

新疆北部乌恰沟地区镁铁质侵入岩的年代学、地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素组成：对地幔源区特征和深部过程的约束*

陈立辉^{1 2} 韩宝福¹

CHEN LiHui^{1 2} and HAN BaoFu¹

1. 北京大学地球与空间科学学院 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871

2. 南京大学地球科学系 壳幔演化与成矿作用研究国家重点实验室, 南京 210093

1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, MOE, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2. State Key Laboratory of Crust-Mantle Evolution and Mineralization, Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2006-03-13 收稿, 2006-04-25 改回.

Chen LH and Han BF. 2006. Geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic composition of mafic intrusive rocks in Wuqiagou area, north Xinjiang: Constraints for mantle sources and deep processes. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1201 – 1214

Abstract Mafic intrusive rocks in Wuqiagou area, eastern part of Altai Orogenic belt, include diorite porphyrite, olivine gabbro cumulates, and hornblende gabbro cumulates. Zircon SHRIMP dating results an age of 257.4 ± 5.3 Ma for the diorite porphyrite, which is near-synchronous with the late-Permian plume represented by Emeishan basalts. The geochemistry of these rocks is similar to that of arc igneous rocks, including enrichment in LILEs, depletion in Nb and Ta, positive K and Pb anomalies, enrichment in LREE relative to HREE in spider diagram. Meanwhile, the signatures for some elements of these rocks are complementary each other, e. g. the diorite porphyrite has negative Ba, Sr, Eu, P and Ti anomalies in spider diagram, the olivine gabbro has positive Ba, Sr, Eu and P anomalies, and the hornblende gabbro has positive Ti anomaly. After the affect of assimilation and fluid metasomatism from wall rocks are corrected, these rocks show consistent Sr-Nd-Pb isotopic compositions. Therefore, these mafic rocks might have a common source in mantle and resulted as the evolved magma and cumulate in crust, respectively. The arc-like geochemistry of these rocks suggest a subduction-modified sub-continental lithospheric mantle source, but the lower values of $Mg^{\#}$, $\epsilon_{Nd}(t)$, as well as the lower La/Nb ratios, than that of mafic plutons of the early Permian in North Xinjiang, suggest that not only sub-continental lithospheric mantle but also asthenosphere contribute to their petrogenesis. Therefore, geochronology, geochemistry, and isotopic signatures of the mafic rocks in Wuqiagou support that plume-lithosphere interactions exist in North Xinjiang at the late Permian.

Key words Mafic intrusive rocks, Lithospheric mantle, Mantle plume, Geochemistry, Isotopes, Altai orogenic belt, Late Permian

摘 要 阿尔泰造山带东段的乌恰沟地区发育大量镁铁质侵入岩(岩脉或小岩体),包括闪长玢岩和具堆积结构的角闪辉长岩和橄榄辉长岩。锆石 SHRIMP U-Pb 同位素定年结果说明这些镁铁质岩浆的侵位时间为 257.4 ± 5.3 Ma,与峨眉山玄武岩相近(259 ± 3 Ma)。在微量元素原始地幔标准化图上,它们共同的特征是富集大离子亲石元素,亏损 Nb 和 Ta,具 K 和 Pb 的正异常, LREE 相对 HREE 富集,即具弧火山岩的地球化学特征。同时它们之间还存在互补的地球化学特征,如闪长玢岩存在 Ba、Sr、Eu、P 和 Ti 的负异常,橄榄辉长岩具有 Ba、Sr、Eu、P 的正异常,而角闪辉长岩具有 Ti 的正异常。如果扣除围岩混染和后期流体交代的影响,这些岩石的 Sr-Nd-Pb 同位素组成基本一致,因此闪长玢岩和两种辉长岩分别代表同源岩浆因结晶分离作用形成的演化岩浆和堆晶岩。乌恰沟晚二叠世镁铁质侵入岩和新疆北部早二叠世与铜镍矿有关的基性-超基性杂岩体都具有与弧火山岩相似的地球化学特征,反映了被俯冲改造的陆下岩石圈地幔的地球化学特征。但是与后者相比,前者的 $Mg^{\#}$ 值、

* 国家重点基础研究发展规划项目(2001CB409802)资助。

第一作者简介:陈立辉,男,1972年生,副教授,岩石学专业, E-mail: chenlh@nju.edu.cn

$\varepsilon_{Nd}(t)$ 值和 La/Nb 比明显偏低, 暗示存在软流圈地幔来源物质的显著贡献。综合阿尔泰乌恰沟地区镁铁质侵入岩的年代学、地球化学和同位素组成特征, 我们推测该区在晚二叠世存在地幔柱与岩石圈地幔之间的相互作用。

关键词 镁铁质侵入岩; 岩石圈地幔; 地幔柱; 地球化学; 同位素; 阿尔泰造山带; 晚二叠世

中图法分类号 P588.125; P597.3

陆内镁铁质岩浆是陆下地幔部分熔融的产物, 不仅可以反映陆下地幔的化学组成, 而且可以反映软流圈地幔(或地幔柱)与岩石圈地幔之间的相互作用。其中大规模的溢流玄武岩是地幔柱在大陆上的主要表现之一, 一般可以分为高钛系列和低钛系列两大类, 分别代表不同源区(软流圈地幔和岩石圈地幔)部分熔融的产物, 因此大陆溢流玄武岩被认为是地幔柱和大陆岩石圈相互作用的产物(相关评述见 Xiao *et al.*, 2004)。除了这种大规模的溢流玄武岩外, 一些规模小的镁铁质岩石在时间和空间上往往与大陆溢流玄武岩密切相关, 在地球化学上也可以与大陆溢流玄武岩相类比, 因此这些小规模的岩浆作用也被认为与地幔柱有关(比如 Gibson *et al.*, 1996)。因此, 对这些与大陆溢流玄武岩密切相关的小规模镁铁质岩浆岩的研究有助于理解地幔柱的演化规律、陆下岩石圈地幔的化学特征以及地幔柱和陆下岩石圈地幔

之间的相互作用等。本文通过对新疆阿尔泰地区富蕴县境内乌恰沟地区的镁铁质侵入岩的锆石 U-Pb 年代学、元素地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素研究, 探讨与这些镁铁质侵入岩的成因、源区特征以及与地幔柱有关的深部过程。

1 地质背景

阿尔泰山位于西伯利亚板块的西南缘和准噶尔盆地的北缘, 是中亚巨型造山带的重要组成部分。阿尔泰山于早石炭世发生最终的板块碰撞作用, 基本形成了现在的构造格局(Coleman, 1989; 肖序常等, 1992; Sengör *et al.*, 1993; 何国琦等, 1994)。该区广泛分布的晚古生代花岗岩以高 ε_{Nd} 值为特征, 代表该区在显生宙发生了大规模的地壳生长(赵振华等,

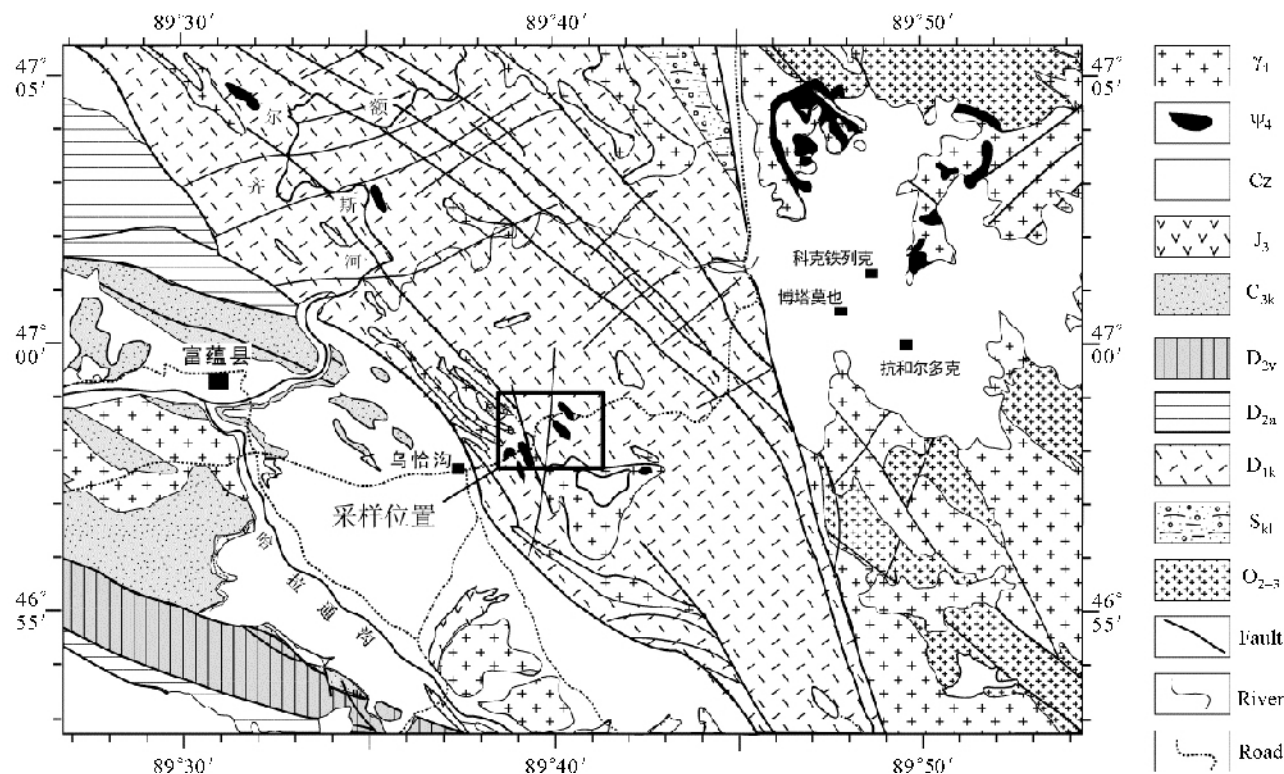


图1 阿尔泰富蕴地区地质简图(参考 1:20 万富蕴幅地质图, 方框内为采样范围)

O_{2-3} -中-晚奥陶世哈巴河群, 包括结晶片岩、片麻岩、混合岩、变粒岩等; S_{k1} -志留纪库鲁姆提群, 包括结晶片岩、变质酸性火山岩和砂砾岩; D_{1k} -早泥盆世康布铁堡组, 下部为片麻岩、片岩、变质流纹岩, 上部主要为混合岩夹片麻岩、片岩; D_{2y} -中泥盆世蕴都喀拉组, 主要是中酸性火山岩、火山碎屑岩和砂岩; D_{2a} -中泥盆世阿勒泰组, 主要是片岩、片麻岩、变粒岩、变质凝灰岩等; C_{3k} -喀喇额尔齐斯组, 主要是硅质岩、片岩、片麻岩、混合岩; J_3 -晚侏罗世石树沟群, 杂色砂岩夹砂砾岩; Cz-新生界; Ψ_4 -华力西期基性-超基性岩; γ_4 -华力西期花岗岩

Fig. 1 Geological sketch map of the Fuyun area, Altay orogenic belt, after 1:200 000 geological map of Fuyun. The frame shows the sampling area

1996;周泰禧等,1996;Han *et al.*,1997;韩宝福等,1999;Chen *et al.*,2000;Jahn *et al.*,2000;Hong *et al.*,2004)。本文研究区乌恰沟属于富蕴县,位于阿尔泰山带南源。乌恰沟地区出露了一系列的镁铁质岩脉或小岩体,呈北西西向排列(图1)。围岩主要是泥盆系的地层,说明这些镁铁质侵入岩的侵位时间晚于泥盆纪(图1)。最近在乌恰沟地区有基性麻粒岩的报导(厉子龙等,2004;Li *et al.*,2004)。因为本文三类样品不仅缺乏麻粒岩的变质变形特征,而且元素地球化学特征与所报导的基性麻粒岩也区别明显,所以推测他们报导的样品与本文的侵入岩样品应属于不同的来源,本文在讨论过程中不涉及他们的样品。方同辉等(2002)曾报导乌恰沟基性岩脉的全岩 Sm-Nd 等时线年龄为 974 ± 63.4 Ma,据此认为这些侵入岩代表了一次元古宙的岩浆事件。但由于小体积的侵入岩往往受到了不同程度的围岩混染的影响,因此这些镁铁质侵入岩很难满足 Sm-Nd 等时线定年的前提,因此该“等时线”很可能是由于围岩混染造成的混合线。

表1 乌恰沟侵入岩样品情况简表

Table 1 Sample description of the Wuqiagou intrusive rocks

样号	采样位置	采样地理坐标	岩性	样品简单描述
WQG02	1号脉边缘	N46°58'47" ,E89°40'38"	闪长玢岩	斑状结构。基质主要由斜长石(55~65%)、角闪石(20~30%)和钾长石(5~10%)组成。斑晶为具环带构造的斜长石,含量少于5%。样品较新鲜,岩脉中心的样品比边缘的样品蚀变程度低。
WQG03	1号脉中心		闪长玢岩	
WQG04	1号脉中心		闪长玢岩	
WQG05	1号脉边缘		闪长玢岩	
WQG11	3号脉	N46°57'56" ,E89°38'48"	闪长玢岩	
WQG06	1号脉附近		花岗片麻岩	原岩为紫苏花岗岩,变形强烈。
WQG07	小岩体	N46°57'57" ,E89°38'37"	橄榄辉长岩	堆积结构。主要含斜长石(>50%)、橄榄石(<20%)、单斜辉石(<20%)、黑云母(<5%)、角闪石(<5%)和不透明矿物(~5%)。由北往南橄榄石含量递增,斜长石含量递减。粗粒矿物之间往往充填细粒的斜方辉石,橄榄石常发育斜方辉石的反应边。除9号样品外,其它样品较新鲜。
WQG08	小岩体	上个样品往南50米	橄榄辉长岩	
WQG09	小岩体	上个样品往南50米	橄榄辉长岩	
WQG10	小岩体	上个样品往南50米	橄榄辉长岩	
WQG12	4号脉	N46°57'51" ,E89°38'05"	角闪辉长岩	堆积结构。主要含斜长石(40%)、闪石(35%)、单斜辉石(10%)、不透明矿物(10%,主要是钛铁矿)和磷灰石(5%)。12号样品比13号样品新鲜。
WQG13	5号脉	N46°57'49" ,E89°37'58"	角闪辉长岩	

乌恰沟侵入岩矿物成分分析在南京大学地球科学系的 JEOL JXA 8800M 型电子探针上完成,代表性矿物化学组成见表2。闪长玢岩中基质斜长石为奥长石(An_{26-27}),斑晶中间为中长石(An_{40}),边缘为奥长石(An_{21})。橄榄辉长岩中的斜长石为拉长石(An_{54-61}),橄榄石为贵橄榄石(Fo_{72-76}),单斜辉石为普通辉石,斜方辉石为古铜辉石,闪石为钠钙质闪石,不透明矿物主要是钛铁矿。角闪辉长岩中的斜长石为中长石或奥长石(An_{29-43}),闪石为钙质闪石,闪石的 $Mg^{\#}$ 值介于闪长玢岩和橄榄辉长岩的闪石之间,辉石为普通辉石,不透明矿物主要是钛铁矿。

2 样品特征

采样地点位于富蕴县城通往可可托海的公路两侧(图1),最北采样点的地理坐标为 N46°58'47" ,E89°40'38" ,最南采样点的地理坐标为 N46°57'49" ,E89°37'58"。包括4个岩脉和一个小岩体。岩石样品的岩相学特征见表1。其中两个岩脉为闪长玢岩,以发育具环带构造的斜长石斑晶为特征(图2a)。另两个岩脉为具粗粒堆积结构的角闪辉长岩,以富粗粒闪石和钛铁矿为特征(图2b)。小岩体为具堆积结构的橄榄辉长岩(图2c)。每个样品再分为三份,一份留为附样,一份用于制备薄片以备显微镜观察和矿物电子探针成分分析,另一份样品先粗碎,经稀盐酸淋滤和烘干处理后再细碎成200目粉末,用于全岩的元素地球化学和同位素分析。

3 锆石 U-Pb 年代学

锆石的 SHRIMP U-Pb 测试在北京离子探针中心完成,分析流程和数据处理与韩宝福等(2004)相同,为同一批测试样品。乌恰沟中性岩脉共测试了17粒锆石,其中有一粒锆石的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄为738Ma,应为捕获锆石。其它16粒锆石的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄在253~304Ma之间(表3),Th/U 比高,在0.36~2.45之间,说明都是岩浆锆石。在 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄的频率直方图上,如果以5Ma为单位,则呈现多峰的特点,其

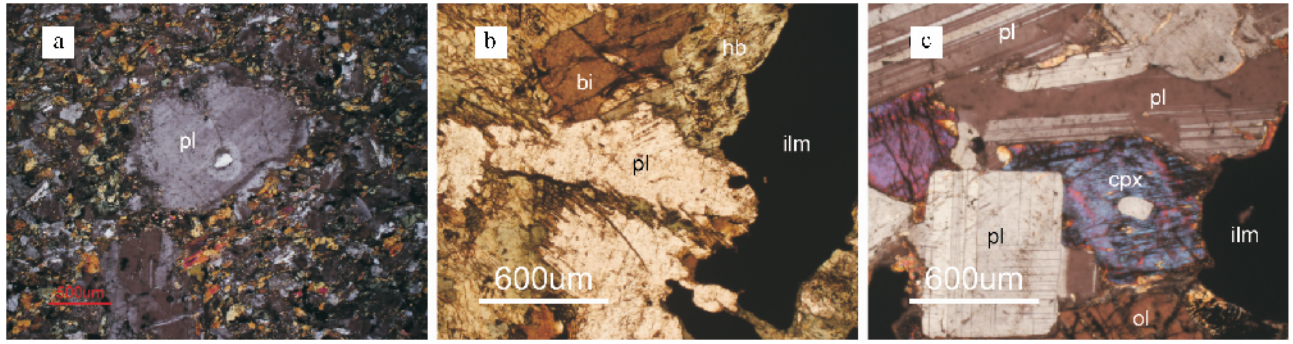


图2 乌恰沟地区镁铁质侵入岩的显微结构

a-闪长玢岩,斑状结构,中间的斜长石斑晶为中长石,反应边为奥长石,周围为细粒斜长石和角闪石组成的基质,正交,样号 WQG03; b-角闪辉长岩,堆积结构,主要由粗粒的斜长石和角闪石组成,并以富含粗粒钛铁矿为特征,单偏光,样号 WQG12; c-橄辉长岩,堆积结构,主要由粗粒的斜长石、单斜辉石和橄榄石组成,不透明矿物主要是钛铁矿,粗粒矿物之间充填细粒斜方辉石,正交镜,样号 WQG07。pl-斜长石, hb-角闪石, bi-黑云母, ilm-钛铁矿, cpx-单斜辉石, ol-橄榄石

Fig. 2 Textures of the Wuqiagou mafic intrusive rocks

a-diorite porphyrite, sample WQG03, crossed-polarized light; b-hornblende gabbro, cumulate texture, sample WQG12, plane-polarized light; c-olivine gabbro, cumulate texture, sample WQG07, crossed-polarized light. pl-plagioclase, hb-hornblende, bi-biotite, ilm-ilmenite, cpx-clinopyroxene, ol-olivine

表2 乌恰沟侵入岩矿物代表性电子探针分析结果

Table 2 Representative mineral chemistry of the Wuqiagou mafic intrusive rocks

Sam.	WQG03 (diorite)				WQG07 (olivine gabbro)					WQG12 (hornblende gabbro)				
	pl-L	pl-s	hb	ol	pl	opx	hb	bi	ilm	hb	pl	ilm	ap	cpx
Na ₂ O	6.28	8.07	0.73	—	4.33	0.01	2.62	1.13	—	0.58	6.28	—	0.04	0.66
K ₂ O	0.04	0.08	0.16	—	0.01	0.01	0.20	7.72	—	0.30	0.05	0.02	0.00	0.02
FeO	0.03	0.04	15.40	22.25	0.14	16.96	9.73	7.20	46.59	12.41	0.03	48.21	0.17	8.65
MgO	—	—	12.89	39.21	0.01	27.31	14.40	19.64	2.75	13.41	—	0.17	0.00	14.63
CaO	7.70	5.11	12.88	—	12.46	0.37	12.65	0.04	—	14.17	8.59	—	56.80	18.52
MnO	0.07	—	0.22	0.34	—	0.57	0.14	0.05	0.57	0.11	—	0.92	0.01	0.25
Al ₂ O ₃	25.73	23.79	6.95	0.01	29.31	0.24	12.16	16.85	0.01	6.13	27.38	0.02	—	4.01
TiO ₂	0.03	—	0.12	0.02	0.04	0.11	2.59	4.00	49.53	0.75	0.05	51.12	0.00	0.39
NiO	0.00	—	0.03	0.12	0.01	0.06	—	0.03	0.02	—	—	0.04	—	0.01
SiO ₂	59.19	62.93	48.89	38.13	53.60	54.15	43.23	39.36	—	49.91	57.75	0.02	0.15	51.79
P ₂ O ₅	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	40.96	—
Total	99.08	100.02	98.27	100.09	99.91	99.78	97.72	96.01	99.47	97.76	100.12	100.50	98.13	98.93
Mg [#]			60.1	76.0		74.4	72.7	83.1		66.04				75.3

注: Mg[#] = Mg / (Mg + Fe) × 100, pl-长石, hb-闪石, ol-橄榄石, opx-斜方辉石, bi-黑云母, ilm-钛铁矿, ap-磷灰石。

Note: Mg[#] = Mg / (Mg + Fe) × 100, pl-plagioclase, hb-hornblende, ol-olivine, opx-orthopyroxene, bi-biotite, ilm-ilmenite, ap-apatite.

中最明显的两个峰分别为 255 ~ 260Ma 和 280 ~ 285Ma (图 3a), 因此这些锆石主要是两期岩浆事件的产物。在 ²⁰⁷Pb/²³⁵U-²⁰⁶Pb/²³⁸U 谐和图上, 大部分点都落在谐和线上或附近(图 3b)。在 U-Th 相关图上, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄小于 260Ma 的大部点组成一个较好的演化线, 暗示它们结晶于同一个岩浆体系(图 4)。而其它锆石的 Th-U 相关性差, 说明来源复

杂。因此我们对小于 260Ma 和介于 270Ma ~ 300Ma 之间的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄进行加权平均, 分别获得 257.4 ± 5.3Ma (MSWD = 0.18, n = 6) 和 279.5 ± 5.3Ma (MSWD = 1.04, n = 7) 的平均年龄。全岩的元素地球化学特征和 Sr-Nd-Pb 同位素组成特征都说明闪长玢岩岩脉受到了其直接围岩花岗岩麻岩的强烈混染(见讨论部分), 因此一个合理的解释是

280Ma 左右的锆石来自围岩,而 257Ma 才是闪长玢岩的侵位年龄。有意思的是,乌恰沟闪长玢岩岩脉中的捕获锆石的年龄主要集中在 280Ma 左右,与相邻的喀拉通克镁铁质杂岩体

的锆石 U-Pb 年龄(287 ± 5Ma, Han *et al.*, 2004)相当,暗示乌恰沟地区在晚二叠世的闪长玢岩之前可能存在与喀拉通克镁铁质杂岩体准同时的岩浆事件。

表 3 乌恰沟地区闪长玢岩锆石 SHRIMP U-Pb 同位素定年结果

Table 3 Results of SHRIMP zircon U-Pb dating of the Wuqiagou diorite porphyrite

Spot	U ($\mu\text{g/g}$)	Th ($\mu\text{g/g}$)	$^{206}\text{Pb}^*$ ($\mu\text{g/g}$)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ Age(Ma)	$\pm\sigma$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm\%$	errcorr
WQG04-1	366	326	13.7	272.0	6.8	0.302	5.2	0.0431	2.5	.491
WQG04-2	549	1345	19.9	266.0	6.6	0.306	4.3	0.0421	2.5	.583
WQG04-3	1213	2768	44.7	270.5	6.6	0.3089	2.9	0.0429	2.5	.872
WQG04-4	265	293	9.46	259.9	6.6	0.313	6.6	0.0411	2.6	.398
WQG04-5	570	788	20.4	255.5	6.4	0.308	8.0	0.0404	2.6	.321
WQG04-6	205	154	8.60	300.6	8.0	0.271	13	0.0477	2.7	.211
WQG04-7	255	118	10.2	290.9	7.8	0.319	6.0	0.0462	2.7	.457
WQG04-8	582	209	22.8	283.6	7.3	0.342	4.6	0.0450	2.6	.567
WQG04-9	270	301	10.2	277.2	7.0	0.310	4.5	0.0439	2.6	.570
WQG04-10	221	233	8.64	283.8	7.2	0.304	7.3	0.0450	2.6	.356
WQG04-11	1216	2095	50.6	303.6	7.4	0.338	3.7	0.0482	2.5	.672
WQG04-12	543	491	21.0	283.1	7.1	0.314	3.7	0.0449	2.6	.693
WQG04-13	322	303	11.7	259.9	6.6	0.325	8.4	0.0411	2.6	.309
WQG04-14	1082	1751	38.5	257.9	6.4	0.460	3.7	0.0408	2.5	.689
WQG04-15	452	501	16.0	258.8	6.5	0.329	4.5	0.0410	2.6	.568
WQG04-16	687	1177	23.7	253.1	6.2	0.304	3.4	0.0400	2.5	.741
WQG04-17	474	195	49.4	738	18	1.078	2.8	0.1212	2.6	.912

注: Pb^* 指放射成因 Pb, 其中普通 Pb 已经用实测的 ^{204}Pb 扣除。

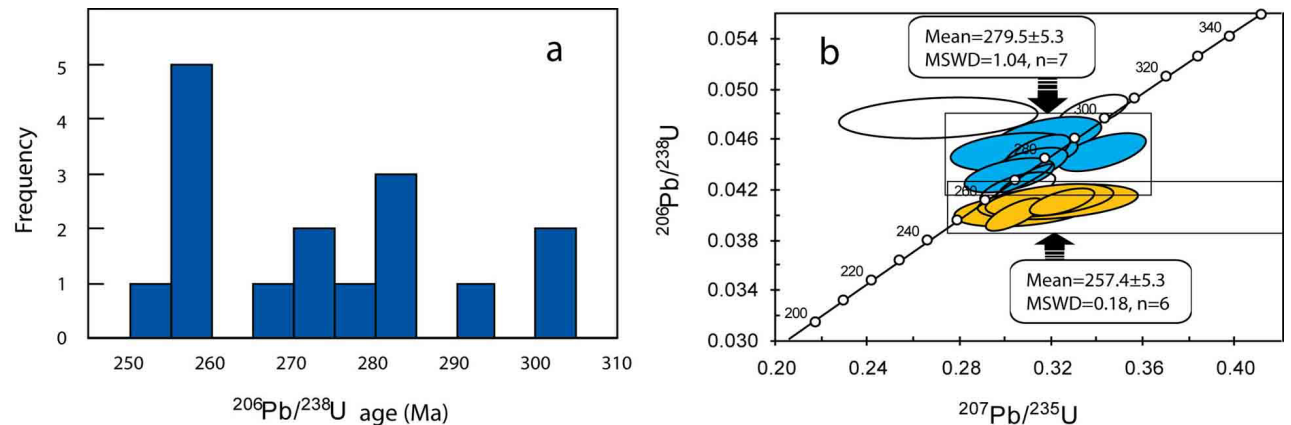


图 3 a-乌恰沟闪长玢岩锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄频率分布图; b-乌恰沟闪长玢岩锆石 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和图

空心圈代表的点没有用于 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄小于 260Ma 的加权平均年龄为 257.4Ma, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄大于 270Ma 小于 300Ma 的加权平均年龄为 279.5Ma。14 号点由于过高的 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 比值而落在图外面,一般解释为普通铅没有得到有效扣除的影响

Fig. 3 a-histogram of apparent $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ zircon age of the Wuqiagou diorite porphyrite; b-Zircon $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ concordia diagram of the Wuqiagou diorite porphyrite

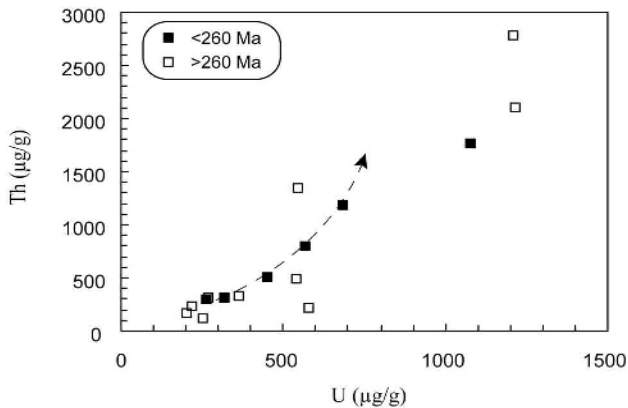


图4 乌恰沟闪长玢岩锆石 U-Th 含量相关图

除一个点外, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄小于 260Ma 的大部点组成一个较好的演化线。其它点较分散

Fig. 4 Zircon U-Th diagram of Wuqiagou diorite porphyrite

4 元素地球化学特征

全岩主量元素和微量元素分析在西北大学大陆动力学实验室完成, 结果见表 4。除 FeO 和烧失量(LOI)采用标准湿化学法分析外, 其他主量元素用制成的碱熔玻璃片在 RIX2100 XRF 仪上测定, 并经 BCR-2 和 GBW07105 标样监控, 元素分析误差 < 5%。微量元素在 Elan 6100DRC ICP-MS

上分析测定, 测试过程经 AGV-1、BCR-1 和 BHVO-1 国际标样监控, 同时作空白样进行质量监控。Li、Be、Cs、Zn、Pb 的精度介于 10~20%, Rb、Zr、Th 的精度介于 5~10%, 其它元素的精度优于 5%。

闪长玢岩的主量元素变化范围较大, 其 SiO₂ 相对高(52.0~58.3wt%), TiO₂ 中等(1.76~1.97wt%), 全 Fe₂O₃ 较低(8.9~10.7wt%), MgO 较低(2.83~5.90wt%), Na₂O 较高(3.42~4.09wt%), K₂O 较高(1.34~3.31wt%), P₂O₅ 较高(0.33~0.54wt%), Mg[#] 值低(0.39~0.54)。角闪辉长岩只有两个样品, 具中等的 SiO₂(46.4~50.8wt%), TiO₂ 较高(3.17~3.62wt%), 全 Fe₂O₃ 较高(13.7~14.9wt%), MgO 较低(4.63~6.42wt%), Na₂O 较高(3.02~3.04wt%), K₂O 中等(0.70~1.53wt%), P₂O₅ 较高(0.27~0.68wt%), Mg[#] 值低(0.40~0.46)。橄榄辉长岩的主量元素变化范围小, 其 SiO₂ 相对低(46.7~48.0wt%), TiO₂ 相对低(0.72~0.95wt%), 全 Fe₂O₃ 相对低(9.6~11.3wt%), MgO 相对高(11.8~16.4wt%), Na₂O 相对低(2.2~2.8wt%), K₂O 相对低(0.40~0.57wt%), P₂O₅ 相对低(0.14~0.21wt%), Mg[#] 值高(0.71~0.74)。橄榄辉长岩样品从北到南氧化物含量出现规律性变化, 即 MgO 和全 Fe₂O₃ 的含量递增, 而 SiO₂、Al₂O₃、CaO、Na₂O 的含量递减, 这与橄榄辉长岩样品从北到南橄榄石含量递增, 斜长石含量递减的趋势相一致。乌恰沟镁铁质侵入岩在主量元素上的共同特征是富钠, Na₂O/K₂O 比都大于 1; 但 K₂O 含量也较高, 为中钾或高钾钙碱性岩。

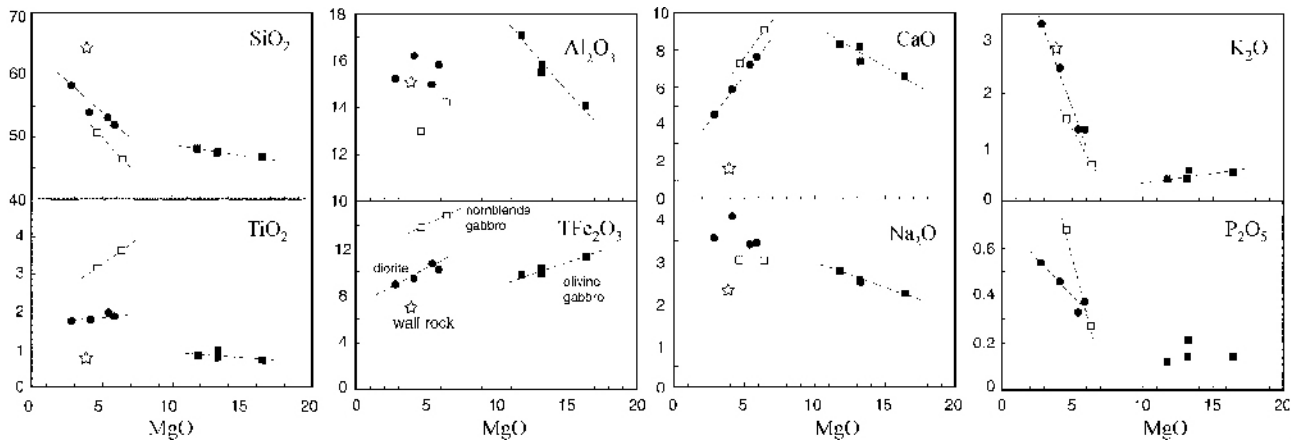


图5 乌恰沟侵入岩的 MgO 与其它氧化物图

注: 实心圆点为闪长玢岩, 实心方块为橄榄辉长岩, 空心方框为角闪辉长岩, 五角星为围岩, 以下各图都如此

Fig. 5 MgO vs. other oxides for the Wuqiagou mafic intrusive rocks

三类岩石在 MgO 对其它氧化物相关图上所表现的演化趋势区别明显(图 5)。橄榄辉长岩的全 Fe₂O₃ 与 MgO 呈较好的正相关, SiO₂、Al₂O₃、CaO、Na₂O 与 MgO 呈较好的负相关, TiO₂、K₂O、P₂O₅ 的变化范围小。而闪长玢岩和角闪辉长岩的全 Fe₂O₃、CaO 与 MgO 呈较好的正相关, SiO₂、K₂O、P₂O₅ 与 MgO 呈较好的负相关。闪长玢岩的 Al₂O₃、Na₂O 虽然变

化范围较大但与 MgO 相关性不明显。

橄榄辉长岩的 Cr、Ni 和 Sr 含量高于闪长玢岩和角闪辉长岩, 而大离子亲石元素 Rb、Ba、Th 和 U, 中等相容元素 V 和 Sc, 以及高场强元素 Nb、Ta、Zr 和 Hf 都比闪长玢岩和角闪辉长岩低。在 MgO 与微量元素的相关图上(图 6), 闪长玢岩和角闪辉长岩的 V、Sc、Cr、Ni 与 MgO 呈正相关; Nb、Ta、Rb、Y、

表4 乌恰沟侵入岩主量元素(wt%)和微量元素(ug/g)组成

Table 4 Major elements (wt%) and trace elements (ug/g) for the Wuqiagou mafic intrusive rocks

	WQG02	WQG03	WQG05	WQG06	WQG07	WQG08	WQG09	WQG10	WQG10R	WQG11	WQG12	WQG13
SiO ₂	58.26	52.04	53.08	64.38	48.02	47.38	47.55	46.74	46.72	53.91	46.42	50.74
TiO ₂	1.76	1.87	1.97	0.77	0.85	0.95	0.79	0.72	0.72	1.80	3.62	3.17
Al ₂ O ₃	15.23	15.79	14.99	15.11	17.02	15.51	15.82	14.09	14.04	16.17	14.21	13.05
TFe ₂ O ₃	8.96	10.18	10.67	6.99	9.67	10.26	9.84	11.26	11.26	9.39	14.86	13.79
FeO	5.00	6.75	7.25	5.00	7.15	7.75	6.52	8.55	8.58	6.08	8.08	8.45
MnO	0.15	0.16	0.17	0.10	0.14	0.15	0.14	0.16	0.16	0.14	0.19	0.21
MgO	2.83	5.90	5.41	3.88	11.81	13.16	13.23	16.39	16.27	4.13	6.42	4.63
CaO	4.53	7.63	7.20	1.65	8.31	8.18	7.39	6.59	6.60	5.91	9.12	7.27
Na ₂ O	3.57	3.46	3.42	2.31	2.76	2.57	2.50	2.26	2.24	4.09	3.06	3.02
K ₂ O	3.31	1.35	1.34	2.85	0.40	0.43	0.57	0.53	0.53	2.49	0.70	1.53
P ₂ O ₅	0.54	0.37	0.33	0.09	0.12	0.14	0.21	0.14	0.14	0.46	0.27	0.68
LOI	0.54	0.91	1.18	1.39	0.61	0.85	1.49	0.80	0.82	1.39	0.93	1.65
Total	99.68	99.66	99.76	99.52	99.71	99.58	99.53	99.68	99.50	99.88	99.80	99.72
Mg [#]	0.39	0.54	0.50	0.53	0.71	0.72	0.73	0.74	0.74	0.47	0.46	0.40
Li	19.10	17.60	15.71	41.8	6.84	8.37	9.64	8.78	9.25	29.2	31.50	28.1
Be	3.92	2.00	1.93	2.69	0.62	0.69	0.86	0.76	0.70	2.22	1.21	1.68
Se	17.6	25.1	28.9	17.9	17.0	18.5	14.3	12.8	12.8	22.0	38.5	24.7
V	141	188	247	116	84	96	81	65	65	160	426	269
Cr	26.69	129.3	96.7	317.6	316.3	483.0	432.7	318.4	320.6	58.0	125.5	36.7
Co	21.8	36.2	34.5	22.2	58.0	66.0	64.0	78.0	77.0	26.5	50.6	33.6
Ni	27.5	83	54	173	270	286	328	461	460	47	77	53
Cu	44.5	48.5	52.9	69.0	39.4	33.2	34.3	30.5	30.3	38.7	73.0	48.4
Zn	114	93.0	97.0	80.9	79.8	76.9	73.1	86.0	86.0	94.0	130	125
Ga	21.8	18.7	19.1	18.4	13.7	12.6	12.8	11.2	11.4	20.1	19.1	17.6
Ge	1.71	1.61	1.72	1.51	1.20	1.28	1.20	1.13	1.15	1.49	1.73	1.46
Rb	105.5	41.47	46.60	113.1	6.72	8.09	11.28	10.57	10.60	72.2	20.05	39.71
Sr	345	282	283	172	600	574	622	486	490	368	318	255
Y	69.8	45.3	44.9	17.6	12.7	16.4	17.7	13.5	13.6	50.1	38.3	58.3
Zr	630.5	273.0	204.0	163.0	57.4	77.0	87.2	82.8	82.9	516.1	172.0	94.8
Nb	34.40	11.40	10.90	9.80	3.98	4.29	5.90	4.61	4.59	16.50	9.30	14.90
Cs	2.20	2.73	2.56	7.04	0.54	0.42	0.73	0.42	0.43	1.71	2.59	1.52
Ba	646.0	169.0	171.2	352.8	91.8	93.2	121.0	105.6	107.1	384.0	121.6	192.2
La	71.40	21.90	19.90	25.70	6.94	7.66	10.62	8.65	8.85	33.40	13.97	27.30
Ce	180.00	50.40	47.00	52.30	15.70	17.90	24.30	19.20	19.50	74.10	34.10	66.00
Pr	18.60	6.78	6.45	6.33	2.09	2.46	3.25	2.50	2.54	9.86	4.87	9.45
Nd	75.9	30.8	29.6	25.3	9.51	11.58	14.60	11.00	11.22	43.1	23.3	43.2
Sm	15.10	7.42	7.18	4.82	2.17	2.71	3.25	2.36	2.43	9.48	5.86	10.20
Eu	3.15	2.04	1.90	1.07	0.88	0.94	1.05	0.83	0.87	2.51	1.82	2.50
Gd	14.10	7.51	7.38	4.20	2.16	2.73	3.20	2.39	2.38	9.16	6.16	10.30
Tb	2.19	1.29	1.25	0.58	0.37	0.47	0.52	0.38	0.38	1.50	1.06	1.71
Dy	12.20	7.48	7.32	3.01	2.10	2.70	2.93	2.20	2.26	8.50	6.35	9.80
Ho	2.45	1.57	1.54	0.60	0.44	0.56	0.61	0.46	0.47	1.79	1.35	2.03
Er	6.51	4.12	4.03	1.61	1.14	1.48	1.60	1.20	1.23	4.66	3.49	5.25
Tm	1.01	0.65	0.64	0.26	0.18	0.23	0.24	0.19	0.19	0.73	0.54	0.78
Yb	6.55	4.20	4.14	1.75	1.13	1.46	1.58	1.22	1.24	4.70	3.47	4.95
Lu	1.00	0.64	0.62	0.28	0.18	0.23	0.24	0.20	0.20	0.74	0.53	0.75
Hf	14.50	6.07	5.23	4.68	1.42	1.90	2.10	1.97	2.01	12.50	4.41	2.78
Ta	2.19	0.85	0.82	0.65	0.24	0.27	0.34	0.28	0.28	0.95	0.60	0.97
Pb	17.26	7.62	8.02	12.66	2.25	2.50	3.13	2.45	2.48	11.16	4.45	7.76
Th	12.32	4.63	4.74	8.90	0.71	0.86	1.08	1.19	1.33	3.84	1.74	3.28
U	2.360	1.400	1.350	1.550	0.165	0.204	0.256	0.300	0.330	1.140	0.500	0.710

注：WQG06 为围岩，WQG10R 是 WQG10 的平行样，TFe₂O₃ 指全铁，Mg[#] = Mg / (Mg + Fe)。

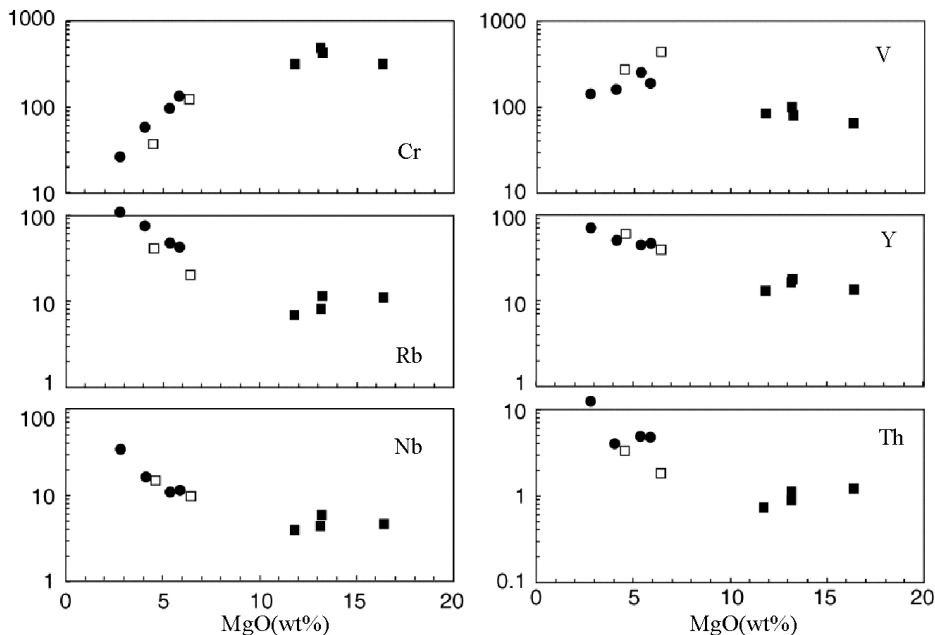


图6 乌恰沟侵入岩的 MgO 含量对部分微量元素相关图

Fig. 6 MgO vs. selected trace elements for the Wuqiagou mafic intrusive rocks

Yb、Th、U 与 MgO 呈负相关；Sr 并不随 MgO 的变化而发生明显变化。橄榄辉长岩的 V、Sc、Sr 与 MgO 呈负相关；Cr、Ni 虽然也与 MgO 呈负相关，但斜率比闪长玢岩和角闪辉长岩大；Rb、Th、U、Nb、Ta 与 MgO 呈正相关；Y、Yb 的变化范围小且与 MgO 相关性不明显。

闪长玢岩和角闪辉长岩的稀土元素总量明显比橄榄辉长岩高，但它们的 LREE 和 HREE 之间的分馏程度相同， $(La/Yb)_n$ 比值主要在 3~5 之间。在球粒陨石标准化图上都表现为 LREE 相对 HREE 富集（图 7）。LREE 之间分馏相对较大， $(La/Gd)_n$ 比在 1.90~4.24；HREE 之间分馏较小， $(Gd/Yb)_n$ 比值为 1.47~1.78，显示平坦型配分模式。闪长玢岩和角闪辉长岩显示不同程度的 Eu 负异常， Eu/Eu^* 比值分别为 0.66~0.83 和 0.74~0.92。而橄榄辉长岩显示无 Eu 异常或弱的 Eu 正异常， Eu/Eu^* 比值 ($Eu/Eu^* = Eu/\sqrt{((Sm^2 + Gd^2)/2)}$) 在 0.99~1.23 之间。闪长玢岩和角闪辉长岩的 HREE 含量高于 N-MORB，而橄榄辉长岩的 HREE 含量明显低于 N-MORB。闪长玢岩和角闪辉长岩之间在稀土元素含量以及在球粒陨石标准化图式上无明显区别。

闪长玢岩在原始地幔标准化图（图 8）上共同的特征是（1）大离子亲石元素相对于高场强元素富集，有明显的 Nb、Ta 和 Ti 的负异常而无 Zr、Hf 负异常；（2）K 和 Pb 的正异常；（3）Sr 和 P 的负异常。角闪辉长岩也具有 K 和 Pb 的正异常和 Nb、Ta 的负异常。其中一个样品有明显的 Sr 负异常和弱的 P 负异常，并具强烈的 Zr、Hf 的负异常；另一个样品无明显 Zr、Hf 和 Ti 的异常，Sr 的负异常较弱，但 P 的负异常稍强（图 8）。橄榄辉长岩在原始地幔标准化图上表现一致而集中，也具有 K、Pb 的正异常和 Nb、Ta 的负异常，与闪长玢岩和

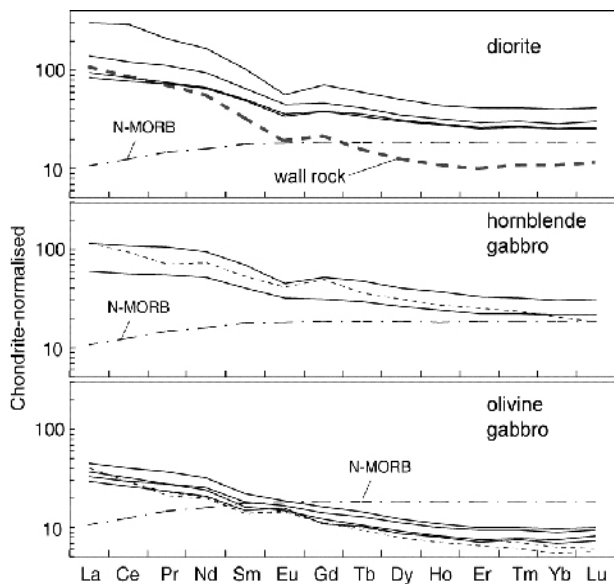


图7 乌恰沟侵入岩的稀土元素球粒陨石标准化图

N-MORB 数据据 Sun & McDonough (1989)，球粒陨石数据据 Anders E. & Grevesse, N. (1989)，细虚线引自方同辉等(2002)的相应样品

Fig. 7 Chondrite-normalized rare earth element patterns for the Wuqiagou mafic intrusive rocks

角闪辉长岩的不同表现在具 Ba、Sr、P 的正异常而 Ti 异常相对不明显（图 8）。乌恰沟镁铁质侵入岩共同的特征是富集大离子亲石元素，亏损 Nb 和 Ta，具 K 和 Pb 的正异常，LREE 相对 HREE 富集，即具有弧火山岩的地球化学特征。

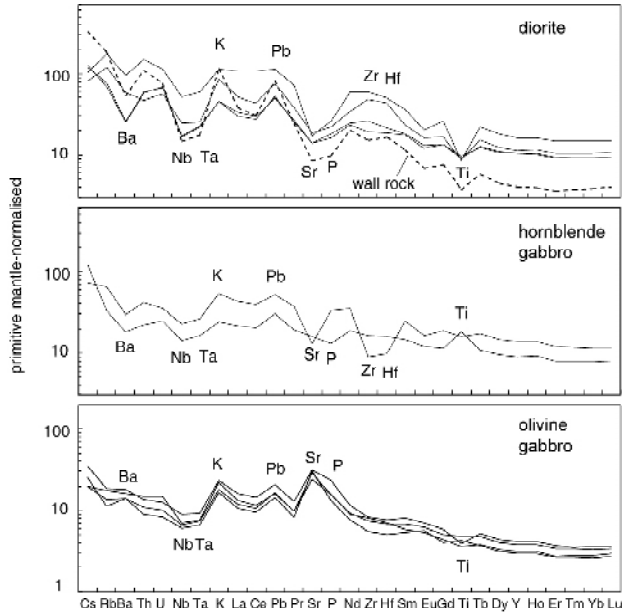


图8 乌恰沟侵入岩的微量元素原始地幔标准化图
原始地幔值引自 McDonough & Sun (1995)

Fig. 8 Primitive mantle-normalized multi-element diagrams for the Wuqiagou mafic intrusive rocks

5 Sr-Nd-Pb 同位素组成特征

Sr-Nd-Pb 同位素组成的分析在中科院地质与地球物理所的 VG354 固体质谱计上完成,结果见表 5。闪长玢岩的 Sr-Nd-Pb 同位素组成变化范围大, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为 0.70362 ~ 0.70520 (该比值为回扣到 255Ma 的初始比值,Nd 和 Pb 同位素比值也是如此), $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 为 0.512425 ~ 0.512600, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 18.134 ~ 18.321, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.468 ~ 15.515, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 37.939 ~ 38.131, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 2.25 ~ 5.66,Nd 模式年龄范围为 689 ~ 865Ma。角闪辉长岩的 Nd 同位素组成变化范围小, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 为 0.512583 ~ 0.512591, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 变化范围为 5.33 ~ 5.49,Nd 模式年龄范围为 708 ~ 755Ma;Sr 和 Pb 同位素组成变化范围相对大, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为 0.70412 ~ 0.70444, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化范围为 18.067 ~ 17.126, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化范围为 15.495 ~ 15.510, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化范围为 37.987 ~ 37.993。橄榄辉长岩的 Nd 同位素组成变化范围小, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 变化范围为 0.512584 ~ 0.512614, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 变化范围为 5.36 ~ 5.94,Nd 模式年龄范围为 633 ~ 646Ma;Pb 同位素组成变化范围大, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 17.885 ~ 18.279, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.477 ~ 15.522, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 37.815 ~ 38.121; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化大,为 0.70381 ~ 0.70441。

在 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 对 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 相关图上,所有样品点落在第一象限和第二象限,位于地幔阵列之上(图 9)。即在 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 与亏损地幔相当的情况下,其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比亏损地

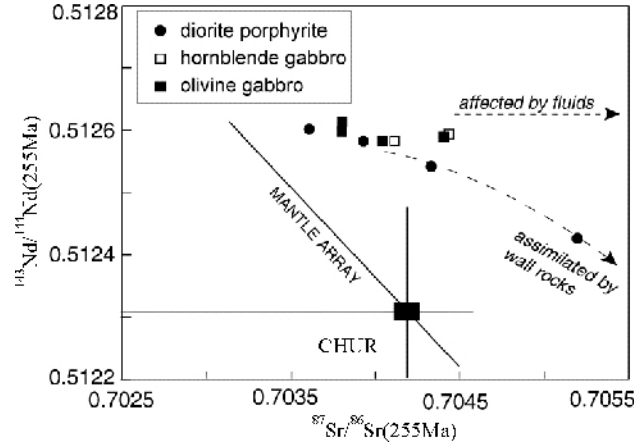


图9 乌恰沟侵入岩的 Sr-Nd 同位素相关图

Fig. 9 Sr-Nd isotopic compositions diagram for the Wuqiagou intrusive rocks

幔显著高而偏离地幔阵列。其中闪长玢岩存在一个向围岩(高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 低 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)演化的趋势,角闪辉长岩和橄榄辉长岩由于 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 变化范围大, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 变化范围小而表现出横向演化的趋势。

在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 相关图上,闪长玢岩随着 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的降低其 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 降低, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 升高,即存在一个向围岩演化的趋势(图 10);角闪辉长岩和橄榄辉长岩在 Sr、Nd 同位素比值变化不大的情况下, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化相对大。在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 相关图上,样品点较分散,但都在北半球参考线之上。

6 讨论

6.1 流体的影响

流体的加入往往对岩石的地球化学特征和同位素组成特征的产生不同程度的影响。橄榄辉长岩中的橄榄石周围常见细小的斜方辉石反应边,说明存在流体的交代作用。由于地壳流体中往往溶解了较多 SiO_2 ,当这种富硅流体遇到岩石中的橄榄石时,由于橄榄石是硅不饱和矿物,所以会反应生成斜方辉石。 Al_2O_3 、 Na_2O 与 MgO 之间的相关性较差(图 5)也反映了流体交代的影响,因为这些元素容易进入流体从而偏离同化混染结晶分离主控的演化趋势。地壳流体同时富含 Rb、U 和 Pb 等大离子亲石元素,但基本不含稀土元素,因此流体的存在往往使岩石的 Rb-Sr 和 U-Th-Pb 同位素体系受到不同程度的干扰,但基本不影响 Sm-Nd 同位素体系。在 Sr-Nd 同位素相关图上(图 9)辉长岩的 Nd 同位素组成都变化很小,但 Sr 同位素组成变化相对大。其中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值高的样品其 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值也相应高(表 5),说明 Sr 同位素组成的变化主要是流体交代引起的。在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 对其它同位素相关图上(图 10)橄榄辉长岩中样品 WQG08 在 Nd 同位素与其它样品基本一致的情况下,其放射性 Pb 同位素组成特

表5 乌恰沟侵入岩的 Sr-Nd-Pb 同位素组成

Table 5 Sr-Nd-Pb isotopic compositions for the Wuqiagou intrusive rocks

Sample	WQG02	WQG03	WQG05	WQG07	WQG08	WQG09	WQG10	WQG11	WQG12	WQG13	WQG06
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.863	0.415	0.465	0.032	0.040	0.051	0.061	0.554	0.178	0.440	1.856
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.708328	0.705125	0.705622	0.703927	0.703954	0.704598	0.704269	0.706345	0.705083	0.705714	0.717957
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.1203	0.1457	0.1467	0.1380	0.1415	0.1346	0.1298	0.1330	0.1521	0.1428	0.1152
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512626	0.512843	0.512825	0.512836	0.512850	0.512815	0.512801	0.512762	0.512845	0.512821	0.512323
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$	0.70520	0.70362	0.70394	0.70381	0.70381	0.70441	0.70405	0.70434	0.70444	0.70412	0.71122
$\epsilon_{\text{Sr}}(\text{T})$	10.0	-5.7	-2.6	-3.8	-3.8	2.2	-1.5	1.4	2.4	-0.7	70.3
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_i$	0.51243	0.51260	0.51258	0.51261	0.51261	0.51259	0.51258	0.51254	0.51259	0.51258	0.51213
$\epsilon_{\text{Nd}}(\text{T})$	2.25	5.66	5.28	5.78	5.94	5.48	5.36	4.49	5.49	5.33	-3.49
$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	-0.23	4.00	3.65	3.86	4.14	3.45	3.18	2.42	4.04	3.57	-6.14
T_{DM}	856	689	740	633	634	646	634	734	755	708	1279
$f_{\text{sm}/\text{Nd}}$	-0.39	-0.26	-0.25	-0.30	-0.28	-0.32	-0.34	-0.32	-0.23	-0.27	-0.41
$^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$	9.696	13.028	11.936	5.442	5.786	5.800	8.683	7.244	7.810	6.488	8.682
$^{235}\text{U}/^{204}\text{Pb}$	0.070	0.094	0.087	0.039	0.042	0.042	0.063	0.053	0.057	0.047	0.063
$^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$	50.985	43.401	42.216	23.588	24.571	24.646	34.694	24.578	27.376	30.191	50.214
$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	18.339	18.560	18.555	18.256	17.998	18.282	18.449	18.276	18.220	18.253	18.240
$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	15.477	15.528	15.495	15.519	15.483	15.528	15.528	15.506	15.518	15.501	15.495
$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	38.371	38.401	38.297	38.091	37.968	38.121	38.337	38.091	38.157	38.180	38.230
$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_i$	18.149	18.305	18.321	18.149	17.885	18.168	18.279	18.134	18.067	18.126	18.070
$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_i$	15.468	15.515	15.484	15.513	15.477	15.522	15.520	15.499	15.510	15.495	15.487
$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_i$	38.055	38.131	38.035	37.945	37.815	37.968	38.121	37.939	37.987	37.993	37.918

注: 初始值计算参考年龄为 255Ma, Rb, Sr, Sm, Nd, U, Th 和 Pb 的含量参考 ICP MS 数据。

Note: initial values are calculated back to 255Ma, the concentrations of Rb, Sr, Sm, Nd, U, Th, and Pb are from ICP MS analysis

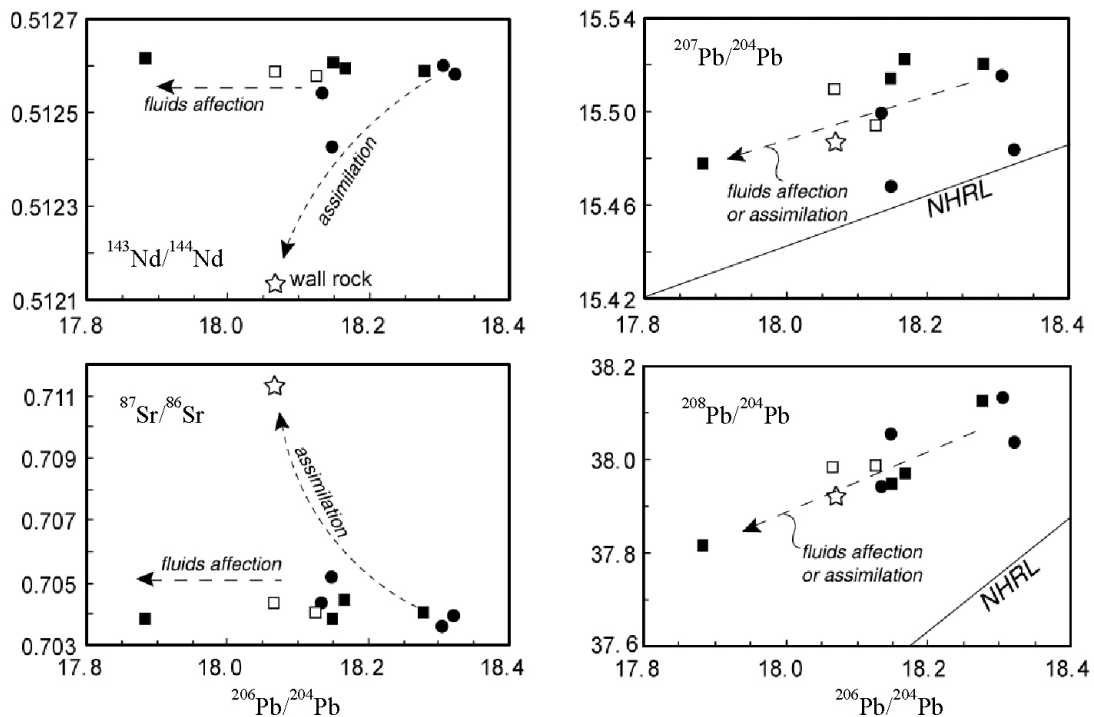


图10 乌恰沟侵入岩的 Pb-Sr-Nd 同位素相关图(图例同图5)

Fig. 10 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. other Pb-Sr-Nd isotopic ratios for the Wuqiagou intrusive rocks

别低。由于围岩具相对低的放射性 Pb 同位素组成和 Nd 同位素组成(见表 5),因此该样品单纯的 Pb 同位素异常应该是围岩来源的流体影响造成的,而与围岩的同化混染作用无关(围岩同化混染作用会使 Nd 同位素组成也受影响),这与镜下观察相吻合。闪长玢岩和角闪辉长岩的 Pb 同位素组成相对分散,可能也是流体交代的影响。从图 10~图 11 看,流体对岩石的 Pb 同位素组成的影响比对 Sr 同位素组成的影响大,对 Nd 同位素影响很小。

在原始地幔标准化图上,橄辉岩的图式基本一致,Pb、Sr 同位素差别明显的样品都具有 Pb 和 K 的正异常和富集大离子亲石元素(图 8),因此这些特征可能是岩石的原始特征,流体的影响不足以改变其在原始地幔标准化图上的图式。

6.2 结晶分离和同化混染

闪长玢岩在球粒陨石标准化图上明显的 Eu 负异常(图 7)和在原始地幔标准化图上具强烈的 Ba、Sr 负异常(图 8)说明存在斜长石的结晶分离,而 P 和 Ti 的负异常说明磷灰石和钛铁矿的结晶分离也影响了岩浆的地球化学组成。MgO 和 CaO 的正相关说明单斜辉石的结晶分离作用,而 MgO 和 TFe_2O_3 的正相关主要反映了橄辉石的结晶分离作用(图 5)。因此闪长玢岩的地球化学特征受到了橄辉石、单斜辉石、斜长石、钛铁矿和磷灰石的结晶分离作用的影响。

橄辉岩中 Sr、Ba 和 Eu 的正异常说明斜长石的结晶对这些元素的控制作用。由于 Sr、Ba 在斜长石中的分配系

数大,所以斜长石结晶时熔体会出现 Sr、Ba 亏损,而由早期结晶矿物组成的堆晶岩(富斜长石)相应的会出现 Sr、Ba 的正异常。因此橄辉岩是堆晶岩,这与其特征的堆积结构相吻合。角闪辉长岩较高的 TiO_2 含量($>3\text{wt}\%$)与其富集钛铁矿一致,由于钛铁矿在岩浆演化过程中是早期结晶矿物,结合其典型的堆积结构,因此角闪辉长岩也是堆晶岩。

在同位素组成相关图上,闪长玢岩存在一个从具有低的放射成因 Sr 和高的放射成因 Nd 和 Pb 同位素组成端元向具有高的放射成因 Sr 和低的放射成因 Nd 和 Pb 同位素组成端元演化的趋势,即其同位素组成有向围岩演化的趋势(图 9 和图 10)。在 $\text{Mg}^\#$ 值与 Sr、Nd 和 Pb 同位素比值相关图上,闪长玢岩的 $\text{Mg}^\#$ 值与 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 成正相关,与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 成负相关(图 11)。由于围岩是酸性岩石,并具相对低的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和相对高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$,因此认为闪长玢岩受到了围岩不同程度的混染。角闪辉长岩和橄辉岩稳定的 Nd 同位素组成说明它们受围岩混染的影响小。

6.3 原始岩浆的特征

闪长玢岩代表演化的岩浆,而橄辉岩和角闪辉长岩是堆晶岩,它们在 Eu、Ba、Sr、P 和 Ti 等元素上具互补的特征(图 8),那么它们是否同源呢?闪长玢岩中样品 WQG03 的同位素组成离围岩的同位素组成最远(具最高的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和最低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$),因此更接近闪长玢岩原始岩浆的同位素组成。其 Sr-Nd-Pb 同位素组成与橄辉岩(WQG08 的 Pb 同位素除外)和角闪辉长岩的差别

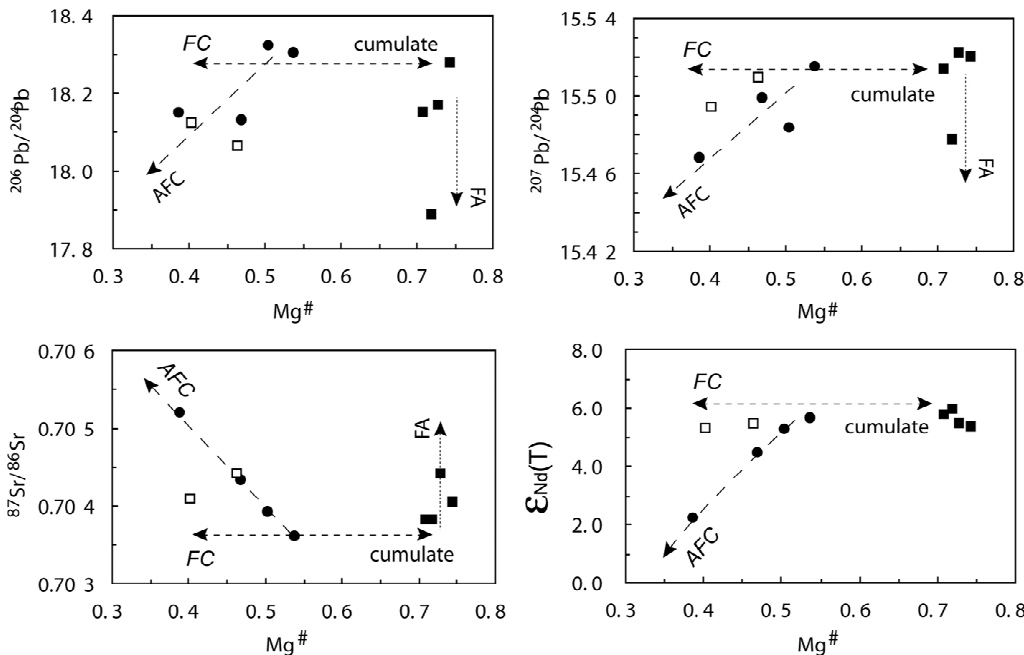


图 11 乌恰沟镁铁质侵入岩的 $\text{Mg}^\#$ 值和 Sr-Nd-Pb 同位素比值相关图 FA-流体影响, AFC-同化混染和分离结晶, 图例同图 5

Fig. 11 $\text{Mg}^\#$ values vs. Sr-Nd-Pb isotopes diagrams for the Wuqiagou mafic intrusive rocks

最小,尤其是在 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值上基本一致,因此认为闪长玢岩和橄榄辉长岩、角闪辉长岩是同一母岩浆演化和结晶分离的产物是合理的(图11)。

综合考虑流体交代、同化混染等作用对岩石同位素体系的影响规律后(图9~图11),我们对乌恰沟镁铁质侵入岩原始岩浆的Sr-Nd-Pb同位素组成(指初始值)作一个粗略的估计: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 为0.51260左右, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值在6.0左右, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为0.7036左右, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为18.32、15.52和38.13左右。由于角闪辉长岩和闪长玢岩在矿物组成和元素地球化学特征更将近,因此角闪辉长岩应晚于橄榄辉长岩堆积成岩。结合橄榄辉长岩在空间上的矿物组成和元素地球化学变化规律,我们可以把乌恰沟镁铁质岩浆矿物结晶的先后顺序总结为橄榄石-单斜辉石-基性斜长石-黑云母-钛铁矿-角闪石-中酸性斜长石-钾长石。

原始岩浆的地球化学特征应该介于演化岩浆和堆晶岩之间,因此原始岩浆应该是基性岩浆。除了互补元素外,闪长玢岩和两种堆晶岩在原始地幔标准化图上的图式是基本一致的,即都富集大离子亲石元素,亏损Nb、Ta,轻稀土元素相对重稀土元素富集,重稀土元素之间分馏不明显等,说明这些地球化学特征不是岩浆演化和后期流体影响引起的。因此原始岩浆应该是具弧火山岩地球化学特征的玄武质岩浆。

6.4 源区特征与深部过程

一般认为幔源弧火山岩是被俯冲洋壳释放流体交代的地幔楔部分熔融的结果,但具弧火山岩地球化学特征的火成岩并不局限于弧背景,因为板内环境的大陆岩石圈地幔来源的岩浆同样会残留有早期俯冲事件的地球化学信息。由于阿尔泰造山带所代表的大洋闭合事件最终发生在早石炭世(Coleman, 1989; 肖序常等, 1992; Sengör *et al.*, 1993; 何国琦等, 1994), 即因洋壳俯冲引起的地幔交代事件要持续到早石炭世(牛贺才等, 1999; Wang *et al.*, 2003)。乌恰沟镁铁质岩浆的侵位时间要比该区大洋闭合时间晚近100Ma, 应属于板内岩浆事件。亏损的Nd同位素组成特征和较小的Nd模式年龄支持该区陆下岩石圈地幔属于新生的岩石圈地幔, 而交代富集事件发生较晚, 这与阿尔泰地区的显生宙构造演化过程相吻合。

乌恰沟橄榄辉长岩中橄榄石的 $\text{Mg}^\#$ 值为72.1~76.0, 明显低于黄山地区基性-超基性杂岩体中橄榄石的 $\text{Mg}^\#$ 值(82~89)(Zhou *et al.*, 2004)。橄榄石在岩浆中的Mg-Fe分配常数($K_d = (\text{Fe}/\text{Mg})^{\text{O}l} / (\text{Fe}/\text{Mg})^{\text{magma}}$)为 0.30 ± 0.03 (Roeder and Emslie, 1970), 据此估算出乌恰沟镁铁质侵入岩原始岩浆的 $\text{Mg}^\#$ 值为0.44~0.49, 远低于黄山地区基性-超基性杂岩体的原始岩浆的 $\text{Mg}^\#$ 值(0.73)。闪长玢岩和角闪辉长岩的 $\text{Mg}^\#$ 值分别为0.39~0.54和0.40~0.46, 说明乌恰沟镁铁质侵入岩的原始岩浆比新疆北部与铜镍矿有关的基性-超基性杂岩体的原始岩浆相对贫镁富铁。同样作为堆晶岩, 乌

恰沟的橄榄辉长岩以富单斜辉石贫斜方辉石, 不透明矿物以钛铁矿为主, 而新疆北部与铜镍矿有关的基性-超基性杂岩体富斜方辉石贫单斜辉石, 不透明矿物以黄铁矿为主, 这种矿物组成上的显著差异也反映了是原始岩浆成分上的差异。

与新疆北部早二叠世与铜镍矿有关的基性-超基性杂岩体相比, 乌恰沟镁铁质侵入岩在放射性Nd同位素组成明显偏低, 其 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 的测试值、初始值以及 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值都明显低于前者(图12)。乌恰沟镁铁质侵入岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值集中在5~6之间, 而新疆北部早二叠世与铜镍矿有关的基性-超基性杂岩体的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值主要在7~10之间, 即在Sr同位素相当的情况下乌恰沟镁铁质侵入岩的放射性Nd同位素组成偏低(图12)。新疆北部早二叠世与铜镍矿有关的基性-超基性杂岩体的原始岩浆具高镁的特征, 因此其同位素组成可以代表该区陆下岩石圈地幔的同位素特征(Zhou *et al.*, 2004)。在Sr-Nd同位素相关图上这些岩石排列在亏损地幔和EM2型地幔端元之间, 符合作为由于俯冲作用改造的陆下岩石圈地幔的同位素特征, 因此我们认为这些基性-超基性杂岩体的Sr-Nd同位素组成可以代表该区陆下岩石圈地幔的Sr-Nd同位素组成。这样乌恰沟镁铁质侵入岩偏低的放射性成因Nd同位素组成不可能单纯是陆下岩石圈地幔来源的产物, 介于陆下岩石圈地幔与OIB之间的Sr-Nd同位素组成特征暗示地幔柱来源物质和陆下岩石圈地幔来源的物质之间的混合是乌恰沟镁铁质侵入岩成因的合理解释。这种成因解释也同时满足其原始岩浆 $\text{Mg}^\#$ 值低(< 0.5)的特征, 因为地幔柱物质由于含有重循环物质因此相对富铁贫镁。

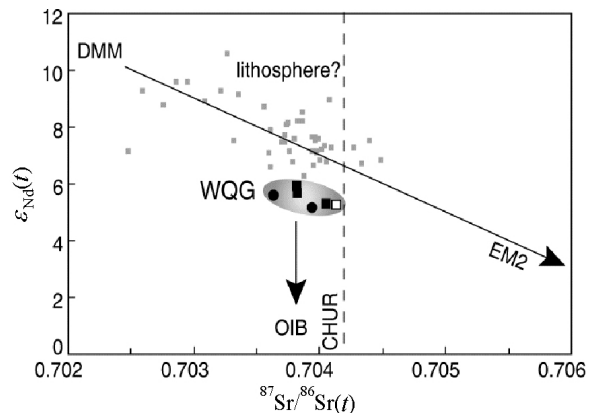


图12 新疆北部镁铁质侵入岩Sr-Nd同位素对比。小点为新疆北部与铜镍矿有关的基性-超基性杂岩体, 包括喀拉通克、黄山和锡泊渡等地区, 数据引自Zhou *et al.* (2004)、张招崇等(2006)和本课题组未发表数据。此外乌恰沟数据不包括明显受围岩混染和流体交代影响的样品, 以便集中讨论源区问题。WQG指乌恰沟镁铁质侵入岩, DMM指亏损地幔端元, EM2指富集2型地幔端元, OIB指洋岛玄武岩。

Fig. 12 Sr-Nd isotopic compositions of mafic rocks in North Xinjiang.

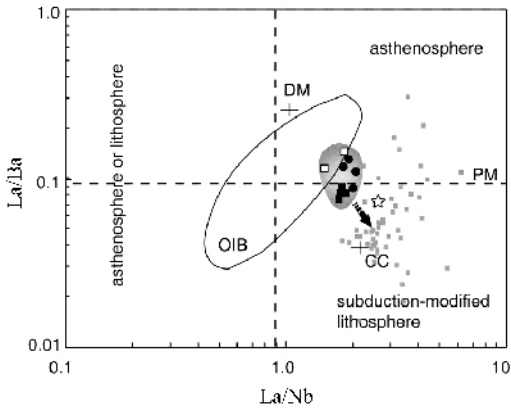


图 13 乌恰沟镁铁质侵入岩的 La/Nb 对 La/Ba 相关图
图例与图 5 相同, OIB 指洋岛玄武岩, PM 指原始地幔, DM 指亏损地幔, CC 指大陆地壳, 小点为新疆北部与铜镍矿有关的基性-超基性杂岩体(引自 Zhou *et al.*, 2004 和本课题组未发表数据)
Fig. 13 La/Nb vs. La/Ba ratios of the Wuqiaogou mafic intrusive rocks

幔源岩浆是否与地幔柱有关的一个重要地球化学参数是 Ti/Y 比(见 Xu *et al.*, 2001)。乌恰沟镁铁质侵入岩的 Ti/Y 比变化范围很大, 从小到大依次为闪长玢岩(151 ~ 263)、橄榄辉长岩(268 ~ 402)、角闪辉长岩(326 ~ 567), 这主要受钛铁矿的结晶分异控制(见讨论部分 6.2), 因此用 Ti/Y 比判断侵入岩的地幔柱贡献比较困难。同时我们注意到乌恰沟侵入岩的 La/Nb 比和 La/Ba 比变化较小。在 La/Nb 对 La/Ba 相关图上, 乌恰沟镁铁质侵入岩落在 OIB 和陆下岩石圈地幔之间, 而新疆北部早二叠世与铜镍矿有关的基性-超基性杂岩体大部分落在被俯冲改造的陆下岩石圈地幔范围(图 13)。因此乌恰沟镁铁质侵入岩的微量元素特征也可以由地幔柱和陆下岩石圈地幔来源物质混合而成。

综上所述, 乌恰沟镁铁质侵入岩的元素地球化学特征和 Sr-Nd 同位素组成特征支持其原始岩浆是两个源区——被早期洋壳俯冲改造的陆下岩石圈地幔和深部来源的地幔柱共同贡献的结果, 是地幔柱-岩石圈地幔相互作用的表现。而本文的锆石年代学证据说明乌恰沟镁铁质侵入岩的侵位年龄为晚二叠世, 在误差范围内与峨眉山玄武岩一致(259 ± 3Ma, Zhou *et al.*, 2002), 因此新疆北部的晚二叠世幔源岩浆所代表的深部事件与峨眉山玄武岩所代表的地幔柱事件在时间上的耦合暗示它们之间可能存在密切的关系。

7 结论

(1) 乌恰沟闪长玢岩岩脉的锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果显示岩浆侵位年龄为 258.9 ± 6.3Ma, 并主要被 279.5 ± 5.3Ma 的围岩混染;

(2) 乌恰沟地区镁铁质侵入岩包括闪长玢岩和具堆积结构的角闪辉长岩、橄榄辉长岩, 它们具有相近的 Sr-Nd-Pb 同位素组成和互补的元素地球化学特征, 是同源岩浆演化和结晶分离的产物;

(3) 乌恰沟地区镁铁质侵入岩的元素地球化学特征和 Sr-Nd 同位素特征介于岩石圈地幔来源和地幔柱来源岩浆之间, 暗示了该区在晚二叠世存在地幔柱-岩石圈地幔之间的相互作用。

致谢 本工作受国家重点基础研究发展规划项目(2001CB409802)资助。季建清博士和李辛子、李宗怀两位研究生参加了野外工作。感谢两位评审人的建设性评审。感谢中科院地质与地球物理研究所同位素实验室提供同位素测试。感谢西北大学大陆动力学实验室提供主量元素和微量元素测试。感谢北京离子探针中心提供锆石 SHRIMP U-Pb 同位素测试。

References

- Anders E & Grevesse N. 1989. Abundances of the elements: meteoritic and solar. *Geochim Cosmochim Acta*, 53: 197-214
- Chen B, Jahn BM. 2002. Geochemical and isotopic studies of the sedimentary and granitic rocks of the Altai orogen of northwest China and their tectonic implications. *Geological Magazine*, 139: 1-13
- Chen JF, Zhou TX, Xie Z, Zhang X, Guo XS. 2000. Formation of positive $\epsilon_{Nd}(t)$ granitoids from the Alataw Mountains, Xinjiang, China, by mixing and fractional crystallization: implication for Phanerozoic crustal growth. *Tectonophysics*, 328: 53-67
- Chung, SL & Jahn BM. 1995. Plume-lithosphere interaction in generation of the Emeishan flood basalts at the Permian-Triassic boundary. *Geology*, 23: 889-892
- Coleman RG. 1989. Continental growth of Northwest China. *Tectonics*, 8: 621-635
- Gibson SA, Thompson RN, Dickin AP, Leonardos OH. 1996. Erratum to "High-Ti and low-Ti mafic potassic magmas: Key to plume-lithosphere interactions and continental flood basalts genesis". *Earth and Planetary Science Letters*, 141: 325-341
- Han B, Ji J, Song B, Chen L, Li Z. 2004. SHRIMP zircon U-Pb ages of Kalatongke No. 1 and Huangshandong Cu-Ni-bearing mafic-ultramafic complexes, North Xinjiang, and geological implications. *Chinese Science Bulletin*, 49: 2424-2429
- Han BF, He GQ, Wang SG. 1999. Mantle-derived magmatism, underplating and the nature of basement for Junggar Basin. *Science in China (Series D)*, 29: 16-21 (in Chinese)
- Han BF, Wang SG, Jahn BM, Hong DW, Kagami H, Sun YL. 1997. Depleted-mantle source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China: geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth. *Chemical Geology*, 138: 135-159
- He Guoqi, Li Maosong, Liu Dequan, Tang Yanling, Zhou Ruhong. 1994. Paleozoic crustal evolution and mineralization in Xinjiang of China. Xingjiang People's Publishing House & Educational, Wulumuqi, and Cultural Press L. T. D., Hongkong, P437
- Hong D, Zhang J, Wang T, Wang S, Xie X. 2004. Continental crustal growth and the supercontinental cycle: evidence from the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23: 799-813

- Jahn BM, Wu FY, Chen B. 2000. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 91: 181–193
- Li Z, Chen H, Yang S, Dong C, Xiao W, Li J, Ye Y, and Wang J. 2004. Discovery and genetic mechanism of basic granulite in the Altay orogenic belt, Xinjiang, NW China. *Acta Geologica Sinica*, 78: 177–185
- Li ZL, Chen HL, Yang SF, Xiao WJ, Tainosho Y. 2004. Discovery of mafic granulites from the Altay orogenic belt: evidence from mineralogical study. *Acta Petrologica Sinica*, 20: 1445–1455
- McDonough WF & Sun SS. 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120: 223–253
- Roeder PL, Emslie RF. 1970. Olivine-liquid equilibrium. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 29: 275–289
- Sengör AMC, Natal'in BA, Burtman VS. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364: 299–307
- Sun SS & McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes, in: Saunders AD, Norry MJ (eds.). *Magmatism in Ocean Basins*, Geol. Soc. London Spec. Publ., 42: 313–345
- Wang Q, Zhao ZH, Bai ZH *et al.* 2003. Carboniferous adakites and Nb-enriched arc basaltic rocks association in the Alataw Mountains, north Xinjiang: interactions between slab melt and mantle peridotite and implications for crustal growth. *Chinese Science Bulletin*, 48: 2108–2115
- Xiao L, Xu YG, Mei HJ, Zheng YF, He B, Pirajno F. 2004. Distinct mantle sources of low-Ti and high-Ti basalts from the western Emeishan large igneous province, SW China: implications for plume lithosphere interaction. *Earth and Planetary Science Letters*, 228: 525–546
- Xiao XC, Tang YQ, Feng YM *et al.* 1992. Tectonic evolution of Northern Xinjiang and its adjacent regions. Beijing: Geological Publishing House, P69 (in Chinese)
- Xu Y, Chung S-L, Jahn B-m, Wu G. 2001. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China. *Lithos*, 58: 145–168
- Zhao ZH, Wang ZG, Zou TR *et al.* 1996. Study on petrogenesis of alkali-rich intrusive rocks of Ulungur, Xinjiang. *Geochimica*, 25: 205–220 (in Chinese with English abstract)
- Zhou M-F, Leshner M, Yang Z, Li J, Sun M. 2004. Geochemistry and petrogenesis of 270Ma Ni-Cu (PGE) sulfide-bearing mafic intrusions in the Huangshan district, Eastern Xinjiang, Northwest China: implications for the tectonic evolution of the Central Asian orogenic belt. *Chemical Geology*, 209: 233–257
- Zhou M-F, Malpas J, Song X-Y, Robinson PT, Sun M, Kennedy AK, Leshner CM, Keays RR. 2002. A temporal link between the Emeishan large igneous province (SW China) and the end-Guadalupian mass extinction. *Earth and Planetary Science Letters*, 196: 113–122
- Zhou TX, Chen JF, Li XM. 1996. Origin of high $\epsilon_{Nd}(t)$ granites from Alataw Mountain, Xinjiang. *Scientia Geologica Sinica*, 31: 71–79 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 方同辉, 王京彬, 张进红, 丁汝福. 2002. 新疆阿尔泰元古代基性岩浆侵入事件. *中国地质*, 29: 48–54
- 韩宝福, 何国琦, 王式泮. 1999. 后碰撞幔源岩浆活动、底垫作用及准噶尔盆地基底的性质. *中国科学(D辑)*, 29: 16–21
- 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. 49: 2324–2328
- 何国琦, 李茂宋, 刘德权, 唐延龄, 周汝洪. 1994. 中国新疆古生代地壳演化及成矿. 新疆人民出版社 & 香港文化教育出版社. P437
- 厉子龙, 陈汉林, 杨树锋, 肖文交, Yoshiaki Tainosho. 2004. 阿尔泰基性麻粒岩的发现: 来自矿物学的证据. *岩石学报*, 20: 1445–1455
- 牛贺才, 许继锋, 于学元, 陈繁荣, 郑作平. 1999. 新疆阿尔泰富镁火山岩系的发现及其地质意义. *科学通报*, 44: 1002–1004
- 王强, 赵振华, 白正华等. 2003. 新疆阿拉套山石炭纪埃达克岩、富 Nb 岛弧玄武岩质: 板片熔体与地幔橄榄岩相互作用及地壳增生. *科学通报*, 42: 1342–1349
- 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 朱宝清, 李锦轶, 赵民. 1992. 新疆北部及其邻区大地构造. 地质出版社, P69
- 张招崇, 闫升好, 陈柏林, 何立新, 何永胜, 周刚, 柴凤梅. 2006. 阿尔泰造山带南缘镁铁质-超镁铁质杂岩体的 Sr、Nd、O 同位素地球化学及其源区特征探讨. *地质论评*, 52: 38–42
- 赵振华, 王中刚, 邹天人等. 1996. 新疆乌伦古富碱侵入岩成因探讨. *地球化学* 25: 205–220
- 周泰禧, 陈江峰, 李学明. 1996. 新疆阿拉套山花岗岩类高 ϵ_{Nd} 值的成因探讨. *地质科学*, 31: 71–79