

四川攀枝花新元古代苦橄质岩脉的 铂族元素地球化学特征

杨仪锦^{1,2} 柏中杰¹ 朱维光^{1*} 钟宏¹ 范宏鹏¹

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 550081;

2. 中国科学院大学 北京 100049

摘要: 四川攀枝花地区出露有新元古代苦橄质岩脉。本文研究表明这些苦橄质岩脉的铂族元素(PGE)含量较高(19.7~29.0 ng/g),原始地幔标准化后的PGE分布模式呈Pt-Pd富集型,Pd/Ir值(5.64~11.33)与高镁玄武岩和科马提岩相似。同时,这些岩石显示在形成过程中没有经历硫化物和PGE合金矿物的熔离,其原始岩浆起源于地幔较高级别的部分熔融,可能与地幔柱的影响有关。通过扣除铬尖晶石和橄榄石结晶分异对PGE造成的影响,得到原始岩浆的PGE组成特征为Ir、Ru、Rh相对于Pt、Pd明显亏损,在源区已无硫化物存在的条件下,这很可能是由于地幔部分熔融过程中有IPGE合金矿物残留在地幔源区。攀枝花地区苦橄质岩脉可能与该地区冷水箐Cu-Ni硫化物矿床具有相似的原始岩浆组成。

关键词: 新元古代;苦橄质岩脉;铂族元素;Cu-Ni硫化物矿床;攀枝花

中图分类号: 588.14⁺6 文章编号: 1007-2802(2016)01-0126-12 doi: 10.3969/j.issn.1007-2802.2016.01.015

Geochemical Characteristics of the Platinum-Group Elements of the Neoproterozoic Picritic Dykes in the Panzhihua Area, Sichuan Province

YANG Yi-jin^{1,2}, BAI Zhong-jie¹, ZHU Wei-guang^{1*}, ZHONG Hong¹, FAN Hong-peng¹

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Some Neoproterozoic picritic dykes are exposed in the Panzhihua area of Sichuan province, SW China. In this study, the data of platinum-group elements (PGE) are reported for these picritic dykes. The picritic dykes are characterized by relatively high PGE contents (19.7–29.0 ng/g) and Pt-Pd enrichment in mantle-normalized patterns, with their Pd/Ir ratios ranging from 5.64 to 11.33, which are similar to those of the high magnesium basalts and komatiites. In addition, the parental magma of these picritic dykes were S-unsaturated and generated by high degree partial melting of the mantle source, with no sulfide or PGE alloys segregation. To estimate the abundances of PGE in the primary magma, we have adjusted for effects of fractional crystallization of Cr-spinel and olivine phenocrysts in a picritic sample. The obvious depletions of Ir, Ru and Rh relative to Pt and Pd in the primary magma may attribute to the retention of Ir, Ru and Rh by IPGE in their mantle source in which no residual sulfide is existed. The picritic dykes in the Panzhihua area and the Lengshuiqing Cu-Ni sulfide deposit may have similar primary magma in composition.

Key words: Neoproterozoic; picritic dykes; platinum-group element; Cu-Ni sulfide deposit; Panzhihua

在扬子地块西缘,出露有很多中元古代晚期到新元古代的岩浆岩(约1050~740 Ma)。最近几十年,学者们对这些岩浆岩做了很多研究工作,但对于它们的岩石成因和构造属性仍然存在分歧。目

前主要存在2种观点:一些学者认为这些大于860 Ma(极有可能900 Ma)的岩浆岩的形成与四堡造山作用有关,并与Rodinia超大陆的聚合有关,而830~740 Ma的岩浆岩是非造山作用的产物,可能

收稿日期: 2015-02-02 收到 2015-04-15 改回

基金项目: 国家自然科学基金项目(41273049, 40673031)

第一作者简介: 杨仪锦(1990-),男,硕士研究生,研究方向: 矿床地球化学。E-mail: Yangyijin12@mails.ucas.ac.cn.

* 通讯作者简介: 朱维光(1968-),男,博士,研究员,研究方向: 矿床地球化学和同位素地球化学。E-mail: zhuweiguan@vip.gyig.ac.cn.

是由地幔柱活动所引起的板内岩浆活动,与 Rodinia 超大陆裂解有关(Li *et al.*, 1999; Lin *et al.*, 2007); 另一些学者认为形成所有这些约 1050~740 Ma 岩浆岩的构造环境为一个南北向的活动大陆边缘(目前方位)(Zhou *et al.*, 2002; Zhao and Zhou, 2007)。

这些岩浆岩主要包括花岗岩、花岗闪长岩、英云闪长岩、闪长岩、镁铁质岩脉和镁铁质-超镁铁质岩体,以及少量的玄武岩,未出现超镁铁质的喷出岩,如苦橄岩。Zhu 等(2010)在攀枝花市同德地区发现了 3 条苦橄质岩脉侵入到新元古代同德杂岩体中, SIMS 锆石 U-Pb 年龄值为 796 ± 5 Ma, 这些苦橄质岩脉的岩相学特征明显有别于附近产出的高家村镁铁-超镁铁质岩体,呈斑状结构,斑晶主要为粗粒的橄榄石和少量单斜辉石,基质为细粒的单斜辉石和斜长石。Zhu 等(2010)对苦橄质岩脉进行了全岩主微量、矿物学和 Nd 同位素等研究,探讨了这些苦橄质岩脉的源区特征及其形成的构造环境,提出

其构造背景为板内裂谷环境,其源区为受到地幔柱影响的异常热的亏损软流圈地幔,源区发生约 20% 的部分熔融形成了同德苦橄质岩脉的原始岩浆。

最近,笔者在攀枝花大田地区发现了一条新元古代苦橄质岩脉,其 SIMS 锆石 U-Pb 年龄为 ~760 Ma(作者未发表数据),与同德苦橄质岩脉的形成年龄较为接近。这些苦橄质岩脉的成因是否起源于较程度的地幔部分熔融并与地幔柱作用有关? 考虑到铂族元素(PGE)在研究镁铁-超镁铁质岩的地幔源区特征和深部过程有独特的优势,本文对攀枝花地区同德和大田苦橄质岩脉中的代表样品进行了 PGE 和硫元素分析,并结合主、微量元素资料,探讨该区苦橄质岩脉的岩浆演化过程和源区地幔特征。此外,在同德杂岩体的北面产出同时代的镁铁-超镁铁质岩体群,这些规模较小的岩体群中赋存中型的冷水箐 Cu-Ni 硫化物矿床(图 1)。本文试图探讨这些新元古代苦橄质岩脉与冷水箐 Cu-

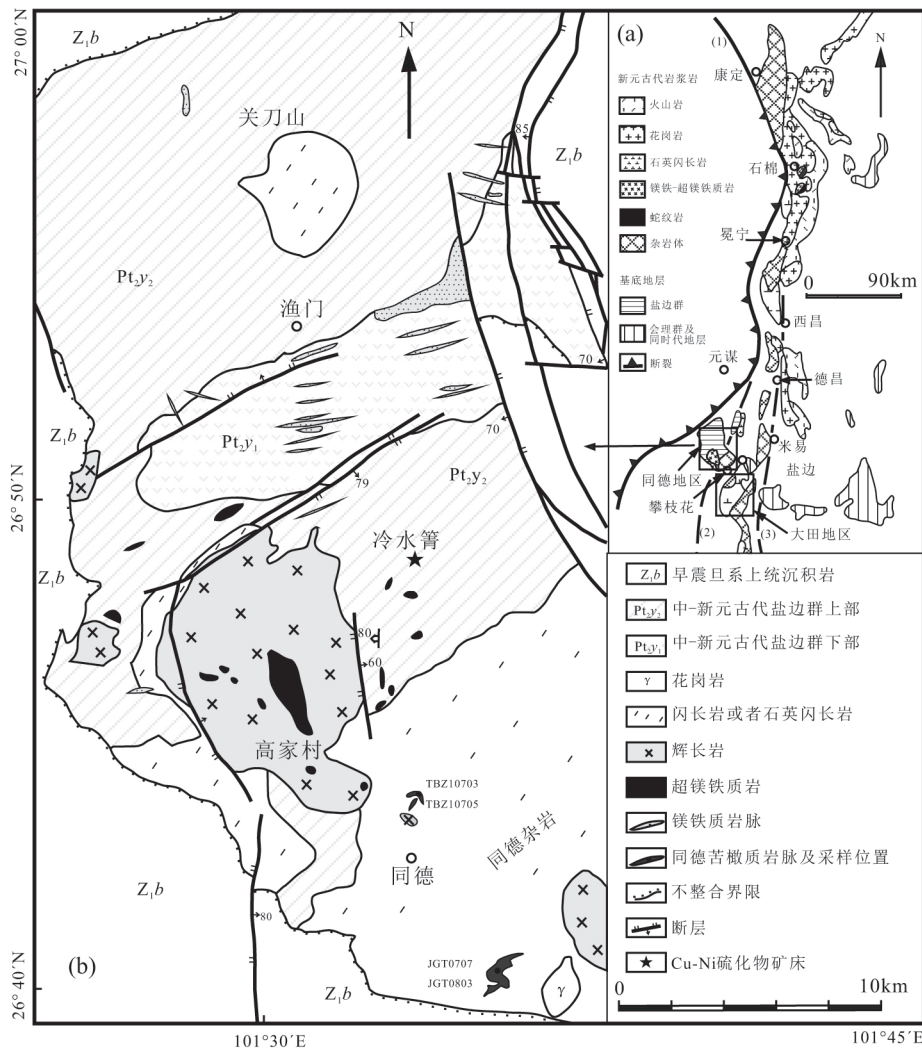


图 1 四川攀西地区前寒武纪地质简图(a)和同德杂岩体及苦橄质岩脉地质简图(b) (据 Zhu *et al.*, 2007)

Fig.1 A simplified map showing Precambrian geology in the Panxi area(a) and a simplified geological map of the Tongde complex and picritic dykes(b), Sichuan Province(after Zhu *et al.*, 2007)

Ni 硫化物矿床成矿作用的可能成因关系。

1 地质背景

四川攀枝花地区位于扬子地块西缘。同德苦橄质岩脉出露于攀枝花市西北方约 30 km 处,大田苦橄质岩脉出露于攀枝花市正南方约 40 km 处。同德地区出露的前寒武纪岩石单元主要为盐边群的小坪组地层,侵入盐边群的新元古代岩浆岩,以及不整合于盐边群及新元古代岩浆岩侵入体之上的晚新元古代地层。小坪组由绢云板岩、砂质板岩、炭质绢云板岩夹变质砂岩及炭质板岩组成,底部为厚层状变质凝灰质细砾岩和变质砂岩(四川省地质矿产局,1991)。这些新元古代岩浆岩包括闪长岩、基性-超基性侵入体和基性岩脉(图 1),比如 ~820 Ma 的以闪长岩为主体的同德杂岩(Sinclair, 2001), ~825~820 Ma 的高家村和冷水箐基性-超基性侵入体(Zhou *et al.* 2006; Zhu *et al.* 2006, 2007), 以及高家村和冷水箐侵入体北部 ~790~760 Ma 的基性岩脉(Zhu *et al.* 2008) 等。同德苦橄质岩脉有 3 条,侵入同德杂岩体中(图 1),它们的走向有北西和北东 2 组,倾向分别为北东和南东,倾角为 70°~80°。这些岩脉(岩墙)的长度可达 2 km,厚度为 30~100 m。上述岩石均比较新鲜,蚀变较弱,为苦橄玢岩。这些苦橄质岩脉的斑状结构明显(图 3a, 3b),斑晶含量为 40%~50% (vol.),基质含量为 50%~60%,斑晶主要为粗粒的橄榄石和少量单斜辉石,基质主要由单斜辉石和斜长石细粒矿物组成。橄榄石占全岩的 35%~50%,单斜辉石占 30%~40%,斜长石占 30%~40%,次要矿物包括 Fe-Ti 氧化物(1%~2%)和铬铁矿(1%)。铬铁矿通常被橄榄石所包裹,而 Fe-Ti 氧化物(磁铁矿和钛铁矿)通常产于橄榄石的颗粒间或者被单斜辉石、斜长石所包裹。

大田地区出露的前寒武纪地层有会理群的大田组和河口组,以及不整合于会理群之上的震旦系上统,包括观音崖组和灯影组。大田组分上下两段,下段为花岗岩混合岩、片麻岩,上段为斜长角闪岩、混合岩;河口组主要为变质火山岩和变质沉积岩。该区出露的新元古代岩浆岩有石英闪长岩和花岗岩(图 2)。大田苦橄质岩脉只发现一条,侵入会理群中,走向为近东西向,倾向为南向,倾角约 25°,长度未知,厚度约为 1.5 m。岩石为苦橄玢岩,蚀变作用较强,橄榄石及部分单斜辉石已完全蛇纹石化,呈交代残余假象存在。斑状结构明显,有些

橄榄石斑晶的粒径可达 4 mm,手标本下可清晰判别,斑晶含量占 50%~60% (vol.),为橄榄石和单斜辉石,基质占 40%~60%,由隐晶质以及细粒的单斜辉石和角闪石组成。橄榄石占全岩的 30%~45%,辉石占 30%~45%,角闪石占 10%~20%,次要矿物包括 Fe-Ti 氧化物(2%~4%)和铬铁矿(1%)。

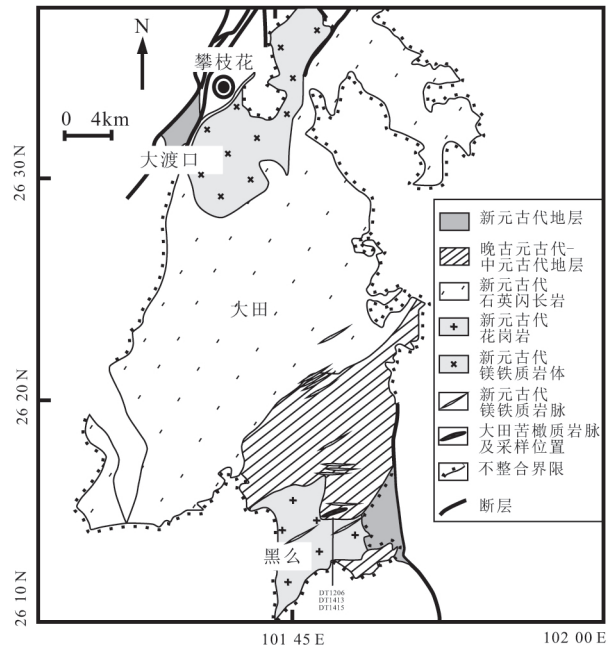


图 2 大田杂岩体及镁铁-超镁铁质岩脉地质简图
(据 Zhao and Zhou 2007)

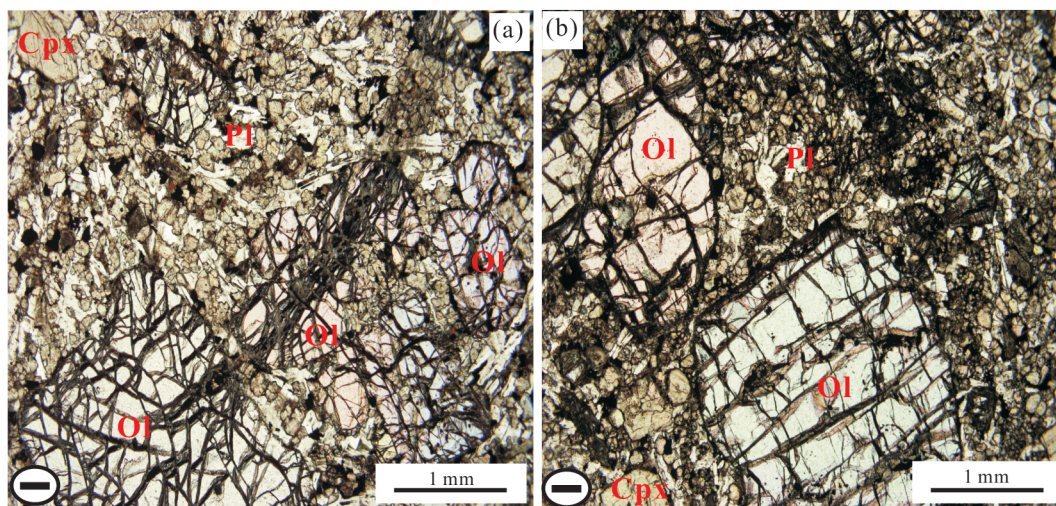
Fig.2 A simplified geological map showing the Datian Complex and mafic-ultramafic dykes (after Zhao and Zhou 2007)

2 样品和分析方法

本研究样品 4 件采自同德苦橄质岩脉,有 3 件采自大田苦橄质岩脉。所研究的样品均是在显微镜下挑选的具有代表性的相对新鲜的样品。PGE 前处理过程在中国科学院地球化学研究所完成,方法见 Qi 等(2007, 2011)。Pt、Pd、Ir 和 Ru 采用同位素稀释法测定,单同位素 Rh 以 ^{194}Pt 为内标测定(Qi *et al.* 2004),测试仪器为 ElanDRC-Eicp-MS。分析精度优于 5%。全流程空白 Ir、Ru、Rh 均小于 0.003 ng/g; Pt、Pd 均小于 0.02 ng/g。S 含量的测定由中国科学院地球化学研究所的 C-S 分析仪完成,检出限为 1 $\mu\text{g/g}$,分析精度优于 8%。

3 分析结果

由分析结果(表 1)可见,同德和大田苦橄质岩脉的铂族元素总体上变化范围相对较小。同德苦橄质岩脉的 Ir 含量为 0.86~1.14 ng/g, Ru 含量为 2.70~3.10 ng/g, Rh 含量为 0.45~0.58 ng/g, Pt 含



a, b-斑状结构 橄辉石为斑晶 基质为细粒斜长石和单斜辉石 橄辉石受到蛇纹石化呈交代残余(单偏光);
Ol-橄辉石; Cpx-单斜辉石; Pl-斜长石

图3 攀枝花地区苦橄质岩脉岩石薄片显微照片

Fig.3 Photomicrographs of the picritic dykes in the Panzihua area

量为 10.45~14.45 ng/g, Pd 含量为 7.36~9.92 ng/g, PGE 总量为 22.3~29.0 ng/g。大田苦橄质岩脉的 Ir 含量为 1.18~1.22 ng/g, Ru 含量为 1.86~1.96 ng/g, Rh 含量为 0.43~0.54 ng/g, Pt 含量为 9.21~11.54 ng/g, Pd 含量为 6.84~11.46 ng/g, PGE 总量为 19.7~25.0 ng/g。

在原始地幔标准化 PGE 配分图上(图 4), 所有样品均显示相似的 PGE 配分曲线, 为“Pt-Pd 型”, 即 Pt、Pd 相对于原始地幔富集, Ir、Ru、Rh 相对于原始地幔亏损, 表明苦橄质岩的 Ir、Ru、Rh 已与 Pt、Pd 发生了分异。同德和大田苦橄质岩脉的 Pd/Ir 值分别为 6.48~11.33 和 5.64~9.59 (表 1), 与科马提岩和高镁玄武岩类似(图 5)。7 件样品中, 除样品 TBZ-1-0705 的 (Pt/Pd)_n > 1 (n 表示原始地幔标准化) (1.02), 其余 6 件样品的 (Pt/Pd)_n < 1 (图 4)。

苦橄质岩脉的 S 含量相对较低, 变化也较小, 同德苦橄质岩脉的 S 含量为 0.024%~0.054% (wt), 大田苦橄质岩脉的为 0.12%~0.14%, 后者比前者稍高。

4 讨论

4.1 结晶分异

同德和大田苦橄质岩脉的 Pd、Pt 与 Ir、Ru、Rh 发生了明显分异, 具有相对高的 Pd/Ir、Pt/Ir 值(图 3 表 1)。由于 PGE 具有高的电负性(2.2), 高的电价(2⁺~4⁺), 以及高的第一电离势(5.4~9.1 eV), 所以它们在风化作用、热液蚀变或者低温变质作用过程中通常是稳定的(Pauling, 1960; Weast *et al.*,

表 1 攀枝花地区苦橄质岩脉的 PGE(×10⁻⁹), MgO, FeO, S(%), Cr, Ni, Cu 和 Zr(×10⁻⁶) 含量

Table 1 PGE (×10⁻⁹), MgO, FeO, S(%), Cr, Ni, and Cu (×10⁻⁶) concentrations of the picritic dykes from the Tongde and Datian areas

地区	同德				大田		
	JGT 0707	JGT 0803	TBZ1 0703	TBZ1 0705	DT 1206	DT 1413	DT 1415
Ir	0.86	1.14	0.97	1.02	1.20	1.22	1.18
Ru	2.70	2.86	3.10	3.03	1.96	1.86	1.88
Rh	0.48	0.45	0.58	0.56	0.43	0.48	0.54
Pt	10.81	10.45	14.45	14.43	9.91	9.21	11.54
Pd	9.76	7.36	9.92	7.77	11.46	6.88	6.84
PGE	24.62	22.25	29.01	26.81	24.96	19.65	21.98
MgO ^a	26.67	27.13	21.35	23.71	23.78	23.06	22.84
FeO ^a	11.79	11.84	12.43	12.47	13.15	13.08	13.10
S	0.054	0.047	0.024	0.031	0.14	0.12	0.12
Cr ^a	1562	1640	1578	1743	1957	2260	2170
Ni ^a	1260	1160	881	1037	726	1337	1313
Cu ^a	69.4	73.7	92.1	79.8	81.7	129	116
Zr ^a	83.0	84.6	114	100	87.7	93.4	98.9
IPGE	3.56	4.00	4.07	4.04	3.16	3.08	3.06
PPGE	21.06	18.25	24.94	22.77	21.80	16.57	18.92
Pd/Ir	11.33	6.48	10.19	7.65	9.59	5.64	5.79
Pt/Ir	12.55	9.20	14.84	14.21	8.29	7.56	9.78
Pd/Pt	0.90	0.70	0.69	0.54	1.16	0.75	0.59
Cu/Pd	7105	10013	9286	10260	7128	18758	16970

注: a 据 Zhu 等(2010), MgO、FeO 含量为扣除挥发分后的值。

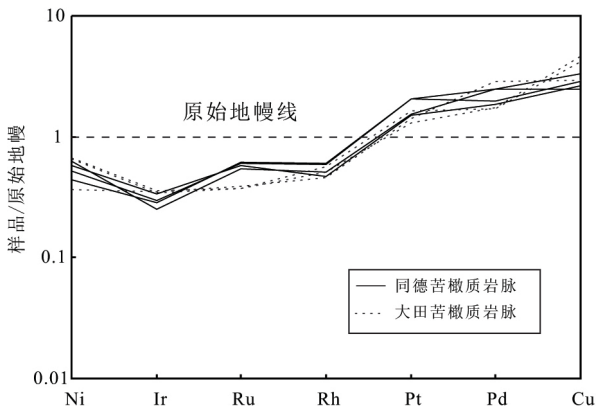


图4 攀枝花地区苦橄质岩脉的原始地幔标准化 PGE Ni, Cu 配分型式(原始地幔 PGE 数据采用 Barnes and Maier, 1999)

Fig.4 Primitive mantle-normalized PGE Ni, Cu patterns of picritic dykes in the Tongde and Datian areas (primitive mantle data are after Barnes and Maier, 1999)

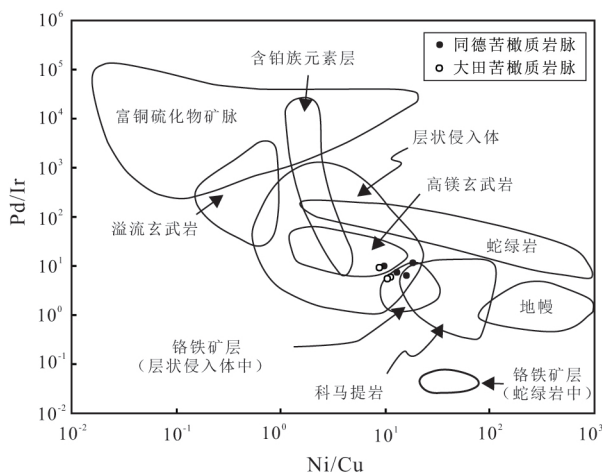


图5 攀枝花地区苦橄质岩脉的 Pd/Ir-Ni/Cu 图解
(底图据 Barnes, 1990)

Fig.5 Diagram of Pd/Ir versus Ni/Cu ratios for the picritic dykes in the Panzhihua area (modified after Barnes, 1990)

1986)。因此, 这些苦橄质岩脉的 PGE 含量主要受地幔源区部分熔融过程及岩浆演化过程所控制。在讨论源区部分熔融过程之前, 笔者首先讨论岩浆结晶分异作用对这些苦橄质岩脉 PGE 的影响。

大量研究表明, 在硫不饱和的玄武岩岩浆体系的结晶分异过程中, Os、Ir、Ru 是相容元素, 易进入早期的镁铁质矿物结晶相 (Barnes *et al.*, 1985; Keays, 1995)。一些实验结果显示, Ir 在结晶分异过程中主要进入 Cr-尖晶石, 而 Pd 既不进入 Cr-尖晶石, 也不进入橄榄石, Ir 和 Pd 在 Cr-尖晶石/硅酸盐熔体间的分配系数分别为 100 和 0.14, 在橄榄石/硅酸盐熔体间的分配系数分别为 0.77 和 0.03 (Puchtel and Humayun, 2001; Richter *et al.*, 2004)。同德

和大田苦橄质岩脉的斑晶矿物主要为橄榄石, 少量单斜辉石, 不含斜长石(图 3), 而且在橄榄石和单斜辉石斑晶里都发现包含有铬尖晶石, 表明岩浆演化过程中橄榄石、单斜辉石和铬尖晶石是主要的分离结晶相。同德和大田苦橄质岩脉并无明显的 Eu 异常 (Zhu *et al.*, 2010; 作者未发表数据), 说明在岩浆演化过程中没有发生过明显斜长石的分离结晶。在图 6a、6c 中, 同德和大田苦橄质岩脉的 Ir、Pd 和 Ni 呈负相关性或无相关性, 说明 Ir、Pd 含量不受橄榄石结晶分异的影响。同德苦橄质岩脉的 Ir 含量可能受到了铬尖晶石结晶分异的影响, 因为 Ir 与 Cr 呈弱的正相关性(图 6b), 但大田苦橄质岩脉并未显示这种趋势, 这有可能是大田苦橄质岩脉只有一条, 再加上样品采集较少的缘故。同德和大田苦橄质岩脉 Pd 与 Cr 显示负相关性或无相关性(图 6d), 表现出不相容于铬尖晶石的特征。总的来说, 这与前人的实验结果是吻合的。所以, Pd、Ir 含量受到了橄榄石和尖晶石等矿物结晶分异的影响。

除了受早期镁铁质矿物结晶相控制以外, PGE 含量还受硫化物控制。铂族元素为高度亲硫元素, 在硫化物熔浆/硅酸盐熔体中的分配系数非常高, 为 $10^3 \sim 10^6$ (Ballhaus *et al.*, 2006)。所以, 当硅酸盐熔体发生硫化物熔离时, 岩浆中的 PGE 会强烈富集在硫化物熔体中, 从而导致残余岩浆中 PGE 亏损。极少量硫化物的熔离(如 0.57%) 也能导致残余岩浆中 PGE 的强烈亏损 (Lightfoot and Keays, 2005)。分析样品显示高的 Σ PGE 含量 (19.7 ~ 29.0 ng/g), 说明岩浆没有达到 S 饱和。Pd 在硫化物中的分配系数远大于 Cu (D^{Pd} 和 D^{Cu} 分别为 $\sim 10^5$ 和 $\sim 10^3$; Naldrett, 2011), 如果熔体由于硫饱和发生了硫化物的熔离, 那么残余熔体中的 Cu/Pd 值将会显著升高。攀枝花地区苦橄质岩脉的 Cu/Pd 值为 9286 ~ 18758, 接近地幔值 ($10^3 \sim 10^4$) (Barnes *et al.*, 1993) (图 7a)。另外, 在硫不饱和的岩浆体系中, Zr、Cu 和 Pd 是不相容元素, 结晶分异作用会导致它们含量的升高。但是当硫一旦饱和, 出现硫化物的熔离, Cu 和 Pd 含量都会急剧降低, 导致低的 Cu/Zr 和 Pd/Zr 值。在 $1000 \times Pd/Zr$ -Cu/Zr 图上(图 7b), 可以发现这些苦橄质岩脉具有相对高的 Cu/Zr (0.80 ~ 1.38) 和 $1000 \times Pd/Zr$ 值 (69 ~ 131), 与云南宾川峨眉山期苦橄岩的 Cu/Zr 和 $1000 \times Pd/Zr$ 值接近, 后者被认为没有经历硫化物的熔离 (Bai *et al.*, 2013)。如果经历了硫化物熔离, Cu/Zr 和 $1000 \times Pd/Zr$ 值将会同时减小, 但在图 7b 中, 并未见到这种趋势。

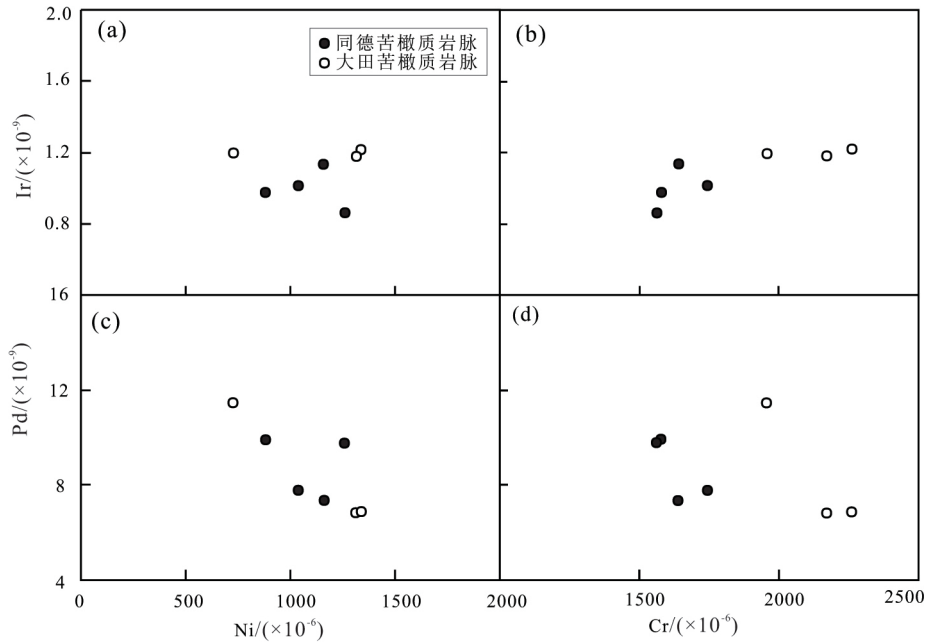


图 6 攀枝花地区苦橄质岩脉 Ir 与 Cr、Ni (a, b) 以及 Pd 与 Cr、Ni (c, d) 相关关系图

Fig.6 Plots of Ir vs. Ni (a) and Cr (b), and Pd vs. Ni (c) and Cr (d) of the picritic dykes in the Panzhihua area

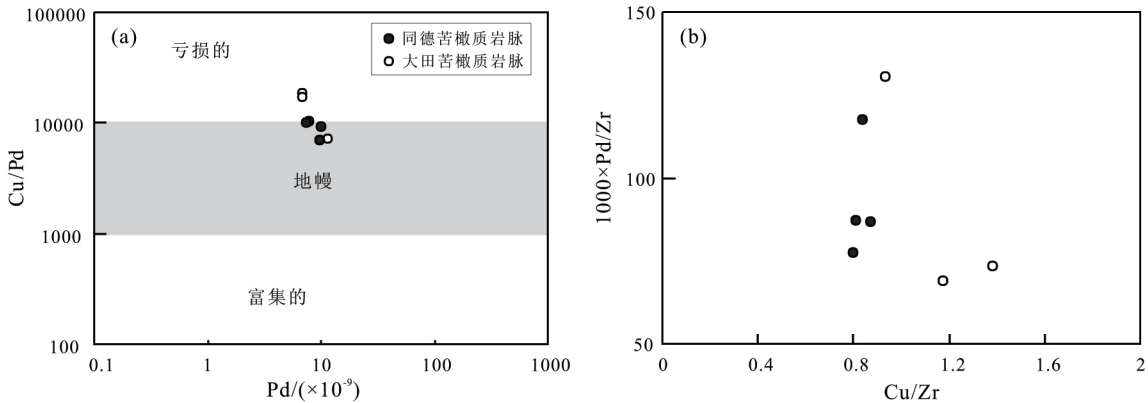


图 7 攀枝花地区苦橄质岩脉 Cu/Pd-Pd 图 (a) (区域划分据 Barnes and Lightfoot 2005), 1000×Pd/Zr-Cu/Zr 相关关系图 (b)

Fig. 7 (a) Plots of Cu/Pd vs. Pd platinum group element (PGE)-enriched and-depleted fields are from Barnes and Lightfoot 2005) (b) 1000×Pd/Zr vs. Cu/Zr for the picritic dykes in the Panzhihua area

同时, 硫化物的分离会导致 Pd/Pt 值的降低, 因为相对于 Pt, Pd 在硫化物熔体/硅酸盐熔体间的分配系数更大 (Peach *et al.*, 1994; Vogel and Keays, 1997), 所以硫化物的熔离会导致 Pd 相对于 Pt 的亏损, 而且会导致 Pt、Pd 含量的明显降低。攀枝花苦橄质岩脉的 Pd、Pt 含量相对高, Pd/Pt 值为 0.54 ~ 1.16 (均值为 0.76), 稍高于地幔的 Pd/Pt 的均值 (0.55, Naldrett and Duke, 1980; 表 1), Pd 并没有相对 Pt 亏损, 也说明原始岩浆没有经历硫化物的熔离。

此外, 在低 f_{S_2} 的情况下, Ir、Ru 和 Pt 还能形成合金矿物 (Fleet and Stone, 1991; Maier and Barnes, 2004)。在镁铁-超镁铁质岩浆结晶形成的岩石中,

如蛇绿岩和层状岩体, 经常可以发现富 IPGE 的矿物, 包括硫钌矿 (Ru, Os, Ir) S_2 , 以及合金矿物, 如钌铱钨矿, 它们作为包体赋存在 Cr-尖晶石、橄榄石和辉石里 (Edwards, 1990; Torres-Ruiz *et al.*, 1996; Maier *et al.*, 1999)。如果形成了 Ru-Ir-Os 合金矿物, 这些矿物的分离会导致残余熔体里的 IPGE 亏损, 但如果这些矿物发生堆晶, 就会使堆晶体里的 IPGE 相对富集, 如在某些层状岩体的铬铁矿层 (如南非 Bushveld 岩体的 UG1 和 UG2 层) 或蛇绿岩带的铬铁矿床 (如西藏罗布莎) 中, 可形成 IPGE 的工业富集 (宋谢炎等, 2009)。

由于 Ir、Ru 在合金/硅酸盐熔体间的分配系数非常高, 甚至高于 Ir、Ru 在硫化物熔体/硅酸盐熔体

间的分配系数(Borisov and Palme, 2000), 极少量合金的分离也会导致 Ir、Ru 的强烈亏损, 攀枝花苦橄质岩脉的 Ir、Ru 相对于原始地幔是亏损的, 但它们亏损的程度并不高(图 4), 它们的含量仍明显高于典型 MORB 的 Ir、Ru 含量(Hamlyn *et al.*, 1985; Bézou *et al.*, 2005)。PGE 合金矿物主要为 Ru-Ir-Os 合金和 Fe-Pt 合金。前人的实验研究表明, Ru-Ir-Os 合金不仅富集 Ru、Ir、Os, 而且还含有 1%~3.9% (wt) Pt 以及非常少的 Pd(Brenan and Andrews, 2001)。在自然界中, 也有很多 Ru-Ir-Os 合金含有少量 Pt 的例子, 比如在菲律宾的 Samas 蛇绿岩带的铬铁矿里, Ru-Ir-Os 合金的 Pt 含量达到了 6.29% (wt) (Nakagawa and Franco, 1997)。Brenan 和 Andrews (2001) 认为 Pt 在 Ru-Ir-Os 合金与镁铁质岩浆间的分配系数能够达到 10^4 。所以, Ru-Ir-Os 合金的分离不仅能造成残余熔体低的 Ir、Ru 含量, 也可能造成 Pt 含量的降低。攀枝花苦橄质岩脉总体上未显示 Pt 相对于 Pd 的明显亏损(Pd/Pt 0.54~1.16)。

在较高的温度下, 富 Ir、Ru 的硫化物和合金矿物作为液相线矿物与铬尖晶石和橄榄石同时晶出(Song *et al.*, 2009)。上面提到, 同德岩脉样品的 Ir 与 Cr 含量间呈弱相关性(图 6b), 这就显示同德苦橄质岩脉没有经历过富 Ir、Ru 硫化物和合金矿物的分离, 因为 Ir 在合金/硅酸盐熔体间的分配系数远大于 Ir 在铬尖晶石的。另外, 同德和大田样品 Ir、Ru 与 MgO 含量间并不显示相关性(未示图), 同样表明在橄榄石和尖晶石结晶过程中, 并未发生富 Ir、Ru 的硫化物和合金矿物的分离。

总的来说, 攀枝花地区新元古代苦橄质岩脉没有发生硫化物和 PGE 合金矿物的熔离, 其 PGE 含量主要受橄榄石和尖晶石结晶分异作用的影响。扣除掉橄榄石和尖晶石结晶分异作用对 PGE 含量的影响, 就可计算原始岩浆的 PGE 成分。

4.2 原始岩浆 PGE 成分

在平衡条件下, 橄榄石的成分是岩浆成分的标志, 因而可以用来估算母岩浆的成分(如 Simkin and Smith, 1970; Green *et al.*, 2001; 张招崇和王福生, 2003)。在图 8a 中可以看出, 以样品中最大 F_o 值以及全岩的 MgO 含量投点, 如果投影点位于曲线的下方, 则代表有过剩橄榄石加入到原始岩浆中, 即以以后形成的原始岩浆上升过程中捕获了早期原始岩浆分离结晶形成的橄榄石斑晶; 如果投影点所落的曲线刚好和全岩的 FeO 含量相符, 则说明全岩的成分可以代表原始岩浆的成分(张招崇和王福生, 2003)。同德苦橄质岩脉样品全部落在曲线的下

方, 似乎说明有过剩橄榄石的加入。样品 JGT0803 的最大 F_o 值为 92.3, 由于其 CaO 含量为 0.14%, 且不存在扭折带, 所以判断其不是幔源捕掳晶, 可以作为恢复原始岩浆的依据。利用质量平衡原理, 采用样品 JGT0803 的全岩组分, 可以计算出与此 F_o 值平衡岩浆的 MgO 含量为 25.3%, FeO 含量为 12.2%, 约有 7% 的堆晶橄榄石加入。在计算中, 设 Mg-Fe 分配系数 $[K_d = (FeO/MgO)^{O_1} / (FeO/MgO)^L]$ 为 0.31(Roeder and Emslie, 1970)。

根据质量平衡原理, 在橄榄石和全岩的 MgO-FeO 图解上(图 8b), 直线 CD 为与具有最高 F_o 值橄榄石平衡的熔体中 FeO/MgO 值。Mg-Fe 分配系数同样设为 0.31。点 A 代表具有最高 F_o 值橄榄石的 FeO 和 MgO 含量, 点 B 为 4 个同德苦橄质岩脉样品的 FeO 和 MgO 的平均值。图 8b 中, 2 个同德苦橄质岩脉样品位于平衡线之下, 但另外 2 个样品落在平衡线之上, 表明同德苦橄质岩脉样品既发生过橄榄石的堆晶, 也发生过橄榄石的分离。这个结论与图 8a 给出的结果似乎出现了矛盾, 这有可能是因为电子探针分析的点位较少, 一些样品中更大的 F_o 值没有被测到。图 8b 中 E 点应为同德苦橄质岩脉原始岩浆的组成, 这与上面计算的结果非常一致。另外, 还可以发现同德苦橄质岩脉样品的平均值与原始岩浆的组成非常接近(图 8b)。

通过扣除掉橄榄石和铬尖晶石的堆晶对 PGE 造成的影响, 就可以估算出同德苦橄质岩脉原始岩浆的组成。从图 8b 中可以知道样品 TBZ1-0703 经历了橄榄石的结晶分异, 在 4 个样品中, 其 MgO 和 Cr 含量最低(表 1)。而且从上面的讨论, 知道样品 JGT0803 经历约 7% 过剩橄榄石的加入, 其 Cr 含量比 TBZ1-0703 的高了 62 $\mu\text{g/g}$, 如果按 Cr_2O_3 含量占铬尖晶石总量的 40% 来算, 165 $\mu\text{g/g}$ 的 Cr 对应的铬尖晶石含量是约 0.0002% 的铬尖晶石。各个铂族元素在铬尖晶石/熔体间的分配系数为: $D^{\text{Ir}} = 100$, $D^{\text{Ru}} = 151$, $D^{\text{Rh}} = 63$, $D^{\text{Pt}} = 3.3$, $D^{\text{Pd}} = 0.14$; 在橄榄石/熔体间的分配系数为: $D^{\text{Ir}} = 0.77$, $D^{\text{Ru}} = 1.7$, $D^{\text{Rh}} = 1.8$, $D^{\text{Pt}} = 0.08$, $D^{\text{Pd}} = 0.03$ (Puchtel and Humayun, 2001; Righter *et al.*, 2004)。原始岩浆 PGE 含量的估算结果列于表 2, 原始地幔标准化后的 PGE 配分型式图见图 9。从表 2 可以看出, 原始岩浆的 Ir、Pd 的含量高于样品 TBZ1-0705 的 Ir、Pd 含量, 原始岩浆 Pd/Ir 值为 7.07, 高于样品 JGT0803 的 6.48。所以, 橄榄石和尖晶石的堆晶作用不仅导致 Ir、Pd 的含量降低, 而且也导致 Pd/Ir 值的降低。原始岩浆

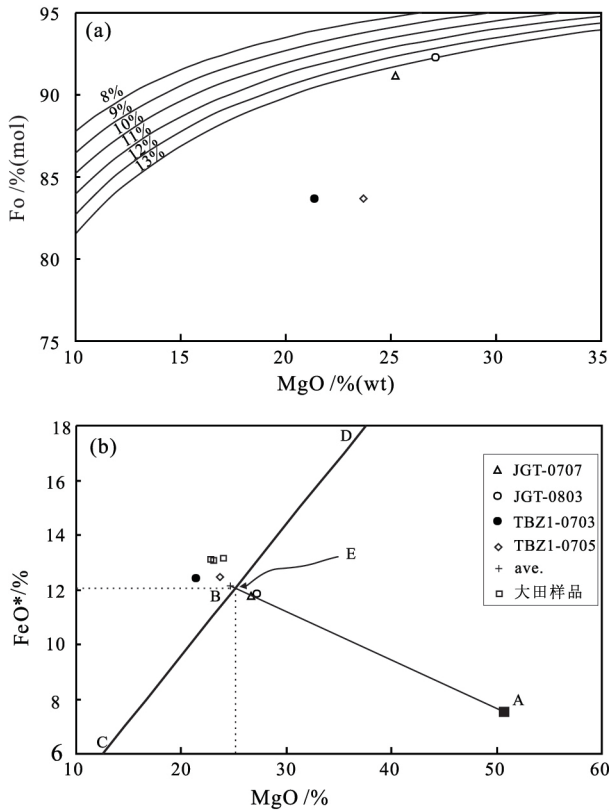


图8 同德苦橄质岩脉橄榄石 Fo 值对全岩 MgO 图解(a) 与橄榄石和全岩的 MgO-FeO 图解(b)

Fig.8 Bulk rock MgO contents vs. Fo values of olivine(a) and MgO vs. FeO contents of both olivine and bulk rocks from picritic dykes in the Tongde area(b)

具有与样品 JGT0803 相似的 PGE 配分型式(图 9) , 其 Ir、Ru、Rh 相对于 Pt、Pd 的亏损最有可能是受地幔部分熔融过程控制的。

表 2 同德苦橄质岩脉样品 TBZ10705 估算的原始岩浆 PGE 组成

Table 2 PGE compositions of primary magmas estimated from sample TBZ10705 from the Tongde picritic dykes

	Tongde picritic dykes (×10 ⁻⁹)					
	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd	Pd/Ir
JGT0803	1.14	2.86	0.45	10.45	7.36	6.48
原始岩浆	1.17	2.64	0.41	11.63	8.24	7.07

4.3 部分熔融

地幔低程度部分熔融时,地幔中的硫化物并未全部熔解,仍有部分 PGE 保留在地幔未熔的硫化物中,原始岩浆亏损 PGE。地幔发生高程度部分熔融,地幔中的硫化物都已经全部熔解时,形成的原始岩浆通常是 S 不饱和的,PGE 随硫化物一起进入熔体,由此形成的岩浆岩 PGE 含量较高,特别是 PPGE,比如科马提岩、苦橄岩等(Keays,1995; Seitz

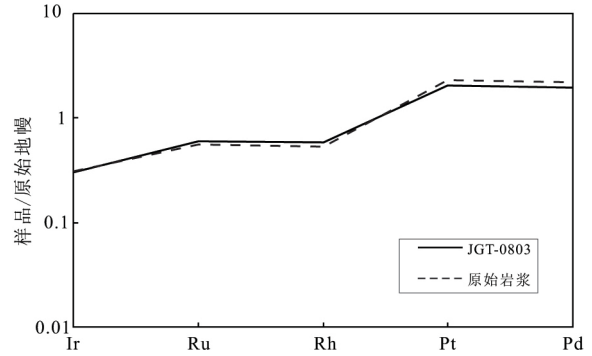


图9 原始岩浆和样品 JGT0803 的原始地幔标准化 PGE 配分型式(原始地幔 PGE 数据采用 Barnes and Maier,1999)

Fig.9 Primitive mantle-normalized PGE patterns of primary melt and the sample JGT0803 (primitive mantle data are after Barnes and Maier,1999)

and Keays,1997; Maier and Barnes,2004)。通常认为,地幔中含有 ~ 250 μg/g 的 S (McDonough and Sun,1995) , ~ 18% (Naldrett,2010) 或者 ~ 25% (Keays,1995) 的地幔部分熔融程度才能将地幔中的 S 全部熔解。从上面的讨论得知,形成攀枝花地区苦橄质岩脉的岩浆 S 不饱和,且 PGE 富集,表明它们的原始岩浆形成于地幔较高分度的部分熔融,可以与地幔柱作用的影响有关。

硫化物饱和时的 S 含量(SCSS) 受熔体 T、p、氧逸度(f_{o2}) 和组分的影响。Li 和 Ripley(2009) 依据岩浆成分和温压条件给出了岩浆 S 饱和度的计算公式:

$$\ln X_S = -1.76 - 0.474(10^4/T) - 0.021p + 5.559X_{FeO} + 2.565X_{TiO_2} + 2.709X_{CaO} - 3.192X_{SiO_2} - 3.049X_{H_2O} \quad (1)$$

式中: 温度 T 的单位为 K, 压力 p 的单位为 ×10⁸ Pa, X 表示氧化物的摩尔分数。

利用式(1) 对岩浆的硫饱和度进行估算,假定含水 1%,全岩 FeO/Fe₂O₃ 比值为 0.9, T 为 1400K (Zhu et al., 2010) , p 为 ~ 10⁹Pa(壳幔边界的压力估值。马昌前,1998) 。计算结果表明攀枝花地区苦橄质岩脉的母岩浆 S 饱和度为 2435 μg/g。从(1) 式可以看出,随着压力的降低, S 饱和度还会升高, 2435 μg/g 的 S 饱和度只是一个下限值,因为这些苦橄质岩脉侵入的是会理群和盐边群地层。Zhu 等(2010) 之前利用 PRIMELT2.XLS 软件对同德苦橄质岩脉地幔源区的熔融程度进行了计算,计算结果为 20%。20%的部分熔融形成的原始岩浆中 S 浓度为 1250 μg/g,明显低于 2435 μg/g 的 S 饱和度,所以这也能解释为什么岩浆没有经历硫化物的熔离。

测得的全岩 S 含量为 240~1400 μg/g (表 1) ,

有些样品的 S 含量低于理论值可能是因为后期蚀变作用导致了 S 的丢失, 因为 S 是一种活动性元素。一些样品硫含量与 $1250 \mu\text{g/g}$ 接近(表 1), 表明地幔源区并不亏损 S。在地球早期壳幔分异的过程中, 大陆岩石圈地幔通常经历过部分熔融事件, 所以它应该是亏损 S 的 (Song *et al.*, 2009)。攀枝花地区苦橄质岩脉更有可能起源于 S 不亏损的软流圈地幔, 这与它们显示似 OIB 的特征是一致的 (Zhu *et al.*, 2010 及作者未发表数据)。此外, 利用 Albaredo (1992) 提出的经验公式: $t(^{\circ}\text{C}) = 2000 [\text{MgO}/(\text{SiO}_2 + \text{MgO})] + 969$ 和 $\ln [10p] (\text{GPa}) = 0.0252T - 0.12\text{SiO}_2 + 5.027$, 得到源区熔融温度为 1693°C , 压力 5.38 GPa , 说明攀枝花地区苦橄质岩脉起源于石榴子石稳定域的软流圈地幔, 其地幔温度明显高出软流圈地幔潜在温度, 可能指示了其地幔柱成因。

总的来说, 形成攀枝花地区新元古代苦橄质岩脉的原始岩浆是 S 不饱和的, 地幔源区发生了较高级的部分熔融, 源区已经没有硫化物残留。如果地幔中的铂族元素只是赋存于硫化物中, 那么当硫化物全部耗尽时, 形成的岩浆不仅应该具有高的 PGE 含量, 其 PGE 间的比值也应该与原始地幔一致。然而事实上科马提岩和苦橄岩的 Pd/Ir 值仍然明显高于原始地幔值, 这意味着地幔中的铂族元素并不只是赋存于硫化物中。很多学者的研究表明, 苦橄岩和科马提岩中 Ir、Ru、Rh 相对于 Pt、Pd 的亏损是因为在地幔发生高程度部分熔融时, Ir-Ru-Rh 合金残留在地幔中导致的 (Keays, 1995; Lorand *et al.*, 1999; Li *et al.*, 2012)。PGE 作为亲铁元素, 具有高的电负性, 很难形成氧化物 (Barnes and Maier, 1999), 形成的富 IPGE 矿物非常难熔, 在部分熔融的过程中, 这些矿物最后熔解, 在结晶过程中, 这些矿物最早结晶 (Peck *et al.*, 1992; O'Neill *et al.*, 1995; Borisov and Palme, 2000; Pagé *et al.*, 2012)。在地幔源区已无硫化物存在的条件下, 攀枝花苦橄质岩脉的 IPGE 亏损可能就是因为有 IPGE 合金矿物滞留在残余地幔体中导致的。

4.4 对本区 800 Ma Cu-Ni-PGE 成矿的意义

四川攀枝花地区同德苦橄质岩脉附近产出冷水箐镁铁-超镁铁质岩体群。该岩体群位于同德杂岩体的北面, 高家村镁铁质-超镁铁质杂岩体的东面 (图 1), 为一个赋存铜镍硫化物矿床的小岩体群 (Zhu *et al.*, 2007)。其各成矿小岩体的成岩年龄为 $807 \sim 817 \text{ Ma}$ (Zhou *et al.*, 2006; Munteanu *et al.*, 2010a)。前人研究表明, 冷水箐 Cu-Ni 硫化物矿床成矿母岩浆亏损 PGE (苟体忠等, 2010; Munteanu *et al.*, 2012)。

对于导致 PGE 亏损的机制, Munteanu 等 (2012) 和苟体忠等 (2010) 都认为是因为原始岩浆达到过硫化物的饱和并发生了硫化物的分离。

冷水箐 Cu-Ni 硫化物矿床中橄榄石 Fo 值为 $75 \sim 86$ (Zhu *et al.*, 2007; Munteanu *et al.*, 2010b), 明显低于与原始岩浆平衡的地幔橄榄石 Fo 值 (~ 90), 表明其母岩浆为演化的岩浆, 并非原始岩浆。采用最高的 Fo 值 (86), 利用 Fo-MgO 图解法, Zhu 等 (2007) 估算了母岩浆的 MgO 含量为 $10\% \sim 11\%$, TFeO 含量约为 9% 。Munteanu 等 (2010b) 同样采用最高的 Fo 值 (86), 主要利用 MELTS 软件来估算母岩浆成分, 得到的 MgO 和 FeO 含量都约为 9% 。在攀枝花盐边地区, 侵入盐边群荒田组的部分镁铁质岩脉具有与冷水箐 Cu-Ni 硫化物矿床成矿母岩浆较为接近的成分。而且, 这些镁铁质岩脉的形成时代 ($792 \pm 13 \text{ Ma}$; Zhu *et al.*, 2008) 与同德苦橄质岩脉的形成时间一致 ($796 \pm 5 \text{ Ma}$; Zhu *et al.*, 2010)。可见, 冷水箐镁铁-超镁铁质岩体群的原始岩浆为类似高 MgO 的苦橄质岩浆, 与同德苦橄质岩脉的岩浆性质非常相似。

尽管同德苦橄质岩脉稍晚于冷水箐镁铁-超镁铁质岩体群形成, 但它们可能具有相似的岩浆起源, 这主要是基于以下几点理由: ①冷水箐镁铁-超镁铁质岩体群和同德苦橄质岩脉在形成时代上很接近, 且产出位置也很近, 表明它们应该形成于相同的构造环境。②冷水箐镁铁-超镁铁质岩体的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $2.4 \sim 5.4$, 同德苦橄质岩脉的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $6.9 \sim 8.7$, 前者的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值低于后者, 这是因为前者经历了 $5\% \sim 27\%$ 的地壳混染 (Zhu *et al.*, 2007, 2010)。可见, 同位素组成显示二者的母岩浆可能都来自一个长期亏损的软流圈地幔源区。③冷水箐镁铁-超镁铁质岩体群的原始岩浆应该是 PGE 不亏损的, 而同德苦橄质岩脉的 PGE 也不亏损; ④同德苦橄质岩脉中橄榄石的 Fo 值为 $81.6 \sim 92.3$, 明显高于冷水箐 Cu-Ni 硫化物矿床中橄榄石 Fo 值范围, 而且 Munteanu 等 (2010b) 利用 MELTS 软件模拟冷水箐镁铁-超镁铁质侵入体岩浆体系的结晶分异过程, 结果显示最早结晶的橄榄石 Fo 值为 93, 这与同德苦橄质岩脉橄榄石的 Fo 值最大值 (92.3) 很接近; ⑤冷水箐矿床中橄榄石的 Ni 含量为 $157 \sim 2750 \mu\text{g/g}$ (Zhu *et al.*, 2007), 总体上明显低于同德苦橄质岩脉中橄榄石的 Ni 含量 ($1988 \sim 4338 \mu\text{g/g}$; Zhu *et al.*, 2010)。

以上讨论表明, 同德苦橄质岩脉与冷水箐 Cu-Ni 硫化物矿床的原始岩浆可能具有相似的起源和

组成。当然,对于这个推论,还需要进一步的工作来验证。

5 结论

(1) 攀枝花地区苦橄质岩脉在铬尖晶石和橄榄石的结晶分异作用过程中, Ir 表现出相容性, Pd 表现出不相容性, 表明它们的 PGE 含量受到了铬尖晶石和橄榄石结晶分异的影响。这些苦橄质岩脉的 Cu/Pd 值(7105~18758) 接近于地幔值, 相对高的 Cu/Zr(0.80~1.38) 和 Pd/Zr(69~131) 值, Pt 与 Pd 无明显的解耦(Pd/Pt=0.54~1.16), 以及具有较高的 PGE 和 IPGE 含量, 表明这些苦橄质岩脉没有经历硫化物和 PGE 合金矿物的熔离。

(2) 通过扣除铬尖晶石和橄榄石的分离结晶作用对 PGE 含量的影响, 就可以计算出原始岩浆的 PGE 组成。攀枝花地区苦橄质岩脉原始岩浆的 PGE 含量较高, 其可能产生于地幔较高级别部分熔融。这些苦橄质岩脉原始岩浆的 Ir、Ru、Rh 相对于 Pt、Pd 明显亏损可能是由于部分熔融过程中有 IPGE 合金矿物残留在源区导致的。通过原始岩浆成分计算的地幔温度明显高出软流圈地幔潜在温度, 可能指示其地幔柱成因。

(3) 攀枝花地区新元古代苦橄质岩脉与冷水箐 Cu-Ni 硫化物矿床的原始岩浆可能具有相似的起源和组成。

参考文献 (References):

Albarede F. 1992. How deep do common basaltic magmas form and differentiate? *Journal of Geophysical Research*, 97(B7): 10997-11009

Bai M, Zhong H, Zhu W G, Bai Z J, He D F. 2013. Platinum-group element geochemical characteristics of the picrites and high-Ti basalts in the Binchuan area, Yunnan Province. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 87(1): 158-175

Ballhaus C, Bockrath C, Wohlgemuth-Ueberwasser C, Laurenz V, Berndt J. 2006. Fractionation of the noble metals by physical processes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152(6): 667-684

Barnes S J, Naldrett A J, Gorton M P. 1985. The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas. *Chemical Geology*, 53(3-4): 303-323

Barnes S J. 1990. The use of metal ratios in prospecting for platinum-group element deposits in mafic and ultramafic intrusions. *Journal of Geochemical Exploration*, 37(1): 91-99

Barnes S J, Couture J F, Sawyer E W, Bouchaib C. 1993. Nickel-copper occurrences in the Belleterre-Angliers Belt of the Pontiac Subprovince and the use of Cu-Pd ratios in interpreting platinum-group element distributions. *Economic Geology*, 88(6): 1402-1418

Barnes S J, Maier W D. 1999. The fractionation of Ni, Cu and the noble

metals in silicate and sulfide liquids. In: Keays R R, Leshner C M, Lightfoot P C, Farrow C E G (eds.), *Dynamic Processes in Magmatic ore Deposits and Their Application in Mineral Exploration. Geological Association Canada Short Course*, pp. 69-106

Barnes S J, Lightfoot P C. 2005. Formation of magmatic nickel-sulfide ore deposits and processes affecting their copper and platinum-group element contents. *Economic Geology*, 100(1): 179-213

Bézos A, Lorand J P, Humler E, Gros M. 2005. Platinum-group element systematics in mid-oceanic ridge basaltic glasses from the Pacific, Atlantic, and Indian Oceans. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(10): 2613-2627

Borisov A, Palme H. 2000. Solubilities of noble metals in Fe-containing silicate melts as derived from experiments in Fe-free systems. *American Mineralogist*, 85(11-12): 1665-1673

Brenan J M, Andrews D. 2001. High-temperature stability of laurite and Ru-Os-Ir alloy and their role in PGE fractionation in mafic magmas. *Canadian Mineralogist*, 39(2): 341-360

Edwards S J. 1990. Harzburgites and refractory melts in the Lewis Hills massif, Bay of Islands ophiolite complex: the base-metals and precious-metals story. *Canadian Mineralogist*, 28: 537-552

Fleet M E, Stone W E. 1991. Partitioning of platinum-group elements in the Fe-Ni-S system and their fractionation in nature. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(1): 245-253

Green D H, Falloon T J, Eggins S M, Yaxley G M. 2001. Primary magmas and mantle temperatures. *European Journal of Mineralogy*, 13(3): 437-451

Hamlyn P R, Keays R R, Cameron W E, Crawford A J, Waldron H M. 1985. Precious metals in magnesian low-Ti lavas: Implications for metallogenesis and sulfur saturation in primary magmas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49(8): 1797-1911

Keays R R. 1995. The role of komatiitic and picritic magmatism and S-saturation in the formation of ore deposits. *Lithos*, 34(1-3): 1-18

Li C S, Tao Y, Qi L, Ripley E M. 2012. Controls on PGE fractionation in the Emeishan picrites and basalts: Constraints from integrated lithophile-siderophile elements and Sr-Nd isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 90: 12-32

Li C Y, Ripley E M. 2009. Sulfur contents at sulfide-liquid or anhydrite saturation in silicate melts: Empirical equations and example applications. *Economic Geology*, 104(3): 405-412

Li Z X, Li X H, Kinny P D, Wang J. 1999. The breakup of Rodinia: Did it start with a mantle plume beneath South China?. *Earth and Planetary Science Letters*, 173(3): 171-181

Lightfoot P C, Keays R R. 2005. Siderophile and chalcophile metal variations in flood basalts from the Siberian Trap, Noril'sk Region: Implications for the origin of the Ni-Cu-PGE sulfide ores. *Economic Geology*, 100(3): 439-462

Lin G C, Li X H, Li W X. 2007. SHRIMP U-Pb zircon age, geochemistry and Nd-Hf isotope of Neoproterozoic mafic dyke swarms in western Sichuan: Petrogenesis and tectonic significance. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 50(1): 1-16

Lorand J P, Pattou L, Gros M. 1999. Fractionation of platinum-group elements and gold in the upper mantle: A detailed study in Pyrenean orogenic lherzolites. *Journal of Petrology*, 40(6): 957-981

- Maier W D , Prichard H M , Fisher P C , Barnes S J. 1999. Compositional variation of laurite at Union Section in the Western Bushveld Complex. *South African Journal of Geology* , 102(3) : 286–292
- Maier W D , Barnes S J. 2004. Pt/Pd and Pd/Ir ratios in mantle-derived magmas: A possible role for mantle metasomatism. *South African Journal of Geology* , 107(3) : 333–340
- McDonough W F , Sun S S. 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology* , 120(3–4) : 223–253
- Munteanu M , Wilson A H , Yao Y , Chunnnett G , Luo Y N. 2010a. Sequence of magma emplacement and sulfide saturation in the Gaojiacun-Lengshuiqing intrusive complex(SW China) . *Mineralium Deposita* , 45(6) : 517–529
- Munteanu M , Wilson A H , Yao Y , Jiang S Y , Chunnnett G , Luo Y N , Mafurutu L , Phadagi R. 2010b. A conduit-related genesis of the Lengshuiqing intrusive assemblage(Sichuan , SW China) . *Journal of Volcanology and Geothermal Research* , 189(1–2) : 118–130
- Munteanu M , Wilson A H , Yao Y , Chunnnett G , Luo Y N , Sibanda S. 2012. The Lengshuiqing Ni-Cu deposit , Sichuan , Southwestern China: Ore characteristics and genesis. *The Canadian Mineralogist* , 49(6) : 1599–1626
- Nakagawa M , Franco H E A. 1997. Placer Os-Ir-Ru alloys and sulfides: Indicators of sulfur fugacity in an ophiolite?. *Canadian Mineralogist* , 35(6) : 1441–1452
- Naldrett A J , Duke J M. 1980. Platinum metals in magmatic sulfide ores. *Science* , 208(4451) : 1417–1424
- Naldrett A J. 2010. Secular variation of magmatic sulfide deposits and their source magmas. *Economic Geology* , 105(3) : 669–688
- Naldrett A J. 2011. Fundamentals of magmatic sulfide deposits. In: Li C , Ripley E M(Eds.) . *Magmatic Ni-Cu and PGE Deposits: Geology , Geochemistry and Genesis* . Reviews in Economic Geology , 1–50
- O'Neill H St C , Dingwell D B , Borisov A , Spettel B , Palme H. 1995. Experimental petrochemistry of some highly siderophile elements at high temperatures , and some implications for core formation and the mantle's early history. *Chemical Geology* , 120(3–4) : 255–273
- Pagé P , Barnes S J , Bédard J H , Zientek M L. 2012. In situ determination of Os , Ir , and Ru in chromites formed from komatiite , tholeiite and boninite magmas: Implications for chromite control of Os , Ir and Ru during partial melting and crystal fractionation. *Chemical Geology* , 302–303: 3–15
- Pauling L. 1960. *The Nature of the Chemical Bond*(3rd Edn.) . Ithaca , NY: Cornell University Press
- Peach C L , Mathez E A , Keays R R , Reeves S J. 1994. Experimentally determined sulfide melt-silicate melt partition coefficients for iridium and palladium. *Chemical Geology* , 117(1–4) : 361–377
- Peck D C , Keays R R , Ford R J. 1992. Direct crystallization of refractory platinum-group element alloys from boninitic magmas: Evidence from western Tasmania. *Austrian Journal of Earth Sciences* , 39(3) : 373–387
- Puchtel I S , Humayun M. 2001. Platinum group element fractionation in a komatiitic basalt lava lake. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 65(17) : 2979–2993
- Qi L , Zhou M F , Wang C Y. 2004. Determination of low concentrations of platinum group elements in geological samples by ID-ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* , 19(10) : 1335–1339
- Qi L , Zhou M F , Wang C Y , Sun M. 2007. Evaluation of a technique for determining Re and PGEs in geological samples by ICP-MS coupled with a modified Carius tube design. *Geochemical Journal* , 41(6) : 407–414
- Qi L , Gao J F , Huang X W , Hu J , Zhou M F , Zhong H. 2011. An improved digestion technique for determination of platinum group elements in geological samples. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* , 26(9) : 1990–1904
- Righter K , Campbell A J , Humayun M , Hervig R L. 2004. Partitioning of Ru , Rh , Pd , Re , Ir , and Au between Cr-bearing spinel , olivine , pyroxene and silicate melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 68(4) : 867–880
- Roeder P L , Emslie R F. 1970. Olivine-liquid equilibrium. *Contributions to Mineralogy Petrology* , 29(4) : 275–289
- Seitz H M , Keays R R. 1997. Platinum group element segregation and mineralization in a noritic ring complex formed from Proterozoic siliceous high magnesium basalt magmas in the Vestfold Hills , Antarctica. *Journal of Petrology* , 38(6) : 703–725
- Simkin T , Smith J V. 1970. Minor-element distribution in olivine. *Journal of Geology* , 78(3) : 304–325
- Sinclair J A. 2001. A re-examination of the “Yanbian Ophiolite Suite”: Evidence for western extension of the Mesoproterozoic Sibao Orogen in South China. *Geological Society of Australia* , 65: 99–100
- Song X Y , Keays R R , Xiao L , Qi H W , Ihlenfeld C. 2009. Platinum-group element geochemistry of the continental flood basalts in the central Emeishan Large Igneous Province , SW China. *Chemical Geology* , 262(3–4) : 246–261
- Torres-Ruiz J , Garuti G , Gazzotti M , Gervilla F , Fenoll Hach-Ali P. 1996. Platinum-group minerals in chromites from the ojen Iherzolite massif(Serrania de Ronda , Beltic Cordillera , Southern Spain) . *Mineralogy and Petrology* , 56(1) : 25–50
- Vogel D C , Keays R R. 1997. The petrogenesis and platinum-group element geochemistry of the Newer Volcanic Province , Victoria , Australia. *Chemical Geology* , 136(3–4) : 181–204
- Weast R C , Astle M J , Beyer W H. 1986. *CRC Handbook of Chemistry and Physics* . Boca Raton , FL: CRC press
- Zhao J H , Zhou M F. 2007. Neoproterozoic adakitic plutons and arc magmatism along the western margin of the Yangtze Block , South China. *The Journal of Geology* , 115(6) : 675–689
- Zhou M F , Yan D P , Kennedy A K , Li Y Q , Ding J. 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block , South China. *Earth and Planetary Science Letters* , 196(1–2) : 51–67
- Zhou M F , Ma Y X , Yan D P , Xia X P , Zhao J H , Sun M. 2006. The Yanbian terrane(southern Sichuan Province , SW China) : a Neoproterozoic arc assemblage in the western margin of the Yangtze Block. *Precambrian Research* , 144(1–2) : 19–38
- Zhu W G , Zhong H , Deng H L , Wilson A H , Liu B G , Li C Y , Qin Y. 2006. SHRIMP zircon U-Pb age , geochemistry and Nd-Sr isotopes of the Gaojiacun mafic-ultramafic intrusive complex , Southwest China. *International Geology Review* , 48(7) : 650–668

Zhu W G, Zhong H, Li X H, Liu B G, Deng H L, Qin Y. 2007. ⁴⁰Ar-³⁹Ar age, geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopes of the Neoproterozoic Lengshuiqing Cu-Ni sulfide-bearing mafic-ultramafic complex, SW China. *Precambrian Research*, 155(1-2): 98-124

Zhu W G, Zhong H, Li X H, Deng H L, He D F, Wu K W, Bai Z J. 2008. SHRIMP Zircon U-Pb geochronology, elemental, and Nd isotopic geochemistry of the Neoproterozoic mafic dykes in the Yanbian area, SW China. *Precambrian Research*, 164(1-2): 66-85

Zhu W G, Li X H, Zhong H, Wang X C, He D F, Bai Z J, Liu F. 2010. The Tongde picritic dikes in the western Yangtze Block: Evidence for Ca. 800-Ma mantle plume magmatism in South China during the breakup of Rodinia. *Journal of Geology*, 118(5): 509-522

苟体忠, 钟宏, 朱维光, 漆亮, 冷成彪, 吴孔文. 2010. 川西冷水箐 Cu-Ni 硫化物矿床的 PGE 和 Re-Os 同位素地球化学特征及成矿意义. *岩石学报*, 26(11): 3363-3374

马昌前. 1998. 莫霍面、下地壳与岩浆作用. *地学前缘*, 5(4): 201-208

四川省地质矿产局. 1991. 四川省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1-730

宋谢炎, 胡瑞忠, 陈列锰. 2009. 铜、镍、铂族元素地球化学性质及其在幔源岩浆起源、演化和岩浆硫化物矿床研究中的意义. *地学前缘*, 16(4): 287-305

张招崇, 王福生. 2003. 一种判别原始岩浆的方法: 以苦橄岩和碱性玄武岩为例. *吉林大学学报(地球科学版)*, 33(2): 130-134

(本文责任编辑: 龚超颖)

致 谢

学术质量是学术期刊的灵魂, 而保障期刊学术质量的则是广大的审稿专家。2015 年, 有 100 多位专家为本刊评审了稿件, 他们对稿件进行了客观、公正、诚恳的评价, 为提高稿件质量付出了宝贵的时间、精力和智慧, 为《矿物岩石地球化学通报》的成长作出了贡献。在此, 编辑部谨向每一位审稿专家致以衷心的感谢, 并希望今后能得到各位的继续支持!

新年伊始, 恭祝各位专家, 身体健康, 新年快乐, 阖家幸福。

《矿物岩石地球化学通报》编辑部
2016 年 1 月

附: 2015 年 1 月 1 日至 12 月 31 日审稿专家名单。①本统计结果以审稿完成时间为准; ②姓氏汉语拼音排序。

- | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 鲍志东 | 蔡春芳 | 蔡剑辉 | 曹 剑 | 曾键年 | 陈多福 | 陈华勇 | 陈建平 | 陈立辉 | 陈衍景 | 程光锁 |
| 代世峰 | 丁俊英 | 杜杨松 | 杜远生 | 樊祺诚 | 范宏瑞 | 范洪海 | 房启飞 | 冯新斌 | 符亚洲 | 高东林 |
| 郭庆军 | 郭正府 | 韩春明 | 何宏平 | 何金先 | 胡芳芳 | 胡 浩 | 华仁民 | 黄 标 | 黄 方 | 黄思静 |
| 黄智龙 | 贾国东 | 姜耀辉 | 姜在兴 | 蒋少涌 | 蒋裕强 | 金章东 | 康明亮 | 冷成彪 | 李美俊 | 李秋立 |
| 李伍平 | 李 忠 | 连 宾 | 梁小兵 | 廖立兵 | 林锦荣 | 林杨挺 | 凌明星 | 刘冬冬 | 刘家军 | 刘建明 |
| 刘建忠 | 刘 健 | 刘 立 | 刘 燊 | 刘文汇 | 刘显凡 | 刘小汉 | 柳广弟 | 卢 鸿 | 鲁安怀 | 罗静兰 |
| 罗维均 | 毛景文 | 孟元林 | 缪秉魁 | 戚华文 | 漆 亮 | 齐有强 | 钱建平 | 秦克章 | 邱检生 | 邱隆伟 |
| 曲希玉 | 申宝剑 | 申俊峰 | 石学法 | 宋金明 | 宋绵新 | 宋谢炎 | 苏本勋 | 孙海龙 | 孙卫东 | 孙晓明 |
| 孙永革 | 虞先国 | 汪立今 | 汪 灵 | 汪 洋 | 王登红 | 王 驹 | 王 宁 | 王 强 | 王汝成 | 王学求 |
| 王 焰 | 王玉往 | 王岳军 | 王云鹏 | 吴春明 | 吴丰昌 | 吴敬禄 | 吴康军 | 吴亚生 | 武 广 | 肖红伟 |
| 肖唐付 | 肖贤明 | 谢桂青 | 谢树成 | 谢先德 | 徐 海 | 徐夕生 | 徐义刚 | 许德如 | 许文良 | 薛春纪 |
| 薛海涛 | 鄢全树 | 闫建平 | 严德天 | 杨经绥 | 杨瑞东 | 杨守业 | 杨天水 | 杨晓志 | 杨志军 | 叶 霖 |
| 英基丰 | 张爱铨 | 张宝华 | 张 斌 | 张成江 | 张 达 | 张 恩 | 张连昌 | 张 旗 | 张 乾 | 张招崇 |
| 张兆峰 | 张正伟 | 章邦桐 | 赵新福 | 赵振华 | 郑建平 | 郑荣才 | 郑秀娟 | 钟 宏 | 周文戈 | 周永章 |
| 朱光有 | 朱建喜 | 朱赖民 | 朱如凯 | 朱筱敏 | 祝新友 | 左仁广 | | | | |