

东天山沙泉子地区石炭纪火山岩的 铂族元素地球化学特征

黄小文^{1,2}, 漆亮¹, 高剑峰³, 赵正⁴

1. 中国科学院地球化学研究所, 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 香港大学地球科学系, 香港; 4. 中国地质科学院, 北京 100037

摘要: 本文报道了东天山沙泉子地区石炭纪火山岩的主量、微量及铂族元素(PGE)地球化学特征, 初步探讨了岩浆源区特征和岩浆演化过程。采用改进的溶样方法, 即 Teflon 密闭溶样-Te 共沉淀富集 PGE, 阳离子交换树脂结合 P507 萃淋树脂分离干扰元素方法, 测定了玄武岩及玄武安山岩中的 PGE 含量。结果表明, 沙泉子火山岩具有较低的 MgO 含量, 且整体表现为强烈的 PGE 亏损, 暗示其可能形成于较低的部分熔融程度(<10%), 可能有少量硫化物(~0.001%)残留于地幔。火山岩较低的 Cu/Zr 值表明原始岩浆有了亲铜元素的亏损。玄武岩较稳定的 Pd/Ir 和 Pt/Pd 值, 较高且变化较大的 Cu/Pd 值, 表明岩浆上升或侵位过程达到过 S 饱和而发生硫化物熔离。IPGE 与 Cr、Ni 的相关性表明, 原始岩浆可能发生了橄榄石和铬铁矿的分离结晶作用。

关键词: 玄武岩; 玄武安山岩; 铂族元素; 铜铁矿床; 沙泉子; 新疆

中图分类号: P595 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2012)06-0575-15

Geochemistry of Platinum-Group Elements (PGEs) in Carboniferous Volcanic Rocks from the Shaquanzi Area, East Tianshan, Xinjiang, China

HUANG Xiao-wen^{1,2}, QI Liang¹, GAO Jian-feng³, ZHAO Zheng⁴

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences,

Guiyang 550002, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Department of Earth Sciences, The University of Hong Kong, Hong Kong, China;

4. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

Abstract: This paper reports the geochemical characteristics of major, trace and platinum-group elements (PGEs) in Carboniferous volcanic rocks from the Shaquanzi area, East Tianshan, Xinjiang. The magma source and the magma evolution of these rocks are discussed. PGEs concentrations in basalt and basaltic andesite are determined by ID-ICP-MS using screw-top, PTFE-lined, stainless steel pressure bombs for sample digestion. PGEs are depleted in the whole volcanic rocks with low MgO suggests that the primary magma has experienced low degree partial melting (<10%) and that some sulfides (~0.001%) were remained in the mantle source. Low Cu/Zr ratios in the volcanic rocks mean depletion of chalcophile elements. The relative stable Pd/Ir and Pt/Pd ratios but high and variable Cu/Pd ratios of basalt suggest that the magmas reached sulfide saturation and segregated PGE-rich sulfides during magma ascent. The strong correlations of Rh and Ir, Ru, as well as IPGE and Cr, Ni, suggest that magmatic differentiation may experience the fractional crystallization of olivine and chromite.

Key words: basalt; basaltic andesite; platinum-group elements; Fe-Cu deposit; Shaquanzi; Xinjiang

收稿日期: 2012-02-09 收到, 03-16 改回

基金项目: 中国科学院“项目百人计划”资助项目(KZCX2-YW-BR-09); 国家自然科学基金资助项目(40773070)

第一作者简介: 黄小文(1985-), 男, 博士研究生, 研究方向: 元素及同位素地球化学. E-mail: huangxiaowen2008@live.cn.

通讯作者: 漆亮(1964-), 男, 研究员, 研究方向: 铂族元素及 Re-Os 同位素研究. E-mail: qilianghku@hotmail.com.

中国西北部天山及其邻区广泛发育石炭纪火山岩建造,长期以来倍受关注,对其构造归属及成因认识至今争议仍较大。一种观点认为天山地区石炭纪火山岩是古亚洲洋闭合后,大规模裂谷事件的产物^[1,2];另一种观点认为该火山岩建造是洋壳俯冲产生的岩浆弧^[3~5]。夏林圻等^[2,6~8]认为石炭纪-早二叠世裂谷火山岩系是一个重要的大火成岩省,但尚未得到公认。石炭纪火山岩主要以陆相玄武质熔岩为主,其次为中性和酸性熔岩及同质火山碎屑岩。夏林圻等^[7]及 Xia 等^[8]对天山及邻区的基性熔岩的岩石成因进行了详细研究,认为其并不是来自同一母岩浆,且遭受地壳混染的基性熔岩与其地幔柱源熔体上升喷发所通过的岩石圈性质有关。虽然天山石炭纪裂谷火山岩的年代学数据有限,但已有资料表明石炭纪裂谷火山活动总体上可以延续 48 Ma (354~306 Ma),且具有短程、脉动式喷发的特点。

幔源岩浆的铂族元素体系,在示踪深部地幔及

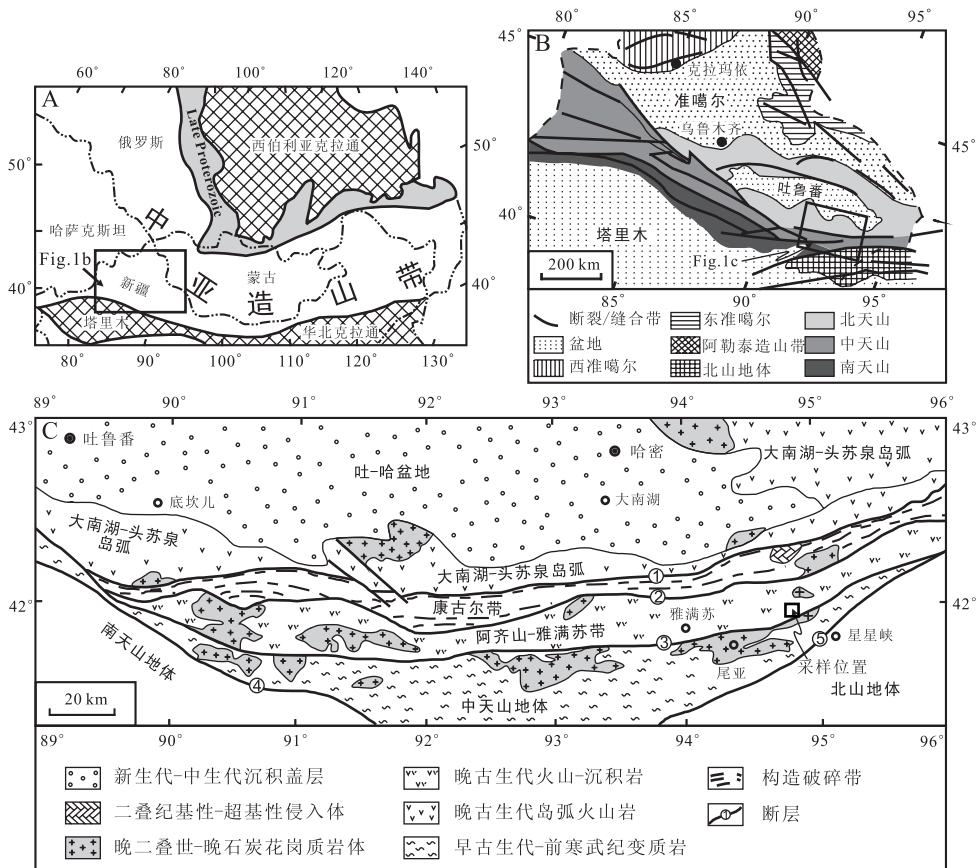
其地球动力学过程,岩石形成过程及其形成的大地构造环境判别等方面,具有非常重要的意义。大量研究表明,幔源岩浆的 PGE 体系,主要受以下因素控制:地幔源区成分特点、部分熔融程度、岩浆分异(包括分离结晶和硫化物分异)和地壳混染^[9~13]。

裂谷火山岩在天山地区分布很广,但由于火山岩中低含量 PGE 的测定方法受限,对火山岩中的 PGE 数据报道较少。

本文研究了东天山沙泉子地区与铜铁矿床有关的火山岩(以下简称沙泉子火山岩)的主量元素、微量元素及铂族元素地球化学特征,从铂族元素地球化学角度来探讨岩浆源区的特点和岩浆演化过程。

1 地质概况

中国西北部的天山造山带是中亚造山带(CAOB)的重要组成部分(图 1A)。它是夹持于北部西伯利亚板块和南部塔里木板块、华北板块(中朝板块)之



①-康古尔-黄山断裂;②-苦水断裂;③-沙泉子断裂;④-托克逊-干沟断裂;⑤-星星峡断裂
①-Kanggurtag-Huangshan fault; ②-Kushi fault; ③-Shaquanzi fault; ④-Tokesun-Gangou fault; ⑤-Xingxingxia fault
图 1 中亚造山带(A)(据文献[19]修改);天山造山带(B)(据文献[20]修改);
东天山地质构造单元划分图(C)(据文献[17,21]修改)

Fig. 1 Relationship of the study area with the Central Asia Orogenic Belt (A)(modified from ref. [19]); Sketch map of geologic tectonic units of the Tianshan Orogenic Belt (B)(modified from ref. [20]); Simplified geological map of East Tianshan (C)(modified from ref. [17, 21]).

间的古亚洲洋在形成、演化和消亡过程中伴随诸多陆块增生、俯冲-消减-碰撞造山和拼合的产物。天山造山带被区域上近东西的断裂分成北天山,中天山及南天山(图 1B)。在早石炭世早期,古生代洋盆已经闭合,板块缝合带成为地壳增厚的地区,发生区域性上隆及与之相伴的部分熔融事件,导致基性侵入体和有关的地壳熔体就位^[2,7,8,14,15]。

东天山位于新疆东部,西起小热泉子,东至甘新交界,面积约 6 万 km²,是中国重要的铜、镍、金、铁、铅锌等大型矿床集中区^[16]。东天山从北到南被区域上近东西向的断裂分成几个主要的构造单元:大南湖-头苏泉岛弧带、康古尔带和阿齐山-雅满苏带(图 1C)。大南湖头苏泉岛弧带位于吐哈盆地南缘的小热泉子向东经康古尔塔格、大南湖、喀尔力克到头苏泉,分布着泥盆-石炭系地层。泥盆系大南湖组、头苏泉组和康古尔塔格组岩石组合为基性火山岩、火山碎屑岩、碎屑岩建造过渡为陆相钙碱性中酸性火山岩。石炭系小热泉子组、恰特卡尔塔格群和底坎儿组岩石组合为火山岩、火山碎屑岩、类复理石和碳酸盐建造^[17]。康古尔带是早期伸展性断裂经变形和变质作用形成的,主要由糜棱岩、构造碎屑岩、构造透镜体和角砾岩组成^[18]。阿齐山-雅满苏带位于苦水断裂和沙泉子断裂之间,主要由早石炭雅满苏组、中石炭沙泉子组、晚石炭统土古土布拉克组和互层的二叠纪的海相和陆相碎屑岩组成^[17]。早石炭统雅满苏组主要以玄武岩和中酸性火山碎屑岩、熔岩为主。中石炭统沙泉子组为一套玄武岩-玄武安山岩-安山岩-英安岩-流纹岩类火山岩-碎屑岩夹碳酸盐岩组合。晚石炭统土古土布拉克组以大量陆相玄武岩喷发为特征。

2 采样及分析方法

火山岩样品采自东天山阿齐山-雅满苏带东段哈密沙泉子铜铁矿区的一个钻孔(图 2)。共采集火山岩样品 14 件,其中玄武岩 9 件,玄武安山岩 3 件,流纹英安岩 2 件。采样深度从 30 m 至 90 m,90 m 以下为矿化带,每隔 1~2 m 取一个样。玄武岩为块状构造,隐晶质结构、辉绿结构,斑晶不发育,部分岩石已硅化和绿泥石化。玄武安山岩为块状构造,结构与玄武岩相同。酸性火山岩为块状构造,隐晶质、霏细结构,主要矿物为长石和石英。火山岩的形成时代大致为中石炭世。本次主要研究玄武岩和玄武安山岩。

主量元素、微量元素及 PGE 的分析均在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室进行。主量元素采用 X 荧光光谱分析,测试仪器为 Axios PW4400,玻璃熔融制样,大部分氧化物的相对误差优于±1%。微量元素(包括稀土元素)采用 ICP-MS 测定,仪器为 Elan DRC-e,详细的分析方法请参见 Qi 等^[23]。具体步骤为:称取 50 mg 样品于带不锈钢外套的 Teflon 密封溶样装置中,加入 1 mL HF 和 0.5 mL HNO₃,加盖密封,在烘箱中于 185℃加热 24 h,取出冷却后,在电热板上低温蒸干,加入 1 mL HNO₃ 再蒸干。最后加入 2 mL HNO₃、1 mL 500 ng/mL Rh 内标和 3 mL H₂O,重新上盖,放入烘箱中于 140℃加热 5 h 溶解残渣。冷却后取 0.4 mL 溶液至 15 mL 离心管中,稀释至 8~10 mL,进行 ICP-MS 测定。大部分元素的相对误差优于±10%。

PGE 分析采用改进的 PGE 前处理方法,即自行设计的 120 mL 不锈钢-Teflon 封闭溶样装置。具体步骤如下:称取 8 g 左右岩石粉末至于 120 mL 的 Teflon 溶样杯中,加入少量水将样品润湿并混合均匀,缓慢加入 20 mL HF,置于电热板上蒸干。然后分别加入 4 mL HF、15 mL HNO₃ 以及适量的¹⁹³Ir、¹⁰¹Ru、¹⁰⁵Pd 和¹⁹⁴Pt 同位素稀释剂,盖上盖子装入不锈钢套内并拧紧密封,放入恒温箱于 185℃加热 24 h。取出后,将溶液蒸干并转化为 HCl 介质,Te 共沉淀法预富集 PGE,然后进行离子交换除去 Cu、Ni、Zr、Hf 等杂质元素^[24]。Pt、Pd、Ir 和 Ru 采用同位素稀释法测定,单同位素 Rh 以¹⁹⁴Pt 为内标测定^[25],测试仪器为 Elan DRC-e ICP-MS,详细的分析方法请参见 Qi 等^[26]。全流程 Ru 空白值为 0.008 ng,Ir 和 Rh 空白值均为 0.009 ng,

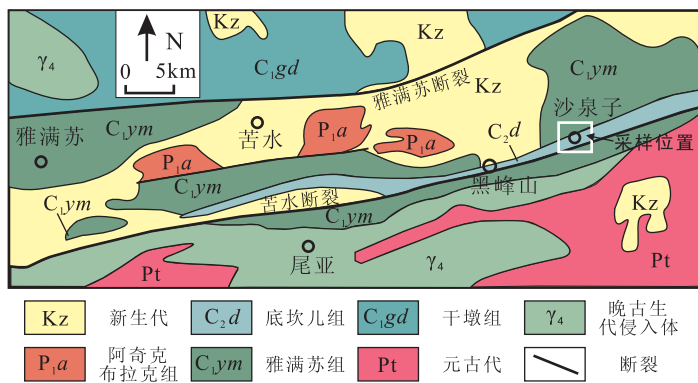


图 2 采样位置图(据文献[22]修改)

Fig. 2 A geological map showing the sampling locations (modified from ref. [22])

Pt 为 0.021 ng, Pd 为 0.033 ng。应用该方法测定的国际标样 WGB-1 和 UMT-1 的结果列于表 1。WGB-1 的测试值略低于推荐值^[27], 但与 Meisel 和 Moser^[28] 的报道值吻合较好, UMT-1 的测试值与推

荐值吻合很好。鉴于火山岩中的 PGE 含量较低, 我们采用增大取样量的方法来提高检测限和精度, 克服块金效应。样品的分析结果见表 2。

表 1 实验全流程空白值、检出限及标样分析测试结果

Table 1 Blank, detection limits and analytical results of PGEs for reference materials, WGB-1 and UMT-1

元素	空白值 (ng)	检出限 (3 σ , ng/g)	WGB-1(辉长岩) (平均值 \pm SD)N=3	Meisel ^①	推荐值 ^②	UMT-1(超基性尾矿) (平均值 \pm SD)N=3	Meisel ^①	推荐值 ^②
Ir	0.009	0.004	0.27 \pm 0.03	0.211 \pm 0.027	0.33 \pm 0.17	8.23 \pm 0.35	8.61 \pm 0.17	8.8 \pm 0.6
Ru	0.008	0.008	0.15 \pm 0.02	0.144 \pm 0.023	0.3	9.83 \pm 0.82	10.14 \pm 0.43	10.9 \pm 1.5
Rh	0.009	0.006	0.18 \pm 0.02	0.234 \pm 0.054	0.32 \pm 0.21	8.89 \pm 0.6	9.12 \pm 0.5	9.5 \pm 1.1
Pt	0.022	0.014	4.95 \pm 0.52	6.39 \pm 3.58	6.1 \pm 1.6	135 \pm 6	146 \pm 44	129 \pm 5
Pd	0.031	0.012	11.8 \pm 0.8	13.9 \pm 2.6	13.9 \pm 2.1	108 \pm 5	113 \pm 4	106 \pm 3

注:① 据参考文献[28];② 据参考文献[27];SD 为标准偏差

表 2 沙泉子铜铁矿床火山岩主量元素、微量元素及铂族元素组成

Table 2 Major, trace and platinum-group elemental compositions of the volcanic rocks from the Shaquanzi Fe-Cu deposit

样品编号	SQZ0901	SQZ0902	SQZ0906	SQZ0907	SQZ0908	SQZ0909	SQZ0910	SQZ0911	SQZ0912
岩石类型	玄武岩							玄武安山岩	
SiO ₂	44.55	48.15	48.01	46.81	46.41	47.53	47.46	55.57	55.51
TiO ₂	1.41	1.44	1.43	1.43	1.45	1.39	1.45	0.73	0.68
Al ₂ O ₃	14.93	15.51	15.44	15.22	15.36	15.12	15.57	14.30	14.16
TFe ₂ O ₃	11.33	9.52	10.30	10.68	10.17	10.38	9.67	6.69	6.58
MnO	0.18	0.15	0.18	0.18	0.17	0.17	0.17	0.11	0.13
MgO	9.25	8.18	7.14	8.91	7.81	7.37	8.99	5.35	5.26
CaO	10.28	7.41	9.10	8.53	7.43	7.59	5.62	6.36	7.12
Na ₂ O	2.38	2.95	2.82	2.15	2.22	2.14	2.62	2.84	3.02
K ₂ O	0.93	2.05	1.22	1.52	1.51	1.68	2.24	1.96	1.86
P ₂ O ₅	0.33	0.35	0.35	0.35	0.36	0.34	0.36	0.21	0.19
LOI	5.90	4.24	4.83	4.58	7.98	7.58	6.20	5.69	6.31
总量	101.47	99.95	100.81	100.36	100.86	101.29	100.35	99.81	100.81
Mg [#]	62	63	58	63	61	59	65	62	62
Ba	163	414	310	296	582	491	631	400	409
Rb	20.3	48.0	23.4	30.1	31.2	35.5	44.3	36.7	33.8
Sr	416	319	483	431	488	491	366	374	349
Y	23.0	24.6	24.4	24.4	24.0	23.7	24.5	13.9	12.4
Zr	144	155	153	154	153	147	160	95.1	98.7
Nb	6.10	6.85	6.47	6.45	6.46	6.05	6.74	3.80	3.64
Th	2.31	2.31	2.25	2.13	2.09	2.09	2.27	1.57	1.45
Pb	14.7	15.9	19.2	20.5	24.1	32.1	18.6	20.8	19.0
Ga	16.9	16.5	18.3	16.8	15.8	17.4	16.2	16.9	17.0
Zn	126	129	117	149	124	137	153	96.3	82.5
Cu	43.8	69.4	49.8	61.3	56.4	52.2	79.8	13.0	9.53
Ni	203	100	125	182	136	144	107	158	144
V	220	229	225	228	215	225	226	157	147
Cr	587	345	407	522	420	467	373	509	463
Hf	3.27	3.78	3.71	3.64	3.63	3.45	3.85	2.72	2.54
Cs	1.53	2.38	1.29	1.65	4.70	3.28	1.76	2.27	1.08
Sc	27.5	27.8	27.0	27.5	25.4	25.9	27.5	17.3	15.6
Ta	0.48	0.66	0.53	0.50	0.49	0.46	0.52	0.28	0.25
Co	52.2	43.6	42.8	49.8	44.3	43.9	45.8	30.0	27.6
U	0.72	0.79	0.75	0.73	0.67	1.46	0.84	0.68	0.63
Sn	6.46	3.16	3.67	14.2	4.35	6.38	3.34	4.71	51.3
Mo	1.14	0.74	0.91	1.60	0.71	0.95	0.71	0.40	0.54
La	13.4	15.2	16.3	15.8	14.7	15.6	16.1	13.5	12.3
Ce	32.5	35.8	37.5	37.3	35.6	36.3	38.0	28.9	26.5
Pr	4.17	4.90	5.07	4.92	4.83	4.98	5.08	3.71	3.44
Nd	18.3	22.0	22.1	22.5	21.7	22.0	22.7	16.1	15.0
Sm	4.17	4.88	4.85	5.04	4.82	5.07	4.95	3.51	3.09
Eu	1.39	1.56	1.67	1.67	1.69	1.73	1.56	1.20	1.09

续表 2

样品编号	SQZ0901	SQZ0902	SQZ0906	SQZ0907	SQZ0908	SQZ0909	SQZ0910	SQZ0911	SQZ0912
岩石类型	玄武岩							玄武安山岩	
Gd	4.55	5.17	5.08	5.42	5.19	5.25	5.39	3.54	3.01
Tb	0.68	0.80	0.79	0.80	0.76	0.78	0.80	0.49	0.43
Dy	3.97	4.71	4.90	4.83	4.63	4.67	4.63	2.72	2.31
Ho	0.83	0.99	0.99	0.99	0.95	0.96	0.96	0.56	0.46
Er	2.20	2.57	2.57	2.58	2.41	2.53	2.55	1.38	1.24
Tm	0.33	0.39	0.39	0.39	0.37	0.36	0.40	0.20	0.19
Yb	2.13	2.61	2.54	2.51	2.43	2.40	2.56	1.37	1.18
Lu	0.31	0.37	0.37	0.35	0.36	0.37	0.38	0.20	0.17
Ir	0.065	0.042	0.035	0.051	0.047	0.039	0.045	0.093	0.082
Ru	0.091	0.058	0.066	0.071	0.060	0.065	0.045	0.082	0.056
Rh	0.044	0.029	0.026	0.041	0.033	0.035	0.025	0.078	0.076
Pt	0.98	0.81	0.70	0.77	0.74	0.71	0.64	1.26	1.35
Pd	0.75	0.71	0.50	0.69	0.80	0.56	0.62	1.28	1.26
ΣPGE	1.93	1.64	1.33	1.62	1.68	1.40	1.38	2.79	2.82
PPGE/IPGE	11.4	11.7	9.5	8.9	10.9	9.1	11.0	10.0	12.2
Pd/Ir	11.5	16.9	14.4	13.3	16.9	14.2	13.7	13.8	15.3
Cu/Pd	58297	97970	99691	89399	70497	93866	129262	10192	7589
Pt/Pd	1.31	1.14	1.41	1.11	0.93	1.27	1.04	0.98	1.08
Ti/Y	368	352	351	351	363	353	356	315	328
(Th/Nb) _{PM}	3.13	2.79	2.87	2.73	2.68	2.87	2.79	3.42	3.30
(Th/Yb) _{PM}	6.02	4.90	4.91	4.71	4.78	4.84	4.91	6.39	6.82

注:主要氧化物含量为%,微量元素为 μg/g,铂族元素为 ng/g;LOI 为烧失量;Mg[#] = 100 * Mg²⁺ / (Mg²⁺ + Fe²⁺),其中 Mg²⁺ 和 Fe²⁺ 均代表各自的摩尔分数,假设 FeO=0.9TFe₂O₃;原始地幔值均引自文献[29]

3 分析结果

3.1 主量及微量元素

由表 2 可见,沙泉子火山岩主要氧化物的含量变化较小,玄武岩和玄武安山岩的 SiO₂ 含量分别为 44.55%~48.15% 和 55.51%~55.57%,MgO 含量分别为 7.14%~9.25% 和 5.26%~5.35%,Mg[#] 分别为 58~65 和 62。玄武岩和玄武安山岩的 TiO₂ 含量很低,分别为 1.39%~1.45% 和 0.68%~0.73%,Ti/Y 值分别为 351~368 和 315~328,均小于 500,属于低 Ti 玄武岩系列^[8]。玄武安山岩的 Cr、Ni 含量与玄武岩的相当,但是 Cu 含量明显降低。火山岩的 MgO 和 Al₂O₃、CaO/Al₂O₃、TiO₂、V 无明显相关关系(图 3A-D),MgO 和 Cr、Ni 表现为弱的正相关(图 3E、F)。

沙泉子玄武岩和玄武安山岩表现出相似的球粒陨石标准化稀土元素分配模式,均为轻稀土富集型(图 4A、B)。玄武岩和玄武安山岩均未表现出 Eu 异常,说明在岩浆演化过程并未发生过斜长石的分离结晶。玄武岩的稀土总量高于玄武安山岩,但玄武安山岩的轻重稀土分馏略大于玄武岩。在微量元素蛛网图上(图 4C、D),二者均表现出明显的 Th、Nb、Ta 亏损,K、Ba 相对富集,玄武安山岩的亏损程度略大于玄武岩。

3.2 铂族元素

3.2.1 PGE 含量及 PGE 与 MgO 的关系

沙泉子铜铁矿床火山岩的 PGE 含量总体较低,且玄武岩的 PGE 含量明显低于玄武安山岩(表 2),二者的 Pd/Ir 和 Pt/Pd 值均在较小范围内变化,其中 Pd/Ir 值分别为 11.5~16.9 和 13.8~15.3,Pt/Pd 值分别为 0.93~1.41 和 0.98~1.08,二者 Cu/Pd 值分别为 58300~129300 和 7589~10192。玄武岩的 Ir、Rh 随 MgO 含量的降低而降低(图 5A、C),Ru、Pt、Pd 与 MgO 无明显相关关系(图 5B、D、E)。玄武安山岩的 Pt 与 MgO 表现为负相关(图 5D),其他 PGE 与 MgO 表现为正相关(图 5A、B、C、E)。火山岩的 Pd/Ir、Cu/Pd 和 Pt/Pd 与 MgO 无明显相关关系(图 5F-H)。

3.2.2 原始地幔标准化模式

根据 Chazey 和 Neal^[30]的投图方法,将 Cr、Ni 放在 Ir 的左边,Y 放在 Cu 的右边,PGE 从左到右按照金属熔点逐渐降低的顺序排列(Ir>Ru>Rh>Pt>Pd)进行原始地幔标准化投图(图 6)。由图 6 可知,所有火山岩的 PGE 含量均小于原始地幔值,显示出明显的 PGE 亏损。玄武岩和玄武安山岩均显示相似的原始地幔标准化 PGE 配分曲线,即 PPGE 相对于 IPGE 明显富集。玄武岩和玄武安山岩的原始地幔 PGE 配分曲线经 Pd-Cu-Y 元素表现为微弱的上凸或下凹,说明 Cu 可能发生了一定程度的活化。

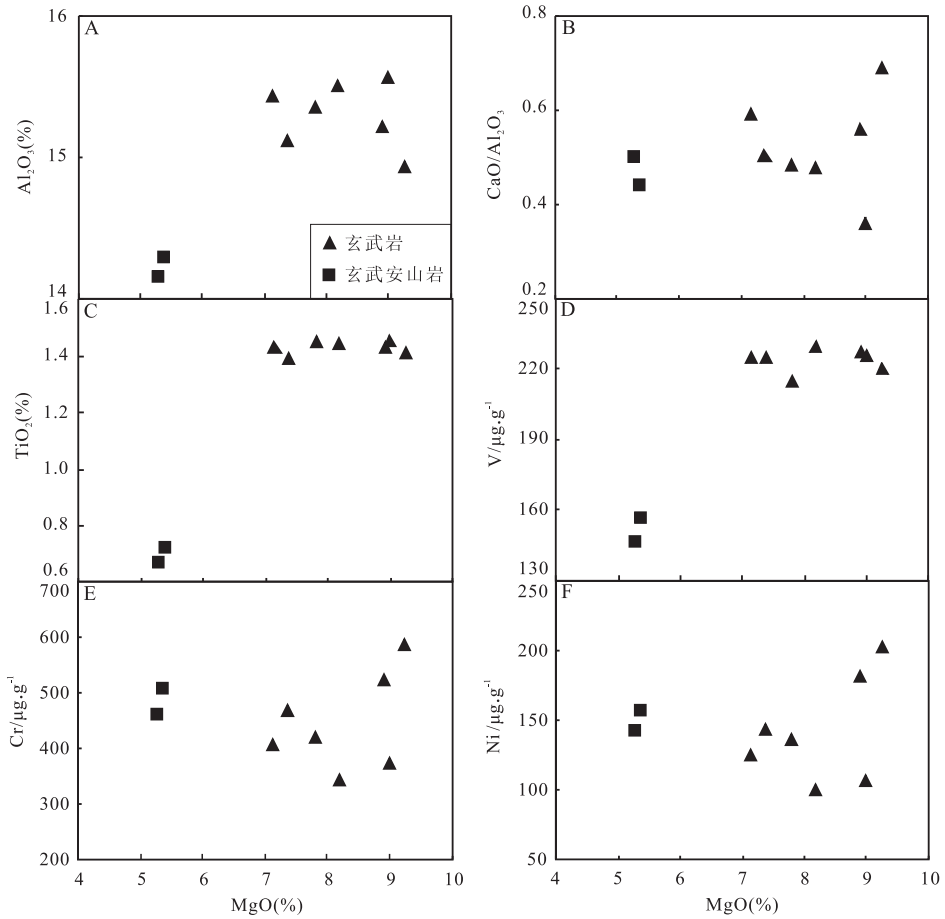
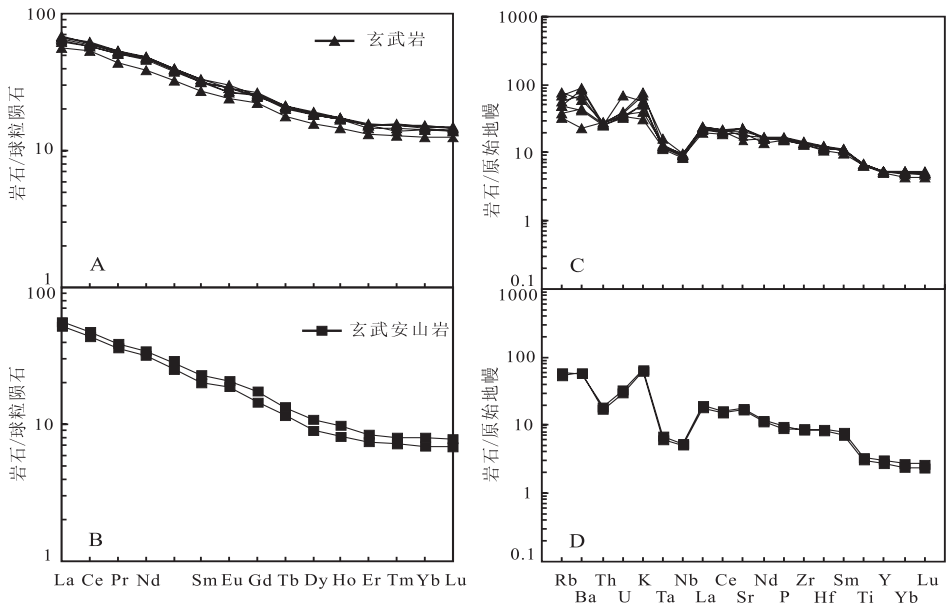


图3 沙泉子火山岩 MgO 与选择性的氧化物和微量元素相关关系图

Fig. 3 Harker diagram showing variations of MgO vs. selected major oxides and trace elements for the Shaquanzi volcanic rocks



球粒陨石和原始地幔值均引自文献[29]

Both the chondrite values and primitive values are from ref. [29]

图4 沙泉子火山岩稀土元素球粒陨石标准化分布型式图及原始地幔标准化微量元素蛛网图

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized incompatible trace element patterns for the Shaquanzi volcanic rocks

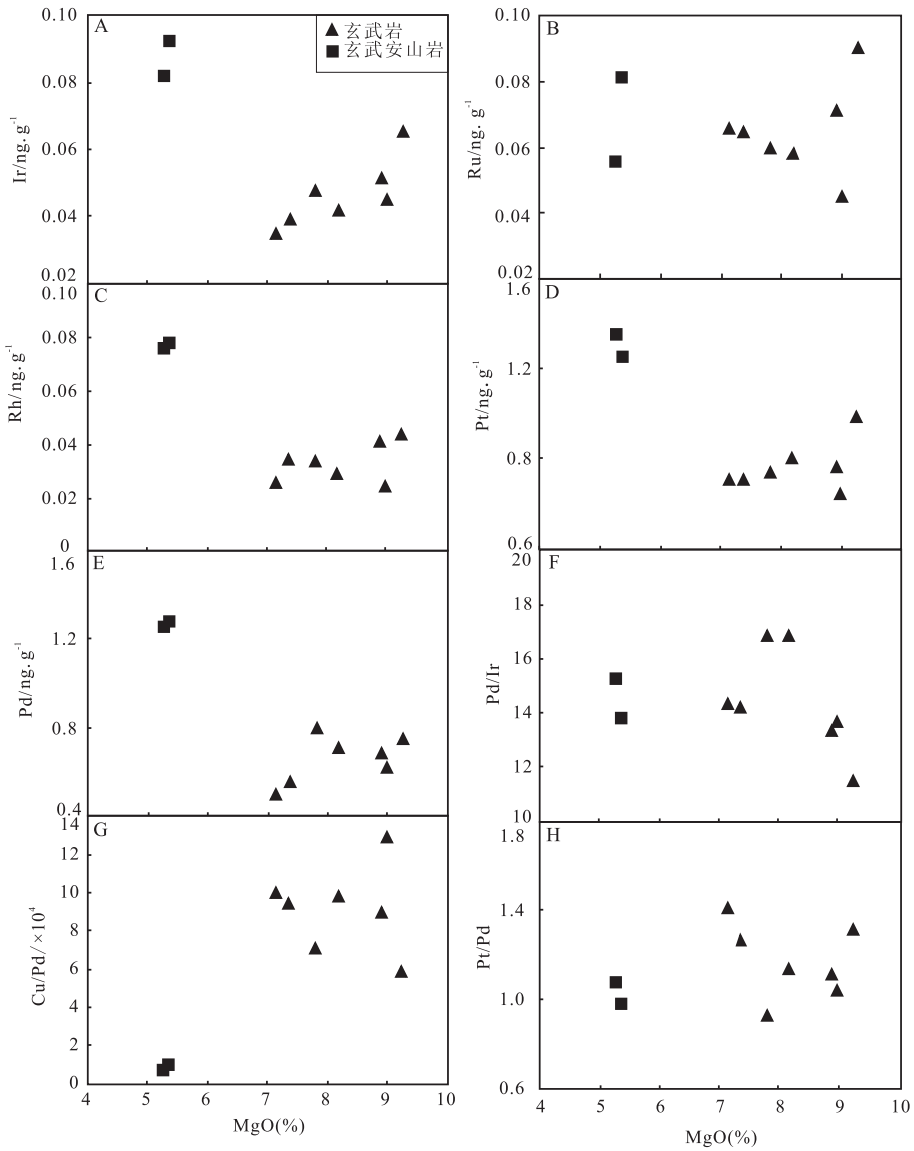


图 5 沙泉子火山岩 PGE、Pd/Ir、Cu/Pd、Pt/Pd 与 MgO 相关关系图

Fig. 5 Plots of PGE, Pd/Ir, Cu/Pd and Pt/Pd against MgO for the Shaquanzi volcanic rocks

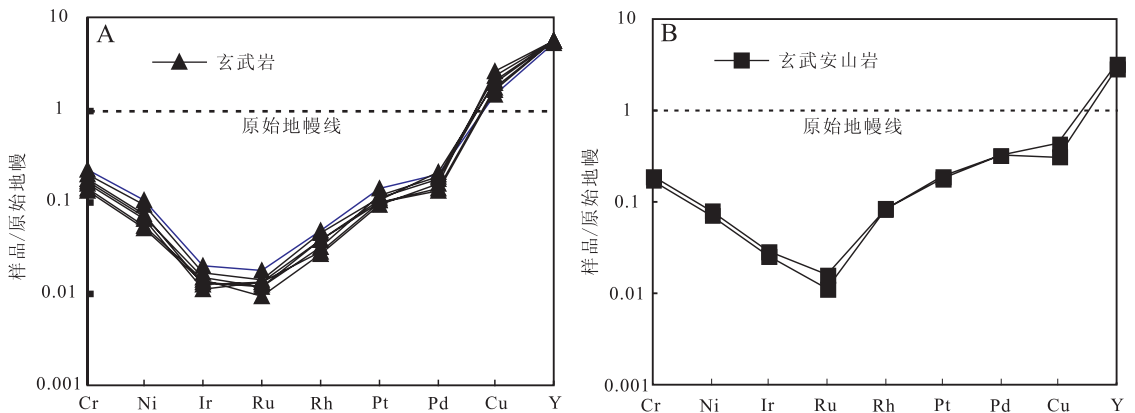


图 6 沙泉子火山岩原始地幔标准化 Cr-Ni-PGE-Cu-Y 配分模式, 标准值引自 McDonough 和 Sun^[31]

Fig. 6 Primitive mantle-normalized Cr-Ni-PGE-Cu-Y patterns for the Shaquanzi volcanic rocks, the normalized values are from McDonough and Sun^[31]

3.2.3 Cr、Ni 与 PGE 的关系及 IPGE 各元素之间的关系 玄武岩和玄武安山岩的 PGE 随 Cr、Ni 变化表现出相同的趋势(图 7)。玄武岩和玄武安山岩的 Ir、Ru、Rh 与 Cr 和 Ni 均表现出明显的正相关关系(图 7A-C, F-H), Pt、Pd 与 Cr、Ni 表现出弱的相关性(图 7D, E, I, J)。沙泉子玄武岩的 Cu/Pd 值

与 Cr、Ni 表现出负相关(图 8)。玄武岩和玄武安山岩的 Ir 与 Ru 表现出弱的正相关关系(图 9A), Rh 与 Ir、Ru 表现出明显的正相关(图 9B, C), 说明 Ir、Ru、Rh 可能受相同的结晶相控制, 在岩浆分异过程中均表现出相同的地球化学行为。

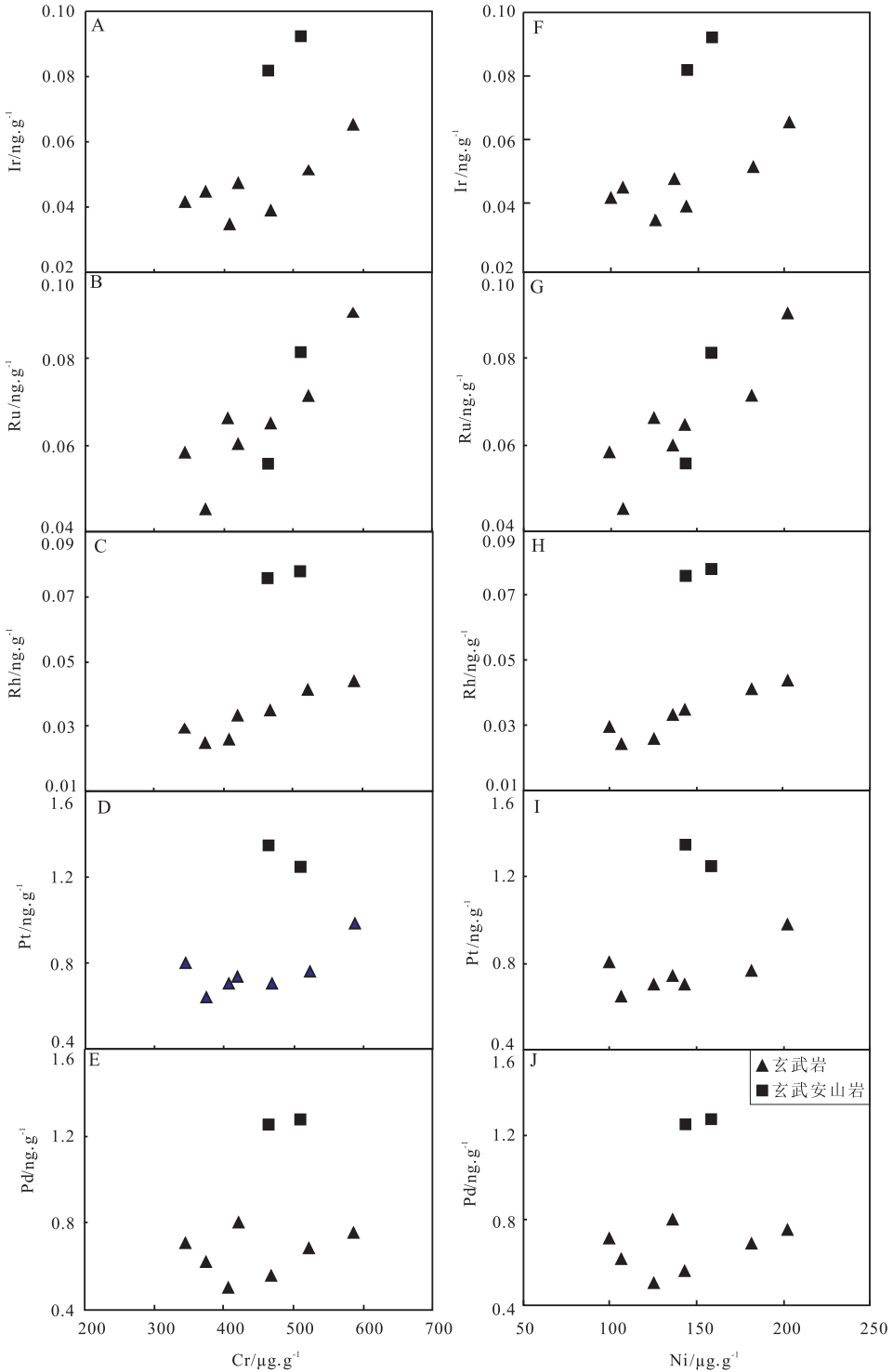


图 7 沙泉子火山岩 PGE 与 Cr、Ni 相关关系图

Fig. 7 PGE plot against Cr and Ni for the Shaquanzi volcanic rocks

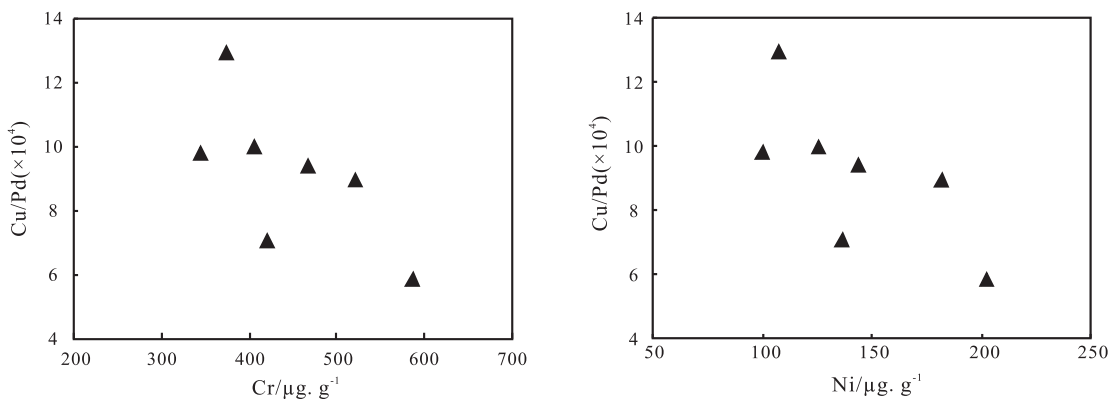


图8 沙泉子玄武岩 Cu/Pd 值与 Cr、Ni 相关关系图
Fig. 8 Cu/Pd ratios plot against Cr and Ni for the Shaquanzi basalts

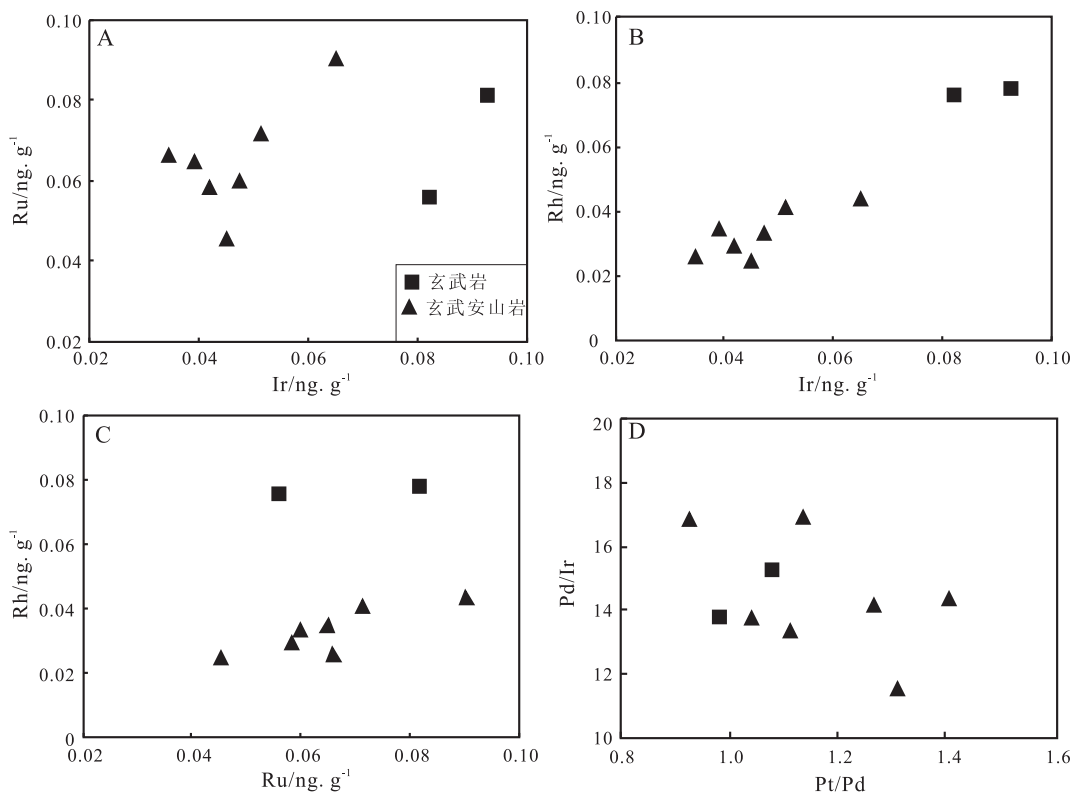


图9 沙泉子火山岩 IPGE-IPGE 相关关系(A-C)及 Pd/Ir-Pt/Pd 相关关系(D)图

Fig. 9 The internal relation among Ir-group PGE and Pd/Ir versus Pt/Pd diagram for the Shaquanzi volcanic rocks

4 讨论

4.1 地壳混染

由于上地壳和中等部分熔融的下地壳富集轻稀土元素(LREE)、大离子亲石元素(LILE)和亏损高场强元素(HFSE),所以地壳物质通常具有高 La/Nb、高 Ba/Nb 和低 La/Ba 值特点^[32,33]。通常,很高的原始地幔标准化 $(Th/Nb)_{PM} (\gg 1)$ 和 $(Th/Yb)_{PM}$ 值,高 La/Nb 值,Nb、Ta、Ti 负异常的微量元素分配型式,是受到地壳混染的大陆玄武岩最鲜明特点^[8]。沙泉子火山岩的 $(Th/Nb)_{PM}$ 值大约为 3,

$(Th/Yb)_{PM}$ 值为 5~7,说明沙泉子火山岩经受了一定程度的地壳混染。其明显的 LILE 和 LREE 的相对富集以及 HFSE 的相对亏损(图 4),也进一步说明沙泉子火山岩可能遭受了一定程度的地壳混染^[34,35]。关于地壳混染的程度及地壳混染对 PGE 的影响非本文重点,在此不做重点讨论。

4.2 地幔源区和部分熔融

玄武岩和玄武安山岩表现出相似的稀土、微量及铂族元素分配模式,说明它们可能来自同一地幔源区。由于缺少原始岩浆组分,且地壳混染程度未知,因此无法精确计算地幔源区的组成及部分熔融的

程度。幔源岩浆的 PGE 组成主要取决于地幔源区的成分特点、PGE 的赋存状态以及部分熔融程度。

PGE 为高度亲硫元素,硫化物被认为是控制地幔和玄武岩中 PGE 含量的首要因素,而 Cu/Pd 值则被认为是硫化物饱和的灵敏指示剂^[36,37]。沙泉子地区玄武岩的 Cu/Pd 值为 58 300~129 300,平均 91 300,远高于原始地幔(7 000~10 000)^[38,39],表明有少量硫化物残留于地幔源区或岩浆上升过程中发生过硫化物熔离^[40]。玄武安山岩的 Cu/Pd 值为 7 600~10 000,与原始地幔值接近,但并不能认为玄武安山岩的原始岩浆未发生分异,因为从图 6B 可以看出 Cu 出现弱的负异常,可能是 Cu 发生了活化而导致 Cu 的亏损,从而造成 Cu/Pd 值降低。已有研究认为,地幔中硫化物只在高程度部分熔融(>25%)条件下才可能完全溶解进入熔体^[11]。Said 等^[9]对 Kambalda 组的超镁铁火山岩的研究表明,该组上部 PGE 富集的高 MgO 玄武岩可能比下部 PGE 亏损的低 MgO 玄武岩(部分熔融程度<10%)具有更高的部分熔融程度。本次研究涉及的玄武岩和玄武安山岩样品的 MgO 含量比较低,且 PGE 明显亏损,暗示其可能为地幔低程度部分熔融(<10%)的产物,因此推测部分熔融过程中有少量硫化物残留于地幔。假定 Pd 总分配系数完全由残留物中的硫化物控制,且 Pd 的 $D_{\text{硫化物/熔体}} = 10000$,则约有 0.001% 的硫化物残余于地幔。假设地幔源在组成上与原始地幔接近,且部分熔融熔体中 S 的溶解量为 1000 $\mu\text{g/g}$ ^[40],那么沙泉子火山岩的原始岩浆中 S 的含量小于 100 $\mu\text{g/g}$,为严重亏损 S 的岩浆。

4.3 硫化物熔离

由于岩浆结晶过程中,Cu 和 Zr 相对于橄榄石和斜长石有着相似的不相容性,因此随着结晶作用的进行,Cu 和 Zr 含量将等比例升高,而 Cu/Zr 值则基本不变(接近 1),但岩浆一旦达到 S 饱和,发生硫化物熔离,Cu/Zr 值将明显下降。因此,Cu/Zr 值被认为是亲铜元素亏损的良好指示剂^[41~43]。沙泉子玄武岩和玄武安山岩的 Cu/Zr 值分别为 0.3~0.5 和 0.1~0.14,远小于 1,说明它们均经历了亲铜元素的严重亏损。

由于 PGE 各元素在硅酸盐矿物/玄武质岩浆中的分配系数远小于其在硫化物熔浆/玄武质岩浆中的分配系数^[44~49],因此 S 不饱和条件下的分离结晶和 S 饱和条件下硫化物熔离所导致的残余岩浆中 PGE 组成将有显著的区别。在硫化物熔离过程中 Ir 和 Pd 表现为相似的相容性^[50, 51],Pd 比 Cu 更相容,因此经历硫化物熔离的玄武质岩浆表现为稳定

的 Pd/Ir 值和 Pt/Pd 值,较高而变化较大的 Cu/Pd 值。相反,在 S 不饱和的岩浆结晶分异过程中 Pd 则表现为不相容性溶解在岩浆中,而 Ir 则表现为相容富集在橄榄石和铬铁矿中,表现为 Cu/Pd 值稳定而 Pd/Ir 值逐渐增加。

沙泉子玄武岩的 Pd/Ir 值并未随 MgO 含量的降低而增大(图 5F),而是基本保持稳定,不符合 S 不饱和条件下硅酸盐和氧化物为主的结晶分异作用特点。而其较稳定的 Pd/Ir 和 Pt/Pd 值(分别为 11.5~16.87 和 0.93~1.31)较高和变化较大的 Cu/Pd 值(58 297~129 262),说明岩浆中的 S 达到过饱和,在上升过程发生过硫化物熔离作用。但是,玄武岩的 Cu/Pd 值与 MgO 表现为弱的负相关关系(图 5G),说明硅酸盐和氧化物的结晶分异作用对 Cu、Pd 的分馏有一定影响。因此,沙泉子玄武岩和玄武安山岩的 Cu/Zr 和 Cu/Pd 值变化表明,岩浆在上升或侵位过程中可能发生过硫化物的熔离作用。

4.4 岩浆分异

沙泉子火山岩的 MgO 和 Al_2O_3 、 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 TiO_2 、V 无明显相关关系(图 3A-D),MgO 和 Cr、Ni 表现为弱的正相关(图 3E、F),说明原始岩浆可能发生了橄榄石和铬铁矿的结晶分异。沙泉子玄武岩的 Cu/Pd 值与 Cr、Ni 含量呈负相关(图 8),也说明了原始岩浆可能同时经历了硫化物分异以及橄榄石和铬铁矿的分异。

已有很多研究表明 Ir 和 Ru 在分离结晶过程中表现出相容性行为^[37,52~56],而 Rh 的相容性行为则报道较少^[54,57]。Rh 的地球化学行为比较复杂,Amassé 等^[57]认为 Rh 的地球化学行为受氧逸度(f_{O_2})影响,当 $f_{\text{O}_2} < 10^{-2}$ Pa 时,Rh 以 Rh^{2+} 形式存在,其行为与 Pd 相似;而当 $f_{\text{O}_2} > 10^{-2}$ Pa 时, Rh^{3+} 为稳定形态,并容易进入尖晶石。因此,Ir、Ru 和 Rh 在岩浆分异过程受何种相控制仍然存在争议。

4.4.1 橄榄石分异对 IPGE 的影响 研究认为,Ir 既可以固溶体形式进入橄榄石^[44,46,58],表现出相容性,也可以铂族矿物(PGM)(比如硫钨铁矿)或 PGE 合金的形式存在于橄榄石中^[12,52,59,60]。前者认为,在大多数玄武岩所处的氧逸度条件下,Ir 由于具有较高的溶解度而无法形成 Ir-Os 合金沉淀下来,Ir 可能以 Ir^{2+} 的形式存在于硅酸盐熔体中,而以类质同像置换 Fe-Mg 硅酸盐矿物中的 Mg^{2+} ^[58]。而后者认为 Ir 在岩浆演化的早期阶段以 Ir-Os 合金的形式沉淀下来,作为橄榄石的结晶核^[59]。橄榄石及辉石中具有非常低的 Ir、Os 含量^[61~63],说明可能是一些微矿物相而不是这些主要的矿物相控制了 IPGE

的相容性,这与 Rehkämper 等^[64]的模拟计算结果相一致。Barnes 和 Fiorentini^[12]的研究表明,最高 Ir 含量样品与 MgO 呈正相关,而最低 Ir 含量(<1 ng/g)的样品与 MgO 不相关,据此认为橄榄石并不是控制 Ir 的主要矿物相,IPGE 的含量主要受它们在岩石中的溶解度限制。

沙泉子火山岩的 Ir 随 MgO 含量的降低而降低(图 5A),表明 Ir 在岩浆结晶分异过程中表现出相容性行为,与世界上其他地区的玄武质岩石特征相似^[10~12,37,65]。Ru 与 MgO 无明显相关关系(图 5B),Rh 与 MgO 呈弱的正相关(图 5C)。Ir 和 Ru 呈弱的正相关(图 9A),Rh 和 Ir、Ru 呈明显正相关(图 9B、C),说明 Rh 和 Ir、Ru 可能受相同的结晶相控制。Ir、Ru、Rh 与 Ni 表现出良好的正相关关系(图 7),且 Ir 相对于其他 PGE 并未出现明显的亏损,Ir 的含量变化小,说明 IPGE 可能以类质同像形式而非 PGM 包裹体或者 PGE 合金形式进入橄榄石,橄榄石的结晶分异控制了 IPGE 的相容性。

4.4.2 铬铁矿或者尖晶石的分异对 IPGE 的影响

与 IPGE 在橄榄石中的存在形式相似,IPGE 在铬铁矿中也可能以多种形式存在。IPGE 可能以固溶体的形式存在于铬铁矿晶格中,铬铁矿控制着 IPGE 特别是 Ru 的相容性^[45,66,67]。而且铬铁矿中 Ru 的相容性与氧逸度呈正相关^[68]。另一种观点则认为,Ir、Ru、Rh 并没有进入铬铁矿或尖晶石晶格,而是以 PGM 或合金的形成存在于这些矿物中^[52,69~76]。铬铁矿颗粒的激光剥蚀原位分析(LA-ICP-MS)也表明铬铁矿颗粒中并没有检测到 PGE^[60,77~79],因此推测 PGE 是以游离的富 PGE 相、PGM 或 PGE 合金的形式存在于铬铁矿中。

若 Ru 与 Cr 存在相关关系,则说明铬铁矿或尖晶石能够容纳 Ru,而若 Ir、Os 和 Cr 不存在相关关系,则说明 Ir 和 Os 可能以 Ir-Os 合金的形式存在,而与铬铁矿无关^[60,80~83]。若有部分 PGE 以合金或者 PGM 形式进入铬铁矿或尖晶石,那么大多数或者全部 PGE 都会与 Cr 有不同程度的相关^[9]。沙泉子火山岩的 Ir、Ru、Rh 与 Cr 表现为明显的正相关(图 7A、C、D),而 Pt、Pd 与 Cr 无明显的相关关系(图 7E、F),且 Ru 未表现出明显的负异常,说明 Ir、Ru、Rh 可能主要以类质同像而不是以 PGM 或合金的形式进入铬铁矿。铬铁矿或者尖晶石的结晶分异控制了 IPGE 的相容性。

4.4.3 岩浆分异中 Pt、Pd 的行为 岩浆分异过程中 Pt、Pd 的地球化学行为主要受其在硅酸盐、氧化物、金属及硫化物相中的溶解能力制约,而硫化物饱

和与否是最为关键的制约因素^[40]。Pt、Pd 与 MgO 无相关关系(图 5D、E)以及 Pt、Pd 与 Cr、Ni 呈弱负相关关系(图 7E、J),均说明硫化物的分异而不是硅酸盐或者氧化物的分异控制了 Pt、Pd 的含量。沙泉子玄武岩和玄武安山岩的 Pt/Pd 值分别为 0.93~1.31 和 0.98~1.08,均低于原始地幔相应值(1.82)^[31],说明了 Pt、Pd 发生了分馏。沙泉子火山岩的 Pt/Pd 与 MgO 无相关关系(图 5H),且 Pt/Pd 与 Pd/Ir 表现出弱的负相关(图 9D),说明硅酸盐矿物的分离结晶作用对 Pt、Pd 的分馏无影响,Pt/Pd 的分馏主要是 Pt、Pd 的亲硫性差异导致的^[84]。

5 结 论

(1)沙泉子火山岩较低的 MgO 含量以及铂族元素严重亏损,暗示其可能形成于较低的部分熔融程度($<10\%$),原始岩浆为 S 相对亏损的岩浆。较高的 Cu/Pd 值和低的部分熔融程度说明可能有少量硫化物($\sim 0.001\%$)残留于地幔;

(2)沙泉子火山岩较低的 Cu/Zr 值说明原始岩浆发生了亲铜元素的严重亏损。沙泉子玄武岩中较稳定的 Pd/Ir 和 Pt/Pd 值,较高且变化较大的 Cu/Pd 值,说明岩浆在上升或侵位过程中达到过 S 饱和而发生了硫化物熔离作用;

(3)沙泉子玄武岩 Ir 表现为相容性,其他 PGE 无明显相容性。Rh 与 Ir、Ru 呈显著正相关,说明 Ir、Ru 和 Rh 可能受相同的相控制。IPGE 与 Cr(或 Ni)表现出明显的相关关系,说明了原始岩浆可能经历了橄榄石和铬铁矿的分异。Pt、Pd 的含量主要受控于硫化物的分异,Pt、Pd 的分馏主要是它们的亲硫性差异导致的。因此,原始岩浆可能既经历了硫化物的分异又经历了橄榄石和铬铁矿的分异。

致 谢:野外工作得到新疆地矿局第六地质大队邓刚总工程师等的大力支持,论文写作过程中与香港大学杨胜洪博士,中国科学院地球化学研究所宋谢炎研究员进行了有益探讨,在此一并致谢!

参考文献 (References):

- [1] 顾连兴,胡受奚,于春水,李宏宇,肖新建,严正富. 东天山博格达造山带石炭纪火山岩及其形成地质环境[J]. 岩石学报, 2000, 16(3): 305-316.
Gu Lianxing, Hu Shouxi, Yu Chunshui, Li Hongyu, Xiao Xinjian, Yan Zhenfu. Carboniferous volcanites in the Bogda orogenic belt of eastern Tianshan: Their tectonic implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2000, 16(3): 305-316. (in Chinese with English abstract)

- [2] 夏林圻, 张国伟, 夏祖春, 徐学义, 董云鹏, 李向民. 天山古生代洋盆开启, 闭合时限的岩石学约束——来自震旦纪、石炭纪火山岩的证据[J]. 地质通报, 2002, 21(2): 55—62.
Xia Linqi, Zhang Guowei, Xia Zuchun, Xu Xueyi, Dong Yunpeng, Li Xiangmin. Constraints on the timing of opening and closing of the Tianshan Paleozoic oceanic basin: Evidence from Sinian and Carboniferous volcanic rocks[J]. Geol. Bull. China, 2002, 21(2): 55—62. (in Chinese with English abstract)
- [3] 左国朝, 梁广林, 陈俊, 郑勇, 高俊宝, 邢德超, 李绍雄. 东天山觉罗塔格地区夹白山一带晚古生代构造格局及演化[J]. 地质通报, 2006, 25(1): 48—57.
Zuo Guochao, Liang Guanglin, Chen Jun, Zheng Yong, Gao Junbao, Xing Dechao, Li Shaoxiang. Late Paleozoic tectonic framework and evolution in the Jiabaishan area, Qoltag, eastern Tianshan Mountains, Northwest China[J]. Geol. Bull. China, 2006, 25(1): 48—57. (in Chinese with English abstract)
- [4] 马瑞士, 舒良树, 孙家齐. 东天山构造演化与成矿[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 152—170.
Ma Ruishi, Shu Liangshu, Sun Jiaqi. Tectonic evolution and mineralization of eastern Tianshan[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997: 152—170. (in Chinese)
- [5] 李锦轶, 王克卓, 李文铅, 郭华春, 宋彪, 王瑜, 莫申国, 赵子然, 朱志新, 潘成泽. 东天山晚古生代以来大地构造与矿产勘查[J]. 新疆地质, 2002, 20(4): 295—301.
Li Jingyi, Wang Kezhao, Li Wenqian, Guo Huachun, Song Biao, Wang Yu, Mo Shenguo, Zhao Ziran, Zhu Zhixin, Pan Chenze. Tectonic evolution since the late Paleozoic and mineral prospecting in eastern Tianshan Mountains, NW China[J]. Xinjiang Geology, 2002, 20(4): 295—301. (in Chinese with English abstract)
- [6] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 李向民, 马中平, 王立社. 天山石炭纪大火成岩省与地幔柱[J]. 地质通报, 2004, 23(9): 903—910.
Xia Linqi, Xia Zhuchun, Xu Xueyi, Li Xiangmin, Ma Zhongping, Wang Lishe. Carboniferous Tianshan igneous megaprovince and mantle plume[J]. Geol. Bull. China, 2004, 23(9): 903—910. (in Chinese with English abstract)
- [7] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 李向民, 马中平. 天山及邻区石炭纪—早二叠世裂谷火山岩岩石成因[J]. 西北地质, 2008, 41(4): 1—68.
Xia Linqi, Xu Xueyi, Xia Zhuchun, Li Xiangmin, Ma Zhongping. Petrogenesis of Carboniferous-early Permian rift-related volcanic rocks in the Tianshan and neighboring areas, northwestern China[J]. Northwest Geology, 2008, 41(4): 1—68. (in Chinese with English abstract)
- [8] Xia L Q, Xia Z C, Xu X Y, Li X M, Ma Z P. Relative contributions of crust and mantle to the generation of the Tianshan Carboniferous rift-related basic lavas, northwestern China[J]. J. Asian Earth Sci., 2008, 31(4-6): 357—378.
- [9] Said N, Kerrich R, Maier W D, McCuaig C. Behaviour of Ni-Pge-Au-Cu in mafic-ultramafic volcanic suites of the 2.7 Ga kambalda sequence, kalgoorlie terrane, yilgarn craton[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 2011, 75(10): 2882—2910.
- [10] Momme P, Tegner C, Brooks K C, Keays R R. The behaviour of platinum-group elements in basalts from the East Greenland rifted margin [J]. Contrib. Mineral. Petrol., 2002, 143(2): 133—153.
- [11] Maier W D, Barnes S J, Marsh J S. The concentrations of the noble metals in Southern African flood-type basalts and MORB: Implications for petrogenesis and magmatic sulphide exploration[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 2003, 146(1): 44—61.
- [12] Barnes S J, Fiorentini M L. Iridium, ruthenium and rhodium in komatiites: Evidence for iridium alloy saturation [J]. Chem. Geol., 2008, 257(1-2): 44—58.
- [13] Fiorentini M L, Barnes S J, Leshner C M, Heggie G J, Keays R R, Burnham O M. Platinum group element geochemistry of mineralized and nonmineralized komatiites and basalts[J]. Econ. Geol., 2010, 105(4): 795—823.
- [14] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 李向民, 马中平, 王利社. 天山古生代洋陆转化特点的几点思考[J]. 西北地质, 2002, 35(4): 9—20.
Xia Linqi, Xia Zhuchun, Xu Xueyi, Li Xiangmin, Ma Zhongping, Wang Lishe. Some thoughts on the characteristic of Paleozoic ocean-continent transition from Tianshan mountains [J]. Northwest Geology, 2002, 35(4): 9—20. (in Chinese with English abstract)
- [15] Zhou M F, Michael Leshner C, Yang Z, Li J, Sun M. Geochemistry and petrogenesis of 270 Ma 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[J]. Chem. Geol., 2004, 209(3-4): 233—257.
- [16] 王京彬, 王玉往, 何志军. 东天山大地构造演化的成矿示踪[J]. 中国地质, 2006, 33(3): 461—469.
Wang Jingbin, Wang Yuwang, He Zhijun. Ore deposits as a guide to the tectonic evolution in the east Tianshan Mountains, NW China[J]. Geol. China, 2006, 33(3): 461—469. (in Chinese with English abstract)
- [17] 杨兴科, 陶洪祥, 罗桂昌, 姬金生. 东天山板块构造基本特征[J]. 新疆地质, 1996, 14(3): 221—227.
Yang Xinke, Tao Hongxiang, Luo Guichang, Ji Jinsheng. Basic features of plate tectonics in east Tianshan of China[J]. Xinjiang Geology, 1996, 14(3): 221—227. (in Chinese with English abstract)
- [18] 秦克章, 方同辉, 王书来, 朱宝清, 冯益民, 于海峰, 修群业. 东天山板块构造分区、演化与成矿地质背景研究[J]. 新疆地质, 2002, 20(4): 302—308.
Qin Kezhang, Fang Tonghui, Wang Shulai, Zhu Baoqing, Feng Yimin, Yu Haifeng, Xiu Qunye. Plate tectonics division, evolution and metallogenic settings in eastern Tianshan Mountains, NW China[J]. Xinjiang Geology, 2002, 20(4): 302—308. (in Chinese with English abstract)
- [19] Zhang Z, Zhou G, Kusky T M, Yan S, Chen B, Zhao L. Late Paleozoic volcanic record of the Eastern Junggar terra-

- ne, Xinjiang, Northwestern China; Major and trace element characteristics, Sr-Nd isotopic systematics and implications for tectonic evolution[J]. *Gondwana Res.*, 2009, 16(2): 201–215.
- [20] Pirajno F, Mao J W, Zhang Z C, Zhang Z H, Chai F M. The association of mafic-ultramafic intrusions and A-type magmatism in the Tianshan and Altay orogens, NW China: Implications for geodynamic evolution and potential for the discovery of new ore deposits[J]. *J. Asian Earth Sci.*, 2008, 32(2-4): 165–183.
- [21] Mao J W, Goldfarb R J, Wang Y T, Hart C J, Wang Z L, Yang J M. Late Paleozoic base and precious metal deposits, east Tianshan, Xinjiang, China: Characteristics and geodynamic setting[J]. *Episodes-News magazine of the International Union of Geological Sciences*, 2005, 28(1): 23–30.
- [22] 方维萱, 黄转盈, 唐红峰, 高珍权. 东天山库姆塔格—沙泉子晚石炭世火山-沉积岩相学地质地球化学特征与构造环境[J]. *中国地质*, 2006, 33(3): 529–544.
Fang Weixuan, Huang Zhuanying, Tang Hongfeng, Gao Zhenquan. Lithofacies, geological and geochemical characteristics and tectonic setting of Late Carboniferous volcanic-sedimentary rocks in the Kumtag-Shaquanzi area, East Tianshan [J]. *Chinese Geology*, 2006, 33(3): 529–544. (in Chinese with English abstract)
- [23] Qi L, H J, Gregoire D C. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Talanta*, 2000, 51(3): 507–513.
- [24] Qi L, Zhou M, Wang C Y, Sun M. Evaluation of a technique for determining Re and PGEs in geological samples by ICP-MS coupled with a modified Carius tube digestion[J]. *Geochem. J.*, 2007, 41(6): 407–414.
- [25] Qi L, Zhou M F, Wang C Y. Determination of low concentrations of platinum group elements in geological samples by ID-ICP-MS[J]. *J. Anal. At. Spectrom.*, 2004, 19(10): 1335–1339.
- [26] Qi L, Gao J F, Huang X W, Hu J, Zhou M F, Zhong H. An improved digestion technique for determination of platinum group elements in geological samples[J]. *J. Anal. At. Spectrom.*, 2011, 26(9): 1900–1904.
- [27] Govindaraju K. Compilation of working values and sample description for 383 geostandards[J]. *Geostand. Newslett.*, 1994, 18(2): 1–158.
- [28] Meisel T, Moser J. Reference materials for geochemical PGE analysis; New analytical data for Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt and Re by isotope dilution ICP-MS in 11 geological reference materials[J]. *Chem. Geol.*, 2004, 208(1-4): 319–338.
- [29] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society London Special Publications*, 1989, 42(1): 313–345.
- [30] Chazey III W J, Neal C R. Platinum-group element constraints on source composition and magma evolution of the Kerguelen Plateau using basalts from ODP Leg 183 [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2005, 69(19): 4685–4701.
- [31] McDonough W F, Sun S S. The composition of the Earth [J]. *Chem. Geol.*, 1995, 120(3-4): 223–253.
- [32] Weaver B L, Tarney J. Empirical approach to estimating the composition of the continental crust[J]. *Nature*, 1984, 310: 575–577.
- [33] Wedepohl H. The composition of the continental crust[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995, 59(7): 1217–1232.
- [34] Green M G, Sylvester P J, Buick R. Growth and recycling of early Archaean continental crust: geochemical evidence from the Coonterunah and Warrawoona Groups, Pilbara Craton, Australia[J]. *Tectonophysics*, 2000, 322(1-2): 69–88.
- [35] Pearce J A, Cann J R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses[J]. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 1973, 19(2): 290–300.
- [36] Fleet M, Crocket J, Stone W. Partitioning of platinum-group elements (Os, Ir, Ru, Pt, Pd) and gold between sulfide liquid and basalt melt[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1996, 60(13): 2397–2412.
- [37] Barnes S J, Picard C P. The behaviour of platinum-group elements during partial melting, crystal fractionation, and sulphide segregation; an example from the Cape Smith Fold Belt, northern Quebec [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1993, 57(1): 79–87.
- [38] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: its composition and evolution[M]. Palo Alto, CA: Blackwell Scientific Publisher, 1985.
- [39] Barnes S J, Maier W D. The fractionation of Ni, Cu and the noble metals in silicate and sulphide liquids[A]. *Dynamic processes in magmatic ore deposits and their application to mineral exploration*[C]. Keays, R R. Leshner, C M. Lightfoot, P C, Farrow C E G. Geological Association of Canada, Short Course Notes, 1999: 69–106.
- [40] Keays R R. The role of komatiitic and picritic magmatism and S-saturation in the formation of ore deposits [J]. *Lithos*, 1995, 34(1-3): 1–18.
- [41] Li C, Naldrett A J. Geology and petrology of the Voisey's Bay intrusion: Reaction of olivine with sulfide and silicate liquids[J]. *Lithos*, 1999, 47(1-2): 1–31.
- [42] Zhong H, Qi L, Hu R Z, Zhou M F, Gou T Z, Zhu W G, Liu B G, Chu Z Y. Rhenium-osmium isotope and platinum-group elements in the Xinjie layered intrusion, SW China: Implications for source mantle composition, mantle evolution, PGE fractionation and mineralization [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2011, 75(6): 1621–1641.
- [43] Lightfoot P C, Naldrett A J, Gorbachev N S, Fedorenko V A, Hawkesworth C J, Duherty W. Chemostratigraphy of the Siberian Trap lava, Noril'sk district, Russia: implications and source of flood basalt magma and their associated Ni-Cu mineralisation. *Proceedings of the Sudbury-Noril'sk symposium* [Z]. Ontario Geological Survey Special Publication No. 5, 1994:283–312.
- [44] Brenan J M, McDonough W F, Ash R. An experimental

- study of the solubility and partitioning of iridium, osmium and gold between olivine and silicate melt[J]. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 2005, 237(3-4): 855—872.
- [45] Righter K, Campbell A J, Humayun M, Hervig R L. Partitioning of Ru, Rh, Pd, Re, Ir, and Au between Cr-bearing spinel, olivine, pyroxene and silicate melts[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2004, 68(4): 867—880.
- [46] Puchtel I S, Humayun M. Platinum group element fractionation in a komatiitic basalt lava lake[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2001, 65(17): 2979—2993.
- [47] Hill E, Wood B J, Blundy J D. The effect of Ca-Tschermaks component on trace element partitioning between clinopyroxene and silicate melt[J]. *Lithos*, 2000, 53(3-4): 203—215.
- [48] Bezmen N I, Asif M, Bügmann G E, Romanenko I M, Naldrett A J. Distribution of Pd, Rh, Ru, Ir, Os, and Au between sulfide and silicate metals[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1994, 58(4): 1251—1260.
- [49] Capobianco C J, Drake M J. Partitioning of ruthenium, rhodium, and palladium between spinel and silicate melt and implications for platinum group element fractionation trends[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1990, 54(3): 869—874.
- [50] Peach C L, Mathez E A, Keays R R, Reeves S J. Experimentally determined sulfide melt-silicate melt partition coefficients for iridium and palladium[J]. *Chem. Geol.*, 1994, 117(1-4): 361—377.
- [51] Fleet M E, Chryssoulis S L, Stone W E, Weisener C G. Partitioning of platinum-group elements and Au in the Fe-Ni-Cu-S system; Experiments on the fractional crystallization of sulfide melt[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1993, 115(1): 36—44.
- [52] Barnes S J, Naldrett A J, Gorton M P. The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas[J]. *Chem. Geol.*, 1985, 53(3-4): 303—323.
- [53] Brüggmann G, Naldrett A, Asif M, Lightfoot P, Gorbachev N, Fedorenko V. Siderophile and chalcophile metals as tracers of the evolution of the Siberian Trap in the Noril'sk region, Russia[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1993, 57(9): 2001—2018.
- [54] Wyman D, Kerrich R, Sun M. Noble metal abundances of late Archean (2.7 Ga) accretion-related shoshonitic lamprophyres, Superior Province, Canada[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995, 59(1): 47—57.
- [55] Zhou M F, Sun M, Keays R R, Kerrich R W. Controls on platinum-group elemental distributions of podiform chromitites: A case study of high-Cr and high-Al chromitites from Chinese orogenic belts[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1998, 62(4): 677—688.
- [56] Brüggmann G E, Arndt N T, Hofmann A W, Tobschall H J. Noble metal abundances in komatiite suites from Alexo, Ontario and Gorgona Island, Colombia[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1987, 51(8): 2159—2169.
- [57] Amossé J, Dablé P, Alibert M. Physico-chemical study of the distribution of PGEs between a metal and a basaltic melt. Differentiation of elements in natural systems. EAG Workshop—the origin and fractionation of highly siderophile elements in the Earth's mantle[A]. Mainz: Max-Planck-Institut für Chemie, Programme and Abstracts[C]. 1997.
- [58] O'Neill H S C, Dingwell D, Borisov A, Spettel B, Palme H. Experimental petrochemistry of some highly siderophile elements at high temperatures, and some implications for core formation and the mantle's early history[J]. *Chem. Geol.*, 1995, 120(3-4): 255—273.
- [59] Keays R R. Palladium and iridium in komatiites and associated rocks; application to petrogenetic problems[J]. *Komatiites*; London, George Allen and Unwin, 1982: 435—458.
- [60] Ballhaus C, Sylvester P. Noble metal enrichment processes in the Merensky Reef, Bushveld Complex[J]. *Journal of Petrology*, 2000, 41(4): 545—561.
- [61] Hart S R, Ravizza G E. Os partitioning between phases in lherzolite and basalt[A]. *Earth processes: Peeding the isotopic code*[C]. A. Basu S. R. Hart; AGU, 1996.
- [62] Mitchell R H, Keays R R. Abundance and distribution of gold, palladium and iridium in some spinel and garnet lherzolites: implications for the nature and origin of precious metal-rich intergranular components in the upper mantle[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1981, 45(12): 2435—2442.
- [63] Walker R J, Shirey S B, Stecher O. Comparative Re-Os, Sm-Nd and Rb-Sr isotope and trace element systematics for Archean komatiite flows from Munro Township, Abitibi Belt, Ontario[J]. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 1988, 87(1-2): 1—12.
- [64] Rehkämper M, Halliday A N, Fitton J G, Lee D C, Wieneke M, Arndt N T. Ir, Ru, Pt, and Pd in basalts and komatiites: new constraints for the geochemical behavior of the platinum-group elements in the mantle[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1999, 63(22): 3915—3934.
- [65] Philipp H, Eckhardt J D, Puchelt H. Platinum-group elements (PGE) in basalts of the seaward-dipping reflector sequence, SE Greenland Coast[J]. *J. Petrol.*, 2001, 42(2): 407—432.
- [66] Locmelis M, Pearson N J, Barnes S J, Fiorentini M L. Ruthenium in komatiitic chromite[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2011, 75(13): 3645—3661.
- [67] Capobianco C J. Ruthenium solubility in hematite[J]. *Am. Mineral.*, 1998, 83(11-12): 1152—1160.
- [68] Brenan J M, Finnigan C S, McDonough W F, Homolova V. Experimental constraints on the partitioning of Ru, Rh, Ir, Pt and Pd between chromite and silicate melt; The importance of ferric iron[J]. *Chem. Geol.*, 2012, 2(302—303): 16—32.
- [69] Stockman H W, Hlava P F. Platinum-group minerals in alpine chromitites from southwestern Oregon[J]. *Econ. Geol.*, 1984, 79(3): 491—508.
- [70] Peck D C, Keays R R. Insights into the behaviour of precious metals in primitive, S-undersaturated magmas: Evidence from the Heazlewood River Complex, Tasmania[J]. *Can.*

- Mineral. , 1990, 28(3): 553-577.
- [71] Peck D C, Keays R R. Geology, geochemistry, and origin of platinum-group element-chromitite occurrences in the Heazlewood River Complex, Tasmania[J]. Econ. Geol. , 1990, 85(4): 765-793.
- [72] Andrews D R A, Brenan J M. Phase-equilibrium constraints on the magmatic origin of laurite+Ru-Os-Ir alloy[J]. Can. Mineral. , 2002, 40(6): 1705-1716.
- [73] Bockrath C, Ballhaus C, Holzheid A. Stabilities of laurite RuS₂ and monosulfide liquid solution at magmatic temperature[J]. Chem. Geol. , 2004, 208(1-4): 265-271.
- [74] Fiorentini M L, Beresford S W, Barley M E. Ruthenium-chromium variation: A new lithogeochemical tool in the exploration for komatiite-hosted Ni-Cu-(PGE) deposits [J]. Econ. Geol. , 2008, 103(2): 431-437.
- [75] Sattari P, Brenan J M, Horn I, McDonough W F. Experimental constraints on the sulfide-and chromite-silicate melt partitioning behavior of rhenium and platinum-group elements [J]. Econ. Geol. , 2002, 97(2): 385-398.
- [76] Maier W D, Prichard H M, Fisher P C, Barnes S J. Compositional variation of laurite at Union Section in the Western Bushveld Complex[J]. S. Afr. J. Geol. , 1999, 102(3): 286-292.
- [77] Fiorentini M L, Stone W E, Beresford S W, Barley M E. Platinum-group element alloy inclusions in chromites from Archaean mafic-ultramafic units: evidence from the Abitibi and the Agnew-Wiluna Greenstone Belts[J]. Mineral. Petrol. , 2004, 82(3): 341-355.
- [78] Godel B, Barnes S J. Platinum-group elements in sulfide minerals and the whole rocks of the JM Reef (Stillwater Complex): Implication for the formation of the reef[J]. Chem. Geol. , 2008, 248(3-4): 272-294.
- [79] Godel B, Barnes S J, Maier W D. Platinum-group elements in sulphide minerals, platinum-group minerals, and whole-rocks of the Merensky Reef (Bushveld Complex, South Africa): Implications for the formation of the reef[J]. J. Petrol. , 2007, 48(8): 1569-1604.
- [80] Brenan J M, Andrews D. High-temperature stability of laurite and Ru-Os-Ir alloy and their role in PGE fractionation in mafic magmas[J]. Can. Miner. , 2001, 39(2): 341-360.
- [81] Handler M R, Bennett V C. Behaviour of platinum-group elements in the subcontinental mantle of eastern Australia during variable metasomatism and melt depletion[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1999, 63(21): 3597-3618.
- [82] Melcher F, Grum W, Simon G, Thalhammer T V, Stumpf E F. Petrogenesis of the ophiolitic giant chromite deposits of Kempirsai, Kazakhstan: a study of solid and fluid inclusions in chromite[J]. J. Petrol. , 1997, 38(10): 1419-1458.
- [83] Puchtel I S, Humayun M, Campbell A J, Sproule R A, Leshner C M. Platinum group element geochemistry of komatiites from the Alexo and Pyke Hill areas, Ontario, Canada [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 2004, 68(6): 1361-1383.
- [84] Vogel D C, Keays R R. The petrogenesis and platinum-group element geochemistry of the Newer Volcanic Province, Victoria, Australia[J]. Chem. Geol. , 1997, 136(3-4): 181-204.

• 学会之声 •

第十二届全国古地理学及沉积学学术会议在青岛召开

2012年10月18日至20日,第12届全国古地理学及沉积学学术会议在青岛召开。会议由我会岩相古地理专业委员会和沉积学专业委员会,以及中国地质学会沉积地质专业委员会、地层古生物专业委员会、地质专业委员会,中国石油学会石油地质专业委员会联合主办,中国石油大学(华东)、中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司承办。来自中国科学院、中国地质科学院、国家海洋局、核工业总公司、中海油、中石油,以及有关高校和出版系统等46个单位的292位代表出席了会议。

会议出版了论文摘要集,共收入论文摘要269篇,大会报告论文12个,分组报告123个,展示成果13份。会议交

流内容涵盖了古地理学及沉积学的各个方面,主要包括:岩相古地理、生物古地理、构造古地理、沉积学、层序地层学、遗迹学、储层地质学、新技术新方法的应用以及综合研究等。会议首次开辟青年优秀论文宣讲专场,35位青年学者交流了自己的研究成果。

经过三天的交流,会议顺利结束。会议就近年来我国古地理学和沉积学领域取得的研究成果和研究进展进行了交流,研讨了古地理学和沉积学今后的发展趋势,为能源矿产勘探开发、环境保护和资源利用提供了更好的服务和技术支持。

(冯增昭 供稿)