

中国地质科学院
天津地质矿产研究所所刊

第 19 号



地质出版社

丁
251.11
362

中 国 地 质 科 学 院

天津地质矿产研究所所刊

第 19 号

地 质 出 版 社

目 录

内蒙古早前寒武纪铁建造的成因矿物学及成矿特征	蒋永年 (1)
内蒙古阴山太古宙高级区变质岩系的地球化学特征	韩 光、孙大中、金文山、吴昌华 (57)
<i>Cyclomedusa</i> 等水母类化石在辽南金县震旦系中的发现及其意义	牛绍武、王敏成、董洪年 (75)
华北地台北缘西段前寒武纪深断裂探讨	胡宝全、朱士谦、白惠兰 (95)
论太古代混合变质杂岩中条纹长石和反条纹长石的成因	金文山 (109)
河北张家口—宣化地区麻粒岩Rb-Sr等时线年龄的研究	高 劭、高 凡 (121)
太行山阜平地区太古宙变质火山岩的地球化学特征	戴凤岩 (129)
江西德兴前震旦系镇桥组浅变质泥砾岩的成因	褚高山、宋福增、张加泉 (143)

中国地质科学院
天津地质矿产研究所所刊

第19号

责任编辑：阎启明、张恩鹏

地质出版社出版发行

(北京西四)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店总店科技发行所经销

开本：787×1092¹/₁₆ 印张：10.5 铜版页：6页 字数：248,000

1988年9月北京第一版 1988年9月北京第一次印刷

印数：1—1,970 国内定价：2.75元

ISBN 7-116-00187-5/P·170

**BULLETIN OF THE TIANJIN INSTITUTE OF GEOLOGY
AND MINERAL RESOURCES, THE CHINESE ACADEMY
OF GEOLOGICAL SCIENCES**

No. 19

CONTENTS

- Genetic Mineralogy and Minerogenetic Characteristics of Early Precambrian
Iron Formation in Nei Mongol Zizhiqu *Jiang Yongnian* (51)
- Geochemical Charcter of Gneiss System for High Grade Area of the Archean
in Yinshan Mountain, Nei Mongol Zizhiqu *Han Guang* et al. (72)
- The Discovery of the Fossil Medusoids (Genera *Cyclomedusa* ETC.,
Cnidaria) From Xingmincun Formation, Sinian System in Jinxian
County, Liaoning Province, China and Its Significance
..... *Niu Shaowu* et al. (87)
- A Study of the Deep Fractures in the Western Part of the North
Margin of North China Platform..... *Hu Baoquan* et al. (106)
- On Origin of Perthite and Antiperthite from Migmatites and Meta-
morphic Rocks of the Archean Complex *Jin Wenshan* (114)
- Study on the Rb-Sr Isochron of Granulites from Zhangjiakou and Xu-
anhua Region, Hebei Province *Gao Mai* and *Gao Fan* (126)
- Geochemical Characteristics of Archean Metavolcanics in the Fuping
Area, Taihang Shan Taihangshan Mountain *Dai Fengyan* (141)
- Origin about the Epimeta-Diamictite of Pre-Sinian Zhenqiao Forma-
tion of Dexing Region, Jiangxi Province..... *Chu Gaoshan* et al. (161)
-

**Edited by Tianjin Institute of Geology and Mineral
Resources, CAGS**

(No. 4, 8th Road, Dazhigu, Tianjin, China)

内蒙古早前寒武纪铁建造的成因

矿物学及成矿特征

GENETIC MINERALOGY AND MINEROGENETIC CHARACTERISTICS OF EARLY PRECAMBRIAN

IRON FORMATION IN NEI MONGGOL

ZIZHIQU

蒋永年^①

内容提要 通过对内蒙古8个早前寒武纪变质铁矿床(点)的主要矿物基本特点和成因信息的研究,辅以岩石化学和稀土元素等方法,探讨了成矿作用的特点。铁质成分来自火山喷发,形成于大洋深水盆地和陆棚环境中。铁矿沉积于火山喷发的间歇期,储量和品位较差。

一、前言

内蒙古早前寒武纪变质铁矿集中分布于包头—白云鄂博铁路两侧,但就已发现的矿床来说,无论在规模和质量上都远不如鞍本、冀东和晋北的同类型铁矿,这可能是地质发展和成矿作用的特殊性所决定的。多年来内蒙古地矿局和一些科研单位曾在此做了大量工作,提高了研究程度。本文系在前人工作的基础上,研究壕赖沟、小壕赖、竹拉沟、公益明、东五分子、头号、黑脑包和三合明等八个铁矿床(点)的主要矿物的基本特征和成因信息,同时辅以岩石化学和稀土元素等方法,探讨成矿作用的特点。其中包括成矿物质的来源、铁矿形成环境、沉积方式和沉积条件、变质作用(包括退变质)和变质相、以及铁矿规模和质量的决定因素,为评价本区铁矿提供依据。

二、地质概况

八个铁矿区的前寒武纪地层主要分布在阴山隆起西南,大致近东西向分布,北倾。从总的层位关系上,自东向西和自南向北有逐渐由老变新的趋势。但是由于多期次的构造叠加,构造十分复杂。因此,它不是简单的单斜层序(图1)。

关于地层划分有多种方案,至今仍没有一致的认识。1984年作者来此主要从事成因矿物学工作,对地层层序只限于一般了解,未做深入研究。现在,为了讨论问题的需要,作者根据短期的粗浅观察并参考前人的工作成果简述如下:

下太古界集宁群(Ar_{1jn}) 于壕赖沟以北,沙湾以南呈东西条带分布。出露岩石有二辉斜长(二长)片麻岩、角闪二长(斜长)片麻岩、紫苏斜长(二长)片麻岩、斜长

^①陈勇华曾参加野外工作。工作中得到内蒙古地矿局刘庆新;天津地矿所王树来、修群业等的大力帮助,我所测试室和辅助室协助测试分析、制片、照相和绘图工作,作者向他们表示感谢。

(二长)二辉麻粒岩、角闪(透辉)斜长石岩、斜长角闪岩、二辉(次透辉)磁铁石英岩等,磁铁石英岩赋存于麻粒岩、片麻岩或斜长角闪岩中。

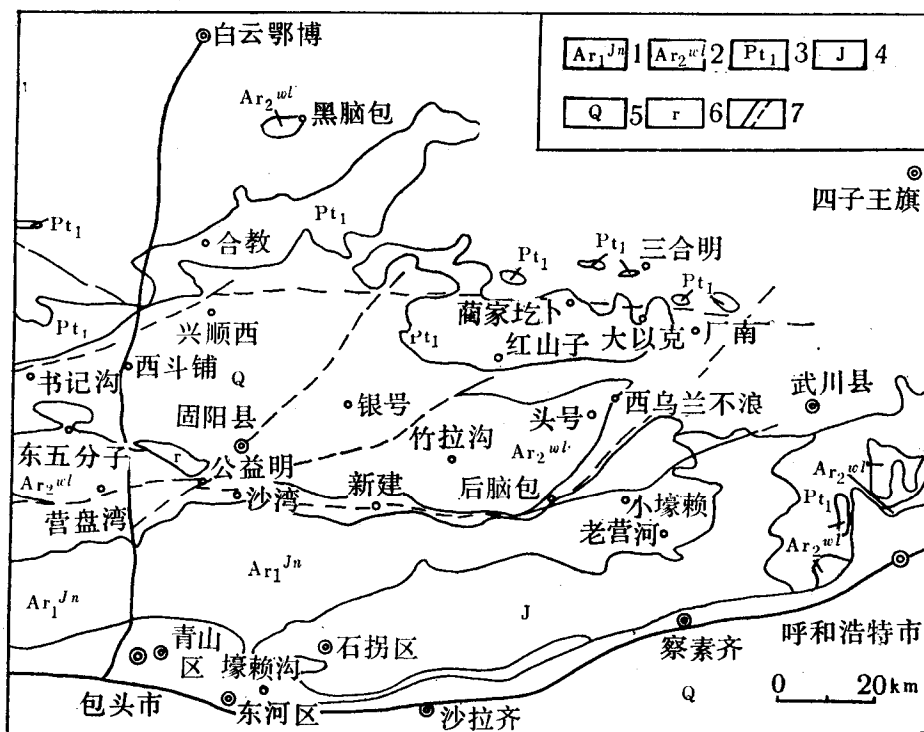


图 1 内蒙古自治区包白线两侧地质略图

(据张履桥, 1982, 略加改动)

Fig. 1 Schematic map of basement structure of region of both sides of Baotou-Bayan Obo railway in Nei Mongol zizhiqu

1-早太古宇集宁群; 2-晚太古宇乌拉山群; 3-早元古宇; 4-中生界侏罗系; 5-新生界第四系; 6-花岗岩; 7-实测和推测断层

上太古界乌拉山群 (Ar_2wl) 分布于东五分子、公益明、竹拉沟一带, 北部也有零星分布(如黑脑包矿区)。出露的岩石主要有(黑云)角闪斜长片麻岩、斜长角闪岩、石榴(斜长)透辉石岩、二长片麻岩、二辉斜长麻粒岩、斜长(镁)铁闪石岩、磁铁石英岩和大理岩等。磁铁石英岩一般赋存在斜长片麻岩、斜长角闪岩、辉斜麻粒岩中。

下元古界(Pt_1) 前人对本区下元古界的认识很不一致, 曾有多种划分方案。这里仅提及三合明铁矿区的岩石组合。

三合明铁矿区出露的岩石以斜长角闪岩和磁铁石英岩为主, 其次为磁铁(镁)铁闪片岩, 石榴黑云片岩。磁铁石英岩产于斜长角闪岩与石榴黑云片岩或(镁)铁闪片岩之间。

三、主要矿物的基本特征

本文的研究范围较广, 包括八个铁矿床(点), 涉及矿物种和亚种共23个。下面分别探

讨它们的基本特征和与之相关的成因信息。

(一) 磁铁矿

磁铁矿是各个铁矿床(点)的主要金属矿物,因其化学成分比较单纯,类质同象元素种类和含量均低,故均可命名为磁铁矿。个别样品(如80A-675)为磁赤铁-磁铁矿,是磁铁矿经受氧化的结果。

表 1 磁铁矿的分析结果
Table 1 Magnetite analyses

序 号 组 样 号 份	1	2	3	4	5*	6	7	8
	84I-8	84I-101	84I-161	80AZ-7	80A-675	80A-801	80A-834	80A-901
SiO ₂	0.14	0.03	0.16	1.50	0.45	0.76	2.18	1.40
TiO ₂	0.09	0.03	0.35	0.03	0.06	0.13	0.12	0.25
Al ₂ O ₃	0.47	0.02	0.00	0.26	0.17	0.43	0.26	0.37
Cr ₂ O ₃	0.02	0.00	0.06	0.002	0.008	0.003	0.002	0.003
V ₂ O ₅	0.03	0.03	0.02	0.005	0.003	0.009	0.005	0.003
Fe ₂ O ₃				67.40	72.74	70.50	68.74	68.14
FeO	93.27	93.01	92.83	30.64	26.99	28.62	29.11	29.77
MnO	0.03	0.03	0.07	0.02	0.02	0.01	0.04	0.02
NiO	0.08	0.00	0.08	0.00	0.001	0.001	0.001	0.001
CoO	0.07	0.00	0.00	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
MgO	0.01	0.02	0.06	0.20	0.08	0.10	0.12	0.01
CaO	0.01	0.02	0.01	0.16	0.04	0.05	0.14	0.12
Na ₂ O	0.04	0.04	0.11	—	—	—	—	—
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	—	—	—	—	—
总 和	94.26	93.23	93.73	100.218	100.563	100.614	100.719	100.178
D	5.1760	5.1854	5.1862					
a_0 (nm)	0.8398	0.8400	0.8396					
Ti	0.0201	0.0074	0.0809	0.0074	0.0146	0.0235	0.0276	0.0571
Al	0.1681	0.0074	0.0000	0.0961	0.0621	0.1541	0.0957	0.1326
Cr	0.0037	0.0000	0.0147	痕	0.0037	痕	痕	痕
V	0.0073	0.0074	0.0037	痕	痕	痕	痕	痕
Fe ³⁺	15.7880	15.9778	15.8786	15.8041	16.6383	16.2192	16.0810	15.9125
Fe ²⁺	7.9342	7.9538	7.8860	7.9834	6.8600	7.3172	7.5674	7.7278
Mn	0.0146	0.0074	0.0184	0.0055	0.0055	0.0018	0.0110	0.0055
Ni	0.0201	0.0000	0.0202	0.0000	痕	痕	痕	痕
Co	0.0219	0.0000	0.0000	痕	痕	痕	痕	痕
Mg	0.0037	0.0092	0.0276	0.0924	0.0365	0.0459	0.0552	0.0461
Ca	0.0037	0.0074	0.0037	0.0536	0.0128	0.0165	0.0460	0.0387
Na	0.0219	0.0222	0.0662					
K	0.0000	0.0000	0.0000					

*磁赤铁-磁铁矿 No. 1-3为中国地质科学院矿床地质研究所王文瑛分析, No. 4-8系翟安民、骆辉的资料。产出岩石: 1—一次透辉磁铁矿石岩(壕赖沟); 2—阳起磁铁矿石岩(竹拉沟); 3—二辉磁铁矿石岩(小壕赖); 4—磁铁矿铁闪石岩(三合明); 5—磁铁矿石岩(黑脑包); 6—黑云磁铁矿石岩(公益明); 7—阳起磁铁矿石岩(东五分子); 8—磁铁矿铁闪石岩(头号)

表 2 矿物的光谱半定量分析
Table 2 Spectral semiquantitative analysis data of selected minerals

样号	矿物名称	Ag	Cu	Be	Ga	Co	Ni	Cr	V	Ti	Mn	Sc	Ba	Sr	Ge	Zn	Zr
84I-1	金云母	0.0000	0.002	0.0001	0.002	0.006	0.01	0.02	0.04	0.6	0.05	0.001	0.04	0.000	0.000	0.002	0.000
84I-15(1)	金云母	0.0000	0.003	<0.0001	0.003	0.005	0.006	0.2	0.06	0.6	0.002	0.000	0.03	0.000	0.000	0.003	0.000
84I-121(1)	黑云母	0.0003	0.001	0.0000	0.002	0.003	0.006	0.04	0.03	0.5	0.04	0.000	0.05	0.000	0.000	0.001	0.000
84I-155(3)	金云母	0.0000	0.003	0.0000	0.000	0.005	0.05	0.8	0.06	0.5	0.003	0.000	0.07	0.000	0.000	0.000	0.000
84I-15(2)	铁铝榴石	0.0000	0.001	0.0000	<0.001	0.004	0.002	0.004	0.002	0.008	0.04	0.000	0.00	0.000	0.001	0.004	0.001
84I-91(1)	铁铝榴石	0.0002	0.004	0.0000	0.001	0.005	0.01	0.02	0.006	0.2	0.4	0.003	0.02	0.001	0.001	0.001	0.003
84I-121(2)	铁铝榴石	<0.0001	0.003	0.0000	<0.001	0.004	0.001	0.004	0.001	0.02	0.6	0.003	0.006	0.001	0.002	0.002	0.003
84I-144	铁铝榴石	0.0000	0.004	0.0000	<0.001	0.007	0.001	0.003	0.007	0.01	0.4	0.000	0.002	0.000	0.000	0.002	0.002
84I-162(4)	铁铝榴石	0.0000	0.005	0.0000	0.001	0.003	0.001	0.02	0.002	0.05	0.5	0.007	0.002	0.000	0.001	0.005	0.004
84I-18(1)	紫苏辉石	0.0000	0.003	0.0000	<0.001	0.01	0.02	0.002	0.002	0.008	0.2	0.000	0.000	0.001	0.001	0.006	0.000
84I-155(1)	古铜辉石	0.0000	0.004	0.0000	0.001	0.005	0.04	0.1	0.008	0.01	0.1	0.000	0.003	0.000	0.000	0.003	0.000
84I-162(1)	铁紫苏辉石	0.0000	0.002	0.0000	<0.001	0.005	0.005	0.002	0.003	0.04	0.3	0.000	0.01	0.000	0.000	0.004	0.000
84I-18(2)	次透辉石	0.0000	0.002	<0.0001	0.000	0.004	0.001	0.008	0.004	0.1	0.006	0.005	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
84I-155(2)	透辉石	0.0000	0.003	0.0001	0.001	0.007	0.04	0.6	0.02	0.1	0.1	0.006	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
84I-162(2)	次透辉石	0.0000	0.002	0.000	<0.001	0.006	0.007	0.006	0.005	0.08	0.2	0.004	0.003	0.000	0.001	0.003	0.000
84I-25	闪石	0.0005	0.004	0.000	<0.001	0.001	0.003	0.002	0.001	0.06	0.05	0.000	0.01	0.001	0.001	0.001	0.000
84I-91(2)	钙铁闪石质普通角闪石	0.0000	0.003	<0.0001	0.003	0.01	0.04	0.06	0.02	0.6	0.03	0.003	0.01	0.001	0.000	0.001	0.000
84I-162(3)	镁绿帘闪石	0.0000	0.004	0.0001	0.001	0.006	0.01	0.01	0.008	0.2	0.1	0.003	0.02	0.005	0.000	0.002	0.000
84I-130	镁铁闪石	0.0000	0.002	0.0000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.01	0.01	0.004	0.006	0.001	0.001	0.001	0.000
84I-8	磁铁矿	<0.0001	0.001	0.0000	<0.001	0.003	0.001	0.000	0.000	0.06	0.002	0.000	0.006	<0.001	0.002	0.003	0.000
84I-101	磁铁矿	0.0003	0.001	0.0000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.001	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000
84I-161	磁铁矿	0.0000	0.001	0.0000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.03	0.001	0.000	0.006	0.000	0.002	0.005	0.000

我所岩矿测试室陈宗礼分析

1. 形态和产状 镜下呈粒状、聚斑状,但也有自形晶,故切片中常见正方形、三角形等切面。磁铁矿晶体中常有石英包体,这反映硅铁胶体沉淀时部分组份混杂的结果。

磁铁矿既是矿层的主要组成矿物,又广泛地分布于围岩中。本文八个磁铁矿均采自矿层——磁铁石英岩中。

2. 化学成分及成因意义

(1) 常量元素 八个磁铁矿的化学分析结果和计算的离子数如表1。 Fe_2O_3 在67.40—72.74%, FeO 在26.99—31.19%。绝大多数的分析数据与理论值(Fe_2O_3 68.97, FeO 31.03%)接近。少数样品偏离理论值(如80A-675),可能与后期氧化有关。据研究,磁铁矿的化学成分比较单纯,乃是成矿物质充分分异的结果,这只有沉积变质作用具备这个条件,故本文磁铁矿属沉积变质成因类型。

(2) 微量元素 磁铁矿中微量元素种类和含量与围岩的关系密切,它反映成矿物质的来源。本区磁铁矿中的微量元素以 TiO_2 , V_2O_5 , Cr_2O_3 , NiO 和 CoO 的含量较多(表2),而这些微量元素是铁矿的围岩——变质基性火山岩(斜长角闪岩、斜辉麻粒岩)的特征组份。这就意味着铁矿与围岩的物质成分同源。

此外,根据前人的研究资料,某些微量元素的比值也可做为成矿物质来源和成因类型的标志。

钛和钒 V在火山沉积铁矿中含量低,而Ti的含量却较高。本区磁铁矿中的 V_2O_5 为0.0131,而 TiO_2 为0.1325, $\text{TiO}_2/\text{V}_2\text{O}_5$ 比值为10.11,接近火山沉积铁矿的比值。

镍与钴 本区磁铁矿中 NiO 和 CoO 分别为0.0205和0.0094, NiO/CoO 比值为2.18,说明形成磁铁矿的物质来源与基性火山活动有关。

(3) 顺便在此提及,前人指出磁铁矿的晶胞参数(a_0)大小随其成因类型而改变。考其实质主要是受成分的控制,即与置换铁的类质同象元素有关,类质同象元素离子多,Fe离子则减少,故磁铁矿的晶胞参数(a_0)与 Fe^{2+} 的含量有关。图2示 a_0 与 Fe^{2+} 为正相关。

从三个磁铁矿的 a_0 值来看,它们都在0.8400nm以下,或接近0.8400nm,这与前寒武纪火山沉积变质铁矿中磁铁矿的 a_0 值低于0.8400nm是一致的。

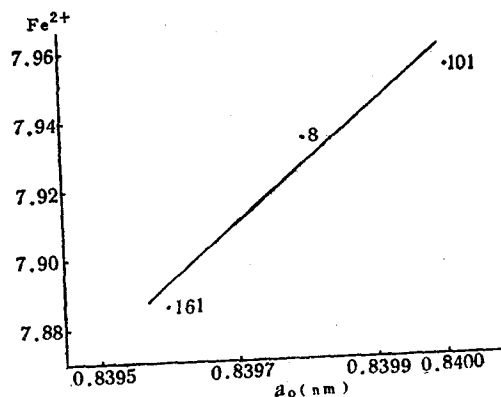


图2 磁铁矿的 Fe^{2+} 与 a_0 的关系图
Fig. 2 Fe^{2+} — a_0 diagram for magnetites

(二) 石榴石

八个石榴石样品分别采自壕赖沟、公益明、头号、小壕赖、黑脑包和三合明矿区不同类型的变质岩中。

1. 形态和物性概述 一般呈自形、半自形粒状,但呈聚斑状的也颇常见。晶体中常有石英、透辉石等包体,分布不均匀。

表 3 铁铝榴石的分析结果
Table 3 Almandine analyses

序 号 组 样 份	1	2	3	4	5	6	7	8
	84I-15	84IZ-42	84IZ-56	84I-84	84I-91	84I-121	84I-131	80AZ-1011
SiO ₂	37.74	36.21	36.79	38.92	38.01	37.16	36.07	38.00
TiO ₂	0.01	0.04	0.07	0.04	0.00	0.05	0.00	0.01
Al ₂ O ₃	21.01	20.43	19.97	19.57	20.91	20.46	20.18	21.54
Cr ₂ O ₃	0.08	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.06	0.10
FeO	27.75	32.15	34.54	33.46	26.20	35.65	37.15	28.79
MnO	0.49	0.95	0.36	0.41	0.86	1.92	1.71	0.60
NiO			0.00		0.00		0.00	
CoO			0.00		0.05		0.01	
MgO	10.24	4.11	2.20	0.96	6.31	2.34	0.74	7.27
CaO	1.42	5.61	6.75	6.78	7.30	1.48	3.48	2.59
Na ₂ O	0.00	0.04	0.17	0.03	0.05	0.06	0.03	0.00
K ₂ O	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
总 和	98.74	99.54	101.05	100.17	99.69	99.12	99.43	98.90
N	1.775				1.780	1.766		
D	4.0209				3.9966	4.2017		4.0575
a_0 (nm)	1.1517				1.1585	1.1540		1.1526
Si	2.9320	2.8903	2.9241	3.1415	2.9621	3.0349	2.9648	2.9897
Al ^{IV}	0.0680	0.1097	0.0759		0.0379		0.0352	0.0103
Al ^{VI}	1.8561	1.8127	1.7955	1.8625	1.8828	1.9699	1.9206	1.9876
Ti	0.0005	0.0024	0.0043	0.0024	0.0000	0.0029	0.0000	0.0005
Cr ³⁺	0.0047	0.0000	0.0029	0.0000	0.0000	0.0000	0.0040	0.0066
Fe ³⁺	0.2060	0.1107	0.3098		0.1626		0.1155	0.0151
Fe ²⁺	1.5968	1.8484	1.9862	2.2588	1.5446	2.4352	2.4379	1.8792
Mn	0.0322	0.0643	0.0244	0.0281	0.0567	0.1330	0.1190	0.0402
Ni								
Co					0.0033		0.0005	
Mg	1.1857	0.4888	0.2608	0.1154	0.7328	0.2846	0.0909	0.8524
Ca	0.1181	0.4796	0.5751	0.5864	0.6097	0.1296	0.3067	0.2184
Na	0.0000	0.0058	0.0258	0.0049	0.0075	0.0098	0.0049	0.0000
K	0.0000	0.0000	0.0153	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
铁铝榴石	54.45	64.01	68.83	80.85	52.39	82.29	82.38	62.85
镁铝榴石	40.43	16.93	9.02	4.13	24.80	9.62	3.07	28.51
锰铝榴石	1.10	2.23	0.84	1.09	1.92	4.49	4.02	1.34
钙铁榴石	1.59	15.60	16.22	0.00	8.25	0.15	5.85	1.09
钙铝榴石	2.43	1.24	5.09	13.93	12.64	3.45	4.67	6.21

注：产出岩石：

1. 混合岩化石榴金云二长片麻岩（壕赖沟）；2. 黑云母化石榴角闪斜长石岩（公益明）；3. 蚀变石榴辉石磁铁矿英岩（公益明）；4. 混合岩化石榴尤莱辉石岩（公益明）；5. 石榴斜长角闪岩（公益明）；6. 石榴黑云斜长片麻岩（黑脑包）；7. 石榴黑云片岩（三合明）；8. 黑云石榴二长片麻岩（壕赖沟）

中国地质科学院矿床地质研究所王文瑛分析，No.10为翟安民、骆辉资料

镜下无色,但常显浅玫瑰色调。均质体,未见光性异常现象。无解理,但裂隙发育。因蚀变的关系,边缘及裂隙绿泥石化。

2. 化学成分特点 八个石榴石的电子探针分析结果和计算的离子数以及五种端员石榴石组成的百分比列于表3中。从表3可见,本区石榴石以铁铝榴石的端员组成占优势,一般在54.45—82.83%,其次为镁铝榴石,锰铝榴石最少。和我国北方其它地区变质铁建造中的石榴石比较,本区有的石榴石中铁铝榴石端员组成偏低,这可能与成矿的物质成分在搬运过程中分异不充分有一定的关系。尽管石榴石的组成中铁铝榴石端员分子未能大量集中,但石榴石中该端员分子仍占优势,故全部石榴石应命名为铁铝榴石。

铁铝榴石的化学成分首先受原岩成分的控制,其中 $\langle \text{FeO} \rangle / \text{MgO}$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{CaO}$ (表4)比值显得格外明显(图3和图4)。毫威伊等^[10](Howie et al., 1957)曾指出,形成铁铝榴石, $\langle \text{FeO} \rangle / \text{MgO}$ 的高比值是非常重要的,其比值不仅比母岩的高,而且也比共生的镁铁硅酸盐矿物的相应比值高。据不完全统计,形成铁铝榴石的岩石,其 $\langle \text{FeO} \rangle / \text{MgO}$ 比不含铁铝榴石的岩石高三倍多,而铁铝榴石的 $\langle \text{FeO} \rangle / \text{MgO}$ 比其主岩约高1.5倍。另外,形成铁铝榴石的岩石还必需具备高的 $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{CaO}$ 比值。德瓦尔德(D. De Waard, 1967)^[6]指出,岩石中的 $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{CaO}$ 比值变化超出角闪石成分的可能变化范围,可以推断矿物组合中存在石榴石或单斜辉石。从表4中可以看出,含有铁铝榴石的岩石中的 $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{CaO}$ 比值,比不含铁铝榴石的岩石中的相应比值高的多。本区铁矿的围岩中具有高的 $\langle \text{FeO} \rangle / \text{MgO}$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{CaO}$ 比值,就有可能出现铁铝榴石,而且越接近矿层的围岩,铁铝榴石的含铁量越高,这说明为什么有人提出把铁铝榴石的出现做为预测矿层的标志。

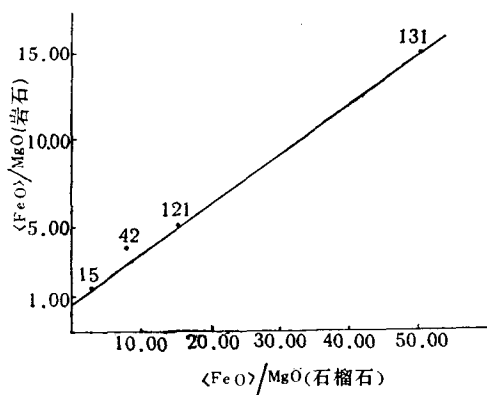


图3 石榴石和主岩的 $\langle \text{FeO} \rangle / \text{MgO}$ 图解
Fig. 3 Distribution of $\langle \text{FeO} \rangle / \text{MgO}$ between garnets and their host rocks

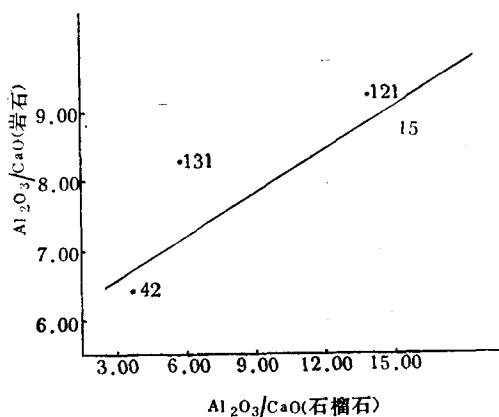


图4 石榴石和主岩的 $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{CaO}$ 图解
Fig. 4 Distribution of $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{CaO}$ between garnets and their host rocks

此外,还应提到与上述铁、铝相关联的钙和碱质。它们可以按比率与铝或与铁、镁进入斜长石或角闪石的组成中。如果岩石中的钙、碱质含量低,那么只能形成较少的斜长石或角闪石。这样,就不足以消耗全部的铝和铁,有利于铁铝榴石晶出。

其次,铁铝榴石的化学成分也受物理化学条件的影响。在具同样或类似化学成分的岩石,当温压条件不同,则形成不同的矿物组合,影响铁、镁分配。这实际上也就是共生矿

表 4 铁铝榴石及其主岩的 $\langle \text{FeO} \rangle / \text{MgO}$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{CaO}$
Table 4 $\langle \text{FeO} \rangle / \text{MgO}$ and $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{CaO}$ Of almandines and their host rocks

样 号	$\langle \text{FeO} \rangle / \text{MgO}$		$\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{CaO}$		样 号	$\langle \text{FeO} \rangle / \text{MgO}$		$\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{CaO}$	
	岩 石	铁铝榴石	岩 石	铁铝榴石		岩 石	铁铝榴石	岩 石	铁铝榴石
84I-15	1.48	2.71	8.72	14.80	84I-18*	1.15		1.17	
84I-84	—	34.85	—	2.89	84I-61*	1.75		3.38	
84I-91	—	4.15	—	2.86	84I-111*	0.93		2.84	
84I-121	5.01	15.24	9.23	13.82	84I-155*	0.60		1.41	
84I-131	15.16	50.20	8.29	5.80	84I-171*	2.43		2.46	
84IZ-42	3.76	7.82	6.42	3.64	平 均	1.37		2.25	
84IZ-56	—	15.70	—	2.96					
80AZ-1011	—	3.96	—	8.32					
平 均	6.35	16.83	8.17	6.89					

$\langle \text{FeO} \rangle$ 全铁——缺岩石化学分析；* 不含铁铝榴石的岩石

表 5 铁铝榴石的 $\text{Ca} + \text{Mn}$, D , N , 和 a_0
Table 5 $\text{Ca} + \text{Mn}$, D , N and a_0
data of almandines

样 号	$\text{Ca} + \text{Mn}$	D	N	a_0 (nm)
84I-15	0.1503	4.0209	1.778	1.1517
84I-91	0.6664	3.9966	1.780	1.1585
84I-121	0.2626	4.2017	1.807	1.1540
80AZ-1011	0.2586	—	—	1.1526

物影响铁铝榴石的化学成分。在高级变质岩中，与铁铝榴石共生的矿物主要是辉石和角闪石，这些矿物分配了铁质，使铁铝榴石的 Fe/Mg 比值降低。在中、低级变质岩中，经常有黑云母与铁铝榴石共生。在这样的共生体中，铁铝榴石易于接受铁质， Fe/Mg 比值增高。以上仅就 Fe/Mg 比值来讨论，实际上形成条件不同，其它组份如 Ti , Mn 等也在发生变化，这里就不一一叙述了。

铁铝榴石的成分变化在不同程度上影响某些物理性质和晶胞参数。这里以 Ca 、 Mn （即钙榴石、锰铝榴石端员分子）为例说明之， $\text{Ca} + \text{Mn}$ 与 D 和 N 为负相关，与 a_0 为正相关（表 5 和图 5）。

3. 铁铝榴石的红外吸收光谱 五个铁铝榴石的红外吸收光谱及波数测定值见表 6 及图 6。全部图谱基本相似，图谱分三个波段。第一波段由四个（个别样品为五个）吸收带组成。1076—1090 cm^{-1} 谱带一般为肩形或较弱的单峰。960—972 cm^{-1} 谱带为尖锐的强单峰，但 84I—15 铁铝榴石因所含镁铝榴石端员分子较多而强度减弱变为开阔，并且波数也比较大。896—904 cm^{-1} 和 872—886 cm^{-1} 谱带是一个强峰分裂的两个吸收峰，为铁铝榴石的特征吸收带。

第二波段只有一个较弱的单峰，波数为 636—642 cm^{-1} ，它与 MnO 为正相关（图 7）。

第三波段为强弱相间的四个吸收带。564—572 cm^{-1} 为最强的峰，526—532 cm^{-1} 为弱峰，个别样品不出现这个峰。476—482 cm^{-1} 和 452—466 cm^{-1} 为较宽的谱带分裂成的比较明显的吸收带，也是铁铝榴石的比较特征的谱带。

4. 成因讨论

(1) 物质来源 半数铁铝榴石含 Cr_2O_3 ，一般在 0.05—0.08%，有的达 0.1%，这与基性，中基性岩石的相应含量近似。另外， Na_2O 的含量除了产于壕赖沟矿区的铁铝榴石

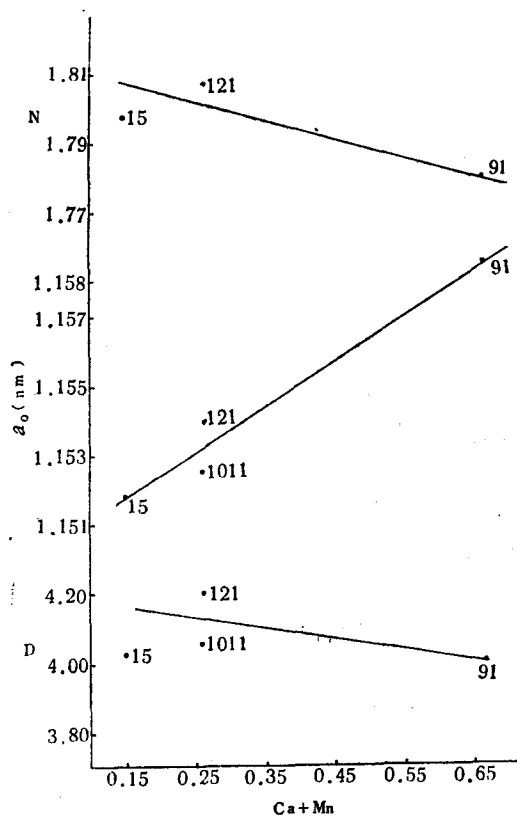


图 5 铁铝榴石的Ca + Mn与D, N和 a_0 的关系
Fig. 5 The relationship of D, N and a_0 to (Ca + Mn) of almandines

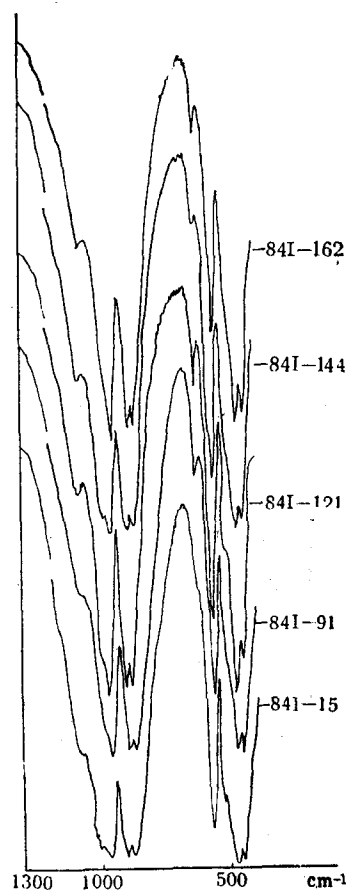


图 6 铁铝榴石的红外光谱
Fig. 6 Infra-red absorption spectra of almandines

表 6 铁铝榴石的红外吸收光谱波数测定值
Table 6 Experimental vibration frequencies (cm^{-1}) of almandines

样 号	吸 收 带										MnO
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
84I-15	1088		972	904	878	642	572	532	478	456	0.49
84I-91	1076		962	896	872	638	566		482	456	0.86
84I-121	1084		964	900	886	636	568	528	478	466	1.92
84I-144	1090		960	900	876	638	568	526	482	468	
84I-162	1088	988	960	896	872	638	564		476	452	

本文中的红外光谱均为我所岩矿测试室张来春分析(后同)

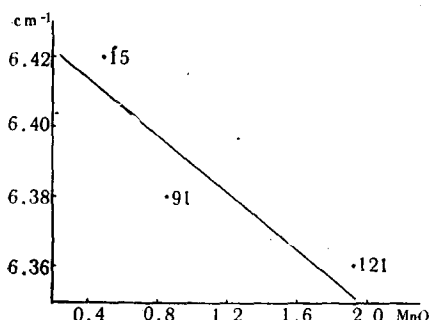


图 7 铁铝榴石红外吸收光谱谱带6与MnO(wt%)的关系

Fig. 7 Relation between band 6 of IR absorption spectra and content of MnO(wt. %) for almandines

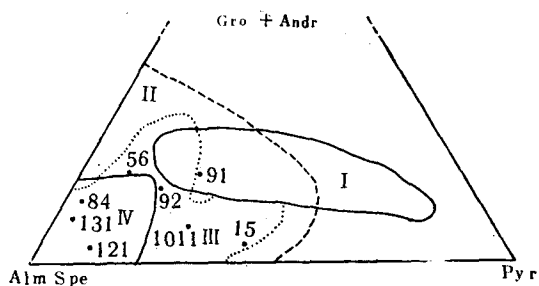


图 8 不同变质相石榴石的成分区间图

(根据 H. B 索波列夫, 1964, 转引自靳是琴、李鸿超, 1984)

Fig. 8 Compositional field of garnets of different metamorphic facies

不含 Na_2O 外, 其它矿区的铁铝榴石, Na_2O 含量远远超过 K_2O , 这说明成矿物质来自中基性-基性海底火山喷发岩。

(2) 铁铝榴石的 TFe 在 26.20—37.15%, 铁铝榴石端员分子在 52.39—82.38%, 变动的幅度较大。铁建造中铁铝榴石的这种成分特点在一定程度上反映形成条件, 诸如产于不同的构造位置、铁矿沉积距火山源远近等等, 因为这与成矿物质运移过程中的物质分异程度及沉积环境有关。三合明、黑脑包矿区铁铝榴石中的铁铝榴石端员分子高达 82% 以上, 其它端员分子含量很少, 这指示: ① 物质在运移过程中高度分异、集中; ② 在比较远离火山源的较深海中沉积。三合明矿区产出的镁铁闪石, 其成分中的铁全部是低价铁 (据穆斯堡尔谱资料), 推测与还原性强的深海环境有一定的关系。黑脑包矿区铁铝榴石中的铁铝榴石端员分子高, 可能与大陆棚深水环境有关。产于壕赖沟的铁铝榴石, 其中铁铝榴石端员分子含量低, 镁铝榴石端员分子等的含量相对较高, 这是在近火山源、物质成分未经充分分异而沉积的结果。产于公益明矿区的铁铝榴石中铁铝榴石端员分子含量变化大, 多数样品的铁铝榴石端员分子含量低 (52.39—68.83%), 但也有高达 80.85% 的。这指示在同一矿区内, 铁铝榴石的形成条件不同。张文耀^① (1979) 曾对公益明矿区铁矿成矿构造环境做了如下的说明: “……下铁矿层是在火山喷发后直接沉积的, 因而工业意义较小, 而上含铁层是在海进层序中沉积的, 具有较大的矿体厚度”。这说明公益明铁矿的铁铝榴石可在不同的环境中形成。只就物质分异来说, 距火山源远近不同, 成矿物质的分异、集中的程度也不一样。

(3) 变质程度的分析

① (Gro + Andr) — (Alm + Spe) — pyr 图解中七个铁铝榴石的投点落在角闪岩相区 (III), 一个铁铝榴石的投点落在靠近角闪岩相的麻粒岩相区 (II), 但与角闪岩相变质程度接近 (图 8)。

② 据张启锐 (1977) 的区分麻粒岩相石榴石和角闪岩相石榴石的判别式, 七个样品的 Y,

① 张文耀, 1979, 关于内蒙鞍山式铁矿成矿规律的探讨

$<Y_2$, 属角闪岩相, 一个样品的 $Y_1 > Y_2$, 属麻粒岩相。所得结果与上述的图解完全一致。

84 I-91 样品选自石榴斜长角闪岩。从矿物的物性、成分来看, 还未发现高级变质的明显标志, 是否高于角闪岩相变质程度还需进一步研究。

(4) 温、压的估测 利用彼尔丘克 (Perchuk, 1969) [11] 相图估测的黑云母 (或金云母)-石榴石的平衡温度见表 7。除了 84 I-131 黑云母-铁铝榴石的平衡温度为 500℃, 属绿帘角闪岩相外, 其余在 660—700℃, 属角闪岩相。

表 7 黑云母 (或金云母)-铁铝榴石的 X_{Mg} 和估测的温度

Table 7 X_{Mg} distribution between biotite (or phlogopite) and almandine and derived temperatures (after L. L. Perchuk, 1966)

样 号	Mg		Fe ²⁺		Fe ³⁺		Mn		X_{Mg}		温 度 (℃)
	云 母	石榴石	云 母	石榴石	云 母	石榴石	云 母	石榴石	云 母	石榴石	
84IZ-42	0.8556	0.4888	1.6496	1.8484		0.2980	0.0129	0.0643	0.34	0.18	700
84I-15	1.8528	1.1857	0.6727	1.5968		0.2060	0.0005	0.0322	0.73	0.39	660
84I-121	0.6602	0.2846	1.3323	2.4352	0.4114		0.0055	0.1330	0.27	0.10	662
84I-131	0.5694	0.0909	1.9018	2.4379		0.1155	0.0062	0.1190	0.23	0.03	500
80AZ-1011	1.4176	0.8524	1.0059	1.8792		0.0151	0.0014	0.0402	0.58	0.31	692

应该在此提及的是, 产于麻粒岩相岩石中的石榴石与金云母 (或黑云母) 平衡温度比二辉石平衡温度低得多, 推测它们受混合岩化作用影响, 也可能是后期动热变质的结果。

压力是按格列鲍维斯基 (Глебовицкий等, 1977, 转引自靳是琴、李鸿超, 1984) [3] 的图解推定的, 约为 600—1200 Мра (表 8)。

表 8 据已知温度和 K 估算的压力

Table 8 The pressure data estimated according to the temperatures and K values known

样 号	Mg		Fe		Mn		X_{Mg}		已知温度 (℃)	lnK	压 力 (MPa)
	云 母	石榴石	云 母	石榴石	云 母	石榴石	云 母	石榴石			
84I-15	1.8528	1.1857	0.6727	1.8028	0.0005	0.0322	0.7335	0.3925	600	-0.625	1100
84IZ-42	0.8556	0.4888	1.6496	2.1464	0.0129	0.0643	0.3398	0.1811	700	-0.629	1120
84I-121	0.6602	0.2846	1.7437	2.4352	0.0055	0.1330	0.2474	0.0998	662	-1.010	620
80AZ-1011	1.4176	0.8524	1.0059	1.8943	0.0014	0.0402	0.5846	0.3059	692	-0.682	1200

(三) 斜 方 辉 石

本文研究的六个斜方辉石均产于基性变质岩中, 与它们共存的矿物有斜长石、单斜辉石、角闪石、黑云母 (或金云母) 和石榴石等。

1. 形态和物性概述 一般呈粒状或不规则的短柱状, 自形晶少见, 仅在蚀变 (斜长) 辉石岩薄片 中见及铁闪石按斜方辉石呈假象所保存的自形晶遗迹 (图版 I-3, II-1)。斜

方辉石与斜长石、单斜辉石等共生矿物的接触界线清楚。薄片中的淡色，显示不同程度的多色性： α 为淡红色， β 为淡黄色， γ 一般为淡绿或淡的灰绿色。平行消光，但也有的切面为斜消光。一级黄、橙干涉色。除了古铜辉石为二轴正光性，其余均为二轴负光性。

2. 化学成分特点 六个斜方辉石的化学成分及计算的离子数见表9，MgO一般偏低，在5.20—26.55%，含量高的只是个别样品；〈FeO〉含量相对较高，在17.00—32.00%；CaO在0.37—0.89%；TiO₂在0.03—0.27%。由此可见，斜方辉石的化学成分以〈FeO〉和MgO为主，且两者互为消长。按100Mg/(Mg+Fe³⁺+Fe²⁺+Mn)比值可划分为古铜辉石、紫苏辉石、铁紫苏辉石和尤莱辉石。由于它们在高温下晶出，形成条件类似，故它们的化学成分主要受主岩化学成分的控制（表10）。图9为三个斜方辉石及其主岩的MgO/〈FeO〉

表 9 斜方辉石的分析结果
Table 9 Orthopyroxene analyses

序 号 矿 样 号 组 份 名 称	1	2	3	4	5	6
	84I-1	84I-18	84I-84	84I-155	84I-162	80A-947
	紫苏辉石	紫苏辉石	尤莱辉石	古铜辉石	铁紫苏辉石	紫苏辉石
SiO ₂	50.86	51.24	46.84	53.60	49.74	49.72
TiO ₂	0.07	0.12	0.06	0.03	0.13	0.27
Al ₂ O ₃	0.88	1.66	0.38	1.90	1.21	1.58
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00	
Fe ₂ O ₃						2.03
FeO	25.39	25.04	46.06	17.00	32.00	24.82
MnO	1.14	0.49	0.14	0.33	1.03	0.54
MgO	19.15	20.79	5.20	26.55	15.03	19.60
CaO	0.58	0.61	0.89	0.37	0.74	0.70
Na ₂ O	0.06	0.02	0.00	0.06	0.02	0.10
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
总 和	98.13	99.97	99.57	100.01	99.90	100.10*

按阳离子或60计算的离子数

Si	1.9669	1.9278	1.9788	1.9378	1.9481	1.9095
Al ^{IV}	0.0331	0.0722	0.0188	0.0622	0.0519	0.0715
Al ^{VI}	0.0069	0.0015	0.0009	0.0186	0.0041	0.0000
Ti	0.0021	0.0034	0.0020	0.0009	0.0038	0.0078
Cr ³⁺	0.0000	0.0000	0.0000	0.0072	0.0000	—
Fe ³⁺	0.0268	0.0651	0.0598	0.0389	0.0416	0.0586
Fe ²⁺	0.7944	0.7228	1.5677	0.4751	1.0066	0.7971
Mn	0.0374	0.0156	0.0051	0.0102	0.0341	0.0175
Mg	1.1038	1.1657	0.3275	1.4305	0.8773	1.1218
Ca	0.0239	0.0246	0.0404	0.0143	0.0311	0.0288
Na	0.0046	0.0014	0.0000	0.0043	0.0014	0.0074
K	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0023

注：产出岩石：

1. 辉斜麻粒岩（壕赖沟）2. 辉斜麻粒岩（壕赖沟）3. 混合岩化石榴尤莱辉石岩（公益明）4. 黑云斜长二辉麻粒岩（头号）5. 石榴角闪斜辉麻粒岩（小壕赖沟）6. 角闪二辉斜长麻粒岩（壕赖沟）*含P₂O₅0.01和H₂O*0.68
N0.1—5中国地质科学院矿床地质研究所王文瑛分析，N0.6我所岩矿测试室分析（翟安民、骆辉的资料）

表 10 斜方辉石及其主岩的MgO,Fe₂O₃,FeO含量及MgO/〈FeO〉
Table 10 Contents of MgO, Fe₂O₃, FeO and MgO/〈FeO〉 ratios of
orthopyroxenes and their host rocks

样 号	MgO		Fe ₂ O ₃		FeO		(FeO)		MgO/〈FeO〉	
	岩 石	斜方辉石	岩 石	斜方辉石	岩 石	斜方辉石	岩 石	斜方辉石	岩 石	斜方辉石
84I-18	9.21	20.79	1.17		9.51		10.56	25.04	0.87	0.83
84I-155	17.34	26.55	1.08		9.47		10.39	17.00	1.67	1.56
84I-162	7.13	15.03	3.46		12.02		15.13	32.00	0.47	0.47

图 9 斜方辉石和主岩的MgO/〈FeO〉图解
Fig. 9 Distribution of MgO/〈FeO〉 between
orthopyroxenes and their host rocks

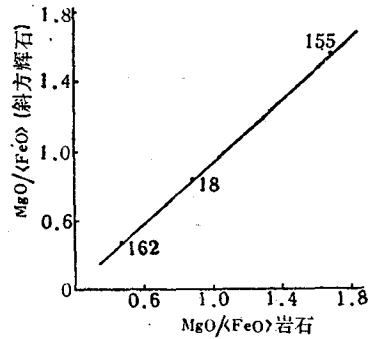


表 11 岩石的化学分析
Table 11 Chemical analyses of selected rocks

序 号 样 号 岩 石 名 称 组 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	84I-15 混合岩化 石榴金云 石斜长片 麻岩	84I-18 二辉斜 长麻粒 岩	84I-61 混合岩化 角闪斜长 片麻岩	84I-111 黑云斜长 次透辉石 岩	84I-121 石榴黑云 斜长片麻 岩	84I-131 石榴黑 云片岩	84I-155 黑云斜长 二辉麻粒 岩	84I-162 石榴角闪 斜长二辉 麻粒岩	84I-171 黑云角闪 斜长石岩	84I-42 黑云母化 石榴角闪 斜长石岩
SiO ₂	67.64	50.12	60.20	52.94	52.14	38.34	52.40	45.90	46.20	54.69
TiO ₂	0.38	0.74	0.52	0.77	1.33	0.24	0.54	0.81	1.55	0.76
Al ₂ O ₃	15.17	14.37	14.58	15.01	16.98	6.47	9.06	14.66	18.50	18.67
Cr ₂ O ₃	0.03	0.04	0.07	0.08	0.03	0.01	0.19	0.03	0.03	0.04
V ₂ O ₅	0.05	0.06	0.08	0.05	0.08	0.05	0.07	0.05	0.05	0.06
Fe ₂ O ₃	0.69	1.17	2.00	2.48	3.12	30.93	1.08	3.46	6.78	4.91
FeO	4.19	9.51	5.75	5.10	12.48	11.59	9.42	12.02	6.01	5.35
MnO	0.06	0.27	0.10	0.11	0.15	0.30	0.16	0.40	0.09	0.12
MgO	2.83	9.21	4.32	7.89	3.05	2.60	17.34	7.31	4.99	2.60
CaO	1.74	12.33	4.32	5.28	1.84	0.78	6.42	11.76	7.51	2.91
Na ₂ O	2.91	1.91	2.67	3.97	2.79	0.19	1.78	2.16	4.17	4.75
K ₂ O	4.04	0.24	3.80	4.66	3.68	2.21	1.11	0.51	1.37	3.26
P ₂ O ₅	0.09	0.05	0.18	0.52	0.04	0.14	0.19	0.05	0.62	0.16
CO ₂	0.06	0.05	0.12	0.09	0.05	0.05	0.04	0.09	0.04	0.10
H ₂ O ⁺	0.27	0.32	1.61	1.01	1.76	6.20	0.30	0.96	1.50	2.10
总 和	100.15	100.39	100.32	99.96	99.52	100.10	100.10	99.99	99.41	100.48