

国外铂族元素的 地质、矿床及资源分析

(译文集)

汤中立 蔡体梁 杜笑菊 编译

兰州大学出版社

1989·兰州

编译者的话

本译文集主要取材于下列书籍和期刊：“铂族元素的矿物学、地质学及回收”《Platinum-Group Elements; Mineralogy, Geology, Recovery》(1981);“地质与勘探”《Геол. и разб》(1981, No. 1);“苏联科学院通报”《Вестник АН СССР》(1986, No. 8);“资源政策”《Resources Policy》(1987, No. 9)。全集共分八部分,约25万字,插图113幅,附表109个,较全面地论述了与铂族元素有关的地球化学、矿物学、矿床学、金属回收以及世界铂族元素资源分析等各个方面的问题,大量引用了这些领域的新成果和新资料,内容丰富、论点明确,反映了国外80年代对铂族元素研究的水平和动向。本译文集既可作为矿床工作者,尤其是从事与铁镁——超镁铁质岩有关矿床的实践者和研究者参考,也可作为大专院校有关地质专业师生、研究生参考书。

我国铂族金属的研究与开发,是新中国成立之后的30多年期间才进行的,全国各部门的地质工作者发现了近200个铂族金属矿点,也找到一些有价值的铂矿。特别是甘肃金川大型镍铜铂矿的发现,为铂族金属的开发应用开创了新的局面。但是正如译文集中资源分析部分所述,中国还属于铂族金属生产的“小国”,和那些生产“大国”相比,无论是储量还是产量,都仍然处于“微小”的地位。那么我国铂族元素资源发展的前景怎么样?要准确回答这个问题是困难的。但是有迹象说明,我国铂族金属的发展是有前景的。为此至少可以提出两点理由:其一,在已发现的近200个铂矿点中,随着研究的深入,有的可能发展为铂矿床。这些年来,新疆喀拉通克铜镍铂矿发展成为大型矿床,就是一个很好的实例;其二,中国有许多镁铁——超镁铁质岩带和数以千计的岩体,像译文集中论述的世界上最主要的铂矿类型是由拉斑玄武岩浆分异而形成的层状岩体中的铂族矿床,我国近年已发现了此类岩体,但还未开展铂矿的调查工作。因此从某种意义上说,出版这个译文集,将有助于加强国内外研究成果和研究方法的对比,促进我国铂族元素资源的成矿研究和发展。

译文集编译者分工:汤中立负责选材和出版前的审查定稿;蔡体梁承担译稿编辑和出版审查工作;杜笑菊协助选材并编译了“铂族金属资源分析”部分。编译者都承担了部分翻译工作,参加译校的还有白文吉、李迎香、陶炳昆、殷德智、张兴虎、赵智伟、王春江、夏艳青、郑国东、邵方、童晓华。

目 录

铂族元素地球化学	(1)
一、引言	(1)
二、贫硫硅酸盐岩中的铂族元素	(16)
(一) 引言	(16)
(二) 超镁铁质岩中的铂族元素含量	(17)
(三) 镁铁质岩中的铂族元素含量	(22)
(四) 镁铁质——超镁铁质层状杂岩体铂族元素	(23)
三、铂族元素的矿物亲和性	(25)
(一) 硫砷化物和砷化物	(25)
(二) 硫化物	(26)
(三) 氧化物	(27)
(四) 硅酸盐	(27)
四、结论	(28)
铂族矿物	(29)
一、铂族矿物汇编	(29)
(一) 引言	(29)
(二) 未被承认、有争议、未完全定性的矿物种	(29)
二、铂族矿物的X射线结晶学及密度数据	(35)
三、铂族矿物的矿石显微技术	(35)
未命名的铂族矿物	(175)
一、引言	(175)
二、未命名的铂族矿物表	(177)
含铂成矿超基性建造属性的矿物标志——砂矿中铂矿的标型共生组合	(230)
铂族元素矿床	(233)
一、引言	(233)
二、地壳中铂族元素富集的方式	(234)
三、铂族元素和硫化镍矿床分类	(235)
(一) 铂族元素为主的矿床	(235)
(二) Ni-Cu为主的矿床	(236)

四、某些铂族元素和硫化镍矿床描述·····	(237)
(一) 布什维尔德杂岩体中铂族元素矿化·····	(237)
(二) Stillwater杂岩体中铂族元素的矿化·····	(245)
(三) Lac des Iles矿床·····	(248)
(四) Ni-Cu硫化物为主的矿床·····	(249)
五、岩浆硫化物中铂族元素的富集·····	(262)
(一) 引言·····	(262)
(二) 不同类型矿床的资料·····	(263)
(三) 分析结果的讨论·····	(274)
六、铂族元素的生产、储量和资源·····	(284)
矿物学与矿石中铂族元素回收的关系·····	(286)
一、引言·····	(286)
二、适合重选回收的矿床·····	(286)
(一) Alaska型矿床·····	(286)
(二) 布什维尔德(Bushveld)伟晶岩和其它产状的矿床·····	(287)
(三) 冲积和残积矿床·····	(288)
(四) 古砂矿矿床·····	(289)
三、适合浮选回收的铂族元素矿床·····	(291)
(一) Merensky层·····	(292)
(二) 蒙大拿的Stillwater杂岩体·····	(295)
(三) 安大略的Lac des Iles杂岩体·····	(296)
四、以铂族元素为副产品的Cu-Ni和Ni硫化物矿床·····	(296)
(一) 安大略的萨德伯里地区(I类Cu-Ni硫化物矿床)·····	(297)
(二) 苏联诺里尔斯克-塔尔纳赫地区(II类Cu-Ni硫化物矿床)·····	(296)
(三) 苏联Kola半岛Pechenga(III A类Cu-Ni硫化物矿床)·····	(300)
(四) III B类Ni硫化物矿床·····	(300)
(五) 其它Cu-Ni硫化物矿床·····	(301)
五、含有铂族元素的铬铁矿矿床·····	(303)
(一) 豆荚状铬铁矿矿床·····	(303)
(二) 层状铬铁矿矿床·····	(304)
六、混杂矿石、矿床和铂族元素产状·····	(309)
(一) 斑岩铜矿矿石·····	(309)
(二) 铜铅矿床·····	(309)
(三) 碳酸盐岩·····	(310)
(四) 黑色页岩·····	(310)
(五) 热液和表生铜矿石·····	(310)

(六) 含镍红土矿床.....	(310)
(七) 铁帽.....	(312)
金属矿床中的铂族.....	(315)
铂族金属资源分析.....	(321)

铂族元素地球化学

J、H 克劳凯特

一、引言

本文论述铂族元素在贫硫硅酸盐岩中的地球化学性质及在硅酸盐、氧化物、砷化物和硫砷化物中的含量范围。最早进行硅酸盐岩石、矿物和陨石中铂族元素地球化学研究的学者主要有Goldschmidt、Noddacks及其同事，并由Crocket (1969) 进行了评述。他们发现了铂族元素的亲铁特性，且常常与超镁铁质——镁铁质岩石中的硫化物共生，并指出贫硫硅酸盐岩和矿物的典型特征是：铂族元素含量很低。但这些主要是50年前测定的Pt和Pd数据。由于当时分析方法的灵敏度很低，因此没有在硅酸盐岩中获得可靠的铂族元素数据。铂族元素地球化学研究表明：虽有一些较可靠的Pt、Ir元素数据，但就贫硫硅酸盐岩石来说，这种基础资料仍很有限。

最近出版的两本刊物，《经济地质》第71卷，第七期（1976），《铂族元素专辑》和《加拿大矿物学家》第17卷，第二部分（1979）〈硫化镍矿床和铂族元素矿床〉，具有特殊的意义。这些专辑反映了近十年来铂族元素矿物矿床及地球化学特征方面所取得的重要进展。但同时反映出由于我们对铂族元素在超镁铁质和镁铁质岩浆源矿物中的含量及分布状态缺乏足够的了解，因而弄清铂族元素矿床的成因模型就受到了限制。地幔源岩中铂族元素赋存状态仍不清楚。然而，Naldrett和Duke (1980) 指正，在岩浆硫化矿石中铂族元素的绝对和相对含量与地幔橄榄岩的部分熔融程度、硫化物的部分分离及分批平衡作用有关。

一些岩石和矿物中铂族元素基本数据见表1、表2、表3及图1、图2、图3。这些数据单位为ppb。大部分由放射化学中子活化分析法（NRAA）取得。这种分析方法广泛用来测定超镁铁岩中的Ru、Pd、Os、Ir、Pt和镁铁岩中测定含量低于ppb的Pd、Os、Ir。该方法主要优点是样品不用进行预富集（如火试金或其它方法），就可达到较高的灵敏度。并且可避免许多常见的污染问题。从数据表中看出，采用此方法能简便可靠地测定铂族元素中的Ir、Pd。Crocket和Cabri (1981) 曾对此方法作了论述，但仅涉及了对地球化学基础资料有重要影响的两个方面因素。用放射化学中子活化分析在测定Ru时，易受由裂变产出的Ru的干扰（Gijbels和Zels, 1977），这样，就需对铀进行测定。这种干扰对于辉长岩类或超镁铁岩中的硅酸盐和氧化物矿物影响不大，还可对超镁铁质岩中的Ru测试结果作适当校正。然而由于干扰的存在，本方法不宜用来测定镁铁质岩中的Ru。利用半衰期3.14天 Au^{198} 通过放射化学中子活化分析检测Pt时，易受金的干扰，且仅当Pt/Au大于2时，才能获得满意结果。超镁铁质岩通常适宜测定Pt，而镁铁质岩中由于Pt/Au比率太低，结果不理想。

表 1 A 贫硫岩石和硅酸盐矿物铂族元素含量 (ppb)

岩石类型和大地构造背景	样品号	超 磁 铁 岩					
		Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt
造山的							
火山喷出岩							
鬣刺结构橄榄岩 (科马提岩)。 Pyke's Hill, Munro, Ont.	11	—	—	8.3	—	1.1	14
鬣刺结构橄榄岩 (科马提质)。Mt. Clifford, 西澳大利亚	22, 23	—	—	7.8	—	2.3	—
鬣刺结构橄榄岩 (科马提质)。 Kambalda (Lunon 和 Long 富矿体)	22, 21	—	—	8.6	—	1.2	—
厚层状拉斑玄武岩流。Munro Twp, Ont.	11	—	—	11	—	0.26	15.5
厚层状科马提熔岩流。Munro Twp, Ont.	11	—	—	11	—	0.38	10
深成侵入岩							
橄榄岩和纯橄榄岩 (与科马提同源)。 Mt, Keith, Forrestania, Black Swan 西澳大利亚	47	—	—	2.3	—	6.3	—
蛇绿岩套橄榄岩, 纯橄榄岩和辉石岩。方辉橄榄岩 (橄提岩构造岩)。Theford, Que.	6	—	—	4.4	—	3.6	9.5
纯橄榄岩 (堆积岩)。Theford	4	—	—	17	—	2.5	24
辉石岩 (堆积岩)。Theford	4	—	—	26	—	0.22	19

续 表

岩石类型和大地构造背景	样品号	超 镁 铁 岩					
		Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt
辉长岩 (堆积岩或浅侵入体)。Thetford	7	—	—	18	—	0.065	7.2
橄榄岩 (橄榄岩构造岩)。Troodos	3	—	—	8.1	4.0	5.1	—
纯橄榄岩、橄榄岩、异剥橄榄岩 (堆积岩)。Troodos	5	—	—	0.9	0.098	0.23	—
辉石岩 (堆积岩)。Troodos	4	—	—	13	0.039	0.05	—
辉长岩 (堆积岩)。Troodos	7	—	—	3.1	0.013	0.033	—
Alpine (蛇绿长岩套?) 纯橄榄岩和橄榄岩。 方辉纯橄榄岩。Mt. Albert, Que	13	—	—	9.5	6.7	2.2	9.7
纯橄榄岩。Ray—Iz massif, Polar Urals, 苏联	4	—	5	15	—	—	112
方辉橄榄岩。Ray—Iz massif, Polar Urals, 苏联	4	—	2	4	—	—	26
纯橄榄岩。Naralinskiy, Urals, 苏联	5	6.1	2.4	2.0	4.7	4.1	8.2
橄榄岩。大西洋中脊钻样334孔	2	—	—	41	—	0.64	35
Alaska型杂岩体。Alaska 橄榄岩—纯橄榄岩和辉长岩—角闪岩辉石岩杂岩体。 Duke Island, Union Bay	15, 79, 70	—	29	107	—	—	54

续表

岩石类型和大地构造背景	样品号	超 铁 岩					
		Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt
Blashke Islands, Eklutna Salt Chuck, Mt Fairwenther Klu kwan	除去Salt Chuck的 15, 73, 84	—	29	32	—	—	54
Alaska型杂岩体。苏联 纯橄岩。Nizhniy Tagil, Kytilym, Khabatninskiy, South Krak, Urals	4	0.65	4.4	32	3.7	9.6	82
辉石岩、碱性超镁铁质杂岩体。 Donbas—Azov地区	11, 7	—	—	36	—	—	25
非造山的							
金伯利岩。南非和印度	11	—	—	8.1	—	3.0	—
超镁铁质包体(主要取自上述金伯利岩中的石榴石二辉橄榄岩)	11	—	—	3.7	—	18	—
金伯利岩。Yakutia苏联。	10	6.5	7.1	53	5	7.6	187
石榴石二辉橄榄岩包体。 Obnashennaya Pipe, Yakutia苏联	2	—	12	80	—	18	35
石榴石二辉橄榄岩包体。Matsoku, 莱索托。	4, 2, 4	—	—	5.1	6.2	6.8	—
石榴石二辉橄榄岩包体。Matsoku, 莱索托	4	—	—	2.9	—	6.9	—
尖晶石二辉橄榄岩包体。(主要取自 Kibourn hole和San Carlos大陆碱性玄武岩)	13, 7, 13	—	—	4.5	3.4	3.4	—

续 表

岩石类型和大地构造背景	样品号	超 镁 铁 岩					
		Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt
尖晶石二辉橄榄岩包体。Kapfenstein Dreiser Weiher, Massif Central, San Carlos, Kilbourn Hole, Potvillo	6	—	—	—	—	3.5	—
尖晶石二辉橄榄岩包体。Victoria, 澳大利亚	3	—	—	6.3	—	4.0	—
		铁 岩					
洋底玄武岩 (主要为大西洋中脊拉斑玄武岩)	13, 32	—	—	< 0.7	—	< 0.061	—
板内和大洋岛屿外脊玄武岩 (主要为拉斑玄武岩)	14, 27	—	—	1.6	—	0.36	—
蛇绿岩杂岩体中玄武岩 块状—枕状富铁拉斑玄武岩。Lac de l'Est, Thetford	10, 10, 6	—	—	< 0.31	—	0.019	6.2
枕状富铁拉斑玄武岩。Lac de l'Est, Thetford	8, 8, 6	—	—	9.7	—	0.056	9.2
多孔富铁玄武拉斑岩。Lac de l'Est Thetford	7, 8, 5	—	—	6.8	—	0.23	16
大陆高原玄武岩 (主要为拉斑玄武岩)。 Parana, Karroo, Deccan, Columbia River	54	—	—	8.3	—	0.092	—
主要为碱性玄武岩。中欧南部。Burgenland, Styria 匈牙利盆地。	24	—	—	—	—	0.059	—
辉绿岩岩墙。南北Carolina	9	—	—	—	—	0.27	—

续 表

岩石类型和大地构造背景	样品号	超 镁 铁 岩					
		Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt
拉斑质辉绿岩, Great Lake粗玄岩, Tasmania	20	—	—	—	—	0.082	—
碱性玄武岩, 辉绿岩和火山碎屑岩同期产物。 Donbas—Azov地区, 苏联	3, 3	—	—	27	—	—	15
玄武岩和安山岩。Boschekul地区, Kazakhstan苏联	10, 7	—	—	10	—	—	5
镁 铁 质 和 超 镁 铁 质 状 态 杂 岩 体							
美国蒙大拿Stillwater杂岩体 底带; 原始岩浆的蛇绿岩和次蛇绿岩化辉长岩。	—	6	5	55	—	0.25	12
底带; 主要为斜方辉石堆积岩, 含23%硫化物	79	—	6	44	—	—	20
超镁铁带; 橄榄岩段, 平均9层铬铁矿	9	230	160	960	—	66	535
西格陵兰Fistkenaesset杂岩体 超镁铁质单元, 主要为角闪岩和橄榄角闪岩	6, 5, 5	—	0.43	10	—	—	4.9
下部淡色辉长岩单元, 主要为超镁铁质堆积岩及河床沉积。	4, 5, 5	—	0.26	11	—	—	12
中部辉长岩单元, 主要为橄榄岩, 辉石岩、角闪石堆积岩。	5	—	0.35	5.1	—	—	10
上部淡色辉长岩单元。主要为橄榄岩—铬铁矿和铬 铁岩堆积岩, 河床沉积	5, 7, 6	—	1.5	1.1	—	—	4.2

续 表

岩石类型和大地构造背景	样品号	超 镁 铁 岩					
		Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt
斜长石单元, 主要为斜长岩中的铬铁岩。	9, 7, 3	—	1.9	1.4	—	—	2.4
南非Bushveld杂岩体 斜方辉石岩 (临界带, 过渡, 下部带)	6	4.3	—	—	0.42	0.35	—
斜长石 (上部临界带)	7	30	—	—	4.9	5.8	—
铬铁矿 (上部临界带)	3	577	—	—	90	77	—
Rhum 单斜辉石类	6	—	—	—	—	0.075	—
斜长石	13	—	—	—	—	0.57	—
橄榄石	10	—	—	—	—	0.35	—
中 性 和 长 英 质 岩							
主要为花岗角闪岩, 英闪岩, 石英二长岩。 Boulder和S. California岩基	29	—	—	—	—	0.031	—
加拿大前寒武纪地盾基底 (标准成分是花岗岩长岩)	11/351	—	—	—	—	0.024	—
花岗岩长岩GSP-1	{ 1 1 }	—	—	—	—	—	< 0.5 —
花岗岩 G-2	{ 1 1 }	—	—	—	—	—	< 0.5 —

续 表

岩石类型和大地构造背景	样品号	超 镁 铁 岩					
		Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt
花岗岩 GA	1	—	—	6	—	—	—
花岗岩 GH	1	—	—	3	—	—	—
花岗岩类	5	—	—	—	—	—	8

碳 质 球 粒 陨 石	超 镁 铁 岩						
I 型和 I 型碳质球粒陨石平均值	5	770	—	575	625	518	1050

表 1 B 铂族元素在贫硫岩石中平均含量 (ppb)

岩 石 类 型	超 镁 铁 质					
	Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt
戴刺结构橄榄岩熔岩流 (每一产地的单位重量)	—	—	8.6	—	1.2	14
科马提质侵入橄榄岩和纯橄岩	—	—	2.3	—	6.3	—
蛇绿岩型和Alpine型橄榄岩构造岩 (每一个产地的单位重量)*. Thetford, Troods, Albert Mt, Ray—Izin Naralinskiy	6.1	3.0	6.7	5.1	3.8	9.1
Alaska型杂岩体 (每一侵入体的单位重量). Alaska, Urals和Donbas	0.65	19	32	3.7	9.6	43

续 表

岩 石 类 型	超 镁 铁 岩					
	Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt
金伯利岩, 南非	—	—	8.1	—	3.0	—
金伯利岩, Yakutia, 苏联	6.5	7.1	53	5	7.6	187
超镁铁质包体 (取自金伯利岩和碱性玄武岩)	—	—	4.3	4.0	8.1	—
镁 铁 质						
洋底玄武岩	—	—	< 0.7	—	< 0.061	—
板内玄武岩	—	—	1.6	—	0.36	—
蛇绿岩套富镁玄武岩	—	—	9.7	—	0.056	9.2
蛇绿岩套富铁玄武岩.	—	—	< 0.3	—	0.019	6.2
大陆高原玄武岩, Carolinas	—	—	8.3	—	0.092	—
辉绿岩岩墙, Carolinas	—	—	—	—	0.27	—
辉绿岩, Tasmania	—	—	—	—	0.082	—
玄武岩, 欧洲	—	—	—	—	0.059	—

注: a, 除去Ray—Iz的Pt值

表 2

铬铁矿和含铬铁矿超镁铁质岩中的铂族元素 (ppb)

样品描述和构造背景	样品数	Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt
蛇绿岩或蛇绿岩类似物Mt Albert Quebec岩体可能的蛇绿岩 付铬尖晶石	4	—	—	24	3.4	4.3	—
块状铬铁矿异离体	2	—	—	0.5	96	24	—
Thetford蛇绿岩杂岩体, Lac du Caribou 在堆积纯橄岩中铬铁矿条带	2	—	—	0.3	—	30	1.5
Semail蛇绿岩, 阿曼铬铁矿 叶片状方辉橄岩中的纯橄岩	5	<125	8	7	—	<43	15
以堆积岩为主岩	1	<100	—	11.5	—	<30	21
希腊铬铁矿产地 (Vourinon, Rodiani, Eretria, Metafition, Nezeros, Euboa, Chalkidiki, Thraki)	11	89	—	<3.6	72	39	<28
Ray-Iz massif, Uralis. 铬铁矿	23	—	22	79	—	—	475
Kempirsay massif, Uralis. 铬铁矿	4	—	42	700	—	—	307
Tocantins杂岩体, Goias, 巴西. 铬铁矿	5	—	125	170	—	—	910
中国西北. 纯橄岩体 铬铁矿	34	92	10	—	63	25	—
铬铁矿中的铬铁矿	10	159	7	—	81	16	—

续 表

样品描述和构造背景	样品数	Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt
镁橄榄石、脉石	?	7	1.3	—	2.7	2.3	—
Alaska型 Urals 纯橄岩侵入体, 包括Nizhniy Tagil, Kytlym, Khabarminskiy和南Karak (包含在铬尖晶石条带或块状铬 铁矿石中的纯橄岩样品)	4	408	43	2220	272	205	19400
Nizhniy Tagil, Urals铬铁矿	8	240	—	—	520	—	—
Konder massif, Aldan. 铬铁矿	5	5320	—	—	1680	—	—
Aldan地盾Inaglinsk岩体 附生和分凝铬尖晶石的纯橄岩	15	5.4	—	—	9.2	—	—
岩体核部含附生和分凝铬尖晶石的纯橄岩	11	4.7	170	73	7.7	226	446
铬铁矿	4	118	—	—	675	—	—

表 3 硫化物、砷硫化物、砷化物和它不透明矿物中铂族元素 (ppm)

矿物和围岩	样品号	Ru	Rh	Pd	Os	Ir	Pt
萨德伯里Strathcona矿山深部矿带; 块状硫化物共生矿物 3 个采样点的 6 个样品	6	—	—	0.18	—	0.0015	0.74
		—	—	0.36	—	0.007	5.46
		—	—	2.07	—	0.002	0.88
		—	—	0.014	—	0.001	0.45
萨德伯里Strathcona矿山. 主矿带底板; Cp 主矿带底板; Po 顶壁矿石; Po	10, 11, 10, 11 7, 9, 7, 7 10, 13, 10, 13	0.014	—	0.96	0.003	0.001	—
		0.004	—	0.21	0.003	0.002	—
		0.059	—	0.071	0.020	0.046	—
		—	—	14	—	0.23	—
萨德伯里Falconbridge矿山 辉砷镍矿	1	—	—	—	—	—	—
萨德伯里Creighton矿山		—	—	0.100	—	—	0.48
		—	—	0.013	—	—	0.72
		—	—	6.30	—	—	0.20