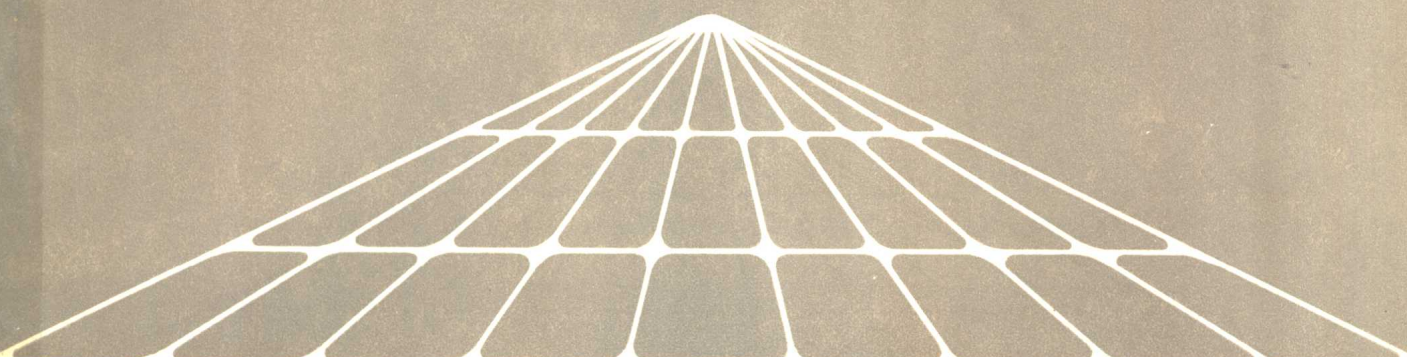




国外铂族金属矿床

(论文集)

冶金工业出版社



国外铂族金属矿床 (论文集)

傅 荫 平 译

冶金工业出版社

内 容 简 介

本书由21篇论文组成。比较详细地介绍了非洲、美洲、欧洲及澳洲等地一些著名的铂族金属矿床的地质特征、成因、矿相、铂族元素在热液和蚀变过程中的地球化学性质,以及与铂族元素富集有关的岩体分类和成因及对铂矿床的开采和不同类型矿石的选矿等方面的问题。同时也反映出西方不同学派的地质学家和矿床学家对于铂矿形成理论上的不同看法和论点。本书可供广大地质战线上从事地质普查与勘探、教学、科研的同志们参考。

国外铂族金属矿床

(论文集)

傅 荫 平 译

*

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 14 1/2 字数 348 千字

1982年1月第一版 1982年1月第一次印刷

印数1~820册

统一书号: 15062·3767 定价1.50元



目 录

1. 超镁铁岩及有关的镁铁岩：与镍的硫化物和铂族元素富集有关的岩石分类与成因.....	1
2. 西澳大利亚镍硫化物矿床的矿石与母岩中的钯、铑和金.....	34
3. 铂矿的成因：新的矿物学证据.....	50
4. 怀俄明州梅迪辛鲍山新兰比莱矿山与热液铜矿伴生的铂族金属.....	61
5. 芬兰希图拉镍矿床中的铂族金属矿物.....	84
6. 蒙大拿州斯蒂尔沃特杂岩中的铂族金属.....	93
7. 布什维尔德侵入杂岩体的铂矿床.....	105
8. 布什维尔德侵入杂岩体的纯橄榄岩中的铂矿床.....	111
9. 产于布什维尔德侵入杂岩体的铬铁矿中的铂矿床.....	137
10. 与布什维尔德侵入杂岩体岩浆Ni-Cu-Fe硫化物有关的铂矿床.....	140
11. 布什维尔德侵入杂岩体的麦林斯基铂矿层.....	141
12. 布什维尔德侵入杂岩体拉斯顿堡地区与比勒陀利亚地区的麦林斯基铂矿层.....	159
13. 布什维尔德侵入杂岩体莱登堡地区与佩特斯堡地区的麦林斯基铂矿层.....	172
14. 布什维尔德侵入杂岩体波希特斯勒斯特之北北西方向的麦林斯基层及伴生的交代矿床和伟晶岩矿床.....	179
15. 布什维尔德侵入杂岩体麦林斯基铂矿层的次生现象.....	195
16. 布什维尔德侵入杂岩体麦林斯基式铂矿床的成因.....	198
17. 产于布什维尔德侵入杂岩体莱登堡区麦林斯基层上部或下部的麦林斯基式的铂族金属矿床.....	200
18. 南罗得西亚（津巴布韦）大岩墙中的铂族金属矿床.....	206
19. 南非其它一些铂族金属矿床.....	210
20. 布什维尔德侵入杂岩体的残积和冲积的铂族金属矿床.....	216
21. 布什维尔德侵入杂岩体的铂矿的开采与矿石的加工处理.....	218

1. 超镁铁岩及有关的镁铁岩：与 镍的硫化物和铂族元素富集有 关的岩石分类与成因

作者：A.J. 纳尔德莱特 (Naldrett)

L.J. 卡布里 (Cabri)

一、引言

因为铂族元素几乎专与超镁铁岩和镁铁岩有成因联系，所以本文的目的主要是综述有关的不同岩石类型，特别着重于铂族元素在这些岩石中富集的原因。铂族金属的原生富集有两个主要途径，或是成岩之后受风化作用并形成砂矿，或是在岩浆阶段因不混溶的硫化物融熔体的形成和富集而富集了铂族元素。本文则特别着重于岩浆作用并且讨论一个分类方案，方案中指出了不同岩石类型的明显的鉴别特征，并且对许多认为是重要的铂族元素来源的岩浆成分和岩浆的分导趋向做了对比。

本文中关于各类超镁铁岩中铂族元素含量的资料都是由已发表的文献中收集的。许多硫化矿床的资料也是从文献中得到和一些矿业公司的同事帮助提供的。作者深望本文对于读者能够提供一点背景材料。

在编写过程中我们注意到，当我们考虑含铂母岩的特点与含铂矿石中的Cu/Ni比值有关时，铂与钯的富集展示了变化，这些变化根据将要讨论的成因模式可以得到很好的解释。

二、超镁铁岩及有关的镁铁岩：它们的分类及有关的一些岩浆类型

以超镁铁岩及有关的镁铁岩所侵位的大地构造环境对其进行分类是很方便的。根据这种思路，纳尔德莱特 (1973) 提出了一个主要超镁铁岩体的分类表。在表 1-1 中我们列出了这个方案的最新说法。可以看出，这个初步的分类方案主要是考虑了侵位于受强烈造山活动或受短暂造山活动的构造环境和侵位于非造山环境（一般是稳定的克拉通区）之间的那些岩体。

1. 侵位于造山环境中的岩体

可以把侵位于造山环境中的超镁铁岩体大致划分出三个类型：一是和“优地槽”早期的火山活动同期形成的超镁铁岩体；二是在地槽造山运动发生挤压期间侵位的所谓阿尔卑斯型的超镁铁岩体；第三是地槽造山运动隆起后期侵位的所谓阿拉斯加型超基性岩体。

同火山活动期的岩体：在太古代和元古代绿岩带工作的经验表明，同火山活动期的超镁铁岩是属于拉斑玄武岩类和科马提岩类两种主要类型岩体的一部分，而拉斑玄武岩又分为两个明显不同的亚类：(a) 苦橄岩亚型和 (b) 斜长岩亚型。因为斜长岩亚型含超镁铁岩甚少，故下边我们将着重地介绍科马提岩和苦橄岩质的拉斑玄武岩类型。

表 1-1 超镁铁岩体及有关的镁铁岩体的分类

分 类	实 例	附 注
A	侵位于造山活动区的岩体 1. 与优地槽火山活动同期形成的岩体 (i) 拉斑玄武岩系列 (a) 苦橄岩亚型 曼罗-丹当尔德 (Munro-Dundenald) 区岩体 (Nal-drett和Mason, 1969; McRac, 1969; Arndt, 1975, 1976) 卡卡吉湖岩体 (Kakgi) (Ridler, 1966) 贝辰加岩体 (Gorbunov, 1968) (b) 斜长岩亚型 道莱湖 (Dore lake) 杂岩 (Allard, 1970) 贝尔河 (Bell River) 杂岩 (Sharpe, 1965) 卡米斯考提亚 (Kamiskotia) 杂岩, 安大略省提敏斯 (Timmins) (ii) 科马提岩系列 曼罗-丹当尔德区, 安大略省 (Naldrett和Mason, 1968; Pyke等, 1973; Arndt等私人通讯) 澳大利亚东金田岩体 (Mc Call和leishman, 1971; Nesbitt, 1971; Hallberg和Williams, 1972; Williams, 1972; Naldrett和Turner, 1977) 2. 阿尔卑斯型岩体 (i) 巨大的层间岩席 新加里东尼亚岩体 (Guillon, 1975) 巴布亚—新几内亚 (Davies, 1968, 1971) (ii) 蛇绿岩杂岩 沃林诺斯岩体 (Vourinos) (Moore, 1969) 特罗斯岩体 (Troodos) (Gass, 1967, 1968; Moore和Vine, 1971) 群岛湾岩体 (Bay of islands) (Dewey和Bird, 1971; Irvine和Findlay, 1972) 峡谷山岩体 (Canyon Mountain) (Thayer和Himmelberg, 1968) 魁北克东乡岩体 (Eastern Townships, Quebec) (Iamerche, 1972; Laurent, 1975) (iii) 混杂岩地带变形蛇绿岩杂岩和碎块 华盛顿李生姐妹岩体 (Twin Sisters, Washington) (Regan, 1967) 佛蒙特州 (Vermont) 蛇纹岩 (Jahans, 1967) 伊朗岩体 (Gansser, 1959) 弗朗西斯科岩系 (Franciscan Series) (Hamilton, 1969; Hsu 1908) (iv) 可能是底辟式岩体 魁北克州艾尔伯特山岩体 (Mt. Albert, Quebec) (Mac Gregor, 1962)	重力分异的岩流, 其上部被一层含MgO13~15%的玻璃碎屑岩所覆盖 (见表2的12和14栏)。重力分异的岩床。 此类中某些岩体是整合的, 另一些则是不整合的, 它们可能是上覆的火山岩的分异的岩浆房。 简单的岩流, 鬃刺结构—帽状结构的岩流, 分异的岩流和分异的岩床。岩流的成分由橄辉岩至玄武岩, 而岩席的成分由纯橄辉岩到斜长辉长岩。

续表 1-1

分 类	实 例	附 注
A	3. 阿拉斯加型杂岩 阿拉斯加与不列颠哥伦比亚的侵入体包括丢克岛岩体 (Duke is land) (Irvine, 1974) 联合湾岩体 (Union Bay) (Ruckmick和Noble, 1959), 图拉敏岩体 (Tulameen) (Findlay, 1969) 乌拉尔的侵入岩体 (Vorobeyeva等, 1962)	
B	侵位于非造山区的岩体 4. 巨大的层状杂岩 布什维尔德杂岩 (Hall, 1932; Wager和Brown, 1968; Visser和Von Gruenewaldt, 1970) 斯梯尔沃特杂岩 (Hess, 1960; Jackson, 1961; Bowes等, 1973) 玛斯科克斯 (Muskox) (Irvine和Smith, 1967) 丢卢恩岩体 (Duluth) (Taylor, 1964; Phinney, 1970) 基格拉派特岩体 (Kiglapait) (Naldrett等, 1970, 1972) 5. 相当于溢流玄武岩的岩床和岩席 派利水德岩床 (Palisades Sill) (F. Walker, 1940; K. Walker, 1969) 南非茵西兹瓦-英格力侵入体 (Insizwa-Ingeli intrusion, S.A.) (Maske, 1966) 南极州达非克侵入体 (Ford和Boyd, 1968; Ford, 1970; Himmelberg和Ford, 1976) 6. 中小规模的侵入体 斯凯尔噶德岩体 (Skaergaard) (Wager和Brown, 1968) 腊姆岩体 (Rhom) (Wager和Brown, 1968) 诺里尔斯克-塔尔纳赫岩体 (Talnakh) (Godlevskii, 1959, Zolotuchin和Vasil'ev, 1967) 7. 环状杂岩的碱性超镁铁岩与金伯利岩岩筒	一般产在喷出的溢流玄武岩区, 这些岩席在化学成分上类似于喷出玄武岩

① 拉斑玄武岩类—亚类 a (苦橄岩): 属于此类的超镁铁岩多呈分异的岩床或岩流的底部堆积层产出。有的也可以呈盖在火山岩流上的玻璃质碎屑岩带或呈隐晶质的或细粒的辉石岩带, 或呈在成因上可能和岩床有关的火山口角砾岩产出。例如丹当尔德岩床就是此亚类的一个典型岩床, 其底部由320米厚橄榄岩层组成, 在上部覆盖有130米厚的辉石岩, 再上面是260米厚的辉长岩, 在辉长岩的顶部有60米的花斑岩带 (Naldrett 和 Mason, 1968)。此岩床每个岩带所采的样品化学分析平均值列于表1-2中。类似的岩相成层现象也见于此亚类的一些岩流中, 只是这些岩流中的辉长岩相带向上过渡为细粒辉石岩, 上面覆盖着辉石岩成分的玻璃质碎屑岩 (Arndt, 1975, 1976)。在阿列克索 (Alexo) 矿山一个管状的玻璃质碎屑岩体穿切覆盖丹当尔德岩床的科马提岩岩流 (其成分参见表1-2), 使其破碎, 并与最后一层玻璃质碎屑岩归并为一体; 而此层的上面又是另一层科马提岩岩流, 这就说明两种岩浆活动是同时的。推测此类玻璃质碎屑岩的成分 (表1-2第12和14栏) 代表着形成岩流和岩床的岩浆的原始成分。它们含有10~20%的橄榄石标准矿物分子, 因此可以把它们描述为橄榄拉斑玄武岩或苦橄岩。

表 1-2 超镁铁岩及有关的镁铁岩的典型的化学分析 (是在扣除了 $H_2O+CO_2+S_2$ 或
烧失量并对 P_2O_5 忽略不计的情况下再换算的结果)

	典型的科-马提岩						丹当尔德岩床					玻璃质碎屑及其 有关的岩石		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
SiO ₂	40.2	44.0	47.6	48.9	51.0	52.2	42.0	52.2	48.7	55.4	64.7	50.0	51.9	50.3
Al ₂ O ₃	0.29	5.27	6.19	10.3	12.6	14.8	1.11	3.11	13.1	13.7	15.1	9.36	9.77	7.93
TiO ₂	0.02	0.27	0.33	0.5	0.59	0.80	0.20	0.46	1.85	1.58	0.92	1.15	1.17	0.97
Fe ₂ O ₃	7.89	12.2	10.4	12.3	12.6	11.52	15.5	1.19	4.46	2.32	0.81	15.6	14.63	16.4
FeO	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	6.71	11.9	13.4	5.21	n.d	n.d	n.d
MnO	0.39	0.22	0.22	0.23	0.4	0.2	0.23	0.17	0.22	0.22	0.13	0.27	0.21	0.25
MgO	51.6	32.5	27.7	16.5	10.68	7.95	40.4	16.0	5.63	3.13	2.47	13.3	9.36	15.2
CaO	0.04	5.48	6.82	9.78	10.54	10.17	0.46	17.4	10.5	5.62	4.64	9.46	10.5	10.2
Na ₂ O	0.01	0.32	0.19	1.18	2.35	2.44	0.0	0.52	2.98	4.11	5.18	2.16	3.95	1.00
K ₂ O	<0.01	0.04	0.01	0.13	0.13	0.28	0.0	0.0	0.43	0.36	0.69	0.09	0.03	0.25
Cr ₂ O ₃	n.d①	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	1.10	0.43	0.01	0.03	0.04	0.13	n.d	n.d
P ₂ O ₅	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
总计	100.44	100.30	99.46	99.82	100.70	100.36	101.00	98.19	99.78	99.87	99.89	101.52	101.52	102.50
ΣFe ₂ 以FeO表示	7.10	10.95	9.38	11.07	11.31	10.36	13.93	7.78	15.92	15.49	5.94	14.04	13.17	14.78

	贝辰加岩体				诺里尔斯克岩体						萨德伯里岩体			
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
SiO ₂	41.1	45.3	46.3	54.5	49.2	45.1	41.3	44.9	48.5	50.7	55.3	56.9	51.7	61.8
Al ₂ O ₃	3.52	5.11	12.5	15.0	15.8	16.0	10.1	14.9	16.2	13.8	18.6	16.0	15.5	14.2
TiO ₂	1.30	2.43	5.36	2.14	1.66	0.93	0.63	0.65	1.12	1.86	0.52	0.66	2.11	0.97
Fe ₂ O ₃	1.67	1.73	2.19	2.81	3.52	4.09	2.64	2.28	2.91	5.43	0.79	3.27	3.12	1.78
FeO	13.5	15.1	13.3	13.6	8.62	9.84	11.9	9.54	7.88	8.34	6.06	6.24	9.28	7.81
MnO	0.17	0.19	0.14	0.20	0.19	0.20	0.20	0.19	0.17	0.20	0.11	0.10	0.11	0.18
MgO	35.3	12.05	6.18	2.42	6.91	12.5	24.5	16.8	8.67	5.59	6.47	4.28	4.64	1.58
CaO	1.83	17.4	10.1	6.23	10.6	9.42	6.66	8.79	11.9	10.7	8.02	7.96	8.01	3.76
Na ₂ O	0.13	0.39	2.30	4.05	2.41	1.29	0.74	1.38	1.87	2.37	2.64	3.23	2.80	3.09
K ₂ O	0.17	0.50	1.81	2.54	0.54	0.78	0.38	0.31	0.39	0.49	0.98	1.43	1.38	3.25
Cr ₂ O ₃	n.d	n.d	n.d	n.d	0.03	0.52	1.07	0.04	0.03	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
P ₂ O ₅	n.d	n.d	n.d	n.d	0.29	0.20	0.12	0.14	0.12	0.48	0.19	0.24	1.21	0.42
总计	99.69	100.20	100.18	103.49	99.77	100.87	100.24	99.92	99.76	99.96	99.68	100.31	99.86	98.84
ΣFe ₂ 以FeO表示	15.0	16.66	15.27	16.13	11.79	13.52	14.28	11.59	10.50	13.23	6.77	9.18	12.08	9.41

续表 1-2

	布什维尔德杂岩体						斯梯尔沃特杂岩					
	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
SiO ₂	43.8	55.5	52.7	52.5	56.6	62.4	40.1	49.02	55.1	51.7	50.3	50.6
Al ₂ O ₃	1.27	2.05	5.31	17.0	13.3	13.2	2.64	4.41	6.27	14.2	19.8	17.2
TiO ₂	0.27	0.10	0.21	0.22	1.75	0.95	0.12	0.10	0.08	0.14	0.14	0.19
Fe ₂ O ₃	1.40	0.15	2.31	0.68	5.42	3.34	1.48	1.23	0.24	0.50	0.21	0.23
FeO	11.30	9.68	11.9	6.78	9.29	7.96	12.0	9.94	7.91	6.59	4.40	5.02
MnO	0.11	0.15	0.16	0.14	0.26	0.15	0.19	0.18	0.18	0.13	0.09	0.12
MgO	36.5	31.0	22.1	9.06	0.57	0.43	39.1	30.5	23.1	16.7	10.7	11.3
CaO	1.43	0.97	5.42	11.6	6.35	4.50	1.40	3.05	5.52	9.12	13.1	14.0
Na ₂ O	0.21	0.10	0.64	1.89	3.51	3.76	0.19	0.41	0.44	0.84	1.01	1.18
K ₂ O	0.32	tr	0.16	0.37	2.60	3.15	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.08
Cr ₂ O ₃	3.40	0.63	0.16	0.00	0.00	0.00	2.43	0.74	0.70	0.23	0.19	0.13
P ₂ O ₅	tr ^②	0.2	0.09	0.11	0.36	0.2	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01
总计	101.01	100.53	101.16	100.35	100.01	100.04	99.69	99.61	99.57	100.16	99.95	100.06
ΣFe,以FeO表示	12.56	9.82	13.98	7.39	14.17	10.97	13.33	11.65	8.13	7.04	4.59	5.23

① n.d—未测定；② tr—痕量。

② 拉斑玄武岩—亚类 b (斜长岩)：这类岩体是由斜长岩、辉长斜长岩或斜长辉长岩组成，其特点是有富含钛磁铁矿的薄层。此类岩体中超镁铁岩相对来说是不普遍的，通常只限于一些富含堆积辉石岩组成的薄层中。此类型中研究得最好的（显然大部分已蚀变了）实例就是道莱湖杂岩（Allard, 1970; Allard等, 1972）。此岩体的岩相层理与围岩层理产状是一致的，说明它是在围岩发生褶皱之前侵入的。然而，位于安大略省提敏斯以西24公里处的卡米斯考提亚杂岩，虽然露头不多，看来很可能是一个不整合的侵入岩体。

③ 科马提岩：到底什么是科马提岩的成分，这个问题已经造成了混乱。此名称是由维蓼恩（Viljoen和Viljoen, 1969）对巴伯顿山地科马提河流域很发育的岩石取名的，科马提岩的初始定义，特别是布鲁克斯和哈特（Brooks和Hart, 1974）对它的阐释后来证明有点过于严格。阿恩特（Arndt）等已经提出对科马提岩火成岩系列要重新定义，认为科马提岩是有特色的，并把它和拉斑玄武岩系列、钙碱系列或碱性系列放在同样的地位来看待。

科马提岩系列的组分变化范围为纯橄榄岩（在无水的基础上计算出MgO>40%）、橄榄岩（MgO为30~40%）、辉石橄榄岩（MgO为20~30%）、辉石岩（MgO为12~20%）以及镁质玄武岩（MgO为10~12%）和玄武岩（MgO为<10%）。这些岩石类型的典型分析见表1-2。在同一地区喷发的和侵入的两种科马提岩往往同时并存，而以喷发岩为主。此组合中的超镁铁岩组分是含MgO达35%，但是，一般则含20~30%，并且是含有20~30%橄榄石悬浮斑晶的液体侵位的产物。橄榄石斑晶的沉降和堆积并伴随着渗滤挤压、压紧，可能还有堆积生长，这对橄榄岩和纯橄榄岩的形成是说得通的（Naldrett和Turner, 1977）。

在某些岩流（也许还有某些接近于地表的侵入体）中，橄榄石和单斜辉石晶体的板片状和骸晶状增生是沉淀了斑晶上部熔融的特征，众所周知这就叫鬣刺结构(Pyke等, 1973)。尽管存在有斑晶的骸晶增生和填隙的辉石骸晶，但是在其它一些岩流中，斑晶的沉淀像是受到阻滞，在这种情况下缺失鬣刺结构的岩带。因而有这种被推想为快速冷却形成的鬣刺结构的岩带，则被认为是成分上接近于该岩浆的液体。按照这个准则，含 MgO 为 23% 左右并具有鬣刺结构的岩流，大约是在 $1425^{\circ}C$ 下喷发的（见 Shima 和 Naldrett, 1975），含 MgO 为 35% 左右的岩流则是在 $1650^{\circ}C$ 左右喷发的（Green等, 1975）。

科马提岩系列中辉石岩和玄武岩组分似乎是由一种富镁较多的科马提岩熔浆分离结晶的产物。辉石岩的特点是具有很尖很细的（几乎就与针一样的细）单斜辉石骸晶颗粒构成的鬣刺结构的变种。在玄武岩中骸晶的结构不是不太发育，就是完全缺失。

阿恩特（1975, 1976）描述过一层 120 米厚有分异的科马提岩流。这层岩流的基底带是由一层堆积的橄榄岩组成，其上被辉石岩覆盖，尽管有一些紫苏辉石，但主要的成分还是普通辉石，辉石岩上部是辉长岩，辉长岩向上渐变成石英辉长岩。此层岩流的上部被一层厚 30 米的具有鬣刺结构的橄榄石和辉石所组成的岩带覆盖。正如阿恩特等（待发表）所强调的那样，这一层岩流是很重要的，因为它提供了超镁铁岩质科马提岩与玄武质科马提岩之间的直接联系。

阿恩特等（待发表）指出，根据岩石中 Al_2O_3 对 $FeO/(FeO + MgO)$ 含量（全部铁都换算为 FeO ）作图，可以很方便地把安大略省曼罗镇区的科马提岩与拉斑玄武岩区分开来。图 1-1 a 中所表示的是曼罗镇科马提岩与丹当尔德岩床的堆积岩。这两类岩浆在图上的区别是极其明显的：科马提岩都落于图中斜线的上部，而拉斑玄武岩则落在斜线的下方。阿恩特等据图 1-2 a 的 TiO_2-MgO 的图象指出，另一个区分特征是科马提岩 TiO_2 的含量相对比拉斑玄武岩中的 TiO_2 要低。尽管丹当尔德岩床的堆积橄榄岩和辉石岩落在科马提岩的范围之内，可是在区分此岩床中诸辉长岩变种时，此图是颇为有效的。在区分科马提岩与未分异的和分异喷出的拉斑玄武岩也是有效的。

如果对世界上其它地方的科马提岩也加以考虑的话，那么纳尔德莱特与特纳（1977）所描述的西澳大利亚雅卡宾迪地区的科马提岩，在 Al_2O_3 对 $FeO/(FeO + MgO)$ （图 1-1(b)）和 TiO_2 对 MgO （图 1-2(b)）的图上均表现出与曼罗有相似的性质。纳尔德莱特和特纳还证明雅卡宾迪地区的玄武岩质科马提岩的特点是镍含量（ Ni 100~181 ppm，平均为 146 ppm）和 Cr_2O_3 含量（ Cr_2O_3 210~800 ppm，平均为 417 ppm）都比同一地区的拉斑玄武岩（ Ni 25~127 ppm，平均为 76 ppm； Cr_2O_3 由 <10 到 336 ppm，平均为 138 ppm）要高一些。奈兹贝特（1971）所报导的西澳大利亚斯科提亚区（位于卡尔古利以北 80 公里地方）的分析资料与雅卡宾迪区的分析资料的投图点会聚一起。然而，与加拿大和西澳大利亚的岩石相反，巴伯顿的科马提岩，特别是巴德普拉斯的和巴伯顿型的玄武岩质科马提岩和格鲁克型的低铝变种的的分析材料均落于图 1-1(a) 中斜线的下方。阿恩特（1976）曾描述过这类目前只产于巴伯顿地区的这些岩石的异常的成分，并且提出一些理由。

对图 1-1 的效果这里还要提醒注意：因为一定的岩石仅通过概述的化学判别图，不一定完全有把握地确定就是科马提岩系列的岩石。除了化学标准以外，要确定科马提岩系列的岩石，还应当考虑我们前面提到的其它特征，例如与熔岩并存、可能的富含橄榄石的次火山的通道以及在某些有代表性的样品中出现的鬣刺结构等。

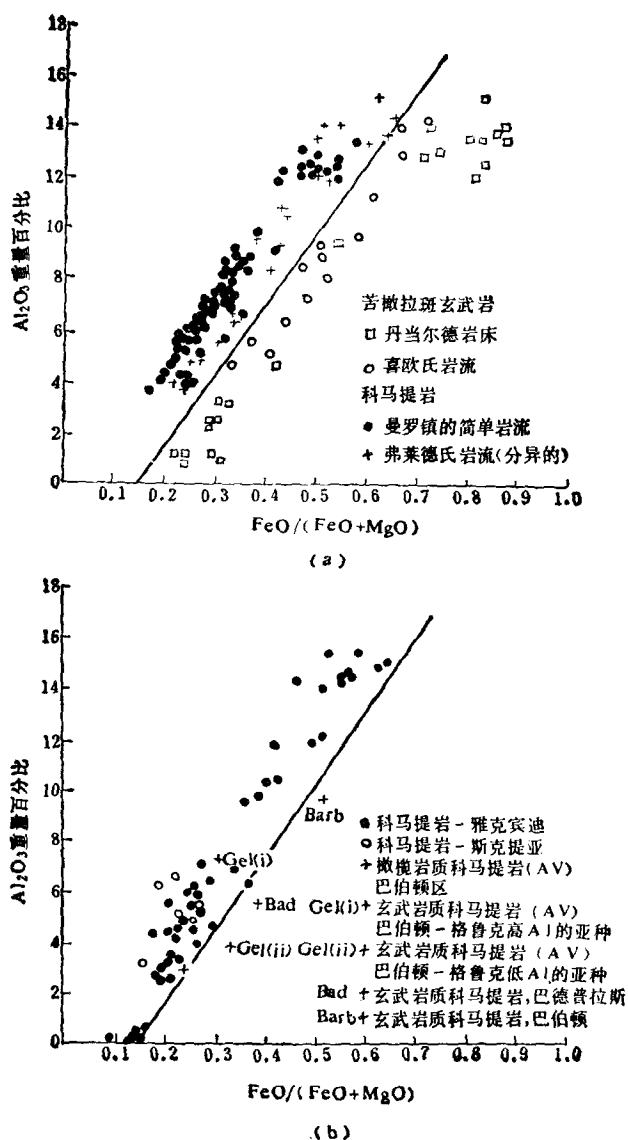


图 1-1 各种岩石中 Al_2O_3 随 $FeO/(FeO+MgO)$ 的重量百分比的变化情况

a—阿比梯比绿岩带；b—南非和西澳大利亚的某些选定地区的科马提岩体

注意：岩石中铁的总量是以 FeO 形式计算的，所有的岩石分析在换算时都扣除了水和 CO_2 或扣除了烧失量。

阿尔卑斯型超镁铁岩：阿尔卑斯型超镁铁岩体的各种类型列于表 1-1。我们根据许多作者的观点，认为阿尔卑斯型岩体是在构造作用期间固态侵位形成的蛇绿岩杂岩的一部分。蛇绿岩本身又被认为是大洋壳和上地幔的一部分，其特点是具有一层带变质结构的橄榄岩底部带，其上是由橄榄岩到辉长岩的堆积岩层、一系列枕状的熔岩与伴生的通道式岩墙以及一层含有放射虫燧石岩层的深海沉积物所覆盖。

在某些地方侵位是完全的，只有小的错动，蛇绿岩层位保存得很完整，但在另一些地

方超镁铁岩在混杂岩中则呈一些孤立的岩块产出。

阿拉斯加型超镁铁岩：阿拉斯加型杂岩的名称是由沿着阿拉斯加东南陆地与内列诸岛出露的一系列著名的岩体而得来。沿着550公里长的阿拉斯加靴形地带分布着30多个岩体，其中大多数分布在宽度约40公里的地带。8个最大的杂岩体出露面积分别为5~30平方公里。有些较大的杂岩体还表现出大致呈同心环带状构造。最发育的同心环构造由纯橄榄岩核部向外依次为橄榄单斜辉石岩、富含磁铁矿的单斜辉石岩以及角闪岩壳层所组成。从整体来看，阿拉斯加型岩体与阿尔卑斯型超镁铁岩体或层状侵入体的明显差别就在于它含有富钙的单斜辉石，而不含斜方辉石或斜长石。但是富含有角闪石、富铁的铬尖晶石以及磁铁矿等成分。磁铁矿有时呈富集体产出，在某种情况下还有经济价值。

类似的同心环状构造岩体在乌拉尔、不列颠哥伦比亚中南部以及在委内瑞拉等地都有产出（见表1-1），研究得最好的就是鄂尔文所描述的（1974）丢克岛杂岩体。鄂尔文还对此类型岩体提出了目前最为全面的解释。

2. 侵位于非造山环境的岩体

如表1-1所示，非造山环境岩体的分类，除能区别高原玄武岩岩浆与碱性侵入体之外，着重是侵入体规模大小的区别，而不是侵入体或岩浆类型的根本差别问题。而且，在被认为是造山环境与非造山环境的岩体之间有一个杂岩地带。例如，韩特（1974）和纳尔德莱特及特纳（1977）就曾把科马提火山活动与早于硅铝板块的断裂作用联系起来。在这两种情况下，并不存在所发生的断裂作用能足以产生新的大洋壳的证据。然而，继断裂之后，接着就是侵位于假定的断裂带中的这些岩体的压缩和褶皱作用，这就是我们要把这些超镁铁岩划入造山组合的原因。

例如，太古代的科马提岩在其侵位时的构造环境是否与位于大地堑中的诺里尔斯克地区二叠—三叠纪火山岩和侵入体的环境、北美大陆中央断裂带有关的苏必利尔湖区的基纳万熔岩和丢卢思杂岩的构造环境、或者是与北大西洋断裂有联系的东格林兰和西苏格兰旁侧的熔岩及侵入体的构造环境有没有区别等问题全都是争议的。在这三种情况下都缺少的是岩体未曾受到最后的压缩作用。

在划分岩体类型时，尽管我们了解到喷出的科马提岩所在的不稳定的太古代地壳断裂的深陷构造过程与较年青的克拉通的断裂（甚至是早期的断裂）的构造过程也许是没有多大差别，可是我们还是把是否受到最后的挤压作用作为重要的因素。后边还将讨论能生成不同类型超镁铁岩的岩浆成分的区别及相似性。

巨大的层状侵入杂岩：如表1-1所示，此类超镁铁岩包括诸如布什维尔德杂岩体，斯梯尔沃特杂岩体，玛斯科克斯杂岩以及萨德伯里等杂岩体。尽管除了萨德伯里杂岩之外，其余的这类岩体都有超镁铁岩岩相带的存在，可是，这类杂岩体的总的化学成分还是趋向于镁铁质，而不是超镁铁质。就是在萨德伯里杂岩体中也有不少纯橄榄岩到暗色橄榄辉长岩包体（Rae, 1975），这些包体被认为是来自隐伏在下边的层状侵入体（Naldrett等, 1972）。

高原（溢流）玄武岩的岩床：此类岩体包括南极洲巨大的达菲克侵入体（厚6~7公里，面积大于8000平方公里）和南非的茵西兹瓦杂岩体（表1-1）。这类杂岩的 K_2O 含量比别的富含 K_2O 的拉斑玄武岩类型中高原类型拉斑玄武岩，甚至比此类的侵入岩中的镁铁岩相所含的 K_2O 都高（ $\approx 1\%$ ）。

其它类型：此类包括一些中小型侵入体和碱性岩体，诸如科马提岩和碳酸盐岩杂岩。

3. 与镍的硫化物和铂族元素富集明显有关的主要岩体的岩浆特点

这里要讨论的岩体包括下述地区与镍的硫化物富集有关的母岩，(1) 西澳大利亚的东部金田岩体，(2) 加拿大的阿比梯比带岩体，(3) 曼尼托巴镍矿带，(4) 安加瓦的斯密斯角—威克汉湾岩带，(5) 萨德伯里地区岩体，(6) 科拉半岛的贝辰加地区岩体，(7) 西伯利亚西部的诺里尔斯克岩体及(8) 罗德西亚的上加尼矿山。与铂族元素富集有关的母岩是：(9) 布什维尔杂岩，(10) 斯梯尔沃特杂岩和(11) 阿拉斯加型杂岩。

我们将首先考查两个造山地区的岩体，看看这两个造山区的岩体是不是科马提岩，然后研究与原始岩浆性质有关的分离结晶作用的变化过程。

可能的科马提岩的特点：如上所述，科马提岩岩浆作用的野外标志包括：(1) 在一个火成岩系列中有喷发岩产出；(2) 在此系列中有富含橄榄石的岩石；(3) 鬣刺结构的出现。上述8个地区可能的科马提岩的岩石特征已综合在表1-3中。东金田岩体，阿比梯比带岩体及曼尼托巴镍矿带的岩石(W.V.Peredery, 1975年的个人通讯，已报导过此岩体中两个地点有鬣刺结构的岩石)都具备这三条标志。安加瓦，贝辰加、诺里尔斯克及上加尼等岩体则具有两个标志，而缺少鬣刺结构。因为鬣刺结构并非是绝对需要的一个标志。这样，这些岩石作为科马提岩的可能性仍然是值得考虑的。在布什维尔杂岩体、斯梯尔沃特杂岩体和萨德伯里杂岩体，直接共生的火山岩是不存在的，鬣刺结构同样也是不存在的。尽管在这三个杂岩体中的每个岩体都有超镁铁岩，但所出露的岩相的平均的化学成分仍然不是超镁铁的。这样，我们就把这三个地区的杂岩排除在科马提岩之外了。阿拉斯加型的岩体则达到富含橄榄石岩石的标准，并且，总的超镁铁岩成分，在某些情况下还存在伴生火山岩这个标志(Irvine, 1974)。然而，正如后边将要指出的那样，这些岩体的岩浆很明显是碱性的(临界不饱和状态)，故认为这些岩石不具有科马提岩特性。

表 1-3 识别科马提岩的野外标志

	标 志		
	1	2	3
萨德伯里岩体	0	0	0
布什维尔杂岩体	0	+	0
诺里尔斯克岩体	+	+	0
贝辰加岩体	+	+	0
西澳大利亚岩体	+	+	+
阿比梯比 (Marbridge, Alexo, langmuir)	+	+	+
安加瓦镍矿带	+	+	0
曼尼托巴镍矿带	+	+	+

注：1. 应当是熔岩和浅成侵入体的层序的一部分。

2. 某些有代表性的岩体应当是富含橄榄石成分的。

3. 有鬣刺结构。

+ 一标志充分的。

0 一标志不充分的。

图1-3表示的是上述7个地区(东金田，阿比梯比，曼尼托巴，安加瓦，贝辰加，诺里尔斯及上加尼等岩体)岩石的 Al_2O_3 对 $FeO/(FeO + MgO)$ 的图解关系，而图1-4则表达了 TiO_2 随 MgO 的变化。在后一图上曼罗和雅卡宾迪的科马提岩(以图1-2为例)的范围是用虚线圈定的。对于东金田和阿比梯比岩带来说，图上只表达了与镍矿化有关的岩体，而

没有包括曼罗和雅卡宾迪地区。这些岩体的成分在图1-3上都位于斜线的上方，在图1-4上又落于虚线范围之内，这就确证了这些岩石具有科马提岩特征。已发表的曼尼托巴带汤普逊矿区样品的分析资料是不可靠的。但史梯芬生（1972）指出此岩带的超镁铁岩和镁铁岩的分析数据中，大多数超镁铁岩数据基本上和伴随矿体的超镁铁岩一样，只不过缺少硫化物而已。所分析的这些成分在图1-3上也落在斜线之上，并在图1-4所圈定的范围之内，或是非常靠近，从而更加说明此岩带存在有科马提岩。威尔逊等（1969）对安加瓦含矿岩石进行分析，其数据落于图1-3之斜线的上方，在图1-4上虽然落在所圈出的范围上方，但紧靠着它，在这种情况下，我们还是确信这些成分代表了一种科马提岩系列。维蓼恩（Villjoen）等（1976）对上加尼的超镁铁岩提出了两个平均分析数值，也具有划分科马提岩的充分的化学标志。

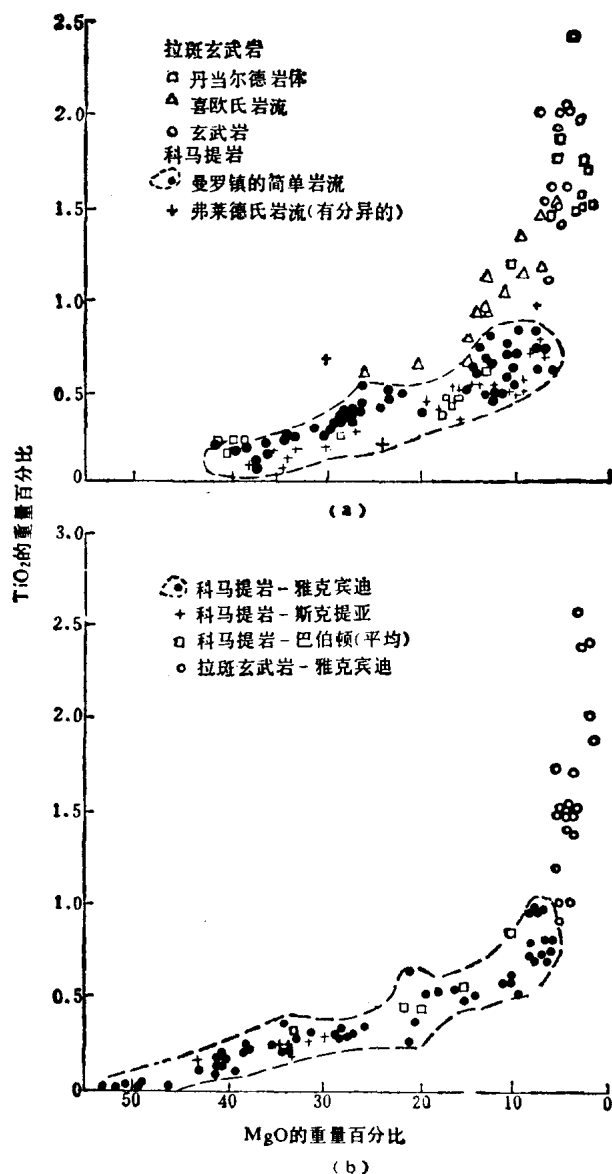


图 1-2 TiO_2 的重量百分比(%)对 MgO 的重量百分比(%)的图象
a—阿比梯比绿岩带的岩石；b—南非及西澳大利亚的某些地区

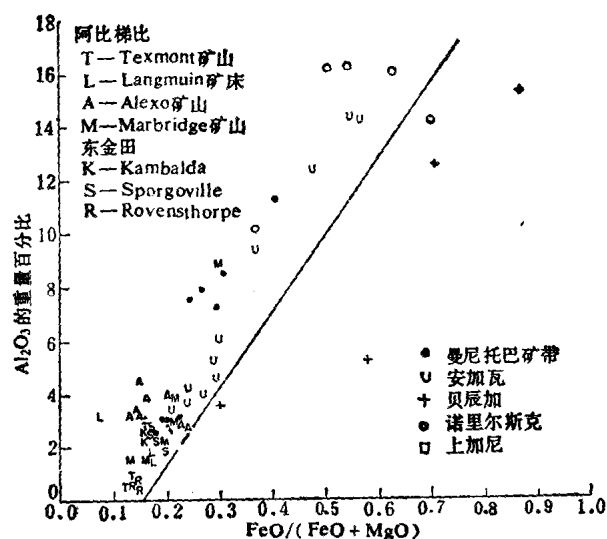


图 1-3 除了图1-1中所标绘的之外，某些镍的硫化物矿体母岩的 Al_2O_3 随 $FeO/(FeO + MgO)$ 的变化图
分析数据的表示方法与图1-1相同

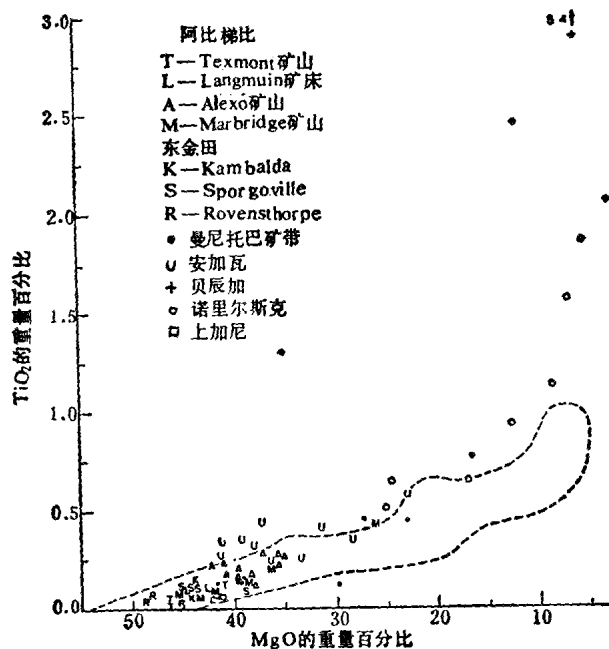


图 1-4 某些镍的硫化物矿体母岩的 TiO_2 的重量百分比(%)对 MgO 的重量百分比(%)图

根据戈尔布诺夫 (1968) 的数据计算了贝辰加的橄榄岩、辉石岩、辉长岩和淡色辉长岩的平均值(表1-2)。这些数值大部分落在图1-3斜线的下边。在图1-4中，这些岩石的 TiO_2 含量表现的特高，说明这些岩体根本不是科马提岩。诺里尔斯克Ⅱ号矿床的岩石平均化学成分(列于表1-2)落在图1-3斜线之上，而在图1-4中则表明其 TiO_2 含量相当高，我们认为也不能把它们看作科马提岩。

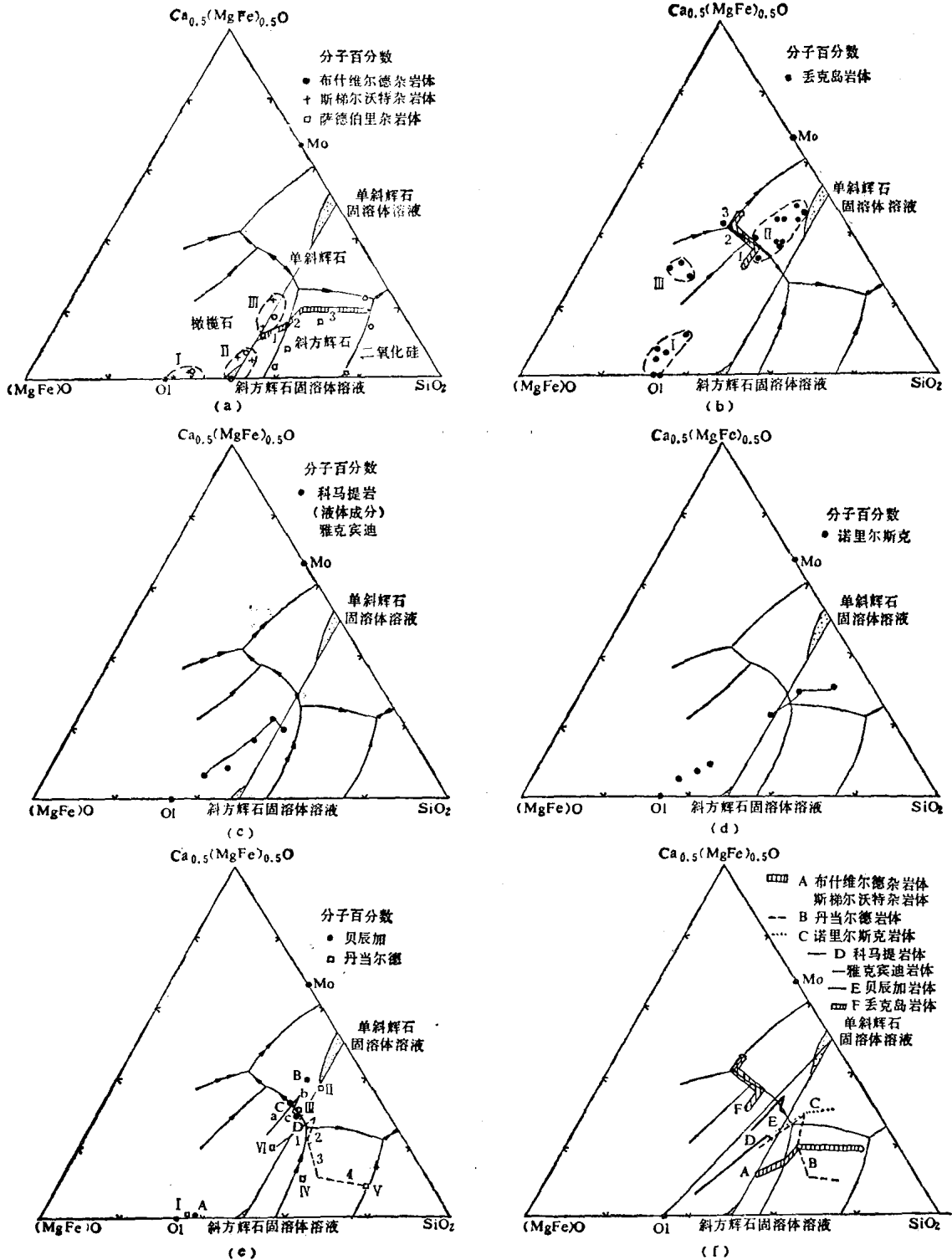


图 1-5 重要的侵入岩地区的超镁铁岩和镁铁岩的 $\text{Ca}_{0.5}(\text{MgFe})_{0.5}\text{O}$ -(MgFe) O - SiO_2 图
 鄂尔文 (1974) 及本作者都讨论了这一化学分析作图方法。相界是近似的，并且是由鄂尔文建立的。由于相界的位置受多种变量的影响例如，总压力、 $P_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 P_{CO_2} 及岩浆成分的化学变化等，所以这些相界并不是在本文所阐述的每一种情况都必定适用。在图 1-5 (a) 上标明 I、II 及 III 的区域，分别代表布什维尔杂岩体和斯梯尔沃特杂岩体的堆积纯橄岩+橄辉岩，古铜辉石岩+苏长岩以及辉石岩的平均成分。沿着 1-2-3 曲线的液体分异现象可以解释堆积岩的序列。同样，在直接引自鄂尔文的图 1-5 (b) 上，沿 1-2-3 曲线的液体分异可以解释丢克岛杂岩体的堆

积的纯橄榄岩和橄榄岩 (I), 辉石岩 (II) 及角闪石岩 (III)。在图 1-5(c) 上的点子代表着雅卡宾迪地区的科马提岩熔岩所计算的连续喷出的液体成分(Naldrett和Turner, 1977)。在图 1-5(d) 上, 沿着1-2曲线液体分异作用可以解释标绘在图上的诺里尔斯克岩体的苦橄岩和辉长岩顺序。在图 1-5(e) 上, 丹当尔德岩床的平均堆积橄榄岩 (I)、单斜辉石岩 (II)、富磁铁矿的辉长岩 (III) 及辉长岩 (IV) 可以用沿 1-2-3-4 曲线的岩浆分异来解释, 并且结束于岩床中的斑状辉长岩 (V)。原始的岩浆成分被认为是和那种开始切割后又具有上覆岩层 (VI) 熔岩夹层的玻璃质的碎屑岩的成分一样。贝辰加地区的平均橄榄岩 (A)、单斜辉石岩 (B) 及辉长岩 (C和D) 可以用沿着 a-b-c 曲线的液体分异现象来解释。在图 1-5(f) 对不同液体的结晶分异途径做了对比。很明显图上的共结线除了丢克岛岩体外 (鄂尔文对它划了最好的线), 对各个火成岩带的曲线都必须有所修正。但是相界的相对的几何形态则大体上是相似的

$\text{Ca}_{0.5}(\text{MgFe})_{0.5}\text{O}-(\text{MgFe})\text{O}-\text{SiO}_2$ 变量: 鄂尔文 (1974) 曾指出, 只要把阳离子标准计算出来, 并把含在磁铁矿、钛铁矿、磷灰石、钙长石、钠长石和正长石中的元素成分扣除, 从落在 $\text{Ca}_{0.5}(\text{MgFe})_{0.5}\text{O}-(\text{MgFe})\text{O}-\text{SiO}_2$ 分子图上的这些岩石来观察堆积岩和非堆积岩是很有用的。实际上此图形是放大的含铁的透辉石-镁橄榄石-硅酸盐系统的翻版。

图1-5(a) 标明了布什维尔德杂岩、斯梯尔沃特杂岩及萨德伯里杂岩的化学分析平均值; 相的关系是鄂尔文确定的; 它们皆作为参考线包括在内了, 并且都不一定十分适合于标在此图上或标在这一序列杂岩的其它图上。主要堆积矿物的顺序列于表1-4。目前, 必须强调, 在每一个侵入体中结晶作用都是复杂的过程, 并且在布什维尔德杂岩和斯梯尔沃特杂岩中都有许多旋回存在, 这可能是由于新注入的岩浆重复的结晶作用所造成的, 或者是由活动着的岩浆周期性对流翻滚所致。

首先, 考虑到布什维尔德杂岩和斯梯尔沃特杂岩在图1-5(a) 上的岩石平均值的图点位置, 联同表1-4所列关于堆积相的情况, 说明了从橄榄岩到古铜辉石岩、苏长岩, 最后到辉长岩的正常的结晶顺序。尽管此图上液体演变的曲线和相位关系的某些变化必然涉及每个侵入体内橄榄石和斜方辉石共同沉淀的现象, 但是这可以沿着曲线 1 (橄榄石), 2 (古铜辉石岩, 苏长岩) 和 3 (辉长岩) 的那一条液体分离曲线的近似情况为代表。虽然纳尔德莱特等 (1970) 已经证明萨德伯里镍矿侵入体中也存在着隐蔽的岩石成分的变化, 并且在此侵入体所露出的各个部位都有相同的堆积相的顺序, 可是萨德伯里岩体的平均成分则没有系统的变化。此种现象是因为萨德伯里矿区的岩石有蚀变情况, 更重要的是混染作用在岩体形成过程中所起的作用。

正如鄂尔文 (1974) 所说, 丢克岛岩体表现出很不同的一种趋向。此岩体的分异作用是由纯橄榄岩和橄榄岩(图1-5(b) I 区)到橄榄石及角闪石辉石岩(II)到角闪石岩, 同时液体成分远离橄榄石, 然后远离 SiO_2 , 沿着图1-5(b) 上的碱性的分异趋向1-2-3曲线进行。

科马提岩分异趋向表示在图1-5(c) 中, 在此图上画出由纳尔德莱特和特纳 (1977) 对雅卡宾迪岩体所估算的液体成分的系列。正如所预料的那样, 标出的原始岩浆成分比其它侵入体更接近于橄榄石的成分。在此图形中所指示出的分异趋向是橄榄石析晶以后接连着橄榄石+单斜辉石的析晶, 这与在岩流中所见到的和列于表1-4中的矿物是一致的。

诺里尔斯克岩体的平均成分 (表1-2) 标在图1-5(d) 中。斯米尔诺夫 (1966) 认为诺里尔斯克侵入体侵位于一个火山的补给通道。该岩体不曾就地分异, 而是岩浆的连续脉动的结果。无论这种解释正确与否, 图1-5指示了这些岩石是分离结晶作用的结果, 这可以简单的表现为橄榄石析晶之后接着是单斜辉石和斜方辉石的晶出。

在图1-5(e) 中, 比较了贝辰加地区含矿侵入体中堆积岩的平均成分与丹当尔德岩床的堆积岩的平均成分, 两个岩床都是造山带早期火山岩的同期产物。关于丹当尔德岩床标绘在图上的平均成分包括橄榄岩 (I)、单斜辉石岩 (II)、磁铁辉长岩 (III)、辉长岩(IV)