第 92 卷　第 2 期
2018年2月　278～297

地　质　学　报　ACTA GEOLOGICA SINICA

Vol. 92 No. 2 2018
Feb.　278～297

内蒙古乌拉特中旗克布镁铁质－超镁铁质岩体年代学、矿物学和岩石地球化学

党智财[1)]，李俊建[1)]，付超[1)]，唐文龙[1)]，刘跃[3)]，赵泽霖[1,2)]，吴兴源[1)]，孙宏伟[1)]

1）中国地质调查局天津地质调查中心，天津，300170；2）中国地质科学院研究生部，北京，100037；
3）中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室，北京，100083

内容提要：内蒙古乌拉特中旗地处华北陆块北缘西段，大地构造分区属于狼山－白云鄂博陆缘裂谷。区域上，镁铁质－超镁铁质岩呈东西向带状分布，断续出露长约 300km，宽约 30km。该镁铁质－超镁铁质岩带内铜镍矿床（点）较为发育，克布为该带内一个中-小型铜镍硫化物矿床。克布镁铁质－超镁铁岩体出露面积约 45km^2，主要由辉长岩相和橄榄岩相组成，辉长岩相为岩体的主要岩相，橄榄岩相为主要的赋矿岩石，两个相带相伴产出，呈渐变过渡关系。本文采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法测年，获得克布斜长方辉橄榄岩年龄为 258.1±1.8Ma（MSWD=2.3），属于晚二叠世。岩石主、微量及稀土元素分析结果表明，岩石样品属铁质镁铁质－超镁铁质岩，具有拉斑玄武岩系列演化趋势，并相对富集大离子亲石元素（Rb、Sr、Ba），亏损高场强元素（Nb、Ta、Zr、Hf、Ti），以及具有轻稀土富集[$(La/Yb)_N$=2.47～11.29]的右倾型稀土配分模式。以橄榄石－熔体平衡原理估算克布镁铁质－超镁铁质岩体母岩浆的 MgO 含量为 10.1%，FeO 为 12.1%，应为高镁的拉斑玄武质岩浆。综合分析认为，克布镁铁质－超镁铁质岩体应形成于后碰撞伸展阶段，岩浆源区由被消减板片交代的地幔楔物质和软流圈物质组成。橄榄石和辉石等富镁铁矿物的分离结晶和富硅地壳物质的混染可能对硫化物熔离富集成矿起到了关键性作用。

关键词：克布镁铁质－超镁铁质岩体；锆石 U-Pb 年龄；地球化学；铜镍成矿作用；乌拉特中旗

内蒙古中部乌拉特中旗位于华北陆块北缘西段，大地构造分区属于狼山－白云鄂博陆缘裂谷（Wang Ji et al.，1992；Liang Youbin et al.，1998；Zhao Lei et al.，2008；Pan Guitang et al.，2009）。区域上，镁铁质－超镁铁质岩呈东西向带状分布，断续出露长约 300km，宽约 30km。区内发育有多条北东或东西向展布的深大断裂，构造岩浆活动强烈，为铜、镍及铂族元素等金属矿床的形成提供了有利的地质构造条件。近年来，随着找矿勘查工作的深入推进，在内蒙古中部地区先后发现了多处铜镍矿床（点）（额布图、达布逊、特颇格日图、温更、克布、黄花滩和小南山等）。研究表明，这些地区镁铁质－超镁铁质岩的形成时代为二叠纪（294～269Ma）（Zhao Lei et al.，2011；Luo Hongling et al.，2009；Wang Qian，2010；Peng Runmin et al.，2013），与新疆东天山、中天山和阿尔泰等地区铜镍硫化物矿床的成岩成矿时代（298～274Ma）接近（Han Baofu et al.，2004；Mao Jingwen et al.，2008；Zhang Zuoheng et al，2008；Zhao Yun et al.，2015；Xue Shengchao et al.，2016，Wang Yalei et al.，2017），表明二叠纪时期中亚造山带南缘较大范围发育较为活跃的幔源岩浆活动，该时期的镁铁质－超镁铁质岩石可能具有很好的成矿潜力。

克布镁铁质－超镁铁质岩位于内蒙古中部乌拉特中旗海流图镇东约 35km（图 1），为该镁铁质－超镁铁质岩带内发育的一中-小型铜镍硫化物矿床。Luo Hongling et al.（2007）获得克布闪长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 291±4Ma，认为岩体是由后碰撞底侵作用导致增厚下地壳基底部分熔融形成。然而，关于克布镁铁质－超镁铁质岩形成时代及岩石成因方面研究一直鲜有报道，其成岩成矿时代及岩浆演化过程与该区域上镁铁质－超镁铁质岩带内其他岩体是否具有相关性并不明确，对其成矿作用方面认识也比较薄弱。鉴于此，本文拟对克

注：本文为中国地质调查局项目（编号 DD20160112、1212010561510、1212010811061、1212011120330、12120114001201、1212011085488）和国土资源公益性行业科研专项（编号 200811010）和国家国际科技合作项目（编号 2012DFB20220）资助。
收稿日期：2016-05-23；改回日期：2017-07-05；责任编辑：郝梓国。
作者简介：党智财，男，1989 年生，助理工程师，主要从事区域成矿学研究及矿产勘查工作；Email：dangzhicai@163.com。通讯作者：李俊建，男，1962 年生，研究员，博士生导师，主要从事区域成矿学研究及矿产勘查工作；Email：junjianl@163.com。

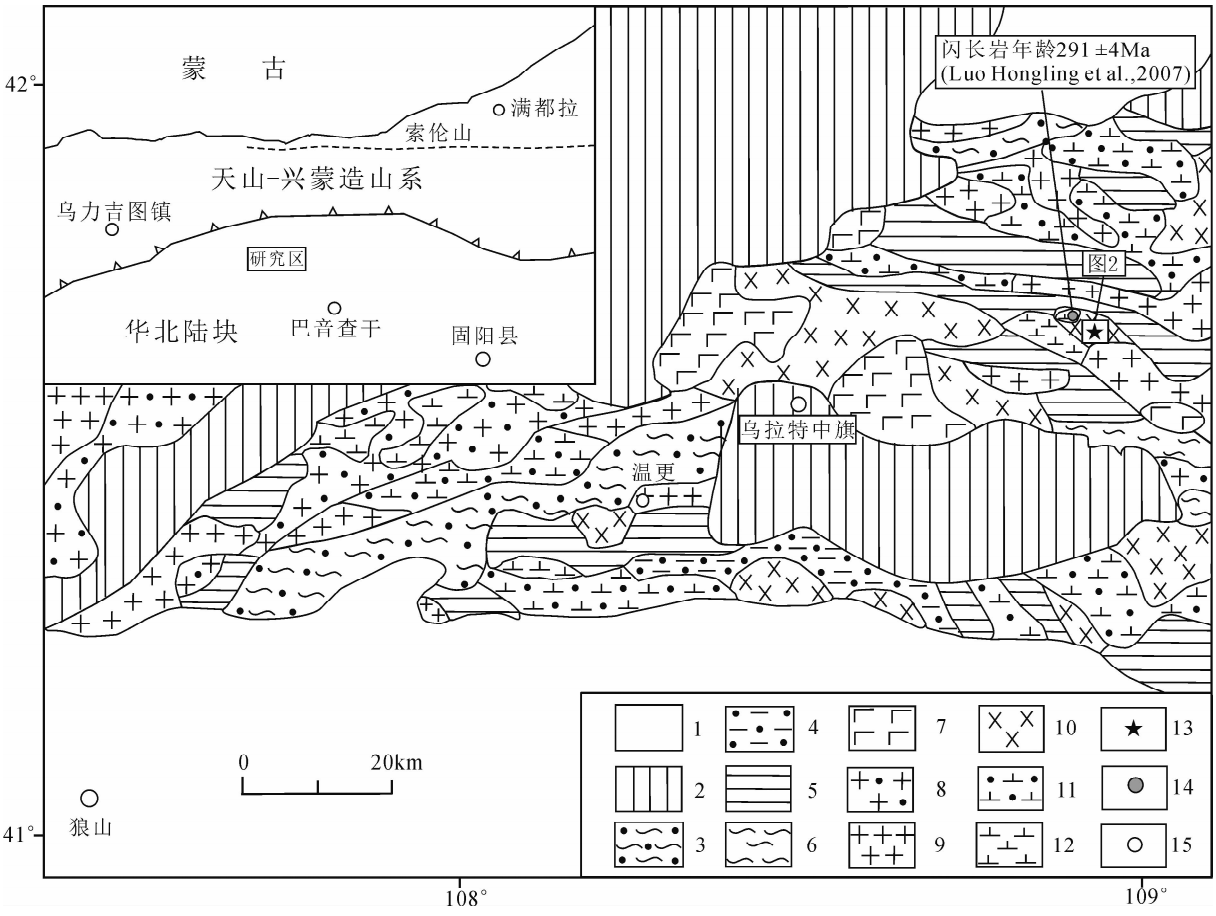


图 1　内蒙古中部乌拉特中旗地区地质图(据 Luo Hongling et al. 2007)

Fig. 1　Geological map of Urad Middle Banner area in Inner Mongolia (after Luo Hongling et al. , 2007)

1—第四系－第三系;2—白垩系白女羊盘组、固阳组;3—侏罗系石拐群;4—二叠系大红山组;5—中元古界白云鄂博群尖山组;6—中太古界乌拉山岩群;7—中新世汉诺坝期玄武岩;8—印支期花岗岩;9—海西期花岗岩;10—辉长岩;11—海西期闪长岩;12—元古代闪长岩;13—本文采样位置;14—已有年龄样品;15—地名

1—Quaternary and Tertiary; 2—Cretaceous Bainvyangpan and Guyang Formations; 3—Jurassic Shiguai Group; 4—Permian Dahongshan Formation; 5—Jianshan Formation in Mesoproterozoic Baiyunebo Group; 6—Mesoarchean Wulasanyan Group; 7—Cenozoic Hannuoba basalt; 8—Indosinian granite; 9—Hercynian granite; 10—gabbro; 11—Hercynian Diorite; 12—Proterozoic diorite; 13—sample location (this work); 14—samples of having been dated; 15—placename

布镁铁质－超镁铁质岩开展详细的锆石 U-Pb 年代学、矿物学和岩石地球化学等方面的研究,探讨母岩浆性质、岩浆演化过程和成矿作用,以期为区域上镁铁－超镁铁岩的成因研究和镍铜找矿工作提供一些启示与借鉴。

1　地质概况和岩石学特征

1.1　地质概况

内蒙古乌拉特中旗克布地区出露的地层主要为中太古界乌拉山岩群斜长角闪片麻岩、大理岩、磁铁石英岩;中元古界白云鄂博群尖山组炭质板岩、石英砂岩、结晶灰岩和白垩系白女羊盘组、固阳组砂岩、粉砂岩、页岩、流纹岩和集块岩等地层。区内发育 EW 向和 SN 向两组断裂,以 EW 向断裂为主。断裂沿走向呈舒缓波状,长约 20～30km,断裂构造为区内赋矿岩体主要控矿构造。褶皱构造受多次断裂及岩浆活动破坏,大都残缺不全,形态难以恢复。该区岩浆岩较发育,以海西期侵入岩为主,分布面积较大,约为全区面积的 50%。岩性从超镁铁质、镁铁质到长英质岩均有分布,其中与铜镍成矿作用有关的为镁铁质－超镁铁质岩(图 2)。岩体长轴方向与区内主要构造线方向基本一致,主要为 110°(李库等[1], 2007)。

1.2　岩石学特征

克布地区镁铁质－超镁铁质岩出露面积约 45km^2(图 2),区内主要划分为两个岩相带,辉长

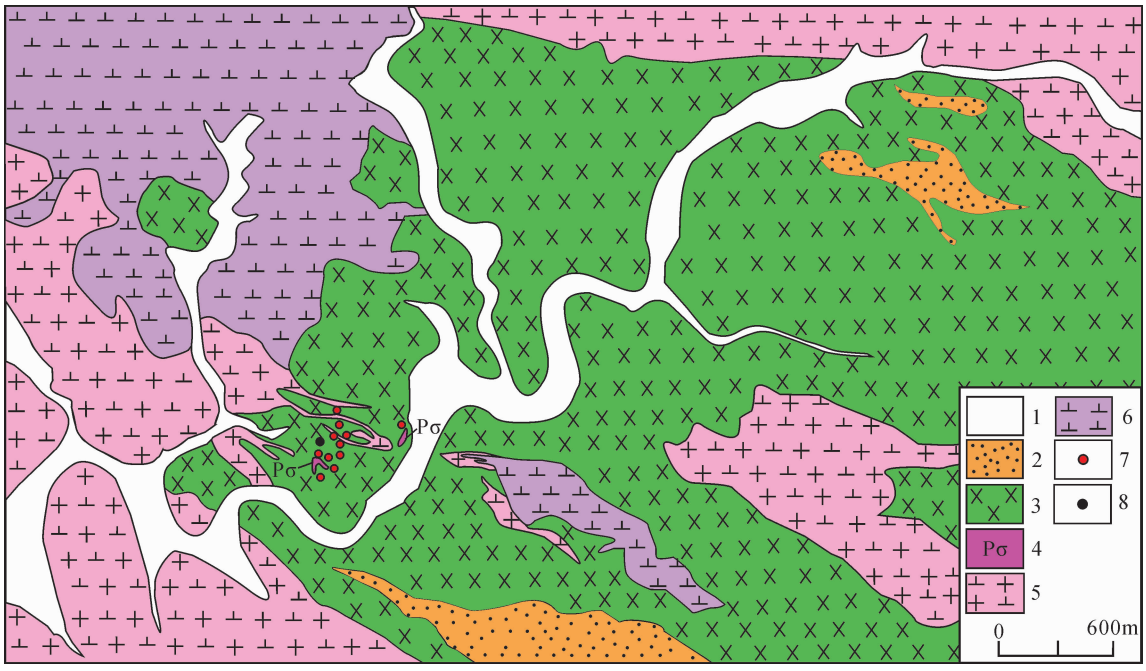


图 2 内蒙古中部乌拉特中旗克布矿区地质图(据苏茂荣等改❷, 2014)

Fig. 2 Geological sketch map of Kebu ore distrrict in Urad Middle Banner, Inner Mongolia (after Su Maorong et al.❷, 2014)

1—第四系冲积物;2—白云鄂博群尖山组板岩夹砂岩;3—辉长岩;4—橄榄岩;5—花岗闪长岩;6—闪长岩;7—见矿钻孔;8—未见矿钻孔

1—Quaternary alluvium; 2—slate and sandstone of Jianshan formation in Baiyunebo group; 3—gabbro; 4—peridotite; 5—granodiorite; 6—diorite; 7—ore drilled hole; 8—no-mine drilled hole

岩相带和橄榄岩相带。辉长岩相为镁铁质—超镁铁质岩体的主要相带,约占整个岩体的 60%~70%;橄榄岩相呈似层状产出,局部形态变化较大,为本区最主要的赋矿岩石。橄榄岩相带产于辉长岩体内,多未出露地表,隐伏在 20m 以下或更深。两个相带相伴产出,呈渐变过渡关系,彼此无明显的界线。

辉长岩相:暗绿色或灰绿色,中粒辉长结构,块状构造。岩石主要由斜长石和辉石组成,个别含橄榄石、黑云母等。斜长石为半自形板柱状,大小约 0.8~3mm,局部被阳起石轻微交代,含量约 60%;辉石呈短柱状,大小约 0.5~2mm,普遍轻微次闪石化,次闪石化作用沿辉石颗粒由外向内逐渐过渡,内部仍保留辉石残骸和光性特征,以普通辉石为主,含量约 35%;黑云母呈片状产出,含量约 5%。该岩相普遍发育磁黄铁矿、黄铁矿,局部还有黄铜矿化,矿化富集地段可形成矿石,但品位偏低。

橄榄岩相:黑色、黑绿色,中—细粒结构、包含嵌晶结构与粒状嵌晶结构,块状构造。主要矿物为橄榄石(50%~80%),辉石(5%~20%),基性斜长石(5%~20%),还含有少量角闪石、黑云母及金属矿物等。橄榄石呈浑圆状、粒状,发育网状裂纹,粒度约 0.2~1.2mm 不等,橄榄石颗粒边缘及裂隙处发育不同程度的蛇纹石化,还可见磁铁矿沿橄榄石裂隙析出,可见斜长石颗粒包裹橄榄石,形成包橄结构;辉石为半自形短柱状或它形粒状,粒度 0.5~1mm,局部包裹斜长石生长;斜长石为半自形—自形板柱状,大小为 0.5~2mm(图 3)。由于斜长石和辉石含量的增减,出现几个岩石亚类,如斜长方辉橄榄岩、斜长橄榄岩、方辉橄榄岩、二辉橄榄岩及橄长岩等。锆石 U-Pb 测年样品采自地表采坑新鲜斜长方辉橄榄岩(样号 D61TW1)(图 3),采样点坐标为 N 108°51′12″,E 41°40′16″(图 1)。

2 分析方法

克布岩体锆石 U-Pb 定年,首先是从斜长方辉橄榄岩样品中挑选锆石单矿物,将挑选好的锆石用环氧树脂固定,待环氧树脂充分固化后,对样品进行抛光至最大面积露出锆石核部,制成环氧树胶样品靶,用于锆石透、反射和阴极发光照相及 U-Pb 年龄测定。锆石单矿物挑选在河北省区域地质调查研究所(廊坊)完成,锆石制靶、透反射显微照相和阴极发

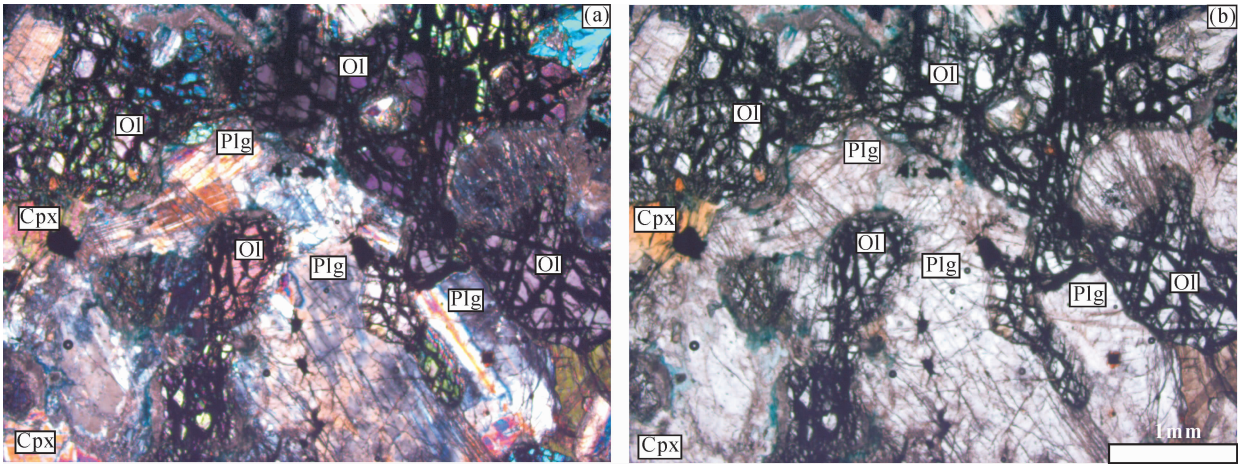


图 3　内蒙古乌拉特中旗克布斜长方辉橄榄岩(D61TW1)显微照片

Fig. 3　Microphotographs of Kebu plagio-harzburgite in Urad Middle Banner, Inner Mongolia

(a)—正交偏光;(b)—单偏光;Cpx—单斜辉石;Plg—斜长石;Ol—橄榄石

(a)—Crossed polarization; (b)—single polarization; Cpx—clinopyroxene; Plg—plagioclase; Ol—olivine

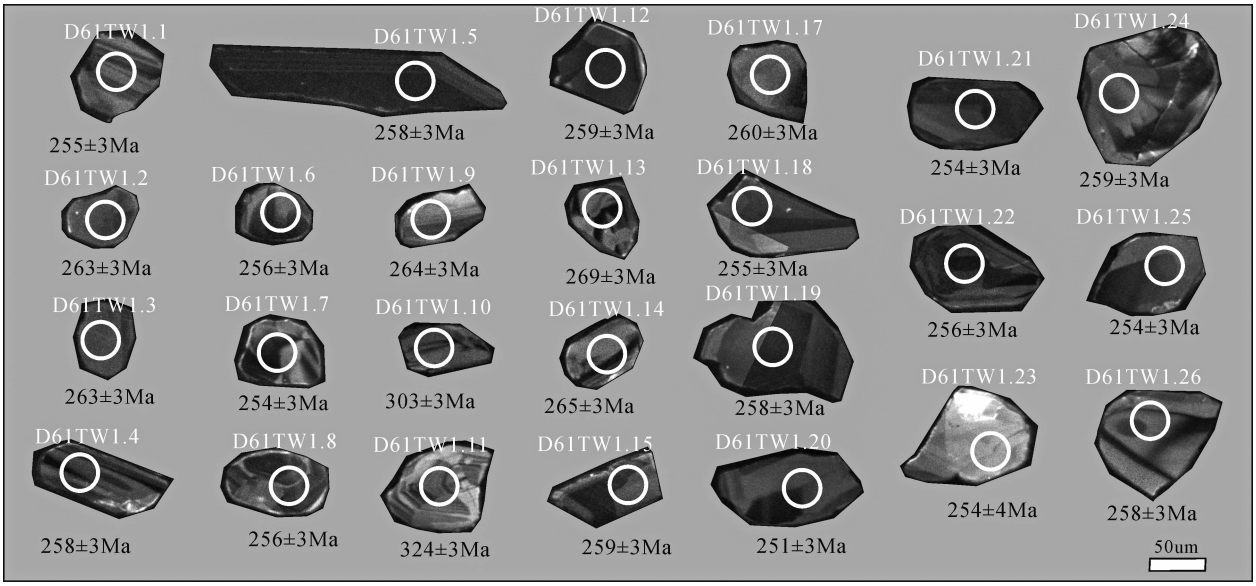


图 4　内蒙古乌拉特中旗克布斜长方辉橄榄岩(D61TW1)样品锆石阴极发光图像及测点年龄

Fig. 4　CL images and U-Pb isotopic ages of zircons for the Kebu plagio-harzburgite (D61TW1) in Urad Middle Banner, Inner Mongolia

光照相均在天津地质矿产研究所实验室完成。锆石形态和阴极发光照片见图 4。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年在天津地质矿产研究所同位素地质年代学测年实验室完成,激光剥蚀孔径 35μm,脉冲 9Hz,以氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,激光预剥蚀时间和剥蚀时间分别为 5s 和 45s。采用 GJ-1(年龄为 602±3Ma,$^{206}Pb/^{238}U$ 比值为 0.0976)作为外部锆石年龄标准进行 U-Pb 同位素分馏校正(Jackson et al., 2004),每 8 个样品测点插入 2 个 GJ-1 标准锆石测试点。数据处理采用中国地质大学刘勇胜研发的 ICP-MS-DataCal 程序(Liu Yongsheng et al., 2010)和 Kenneth R. Ludwig 的 Isoplot 程序进行(Ludwig et al., 2003),普通铅采用^{208}Pb 校正法校正(Anderson et al., 2002),利用 NIST610 玻璃标样作为外标计算锆石样品的 Pb、U、Th 含量。仪器配置和试验流程参见 Li Huaikun et al.(2009)。测试结果见表 1。

矿物主量元素分析在天津地质矿产研究所实验测试室 EPMA-1600 型电子探针上完成,测试加速电压 15kV,束电流 10nA,束斑直径为 5μm。各矿物测试结果列于表 2～4。

表 1 内蒙古乌拉特中旗克布斜长方辉橄榄岩(D61TW1)LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定结果

Table 1 Results of LA-ICP-MS zircon U-Pb isotope analysis for the Kebu plagio-harzburgite in Urad Middle Banner, Inner Mongolia (D61TW1)

样品号	含量($\times10^{-6}$)		Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)					
	Pb	U		$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ
D61TW1.1	6	143	0.15	0.0403	0.0005	0.2841	0.0239	0.0511	0.0043	255	3	254	21	246	194
D61TW1.2	9	180	1.17	0.0416	0.0005	0.2968	0.0178	0.0518	0.0031	263	3	264	16	275	136
D61TW1.3	6	119	1.03	0.0416	0.0005	0.2985	0.0344	0.0521	0.0060	263	3	265	31	289	263
D61TW1.4	27	424	2.55	0.0408	0.0004	0.2953	0.0089	0.0525	0.0015	258	3	263	8	307	66
D61TW1.5	32	498	2.80	0.0408	0.0004	0.2954	0.0079	0.0525	0.0014	258	3	263	7	309	59
D61TW1.6	11	226	1.30	0.0405	0.0004	0.2848	0.0158	0.0511	0.0028	256	3	254	14	243	124
D61TW1.7	19	371	1.67	0.0402	0.0004	0.2849	0.0101	0.0514	0.0018	254	3	255	9	257	80
D61TW1.8	13	299	0.61	0.0405	0.0004	0.2915	0.0107	0.0522	0.0019	256	3	260	10	295	81
D61TW1.9	9	208	0.77	0.0418	0.0005	0.2995	0.0175	0.0519	0.0030	264	3	266	16	282	131
D61TW1.10	8	140	2.05	0.0482	0.0005	0.3471	0.0175	0.0523	0.0026	303	3	303	15	298	112
D61TW1.11	16	283	0.78	0.0515	0.0005	0.3776	0.0128	0.0532	0.0018	324	3	325	11	338	75
D61TW1.12	28	616	0.89	0.0410	0.0004	0.2919	0.0070	0.0516	0.0012	259	3	260	6	267	53
D61TW1.13	49	1162	0.40	0.0426	0.0004	0.3044	0.0053	0.0518	0.0008	269	3	270	5	276	37
D61TW1.14	9	186	1.46	0.0419	0.0005	0.2972	0.0177	0.0514	0.0030	265	3	264	16	260	134
D61TW1.15	15	321	0.95	0.0409	0.0004	0.2969	0.0112	0.0526	0.0019	259	3	264	10	312	84
D61TW1.17	4	117	0.32	0.0412	0.0005	0.2969	0.0210	0.0523	0.0037	260	3	264	19	298	160
D61TW1.18	14	309	0.77	0.0403	0.0004	0.2858	0.0116	0.0515	0.0020	255	3	255	10	262	91
D61TW1.19	15	308	1.12	0.0408	0.0004	0.2904	0.0115	0.0516	0.0020	258	3	259	10	269	89
D61TW1.20	5	133	0.06	0.0397	0.0005	0.2830	0.0243	0.0517	0.0045	251	3	253	22	274	198
D61TW1.21	15	287	1.52	0.0401	0.0004	0.2928	0.0119	0.0529	0.0021	254	3	261	11	326	92
D61TW1.22	19	375	1.23	0.0405	0.0004	0.2910	0.0099	0.0521	0.0017	256	3	259	9	288	76
D61TW1.23	3	73	0.98	0.0402	0.0006	0.2863	0.0519	0.0516	0.0098	254	4	256	46	270	435
D61TW1.24	5	102	1.04	0.0411	0.0005	0.2931	0.0330	0.0518	0.0061	259	3	261	29	275	269
D61TW1.25	7	153	1.16	0.0402	0.0004	0.2913	0.0224	0.0525	0.0041	254	3	260	20	307	179
D61TW1.26	12	242	1.64	0.0409	0.0004	0.2912	0.0136	0.0517	0.0024	258	3	259	12	270	106

全岩主、微量及稀土元素分析测试在天津地质矿产研究所实验测试室完成。主量元素用 PW4400/40X 射线荧光光谱法测试,经 GB/T14506-2010,GHJZ 003-2009 监控,FeO 应用氢氟酸—硫酸溶样、重铬酸钾滴定的容量法,分析偏差优于 2%,微量和稀土元素使用 X Series Ⅱ等离子体质谱仪测试,当元素含量大于 10×10^{-6} 时,测试偏差优于 5%,当元素含量<10×10^{-6} 时,其偏差优于 10%。其测试结果见表 5。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 定年结果

斜长方辉橄榄岩(D61TW1)中锆石多呈短柱状,透明度较高,自形—半自形,长约 60~90μm,

具有较为典型的岩浆锆石的带状震荡环带。锆石中 U 含量为 73×10^{-6}~2164×10^{-6},Th 含量为 8×10^{-6}~1571×10^{-6},Th/U 比值为 0.06~2.80,平均值为 1.12。Th/U 比值常作为区分岩浆、变质和热液成因锆石的标志(Belousova et al., 2002),一般变质和热液成因的锆石的 Th/U<0.1,岩浆成因锆石的 Th/U>0.1(Zhao Zhenhua, 2010),样品中除 1 个锆石 Th/U 比值小于 0.1 外,其他均大于 0.1,且锆石中 Th、U 含量呈现较好的正相关性,以上特征表明锆石应为岩浆成因(Williams, 1987; Hanchar et al., 1993)。25 颗测年锆石中,除两颗锆石年龄较大(分别为 302Ma 和 324Ma),可能为该岩体中较早期结晶的锆石,其余 23 颗锆石测年结果在 U-Pb 谐和图上集中分布在一致曲线上,$^{206}Pb/^{238}U$年龄范围为(251~269)Ma,加权平均年龄为 258.1±1.8Ma(MSWD=2.3)(图 5),该年龄代表克布镁铁质—超镁铁质岩体的结晶时代,属于晚二叠世。

3.2 矿物化学

3.2.1 橄榄石

橄榄石成分在不同岩石样品中变化较大,D61TW1 斜长方辉橄榄岩样品中橄榄石与地幔橄榄岩中橄榄石相比(Zhi Xiachen, 1995),SiO_2 含量(35.53% ~ 41.58%)偏低,MgO(37.40% ~

45.56%)、FeO(17.81%～21.66%)含量偏高,其 Fo 值为 76.08～81.80,为贵橄榄石;SZK1b2 斜长方辉橄榄岩样品中橄榄石则 SiO_2(34.59%～36.08%)和 MgO(28.53%～32.93%)含量偏低,FeO(30.24%～35.94%)含量偏高,其 Fo 值为 58.18～65.70,属于透铁橄榄石。SZK1b2 样品中橄榄石 Fo 值明显低于 D61TW1 样品中橄榄石 Fo 值,可能为岩浆非平衡条件下结晶作用所致(Chai Fengmei, 2006)。

3.2.2　辉石

(1)单斜辉石

单斜辉石呈它形短柱状,晶体大小不一,以它形

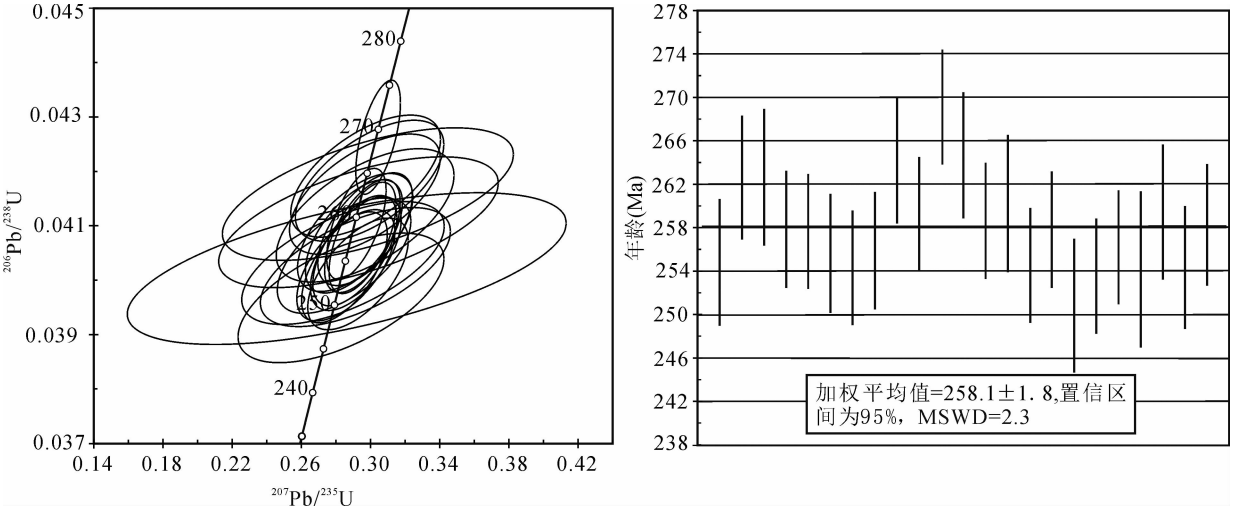


图 5　内蒙古乌拉特中旗克布斜长方辉橄榄岩(D61TW1)锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5　Zircon U-Pb concordia diagram for the Kebu plagio-harzburgite (D61TW1) in Urad Middle Banner, Inner Mongolia

表 2　橄榄石电子探针数据(%)

Table 2　Compositions (%) of Olivine

岩石(样号)	斜长方辉橄榄岩(D61TW1)							斜长方辉橄榄岩(SZK1b2)			
点号	12	3	4	5	6	8	9	1	2	3	4
SiO_2	37.53	37.80	40.92	37.46	38.10	35.53	41.58	35.43	36.08	34.59	35.25
MgO	41.65	41.49	37.40	45.56	41.65	41.42	38.43	32.72	32.93	28.53	31.82
FeO	20.83	21.53	20.66	17.81	20.93	21.66	19.74	31.15	30.24	35.94	31.86
MnO	0.24	0.32	0.30	0.26	0.30	0.23	0.26	0.39	0.40	0.61	0.42
CaO	0.01	0.03	0.02	0.05	0.02	0.03	0.03	0.01	0.03	0.02	0.02
TiO_2	0.08	0.00	0.04	0.03	0.00	0.01	0.02	0.03	0.02	0.00	0.01
NiO	0.01	0.1	0.12	0.08	0.11	0.11	0.12	0.05	0.00	0.04	0.00
CoO	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr_2O_3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01	0.22	0.00	0.04
Na_2O	0.04	0.38	0.00	0.00	0.06	0.04	0.01	0.06	0.07	0.18	0.07
Al_2O_3	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
总量	100.39	101.71	99.51	101.25	101.18	99.05	100.21	99.86	100.03	99.94	99.55
以 4 个氧为基准计算的阳离子数											
Si	0.969	0.970	1.054	0.948	0.9746	0.940	1.057	1.029	1.000	0.909	0.904
Ti	0.002	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
Al	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.005	0.000	0.001
Fe	0.450	0462	0.445	0.3768	0.4486	0.479	0.4199	0.672	0.674	0.897	0.783
Mn	0.005	0.007	0.007	0.006	0.007	0.005	0.006	0.009	0.009	0.015	0.010
Mg	1.603	1.588	1.436	1.7182	1.592	1.6329	1.457	1.259	1.309	1.269	1.394
Ni	0.000	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.000	0.001	0.000
Ca	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001
Total	3.03	3.03	2.95	3.05	3.03	3.06	2.94	2.97	3.00	3.09	3.09
Fo	77.89	77.19	76.08	81.80	77.77	77.12	77.40	64.89	65.70	58.18	63.73

测试单位:天津地质矿产研究所实验测试室,Fo=100×Mg/(Fe+Mg+Mn)。

表 3 辉石电子探针数据(%)

Table 3 Compositions (%) of pyroxene

岩石(样号)	斜长方辉橄榄岩(D61TW1)								斜长方辉橄榄岩(SZK1b2)		
点号	11	20	21	22	23	8	10	19	5	6	7
Na_2O	2.47	2.35	2.38	2.43	2.46	0.04	0.06	0.10	0.06	0.10	0.05
MgO	14.37	13.98	14.76	15.39	15.63	27.52	27.63	29.65	26.32	27.76	27.21
Al_2O_3	10.96	11.66	12.56	10.23	10.48	1.51	1.09	1.35	0.01	0.02	0.00
SiO_2	46.37	44.52	44.54	46.2	46.15	57.85	58	54.11	37.18	37.78	37.86
K2O	1.21	1.09	1.09	1.07	1.11	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.04
CaO	11.35	12.04	11.48	11.81	11.88	1.16	0.83	1.16	0.00	0.06	0.00
TiO_2	4.88	5.31	4.45	4.02	4.31	0.35	0.21	0.3	0.04	0.05	0.00
MnO	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.26	0.37	0.28	0.6	0.56	0.00
FeO^T	7.52	8.14	8.06	7.76	7.5	12.26	12.58	13.3	35.26	35.37	34.69
CoO	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04	0.05	0.00	0.00	0.04	0.12	0.10
NiO	0.00	0.06	0.08	0.02	0	0.03	0.08	0.00	0.12	0.07	0.12
总量	99.25	99.19	99.45	98.99	99.57	101.05	100.87	100.31	99.65	101.91	100.05
以 6 个氧原子和 4 个阳离子为基准											
Na	0.18	0.17	0.17	0.17	0.18	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00
Mg	0.79	0.78	0.81	0.85	0.86	1.43	1.44	1.58	1.64	1.69	1.67
Al(IV)	0.29	0.34	0.35	0.29	0.30	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
Al(VI)	0.19	0.17	0.20	0.16	0.16	0.06	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
Si	1.71	1.66	1.65	1.72	1.70	2.02	2.03	1.93	1.56	1.54	1.56
K	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	0.45	0.48	0.46	0.47	0.47	0.043	0.03	0.04	0.00	0.00	0.00
Ti	0.14	0.15	0.12	0.11	0.12	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.02	0.00
Fe^{3+}	0.10	0.14	0.19	0.18	0.19	0.00	0.00	0.10	1.21	1.25	1.19
Fe^{2+}	0.14	0.11	0.06	0.05	0.04	0.36	0.37	0.29	0.00	0.00	0.00
Co	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ni	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
En	53.79	51.50	53.75	54.64	55.21	77.88	78.08	78.27	57.46	57.45	58.45
Wo	30.54	31.88	30.05	30.14	30.16	2.36	1.69	2.20	0.00	0.09	0.00
Fs	15.88	16.62	16.21	15.22	14.63	20.10	20.71	19.86	42.96	42.83	41.55
种属	普通辉石	普通辉石	普通辉石	普通辉石	普通辉石	斜铁辉石	斜铁辉石	斜铁辉石	斜铁辉石	斜铁辉石	斜铁辉石

测试单位:天津地质矿产研究所实验测试室,其中 $En=100\times Mg/(Fe^{2+}+Fe^{3+}+Mg+Ca+Mn)$;$Wo=100\times Ca/(Fe^{2+}+Fe^{3+}+Mg+Ca+Mn)$;$Fs=100\times(Fe^{2+}+Fe^{3+}+Mn)/(Fe^{2+}+Fe^{3+}+Mg+Ca+Mn)$。

填隙状或嵌晶状充填于橄榄石颗粒之间。其 En 值为 51.50～55.21,Fs 值为 14.63～16.62,Wo 值为 30.05～31.88,属于普通辉石。单斜辉石中各元素含量变化不大,Al_2O_3 含量(10.23%～12.56%)较高。Kushiro (1960)和 Thompson (1974)研究表明,单斜辉石中 Al 的含量与其结晶压力大小关系密切,玄武质岩浆在高压条件下结晶,Al 易进入单斜辉石中,形成富铝辉石;在低压条件下结晶时,Al 易于代替 Si 进入斜长石,形成贫铝辉石。本区岩体中单斜辉石 Al_2O_3 含量较高,暗示其结晶压力较大,结晶深度较深。

(2)斜方辉石

D61TW1 样品中斜方辉石的 FeO 含量为 12.26%～13.30%,Al_2O_3 含量为 1.09%～1.51%,CaO 含量为 0.83%～1.16%,MgO 含量为 27.52%～29.65%,其 En 值为 77.88～78.27,Fs 值为 19.86～20.71,Wo 值为 1.69～2.36,属于斜铁辉石;SZK1b2 样品中斜方辉石 FeO 含量为 34.69%～35.37%,Al_2O_3 含量为 0.00%～0.02%,CaO 含量为 0.00%～0.06%,MgO 含量为 26.32%～27.76%,其 En 值为 57.45～58.45,Fs 值为 41.55～42.96,Wo 值为 0.00～0.09,也属于斜铁辉石。

3.2.3 斜长石

克布斜长方辉橄榄岩中斜长石 Al_2O_3 含量为 29.49%～31.95%,CaO 含量为 13.62%～14.91%,Na_2O 含量为 2.92%～3.55%,其 An=67.83～73.66,Ab=27.13～31.88,Or=0.24～1.79,属于拉长石和倍长石。斜长石具有相对低的 Al_2O_3、CaO 和高的 Na_2O 特征,明显不同于岛弧或活动大陆边缘堆晶岩中高钙长石成分特征(Burns,

1985; Zhou Xinmin et al., 1994; Zhou Changyong et al., 2005),而与造山后辉长岩中低铝、钙斜长石成分特征类似(Zhang Qi et al., 1995)。总体上,克布斜长方辉橄榄岩中斜长石基性程度较高,其 Or 的含量普遍较低,反映了岩浆碱性程度较低的特点。

表 4　斜长石电子探针数据(%)

Table 4　Compositions (%) of plagioclase

岩石(样号)	斜长方辉橄榄岩(D61TW1)					
点号	1	2	13	15	17	24
Na_2O	3.00	3.55	3.12	2.92	3.38	3.03
MgO	0.02	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00
Al_2O_3	30.94	29.49	30.83	30.66	31.15	31.95
SiO_2	52.4	53.88	50.29	51.61	53.03	51.92
K_2O	0.07	0.05	0.31	0.04	0.14	0.07
CaO	14.50	13.67	14.62	14.91	13.62	14.41
TiO_2	0.04	0.01	0.00	0.06	0.06	0.08
MnO	0.00	0.01	0.04	0.01	0.00	0.02
FeO	0.03	0.00	0.02	0.00	0.07	0.00
CoO	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
NiO	0.01	0.06	0.00	0.01	0.02	0.00
总量	101.01	100.74	99.24	100.24	101.46	101.47
以 8 个氧原子为基准						
Si	0.368	0.312	0.249	0.222	0.202	0.177
Al	0.256	0.202	0.180	0.156	0.140	0.129
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	0.109	0.085	0.078	0.069	0.056	0.025
Na	0.041	0.040	0.030	0.024	0.025	0.020
K	0.004	0.003	0.018	0.002	0.008	0.004
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Co	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
An	72.46	67.83	70.85	73.66	68.43	72.14
Ab	27.13	31.88	27.36	26.10	30.73	27.45
Or	0.42	0.30	1.79	0.24	0.84	0.42
种属	倍长石	拉长石	倍长石	倍长石	拉长石	倍长石

测试单位:天津地质矿产研究所实验测试室,其中 An=100×Ca/(Ca+Na+K); Ab=100×Na/(Ca+Na+K); Or=100×K/(Ca+Na+K)。

3.3　岩石地球化学

3.3.1　主量元素

克布斜长方辉橄榄岩和斜长橄榄岩 SiO_2 含量为 39.74%～40.52%,MgO 含量为 25.65%～30.83%,Al_2O_3 含量为 4.55%～7.64%,CaO 含量为 2.23%～4.12%,K_2O 含量为 0.08%～0.37%,Na_2O 含量为 0.42%～1.00%,TiO_2 含量为 0.34%～0.47%, Fe_2O_3、FeO 含量分别为 1.99%～4.21%和 9.95%～14.00%。岩石 CaO、SiO_2、TiO_2 含量偏低,MgO、FeO^T 含量偏高,总体表现为富镁铁、低钙、贫钛的特征。

表 5　内蒙古乌拉特中旗克布镁铁质－超镁铁质岩主量元素(%)和微量元素含量(×10^{-6})

Table 5　Major (%) and Trace elements (×10^{-6}) compositions for the Kebu mafic-ultramafic rocks in Urad Middle Banner, Inner Mongolia

岩性(样号)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO	S	LOI	总量	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm
斜长方辉橄榄岩(D61b2)	39.74	4.55	4.04	12.1	2.23	30.83	0.37	0.47	0.47	0.16	0.21	0.15	3.24	98.41	10.60	18.70	3.06	12.30	2.49	0.55	2.21	0.38	2.21	0.44	1.33	0.20
斜长橄榄岩(D61b3)	40.31	7.64	2.08	12.5	4.12	27.27	0.33	1.00	0.34	0.13	0.19	0.32	2.54	98.45	6.42	12.60	1.61	6.39	1.14	0.51	1.10	0.16	0.87	0.16	0.46	0.07
斜长方辉橄榄岩(D61TW1)	39.77	7.57	4.21	9.95	3.70	26.40	0.31	0.95	0.47	0.19	0.18	0.031	4.97	98.67	7.98	16.60	2.22	9.20	1.75	0.57	1.63	0.25	1.30	0.25	0.69	0.10
斜长方辉橄榄岩(SZK1b2)	40.52	7.54	1.99	14.00	3.62	25.65	0.08	0.42	0.46	0.17	0.21	0.18	3.58	98.24	7.93	16.70	2.23	9.52	1.79	0.56	1.56	0.24	1.29	0.24	0.68	0.10

岩性(样号)	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE/HREE	La_N/Yb_N	δEu	δCe	m/f	$Mg^{\#}$	Rb	Sr	Ba	Nb	Ta	Zr	Hf	U	Th	Pb	Cu	Cu	Ni	Co	Se
斜长方辉橄榄岩(D61b2)	1.34	0.21	11.30	56.02	5.73	5.35	0.70	0.76	3.54	82	10.1	192	166	3.23	0.18	58.9	1.36	0.18	2.78	4.93	85.7	85.7	771	135	0.17
斜长橄榄岩(D61b3)	0.45	0.07	4.19	32.01	8.59	9.64	1.37	0.9	3.42	80	10.5	315.7	157	2.07	0.12	41.6	0.93	0.15	0.50	3.27	75.6	75.6	603	126	0.19
斜长方辉橄榄岩(D61TW1)	0.62	0.09	6.09	43.25	7.77	8.7	1.02	0.91	3.46	83	9.8	315.9	157	2.67	0.15	43.6	1.08	0.14	0.47	2.47	51.5	51.5	523	120	0.098
斜长方辉橄榄岩(SZK1b2)	0.61	0.10	5.91	43.55	8.04	8.78	1.00	0.92	2.92	77	5.9	157.1	30.2	2.74	0.15	45.8	1.19	0.15	0.54	1.00	36.2	36.2	452	121	0.12

注:$Mg^{\#}=100\times Mg^{2+}/(Mg^{2+}+Fe^{2+})$;m/f=(Mg+Ni)/(Fe+Mn)。

在 SiO_2-Na_2O+K_2O 图上(图 6),岩石样品主要投在亚碱性系列区;在 SiO_2-FeO^T/MgO 图上,样品主要投在拉斑玄武岩系列区。岩石 m/f 比值为 2.92～3.54,属于铁质镁铁质－超镁铁质岩(Wu Liren, 1963)。

3.3.2 微量元素

岩石稀土总量(ΣREE)为 32.01×10^{-6}～56.02×10^{-6},La_N/Yb_N 值为 5.35～9.64,LREE/HREE 值为 5.73～8.59。其球粒陨石标准化配分曲线基本一致,为轻、重稀土分馏明显,轻稀土相对富集、重稀土亏损的右倾型(图 7)。δEu 值为 1.00～1.59,表现为 Eu 正异常,但其中 D61b2 岩石样品表现为 Eu 负异常,并具有 Ce 负异常,可能由蚀变作用引起。微量元素蛛网图显示,岩石主要表现为富集大离子亲石元素(LILE)Rb、Ba、Sr、K,亏损高场强元素(HFSE)Nb、Ta、Zr、Hf、Ti。Ti 的负异常可能与源区残留有金红石有关,Sr 的正异常反映了斜长石堆晶作用。Nb、Ta 的亏损可能暗示着有大陆地壳物质的混染或源区存在俯冲的洋壳物质。

4 讨论

4.1 形成时代

本文采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年法,获得克布斜长方辉橄榄岩年龄为 258±2Ma(MSWD=2.3),代表了克布赋矿镁铁质－超镁铁质岩体的结晶年龄,属于晚二叠世。该年龄与克布岩体以东小南山辉长岩(LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 272.7±2.9Ma)、黄花滩辉长闪长岩(LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 262.4±1.1Ma)(Dang Zhicai, 2015, 2016)、克布以西温更辉长岩(SHRIMP 锆石 U-Pb

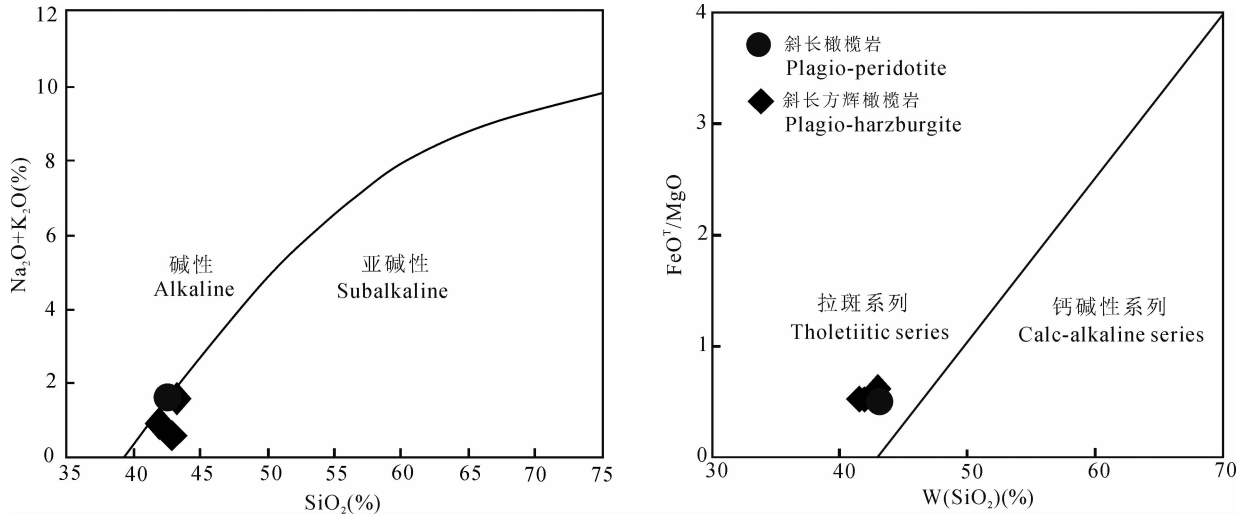


图 6 岩石化学系列分类图解

Fig. 6 The petrochemical series classification diagram

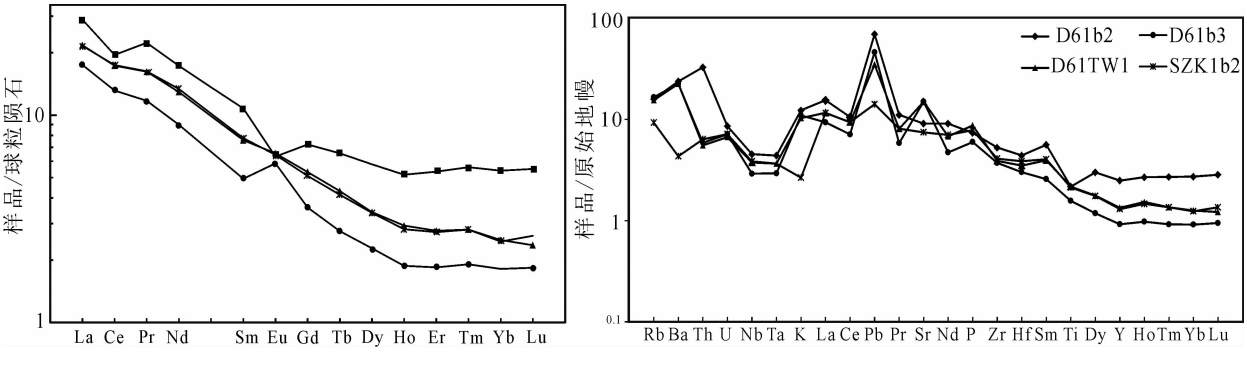


图 7 稀土元素球粒陨石标准化(标准值据 Taylor et al., 1985)和微量元素原始地幔标准化(标准值据 Sun et al., 1989)配分图解

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (chondrite after Taylor et al., 1985) and primitive mantle-normalized trace elements spider diagram (primitive mantle after Sun et al., 1989) of Kebu intrusions

年龄 269±8Ma)(Zhao Lei et al., 2011)及白云鄂博地区辉长岩(SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 259Ma)(Zhang Zongqing et al., 2004)等岩体年龄在误差范围内一致。此外,四子王旗地区大庙花岗闪长岩(265Ma)、西后壕子沟花岗岩(266Ma)和乌拉特中旗北七哥陶、塔拉布基、阿格如和保尔汗图庙花岗岩(260～258Ma)等中酸性岩体也与该镁铁质－超镁铁质岩形成时代基本一致(Liu Changfeng, 2011; Zhang Yongmei et al., 2009; Meng Qingpeng et al., 2013; Luo Hongling et al., 2010),应为同一构造岩浆事件的产物。因此,内蒙古中部地区晚古生代镁铁质－超镁铁质岩浆活动时代主要为中晚二叠世(272Ma～258Ma),该期岩浆活动与成矿作用密切相关。

4.2　母岩浆成分

橄榄石成分与母岩浆的 MgO/FeO^T 比值、Ni 的含量及岩浆的结晶分异作用密切相关,实验表明 Mg、Fe 元素在橄榄石－熔浆之间的分配系数 $K_D = X(FeO/MgO)^{Ol}/X(FeO/MgO)^{melt} = (0.3\pm0.03)$,$K_D$ 受温度、压力及岩浆成分影响很小,可视为常数(Roeder et al.,1970; Li Chusi et al., 2004),应用橄榄石－熔体平衡原理可以估算母岩浆的成分。以岩体中橄榄石 MgO 含量最高的 Fo=81.80,推算与其共存熔体的 MgO/FeO^T 值为 0.83(按质量百分比计算,FeO^T 为全铁,$K_D^{Ol\text{-}Melt} = 0.33$)。由于大部分样品的 MgO/FeO^T 值大于 0.83,表明各岩石的成分均不能代表共存的熔体成分,进入高位岩浆房的母岩浆中应有过剩橄榄石的加入,克布岩体应是岩浆结晶分异过程中富镁矿物(橄榄石)结晶后堆晶作用的结果。$Mg^{\#}$ 值是鉴别原生岩浆的重要标志之一,以 $Mg^{\#} = 0.63\sim0.73$ 代表原生岩浆和近于原生岩浆的 $Mg^{\#}$ 范围(Green, 1975),克布斜长方辉辉橄岩和斜长橄榄岩的 $Mg^{\#}$ 介于 77～83 之间,指示其含有早期结晶矿物相。

根据质量平衡原理,选取 Fo=81.80 的橄榄石估算克布岩体母岩浆的成分,图 8 中 CD 曲线斜率为 Fo 最高值对应的原始岩浆的 MgO/FeO 比值。A 点为最高 Fo 值的橄榄石成分投点,B 点为克布超镁铁质单元的平均成分。橄榄石与原始岩浆被设为两个端元,超镁铁质单元为两者的混合物。AB,CD 两条曲线的交点即为母岩浆的 MgO 和 FeO 的成分,由此获得母岩浆成分 MgO=10.1%和 FeO=12.1%,应为高镁玄武质岩浆。克布镁铁质－超镁铁质岩应为 60%的熔体和 40%的过剩橄榄石混合

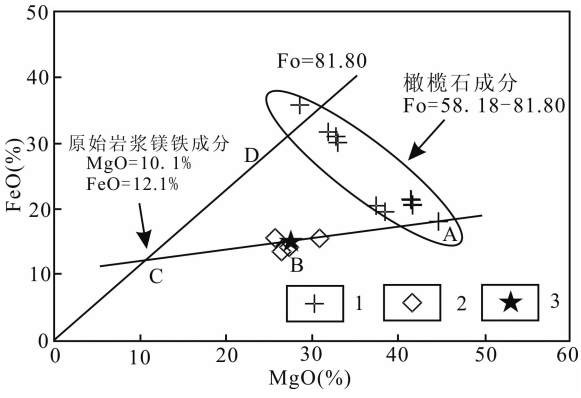


图 8　MgO-FeO 母岩浆图解

Fig. 8　Primitive magma plot by MgO-FeO

1—橄榄石;2—斜长方辉橄榄岩、斜长橄榄岩;3—超镁铁质单元平均成分

1—Olivine; 2—Plagio-harzburgite, Plagio-peridotite; 3—Average components of ultramafic rocks

作用的结果(图 8)。另外,SiO_2-FeO^T/MgO 关系图解(图 6)表明,岩浆具有拉斑质玄武岩浆的演化趋势。因此,克布岩体母岩浆应为高镁的拉斑玄武质岩浆。

4.3　同化混染

通常认为富 Si 的高镁玄武质浆岩应为地幔派生并受到了地壳物质的混染作用形成的,克布镁铁质－超镁铁质岩结晶生成了较多的斜方辉石,显示岩浆富 Si 的特征(Zhang Zhaochong et al., 2009; Arndt et al., 1986; Barley, 1986; Cattell, 1987; Skulski et al., 1988, 1996; Barnes, 1989),暗示克布岩体母岩浆可能发生了一定程度的地壳物质混染作用,这与克布岩体具有 Nb、Ta 亏损特征一致。总分配系数相同或相近元素比值(Ce/Pb, Th/Yb, Nb/Ta, Ta/Yb, K_2O/P_2O_5, Ti/Yb, Zr/Nb)间的协变关系,也可以检验同化混染作用是否存在及混染程度(Barker et al., 1997; Campbell et al., 1993; Mecdonald et al., 2001; Xia Mingzhe et al., 2010)。克布岩石样品显示,Ta/Yb-Th/Yb 相关性相对较好,而 Ce/Pb-Th/Zr、La/Yb-Ta/Ta 和 Ta/Yb-Zr/Yb 相关性较弱,也表明岩浆在演化过程中应发生了一定程度的同化混染作用(图 9)。

克布镁铁质－超镁铁质岩样品 Th/Ta 比值较高(Th/Ta = 3.60～15.44),明显高于原始地幔(Th/Ta=2.2)(Condie, 1982),显示 Th 相对富集;Ce/Pb 比值为 3.8～16.7,平均值为 7.8,介于典型地幔(Ce/Pb 为 25±5)和地壳(Ce/Pb＜15)(Hoffman, 1988)之间,说明岩体在就位过程中受

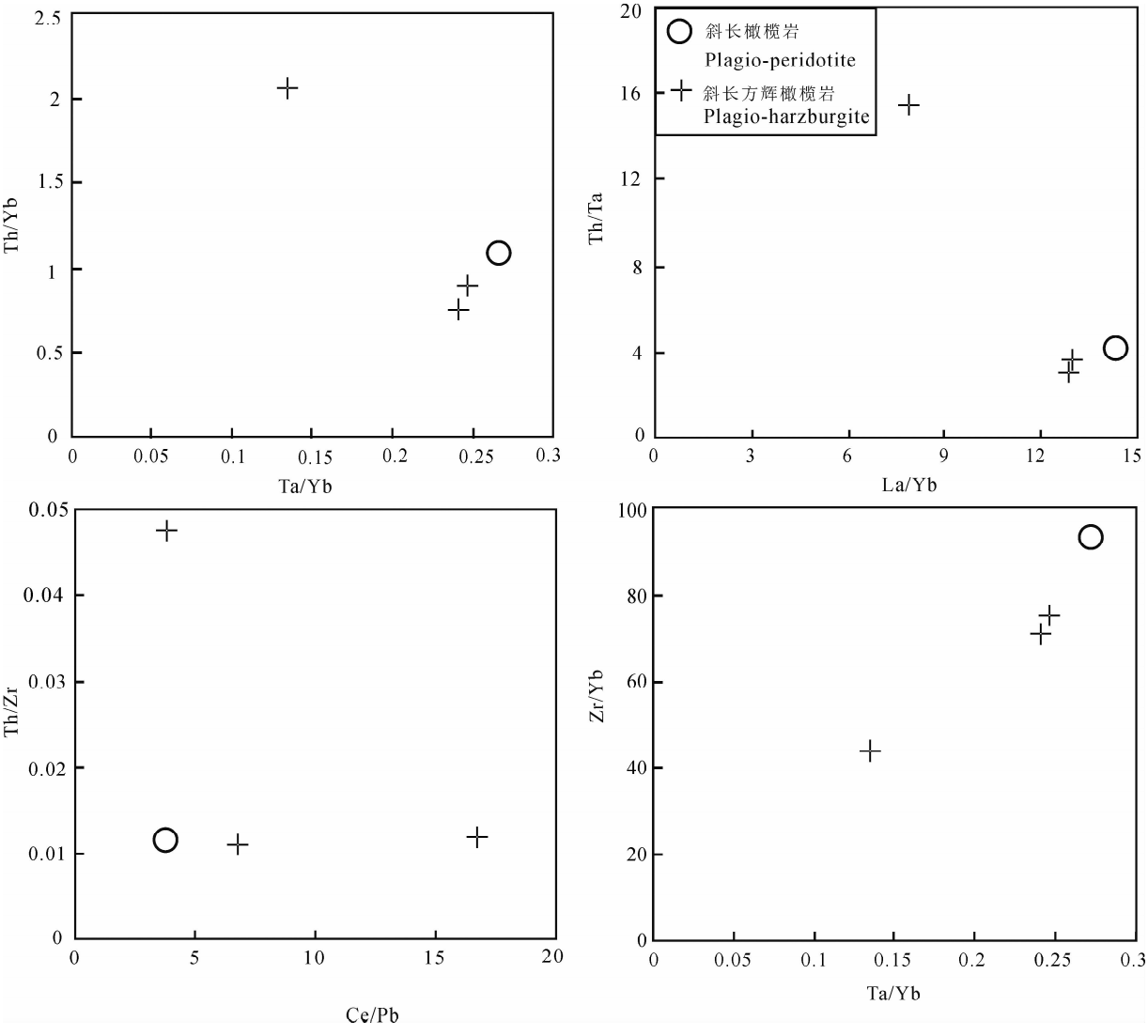


图 9 同化混染判别图解

Fig. 9 Discrimination plots for contamination from selected trace elements

到了一定程度的地壳物质混染作用。Neal et al. (2002)和 Zhang Zhaochong et al. (2003)进一步用 $(La/Nb)_{PM}$-$(Th/Ta)_{PM}$(下标表示原始地幔标准化)图解区分上、下地壳物质的混染作用(图 10),显示岩石样品大部分受到了中下地壳物质的混染作用。此外,岩石样品中 Th/Nb 比值介于 0.18～0.86 之间,平均为 0.37,与上、中、下地壳和原始地幔 Th/Ta 值(0.89、0.76、0.24、0.14)相比,与中、下地壳成分值接近,也说明岩浆受到中－下地壳物质的混染作用(Yang Xueming et al., 2000; Xia Mingzhe et al., 2010)。

4.4 分离结晶

分离结晶作用是镁铁质－超镁铁质岩浆演化过程中重要的控制因素(Morse, 1980)。克布岩石样品 Harker 图解显示(图 11),MgO 与 SiO_2 呈负相关关系,与 Ni、Co 呈正相关关系,说明有一定量的橄榄石分离或堆晶作用,与前述证明的岩浆在深部经历过橄榄石的分离结晶并发生堆晶作用一致;大部分样品显示 MgO 与 CaO、Al_2O_3 含量呈负相关关系,说明存在单斜辉石或斜长石的分离过程,与岩石样品具有 Eu 和 Sr 异常特征一致。在(Fe＋Mg)/Ti-Si/Ti 判别图解中(Stanley et al., 1989),岩浆的分离结晶作用主要受斜方辉石的控制。由此认为,克布镁铁质－超镁铁质岩浆结晶演化可能经历了橄榄石、斜方辉石、单斜辉石及斜长石的分离结晶作用。

4.5 构造背景及可能深部动力学过程

克布岩体形成于晚二叠世时期(258Ma),与区域上大量后碰撞期辉长岩和花岗岩体形成时代一致,如乌拉特中旗红旗店辉长岩(273Ma)(Luo

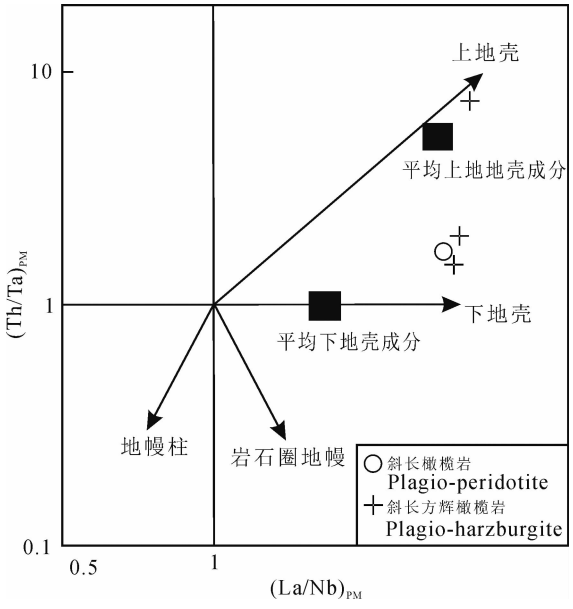


图 10　$(Th/Ta)_{PM}$-$(La/Nb)_{PM}$图解
(据 Zhang Zhangchong et al., 2003)

Fig. 10　Diagram of $(Th/Ta)_{PM}$ versus $(La/Nb)_{PM}$
(after Zhang Zhangchong et al., 2003)

Hongling et al., 2009)、温更斜长岩(285±2Ma)(Wang Qian, 2010)和辉长岩(269±8Ma)(Zhao Lei et al., 2011)、克布闪长岩(291.0±4.0Ma)(Luo Hongling et al., 2007)、四子王旗乌尔塔高勒庙花岗岩(271～256Ma)(Liu Changfeng et al., 2011)及乌梁斯太花岗岩(277±3Ma)(Luo Hongling et al., 2009)等岩体;Luo Hongling et al.(2010)还获得了乌拉特中旗北七哥陶、塔拉布基、阿格如和保尔汗图庙等后碰撞期花岗闪长岩和闪长岩体黑云母$^{40}Ar/^{39}Ar$年龄分别为 260±3 Ma、258±1 Ma、260±3 Ma 和 258±2Ma。此外,索伦－贺根山及其东延一带和苏左旗－东乌旗地区也发育有大量二叠纪后碰撞期花岗岩(290～260 Ma)(Wu Fuyuan et al., 2002; Hong Dawei et al., 1994)。

尽管前人曾获得索伦－贺根山一带蛇绿岩年龄为 299～290Ma(Jian Ping et al., 2008, 2010; Miao Laicheng et al., 2008),而 Xu Bei et al.(2014)研究认为索伦山蛇绿岩属于 Ligurian 型陆缘蛇绿岩,其构造就位与推覆过程有关而与洋壳俯冲无关,应代表二叠世时期的伸展环境;索伦－贺根山地区南北两侧发育的双峰式火山岩及 A 型花岗岩也均不支持早二叠世存在洋壳俯冲作用(Li Ke et al., 2015; Luo Hongling et al., 2009, 2010; Zhang Zuoheng et al., 2008; Kovalenko et al., 2006, 2007; Yarmolyuk et al., 2008; Shi Guanghai et al., 2004);另外,挤压环境也不能很好地解释内蒙古中部地区如此大规模的酸性岩浆侵入活动和宏观上呈"雁列式"展布的镁铁质－超镁铁质岩,大陆主碰撞期不利于岩浆上升(Xiao Qinghui et al., 2002)。因此,二叠世时期,内蒙古中部地区构造环境不应为汇聚构造活动期(俯冲或碰撞),而应为后碰撞伸展环境。克布镁铁质－超镁铁质岩体中斜长石成分也显示与后造山环境的辉长岩中斜长石特征一致(Zhang Qi et al., 1995),而明显不同于岛弧或活动大陆边缘型堆晶岩中斜长石(Burns, 1985; Zhou Xinming et al., 1994; Zhou Changyong et al., 2005)。综上分析认为,克布岩体应为后碰撞伸展阶段的产物。

Chai Fengmei (2006) 根据 Heraberg et al. (2002) 提出的母岩浆 MgO 含量与岩浆液相温度和压力的关系实验,获得新疆黄山东、白石泉等镁铁质－超镁铁质岩等母岩浆液相线温度和压力。本文采用同样的方法,获得克布母岩浆的液相线温度为 1320℃,压力约 1.8GPa(图 12)。据此推断,克布岩体原生岩浆温度至少应为 1320℃,该温度与软流圈地幔的温度接近,说明克布岩体母岩浆不可能由岩石圈地幔直接熔融形成的,而应该是软流圈地幔高度部分熔融的结果。由图 7 可知,岩浆是富集轻稀土元素和大离子亲石元素(LILE)的,而对于亏损的软流圈地幔,只有部分熔融程度＜1%时,才能产生富集型的稀土元素配分模式,但此情况是不能分凝出熔体来的(Mckenzie et al., 1988)。因此,克布镁铁质－超镁铁质岩浆不可能是亏损的软流圈地幔直接熔融形成的。一个合理的解释是亏损的软流圈地幔混染了与俯冲消减有关的地幔楔物质(Wilson, 1989; Elliott et al, 1997, Zhang Zhaochong et al., 2003; Xia Mingzhe et al., 2010)。克布岩石样品 TiO_2 含量(0.34%～0.47%)较低,普遍富集轻稀土元素和大离子亲石元素(LILE),亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti 和 Zr、Hf),也指示岩浆具有部分岛弧岩浆性质的信号(Zhang Zhaochong et al., 2003)。先期俯冲阶段产生的俯冲板片、流体及交代改造的地幔楔在岩石圈根部,通过地幔对流或重力拆沉作用进入地幔源区并在热的作用下释放出一部分水,使软流圈地幔富含水及流体,降低了液相线温度而使其发生部分熔融形成岩浆,并保留了部分岛弧岩浆的特征(Zhang Zhaochong et al., 2003; Xia Mingzhe et al., 2010)。因此,克布岩体的母岩浆

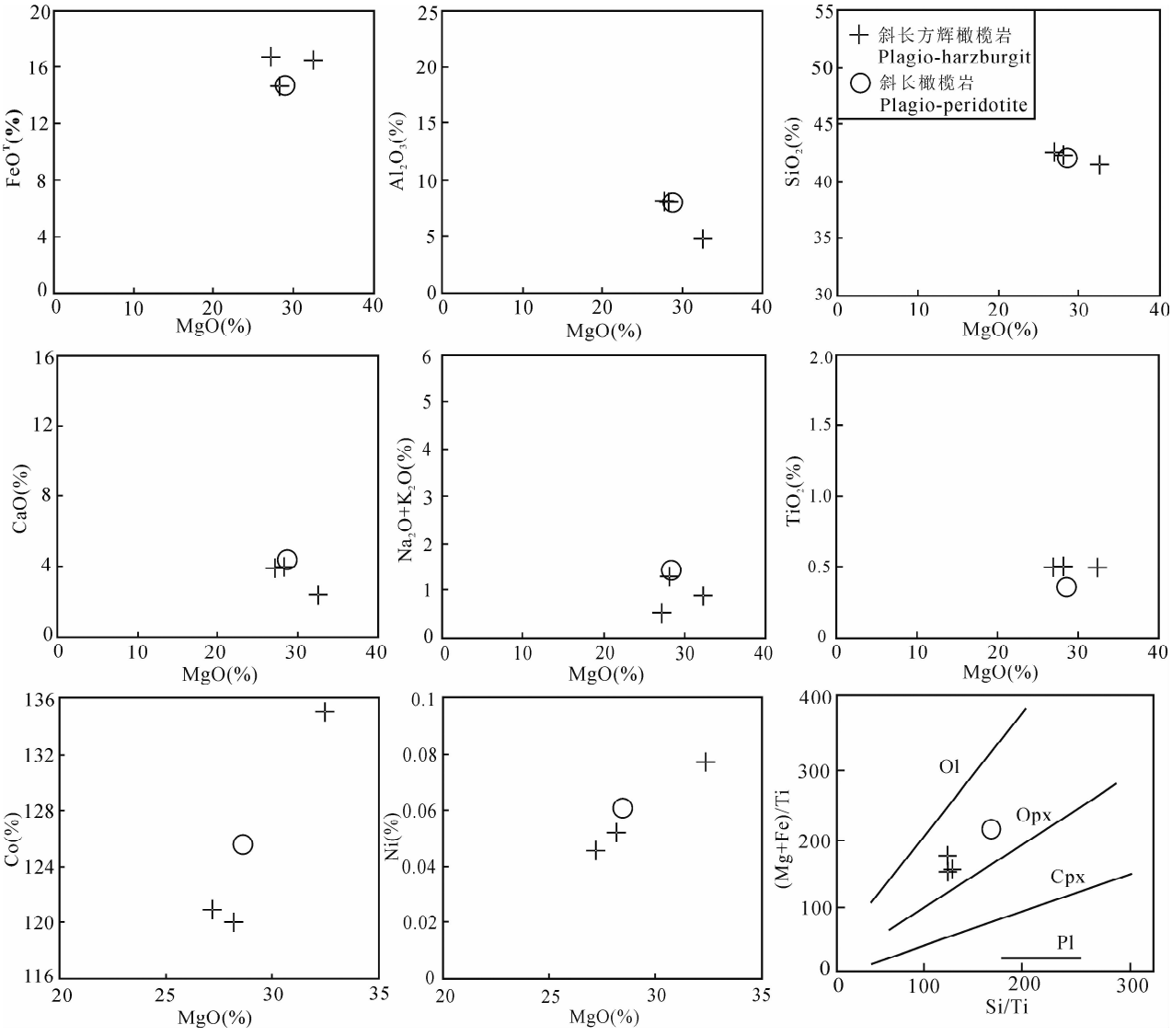


图 11 克布岩体分离结晶作用判别图解

Fig. 11 Discrimination diagrams for fractional crystallization processes

可能为来自于含有早期俯冲地壳物质的软流圈地幔。

4.6 成矿作用

岩浆型铜镍硫化物矿床成矿过程就是岩浆中硫达到饱和,发生金属硫化物熔离富集的过程(Naldrett, 1989; 2005),其主要受控于硫溶解度及地壳混染等外来物质的加入等因素。一般情况下,硫在岩浆中的溶解度是温度、压力和 Fe^{2+}、SiO_2 等组分的函数,这些参数的改变可能会导致硫达到饱和。岩浆中硫溶解度与 Fe^{2+} 含量成正比,与 SiO_2 含量成反比。因此,促使幔源岩浆中硫达到饱和的可能机制(Naldrett et al., 1999; Naldrett, 1999, 2005; Su Shangguo et al., 2004; Wang Kun et al., 2017)主要有:①岩浆温度的快速降低;②岩浆分离结晶作用;③外来硫的加入;④富硅围岩的混染;⑤岩浆混合作用等。

研究表明,橄榄石中 CaO 的含量与其结晶速度密切相关,橄榄石冷却速度越快,压力越低,CaO 含量越高;反之,则含量越低(Simkin et al., 1970; Ni Zhiyao, 1991)。克布岩体中橄榄石的 CaO 含量(均小于 0.1%)偏低,显示其结晶冷却速度较慢,压力较高。克布岩体岩相分异较好,结晶粒度较大,不同岩相为渐变过渡关系,具有完整的岩浆分异特征,也显示岩体并非快速冷却结晶作用形成,据此推断岩浆快速冷却对成矿作用的贡献不大。岩相学及岩石地球化学表明,克布镁铁质—超镁铁质岩的母岩浆经历了橄榄石和辉石等镁铁质矿物的分离结晶作用,橄榄石和辉石的分离结晶会急剧降低岩浆中

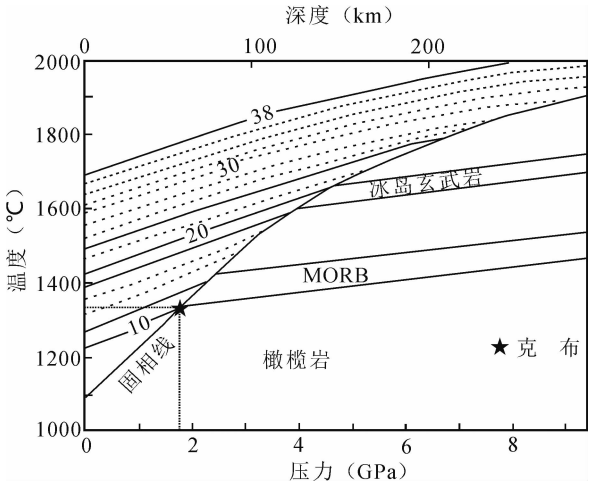


图 12　原始岩浆的温度－压力图解
（据 Heraberg et al.，2002）

Fig. 12　A thermal model of adiabatic T-P path for primary magmas(After Heraberg et al., 2002)

Fe^{2+}的含量,使岩浆中硫溶解度显著降低,可能是导致铜镍硫化物熔离作用的一个重要因素。另一方面,地壳物质的加入是引起岩浆中硫达到饱和的重要原因(Ripley et al., 2002; Naldrett, 1989, 1999; Li Wenyuan, 2007; Zhang Zhaowei et al., 2015, 2017; Wang Yalei et al., 2016; Feng Yanqing et al., 2017)。如前所述,克布岩体母岩浆在演化过程中明显受到地壳物质和/或俯冲消减有关的地幔楔物质的混染作用,克布矿区未发现含硫的围岩地层,应排除地壳硫的加入对成矿作用的影响,而岩体中发育大量斜方辉石,指示可能有富硅组分的加入。如克布矿区 SiO_2 含量较高的磁铁石英岩和石英砂岩等围岩的混染,可能为铜镍硫化物熔离成矿作用的一个重要因素。此外,克布铜镍硫化物矿床的形成也不能排除多期岩浆混合等因素的影响。原始富 FeO 的热岩浆与分异的贫 FeO 的冷岩浆混合可以改变硫的饱和曲线,使硫进入饱和区而达到硫化物熔离(Irvine, 1975; Campbell et al., 1983),如 Stillwater 杂岩体 J-M 矿层及金川铜镍硫化物矿床均可能是由两种岩浆混合作用形成的(Lambert et al.,1998; Li Wenyuan et al., 1996)。

综上认为,橄榄石和辉石等富镁铁矿物的分离结晶和富硅围岩物质的混染可能对克布硫化物熔离富集成矿起到了关键性作用。

5　结论

(1)本文获得了克布斜长方辉橄榄岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 258.1±1.8Ma(MSWD=2.3),属于晚二叠世。该年龄代表了克布赋矿镁铁质－超镁铁质岩体的成岩成矿时代。

(2)克布岩体母岩浆成分为 MgO=10.1%,FeO=12.1%,应为高镁的拉斑玄武质岩浆,岩浆在演化过程中受到了一定程度的中－下地壳物质的混染作用。

(3)克布镁铁质－超镁铁质岩体形成于后碰撞伸展阶段,其母岩浆可能来自于含有早期俯冲地壳物质的软流圈地幔,使岩浆具有富含大离子亲石元素和轻稀土元素,贫高场强元素等部分岛弧岩浆的特征。

(4)橄榄石和辉石等富镁铁矿物的分离结晶和富硅地壳物质的混染可能对克布铜镍矿床硫化物熔离富集成矿起到了关键性作用。

致谢:在实验过程中得到了天津地质矿产研究所同位素地质研究室周红英、郭虎老师及显微实验室许雅雯老师给予的热情帮助和指导,两位审稿专家和编辑部老师为本文提供了宝贵的修改意见与建议,在此致以诚挚的谢意!

注　释

❶ 李库,白启星,郭海生,况新生,郭轶,王秀维,高韩鑫. 2007. 内蒙古自治区乌拉特中旗克布矿区镍矿详查报告. 内蒙古自治区第五地质矿产勘查开发院,1～34.

❷ 苏茂荣,樊永刚,赵军,宋乐平,张永旺,贾大为,刘国瑞,杨宝宏,张海龙,梁立新. 2014. 内蒙古自治区乌拉特中旗克布地区铜镍矿调查评价报告. 内蒙古地质调查院,52～55.

References

Amdt N T, Jenner G A. 1986. Crustally contaminated komatiites and basalts from Kambalda, Western Australia. Chemical Geology, 56: 229～255.

Anderson T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb. Chemical Geology, 192(1～2): 59～79.

Baker J A, Menzies M A, Thirlwall M F, Macpherson C G. 1997. Petrogenesis of Quaternary intraplate volcanism, Sana' a Yenmen: Implication and polybaric melt hybridization. Journal of Petrology, 38: 1359～2390.

Barley M E. 1986. Incompatible element enrichment in Archean basalts: A consequence of contamination by older sialic crust rather than mantle heterogeneity. Geology, 14: 947～950.

Barnes S J. 1989. Are Bushveld U-type parent magmas boninites or contaminated komatiites. Contributions to Mineralogy and Petrology, 101: 447～457.

Belousova E A, Griffin W L, O Reilly S Y, Fisher N. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. Contributions to Mineralogy Petrology, 143

(5): 602～622.

Burns L E. 1985. The border ranges ultramafic and mafic complex, south-central Alaska: cumulate fractionates of island-arc volcanics. Can J Earth Sci, 22: 1020～1038.

Campbell I H, Griffiths R W. 1993. The evolution of mantle's chemical structure. Lithos, 30: 389～399.

Campbell I H, Barnes S J. 1983. A model for the origin of the platinum-rich sulphide horizons in the Bushveld and Stillwater Complexes. Petrol, 24: 133～165.

Cattell A. 1987. Enriched komatiitic basalts from Newton Township, Ontario: Their genesis by crustal contamination of depleted komatiite magma. Geological Magazine, 124: 303～309.

Chai Fengmei. 2006. Comparision on petrologic geochemistry of three mafic-ultramafic intrusions associated with Ni-Cu sulfide deposits in Northern Xinjiang. China University of Geosciences, Beijing, 1～152 (in Chinese with English abstract)

Condie X C. 1982. Plate tectonic and crustal evolution. New York: Pergamon Press.

Dang Zhicai. 2015. Petrology, geochemistry, ages and ore-bearing property evaluation of the mafic-ultramafic intrusions, the middle segment of Inner Mongolia. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 1～113 (in Chinese with English abstract).

Dang Zhicai, Li Junjian, Zhao Zelin, Fu Chao, Tang Wenlong. 2016. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the gabbro from Xiaonanshan, Siziwang Banner, Inner Mongolia, and its geological significance. Geological Bulletin of China, 35(4): 583～592 (in Chinese with English abstract).

Elliott T, Plant T, Zindler A, White W, Bourdon B. 1997. Elements transport from slab to volcanic front the Mariana arc, Journal of Geophysical Research, 102: 14991～15019.

Feng Yanqing, Qian Zhuangzhi, Duan Jun, Sun Tao, Xu Gang, Jiang Chao, Ren Meng, Chen Hongjun. 2017. Genesis and ore-forming potential of mafic-ultramafic intrusions in the western part of East Tianshan Cu-Ni metallogenic belt, Xinjiang. Acta Geologica Sinica, 91(4):792～811 (in Chinese with English abstract).

Green D H. 1975. Genesis of archean peridotic magmas and constraints on archean geothermal gradients and tectonics. Geology, 3: 15～18.

Han Baofu, Ji Jianqing, Song Biao, Chen Lihui, Li Zonghuai. 2004. SHRIMP U-Pb zircon age of the mafic-ultramafic rocks and geological significance in Karatungk and Huangshan, Xinjiang. Chinese Science Bulletin, 49(2): 2324～2328 (in Chinese with English abstract).

Hanchar J M, Miller C F. 1993. Zircon zonation patterns as revealed by cathodoluminescence and backscattered electron images: implications for interpretation of complex crustal histories. Chemical geology, 110(1/3): 1～13.

Heraberg C, O'Hara M J. 2002. Plume-associated ultramafic magmas of Phanerozoic age. Journal of Petrology, 43: 1857～1883.

Hofmann W. 1988. Chemical differentiation of the earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust. Earth and Planetary Science Letters, 90: 297～314.

Hong Dawei, Huang Huaizeng, Xiao Yijun, Xu Haiming, Jin Haiyuan. 1994. The Permian alkaline granites in central Inner Mongolia and their geodynamic significance. Acta Geological Sinica, 68(3): 219～230 (in Chinese with English abstract).

Irvine T N. 1975. Cry stallisation sequence of the Muskox Intrusion and other layered intrusions: Ⅱ Origin of the chromotite layers and similar deposits of other magmatic ores. Geochim. Cosmochim. Acta, 39: 991～1020.

Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, Belousova E A. 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology. Chemical Geology, 211(1～2): 47～69.

Jian Ping, Liu Dunyi, Alfred K, Brian F W, Shi Yurun, Zhang Wei, Zhang Fuqin, Miao Laicheng, Tomurhuu D. 2010. Evolution of a Permian intraoceanic arc-trench system in the Solonker suture zone, central Asian orogenic belt, China and Mongolia. Lithos, 118: 169～190.

Jian Ping, Liu Dunyi, Alfred K, Brian F, Windley, Shi Yuruo, Zhang Fuqin, Shi Guanghai, Miao Laicheng, Zhang Wei, Zhang Qi, Zhang Liqiao, Ren Jishun. 2008. Time scale of an early to mid-Paleozoic orogenic cycle of the long-lived Central Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia of China: Implication for continental growth. Lithos, 101: 233～259.

Kovalenko V I, Yarmoluyk V V, Sal'nikova E B, Kozlovsky A M, Kotov A B. 2006. Geology, geochronology and geodynamics of the Khan Bogd alkali granite pluton in southern Mongolia. Geotectonics, 40(6): 450～466.

Kovalenko V I, Yarmolyuk V V, Kozlovsky A M, Kovach, V P, Sal'nikova E B, Kotov A B, Vladykin N V. 2007. Two types of magma sources of rare-metal alkali granites. Geology of Ore Deposits, 49(6): 442～466.

Kushiro I. 1960. Si-Al relation in clinopyroxenes from igneous rocks. Amercian Journal of Seience, 258: 518～551.

Lambertt D D, Walker RJ, Morgan J W. 1998. Re-Os and Sm-Nd isotope geochemistry of the Stillwater complex, Montana: Implications for the petrogenesis of the J-M Reef. Petrol, 35: 1717～1753.

Li Chusi, Xu Zhanghua, De Wall S A, Ripley E M, Maier W D. 2004. Compositional variations of olivine from the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, western China: implications for ore genesis. Mineralium deposita, 39: 159～172.

Li Huaikun, Geng Jianzhen, Hao Shuang, Zhang Yongqing, Li Huimin. 2009. The Studying of U-Pb dating of zircons by LA-ICP-MS. Acta Mineralogical Sinica, 600～601 (in Chinese with English abstract).

Li Ke, Zhang Zhicheng, Feng Zhishuo, Li Jianfeng, Tang Wenhao, Luo Zhiwen, Chen Yan. 2015. Two-Phase magmatic events

during Late Paleozoic in the North of the Central Inner Mongolia Hinggan orogenic belt and its significance. Acta Geologica Sinica, 89(2): 272～288 (in Chinese with English abstract).

Li Wenyuan. 1996. Re-Os isotopic system and its application to study of magmatic Cu-Ni-PGE deposit. Advance in Earth Sciences, 11 (6): 580 ～ 584 (in Chinese with English abstract).

Li Wenyuan. 2007. The current status and prospect on magmatic Ni-Cu-PGE deposits. Northwestern Geology, 40(2): 1～23 (in Chinese with English abstract).

Liang Youbin, Liu Tongyou, Song Guoren, Jin Shuimiao. 1998. Platinum-group elements deposits in China. Beijing Metallurgical Industry Press, 17～21 (in Chinese with English abstract).

Liu Changfeng, Zhou Zhiguang, Zhang Huafeng, Liu Wencan, Zhang Lei. 2011. Petrochemical characteristics and timing of Wuertagaolemiao granitoids, Siziwangqi, Inner Mongolia. Mineral Petrol, 31(4): 34～43 (in Chinese with English abstract).

Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, Gao Changgui, Zong Keqin, Wang Dongbin. 2010. 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.

Ludwig K R. 2003. User's manual for Isoplot/Ex, version 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4: 1～70.

Luo Hongling, Wu Tairan, Li Yi. 2007. Geochemistry and SHRIMP dating of the Kebu massif from Wulatezhongqi, Inner Mongolia evidence for the Early Permian underplating beneath the North China Craton. Acta Petrologica Sinica, 23(4): 756～763 (in Chinese with English abstract).

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

Luo Hongling, Wu Tairan, Zhao Lei. 2010. Geochemistry and tectonic implications of the Permian I-type granitoids from Urad Zhongqi, Inner Monglia. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 46(5): 805～820 (in Chinese with English abstract).

Mao Jingwen, Franco P, Zhang Zuoheng, Chai Fengmei, Wu Hua, Chen ShipingP, Cheng Linsong, Yang Jianmin, Zhang Cangqing. 2008. A review of the Cu-Ni sulphide deposits in the Chinese Tianshan and Altay orogens (Xinjiang Autonomous Region, NW China): Principal characteristics and ore-forming processes. Journal of Asian Earth Sciences, 32: 184～203.

Mckenzie D, Bickle M J. 1988. The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere. Petrol., 29: 53～72.

Mecdonald R, Rongers N W, Fitton J G, Black S. Smith M. 2001. Plume-lithosphere interaction in the generation of the basalts of the Kenya Rift, East Africa. Journal of Petrology, 42: 877～900.

Meng Qingpeng, He Yuankai, Zhang Wen, Wu Tairan, Zheng Rongguo, Xu Cao, Zhang ZhaoYi. 2013. Time constraints on the closure of the Paleo-Asian Ocean on the northern margin of North China Craton: Evidence from Xihouhaozi syn-collisional granites in Siziwang Qi area. Geological Bulletin of China, 32 (11): 1749 ～ 1759 (in Chinese with English abstract).

Miao Laicheng, Fan Weiming, Liu Dunyi, Zhang Fuqin, Shi Yuruo, Guo Feng. 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.

Morse S A. 1980. Basult and phase diagram. New York: Springer-Verlag.

Naldrett A J, Lightfoot P C. 1999. Ni-Cu-PGE deposits of the Noril'sk region, Siberia: Their formation in conduits for flood basalt volcanism. Geological Association Canada Short Courese, 13:195～250.

Naldrett A J. 1989. Magmatic sulphide deposits. New York: Oxford Univ. Press, 1～186.

Naldrett A J. 1999. World-class Ni-Cu-PGE deposits: Key factors in their genesis. Mineraliu Deposita, 34: 227～240.

Naldrett A J. 2005. A history of our understanding of magmatic Ni-Cu sulfide deposits. Can. Mineral. 43: 2069～2098.

Neal C R, Mahoney J J, Chazey W J. 2002. Mantle sources and the highly variable role of continental lithosphere in basalt petrogenesis of the Kerguelen Plateau and Broken Ridge LIP: result from ODP Leg 183. Petrol., 43: 1177～1205.

Ni Zhiyao. 1991. Chemical composition and petrologicsignificance of olivines in Huangshandong mafic-ultramafic complex in Hami, Xinjiang. Mineralogy and Petrology, 1(3): 40～47.

Pan Guitang, Xiao Qinghui, Lu Songnian, Deng Jinfu, Feng Yimin, Zhang Kexin, Zhang Zhiyong, Wang Fangguo, Xing Guangfu, Hao Guojie, Feng Yanfang. 2009. Subdivision of tectonic units in China. Geology in China, 36(1): 1～28 (in Chinese with English abstract).

Peng Runmin, Zhai Yusheng, Li Chusi, Ripley E M. 2013. The Erbutu Ni-Cu deposit in the central Asian orogenic belt: A Permian magmatic sulfide deposit related to boninitic magmatism in an arc setting. Economic Geology, 108: 1879～1888.

Ripley E M, Li Chusi. 2002. Paragneiss assimilation in the genesis of magmatic Ni-Cu-Co sulfide mineralization at Voisey's Bay, Labrador: $D^{34}S$, $D^{13}C$, and Se/S evidence. Econ. Geol., 97(6): 1307～1318.

Roeder P L, Emslie R F. 1970. Olivine-liquid equilibrium.

Contributions to Mineralogy and Petrology, 29: 275～289.

Shi Guanghai, Miao Laicheng, Zhang Fuqing, Jian Ping, Fan Weiming, Liu Dunyi. 2004. Emplacement age and tectonic implications of the Xilinhot A-type granite in Inner Mongolia, China. Chinese Science Bulletin, 49(7): 723～729.

Simkin T, Smith J V. 1970. Minor element distribution in olivine. Journal of Geology, 78: 304～325.

Skulski T, Percival J A. 1996. Allochthonous 2.78 Ga oceanic plateau slivers in a 2.72 Ga continental arc sequence: Vizien greenstone belt, northeastern Superior province, Canada. Lithos, 37: 163～179.

Skulski T, Hynes A, Francis D. 1988. Basic lavas of the Archean La Grande greenstone belt: Products of polybaric fractionation and crustal contamination. Contributions to Mineralogy and Petrology, 100: 236～245.

Stanley C R, Russell J K. 1989. Petrologic hypothesis testing with trace element ration diagrams derivation of diagram axes. Contributions to Mineralogy and Petrology, 101:78～89.

Su Shangguo, Deng Jinfu, Tang Zhongli, Luo Zhaohua, Yu Xiaoyan, Li Fangning. 2014. Advances in mineralization associated with mafic-ultramafic igneous rocks. Geoscience, 18(4): 457～458 (in Chinese with English abstract).

Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implication for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). Magmatism in Oceanic Basins. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond., 42: 313～345.

Taylor S R, Mclennan S M. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Oxford: Blackwell, 1～31.

Thompson R N. 1974. Some high-pressure pyroxenes. Mineralogical Magazine, 39: 768～787.

Wang Ji, Li Shuangqing, Wang Baoliang. 1992. Langshan-Baiyunobo rift system. Beijing: Peking University Publish in House, 1992: 1～132 (in Chinese with English abstract).

Wang Kun, Dong Huan, Cao Yonghua, Wu Xiaoji. 2017. Research status and existing problems of silicate liquid immiscibility in intermediate-Basic magma. Geological Review, 63(3): 739～757 (in Chinese with English abstract).

Wang Qian. 2010. Petrogenesis and magma source of Wengeng A mafic-ultramafic Intrusion, Inner Mongolia, China. China University of Geosciences, Beijing, 5～30 (in Chinese with English abstract).

Wang Yalei, Zhang Zhaowei, Chen Shoubo, Zhang Jiangwei, Likan, You Minxin. 2017. Petrogenesis and metallogenic potential analysis of mafic intrusion in the Hongshigangbei Ni-Cu-Sulfide mineralization in East Tianshan, Xinjiang. Acta Geologica Sinica, 91(4): 776～791 (in Chinese with English abstract).

Wang Yalei, Zhang Zhaowei, Zhang Jiangwei, You Minxin, Li Kan, Wang bolin. 2016. Mineralogy and Sr-Nd isotope characteristics of Baixintan Ni-Cu deposit in Eastern Tianshan Mountains, Xinjiang, and mineralization process. Acta Geologica Sinica, 90(10): 2747～2758 (in Chinese with English abstract).

Williams I S. 1987. Isotopic evidence for the Precambrian provenance and Caledonian metamorphism of high grade paraneisses from the SeveNappes, Scandinavian Caledonides. Contributions to Mineralogy and Petrology, 97(2): 205～217.

Wilson M. 1989. Igneous Petrogenesis. London: Unwin Hyman, 1～466.

Wu Fuyuan, Sun Deyou, Li Huimin, Jahn B M, Wilde S. 2002. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis. Chemical Geology, 187: 143～173.

Wu Liren. 1963. The specialty for deposits in mafic-ultramafic in China. Chinese Journal of Geology, 4(1):29～41 (in Chinese with English abstract).

Xia Mingzhe, Jiang Changyi, Qian Zhuangzhi, Xia Zhaode, Wang Bangyao, Sun Tao. 2010. Geochemistry and petrogenesis of Huangshandong intrusion, East Tianshan, Xinjiang. Acta Petrologica Sinica, 26(8): 2413～2430 (in Chinese with English abstract).

Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Ma Dashuan, Hong Dawei, Mo Xuanxue, Lu Xinxiang, Li Zhichang, Wang Xiongwu, Ma Changqian, Wu Fuyuan, Luo Zhaohua, Wang Tao. 2002. The ways of investigation on granitoids. Beijing: Geological Publishing House,1～100 (in Chinese with English abstract).

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

Xue Shengchao, Qin Kezhang, Li Chusi, Tang Dongmei, Mao Yajing, Qi Liang, Ripley W M. 2016. Geochronological, Petrological and geochemical constraints on Ni-Cu sulfide mineralization in the Poyi ultramafic-troctolitic intrusion in the Northeast rim of the Tarim craton, Western China. Economic Geology, 111:1465～1484.

Yang Xueming, Yang Xiaoyong, Chen Shuangxi. 2000. Petrogeochemistry. Press of University of Science and Technology of China, Hefei, 1～275 (in Chinese with English abstract).

Yarmolyuk V V, Kovalenko V I, Sal'nikova E B, Sal'nikova E B, Kovach V P, Kozlovsky A M, Kotov A B, Lebedev V I. 2008. Geochronology of igneous rocks and formation of the Late Paleozoic south Mongolian active margin of the Siberian continent. Stratigraphy and Geological Correlation, 16(2): 162～181.

Zhang Qi, Ma Wenpu, Jin Weijun, Li Xiuyun. 1995. Geochemistry and tectonicsignificance of post-tectonic gabbro from Wangmuguan of Xinxian county, Henan province. Geochimica, 24(4): 341～350 (in Chinese with English abstract).

Zhang Yongmei, Zhang Huafeng, Liu Wencan, Zhou Zhiguang.

2009. Timing and petrogenesis of the Damiao grandiorite, Siziwangqi, Inner Mongolia. Acta Petrologica Sinica, 25(12): 3165～3181 (in Chinese with English abstract).

Zhang Zhaochong, Mao Jingwen, Chai Fengmei, Yan Shenghao, Chen Bailin. 2009. Geochemistry of the Permian Kalatongke mafic intrusions, Northern Xinjiang, Northwest China: implications for the genesis of magmatic Ni-Cu sulfide deposits. Economic Geologists, 104: 185～203.

Zhang Zhaochong, Yan Shenghao, Chen Bolin, He Lixin, He Yongsheng, Zhou Gang. 2003. Geochemistry of the Kalatongke basic complex in Xinjiang and its constrain on genesis of the deposit. Acta Petrologica et Minerlogica, 22 (3): 217～223 (in Chinese with English abstract).

Zhang Zhaowei, Li Wenyuan, Wang Yalei, Qian Bing, Li Kan, Zhang Jiangwei, Gao Yongbao, Guo Zhouping, You Minxin. 2015. Geological and geolchemical characteristics of mafic-ultramafic intrusions in the Hualong area, southern Qilian mountains and its Ni-Cu mineralization. Acta Geologica Sinica, 89(3): 632～644 (in Chinese with English abstract).

Zhang Zhaowei, Wang Yalei, Qian Bing, Li Wenyuan. 2017. Zircon SHRIMP U-Pb age of the Binggounan magmatic Ni-Cu deposit in east Kunlun Mountains and its tectonic implications. Acta Geologica Sinica, 91(4):724～735 (in Chinese with English abstract).

Zhang Zongqing, Du Andao, Tang Suohan, Lu Jiren, Wang Jinhui, Yang Gang. 2004. Age of the Jinchuan copper-nickel deposit and isotopic geochemical feature of its source. Acta Geologica Sinica, 78(3): 359～365 (in Chinese with English abstract).

Zhang Zuoheng, Mao Jingwen, Du Andao, Pirajno F, Wang Zhiliang, Chai Fengmei, Zhang Zhaochong, Yang Jianmin. 2008. Re-Os dating of two Cu-Ni sulfide deposits in northern Xinjiang, NW China and its geological significance. Journal of Asian Earth Sciences, 32: 204～217.

Zhao Lei, Wu Tairan, Luo Hongling, He Yuankai. 2008. Petrology, geochemistry and tectonic implications of the Wengeng gabbros in Wulatezhongqi area, Inner Mongolia. Acta Scientiarum Natuazlium Universitatis Pekinesis, 44(2): 201～211 (in Chinese with English abstract).

Zhao Lei, Wu Tairan, Luo Hongling. 2011. SHRIMP U-Pb dating, geochemistry and tectonic implications of the Beiqigetao gabbros in Urad Zhongqi area, Inner Mongolia. Acta Petrologica Sinica, 27(10): 3072～3081 (in Chinese with English abstract).

Zhao Yun, Xue Chunji, Zhao XiaobaoB, Yang Yongqiang, Ke Junjun. 2015. Magmatic Cu-Ni sulfide mineralization of the Huangshannan mafic-untramafic intrusion, Eastern Tianshan, China. Journal of Asian Earth Sciences, 105:155～172.

Zhao Zhenhua. 2010. Trace element geochemistry of accessory minerals and its applications in petrogenesis and metallogenesis. Earth Science Frontiers, 17(1): 267～286 (in Chinese with English abstract).

Zhi Xiachen, Li Binxian, Chen Daogong. 1995. Trace element geochemistry of mantle-originated diopside from Panshishan, Jiangsu province. 30(4): 384～391 (in Chinese with English abstract).

Zhou Changyong, Ge Wenchun, Wu Fuyuan, Rahman A A. 2005. Petrological characteristics and tectonic implication of Tahe gabbro in the northern part of the Great Xing'an rang. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 35(2):144～149 (in Chinese with English abstract).

Zhou Xinmin, Xu Xisheng, Dong Chuanwan, Li Huimin. 1994. Mineral evidence on the active continental margin in southeastern China fromPlagioclase feldspar. Chinese Science Bulletin, 39(11): 1011～1014 (in Chinese with English abstract).

参　考　文　献

柴凤梅. 2006. 新疆北部三个与岩浆型 Ni-Cu 硫化物矿床有关的镁铁－超镁铁质岩的地球化学特征对比研究. 北京:中国地质大学博士学位论文,1～152.

党智财. 2015. 内蒙古中部地区镁铁质－超镁铁质岩岩石学、地球化学、年代学及含矿性评价. 北京:中国地质科学院硕士学位论文,1～113.

党智财,李俊建,赵泽霖,付超,唐文龙. 2016. 内蒙古四子王旗地区小南山辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地质通报,35(4):583～592.

冯延清,钱壮志,段俊,孙涛,徐刚,姜超,任萌,陈宏骏. 2017. 新疆东天山铜镍成矿带西段镁铁－超镁铁质岩体成岩及成矿潜力研究. 地质学报,91(4):792～811.

韩宝福,季建清,宋彪,陈立辉,李宗怀. 2004. 新疆喀拉通克和黄山东含铜镍矿镁铁－超镁铁杂岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 科学通报,49(22):2324～2328.

洪大卫,黄怀曾,肖宜君,徐海明,靳海元. 1994. 内蒙中部二叠纪碱性花岗岩及其地球动力学意义. 地质学报,68(3):219～230.

李怀坤,耿建珍,郝爽,张永清,李惠民. 2009. 用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)测定锆石 U-Pb 同位素年龄的研究. 矿物学报,600～601.

李可,张志诚,冯志硕,李建锋,汤文豪,罗志文,陈彦. 2015. 兴蒙造山带中段北部晚古生代两期岩浆活动及其构造意义. 地质学报,89(2):272～288.

李文渊. 1996. Re-Os 同位素体系及其在岩浆 Cu-Ni-PGE 矿床研究中的应用. 地球科学进展,11(6):580～584.

李文渊. 2007. 岩浆 Cu-Ni-PGE 矿床研究现状及发展趋势. 西北地质,40(2):1～23.

梁有彬,刘同有,宋国仁,金水森. 1998. 中国铂族元素矿床. 北京,冶金工业出版社,17～21.

柳长峰,周志广,张华锋,刘文灿,张磊. 2011. 内蒙古四子王旗乌尔塔高勒庙岩体的侵位时代及岩石地球化学特征. 矿物岩石,31(4):34～43.

罗红玲,吴泰然,李毅. 2007. 乌拉特中旗克布岩体的地球化学特征及 SHRIMP 定年:早二叠世华北克拉通底侵作用的证据. 岩石学报,23(4):756～763.

罗红玲,吴泰然,赵磊. 2009. 华北板块北缘乌梁斯太 A 型花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 定年及构造意义. 岩石学报,25(3):515

～526.

罗红玲,吴泰然,赵磊. 2010. 乌拉特中旗二叠纪Ⅰ型花岗岩类地球化学特征及构造意义. 北京大学学报(自然科学版),46(5):805～820.

孟庆鹏,贺元凯,张文,吴泰然,郑荣国,徐操,张昭昱. 2013. 华北板块北缘古大洋闭合时间的限定——来自四子王旗西后壕子同碰撞花岗岩的证据. 地质通报,32(11):1749～1759.

倪志耀. 1991. 新疆哈密黄山东镁铁－超镁铁杂岩体中橄榄石的化学成分及其岩石学意义. 矿物岩石,1(3):40～47.

潘桂棠,肖庆辉,陆松年,邓晋福,冯益民,张克信,张智勇,王方国,邢光福,郝国杰,冯艳芳. 2009. 中国大地构造单元划分. 中国地质,36(1):1～28.

苏尚国,邓晋福,汤中立,罗照华,余晓艳,李芳凝. 2004. 镁铁质－超镁铁质岩浆作用与成矿作用的新进展. 现代地质,18(4):457～458.

王楫,李双庆,王保良. 1992. 狼山－白云鄂博裂谷系. 北京:北京大学出版社,1～132.

王坤,董欢,曹永华,武晓雾. 2017. 中基性岩浆的不混溶作用及存在的问题. 地质论评,63(3):739～757.

王倩. 2010. 内蒙古乌拉特中旗温更Ａ区镁铁质－超镁铁质岩体成因及岩浆源区讨论. 北京:中国地质大学,5～30.

王亚磊,张照伟,陈寿波,张江伟,李侃,尤敏鑫. 2017. 新疆东天山红石岗北铜镍矿化镁铁质岩体岩石成因及成矿潜力分析. 地质学报,91(4):776～791.

王亚磊,张照伟,张江伟,尤敏鑫,李侃,王博林. 2016. 新疆白鑫滩铜镍矿床矿物学、Sr-Nd 同位素特征及其成矿过程探讨. 地质学报,90(10):2747～2758.

吴利仁. 1963. 论中国基性岩、超基性岩的成矿专属性. 地质科学,4(1):29～41.

夏明哲,姜常义,钱壮志,夏昭德,汪帮耀,孙涛. 2010. 新疆黄山东岩体岩石地球化学特征与岩石成因. 岩石学报,26(8):2413～2430.

肖庆辉,邓晋福,马大铨,洪大卫,莫宣学,卢欣祥,李志昌,汪雄武,马昌前,吴福元,罗照华,王涛. 2002. 花岗岩研究思维与方法. 北京:地质出版社,1～100.

徐备,赵盼,鲍庆中,周永恒,王炎阳,罗志文. 2014. 兴蒙造山带前中生代构造单元划分初探. 岩石学报,30(7):1841～1857.

杨学明,杨晓勇,陈双喜译. 2000. 岩石地球化学. 合肥:中国科学技术大学出版社,1～275.

张旗,马文璞,金唯俊,李秀云. 1995. 一个造山后的辉长岩——河南新县王母观岩体的地球化学特征. 地球化学,24(4):341～350.

张招崇,闫升好,陈柏林,何立新,何永胜,周刚. 2003. 新疆喀拉通克基性杂岩体的地球化学特征及其对矿床成因的约束. 岩石矿物学杂志,22(3):217～223.

张照伟,李文渊,王亚磊,钱兵,李侃,张江伟,高永宝,郭周平,尤敏鑫. 2015. 南祁连化隆地区镁铁－超镁铁质侵入岩地质、地球化学特征与铜镍成矿. 地质学报,89(3):632～644.

张照伟,王亚磊,钱兵,李文渊. 2017. 东昆仑兵沟南铜镍矿锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及构造意义. 地质学报,91(4):724～735.

张宗清,杜安道,唐索寒,卢纪仁,王进辉,杨刚. 2004. 金川铜镍矿床年龄和源区同位素地球化学特征. 地质学报,78(3):359～365.

章永梅,张华峰,刘文灿,周志广. 2009. 内蒙古中部四子王旗大庙岩体时代及成因. 岩石学报,25(12):3165～3181.

赵磊,吴泰然,罗红玲,贺元凯. 2008. 内蒙古乌拉特中旗温更辉长岩类的岩石学、地球化学特征及其构造意义. 北京大学学报(自然科学版),44(2):201～211.

赵磊,吴泰然,罗红玲. 2011. 内蒙古乌拉特中旗北七哥陶辉长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义. 岩石学报,27(10):3072～3081.

赵振华. 2010. 副矿物微量元素地球化学特征在成岩成矿作用研究中的应用. 地学前缘,17(1):267～286.

支霞臣,李彬贤,陈道公. 1995. 盘石山幔源透辉石微量元素地球化学. 地质科学,30(4):384～391.

周新民,徐夕生,董传万,李惠民. 1994. 中国东南活动大陆边缘的矿物标志:钙长石质斜长石. 科学通报,39(11):1011～1014.

周长勇,葛文春,吴福元,Rahman A A. 2005. 大兴安岭北段塔河辉长岩的岩石学特征及其构造意义. 吉林大学学报(地球科学版),35(2):144～149.

Geochronological, Mineralogical and Lithogeochemical Studies of the Kebu Mafic-ultramafic Intrusion in Urad Middle Banner, Inner Mongolia

DANG Zhicai[1)], LI Junjian[1)], FU Chao[1)], TANG Wenlong[1)], LIU Yue[3)],
ZHAO Zelin[1,2)], WU Xingyuan[1)], SUN Hongwei[1)]

1) *Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Tianjin, 300170, China;*
2) *Graduate Department of Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037, China;*
3) *State Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing, 100083, China*

Abstract

Urad Middle Banner (Wulatezhongqi) in Inner Mongolia is tectonically located in the northwestern margin of North China Craton, belonging to the Langshan-Baiyan Obo epicontinental rifting. Regionally, mafic-ultramafic intrusions are distributed discontinuously along central Inner Mongolia, forming a 400-km-long, 30-km-wide magmatic belt. This belt hosts lots of Cu-Ni (PGE) deposits/ occurrences, with the small-medium sized Kebu Cu-Ni deposit occurring in the Kebu massif. The Kebu massif, cropping out over an area of 45km^2, consists of gabbro and olive facies. The gabbro facies is dominant litholgical facies for massif, whereas the olive facies hosts the main orebodies. The two facies occur together and present a transition relation. In this study, LA-ICP-MS U-Pb dating of zircons yielded an age of 258.1±1.8Ma (MSWD=2.3) for the Kebu plagio-harzburgite, suggesting a Late Permain magmatic event. Geochemical analysis results show that the mafic-ultramafic rocks from the Kebu massif belong to the tholetiitic series. These rocks are relatively enriched in large ion lithophile elements (e.g. Rb, Sr, Ba,) and depleted in high field strength elements (e.g. Nb, Ta, Zr, Hf, Ti), with right-inclined REE distribution pattern and $(La/Yb)_N$ value of 2.47～11.29. According to the Fo and Ni values of olivine which contains the highest Fo, MgO and FeO contents of parent magma were estimated to 10.1% and 12.1% respectively, indicating that the parent magma of the Kebu intrusion is a high-MgO tholetiitic basalt. The comprehensive analysis shows that the Kebu mafic-ultramafic intrusion might form in the post-collisional tectonic setting, with magmatic source consisting of asthenospheric material and mantle wedge material, both of which were contaminated by previously subducted fluids. Crystallization fractionation of Fe- and Mg-rich minerals (such as olivine and pyroxene) and contamination of Si-rich crust material might have played a key role in S-saturation and subsequent sulfide segregation.

Key words: The Kebu mafic-ultramafic intrusion; Zircon U-Pb dating; Geochemistry; Cu-Ni mineralization; Urad Middle Banner