, H. F., Tang, Y. J., et al., 2008. Geochemistry of Permian bimodal volcanic rocks from Central Inner Mongolia, North China; implication for tectonic setting and Phanerozoic continental growth in Central Asia orogenic belt. *Chemical Geology*, 249(3—4): 262—281. doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.01.005
- Zhang, X. H., Zhang, H. F., Zhai, M. G., et al., 2009. Geochemistry of middle triassic gabbros from northern Liaoning, North China; origin and tectonic implications. *Geological Magazine*, 146(4): 540—551. doi: 10.1017/S0016756808005530
- Zhao, L., 2008. Geochemistry and tectonic implications of the late palaeozoic mafic-ultramafic rocks belt on the middle segment of the northern margin of the North China plate (Dissertation). Beijing University, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Zheng, J. P., Lu, F. X., 1999. Mantle xenoliths from kimberlites, Shandong and Liaoning; Paleozoic mantle character and its heterogeneity. *Acta Petrologica Sinica*, 15(1): 65—74 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. H., Zhang, G. H., Yang, J. H., et al., 2001. Sr-Nd-Pb isotope mapping of Late Mesozoic volcanic rocks across northern margin of North China craton and implications to geodynamic processes. *Geochimica*, 30(1): 10—23 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈斌, 田伟, 刘安坤, 2008. 冀北小张家口基性—超基性杂岩的成因: 岩石学、地球化学和 Nd-Sr 同位素证据. 高校地质学报, 14(3): 295—303.
- 陈军强, 孙景贵, 朴寿成, 等, 2005. 金厂沟梁金矿区暗色脉岩的成因和意义: 主要和微量元素地球化学证据. 吉林大学学报(地球科学版), 35(6): 707—713.
- 陈义贤, 陈文寄, 周新华, 等, 1997. 辽西及邻区中生代火山岩: 年代学、地球化学和构造背景. 北京: 地震出版社, 1—279.
- 韩宝福, 加加美宽雄, 李惠民, 2004. 河北平泉光头山碱性花岗岩的时代、Nd-Sr 同位素特征及其对华北早中生代壳幔相互作用的意义. 岩石学报, 20(6): 1375—1388.
- 韩庆军, 邵济安, 周瑞, 2000. 内蒙古喀喇沁早中生代闪长岩的岩石学、地球化学及其成因. 岩石学报, 16(3): 385—391.
- 何世平, 王洪亮, 陈隽璐, 等, 2008. 中祁连马街山岩群内基性岩墙群锆石 La-ICP-MS U-Pb 年代学及其构造意义. 地球科学——中国地质大学学报, 33(1): 35—45.
- 李锦轶, 高立明, 孙桂华, 等, 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板块碰撞时限的约束. 岩石学报, 23(3): 565—582.
- 李永刚, 翟明国, 苗来成, 等, 2003. 内蒙古安家营子金矿与侵入岩的关系及其地球动力学意义. 岩石学报, 19(4): 808—816.
- 刘伟, 杨进辉, 李潮峰, 2003. 内蒙赤峰地区若干主干断裂带的构造热年代学. 岩石学报, 19(4): 717—728.
- 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.
- 牟保磊, 邵济安, 储著银, 等, 2001. 河北矾山钾质碱性超镁铁岩—正长岩杂岩体 Sm-Nd 年龄和 Sr、Nd 同位素特征. 岩石学报, 17(3): 358—365.
- 邵济安, 张任祜, 韩庆军, 等, 2000. 内蒙古喀喇沁堆晶岩捕虏体和寄主闪长岩的同位素年龄. 地球化学, 29(4): 331—336.
- 邵济安, 张永北, 张履桥, 等, 2003. 大同地区早中生代煌斑岩—碳酸岩岩墙群. 岩石学报, 19(1): 93—104.
- 余宏全, 王义文, 李庆环, 等, 2006. 内蒙古赤峰柴胡栏子金矿基性麻粒岩包体特征及其成矿动力学意义. 地质学报, 80(6): 863—875.
- 余宏全, 徐贵忠, 周瑞, 等, 2000. 内蒙东部红花沟金矿田早中生代构造—岩浆活动及对金成矿的控制作用. 现代地质, 14(4): 408—416.
- 孙德有, 吴福元, 张艳斌, 等, 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—181.
- 田伟, 陈斌, 刘超群, 等, 2007. 冀北小张家口超基性岩体的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成. 岩石学报, 23(3): 583—590.
- 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, 8—11.
- 王瑜, 1996. 中国东部内蒙古—燕山造山带晚古生代晚期—中生代的造山作用过程. 北京: 地质出版社, 1—142.
- 王志, 徐忠勋, 杨福和, 1989. 辽宁省二道沟金矿地质及成因. 长春地质学院学报, 19(3): 287—297.
- 吴福元, 曹林, 1999. 东北亚地区的若干重要基础地质问题. 世界地质, 18(2): 1—13.
- 翟明国, 樊祺诚, 2002. 华北克拉通中生代下地壳置换: 非造山过程的壳幔交换. 岩石学报, 18(1): 1—8.
- 张国辉, 周新华, 孙敏, 等, 1998. 河北汉诺坝玄武岩中麻粒岩类和辉石岩类捕虏体 Sr、Nd、Pb 同位素特征及其地质意义. 岩石学报, 14(2): 190—197.
- 张宏福, 杨岳衡, 2007. 华北克拉通东部含金刚石金伯利岩的侵位年龄和 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学特征. 岩石学报, 23(2): 285—294.
- 赵磊, 2008. 华北板块北缘中段晚古生代镁铁—超镁铁岩石的岩石地球化学特征及其构造意义(学位论文). 北京: 北京大学.
- 郑建平, 路凤香, 1999. 胶辽半岛金伯利岩中地幔捕虏体岩石学特征: 古生代岩石圈地幔及其不均一性. 岩石学报, 15(1): 65—74.
- 周新华, 张国辉, 杨进辉, 等, 2001. 华北克拉通北缘晚中生代火山岩 Sr-Nd-Pb 同位素填图及其构造意义. 地球化学, 30(1): 10—23.