西昆仑库地蛇绿岩铂族元素初步研究

王志洪 侯泉林 李继亮 陈海泓
(中国科学院地质研究所岩石圈开放研究实验室, 北京 100029)

摘要 对库地蛇绿岩铂族元素进行了初步研究. 地幔橄榄岩所代表的亏损Ir的异常地幔受到了来自消减带之上的洋壳重熔组分的渗透, 使之富Pd. 堆晶辉石岩和辉长岩的PGE配分曲线为陡的正倾斜曲线. Pd的富集与Thetford和Troodos蛇绿岩中辉石岩相似. 辉绿岩和玄武岩的PGE特征与Troodos蛇绿岩中的上部枕状玄武岩具可比性, 指示消减带之上弧后扩张的环境.

关键词 铂族元素 消减带 库地蛇绿岩 西昆仑

铂族元素(PGE)是指一组相关的亲铁元素, 包括弱溶于镁铁质熔体的元素(Ir, Os和Ru)和较可溶元素(Rh, Pt和Pd), 前者趋于较早在最难熔堆晶岩中富集, 后者作为不相容元素在溶体中逐渐富集. 在岩浆条件下PGE的分离和富集将强烈依赖于: 硫化物饱和与否和晶体分离的相对时间, 以及硫化物相的行为[1]. 因为硫是岩石水热蚀变过程中极易活动的元素, 所以热液变化会影响PGE的运移、减少或富集. 迄今我们对单个蛇绿岩中PGE的分布所知甚少. 在大量的蛇绿岩文献中关于贵金属(PGE+ Au)的资料很零碎, 而且大多数是有关豆荚状铬铁矿的. Oshin and Crocket对贵金属在加拿大Thetford蛇绿岩的超镁铁质和辉长质岩石中的分布和行为做过研究[2]. 现代印度洋和大西洋中脊的拉斑玄武岩和大西洋中脊的超镁铁质岩石也曾有一些贵金属元素丰度的报道. Leblanc收集了多处零碎资料对蛇绿岩中PGE和Au的分布和行为做过综合评述[1]. 在我国PGE研究尚属起步阶段, 侯泉林等人探讨了(超)镁铁质岩石中PGE的分布特征、行为和规律[3]. 徐义刚等人以吉林汪清橄榄岩包体为例讨论了上地幔PGE的分异[4]. 国内有关具体蛇绿岩PGE丰度和行为的报道和探讨尚属首次.

1 样品和测试结果

库地蛇绿岩位于西昆仑山脉的北西部, 出露于新藏公路133~ 156 km间的库地附近. 它由方辉橄榄岩和纯橄榄岩等地幔变质橄榄岩、豆荚状铬铁矿、堆晶橄榄岩、堆晶辉石岩和辉长岩、辉绿岩墙、块状和枕状玄武岩等组成. 详细的岩石地球化学特征将另文发表, 此处作一简述. 库地地幔橄榄岩主要有镁橄榄石、顽火辉石、透辉石和铬尖晶石等矿物组成. 方辉橄榄岩为主的地幔岩组合, 两种辉石的低Al含量和铬尖晶石的高Cr, 以及岩石的富Mg, Ni和贫Al, Ca特征一致表明地幔橄榄岩类是经较高程度部分熔融后的地幔残余. 尖晶石的高Cr和岩石的贫Ti使之异于大洋中脊地幔橄榄岩, 而与消减带之上蛇绿岩中的同类岩石相近. 岩石富Rb, Ba, U, Th, LREE, 说明地幔残余岩石受到了来自消减带的洋壳重熔组分的混染. 库地堆晶岩以辉石岩和辉长岩为主, 属PPG系列. 主量元素分布呈良好的基性岩浆分离结晶趋势. 辉长岩富Rb, Ba, Th, 贫Ti, K, REE分布与典型蛇绿岩中的堆晶岩相近, 为低Ti蛇绿岩型, 代表洋内弧后盆地早期环境. 辉绿岩和玄武岩具相近的主量元素含量特征, 与堆晶岩共同组成低钾拉斑玄武岩系列演化趋势. 在一系列玄武岩主量、微量元素成因判别图上, 库地玄武岩样品或位于洋中脊拉斑玄武岩区或位于岛弧拉斑玄武岩区; 其微量元素配分型式呈二者的过渡

类型. 玄武岩和辉绿岩相比富 Ba, Th, LREE, 贫 Ta, 指示玄武岩较辉绿岩更多地受到来自消减带洋壳重熔组分的影响. 我们选取具代表性的纯橄岩、方辉橄榄岩、铬铁矿、堆晶辉石岩和辉长岩、辉绿岩和枕状玄武岩作了铂族元素分析, 样品由中国科学院地质研究所岩石圈研究开放实验室处理和分析, 分析仪器为英国造 VG Plasma Quad PQ2 Turbo 型 ICP-MS 仪. 该技术检测限为: Ir 和 Au 为 0.005 ng/g, Ru 和 Rh 为 0.05 ng/g, Pt 和 Pd 为 0.1 ng/g. 分析数据见表 1.

表 1 库地蛇绿岩铂族元素和金的含量(ng/g)、Pd/Ir 值及与典型蛇绿岩的对比[a)]

岩石	纯橄岩		方辉橄榄岩							铬铁矿岩	
样品号	W707-32	D	W707-20	W707-18	W707-16	W707-8	W714-2	H707-16	Hzb	W707-12	H707-8
Ir	0.15	4.0	0.22	0.15	0.15	0.06	0.14	0.23	3.2	0.2	0.13
Ru	0.54	4.5	0.61	2.27	1.63	1.76	1.09	1.99	n.d.	n.d.	1.55
Rh	0.09	1.0	0.67	0.26	0.47	0.14	0.48	0.52	n.d.	0.5	0.13
Pt	n.d.	1.5	0.66	0.36	0.84	1.63	0.48	1.01	10	0.9	1.29
Pd	3.4	0.5	2.1	1.53	2.93	3.51	0.38	0.92	3.8	1.8	6.67
Au	0.5	0.2	n.d.	0.09	0.16	0.29	n.d.	n.d.	1.5	1.8	0.21
ΣPGE	4.68		4.26	4.66	6.18	7.39	2.57	4.67		5.2	9.98
平均 Σ	4.68	14.7				4.955			< 30		
Pd/Ir	22.7		9.55	10.2	18.3	58.5	2.7	4		9	51.3
平均	22.7	0.12				17.21			1.18		
岩石		铬铁矿岩					辉石岩				
样品号	H709-7	H709-6	H709-4	Chr	W708-10	W708-11	W707-14	W707-9	W708-8	W708-6	UltM
Ir	0.2	0.15	0.06	25.9	0.27	0.2	0.12	n.d.	0.27	0.08	2.3
Ru	n.d.	n.d.	n.d.	55.2	2.27	1.3	n.d.	n.d.	1.76	n.d.	4.8
Rh	0.01	1.75	0.62	5.2	1.14	0.09	0.26	0.15	0.51	n.d.	1.7
Pt	n.d.	n.d.	n.d.	10.2	0.76	0.74	n.d.	1.92	0.97	n.d.	17.3
Pd	12.7	2.78	3.57	10.9	17	9.22	1.31	2.43	19.87	2.65	12.5
Au	1.09	0.18	n.d.	6.1	0.48	0.15	1.29	n.d.	0.56	n.d.	1.9
ΣPGE	14	4.86	4.25		21.92	11.7	2.98	4.5	23.94	2.37	
平均 Σ		7.658		144.4			11.295				41.6
Pd/Ir	63.5	18.5	59.5		62.96	46.1	10.92		73.59	33.1	
平均		40.36		0.42			45.33				5.4
岩石			辉长岩				辉绿岩		玄武岩		
样品号	W707-25	W707-31	W708-3	W708-5	W708-12	M	W709-1	H709-9	H709-10	MORB	Bon
Ir	0.52	0.01	0.12	n.d.	0.1	0.04	0.06	0.24	0.23	0.02	0.06
Ru	1.65	0.17	1.32	0.22	n.d.	0.18	n.d.	0.16	1.57	n.d.	n.d.
Rh	0.77	0.12	0.53	0.17	0.17	0.14	0.62	0.27	n.d.	n.d.	n.d.
Pt	0.72	n.d.	1.58	n.d.	n.d.	4.9	n.d.	n.d.	1.26	n.d.	n.d.
Pd	8.61	4.18	16.38	1.8	14.02	3.0	3.57	6.51	9.72	0.83	15.0
Au	0.32	n.d.	0.59	0.21	0.01	1.0	0	0.18	n.d.	1.3	1.9
ΣPGE	12.59	4.48	20.52	2.4	14.3		4.25	7.36	12.78		
平均 Σ			10.858			8.31			10.07	< 3	< 25
Pd/Ir	16.56	418	136.5		140.2		59.5	27.1	42.26		
平均			177.82			75.0			34.68	41.0	250

a) 典型蛇绿岩数据来源: D——纯橄榄岩[1]; Hzb——方辉橄榄岩[2]; Chr——铬铁矿岩[5]; UltM——超镁铁堆晶岩[2,6]; M——镁铁堆晶岩[2,6]; MORB——大洋中脊玄武岩, Bon——玻安岩[7]. n.d.——未检出

2 铂族元素地球化学特征及其讨论

2.1 地幔橄榄岩类和铬铁矿岩

地幔橄榄岩中的方辉橄榄岩、纯橄榄岩与二辉橄榄岩相比, 通常亏损 Pt、Pd 和 Au, 具弱负倾斜的球粒陨石标准化 PGE 型式, 有些方辉橄榄岩显示平坦型式(图 1). 库地蛇绿岩中的方辉橄榄岩和纯橄榄岩的 PGE 型式为正倾斜曲线(图 1), Pd/Ir= 2.7~ 58.5, Au/Pd= 0.05~ 0.15, PGE 总丰度为 2.57~ 7.39 ng/g. 与蛇绿岩的平均丰度相比, 纯橄榄岩 PGE 总丰度(4.68

ng/g) 较平均值(14.7 ng/g) 偏低, Pd/Ir 值(22.7) 较平均值(0.12) 偏大; 方辉橄榄岩的 PGE 总丰度介于 2.57~ 7.39ng/g, 与平均值(< 30 ng/g) 相符, 但 Pd/Ir 值(2.7~ 58.5) 明显大于平均值(1.18). 已发表的蛇绿岩中铬铁矿岩的 PGE 总量介于 144.4~ 1064.1 ng/g, 远高于库地的 4.25~ 14 ng/g; Pd/Ir 值(0.013~ 0.42) 则明显小于库地(9~ 63.5); 库地铬铁矿岩也具正倾斜 PGE 型式.

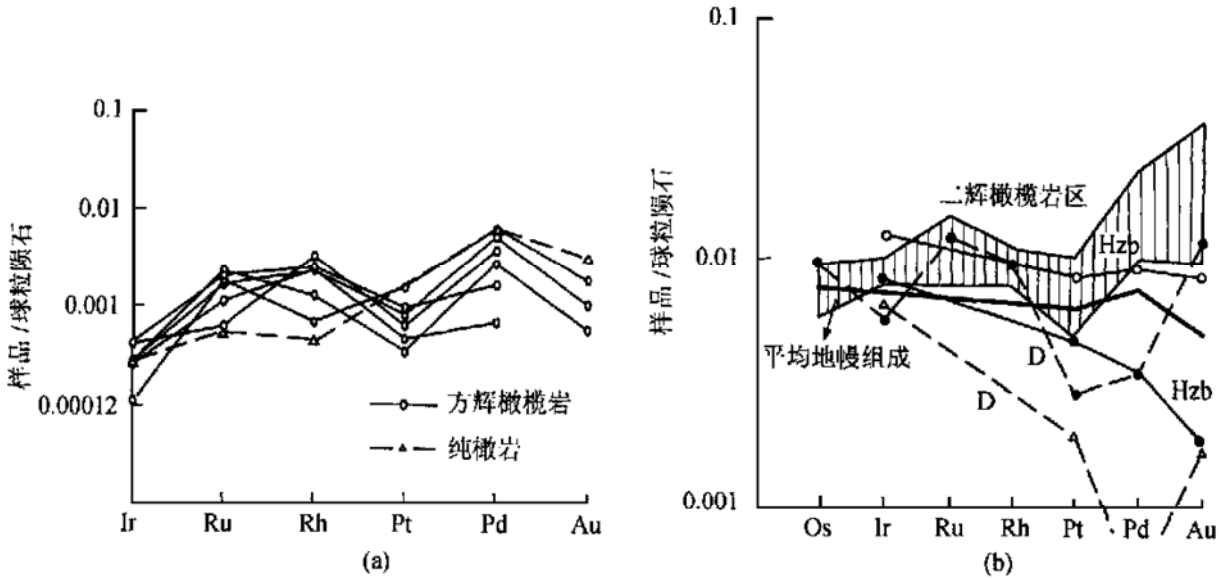

图 1 库地蛇绿岩中地幔橄榄岩和铬铁矿岩 PGE 球粒陨石标准化配分型式及与典型蛇绿岩的对比 (a) 方辉橄榄岩和纯橄榄岩的 PGE 型式正倾斜曲线; (b) 为典型地幔岩 PGE 球粒陨石标准化型式, 黑圆表示二辉橄榄岩岩体中的方辉橄榄岩(实线 Hzb) 和纯橄榄岩(虚线 D); 空圆和空三角表示蛇绿岩中的方辉橄榄岩(实线 Hzb) 和纯橄榄岩(虚线 D). 阿尔卑斯型二辉橄榄岩区据文献[1, 8, 9]; 平均地幔组成据文献[10]; 二辉橄榄岩岩体据文献[1]; 蛇绿岩中的方辉橄榄岩据文献[8]; 蛇绿岩中的纯橄榄岩据文献[2]

在超基性地幔岩石和铬铁矿岩中, Ir 常赋存于铬尖晶石晶体内而 Pd 常赋存于填隙硫化物颗粒内, 所以部分熔融后的难熔残余体中常富 Ir 贫 Pd, 产生典型的负倾斜 PGE 型式. 方辉橄榄岩平坦的 PGE 型式可能是因为一部分残余硫化物的保留或与后来渗透岩浆的再平衡[1]. 库地地幔橄榄岩的正倾斜 PGE 型式和贫 Ir 富 Pd 的特征与典型蛇绿岩中的地幔橄榄岩相反. 库地蛇绿岩的部分熔融程度为 20% ~ 27%, 基本能使赋存 Pd 的硫化物溶解进入硅酸盐熔体[10, 11], 所以理论上库地蛇绿岩的地幔橄榄岩应该是贫 Pd 富 Ir 的. 其部分熔融程度(20% ~ 27%) 尚难以使 Ir 绝大部分进入硅酸盐熔体; 铬尖晶石含量也没有表现出异常特征; 所以可能的解释就是熔融过程中熔体内的 Ir-Os 合金分离并滞留于深部地幔, 而其上地幔是一 Ir 亏损区. 有意思的是中国东部汪清、汉诺坝、宽甸和辉南等地的上地幔橄榄岩包体也是亏损 Ir[4].

地幔岩的 Pt-Pd 富集有 2 种解释: 赋存 Pt-Pd 硫化物的残留和含硫化物岩浆的渗透再平衡. 库地地幔橄榄岩的部分熔融程度已基本能使地幔岩中赋存 Pt, Pd 的硫化物熔融进入硅酸盐熔体, 所以其富 Pd 特性可能是含硫化物岩浆的渗透再平衡. 此外 Pt 和 Pd 因进入合金-硫化物熔体的不同赋存体而发生分异, 从熔体中不混溶分离出的富 Pd 硫化物岩浆对库地地幔橄榄岩的渗透再平衡, 使之富 Pd. 硅酸盐熔体分离结晶生成的辉石岩、辉长岩、辉绿岩和玄武岩的 PGE 也呈富 Pd 特征, 一者说明这些岩石中的 PGE 也发生了 Pt, Pd 分异; 二者说明这种富 Pd 的硫化物岩浆确实存在于库地蛇绿岩中. 与库地地幔橄榄岩微量元素地球化学所揭示的一

样, 富 Pd 硫化物岩浆可能是来自消减带的洋壳重熔组分.

2.2 堆晶岩类和玄武岩类

库地蛇绿岩中的辉石岩 PGE 总丰度介于 2.98~ 23.94ng/g, 平均 13.6 ng/g, 较世界上其他蛇绿岩中已发表的超基性堆晶岩的平均 PGE 总丰度(41.6 ng/g) 偏低, Pd/Ir 值(10.9~ 73.6) 的平均值 45.3, 明显大于后者(Pd/Ir= 5.4). 除个别样品的 Au/Pd 值达 0.98 外, 其余介于 0.02~ 0.03, 小于后者(Au/Pd= 0.15). 对照表 1, Pt 和 Ir 的亏损是造成库地蛇绿岩中辉石岩 PGE 总丰度偏低的主要原因, 而 Pd 的相对富集是造成 Pd/Ir 值和 Au/Pd 值差异的主要因素.

在库地辉长岩中, PGE 总丰度为 2.4~ 20.52ng/g, 平均 10.9 ng/g, 略低于库地辉石岩, 与世界上其他蛇绿岩中辉长岩的平均 PGE 总丰度(8.31 ng/g) 相近; Pd/Ir 值介于 16.6~ 418, 变化范围很大, 平均 177.8, 远大于后者的平均值(75), 显然 Pd 的相对富集和其它 PGE 的相对亏损仍是造成这些差异的原因. 辉石岩和辉长岩的富 Pd 特征如加拿大 Thetford 和塞浦路斯 Troodos 蛇绿岩中的辉石岩一样[2,6].

库地辉石岩和辉长岩的 PGE 特征与全球其它蛇绿岩已发表的同类岩石 PGE 资料相比, 具有下述共同点: (1) PGE 总丰度变化于 10~ 50 ng/g, 而在辉石岩中为最高; (2) Pd/Ir 值由辉石岩向辉长岩增加, 在后期辉长岩中为最高; (3) PGE 球粒陨石标准化曲线呈陡的、排列较紧密的、正倾斜曲线(图 2). 此外库地堆晶岩和地幔橄榄岩相似的 PGE 型式可能是蛇绿岩中熔体——地幔岩相互作用模式的一个佐证.

低的 PGE 丰度(< 20 ng/g) 和陡的正倾斜球粒陨石标准化曲线(Pd/Ir= 20~ 250) 是蛇绿岩中玄武岩的共同特点[1]. 库地蛇绿岩中辉绿岩和玄武岩的 PGE 总丰度为 4.25~ 12.78 ng/g, 平均 8.1 ng/g, 介于 MORB 的平均 PGE 丰度(< 3 ng/g) 和玻安岩的平均 PGE 丰度(< 25 ng/g) 之间;

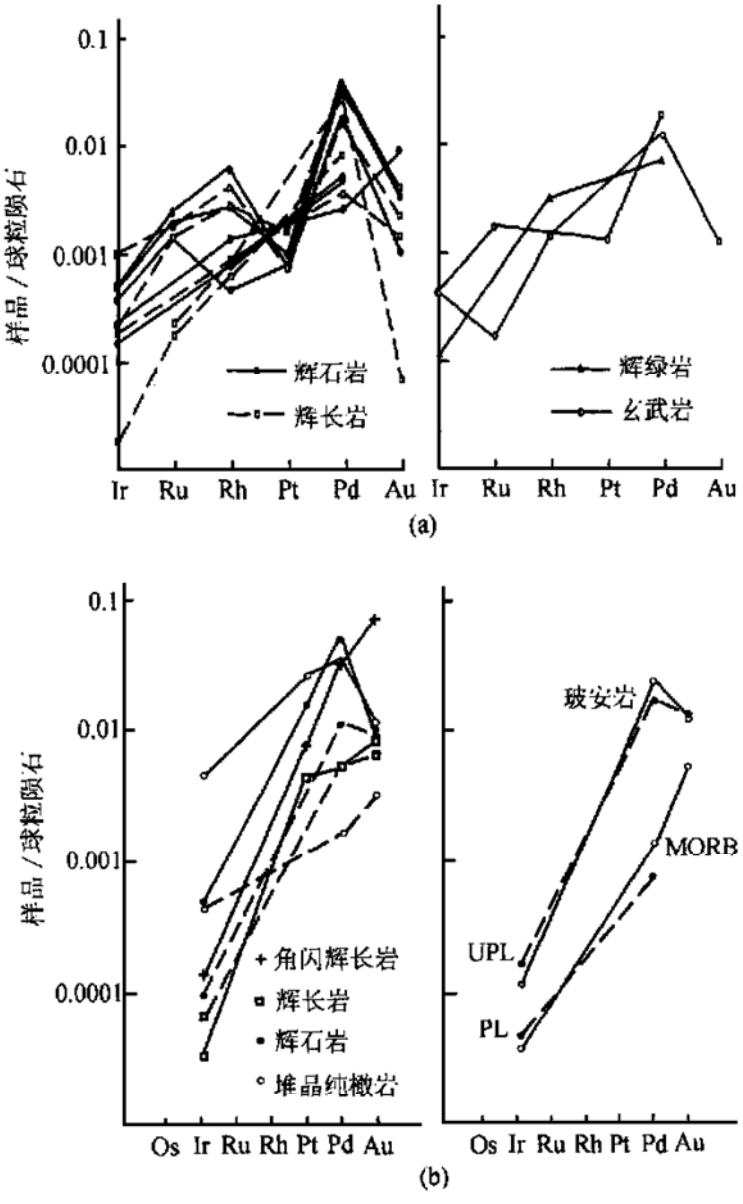

图 2 库地蛇绿岩中堆晶岩和熔岩 PGE 球粒陨石标准化配分型式及与典型蛇绿岩的对比

(a) PGE 球粒陨石标准化曲线; (b) 为典型蛇绿岩中堆晶岩和玄武岩 PGE 球粒陨石标准化型式. 实线表示的堆晶岩据文献[2]; 虚线表示的堆晶岩据文献[6]; PL 和 UPL 指 Troodos 的下部枕状玄武岩和上部枕状玄武岩[6,7]; 玻安岩(boninite) 和大洋中脊玄武岩(MORB) 据文献[7]

Pd/Ir 值为 27.1~ 59.5, 平均 43, 与 MORB 的 Pd/Ir 值(41)一致, 而小于玻安岩的 Pd/Ir 值(250). 库地辉绿岩和玄武岩具有与 MORB 相近的 PGE 丰度和 Pd/Ir 值, 又具有与富 Mg 玄武岩和玻安岩相似的富 Pd 特征, 隐含着一种大洋中脊与岛弧扩张的过渡环境. 从其球粒陨石标准化 PGE 型式看(图 2), 非常类似于 Troodos 蛇绿岩的上部枕状玄武岩[1,6,7], 后者被认为产出于俯冲带之上的弧后扩张中心[12]. 从 PGE 丰度来看, 辉绿岩比玄武岩低, 尤其玄武岩的 Pd 含量明显高于辉绿岩; 而元素地球化学已揭示玄武岩较辉绿岩更多地受到来自消减带洋壳重熔组分的影响, 这说明富 Pd 硫化物岩浆与消减带之上的洋壳重熔组分有关.

3 结论

库地蛇绿岩中地幔橄榄岩的 PGE 特征表明亏损的地幔残余岩石受到了具高度不相容元素的熔体的渗透混合, 经合金-硫化物分离后, 含硫化物的熔体使 Pt, Pd 分异, 从而使岩石富 Pd. Ir 的亏损可能指示了它所代表的地幔是一亏损 Ir 的异常地幔.

堆晶辉石岩和辉长岩的 PGE 总丰度变化于 2.4~ 23.94 ng/g, 在辉石岩中为最高; Pd/Ir 值由辉石岩向辉长岩增加; PGE 配分曲线为陡的正倾斜曲线. Pd 的富集与加拿大 Thetford 和塞浦路斯 Troodos 蛇绿岩中辉石岩的 PGE 分布特征相似.

辉绿岩和玄武岩具低的 PGE 丰度和陡的正倾斜 PGE 球粒陨石标准化型式, 与 Troodos 蛇绿岩中的上部枕状玄武岩具可比性, 指示俯冲带之上弧后扩张的环境.

值得指出的是, 由库地蛇绿岩 PGE 研究所得到的认识与常规岩石地球化学研究相当一致, 甚至能提供更为丰富的成因信息, 无疑这为蛇绿岩成因研究提供了一个有效手段.

致谢 陈汉林、肖文交、张国成、周 辉、方爱明、袁超等博士和韦小山等同志一起完成了野外考察工作, 两位审稿人对初稿进行了认真的审阅和指导, 谨致谢忱. 国家"九五"科技攻关 305 项目 06-03 专题、国家自然科学青年基金(批准号: 49602038)和博士后基金项目资助了本项研究.

参 考 文 献

1 Leblanc M. Platinum-group elements and gold in ophiolitic complexes: distribution and fractionation from mantle to ocanic floor. In: Peters T J, et al. (eds), Ophiolite Genesis and Evolution of the Oceanic Lithosphere. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991. 231~ 260
2 Oshin I O, Crocket J H. Noble metals in Thetford Mines ophiolites, Quebec, Canada. Part I: distribution of gold, iridium, platinum, and palladium in the ultramafic and gabbroic rocks. Econ Geol, 1982, 77: 1556~ 1570
3 侯泉林, 马配学, 王志洪. (超)镁铁岩中铂族元素的分布特征. 壳幔相互作用与岩石圈演化研讨会论文集, 1997. 61~ 64
4 徐义刚, Orberger B, Reeves S J. 上地幔铂族元素的分异——吉林汪清橄榄岩包体提供的证据. 中国科学, 1998, 28(3): 201~ 207
5 Page N J, Talkington R W. Palladium, platinum, rhodium, ruthenium and iridium in peridotites and chromitites from ophiolite complexes in Newfoundland. Canad Mineral, 1984, 22: 137~ 149
6 Becker E, Agiorgitis G. Iridium, osmium, and palladium distribution in rocks of the Troodos complex, Cyprus. Chem Erde Bd, 1978, 37: 302~ 306
7 Hamlyn P R, Keays R R, Cameron W E, et al. Precious metals in magnesian low-Ti lavas: implications for metallogenesis and sulfur saturation in primary magmas. Geoch Cosmoch Acta, 1985, 49: 1797~ 1911
8 Stockman H W. Noble metals in the Ronda and Josephine peridotites. Ph D thesis. MIT, Cambridge, Mass, USA, 1982. 180
9 Lorand J P. Abundance and distribution of Cu-Fe-Ni sulfides, sulfur, copper and platinum-group elements in orogenic type spinel lherzolite massifs of Ariege (northeastern Pyrenees, France). Earth Planet Sci Letters, 1989, 93: 50~ 64
10 Sun S S. Chemical composition and origin of the earth's primitive mantle. Geochim Cosmochim Acta, 1982, 46: 179~ 192
11 Barnes S J, Naldrettt A J, Gorton M P. The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas. Chem Geol, 1985, 53: 303~ 323
12 Dilek Y, Thy P. Tectonic evolution of the Troodos ophiolite within the Tethyan framework. Tectonics, 1990, 9(4): 811~ 823

(1998-08-18 收稿, 1999-01-28 收修改稿)