

56.72
122

火成岩及矿物中 的稀有元素

V. M. 戈尔德施密特等著

丁 迈 译

地质出版社

РЕДКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ
В ИЗВЕРЖЕННЫХ ГОРНЫХ ПОРОДАХ
И МИНЕРАЛАХ
СБОРНИК СТАТЕЙ
ИЗДАТЕЛЬСТВО
ИНОСТРАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА—1952

本書系根据英文原版譯出，后根据俄譯本作了修改。

本書系一論文集，由B. B. 謝尔比納主編。在这本論文集中收集了根据光譜分析， α 射綫化学、螢光及化学分析研究而获得的极大量的有价值的資料。

在論文集中所发表的資料，对于研究金屬矿床的地球化学家、矿物学家和地質学家无疑是有好处的。

火成岩及矿物中的稀有元素

著 者 V. M. 戈尔德施密特等
譯 者 丁 迈
出 版 者 地 質 出 版 社

北京西四羊市大街地質部內

北京市書刊出版業營業登記證出字第050号

发 行 者 新 華 書 店
印 刷 者 地 質 出 版 社 印 刷 厂

印数(京) 1—53000 1959年12月北京第1版
开本787×1092 1/32 1959年12月第1次印刷
字数410 000 印张19 1/8 插頁4
定价(10) 2.55元

目 录

序 言

I. 一般性工作

次要元素分布的地球化学原理 V.M. 戈尔德施密特	14
宇宙频率及宇宙演化	14
地球的星体演化, 原生分异	14
硅酸盐岩浆的结晶分异和离子半径	15
火成岩矿物中的同形代替	16
风化及沉积物的旋迴, 离子电势	18
氧化与还原	19
文 献	19
微跡元素在地球化学研究中的意义 H. 哈柏兰特	21
文献	35

II. 矿物中的稀有元素

南非矿物与岩石中某些稀有元素的地球化学研究 L.H. 阿爾斯, W.R. 李本堡	41
云母及长石中的鋰	41
緒 論	41
分析結果	42
对結果的討論	44
影响鋰离子进入云母晶格的因素	44
鋰在晚期云母結晶中的富集	44
白云母与含鋰云母的可混性	47
結 論	47
文 献	47
南非矿物与岩石中稀有元素的地球化学研究 L.H. 阿爾斯	49
岩浆成因的矿物中鉍与鉀的地球化学关系	49

02283

摘 要	49
緒 論	49
一价鉈与鉈的性質	50
基本化学性質	50
离子半徑与类質同形	51
放射性	51
矿物的研究	52
分析方法	52
設 备	52
分析綫的选择	53
激发方法	53
人工标准的配制	54
标准曲綫	54
分析的精确度	56
Fe 4202.03影响的校准	57
分析結果	58
一般的 Rb_2O/Tl_2O 比值	58
各別地区的 Rb_2O/Tl_2O 比值	64
Rb_2O/Tl_2O 比值的不变性在成因問題上可能的应用	68
在不同类型矿物中鉈与鉈的分布	68
結 論	71
文 献	71

根据光譜方法測出的云母中的錫与鉍 L.H. 阿崙斯, W.R. 李本堡 73

摘 要	73
緒 論	73
分析步驟	73
分析結果	75
討 論	77
文 献	78

釷及其它次要元素在石榴石組內的作用 H.W. 賈菲 80

摘 要	80
緒 論	80
分析数据	80
石榴石組份与产狀上的关系	87
石榴石中微跡与次要的成分	89

与偉晶岩和花崗岩石榴石共生的第Ⅰ組副元素·····	89
釷对錳的代替·····	93
与片岩中石榴石共生的第Ⅱ組副元素·····	96
与接触碳酸鹽石榴石共生的第Ⅲ組副元素·····	98
結 論·····	98
文 献·····	99

Ⅲ. 在火成岩及其它岩石中的稀有元素

科罗拉多詹姆斯頓地区火成岩中微量元素分布的光譜研究 J.M.布 瑞·····	101
--	-----

摘 要·····	101
定性分析·····	101
定量分析·····	101
緒 論·····	102
研究的目的与任务·····	102
区域地質·····	102
一般性叙述·····	102
前寒武紀岩石·····	103
第三紀岩石·····	104
样品的选择·····	105
破碎与分离·····	105
自斜長石中分出鉀長石·····	105
加入內标·····	105
分析方法·····	106
一般叙述·····	106
操作技术·····	106
定性分析·····	107
定量分析·····	107
內 标·····	110
标准混合物·····	110
标准濃度曲綫·····	111
可能的誤差·····	111
硅酸鹽中次要元素的分布·····	112
硅酸鹽的构造·····	112
硅酸鹽中次要元素的形式·····	113
岩石样品定性分析的結果·····	114
一般性叙述·····	114
次要元素在岩石中的分布·····	14

所得結果的意义.....	118
矿物样品的定性分析結果.....	119
一般性叙述.....	119
次要元素在各种矿物中的分布.....	119
在單一矿物中次要元素含量的差別.....	120
定性工作的总结.....	122
岩 石.....	122
矿 物.....	126
矿物的定量分析.....	126
一般性叙述.....	126
在各矿物种中次要元素的分布.....	126
鉀長石.....	127
斜長石及基質.....	130
白云母.....	132
黑云母.....	133
石 英.....	135
結 論.....	136
文 献.....	138
在科罗拉多弗朗特山第三紀脉岩中次要化学元素的分布 J.M. 布 瑞.....	142
摘 要.....	142
緒 論.....	142
地質及岩石.....	143
分析方法.....	145
定性分析.....	146
岩 石.....	146
矿 物.....	148
定量分析.....	151
摘要及結論.....	154
文 献.....	154
格陵兰斯卡尔葛德侵入体的岩石中微跡元素分布的初步观察	
L.R. 瓦格, R.L. 密契尔	156
緒 論.....	156
分析方法以及其結果.....	157
斯卡尔葛德原始岩漿成分.....	157
在分異作用中微跡元素的成分和含量的变化.....	161
微跡元素的变化与离子半徑及电荷的关系.....	163
結 論.....	167

文 献	167
某些美国火成岩中的稀有金属 E.B.山德尔, S.S. 哥地施	169
摘 要	169
緒 論	169
分析方法	170
綫 图	171
結果的叙述	171
密西根	171
前 言	171
討 論	172
明尼苏达	177
前 言	177
討 論	177
密苏里	180
前 言	180
討 論	180
中德克西斯	180
前 言	180
討 論	181
加利福尼亚	182
前 言	182
討 論	182
新英格蘭	183
前 言	183
討 論	183
从地球化学观点对結果的分析	185
一般性叙述	185
关于各元素的討論	185
鉬	185
鈹	186
鉛	187
鋅	187
錫	190
銅	191
鎳	191
鈷	194
地壳中次要元素的富度	195

地質方面的应用.....	197
火成岩的种类及矿化.....	197
对数据的討論.....	198
金屬的分布.....	198
岩漿作用.....	202
結 論.....	203
文 献.....	205
芬屬南拉帕兰岩石中的微跡元素 T.G. 塞哈瑪	207
緒 論.....	207
地質概述.....	210
本区的地理与地質位置.....	210
岩层的划分.....	211
通薩 - 薩伏科斯基岩系.....	212
片麻花崗岩与花崗片麻岩.....	212
西拉帕兰的硅綫石片麻岩.....	213
拉彭系石英岩及片岩.....	214
拉彭系基性火山岩.....	214
拉彭系碧玉石英岩.....	214
孔普 - 奥兰尼米系.....	215
碳酸盐岩石.....	216
粒变岩系.....	216
赫塔花崗岩与新花崗岩.....	216
西拉帕兰的正長岩系列.....	216
輝長岩与粗玄岩.....	217
深成的超基性岩.....	217
某些南拉帕兰岩石的平均化学成分.....	217
分析的样品.....	218
光譜分析方法.....	220
分析成果表.....	222
根据南芬屬拉帕兰的觀察所获得的分散元素一般地球化学概況.....	233
鈦.....	233
鉛.....	237
錳.....	238
鋁与鋇.....	239
稀土元素.....	242
鎂.....	244
鉍.....	245

硼.....	245
铷与铯.....	255
锂.....	256
铈.....	257
钒.....	260
镍与钴.....	261
铅.....	262
锆.....	262
关于外属南拉帕兰岩石中附生元素成分的总结.....	263
文 献.....	264
某些加里东深成岩的地球化学：关于火成岩及其矿物中	
主要元素与微迹元素之间关系的研究 S.R. 諾克拉德, R.L. 密契尔	266
緒 論.....	266
岩石中的微迹元素.....	270
在个别岩石的矿物中微迹元素的分布.....	280
矿物系列.....	297
摘要及結論.....	324
附 录.....	325
文 献.....	326
新英格兰花岗岩与伟晶岩的光谱分析 J.A. 夏米尔.....	329
摘 要.....	329
緒 論.....	329
分析方法.....	330
定性結果.....	331
一般性叙述.....	331
区域关系.....	334
花岗岩与伟晶岩的关系.....	336
其它各种关系.....	338
定量分析結果.....	338
标本的描述.....	338
文 献.....	341
钨在火成岩中的富度 E.B. 山德爾	342
分析方法.....	342
样 品.....	343
討 論.....	344

文 献.....	345
火成岩中铈的含量 E.B. 山德尔	346
提 要.....	346
緒 論.....	346
分析方法.....	346
結果的討論.....	348
文 献.....	351

序 言

稀有元素地球化学的問題长期以来引起学者們的重視。曾用各种不同的方法，不同的規模，不同的观点以及为了各种不同的目的来解决这些問題。在这些問題中理論的一面与实用的一面是密切相連系的。

許多稀有元素的有价值的工艺特征及特殊的应用領域促进了对于它們在岩石与矿物中的散布(распространение)与分布(распределение)的研究，它們与其它元素共生关系的探討以及达到工业品位的濃集条件的确立。

从实用性的研究工作中产生了大量富有理論性意义的成果，反之亦然。为了解决实际問題，必須去闡明稀有元素散布、分布与濃集的問題，并往往必須研究那些似乎是純理論性的关于結晶化学特征，稀有元素原子的电子結構等方面的問題。

稀有元素的概念到現在为止是有条件的并且是不肯定的，那些在地壳中分布較少的元素之中，何者被称为稀有元素是由地質專門研究与普查勘探工作水平、技术現狀、經濟条件及利用程度所决定。有不少元素过去認為是稀有的，現在已被認為是普通的。稀有元素的概念在很大程度上取决于它們不能够或者极难形成独立的矿物与矿床这一点上。例如钽、錫及砷在地壳中的散布是类似的，并具有互相接近的克拉克值，但钽几乎不形成独立的矿物与矿床，它分散在其它矿物的晶架之中，因此我們認為它极稀有。据知錫能够生成够工业品位的矿床，因而看起来它似乎比钽散布更廣。砷能够濃集，并成为許多矿床的矿石組份，因而决不認為它是稀有的。

对于稀有元素与普通元素之間比較客觀的分类法是根据它們在地壳中的平均含量，含量較低，例如低于0.01%（重量）者属稀有元素。但这样一来由于逐漸积成的概念而已划入为稀有元素的鋇及釷就不能算作是稀有的，反之在稀有元素組內却划入了鈷、鉛、鉻、錫、砷以及銀与金；这些都不應認為是稀有的。

与“稀有元素”概念一起，还产生了另一些多少相近似的概念：少量的(малые)次要的(второстепенные)，分散的(рассеянные)元素。“少量的”这一概念（在英文文献中相当于“minor”〔次要〕）比“稀有的”概念更不肯定。在我国地質文献中，它仅用来表示矿石組份的一些金属，它們在散布上介乎普通金属与稀有金属之間。而在外国文献中，特别是在本論文集的某些論文之中还探討在岩石与矿物中的少量元素。在此情况下他們所用的“minor”这一术语最好譯成“второстепенный”（次要），在譯文中已这样作了。

除此之外，某些英美作者使用了“trace element”（微跡元素）这一术语，如果

这些元素仅以光谱微迹量存在。在我国没有恰相对应的术语，在翻译时可将其译成“稀有的”或“分散的”，但“分散的”这一术语的意义仅指该元素在岩石与矿物中含量极低，而非该元素在矿物晶架中处于分散状态。这种译法使元素的分散性的概念失去了严格的地球化学意义，因而读者在阅读本论文集集中的某些论文中必须注意此点^①。

如果过去不久在稀有元素领域内的研究工作限于对它们在岩石中的含量进行完全测定，则近年来已观察到一种对问题作更深入研究的趋势，不但研究稀有元素在岩石中的分布，而且也研究它们在矿物中的分布以及提供这些分布之间的平衡关系，这一新的趋势决定了本论文集（专为探讨岩石中稀有元素的地球化学而编辑的）中主要部分的内容。本论文集因而分为三部分：（一）一般性工作，（二）在矿物中的稀有元素，（三）在矿物与岩石中的稀有元素。

在这些论文中累积了根据光谱、X射线化学、荧光及化学分析研究而获得的极大量的有价值的资料。

但遗憾的是在许多论文中对这些资料几乎未进行分析，作者未从其中得出深刻的结论与理论上的总结，这些都是可以而且应当作出的。往往对于地球化学现象的实质未进行深刻的探讨，以便奠定元素分布规律的基础，而将工作局限于一些只能得到一些数据与形式统计的评价的研究工作上。

也可以从作者们试图只从戈尔德施密特的离子半径大小出发来解决一切问题的趋势上看到这种形式主义的态度。如果在1922—1926以及其后的年代中离子半径大小的概念以及由此一概念所决定的结晶物质结构的规律，类质同形规律等等起了推进的作用，则在今日如果仅用这一观点来对现象作解释已显得有些保守了，因而在论文集集中有些地方编者加了一定的附注。特别是仅从离子半径大小与价数出发并不能解决所有结晶化学的问题，必须还要考虑到极化现象与键的特征。例如正是键的特征，而不是类质同形解释了这类化合物如 NaNO_3 及 CaCO_3 ， KCl 及 PbS 等的同构性（изоструктурность）。

对于戈尔德施密特在论文集的第一篇论文中所扼要叙述的地球的地球化学发展史的一般性假说，也要给以一定的批判。戈尔德施密特认为我们的行星起源于炽热的气态物质。现在这一概念以及与之有关的地球原生分层过程的假说都应认为是极其有条件性的。在苏联学者史密特院士的宇宙进化论中认为我们的行星是由固态的冷的宇宙物质所形成的。

外国作者对于苏联科学以及苏联学者（特别是维尔纳茨基院士）所起的作用的低估应该严厉批评。维尔纳茨基在1908—1916年大大地超过了外国的学者，首先发

^①在中译本中不发生这类问题，因已有与“Trace element”相对应的术语“微迹元素”。为使读者了解俄文文献与英美文献一些术语概念上的出入，故将此二段译出，未加删去——中译本译者注。

表了关于稀有元素地球化学的著作，尽管在他的著名的著作发表之后已经出版了大量的著作，但他的著作至今尚未失去意义。

因而編者在附注之中注出了相应的苏联学者的重要著作。

在論文中所发表的資料对于研究金属矿床的苏联的地球化学家、矿物学家、地質学家无疑地是有好处的。那些从事研究内生金属矿床与侵入体之間关系的学者对論文集內的材料应该特別感到兴趣，因为有关各种岩石內稀有元素含量的比較数据可以作为地質研究工作中有价值的补充材料。但必須再一次指明，要想廣泛，全面而且客觀的闡明稀有元素的地球化学散布問題，还需要对于事实进行比本論文集作者所作的更深入一步的分析。

B. 謝尔比納

1. 一般性工作

次要元素分布的地球化学原理^①

V.M. 戈尔德施密特

宇宙频率及宇宙演化

各种不同化学元素，其中包括次要元素，它们的分布与存在总的来说主要受地球在地質及前地質时代的化学演化所控制。

我們可以从討論宇宙中物質的平均化学成分开始，这是由对星体大气，星云物質，星际間的分散物質，行星大气的天文学研究以及由隕石化学組份的資料中透露出来的。化学元素的宇宙富度或者宁可說是不同类型原子核的宇宙富度显然是受核的稳定性以及核演化的一般規律所控制。就現在所知，最富的核子是那种最簡單的質量為1，帶1單位电荷的質子——氢原子的核。在星体內部質子蛻变为質量4，电荷2的氦核，这个作用形成星体能量的主要来源。各不同原子核的稳定度似乎主要是与它們的質量数（重量）有关，具有双質量数的比具有單質量数的更常見，具有4的倍数的質量的核子占优势直到質量数达60。質量数超过60的核子一般很稀有。核子的原生的宇宙富度又被某些后来的演化过程或宁可称之为衰变过程所修改，特别是被在星际条件下某些輕核子（包括鋰、鈹、硼）在碰撞时的不稳定性，放射性核子的衰变，可能还有核裂变过程等所修改。

地球的星体演化；原生分異

在地球化学演化进行中，有重要的物理及化学的分凝与富集过程控制着物質发展史，这些过程不依靠核子的性質而是决定于不同元素的电子壳的性質。

在地球的第一个前地質演化中，原始的气态物質无疑地会分異成某种凝集相（可能是液体）以及一个殘余气态相（原生大气）。

^①V.M. Goldschmidt, The geochemical background of Minor Element Distribution "Soil Science", 60, No. 1 (1945).

这个原生大气中含有大多数挥发性的亲气元素，如氢、氮、惰性气体以及水蒸气、碳的挥发性化合物等等。凝集相与隕石相同，包括一硅酸鹽渣，它后来成为地球的石質硅酸岩外壳。无疑的亦有一主要由金属鉄組成的相，可能还有一主要由硫化鉄組成的相。我們不能肯定的知悉在何种程度上目前的水圈与气圈是我們原生大气的直接分異物，但很可能由于最初的高溫，絕大部分的原生大气都分散入宇宙空間而損失，而很多气态物質系由后来岩石圈的脫气作用所供給。最重要的大气演化过程是与生物化学过程有关，但仍能看到原生大气的某些化学面貌保留在大洋水的化学組份中，亦即氯、溴、碘、硼及硫的化合物的大量存在，与岩石圈中这些元素的不足形成对照。

在地球的原生分異阶段，各种元素的分布主要由它們与氧及硫的化学亲合力以及它們的蒸发潛热所控制，特別可与鉄的相应的亲合力作比較，因鉄是天体物質中最普通的重金属。

可取阳性元素最低級氧化物被每克原子氧所氧化的自由能作为这类亲合力的适宜的量度，并取相应的数据作为它們与硫的亲合力的量度。如果我們把这些热力学的数据算到标准状态^①，則它們本身就可以看出形成凝集金属相的难易程度的比較。

元素具有比鉄高的氧化自由能（对最低氧化物而言）——亲石元素，在原生分異中可望富集于硅酸岩壳（岩石圈）之中。这些元素有硅、鋁、碱及碱土金属。另一方面趋向于聚集在金属鉄相內的元素例如鎳、鈷、鉑金属及金，这些是亲鉄元素，可用少数数据來說明这些关系：

从标准状态的氧化自由能用每克原子氧的仟克——卡数（ $-\Delta F^\circ$ ）表示；CaO 144.3， Al_2O_3 131.6， SiO_2 96.0，MnO 91.2， Na_2O 91.0，FeO 59.4，CaO 51.2，NiO 48.2，鉑金属 5 到 20。

根据从标准状态形成硫化物的自由能划分出一些元素，与含氧鹽（如碳酸鹽）的形成作比較后按其在一一般条件下的在岩石圈中形成硫化物矿石的亲合力順序排列如下，这些元素称为亲銅元素：

$Ag > Cu > Pb > Cd > Zn > Co > Fe > Ca > Mn$ ^②。

根据热力学数据我們可以了解化学元素在它們的原子与离子的电子壳特性的控制下的原生分离的主要趋势。

硅酸鹽岩漿的結晶分异和离子半徑

地球化学演化的下一主要步驟是与地球后来的冷却以及硅酸鹽渣或地球的岩石

①标准状态系指以单体元素形式存在而言，以与化合状态相区别。

② $Ag > Cu > Pb > Cd > Zn > Co > Fe > Ca > Mn$ 的順序至今没有什么修改。

圈的結晶，其中包括硅酸岩漿的結晶分異相關聯的。這種類型的过程仍在進行中，從現在的深成的和火山的岩漿中形成岩石。

結晶过程中包括一種對各種原子或離子的挑選作用，這種挑選是按照它們的大小，根據它們進入從岩漿溶液中析出的不同礦物的晶格或空間網的能力而定。這些礦物主要是由帶負電的硅酸鹽及硅鋁酸鹽絡陰離子組成，有時也含氟化物或氫氧化物離子，這些陰離子被帶正電的各種金屬的陽離子所中和及接合。岩漿岩中的主要及次要元素在這種方式下在各種礦物中各有其位置，元素的挑選主要是按照離子的大小，這可用埃的單位來計量，每埃相當於 $1 \text{ 厘米} \times 10^{-8}$ 。在結晶構造中各種離子或原子的大小可用 X 射綫干涉法精確的量出，一般用各種結晶構造條件下的一套半徑數值來表示，對離子半徑使用氯化鈉晶格型的標準條件，對原子半徑使用金屬構造的緊密排列（12 配位），可參閱戈爾德施密特及鮑林所發表的離子半徑表。

火成岩礦物中的同形代替

岩漿礦物中大規模同形代替的可能性一般只限于那些半徑相差小於 10—15% 的元素偶。例如鎂（ $0.78 \text{ \AA}$ ）及二價鐵（ $0.83 \text{ \AA}$ ）在離子晶体中可任意互相代替，但鎂與鈣（ $1.06 \text{ \AA}$ ）之間則不可能。兩價錳在鎂與鈣之間占一中間位置，它的離子半徑為 $0.91 \text{ \AA}$ ，它可以同形代替鎂，在許多情況下亦可代替鈣。鈉（ $0.98 \text{ \AA}$ ）及鉀（ $1.33 \text{ \AA}$ ）在常溫及中等溫度下，在任何濃度範圍內一般都不能互相代替。

在極高溫度下，接近礦物的沸點，甚至離子半徑相差 20—30% 以上亦能發生同形代替，例如鈉長石及鉀長石以及在某些斜輝石中鈣與鎂之間的情況。迅速冷卻，這類特殊的類質同形混合物甚至在低溫時亦能暫時穩定，但遲早在它們的組份之間要發生分凝或不融合現象。

在火成岩冷卻礦物析出的过程中，當大小相似，電荷（價）相等的不同離子互相代替時，不同離子進入晶格的順序是按照它們鍵強度遞減的順序。在相同電荷的情況下，靜電鍵強度是與離子間距的平方成反比：因而最小的離子最先結合。鎂離子在較大的二價鐵離子之前結合，而二價鐵又優先於二價錳離子。當電子鍵與離子鍵共同存在時，鍵強度的總合具有決定性意義：因而鎳富集於岩漿中最早期分出的硅酸鎂之中，即使鎳與鎂的離子半徑實際上相同；由於礦物中三價鉻的電子鍵的存在，鉻尖晶石在其它尖晶石礦物之前析出。

從岩漿析出的礦物中的離子代替不僅在具有同等電荷及相似半徑的離子之間發生，而且在許多情況下在半徑相似但電荷不同的離子之間也會發生，在此情況下具有較高離子電荷的離子比具有較低電荷的離子更易于被捕虜於晶格之中。斜長石系是一個很熟悉的例子，它的特点是兩價鈣代替一價的鈉，另一個例子是在雲母類某些礦物中一價的鋰與兩價的鎂之間的代替。在此情況下進入晶体的順序仍是按鍵強度的順序，高電荷離子被晶格捕虜，低電荷的離子僅當正常格組份的供應幾乎耗盡

之后才被允许进入。

我們一般可將次要元素按它們在最主要的电离或价阶段的离子半徑来分类，这种分类法能够用来确定它們的主矿物，这些主矿物中的某些主要組份具有与共生次要元素相同的离子半徑。从岩漿残余液或气相中次要元素亦能形成自己的独立矿物。

从具有最大半徑的阳离子开始，先分出那些半徑接近鉀的元素。这些离子的最主要的主矿物是鉀長石（最重要），然后是各种云母矿物，比較最少一些（多为火山岩）的是似長石矿物白榴石。

与鉀（1.33 Å）大小相彷彿的是一价的离子銣（1.49 Å），铯（1.49 Å），铷（1.65 Å）；兩价的离子鎔（1.25 Å），釷（1.27 Å），鐳（1.27 Å），鉛（1.32 Å），鋇（1.43 Å）；在某种程度上还有三价的离子釷（1.15 Å），鐳（1.16 Å），鈾（1.18 Å），釷（1.22 Å）。进入鉀長石中的铷仅能达一有限的濃度；过剩者聚于云母或铷榴石中，在其中它可大量的与銣共生。

与兩价鈣（1.06 Å）的大小相彷彿的是一价的鈉（0.98 Å），兩价的鎘（1.03 Å）在某种程度上还有兩价的錳（0.91 Å）及鋇（1.27 Å），很可能还有兩价的鐳（1.1 Å），三价的釷（1.06 Å），以及所有三价的錒族元素自釷（1.22 Å）到鐳（0.99 Å）。与鈣大小相似的四价离子是鈾（1.02 Å），鈾（1.05 Å）及釷（1.10 Å）。三价的鈾（1.05 Å）及鋇（1.1 Å）也属于同一大小級，还有一价的鋇（1.13 Å）。在火成岩中重要的主矿物是斜長石，輝石，磷灰石、榍石、螢石。

与兩价鎂（0.78 Å）大小相彷彿的除二价鉄（0.83 Å）外，还有很多次要元素离子。它們是一价的鋰（0.78 Å），兩价的鎳（0.78 Å），鈷（0.82 Å），鋅（0.83 Å），錳（0.91 Å），三价的釷（0.83 Å），銻（0.8 Å），錒（0.92 Å），四价的錫（0.74 Å），鉛（0.84 Å），鋇（0.87 Å），鈾（0.85 Å），鐳（0.89 Å）。最重要的主矿物是橄欖石，輝石，閃石及黑云母。

与三价鉄（0.67 Å）大小彷彿的是三价离子鋁（0.57 Å），鎂（0.62 Å），鉻（0.64 Å），鈾（0.65 Å），鋇（0.68 Å），鈾（0.69 Å），錳（0.70 Å），四价錳（0.52 Å），鈾（0.61 Å），鈾（0.64 Å），鈾（0.65 Å），鋇（0.66 Å），鋇（0.67 Å），鈾（0.68 Å），鎂（0.68 Å），五价的鈾（0.69 Å），鈾（0.69 Å），銻（0.6 Å）。主要的主矿物为磁鉄矿，其它鉄矿石，以及許多硅鋁酸鹽。

与四价硅（0.39 Å）大小相彷彿的是兩价的鈹（0.34 Å），四价的鍺（0.41 Å），五价的磷（0.34 Å），可能还有六价的鈾及鎂^①。三价鋁及鎂可在某种程度上代替四价的硅。此組內重要的主矿物是許多硅酸鹽及硅鋁酸鹽。

① 鲍涅曼（И. Д. Борнеман）（苏联科学院地質研究所）証明有 $\text{Si}^{4+}-\text{P}^{5+}-\text{S}^{6+}$ 的类質同形（ $\text{S}^{6+} \approx 0.34 \text{ Å}$ ）。