

雅鲁藏布江西段东波超镁铁岩体经历了俯冲带流体的改造:来自铂族元素的证据

牛晓露¹ 杨经绥¹ 陈松永¹ 刘 飞¹ 熊发挥¹ 刘 钊¹ 郭国林²

(1. 大陆构造与动力学国家重点实验室, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

2. 核资源与环境省部共建国家重点实验室培育基地, 东华理工大学, 江西南昌 330013)

摘要:东波超镁铁岩体位于雅鲁藏布江缝合带的西段,在中国是一个不多见的面积超过 400 km² 的大型超镁铁岩体。已有的岩石学和矿物学特征表明,该岩体与同一带中含有大型铬铁矿的罗布莎岩体可以对比,是一个寻找铬铁矿床的远景区。本文开展了东波超镁铁岩的主要组成岩石类型——方辉橄榄岩的铂族元素(PGE)研究,并结合主量和稀土元素(REE)组成,探讨岩体的成因。东波超镁铁岩中方辉橄榄岩具有相当高的 Os 含量($3.52 \times 10^{-9} \sim 4.36 \times 10^{-9}$),亏损的主量元素组成和低于原始地幔的稀土元素含量($0.89 \times 10^{-6} \sim 1.37 \times 10^{-6}$),指示东波超镁铁岩为经历过部分熔融和熔体抽取的亏损残余地幔岩石。东波超镁铁岩的 PGE 总含量为 $23.97 \times 10^{-9} \sim 31.98 \times 10^{-9}$,高于原始地幔的含量;PGE 配分型式为左倾的正斜率型,相对 Ir 亚组铂族元素(IPGE)亏损钨亚组铂族元素(PPGE),Pd/Ir=1.49~2.65;REE 配分型式为中稀土亏损的“V”型或“U”型,原始地幔标准化元素比值(La/Sm)_m 为 1.05~3.37, (Gd/Yb)_m=0.28~0.64;这些数据揭示东波超镁铁岩经历过交代作用,交代物质应富集不相容元素,高 PGE 含量,相对 IPGE 富集 PPGE;较低的 Cu/Pd 比值(1226~3448)要求交代物质还应富含硫化物;推测交代物质可能来源于俯冲带构造环境下所产生岩浆熔离出的富硫化物熔体/流体。

关键词:交代作用;残余地幔岩;PGE REE;东波超镁铁岩;雅鲁藏布江缝合带

中图分类号:P588.12^{†5} **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2013)03-0756-11

1 引言

铂金属元素(PGE)包括 Ru、Rh、Pd、Os、Ir 和 Pt,是强亲铁元素(HSE),相对于硅酸盐矿物,它们更容易进入硫化物相和金属相,因此,这些元素主要富集在地核和地幔中,包含了丰富的地幔过程信息。

根据元素组合,铂族元素(PGE)可以分为两个亚组:Ir 亚组(IPGE;Os, Ir 和 Ru)和 Pd 亚组(PPGE;Rh, Pt 和 Pd)。Ir 亚组为难熔金属,熔融温度 >2000°C,易保存于难熔相,如橄榄石、尖晶石等,在地幔岩中常呈合金相和高温硫化物相存在;Pd 亚组熔融温度 <2000°C,主要保存在较早形成的熔融

相中(如低温硫化物)。Ir 亚组和 Pd 组地球化学性质的不同,使它们在地幔部分熔融过程中表现为不同的行为,Ir 亚组倾向于残留在地幔橄榄岩的残余体中,表现为相容元素的特征,而 Pd 亚组则倾向于优先进入熔体中,表现为不相容元素的特征。铂族各元素间性质的不同导致其在地质过程中具有不同的化学行为从而极易发生分异,进而可以用来探讨地幔中的部分熔融、地幔交代、核幔分异等作用以及岩浆演化过程中的岩浆混合、壳幔混合和分离结晶等作用,这已经得到了地球科学界的广泛重视及应用^[1-9]。尤其是超镁铁岩中的铂族元素组成,可以指示超镁铁岩的成因及所经历的各种地质作用(如,地幔交代作用

收稿日期:2013-01-27;改回日期:2013-05-02

基金项目:本文得到国家行业专项(SinoProbe-05-02)、国家自然科学基金重点项目(40930313)、中国地质调查局工作项目(1212011121263、1212011121272)联合资助。

作者简介:牛晓露,女,1983年生,助理研究员,主要从事岩浆岩岩石学和岩石地球化学的研究工作;E-mail:niuxiaoludx@126.com。

等)^[2-3,6-11]。

东波超镁铁岩体位于雅鲁藏布江缝合带的西段,在岩石学、矿物学特征上,东波超镁铁岩与中国最大的铬铁矿矿床——罗布莎超镁铁岩可对比,是一个具有铬铁矿大矿富矿前景的超镁铁岩岩体^[12],因此,对东波超镁铁岩岩体的研究将具有重要的战略找矿意义。杨经绥等^[12](2011)已对该岩体进行了详细的野外考察和系统的矿物学工作。本文拟着重对东波超镁铁岩的 PGE 组成进行研究,结合其主量、稀土元素特征及单斜辉石成分特征,希望对东波超镁铁岩的成因提供新的限制,并对可能的地幔交代作用进行探讨。

2 地质背景及样品描述

东波超镁铁岩体位于雅鲁藏布江缝合带的最西端(图 1-a),雅鲁藏布江缝合带是印度板块和欧亚板块之间的分界线,标志着新特提斯洋的最终关闭^[13-15]。雅鲁藏布江缝合带北为冈底斯构造带,南为喜马拉雅构造带,缝合带中地幔橄榄岩广泛出露,发育中国境内规模最大的地幔橄榄岩带。其中,赋存中国最大的铬铁矿矿床的罗布莎地幔橄榄岩即位于该缝合带的东段,其中发育金刚石等深部地幔矿物,引起了国内外学者的广泛关注^[16-19]。

东波超镁铁岩体呈近北西—南东走向的梨形或近似等轴状岩体,航磁资料显示该岩体约 400 km²,其中约三分之一的面积被新生代剥蚀物沉积覆盖(图 1-b)。东波岩体与周围地层总体呈断层接触,包括晚三叠世—晚白垩世海相碳酸盐岩、碎屑岩和基性熔岩,或被新近系—第四系所覆盖。前人在岩体东北边缘出露的早白垩世—晚白垩世的红色硅质岩发现放射虫化石^[20]。东波岩体周边普遍发育红色的硅质岩层,可见硅质岩或直接盖在超镁铁岩上,或呈剥蚀残留的块体;在岩体的北界,超镁铁岩体被构造逆推覆到早三叠世—晚白垩世地层之上;接触带处的超镁铁岩被强烈破碎和蛇纹石化^[12]。

东波超镁铁岩以方辉橄榄岩为主(约占岩体总面积的 70%~80%),其次为纯橄岩(约占岩体总面积的 5%~10%)及少量的二辉橄榄岩。杨经绥等^[12](2011)对这三类组成岩石的结构、构造及矿物组成均做过详细描述,在此不再赘述,仅概述本文的研究对象方辉橄榄岩的主要特征。总体上,方辉橄榄岩岩石较为新鲜,蛇纹石化仅限于岩体边部;块状构造,

常呈球状风化;主要由橄榄石(含量 70%~85%)、斜方辉石(含量 15%~25%)、少量单斜辉石(含量 0.5%~4%)和铬尖晶石($\leq 2\%$)组成;中粗粒块状结构,发育嵌晶结构(图 2-a)、熔融残余结构和粒状镶嵌结构(图 2-b);粗粒单斜辉石常发育波状消光(图 2-b,c),并常见单斜辉石的出溶现象(图 2-c)。

3 分析方法

全岩主量、稀土和铂族元素分析在河南岩矿测试中心完成。样品粉末熔成玻璃片后用 X 射线荧光光谱(XRF)方法测定主量元素组成,测试精度优于 1%。采用两酸(HNO₃+HF)高压反应釜溶样方法对样品粉末进行溶解以进行稀土元素分析。采用电感耦合等离子质谱仪(ICPMS; Agilent 7700x)来测定元素含量。含量高于 10×10^{-6} 元素的误差小于 5%,小于 10×10^{-6} 元素误差小于 10%。铂族元素测试采用同位素稀释 Carius tube 法,在电感耦合等离子质谱仪上测定,分析精度优于 $\pm 10\%$;详细分析流程参见文献^[22]。

4 结果

东波超镁铁岩中方辉橄榄岩的主量元素、稀土元素(REE)和铂族元素组成(表 1)显示:

方辉橄榄岩的烧失量(LOI)1.13%~6.73%,平均为 3.62%,说明岩石后期蚀变较轻。SiO₂ 含量为 41.29%~43.49%,平均为 42.44%;MgO 含量为 40.31%~42.21%,平均为 41.32%;Fe₂O₃Total 含量为 8.13%~8.62%,平均为 8.41%;Al₂O₃ 含量为 0.64%~1.17%,平均为 0.97%。

东波超镁铁岩方辉橄榄岩的 REE 总量为 0.89×10^{-6} ~ 1.37×10^{-6} ,平均为 1.07×10^{-6} 。样品的球粒陨石和原始地幔标准化 REE 配分模式如图 3 所示,图中还给出了正常洋中脊玄武岩(N-MORB)、富集的洋中脊玄武岩(E-MORB)和洋岛玄武岩(OIB)的 REE 配分模式,以与东波超镁铁岩的 REE 配分模式进行对比。不论是在球粒陨石还是原始地幔的 REE 配分模式上,东波超镁铁岩均呈中稀土亏损、LREE 相对富集的“v”型或“U”型配分型式(图 3-a,b)。

东波超镁铁岩铂族元素的总量变化范围为 23.97×10^{-9} ~ 31.98×10^{-9} ,平均为 28.64×10^{-9} (表 1),是原始地幔 PGE 总含量(23.75×10^{-9} ^[24])的 1.01~1.35

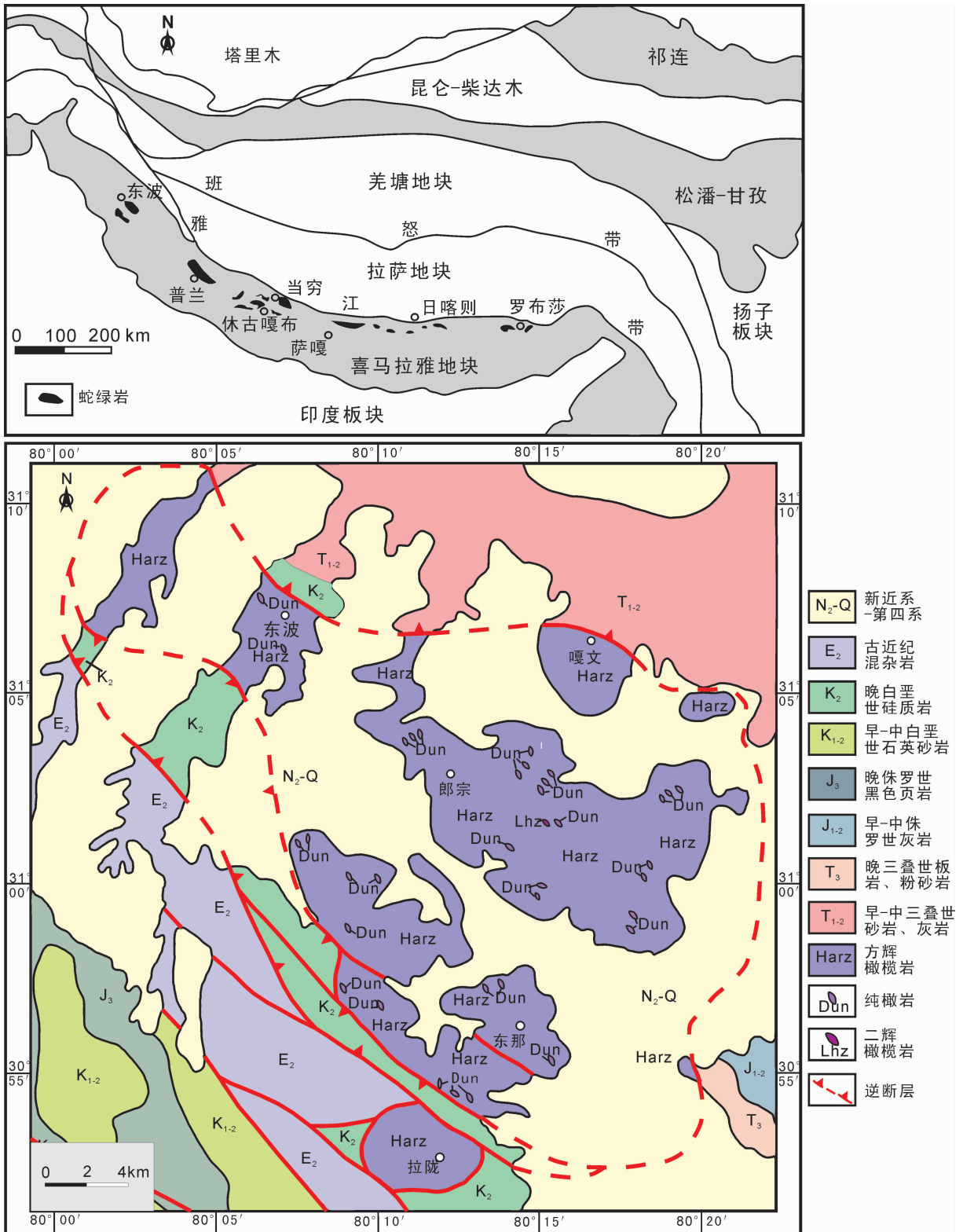


图1 研究区区域地质简图(a)(据文献[20]修改)东波超镁铁岩地质简图(b)(据文献[12]修改)
 Fig.1 Sketch geological map of the study area (a)(after Reference [20])and detailed geological map of Dongbo ultramafic rocks (b)(after Reference [12])

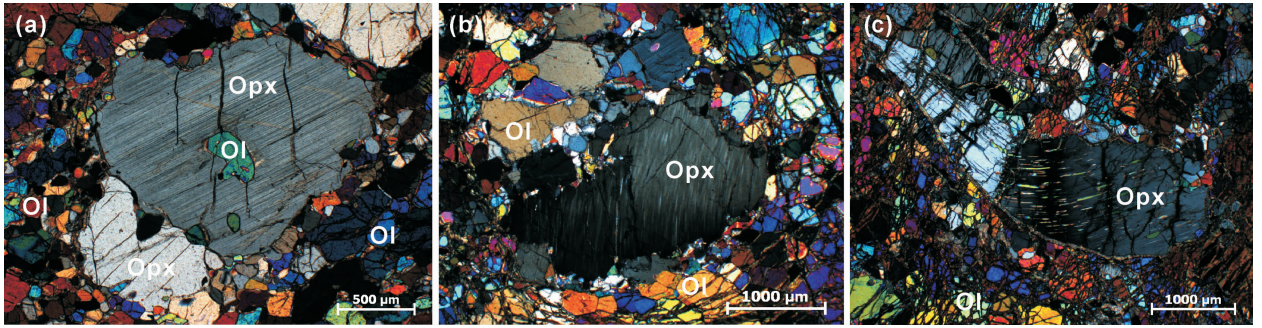


图2 东波超镁铁岩方辉橄榄岩的显微镜下特征

a—嵌晶结构,斜方辉石中包裹橄榄石;b—熔融残余结构;粗粒斜方辉石发育波状消光;c—粗粒斜方辉石发生扭折,发育波状消光,出溶针状单斜辉石;Opx—斜方辉石;Ol—橄榄石

Fig.2 Photomicrographs of Dongbo ultramafic rocks

a— Poikilitic texture, with olivine inclusions in orthopyroxene porphyroblast; b—Porphyroclastic texture with orthopyroxene showing undulatory extinction; c—Warped orthopyroxene porphyroblast with acicular clinopyroxene exsolutions assuming undulatory extinctions. Opx, Orthopyroxene; Ol, Olivine

倍,与球粒陨石中PGE含量(3509×10^{-9} [25])的比值为0.007~0.009。从原始地幔标准化数值看,元素Os、Ru、Rh和Pd的含量均明显高于原始地幔的值(Os、Ru、Rh、Pd原始地幔标准化后的范围分别为1.04~1.28、1.03~1.31、1.05~1.39和1.26~2.19;表1);个别样品的元素Ir和Pt略低于原始地幔值,其他样品均明显高于原始地幔值(表1),较原始地幔富集。

东波超镁铁岩各PGE元素比值分别为: Pd/Os = 1.40~2.44, 平均为1.82; Pd/Ir = 1.49~2.65, 平均为1.98; Pd/Ru = 0.98~1.61, 平均为1.22; Pd/Rh = 5.07~7.61, 平均为5.95; Pd/Pt = 0.87~1.17, 平均为0.96; 均高于原始地幔(比值依次为1.18、1.18、0.80、4.21和0.57 [24])和球粒陨石(比值依次为1.06、1.01、0.79、2.73和0.53 [25])。经原始地幔标准化后的各元素比值为: (Pd/Os)_m = 1.19~2.07, 平均为1.54; (Pd/Ir)_m = 1.27~2.25, 平均为1.68; (Pd/Ru)_m = 1.22~2.01, 平均为1.52; (Pd/Rh)_m = 1.20~1.81, 平均为1.41; (Pd/Pt)_m = 1.52~2.04, 平均为1.67。经球粒陨石标准化后的各元素比值为: (Pd/Os)_c = 1.32~2.30, 平均为1.71; (Pd/Ir)_c = 1.48~2.63, 平均为1.96; (Pd/Ru)_c = 1.23~2.04, 平均为1.54; (Pd/Rh)_c = 1.86~2.79, 平均为2.18; (Pd/Pt)_c = 1.62~2.19, 平均为1.19(表1)。

样品的球粒陨石和原始地幔标准化PGE配分模式(图4-a,b),不同样品显示相似的配分模式,呈IPGE相对亏损、PPGE相对富集的左倾配分模式(正斜率型)。

5 讨论

5.1 东波超镁铁岩为部分熔融后残余的地幔岩

如前所述,铂族元素为强烈亲铁元素,因此,可以利用它们在岩石中的含量来鉴别岩石形成于熔融残留还是岩浆结晶作用。以元素Os为例,在地幔熔融过程中,Os在残余地幔中强相容 [27-28]。这样,残留地幔岩石表现为高Os含量(如,SCLM, 3×10^{-9} ~ 5×10^{-9} [27,29]),而形成于地幔部分熔融熔体的岩石(如,绝大部分地壳岩石)则具有极低的Os含量(0.005×10^{-9} ~ 0.2×10^{-9} [30-32])。

东波超镁铁岩具有高的Os含量(3.52×10^{-9} ~ 4.36×10^{-9} ;表1),指示东波超镁铁岩为地幔岩石,而非形成于地幔来源熔体的岩浆岩。此外,东波超镁铁岩的Os含量远高于原始地幔的Os含量(3.4×10^{-9} [24]),说明该岩体经历过较高级别的部分熔融作用,是部分熔融形成的熔体抽离后的残余地幔岩石。

该结论也得到了岩体的主量元素和稀土元素组成特征的支持。本文所研究的东波超镁铁岩的MgO含量为40.31%~42.21%,平均为41.32%,高于原始地幔的MgO含量(38.5% [33]); Al₂O₃含量为0.64%~1.17%,平均为0.97%,远低于原始地幔的Al₂O₃含量(3.97% [33]); CaO含量为0.79%~1.46%,平均为1.16%,也远低于原始地幔的CaO含量(3.50% [33])。在球粒陨石标准化稀土元素配分模式上,各稀土元素的含量均低于原始地幔的稀土元素含量,稀土元

表 1 东波超镁铁岩中方辉橄岩的主量元素、稀土元素和铂族元素组成
 Table 1 Major element, rare-earth element (REE) and platinum-group element (PGE) compositions of harzburgites from Dongbo ultramafic rocks

样品号	11Y-311-1	11Y-311-2	11Y-312-1	11Y-313-1	11Y-314-1	11Y-315-1	11Y-317-1	11Y-319-2
主量元素/%								
SiO ₂	42.71	41.79	43.16	42.77	41.99	42.3	43.49	41.29
TiO ₂	0.019	0.013	0.015	0.015	0.016	0.015	0.017	0.017
Al ₂ O ₃	1.17	0.64	1.06	1.14	0.82	1.09	0.73	1.08
Cr ₂ O ₃	0.549	0.547	0.571	0.518	0.548	0.521	0.562	0.521
Fe ₂ O ₃ Total	8.39	8.4	8.62	8.49	8.13	8.59	8.48	8.16
MnO	0.157	0.156	0.158	0.158	0.15	0.158	0.159	0.152
MgO	40.36	41.75	41.6	41.73	40.55	42.21	42.02	40.31
CaO	1.46	0.91	1.24	1.42	0.94	1.35	0.79	1.15
Na ₂ O	0.13	0.13	0.14	0.17	0.14	0.13	0.14	0.13
K ₂ O	0.0398	0.0254	0.0245	0.0246	0.019	0.012	0.0199	0.0113
P ₂ O ₅	0.007	0.009	0.008	0.006	0.006	0.005	0.007	0.007
LOI	4.22	4.87	2.64	1.85	4.65	1.13	4.16	6.73
Total	99.21	99.24	99.24	98.29	97.96	97.51	100.58	99.56
稀土元素/10 ⁻⁶								
La	0.099	0.132	0.107	0.174	0.132	0.11	0.073	0.146
Ce	0.283	0.31	0.242	0.4	0.391	0.282	0.211	0.362
Pr	0.029	0.038	0.025	0.047	0.045	0.03	0.021	0.042
Nd	0.0112	0.108	0.097	0.15	0.121	0.095	0.101	0.115
Sm	0.033	0.048	0.043	0.048	0.041	0.053	0.045	0.028
Eu	0.015	0.016	0.015	0.018	0.018	0.021	0.019	0.011
Gd	0.069	0.072	0.064	0.08	0.062	0.084	0.089	0.035
Tb	0.015	0.013	0.01	0.015	0.011	0.019	0.018	0.007
Dy	0.124	0.09	0.071	0.123	0.08	0.147	0.139	0.063
Ho	0.029	0.02	0.017	0.032	0.02	0.034	0.031	0.017
Er	0.099	0.062	0.066	0.099	0.063	0.115	0.096	0.062
Tm	0.019	0.012	0.013	0.019	0.012	0.02	0.019	0.013
Yb	0.141	0.093	0.096	0.138	0.087	0.139	0.121	0.103
Lu	0.025	0.016	0.02	0.025	0.018	0.027	0.027	0.021
∑REE	0.9912	1.03	0.886	1.368	1.101	1.176	1.01	1.025
(La/Sm) _m	1.94	1.78	1.61	2.34	2.08	1.34	1.05	3.37
(Gd/Yb) _m	0.40	0.64	0.55	0.48	0.59	0.50	0.61	0.28
铂族元素/10 ⁻⁹								
Os	3.989	4.227	3.588	4.088	3.59	3.522	4.361	3.53
Ir	3.6	3.967	3.373	3.759	3.305	3.123	4.017	3.228
Ru	6.062	6.536	5.167	6.035	5.448	5.127	6.348	5.328
Rh	1.204	1.322	0.994	1.266	1.151	1.058	1.314	1.091
Pt	7.565	8.282	5.805	8.247	7.499	6.573	7.771	6.709
Pd	6.821	7.644	5.038	7.599	8.762	6.29	7.152	6.659
Cu	20.61	19.818	12.978	19.269	10.746	15.282	24.66	14.76
∑PGE	29.241	31.978	23.965	30.994	29.755	25.693	30.963	26.545
Pd/Ir	1.89	1.93	1.49	2.02	2.65	2.01	1.78	2.06
Pd/Os	1.71	1.81	1.40	1.86	2.44	1.79	1.64	1.89
Pd/Ru	1.13	1.17	0.98	1.26	1.61	1.23	1.13	1.25
Pd/Rh	5.67	5.78	5.07	6.00	7.61	5.95	5.44	6.10
Pd/Pt	0.90	0.92	0.87	0.92	1.17	0.96	0.92	0.99
Cu/Pd	3021.55	2592.62	2576.02	2535.73	1226.43	2429.57	3447.99	2216.55
原始地幔标准化 PGE								
Os	1.173	1.243	1.055	1.202	1.056	1.036	1.283	1.038
Ir	1.059	1.167	0.992	1.106	0.972	0.919	1.181	0.949
Ru	1.212	1.307	1.033	1.207	1.090	1.025	1.270	1.066
Rh	1.267	1.392	1.046	1.333	1.212	1.114	1.383	1.148
Pt	1.081	1.183	0.829	1.178	1.071	0.939	1.110	0.958
Pd	1.705	1.911	1.260	1.900	2.191	1.573	1.788	1.665
(Pd/Ir) _m	1.61	1.64	1.27	1.72	2.25	1.71	1.51	1.75
(Pd/Os) _m	1.45	1.54	1.19	1.58	2.07	1.52	1.39	1.60
(Pd/Ru) _m	1.41	1.46	1.22	1.57	2.01	1.53	1.41	1.56
(Pd/Rh) _m	1.35	1.37	1.20	1.43	1.81	1.41	1.29	1.45
(Pd/Pt) _m	1.58	1.62	1.52	1.61	2.04	1.67	1.61	1.74
球粒陨石标准化 PGE								
Os	0.008	0.008	0.007	0.008	0.007	0.007	0.008	0.007
Ir	0.007	0.007	0.006	0.007	0.006	0.006	0.007	0.006
Ru	0.009	0.009	0.007	0.009	0.008	0.007	0.009	0.008
Rh	0.006	0.007	0.005	0.006	0.006	0.005	0.007	0.005
Pt	0.007	0.008	0.006	0.008	0.007	0.006	0.008	0.007
Pd	0.013	0.014	0.009	0.014	0.016	0.012	0.013	0.012
(Pd/Ir) _c	1.88	1.91	1.48	2.00	2.63	2.00	1.76	2.04
(Pd/Os) _c	1.61	1.71	1.32	1.75	2.30	1.68	1.55	1.78
(Pd/Ru) _c	1.42	1.48	1.23	1.59	2.04	1.55	1.43	1.58
(Pd/Rh) _c	2.08	2.12	1.86	2.20	2.79	2.18	2.00	2.24
(Pd/Pt) _c	1.69	1.73	1.62	1.72	2.19	1.79	1.72	1.86

注:(La/Sm)_m和(Gd/Yb)_m为原始地幔标准化后的稀土元素比值,用于标准化的原始地幔值采用文献[23]。(Pd/Ir)_m和(Pd/Ir)_c分别为原始地幔和球粒陨石标准化后的铂族元素比值,用于铂族元素标准化的原始地幔值采用文献[24],球粒陨石数据采用文献[25]。

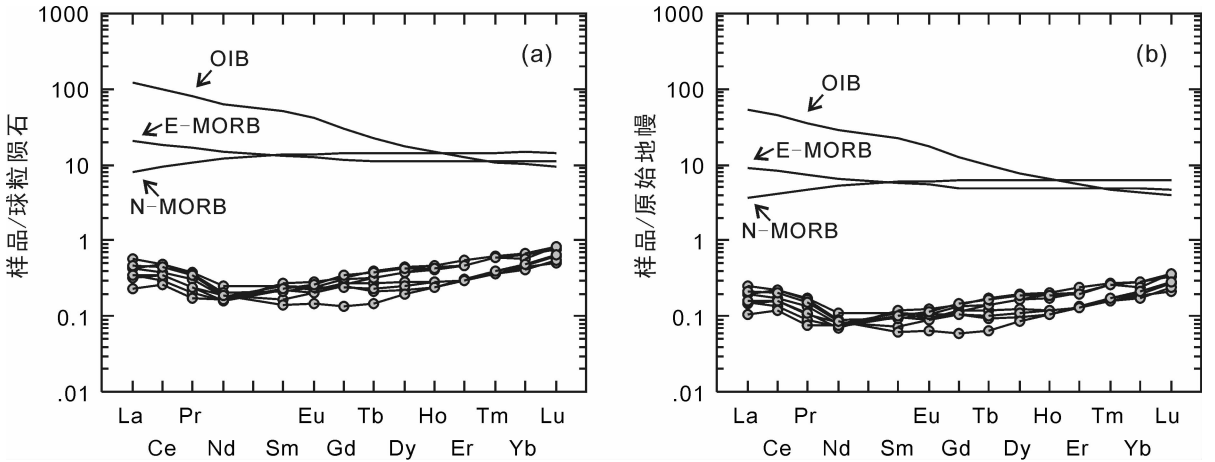


图 3 东波超镁铁岩中方辉橄榄岩的球粒陨石标准化(a)及原始地幔标准化稀土元素配分模式(b)
(球粒陨石稀土元素数据采用文献[26], 原始地幔稀土元素数据采用文献[23])

Fig.3 Chondrite-normalized (a) and primitive mantle-normalized (b) REE patterns for harzburgites from Dongbo ultramafic rocks (chondrite values after Reference [26]; primitive mantle values after Reference [23])

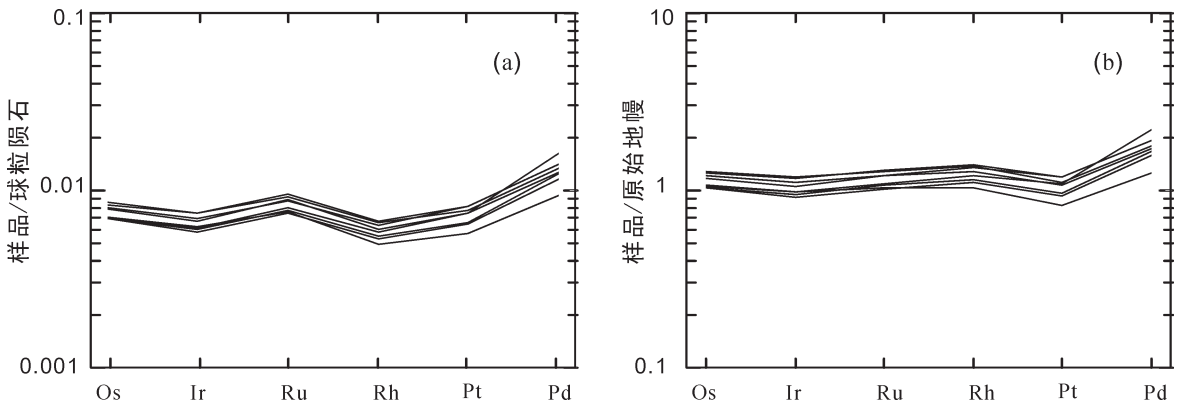


图 4 东波超镁铁岩中方辉橄榄岩的球粒陨石标准化(a)及原始地幔标准化铂族元素配分模式(b)
(球粒陨石铂族元素数据采用文献[25], 原始地幔铂族元素数据采用文献[24])

Fig.4 Chondrite-normalized (a) and primitive mantle-normalized (b) PGE patterns for harzburgites from Dongbo ultramafic rocks (chondrite values after Reference.[25]; primitive mantle values after Reference [24])

素为不相容元素, 支持东波超镁铁岩经历过熔体的抽取作用。

东波超镁铁岩的元素地球化学特征与矿物学特征也是一致的, 以单斜辉石为例, 如图 5 所示, 与岩浆成因堆晶超镁铁岩中的单斜辉石相比, 东波超镁铁岩的单斜辉石明显富 Mg、贫 Fe、贫 Ca、贫 Al、贫 Na 和贫 Ti, 是经过部分熔融后的亏损成分特征。

综上所述, PGE、主量和微量元素地球化学以及矿物化学特征揭示东波超镁铁岩为经历过熔体抽取的亏损残余地幔岩石。该认识与笔者前期的认识是相吻合的^[12]。

5.2 东波超镁铁岩经历过俯冲带环境的地幔交代作用

如上所述, 东波超镁铁岩在 PGE 组成上, 具有以下 3 个明显特征:

(1) 具有较高的 PGE 含量 ($23.97 \times 10^{-9} \sim 31.98 \times 10^{-9}$, 平均为 28.64×10^{-9}), 高于原始地幔和球粒陨石的含量; 而且也高于一些典型蛇绿岩中橄榄岩的 PGE 含量 (如, 塞浦路斯 Troodos 方辉橄榄岩 PGE 平均含量为 $15 \times 10^{-9} \sim 20 \times 10^{-9}$ ^[35])。

(2) 东波超镁铁岩具有亏损 IPGE、富集 PPGE 的左倾(正斜率型)PGE 配分模式, 这也不同于世界

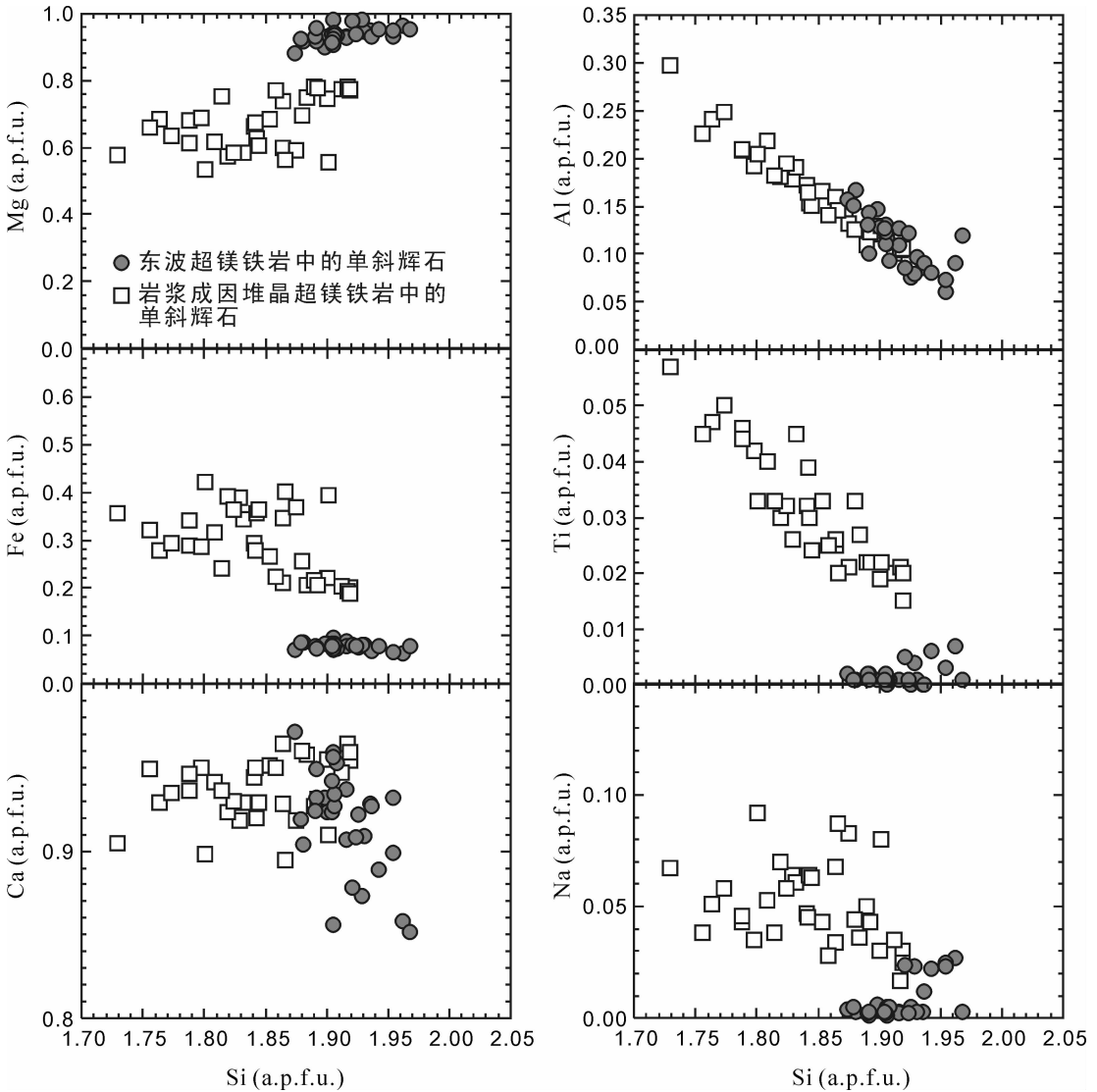


图5 东波超镁铁岩方辉橄橄榄岩中单斜辉石与岩浆成因堆晶超镁铁岩中单斜辉石的成分对比 (东波超镁铁岩方辉橄橄榄岩中单斜辉石数据为本文未发表数据, 岩浆堆晶岩中单斜辉石的数据来源于文献[34], a.p.f.u., 每个分子单元中元素的个数)

Fig.5 Comparisons of clinopyroxenes from harzburgites of Dongbo ultramafic rocks with those from ultramafic rocks of igneous cumulate origin

Data of clinopyroxenes from harzburgites of Dongbo ultramafic rocks are unpublished in this paper, and data of clinopyroxenes from ultramafic rocks of igneous cumulate origin are from Reference [34]; a.p.f.u. refers to the number of atoms per formula unit

上正常亏损地幔岩的PGE模式,如Troodos方辉橄橄榄岩^[35]、西班牙南部的Ronda地幔橄橄榄岩和摩洛哥北部的Beni Bousera地幔橄橄榄岩^[36],它们具有相对富集IPGE、亏损PPGE的右倾(正斜率型)PGE配分模式。

(3)Pd和Ir是铂族元素中性质差别较大的两个元素,其比值可以反映IPGE和PPGE的分异程度。东波超镁铁岩具有较高的Pd/Ir比值(Pd/Ir=1.49~

2.65,平均为1.98),远高于原始地幔的Pd/Ir比值(Pd/Ir=1.18^[24])和球粒陨石的Pd/Ir比值(Pd/Ir=1.01^[25]);这与特征(2)是一致的。

大量研究表明,控制地幔中PGE组成的地质作用主要有两种:(1)部分熔融作用——如引言所述,IPGE和PPGE在地幔部分熔融过程中,具有不同的化学行为,Ir亚组倾向于残留在地幔橄橄榄岩的残余体中,表现为相容元素的特征,而Pd亚组则倾向于

优先进入熔体中,表现为不相容元素的特征;因此,当部分熔融程度较低时,地幔岩汇总 IPGE 和 PPGE 之间不会发生明显分异,其 PGE 配分模式为“平坦型”,而当部分熔融程度较高时,PPGE 大量进入熔体,导致残留地幔岩中 PPGE 相对 IPGE 亏损,具有比原始地幔低的 Pd/Ir 比值,PGE 总量降低,PGE 配分模式为右倾型(负斜率型)^[6,8,36~39];(2)地幔交代作用——受到了外部物质的渗透-交代作用^[6~7,37]。

因此,东波超镁铁岩较高的 PGE 含量、正斜率型的 PGE 配分模式及较高的 Pd、Ir 比值要求其经历过地幔交代作用。该认识也得到了东波超镁铁岩 REE 组成的支持。总体上,REE 含量较低,低于原始地幔的 REE 含量,是经历过强烈部分熔融作用的特征;但是,在原始地幔标准化配分模式上,表现为 LREE 富集,中稀土亏损的“V”型或“U”型的配分模式,(La/Sm)_m (原始地幔标准化元素比值)=1.05~3.37,平均为 1.94;(Gd/Yb)_m=0.28~0.64,平均为 0.51;这种配分型式是部分熔融作用与后期熔-岩相互反应共同作用的结果^[3,40~42]。

交代东波超镁铁的物质应该富集不相容元素(如,LREE)、具有较高的 PGE 含量且相对 IPGE 富集 PPGE。推测这种交代物质很可能是俯冲带构造环境下所产生岩浆熔离出的富硫化物熔体/流体。首先,俯冲带构造环境下产生的熔体/流体会具有 LREE 相对富集的 REE 配分型式^[43];其次,东波超镁铁岩具有较低的 Cu/Pd 比值(1226~3448,平均为 2506;表 1),指示交代物质富含硫化物,这是因为 Pd 在液态硫化物和硅酸盐岩浆中的分配系数(约 3×10^4)远远高于 Cu 的分配系数(4×10^3)^[44],东波超镁铁岩的 Cu/Pd 比值远远低于原始地幔的 Cu/Pd 比值(7000^[24]),暗示东波超镁铁岩经历过富硫化物物质的交代作用。

在雅鲁藏布江缝合带中,东波超镁铁岩并不是唯一一个经历过俯冲带相关流体改造作用的地幔橄榄岩体。普兰地幔橄榄岩体位于东波岩体的东南方向,该岩体中钙质斜长石($A_n=99$)和低钛韭闪角闪石的发现以及单斜辉石微量元素组成,支持普兰地幔橄榄岩受到了具有高 Ca/Na 比值、低 Ti 含量且相对于中稀土和重稀土而富集轻稀土的俯冲带熔体的交代作用^[20];此外,普兰橄榄岩的全岩微量元素组成也具有俯冲带流体的交代特征^[45]。位于东波岩体西北方向的巴尔橄榄岩中的角闪石发育,支持该岩

体在受到了 SSZ 环境的改造作用^[46]。位于雅鲁藏布江缝合带东段的罗布莎地幔橄榄岩具有“U”型 REE 配分模式和富集的 PGE 组成,反映岩体也受到了不同程度俯冲带熔体的交代作用^[9]。位于罗布莎岩体东部的康金拉橄榄岩体也具有 LREE 富集的稀土配分模式,显示存在两期矿物生长,指示岩体经历了俯冲带相关流体的改造作用^[47]。位于雅江缝合带东段的大竹卡橄榄岩具有较高的 PGE 含量和富集的“正斜率”型 PGE 的分布模式,暗示岩体经历了地幔交代-熔体/流体的的渗透混合作用^[8]。位于雅江缝合带中段的日喀则蛇绿岩中基性岩具有 LREE 亏损的球粒陨石标准化 REE 配分模式,指示亏损的地幔源区^[48],但其地幔橄榄岩具有“V”型的球粒陨石标准化 REE 配分模式及富集的原始地幔标准化 PGE 配分模式,说明地幔橄榄岩在俯冲带环境经历过交代作用^[9]。由此可见,雅鲁藏布江缝合带的橄榄岩普遍经历过俯冲带构造环境熔体/流体的改造作用。

6 结论

(1)东波超镁铁岩为经历过熔体抽取的亏损残余地幔岩石,具有亏损的主量元素组成和较高的相容元素含量。

(2)东波超镁铁岩具有高于原始地幔含量的 PGE 组成、左倾的 PGE 配分型式、高 Pd/Ir 比值及“U”型稀土配分型式,这些特征均揭示东波超镁铁岩经历过地幔交代作用;交代物质应富集不相容元素,高 PGE 含量,相对 IPGE 富集 PPGE;该交代物质可能来源于俯冲带构造环境下所产生岩浆熔离出的富硫化物熔体/流体。

(3)综合已有研究成果发现,俯冲带构造环境下熔体/流体的交代作用在雅鲁藏布江缝合带橄榄岩的成因过程中普遍发挥了重要作用。

参考文献(References):

- [1] Pattou L, Lorand J L, Cros M. Non-chondritic platinum-group element ratios in the earth's mantle[J]. *Nature*, 1996, 379:712-715.
- [2] Zhou M F, Sun M, Keays R R, et al. Controls on platinum-group elemental distributions of podiform chromitites: a case study of high-Cr and high-Al chromitites from Chinese orogenic belts[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62:677-688.
- [3] Zhou M F, Robinson P T, Malpas J, et al. REE and PGE geochemical constraints on the formation of dunites in the Luobusa ophiolite, Southern Tibet [J]. *Journal of Petrology*, 2005, 46:615-

- 639.
- [4] Fleet M E, Crocket J H, Lin M H, et al. Laboratory partitioning of platinum-group elements and gold with application to magmatic sulfide-PGE deposits[J]. *Lithos*, 1999, 47:127-142.
- [5] Lorand J P. Fractionation of PGE and gold in the upper mantle: a detailed study in Pyrenean orogenic lherzolites [J]. *Journal of Petrology*, 1999, 40:957-981.
- [6] Chen G W, Xia B. Platinum-group elemental geochemistry of mafic and ultramafic rocks from the Xigaze ophiolite, southern Tibet[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32:406-222.
- [7] 王志洪, 侯泉林, 李继亮, 等. 西昆仑库地蛇绿岩铂族元素初步研究[J]. *科学通报*, 1999, 44:1676-1999.
- Wang Zhihong, Hou Quanlin, Li Jiliang, et al. A preliminary study on the platinum-group elements of the Kudi ophiolite in West Kunlun [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44:1676-1999 (in Chinese).
- [8] 喻享祥, 夏斌, 梅厚钧, 等. 西藏大竹卡蛇绿岩中地幔橄榄岩铂族元素分布特征[J]. *科学通报*, 2000, 45:2446-2452.
- Yu Hengxiang, Xia Bin, Mei Houjun, et al. Platinum-group element geochemistry of the mantle peridotites from the Dazhuka ophiolite [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45:2446-2452 (in Chinese).
- [9] 夏斌, 陈根文, 梅厚钧, 等. 西藏吉定蛇绿岩铂族元素地球化学及其对地幔过程的制约[J]. *中国科学(D 辑)*, 2001, 31:578-585.
- Xia Bin, Chen Genwen, Mei Houjun, et al. PGE geochemistry of Jiding ophiolite in Tibet and its constraint on mantle processes [J]. *Science in China (Series D)*, 44(11):1019-1028.
- [10] 陈根文, 夏斌, 梅厚钧, 等. 西藏路曲蛇绿岩地幔橄榄岩的贵金属元素地球化学特征[J]. *地球化学*, 2002, 31:549-556.
- Chen Genwen, Xia Bin, Mei Houjun, et al. Geochemical characteristics of precious metallic elements in the mantle peridotite from the Luqu ophiolite, Tibet[J]. *Geochimica*, 2002, 31:549-556 (in Chinese with English abstract).
- [11] 刘庆, 侯泉林, 周新华, 等. 大别造山带毛屋超镁铁岩的铂族元素研究[J]. *中国地质*, 2007, 34:808-814.
- Liu Qing, Hou Quanlin, Zhou Xinhua, et al. Platinum-group element geochemistry of ultramafic rocks in Maowu, Dabie Mountains [J]. *Geology in China*, 2007, 34:808-814 (in Chinese with English abstract).
- [12] 杨经绥, 熊发挥, 郭国林, 等. 东波超镁铁岩体: 西藏雅鲁藏布江缝合带西段一个甚具铬铁矿前景的地幔橄榄岩体[J]. *岩石学报*, 2011, 27:3207-3222.
- Yang Jingsui, Xiong Fahui, Guo Guolin, et al. The Dongbo ultramafic massif: a mantle peridotite in the western part of the Yarlung Zangbo suture zone, Tibet, with excellent prospects for a major chromite deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27:3207-3222 (in Chinese with English abstract).
- [13] Nicolas A, Girardeau J, Marcoux J, et al. The Xigaze ophiolite (Tibet): A peculiar oceanic lithosphere[J]. *Nature*, 1981, 294:414-417.
- [14] Tapponnier P, Mercier J L, Proust F, et al. The Tibetan side of the India-Eurasia collision[J]. *Nature*, 1981, 294:405-410.
- [15] Allègre C J, Coutillot V, Tapponnier P, et al. Structure and evolution of the Himalaya-Tibet Orogenic Belt [J]. *Nature*, 1984, 313:173-184.
- [16] 白文吉, 杨经绥, Robinson P T, 等. 西藏罗布莎蛇绿岩铬铁矿中金刚石的研究[J]. *地质学报*, 2001, 75:404-409.
- Bai Wenji, Yang Jingsui, Robinson P T, et al. Study of diamonds from chromitites in the Luobusha ophiolite, Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75:404-409 (in Chinese with English abstract).
- [17] 杨经绥, 张仲明, 李天福, 等. 西藏罗布莎铬铁矿体围岩方辉橄榄岩中的异常矿物[J]. *岩石学报*, 2008, 24:1445-1452.
- Yang Jingsui, Zhang Zhongming, Li Tianfu, et al. Unusual minerals from harzburgite, the host rock of the Luobusha chromite deposit, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24:1445-1452 (in Chinese with English abstract).
- [18] Xu X Z, Yang J S, Chen S Y, et al. An unusual mantle mineral group from chromitite orebody Cr-11 in the Luobusha ophiolite of the Yarlung-Zangbo suture zone, Tibet [J]. *Journal of Earth Science*, 2009, 20(2):284-302.
- [19] Yamamoto S, Komiya T, Hirose K, et al. Coesite and clinopyroxene exsolution lamellae in chromites: In-situ ultrahigh-pressure evidence from podiform chromitites in the Luobusha ophiolite, southern Tibet[J]. *Lithos*, 2009, 109:314-322.
- [20] Liu C Z, Wu F Y, Wide S A, et al. Anorthitic plagioclase and pargasitic amphibole in mantle peridotites from the Yungbwa ophiolite (southwestern Tibetan Plateau) formed by hydrous melt metasomatism[J]. *Lithos*, 2010, 114(3-4):413-422.
- [21] 黄圭成. 西藏雅鲁藏布江西段蛇绿岩及铬铁矿研究 [D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文. 2006.
- Huang Guicheng. Study on ophiolite and Chromitite in Western Yarlung Zangbo, Tibet [D]. Doctoral thesis of China University of Geoscience (Beijing), 2006(in Chinese with English abstract).
- [22] 漆亮, 周美夫, 严再飞, 等. 改进的卡洛斯特管溶样等离子质谱法测定地质样品中低含量铂族元素及铼的含量 [J]. *地球化学*, 2006, 35:667-674.
- Qi Liang, Zhou Meifu, Yan Zaifu, et al. An improved Carius tube technique for digesting geological samples in the determination of PGEs and Re by ICP-MS [J]. *Geochimica*, 2006, 35:667-674 (in Chinese with English abstract).
- [23] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [C]//Saunders A D, Norry M J (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42: 313-345.
- [24] Maier W D, Barnes S. Platinum-group elements in silicate rocks of the lower, critical and main zones at Union Section, western Bushveld Complex[J]. *Journal of Petrology*, 1999, 40:1647-1671.
- [25] Naldrett A J, Duke J M. Platinum metals in magmatic sulfide ores [J]. *Science*, 1980, 208:1417-1427.

- [26] Boynton W V, Geochemistry of the earth elements: Meteorite studies[C]//Henderson P. (ed.). Rare Earth Element Geochemistry. Elsevier, 1984:63-114.
- [27] Walker R J, Carlson R W, Shirey S B, et al. Os, Sr, Nd, and Pb isotope systematics of southern African peridotite xenoliths: implications for the chemical evolution of subcontinental mantle[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53:1583-1595.
- [28] Shirey S B, Walker R J. The Re-Os isotope system in cosmochemistry and high-temperature geochemistry [J]. *Annual Review of Earth Planetary Science*, 1998, 26:423-500.
- [29] Chesley, J, Richter, K, Ruiz J. Large-scale mantle metasomatism: a Re-Os perspective [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 219:49-60.
- [30] Chen B, Jahn B M, Tian W. Evolution of the Solonker suture zone: constraints from zircon U-Pb ages, Hf isotopic ratios and whole-rock Nd-Sr isotopic compositions of subduction- and collision-related magmas and forearc sediments[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34(3):245-257.
- [31] Liu A K, Chen B, Suzuki K, et al. Petrogenesis of the Mesozoic Zijinguan mafic pluton from the Taihang Mountains, North China Craton: Petrological and Os-Nd-Sr isotopic constraints [J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2010, 39:294-308.
- [32] Niu X L, Chen B, Liu A K, et al. Petrological and Sr-Nd-Os isotopic constraints on the origin of the Fanshan ultrapotassic complex from the North China Craton[J]. *Lithos*, 2012, 149:146-158.
- [33] Jagoutz E, Palme H, Baddenhausen H, et al. The abundances of major, minor and trace elements in the Earth's mantle as derived from primitive ultramafic nodules[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1979, (supp.11):2031-2050.
- [34] 牛晓露, 陈斌, 马旭. 河北矾山杂岩体中单斜辉石的研究 [J]. *岩石学报*, 2009, 25:359-373.
Niu Xiaolu, Chen Bin, Ma Xu. Clinopyroxenes from the Fanshan pluton, Hebei [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25:359-373 (in Chinese with English abstract).
- [35] Prichard H M, Lord R A. Platinum and palladium in the Troodos ophiolite complex, Cyprus [J]. *Canadian Mineralogist*, 1990, 28:606-617.
- [36] Gueddari K, Piboule M, Amossé J. Differentiation of platinum-group elements (PGE) and of gold during partial melting of peridotites in the lherzolitic massifs of the Betico-Rifean range (Ronda and Beni Bousera) [J]. *Chemical Geology*, 1996, 134:181-197.
- [37] Lorand J P, Keays R R, Bodinier J L. Copper and noble metal enrichments across the lithosphere-asthenosphere boundary of the mantle diapir: evidence from the Lanzo lherzolite massif[J]. *Journal of Petrology*, 1993, 34:1110-1140.
- [38] Barnes S J, Naldrett A J, Gorton M P. The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas[J]. *Chemical Geology*, 1985, 53:303-323.
- [39] Brüggmann G E, Arndt N T, Hofmann A W, et al. Nobel metal abundances in Komatiite suites from Alexo, Ontario and Gorgona Island, Colombia[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, 51:2159-2169.
- [40] Kelemen P B, Dick H J B, Quick J E. Formation of harzburgite by pervasive melt/rock reaction in the upper mantle [J]. *Nature*, 1992, 358:635-641.
- [41] Edwards S J, Malpas J. Multiple origins for mantle harzburgites: examples from Lewis Hills, Bay of Islands ophiolite, Newfoundland [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1995, 32:1046-1057.
- [42] Suhr G, Seck H A, Shimizu N, et al. Infiltration of refractory melts into the lowermost oceanic crust: evidence from dunite- and gabbro-hosted clinopyroxenes in the Bay of Islands ophiolite [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1998, 131:136-154.
- [43] Crawford A J, Falloon T J, Green T H. Classification, petrogenesis and tectonic setting of boninites[C]//Crawford A J(ed.). *Boninites and Related Rocks*. London: Unwin Hyman, 1989:1-49.
- [44] Brüggmann G E, Naldrett A J, Asif M, et al. Siderophile and chalcophile metals as tracers of the evolution of the Siberian Trap in the Noril'sk region, Russia [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57:2001-2018.
- [45] 徐向珍, 杨经绥, 郭国林, 等. 雅鲁藏布江缝合带西段普兰蛇绿岩中地幔橄辉岩的岩石学研究 [J]. *岩石学报*, 2011, 27:3179-3196.
Xu Xiangzhen, Yang Jingsui, Guo Guolin, et al. Lithological research on Purang mantle peridotite in western Yarlung-Zangbo suture zone in Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27:3179-3196 (in Chinese with English abstract).
- [46] 李源, 杨经绥, 刘钊, 等. 西藏雅鲁藏布江缝合带西段巴尔地幔橄辉岩成员及构造意义 [J]. *岩石学报*, 2011, 27:3239-3254.
Li Yuan, Yang Jingsui, Liu Zhao, et al. The origins of Baer ophiolitic peridotite and its implication in the Yarlung Zangbo suture zone, southern Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27:3239-3254 (in Chinese with English abstract).
- [47] Xu X Z, Yang J S, Ba D Z, et al. Petrogenesis of the Kangjinla peridotite in the Luobusa ophiolite, southern Tibet [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42:553-568.
- [48] 牛晓露, 赵志丹, 莫宣学, 等. 西藏日喀则地壳德村-昂仁蛇绿岩内基性岩的元素与 Sr-Nd-Pd 同位素地球化学及其揭示的特提斯地幔域特征 [J]. *岩石学报*, 2006, 22:2875-2888.
Niu Xiaolu, Zhao Zhidan, Mo Xuanxue, et al. Elemental and Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry for basic rocks from Decun-Angren ophiolites in Xigaze area, Tibet: implications for the characteristics of the Tethyan upper mantle domain [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27:2875-2888 (in Chinese with English abstract).

The reformation of the Dongbo ultramafic rock massif in the western part of the Yarlung Zangbo suture zone by subduction-related fluids: Evidence from the platinum-group elements (PGE)

NIU Xiao-lu¹, YANG Jing-sui¹, CHEN Song-yong¹,
LIU Fei¹, XIONG Fa-hui¹, LIU Zhao¹, GUO Guo-lin²

(1. State Key Laboratory of Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. State Key Laboratory Breeding Base of Nuclear Resources and Environment, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China)

Abstract: Located in the western part of the Yarlung Zangbo suture zone, the Dongbo ultramafic rock massif is comparable with the Luobusa ultramafic rock massif which holds the largest chromite deposit in China in terms of their petrology and mineralogy. In this paper, the authors attempted to characterize its origin by examining the geochemistry of platinum group elements (PGE), major elements and rare earth elements (REE) of the harzburgites which are the main rocks of the rock mass. The harzburgites are characterized by high abundances of Os ($3.52 \times 10^{-9} \sim 4.36 \times 10^{-9}$), depleted major element compositions and low REE content ($0.89 \times 10^{-6} \sim 1.37 \times 10^{-6}$) which is lower than that of the primary mantle, indicating that the Dongbo ultramafic rocks belonged to depleted residual mantle rocks after a significant degree of partial melting and melt extraction. They also have high PGE content ($23.97 \times 10^{-9} \sim 31.98 \times 10^{-9}$) which is higher than that of primary mantle, and display IPGE-depleted, PPGE-enriched chondrite- and primary mantle-normalized PGE patterns with Pd/Ir being 1.49~2.65. Their chondrite- and primary mantle-normalized REE patterns are all U- or V-shaped with (La/Sm)_m being 1.05~3.37 and (Gd/Yb)_m 0.28~0.64 (primary mantle-normalized values). These features are consistent with the opinion that the Dongbo ultramafic rocks were formed by the interaction of depleted residual mantle rocks with melts/fluids which were enriched with incompatible elements and PGE, especially IPGE relative to PPGE. In addition, the low Cu/Pd ratios (1226~3448) argue that the melts/fluids should also have high content of sulfides. The authors infer that the melts/fluids that reacted with the residual mantle rocks probably originated from the magmas produced in a subduction-related tectonic setting.

Key words: mantle metasomatism; residual mantle rocks; PGE; REE; Dongbo ultramafic rocks, Yarlung Zangbo suture zone

About the first author: NIU Xiao-lu, female, born in 1983, assistant researcher, majors in igneous petrology and geochemistry; E-mail: niuxiaoludx@126.com.