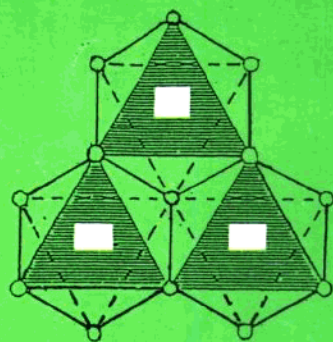


# 铬铝云母成因矿物学

——兼论焦家式金矿床成因与找矿

鲁安怀 陈光远 著



地质出版社

# 铬铝云母成因矿物学

——兼论焦家式金矿床成因与找矿

鲁安怀 陈光远 著

地质出版社

·北京·

(京)新登字 085 号

## 内 容 提 要

本书以成因矿物学思想与研究方法为指导,在云母族中确立 Cr—Al 完全类质同象关系,将过去的白云母亚族扩展为铬铝云母亚族,提出晶体化学分类与自然分类及其晶体化学特征,探讨从早期地壳发生到晚期地壳改造的地质作用过程中铬铝云母系统发生史及成因图解,具体研究胶东地区前寒武纪变质作用、中生代构造岩浆活动到焦家式金矿床成矿的成岩成矿过程与铬铝云母标型特征继承性关系,揭示焦家式金矿床成因机理,提出焦家式金矿床找矿方向、找矿标志与找矿实例。

全书内容新颖、资料丰富、独具特色。

本书可供矿物学、矿床学、地球化学以及研究地壳演化等方面专业人员和大专院校相关学科师生参考,也可供专门从事金矿床理论研究和地质找矿人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

铬铝云母成因矿物学:兼论焦家式金矿床成因与找矿/鲁安怀,陈光远著.-北京:地质出版社,1995.3

ISBN 7-116-01872-7

I. ① 铬… II. ① 鲁…② 陈… III. ① 铬-云母矿床-矿床成因论-矿物学② 铝-云母矿床-矿床成因论-矿物学金矿床-矿床成因论 IV. ① P619.27② P618.510.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 02895 号

## 地质出版社出版发行

(100013 北京和平里七区十楼)

责任编辑:周继荣 陈 磊

中国地质大学轻印刷厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本:787×1092 1/16 印张:8.5 字数:195 000

1995 年 3 月北京第一版·1995 年 3 月北京第一次印刷

印数:1—500 册 定价:8.80 元

ISBN 7-116-01872-7

P·1464

# 前 言

云母族矿物成分复杂、分布广泛，并在成岩成矿作用中十分重要。但过去研究多限于镁铁云母、铁锂云母、锂白云母等，而且联系成岩作用多，联系成矿作用少。本书以成因矿物学与找矿矿物学为指导，在充分研究国内外 1842—1993 年有关铬铝云母资料的基础上，结合作者 10 多年的实际研究资料，重点开展铬铝云母理论研究及其在胶东地区焦家式金矿床成矿与找矿中的应用研究。

在过去的矿物学论著中，云母族主要包括白云母亚族、黑云母亚族即镁铁云母亚族、锂云母亚族。陈光远（1990）在孙世华（1986）提出的 Fe—Li、Al—Li、Fe—Al、Mg—Fe 四个系列云母的基础上，才补充提出存在 Cr—Al 系列与铬铝云母亚族。过去认为白云母中  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  含量不超过 4.81%（Whitmore, 1946; Deer, 1963; 王濮, 1984; Bailey, 1984; 潘兆橹, 1985），以后有资料报道，其中  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  含量可高达 24.63%（Treloar, 1987）。根据作者综合研究，自然界中与白云母同结构的云母中含  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  的连续变化范围为 0.00—24.63%，即 Cr 对 Al 的替代程度为 0.00—83.14%，显示 Cr—Al 间具完全类质同象替代的趋势，构成了云母族中较完整的 Cr—Al 系列。因此，作者提出将过去的白云母亚族扩展为铬铝云母亚族，从而丰富和发展了云母族的分类。

铬铝云母亚族矿物可稳定存在于国内外广泛分布的太古宙早期砾岩层与石英岩层中，其形成年龄在南非和我国冀东均达 35 亿年以上。它是早期地壳发生过程中幔源物质（Cr）与壳源物质（Si, Al）交互作用的产物（陈光远, 1992）。在以后的地壳演化过程中所形成的太古宙晚期绿岩带型金矿和 BIF 型铁矿、元古宙块状硫化物矿、古生代蛇绿岩带中金（镍）矿和玉石矿直到中生代与基底活化作用有关的金矿床，由于继承了结晶基底的成分特征，均有铬铝云母亚族矿物产出。因此，作者提出从早期地壳发生到晚期地壳改造、从成岩到成矿的自然历史中，铬铝云母亚族矿物均具有其固有的位置和作用，从太古宙至显生宙铬铝云母亚族矿物系统发生史（陈光远, 1992）能够反映地壳演化史。

铬铝云母亚族中含铬种属的形成机理与在金矿床成矿理论及生产实践中的意义，在国内外一直被忽略。陈光远等（1985）首先在焦家金矿床露天采坑中发现了含铬绢云母，后又在罗峰金矿床（1987）、黑岚沟金矿床（1990）相继发现了铬绢云母和含铬绢云母，1987 年又在流口金矿床发现了含铬白云母，并于 1989 年论述了它们在胶东金矿床中的出现是金矿床矿物成分标型对胶东群成分特征继承性的标志，也是强烈蚀变矿化的标志（陈光远等, 1989）。因此，作者提出铬铝云母亚族中含铬种属是与基底活化作用有关的金矿床、更是焦家式金矿床成矿与找矿的标型矿物，并提出绿化蚀变的概念及其找矿意义。

长期以来矿源问题的研究方法多限于稳定同位素及稀土元素等方法，并主要探讨矿化原岩和成矿流体的来源，从而间接达到解决矿质来源的目的。在本书研究中，作者以微量元素 Cr 为示踪剂，以自然历史为线索，利用含铬矿物标型继承性特征，追溯胶东西北部从前寒武纪结晶基底变质岩类到其部分熔融产物燕山运动早期 I 型花岗岩类直至燕山运动晚期焦家式金矿床的成岩成矿全过程中 Cr 元素的演化特征，用以追踪与 Cr 具紧密时空关系的 Au 在成岩成矿作用中活化、运移、沉淀、富集的机理，进而揭示金矿床矿质来源。这为金矿床矿质来源研究开辟了一条新途径。

1998/6

全书共分九章，各章内容简单综合介绍如下：

第一章探讨Cr元素在矿物中赋存状况，提出云母族矿物中存在Cr—Al完全类质同象替代，重新核查云母族矿物分类，将白云母亚族扩展为铬铝云母亚族。

第二章对铬铝云母亚族矿物进行晶体化学分类与自然分类，初步提出划分方案。

第三章重点讨论铬铝云母亚族矿物精细结构特征，深入研究含铬种属晶体化学特征。

第四章开展铬铝云母亚族中含铬种属系统发生史研究，探讨从早期地壳发生到晚期地壳改造过程中含铬种属系统演化特征，具体阐述含铬种属9种成因产状，建立成因图解。

第五章对胶东地区区域地层、构造及岩浆岩地质特征进行系统总结概括，阐明焦家式金矿床地质特征，指明含铬种属产出背景。

第六章深入开展用于焦家式金矿床成矿与找矿的含铬种属标型性研究，并提出绿化蚀变的概念及其找矿意义。

第七章开展焦家式金矿床成矿时代、成矿物质、成矿过程、成因类型等方面的深入研究，指出成岩成矿过程中微量元素Cr的示踪性特征，提出金矿床矿质来源研究的新方法。

第八章具体指出在我国寻找焦家式金矿床区域上找矿方向及矿区内找矿标志，重点研究利用矿物标型特征及矿物学填图方法，尤其强调利用铬铝云母标型特征的找矿方法。

第九章根据焦家式金矿床找矿方法，开展未知区焦家式金矿床找矿应用研究，探讨含矿标志，指明矿化远景，提出找矿实例。

本书是在矿物系统发生史、矿物标型普遍规律、成因矿物族以及五结合的方法论等成因矿物学的学术思想（陈光远等，1987，1988）指导下，以鲁安怀（1993）的在职博士论文为基础，并参考十几年来科研集体长期积累的有关资料，修改补充完成的。以上成果曾获得国家科委、国家自然科学基金委、国家教委博士生导师基金、地矿部科技司、冶金部黄金管理局与玲珑金矿床等项目的部分资助。

本书完成过程中，得到中国地质大学（北京）地矿系邵伟和孙岱生的热情帮助；得到中科院地质所叶大年、刘秉光、苏明迪，北京大学地质系曹正民、崔文元、郑辙，地科院矿床所黄蕴慧，有色金属总公司北京地矿所冯建良以及中国地质大学（北京）地矿系王濮、翟裕生、石准立、池三川、黄华盛、陈珍珍、崔彬的审阅并提出宝贵的修改意见；蔡长金、阎月华、宋玉国、初凤友、鞠党辰、蒋楠提供部分样品；宋玉国、李胜荣、杨立信给予支持和帮助；徐文超参加第九章部分工作。在此谨向他（她）们表示由衷的感谢。

由于时间匆促与作者水平所限，书中不当之处，敬请批评指正。

作 者

1994年9月

# 目 录

## 前 言

|                             |      |
|-----------------------------|------|
| 第一章 铬铝云母亚族的建立 .....         | (1)  |
| 一、矿物学中铬元素 .....             | (1)  |
| 二、云母族中铬—铝完全类质同象系列的确立 .....  | (1)  |
| 三、云母族中铬铝云母新亚族的建立 .....      | (6)  |
| 1. 云母族矿物分类沿革 .....          | (6)  |
| 2. 铬—铝系列的提出 .....           | (8)  |
| 第二章 铬铝云母亚族矿物初步分类 .....      | (9)  |
| 一、晶体化学分类 .....              | (9)  |
| 二、自然分类 .....                | (10) |
| 第三章 铬铝云母亚族矿物晶体化学 .....      | (12) |
| 一、晶体结构 .....                | (12) |
| 二、化学成分 .....                | (14) |
| 1. X 位阳离子 .....             | (17) |
| 2. Y 位阳离子 .....             | (17) |
| 3. Z 位阳离子 .....             | (19) |
| 4. 附加阴离子 .....              | (19) |
| 第四章 铬铝云母亚族系统发生史及成因图解 .....  | (20) |
| 一、时空演化 .....                | (20) |
| 1. 铬元素在地球中分布 .....          | (20) |
| 2. 铬铝云母亚族含铬种属化学成分时间演化 ..... | (22) |
| 3. 铬铝云母亚族含铬种属时间演化 .....     | (24) |
| 二、成因图解 .....                | (26) |
| 三、太古宙早期碎屑沉积变质成因 .....       | (28) |
| 1. 石英岩 .....                | (28) |
| 2. 蓝晶石榴玉片岩 .....            | (29) |
| 四、太古宙晚期沉积变质叠加热液改造成因 .....   | (30) |
| 1. 绿岩带中层控型金矿床 .....         | (30) |
| 2. 绿岩带中 BIF 型铁矿床 .....      | (31) |
| 五、元古宙沉积变质叠加热液改造成因 .....     | (32) |
| 六、古生代至中生代岩浆侵入叠加热液改造成因 ..... | (32) |
| 1. 基性—超基性岩中玉石矿床 .....       | (33) |
| 2. 基性—超基性岩中金(镍)矿床 .....     | (34) |
| 七、中生代基底活化叠加热液改造成因 .....     | (35) |
| 第五章 焦家式金矿床铬铝云母亚族地质背景 .....  | (36) |

|                                                                 |             |
|-----------------------------------------------------------------|-------------|
| 一、地层.....                                                       | (36)        |
| 1. 胶东群 .....                                                    | (36)        |
| 2. 荆山群 .....                                                    | (36)        |
| 3. 粉子山群 .....                                                   | (37)        |
| 4. 蓬莱群 .....                                                    | (37)        |
| 5. 中、新生界 .....                                                  | (37)        |
| 二、构造.....                                                       | (38)        |
| 三、岩浆岩 .....                                                     | (39)        |
| 四、围岩蚀变类型与分带 .....                                               | (40)        |
| 1. 动力变质作用与分带 .....                                              | (41)        |
| 2. 热液蚀变作用与分带 .....                                              | (43)        |
| 五、成矿阶段 .....                                                    | (47)        |
| 六、矿体特征 .....                                                    | (49)        |
| <b>第六章 焦家式金矿床铬铝云母亚族标型特征 .....</b>                               | <b>(53)</b> |
| 一、产状.....                                                       | (53)        |
| 二、颜色.....                                                       | (53)        |
| 三、粒径和形态 .....                                                   | (54)        |
| 1. 粒径 .....                                                     | (54)        |
| 2. 形态 .....                                                     | (55)        |
| 四、化学成分 .....                                                    | (55)        |
| 1. 含铬种属化学成分特征 .....                                             | (55)        |
| 2. 白云母、绢云母、含铬种属化学成分演化特征 .....                                   | (57)        |
| 五、晶体结构 .....                                                    | (60)        |
| 1. 多型 .....                                                     | (60)        |
| 2. 晶胞参数 .....                                                   | (62)        |
| 六、晶体光学 .....                                                    | (62)        |
| 七、差热分析 .....                                                    | (64)        |
| 八、标型性 .....                                                     | (65)        |
| <b>第七章 焦家式金矿床成因机理 .....</b>                                     | <b>(67)</b> |
| 一、成矿时代 .....                                                    | (67)        |
| 二、成矿物质 .....                                                    | (68)        |
| 1. 不同地质体中铬、镍丰度特征 .....                                          | (68)        |
| 2. 不同地质体组成矿物中 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{NiO}$ 分布特征 ..... | (71)        |
| 三、铬元素演化特征 .....                                                 | (71)        |
| 1. 成岩阶段铬元素分布特征 .....                                            | (71)        |
| 2. 过渡阶段铬元素分布特征 .....                                            | (72)        |
| 3. 成矿阶段铬元素分布特征 .....                                            | (72)        |
| 四、成矿过程 .....                                                    | (74)        |
| 五、成因类型 .....                                                    | (76)        |
| 六、铬铝云母矿物学表现 .....                                               | (77)        |
| <b>第八章 焦家式金矿床找矿方法 .....</b>                                     | <b>(79)</b> |

|                             |        |
|-----------------------------|--------|
| 一、区域上找矿方向 .....             | ( 79 ) |
| 二、矿区内找矿标志 .....             | ( 80 ) |
| 1. 动力变形标志 .....             | ( 80 ) |
| 2. 热液蚀变标志 .....             | ( 80 ) |
| 3. 矿物(铬铝云母、黄铁矿、石英)标型 .....  | ( 80 ) |
| 4. 断层泥 .....                | ( 97 ) |
| 三、矿体规模评价准则 .....            | ( 99 ) |
| <b>第九章 焦家式金矿床找矿实例</b> ..... | (102)  |
| 一、控矿构造背景 .....              | (102)  |
| 二、围岩及其蚀变岩化学成分特征 .....       | (103)  |
| 1. 围岩岩石化学 .....             | (103)  |
| 2. 围岩微量元素 .....             | (103)  |
| 3. 破碎蚀变岩化学成分 .....          | (105)  |
| 4. 含矿性标志 .....              | (106)  |
| 三、成岩成矿过程矿物学表现 .....         | (106)  |
| 1. 成岩阶段矿物学表现 .....          | (106)  |
| 2. 过渡阶段矿物学表现 .....          | (108)  |
| 3. 成矿阶段矿物学表现 .....          | (108)  |
| 四、铬铝云母矿物标型性 .....           | (109)  |
| 五、矿化远景评价 .....              | (110)  |
| <b>参考文献</b> .....           | (115)  |
| <b>英文摘要</b> .....           | (120)  |

# CONTENTS

## Preface and Acknowledgements

|                  |                                                                                |    |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Chapter 1</b> | <b>Developed Chromo-Alumino-Mica Subgroup</b>                                  | 1  |
| 1.               | Element of Cr in Mineralogy                                                    | 1  |
| 2.               | Isomorphism of Cr—Al Series in Mica Group                                      | 1  |
| 3.               | New Subgroup of Chromo-Alumino-Mica in Mica Group                              | 6  |
| 1)               | Classification of Minerals in Mica Group                                       | 6  |
| 2)               | Complete Solid Solution of Cr—Al Series                                        | 8  |
| <b>Chapter 2</b> | <b>Tentative Classification of Minerals in Subgroup of Chromo-Alumino-Mica</b> | 9  |
| 1.               | Crystallochemical Classification                                               | 9  |
| 2.               | Natural Classification                                                         | 10 |
| <b>Chapter 3</b> | <b>Crystallochemistry of Subgroup of Chromo-Alumino-Mica</b>                   | 12 |
| 1.               | Crystal Structure                                                              | 12 |
| 2.               | Chemical Composition                                                           | 14 |
| 1)               | Cation in X Site                                                               | 17 |
| 2)               | Cation in Y Site                                                               | 17 |
| 3)               | Cation in Z Site                                                               | 19 |
| 4)               | Additional Anion                                                               | 19 |
| <b>Chapter 4</b> | <b>Phylogeny of Chrome Mica and Its Genetic Diagram</b>                        | 20 |
| 1.               | Temporal and Spatial Distribution                                              | 20 |
| 1)               | Distribution of Cr in the Earth                                                | 20 |
| 2)               | Temporal Evolution of Chemical Composition of the Chrome Mica                  | 22 |
| 3)               | Temporal Evolution of the Chrome Mica                                          | 24 |
| 2.               | Genetic Diagram                                                                | 26 |
| 3.               | Metamorphic Crystallization of Clastic Sediments in Early Archaean Era         | 28 |
| 1)               | Quartzite                                                                      | 28 |
| 2)               | Schist of Kyanite and Corundum                                                 | 29 |
| 4.               | Altered Sedimentary Metamorphics in Late Archaean Era                          | 30 |
| 1)               | Stratabound Gold Deposits in Greenstone Belt                                   | 30 |
| 2)               | BIF Iron Deposits in Greenstone Belt                                           | 31 |
| 5.               | Altered Sedimentary Metamorphics in Proterozoic Era                            | 32 |
| 6.               | Altered Intrusives in Palaeozoic and Mesozoic Era                              | 32 |
| 1)               | Jade Deposits in Basics and Ultrabasics                                        | 33 |
| 2)               | Gold (Nickel) Deposits in Basics and Ultrabasics                               | 34 |
| 7.               | Altered Crystalline Basement Mobilized Rocks in Mesozoic Era                   | 35 |

## **Chapter 5 Geological Background of Chrome Mica from Gold Deposits of Jiaojia**

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| <b>Type</b>                                     | 36 |
| 1. Stratigraphy                                 | 36 |
| 1) Jiaodong Group                               | 36 |
| 2) Jingshan Group                               | 36 |
| 3) Fenzishan Group                              | 37 |
| 4) Penlai Group                                 | 37 |
| 5) Cenozoic and Mesozoic Group                  | 37 |
| 2. Structural Geology                           | 38 |
| 3. Igneous Rocks                                | 39 |
| 4. Classifying and Zoning of Altered Wall Rocks | 40 |
| 1) Dynamic Metamorphism                         | 41 |
| 2) Hydrothermal Alteration                      | 43 |
| 5. Mineralizing Stages                          | 47 |
| 6. Characteristics of Orebodies                 | 49 |

## **Chapter 6 Typomorphic Features of Chrome Mica from Gold Deposits of Jiaojia**

|                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------|----|
| <b>Type</b>                                                   | 53 |
| 1. Occurrence                                                 | 53 |
| 2. Colour                                                     | 53 |
| 3. Grain Size and Crystal Form                                | 54 |
| 1) Grain Size                                                 | 54 |
| 2) Crystal Form                                               | 55 |
| 4. Chemical Composition                                       | 55 |
| 1) Characteristics of the Chrome Mica                         | 55 |
| 2) Evolution of Muscovite through Sericite to the Chrome Mica | 57 |
| 5. Crystal Structure                                          | 60 |
| 1) Polymorphism                                               | 60 |
| 2) Cell Dimension                                             | 62 |
| 6. Crystal Optics                                             | 62 |
| 7. Differential Thermal Analysis                              | 64 |
| 8. Typomorphism                                               | 65 |

## **Chapter 7 Genesis of Gold Deposits of Jiaojia Type**

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| 1. Age Dating of the Gold Mineralization                   | 67 |
| 2. Ore-Forming Materials                                   | 68 |
| 1) Cr and Ni Distributions in Geologic Bodies              | 68 |
| 2) Contents of $\text{Cr}_2\text{O}_3$ and NiO in Minerals | 71 |
| 3. Natural Evolution of Cr                                 | 71 |
| 1) Cr Distribution at Rock-Forming Stage                   | 71 |
| 2) Cr Distribution at Transitional Stage                   | 72 |

|                                                                                         |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3) Cr Distribution at Ore-Forming Stage .....                                           | 72         |
| 4. Process of the Gold Mineralization .....                                             | 74         |
| 5. Genetic Type of the Gold Deposits .....                                              | 76         |
| 6. Mineralogical Expressions of Minerals in Subgroup of Chromo-Alumino-Mica .....       | 77         |
| <b>Chapter 8 Prospecting for Gold Deposits of Jiaojia Type .....</b>                    | <b>79</b>  |
| 1. Regional Prospecting Directions .....                                                | 79         |
| 2. District Prospecting Criteria .....                                                  | 80         |
| 1) Criteria of Dynamic Metamorphism .....                                               | 80         |
| 2) Criteria of Hydrothermal Alteration .....                                            | 80         |
| 3) Criteria of Mineral Typomorphism (Chromo-Alumino-Mica, Pyrite and Quartz) .....      | 80         |
| 4) Criteria of Fault Gouge .....                                                        | 97         |
| 4. Evaluation Criteria for Extent of Orebodies .....                                    | 99         |
| <b>Chapter 9 Practical Investigation into Gold Mineralization of Jiaojia Type .....</b> | <b>102</b> |
| 1. Regional Structure .....                                                             | 102        |
| 2. Chemical Composition of Wall Rocks and Their Altered Rocks .....                     | 103        |
| 1) Petrochemistry of Wall Rocks .....                                                   | 103        |
| 2) Trace Elements of Wall Rocks .....                                                   | 103        |
| 3) Chemical Composition of Katamorphic Altered Rocks .....                              | 105        |
| 4) Criteria of the Gold Mineralization .....                                            | 106        |
| 3. Mineralogical Expressions from Rock Formation to Ore Formation .....                 | 106        |
| 1) Mineralogical Expression at Rock-Forming Stage .....                                 | 106        |
| 2) Mineralogical Expression at Transitional Stage .....                                 | 108        |
| 3) Mineralogical Expression at Ore-Forming Stage .....                                  | 108        |
| 4. Typomorphism of Minerals in Subgroup of Chromo-Alumino-Mica .....                    | 109        |
| 5. Potentiality of Gold Mineralization of Jiaojia Type .....                            | 110        |
| <b>References .....</b>                                                                 | <b>115</b> |
| <b>Abstract in English .....</b>                                                        | <b>120</b> |

# 第一章 铬铝云母亚族的建立

## 一、矿物学中铬元素

铬元素分别由法国人 Nicolas—Louis Vauquelin 和德国人 Martin H. Klaproth 于 1797 年从西伯利亚铅矿中产出的橙红色铬铅矿 ( $\text{PbCrO}_4$ ) 中发现的 (Donath, 1962)。1798 年, Vauquelin 在高温条件下用木炭还原  $\text{CrO}_3$  分离出这种新金属——铬 (Cr)。由于在化合物中铬元素以美丽的颜色为特征, A. E. Fourciuy 和 R. J. Hauy 建议将这种新金属命名为 chromium (来自希腊文 khroma, 颜色的意思) (Burns, 1975), 在我国曾称之为克罗米 (孟庆珍, 1988)。

在化合物中铬元素的氧化态有  $\text{Cr}^+$ ,  $\text{Cr}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{4+}$ ,  $\text{Cr}^{5+}$  和  $\text{Cr}^{6+}$  (Rollinson, 1973); 但在含铬的矿物中主要是  $\text{Cr}^{3+}$  和  $\text{Cr}^{6+}$  (Burns, 1975), 对陨石矿物研究表明  $\text{Cr}^{2+}$  可出现于含碳的金属相中 (Olsen, 1973)。

据 Strunz (1970)、Fleischer (1971) 和岳树勤等 (1981) 资料统计自然界中含铬矿物达 48 种, 其中硅酸盐 14 种、铬酸盐 13 种、氧化物 10 种、氢氧化物 4 种、硫化物 4 种、氮化物 1 种、硫酸盐 1 种及自然铬。

在大多数含  $\text{Cr}^{3+}$  的矿物中,  $\text{Cr}^{3+}$  与氧结合进入八面体位置, 这是由于  $\text{Cr}^{3+}$  优先占据八面体位置 (Burns, 1970)。  $\text{Cr}^{3+}$  的八面体半径为 0.0615 nm (Shannon 和 Prewitt, 1969), 介于  $\text{Al}^{3+}$  (0.053 nm) 和  $\text{Fe}^{3+}$  (0.0645 nm)、 $\text{Ti}^{4+}$  (0.068 nm) 及  $\text{Mg}^{2+}$  (0.072 nm) 之间 (Burns, 1975)。  $\text{Cr}^{3+}$  和  $\text{Al}^{3+}$  的电负性分别为 1.6 和 1.5 (波林, 1964), 因此在大多数含  $\text{Cr}^{3+}$  矿物中,  $\text{Cr}^{3+}$  可与  $\text{Al}^{3+}$  形成广泛类质同象替代, 在较高温度和压力条件下也可与造岩矿物中  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Ti}^{4+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  形成有限类质同象替代。  $\text{Cr}^{3+}$ — $\text{Al}^{3+}$  完全类质同象已在尖晶石族矿物中  $\text{MgCr}_2\text{O}_4$ — $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  和石榴子石族矿物中  $\text{Ca}_3\text{Cr}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ — $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$  中得到证实, 在辉石族矿物中  $\text{NaCrSi}_2\text{O}_6$  (Fron del, 1967) 与  $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$  之间也可能存在  $\text{Cr}^{3+}$ — $\text{Al}^{3+}$  完全类质同象系列。  $\text{Cr}^{3+}$ — $\text{Fe}^{3+}$  有限替代可见于铬磁铁矿  $\text{Fe}(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{O}_4$  (Sergeeva, 1968) 中。  $\text{Cr}^{3+}$ — $\text{Ti}^{4+}$  有限替代可存在于铬钛铁晶石  $\text{Fe}_2(\text{Ti}, \text{Cr})\text{O}_4$  及铁镁铬钛矿  $(\text{Mg}, \text{Fe})(\text{Ti}, \text{Cr})_2\text{O}_5$  等月岩矿物 (Agrell, 1970; Steele 等, 1972) 中。  $\text{Cr}^{3+}$ — $\text{Mg}^{2+}$  有限替代可见于铬透辉石  $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Cr})[\text{Si}_2\text{O}_6]$  和铬透闪石  $\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Cr})_5[\text{Si}_6\text{O}_{22}](\text{OH})_2$  中。

因此理论与实践均说明在由氧紧密堆积形成的八面体中  $\text{Cr}^{3+}$ — $\text{Al}^{3+}$  之间可形成完全类质同象系列。

## 二、云母族中铬—铝完全类质同象系列的确立

白云母晶体化学式为  $\text{KAl}_2[(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ , 铬云母为  $\text{KCr}_2[(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ ,  $\text{Cr}$ — $\text{Al}$  替代理应发生在结构单元层内  $\text{Al}$ — $\text{O}$  与  $\text{Cr}$ — $\text{O}$  八面体中。

通过对世界范围内 1842—1993 年他人资料及作者所完成的实际资料所涉及的 26 个产地、118 个含有铬元素且与白云母同结构的云母化学成分研究 (表 1—1), 发现其中含  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  的变化范围为 0.15%—24.63%, 相应地  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 37.72%—11.79%,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  呈负相关性较明显 (图 1—1), 当然八面体中 Mg, Fe 等对相关系数有一定影响。同在八面体位置中,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  这种较好的负相关性无疑是 Cr—Al 间相互替代的结果。

铬对铝替代的程度变化范围为 0.53%—83.14% (表 1—2), 未列入表 1—2 数据表明, 实际为 0.00%—83.14%, 显示铬—铝具完全类质同象替代的趋势 (图 1—2)。

根据上述事实, 作者提出在铬云母—白云母中存在由端员组分  $\text{KCr}_2[(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ — $\text{KAl}_2[(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2$  组成的完全类质同象系列。

其中白云母端员  $\text{KAl}_2[(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2$  在自然界中广泛分布, 成为成岩成矿作用中较重要的组成矿物。但在自然界中尚未发现铬云母端员  $\text{KCr}_2[(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ , 表 1—1 中所列多为该完全类质同象系列中的中间成员  $\text{K}(\text{Al}, \text{Cr})_2[(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ 。

表 1—1 铬铝云母亚族含铬种属化学成分

Tab. 1—1 Chemical composition of chrome mica in subgroup of chromo-alumino-mica

| 编号 | $\text{SiO}_2$ | $\text{TiO}_2$ | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{Cr}_2\text{O}_3$ | $\text{V}_2\text{O}_5$ | $\text{FeO}$ | $\text{MgO}$ | $\text{CoO}$ | $\text{NiO}$ | $\text{MnO}$ | $\text{CaO}$ | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{K}_2\text{O}$ | 总量    | 资料来源          |
|----|----------------|----------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------------|----------------------|-------|---------------|
| 1  | 43.17          |                | 12.55                   | 24.63                   | 0.17                   | 0.37         | 1.83         |              |              |              | 0.10         |                       | 10.02                | 92.84 | Treloar, 1987 |
| 2  | 43.63          |                | 13.38                   | 23.86                   | 0.24                   | 2.32         | 0.53         |              |              |              |              |                       | 9.10                 | 93.06 |               |
| 3  | 42.22          | 0.12           | 11.79                   | 23.62                   | 0.24                   | 1.04         | 2.15         |              |              |              | 0.11         |                       | 8.82                 | 90.11 |               |
| 4  | 42.73          |                | 14.12                   | 23.43                   | 0.19                   | 2.26         | 0.44         |              |              | 0.17         | 0.11         |                       | 9.07                 | 92.52 |               |
| 5  | 44.02          | 0.24           | 14.50                   | 23.12                   | 0.13                   | 2.30         | 0.77         |              |              |              | 0.09         |                       | 9.37                 | 94.56 |               |
| 6  | 45.45          | 0.13           | 21.34                   | 18.81                   |                        | 0.30         | 0.31         |              |              |              | 0.09         |                       | 9.79                 | 96.22 |               |
| 7  | 45.03          |                | 20.85                   | 17.76                   |                        | 0.18         | 0.72         |              |              |              | 0.11         |                       | 10.18                | 94.83 |               |
| 8  | 43.62          |                | 19.48                   | 15.15                   |                        | 0.24         | 5.88         |              |              |              | 0.15         |                       | 10.12                | 94.64 |               |
| 9  | 42.20          | 0.23           | 24.46                   | 14.99                   |                        | 0.21         |              |              |              |              | 0.10         |                       | 10.11                | 92.30 |               |
| 10 | 42.60          | 0.21           | 22.48                   | 13.28                   |                        | 0.84         | 1.27         |              |              | 0.13         | 0.10         |                       | 9.42                 | 90.33 |               |
| 11 | 45.66          | 0.28           | 24.07                   | 12.13                   |                        | 0.41         | 1.97         |              |              | 0.12         |              |                       | 10.17                | 94.75 |               |
| 12 | 44.92          | 0.31           | 21.15                   | 11.13                   | 1.57                   | 0.37         | 3.06         |              |              | 0.12         | 0.10         |                       | 9.97                 | 92.70 |               |
| 13 | 44.99          | 0.41           | 22.32                   | 11.08                   | 0.13                   | 0.29         | 1.99         |              |              |              |              |                       | 9.99                 | 91.20 |               |
| 14 | 44.96          | 0.27           | 22.28                   | 11.00                   |                        | 0.37         | 3.69         |              |              | 0.12         |              |                       | 10.06                | 92.75 |               |
| 15 | 44.41          | 0.43           | 22.17                   | 10.72                   | 1.60                   | 0.17         | 2.67         |              |              |              |              |                       | 9.81                 | 91.98 |               |
| 16 | 43.87          | 0.37           | 20.86                   | 10.60                   | 1.32                   | 2.36         | 4.91         |              |              |              |              |                       | 8.79                 | 93.08 |               |
| 17 | 43.95          | 0.42           | 21.11                   | 10.31                   | 1.65                   | 0.39         | 3.27         |              |              |              |              |                       | 9.31                 | 90.41 |               |
| 18 | 44.51          | 0.49           | 21.99                   | 10.39                   | 1.72                   | 0.21         | 3.10         |              |              |              | 0.13         |                       | 9.79                 | 92.33 |               |
| 19 | 44.26          |                | 24.23                   | 10.15                   |                        | 0.46         | 2.68         |              |              |              | 0.14         |                       | 10.01                | 91.93 |               |
| 20 | 46.08          | 0.15           | 24.48                   | 10.12                   |                        | 0.64         | 3.61         |              |              | 0.18         | 0.12         |                       | 10.37                | 95.75 |               |
| 21 | 45.34          | 0.41           | 27.07                   | 10.01                   |                        |              | 0.87         |              |              |              | 0.10         |                       | 10.12                | 93.92 |               |
| 22 | 46.49          |                | 23.56                   | 9.80                    |                        | 0.31         | 3.94         |              |              |              | 0.08         |                       | 10.21                | 94.39 |               |
| 23 | 47.70          | 0.36           | 21.10                   | 9.67                    | 1.46                   | 1.62         | 4.94         |              |              |              | 0.15         |                       | 9.11                 | 96.10 |               |
| 24 | 46.05          | 0.46           | 26.71                   | 9.50                    |                        |              | 0.79         |              |              |              | 0.18         |                       | 9.87                 | 93.56 |               |
| 25 | 46.67          |                | 25.57                   | 9.35                    |                        | 0.17         | 1.80         |              |              |              | 0.16         |                       | 10.86                | 94.58 |               |
| 26 | 47.02          |                | 30.10                   | 8.95                    |                        | 0.30         | 0.32         |              |              | 0.14         | 0.12         |                       | 10.89                | 97.84 |               |
| 27 | 46.26          |                | 26.50                   | 7.90                    |                        | 0.69         | 1.84         |              | 0.78         |              | 0.0          | 0.0                   | 10.59                | 94.56 | Chao, 1986    |
| 28 | 46.31          | 0.29           | 24.47                   | 7.72                    |                        | 0.39         | 2.44         |              | 1.11         |              | 0.0          | 0.0                   | 11.27                | 94.00 |               |
| 29 | 47.36          |                | 27.17                   | 7.67                    |                        | 0.34         | 2.79         |              |              |              | 0.13         |                       | 10.79                | 96.65 |               |
| 30 | 51.36          | 0.14           | 21.26                   | 7.46                    | 0.29                   | 0.94         | 5.57         | 0.01         | 0.37         | 0.03         | 0.11         | 0.29                  | 5.73                 | 93.57 | Treloar, 1987 |
|    |                |                |                         |                         |                        |              |              |              |              |              |              |                       |                      |       | 鲁安怀, 1993     |

续表

| 编号 | SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | FeO  | MgO  | CoO  | NiO  | MnO  | CaO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | 总量     | 资料来源            |
|----|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|-------------------|------------------|--------|-----------------|
| 31 | 47.06            | 0.27             | 27.79                          | 6.44                           |                               | 0.56 | 1.76 |      | 0.25 |      | 0.0  | 0.0               | 11.11            | 95.24  | Chao,1986       |
| 32 | 43.48            | 0.73             | 29.51                          | 6.39                           |                               |      | 1.88 |      |      |      |      | 0.72              | 8.53             | 95.40  | Pan,1991        |
| 33 | 48.50            | 0.0              | 26.73                          | 6.21                           |                               | 0.54 | 2.14 |      | 0.60 |      | 0.0  | 0.0               | 11.64            | 96.36  | Chao,1986       |
| 34 | 44.26            | 0.67             | 32.00                          | 4.92                           |                               | 0.57 | 0.90 |      |      | 0.19 | 0.22 | 0.26              | 11.49            | 95.34  | 蒋楠,1993         |
| 35 | 45.97            | 2.23             | 31.67                          | 4.81                           |                               | 0.53 | 0.31 |      |      |      | 0.15 | 1.03              | 9.07             | 102.32 | Whitenore,1946  |
| 36 | 44.94            | 0.98             | 27.56                          | 4.75                           |                               | 1.07 | 2.34 |      |      |      |      | 0.27              | 7.44             | 95.77  | Pan,1991        |
| 37 | 46.35            | 0.28             | 29.69                          | 4.60                           |                               | 0.85 | 1.93 |      |      |      |      | 0.78              | 10.53            | 99.97  | Hutton,1942     |
| 38 | 45.47            | 0.94             | 31.11                          | 4.52                           |                               | 1.35 | 1.06 |      |      |      | 0.13 | 0.24              | 9.91             | 95.07  | 张建洪,1987        |
| 39 | 47.95            | 0.21             | 30.33                          | 4.39                           |                               | 0.41 | 1.72 |      |      |      | 0.0  | 0.44              | 10.83            | 96.28  | Chao,1986       |
| 40 | 46.39            | 3.58             | 27.56                          | 4.32                           |                               | 0.30 | 3.11 |      |      |      |      | 0.76              | 7.97             | 97.03  | Pan,1991        |
| 41 | 43.4             | 0.8              | 33.4                           | 4.0                            |                               | 0.25 | 0.14 |      |      |      | 0.3  | 0.95              | 10.6             | 99.67  | Leo,1965        |
| 42 | 47.95            |                  | 34.45                          | 3.95                           |                               |      | 0.71 |      |      |      | 0.59 | 0.37              | 10.75            | 100.93 | Schafhault,1842 |
| 43 | 44.7             | 0.50             | 34.0                           | 3.7                            |                               | 0.15 | 0.62 |      |      |      | 0.03 | 0.96              | 9.9              | 94.56  | Schreyer,1981   |
| 44 | 46.17            |                  | 29.71                          | 3.51                           |                               |      | 2.28 |      |      |      |      |                   | 10.40            | 99.52  | Damour,1882     |
| 45 | 43.75            | 5.84             | 29.45                          | 3.36                           |                               | 0.23 | 2.24 |      |      |      |      | 0.68              | 8.80             | 97.43  | Pan,1991        |
| 46 | 48.32            | 0.52             | 32.44                          | 3.13                           | 0.00                          | 1.10 | 1.50 | 0.05 | 0.00 | 0.13 | 0.08 | 0.23              | 7.45             | 94.94  | 鲁安怀,1993        |
| 47 | 45.49            |                  | 31.08                          | 3.09                           |                               |      | 3.36 |      |      |      | 0.51 | 0.90              | 9.76             | 100.04 | Chester,1887    |
| 48 | 47.74            | 2.05             | 25.19                          | 2.84                           | 0.11                          | 4.41 | 2.38 | 0.00 | 0.05 | 0.00 | 0.01 | 0.24              | 8.51             | 93.52  |                 |
| 49 | 53.35            | 0.14             | 27.10                          | 2.72                           | 0.04                          | 0.86 | 2.63 | 0.08 | 0.24 | 0.03 | 0.00 | 0.34              | 5.40             | 92.93  | 鲁安怀,1993        |
| 50 | 44.15            | 0.90             | 31.72                          | 2.38                           |                               | 0.68 | 1.55 |      |      |      | 0.05 | 0.67              | 8.93             | 94.67  | Pan,1991        |
| 51 | 45.63            | 0.43             | 33.51                          | 2.32                           |                               | 0.64 | 0.92 |      |      | 0.10 | 0.20 | 0.09              | 10.80            | 94.74  | 蒋楠,1993         |
| 52 | 44.9             | 0.22             | 34.2                           | 2.2                            |                               | 0.15 | 0.37 |      |      |      | 0.07 | 1.0               | 9.8              | 92.91  | Schreyer,1981   |
| 53 | 44.4             | 2.1              | 31.7                           | 2.1                            |                               |      | 0.7  |      |      |      | 0.1  | 1.1               | 10.7             | 99.90  | Clifford,1957   |
| 54 | 42.21            |                  | 34.55                          | 2.03                           |                               |      | 3.13 |      |      |      | 0.47 | 0.82              | 9.16             | 100.17 | Gill,1889       |
| 55 | 48.96            | 0.29             | 30.42                          | 2.00                           |                               | 1.53 | 0.98 |      | 0.08 | 0.03 | 0.00 | 0.00              | 7.53             | 91.82  |                 |
| 56 | 48.31            | 0.18             | 30.93                          | 1.86                           | 0.25                          | 2.02 | 1.63 | 0.00 | 0.17 | 0.00 | 0.08 | 0.74              | 7.22             | 93.40  | 鲁安怀,1993        |
| 57 | 45.20            | 1.40             | 32.50                          | 1.70                           |                               | 2.20 | 0.80 |      |      | 0.00 | 0.00 | 0.60              | 10.60            | 95.00  | 阎月华,1991        |
| 58 | 54.19            | 0.05             | 26.11                          | 1.68                           | 0.24                          | 0.67 | 3.48 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.21 | 0.24              | 6.04             | 92.92  | 鲁安怀,1993        |
| 59 | 41.64            | 1.54             | 32.51                          | 1.65                           |                               | 1.19 | 2.06 |      |      |      |      | 0.26              | 5.83             | 96.88  | Pan,1991        |
| 60 | 48.86            | 0.57             | 28.66                          | 1.52                           |                               | 0.86 | 2.24 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.24              | 10.88            | 93.86  |                 |
| 61 | 49.45            | 0.34             | 29.45                          | 1.46                           |                               | 2.18 | 1.01 | 0.22 | 0.08 | 0.02 | 0.00 | 0.03              | 7.46             | 91.70  | 鲁安怀,1993        |
| 62 | 43.26            | 1.18             | 31.87                          | 1.46                           |                               | 1.10 | 2.00 |      |      |      | 0.02 | 0.29              | 6.57             | 95.21  | Pan,1991        |
| 63 | 45.40            | 1.40             | 32.60                          | 1.40                           |                               | 2.30 | 0.80 |      |      | 0.00 | 0.00 | 0.60              | 10.20            | 94.70  | 阎月华,1991        |
| 64 | 51.94            | 0.00             | 28.14                          | 1.39                           | 0.02                          | 0.91 | 2.20 | 0.00 | 0.23 | 0.00 | 0.10 | 0.51              | 6.79             | 92.23  | 鲁安怀,1993        |
| 65 | 44.37            | 1.00             | 30.24                          | 1.36                           |                               | 1.00 | 2.04 |      |      |      |      | 0.40              | 7.17             | 95.37  | Pan,1991        |
| 66 | 45.60            | 1.20             | 32.80                          | 1.30                           |                               | 2.10 | 0.90 |      |      | 0.00 | 0.00 | 0.60              | 9.90             | 94.40  | 阎月华,1991        |
| 67 | 39.25            | 1.41             | 33.48                          | 1.28                           |                               | 0.68 | 1.09 |      |      |      |      | 1.35              | 5.68             | 94.54  | Schreyer,1981   |
| 68 | 45.16            | 1.13             | 32.48                          | 1.20                           |                               | 2.06 | 0.81 |      |      | 0.00 | 0.03 | 0.61              | 10.04            | 93.52  |                 |
| 69 | 45.90            | 1.40             | 33.10                          | 1.00                           |                               | 2.00 | 0.80 |      |      | 0.00 | 0.00 | 0.60              | 9.30             | 94.10  | 阎月华,1991        |
| 70 | 43.84            | 0.96             | 32.03                          | 1.00                           |                               | 1.26 | 2.37 |      |      |      |      | 0.36              | 7.00             | 97.26  | Pan,1991        |
| 71 | 46.32            | 0.96             | 32.89                          | 0.99                           |                               | 0.67 | 0.09 |      | 0.01 | 0.08 | 0.98 | 0.44              | 6.89             | 90.32  | Chen,1989       |
| 72 | 49.31            | 0.19             | 31.49                          | 0.96                           |                               | 1.15 | 1.12 |      | 0.15 | 0.09 | 0.28 | 0.21              | 7.43             | 92.38  |                 |
| 73 | 48.83            | 0.46             | 29.35                          | 0.96                           |                               | 1.91 | 1.90 |      | 0.08 | 0.00 | 0.00 | 0.05              | 8.43             | 91.57  | 鲁安怀,1993        |
| 74 | 47.24            |                  | 31.86                          | 0.87                           |                               | 0.56 | 2.91 |      |      |      | 0.58 | 0.16              | 10.72            | 100.27 | Prior,1908      |
| 75 | 43.51            |                  | 36.86                          | 0.85                           |                               |      | 1.02 |      |      |      | 0.55 | 1.34              | 8.11             | 100.09 | Partridge,1937  |
| 76 | 45.68            |                  | 34.17                          | 0.84                           |                               |      | 3.84 |      |      |      | 0.27 | 2.23              | 4.47             | 98.50  | Klement,1888    |
| 77 | 46.28            | 0.67             | 33.15                          | 0.80                           |                               | 0.60 | 0.90 |      |      |      | 0.31 | 1.18              | 9.37             | 99.65  | 陈光远,1984        |

续表

| 编号  | SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | FeO  | MgO  | CoO  | NiO  | MnO  | CaO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | 总量    | 资料来源          |
|-----|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|-------------------|------------------|-------|---------------|
| 78  | 50.06            | 0.36             | 29.13                          | 0.80                           | 0.12                          | 1.70 | 2.33 | 0.13 | 0.01 | 0.07 | 0.01 | 0.31              | 7.31             | 92.33 | 鲁安怀,1993      |
| 79  | 56.00            | 0.18             | 23.52                          | 0.78                           |                               | 0.51 | 2.12 |      |      |      | 0.37 | 2.72              | 7.03             | 99.87 | Moore,1936    |
| 80  | 54.22            | 0.43             | 26.97                          | 0.78                           | 0.17                          | 1.30 | 2.67 | 0.00 | 0.03 | 0.00 | 0.01 | 0.15              | 6.42             | 93.16 | 鲁安怀,1993      |
| 81  | 50.97            | 0.00             | 30.86                          | 0.69                           |                               | 2.70 | 0.69 |      |      | 0.09 | 0.07 | 0.00              | 7.23             | 93.99 | 鲁安怀,1993      |
| 82  | 46.35            | 0.41             | 33.27                          | 0.69                           |                               | 0.81 | 1.29 |      |      | 0.06 | 0.09 | 0.10              | 11.78            | 94.85 | 蒋楠,1993       |
| 83  | 47.24            | 0.11             | 32.57                          | 0.68                           |                               | 2.73 | 0.84 |      |      | 0.06 | 0.21 | 0.20              | 8.34             | 92.98 | 鲁安怀,1993      |
| 84  | 55.62            | 0.11             | 26.94                          | 0.66                           | 0.05                          | 0.55 | 3.92 | 0.00 | 0.23 | 0.03 | 0.00 | 0.76              | 6.62             | 95.49 | 鲁安怀,1993      |
| 85  | 42.03            | 0.86             | 32.61                          | 0.63                           |                               | 1.19 | 2.06 |      |      |      |      | 0.30              | 6.80             | 96.79 | Pan,1991      |
| 86  | 45.28            | 0.06             | 37.08                          | 0.63                           |                               | 0.08 | 0.06 |      |      |      | 0.11 | 1.30              | 9.28             | 93.88 | Schreyer,1981 |
| 87  | 44.41            | 1.16             | 34.66                          | 0.62                           |                               | 0.62 | 0.69 |      |      |      |      | 1.21              | 9.08             | 94.96 | 鲁安怀,1993      |
| 88  | 51.81            | 0.10             | 32.29                          | 0.56                           |                               | 1.14 | 1.63 |      | 0.00 | 0.21 | 0.10 | 0.13              | 8.30             | 96.27 | 鲁安怀,1993      |
| 89  | 59.35            | 1.23             | 23.80                          | 0.46                           |                               | 1.38 | 1.53 |      | 0.26 | 0.18 | 0.08 | 0.01              | 8.64             | 96.92 | 初凤友,1992      |
| 90  | 51.18            | 0.23             | 32.36                          | 0.40                           |                               | 2.85 | 1.78 |      |      | 0.02 | 0.02 | 0.11              | 8.80             | 97.76 | 鲁安怀,1993      |
| 91  | 48.39            | 0.29             | 30.44                          | 0.40                           |                               | 2.75 | 1.07 |      | 0.00 | 0.07 | 0.12 | 0.15              | 10.76            | 94.44 | 鲁安怀,1993      |
| 92  | 48.82            | 0.38             | 32.04                          | 0.37                           |                               | 2.65 | 1.32 |      |      | 0.13 | 0.22 | 0.29              | 10.11            | 96.32 | 鲁安怀,1993      |
| 93  | 48.85            | 0.14             | 32.92                          | 0.33                           |                               | 1.40 | 0.52 |      | 0.19 | 0.21 | 0.01 | 0.09              | 10.75            | 95.46 | 鲁安怀,1993      |
| 94  | 47.67            | 0.18             | 32.99                          | 0.31                           |                               | 3.18 | 0.38 |      |      | 0.00 | 0.10 | 0.00              | 8.49             | 93.31 | 鲁安怀,1993      |
| 95  | 48.38            | 0.19             | 30.11                          | 0.31                           |                               | 3.53 | 1.60 |      | 0.04 | 0.10 | 0.14 | 0.36              | 10.75            | 95.47 | Schreyer,1981 |
| 96  | 45.25            | 1.21             | 34.48                          | 0.31                           |                               | 0.74 | 0.87 |      |      |      |      | 1.45              | 9.04             | 94.08 | 鲁安怀,1993      |
| 97  | 52.13            | 0.27             | 32.94                          | 0.30                           |                               | 2.24 | 1.67 |      | 0.15 | 0.00 | 0.00 | 0.37              | 8.11             | 98.18 | 鲁安怀,1993      |
| 98  | 53.50            | 0.11             | 34.41                          | 0.29                           |                               | 0.71 | 1.51 |      | 0.05 | 0.06 | 0.00 | 0.33              | 6.79             | 97.76 | Hutton,1940   |
| 99  | 44.87            | 0.02             | 37.72                          | 0.27                           |                               |      | 0.32 |      |      |      | 0.36 | 1.04              | 9.83             | 99.69 | 鲁安怀,1993      |
| 100 | 47.48            | 0.29             | 29.52                          | 0.25                           |                               | 3.89 | 1.40 |      | 0.30 | 0.10 | 0.11 | 0.03              | 10.99            | 94.34 | 鲁安怀,1993      |
| 101 | 49.87            | 0.00             | 28.72                          | 0.24                           |                               | 2.59 | 1.30 |      |      | 0.12 | 0.16 | 0.06              | 9.16             | 92.82 | 鲁安怀,1993      |
| 102 | 48.67            | 0.00             | 35.45                          | 0.23                           |                               | 1.69 | 0.03 |      |      | 0.00 | 0.15 | 0.00              | 10.12            | 96.34 | 鲁安怀,1993      |
| 103 | 46.63            | 0.83             | 33.99                          | 0.22                           | 0.15                          | 1.55 | 0.90 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.30              | 9.47             | 94.03 | Schaller,1950 |
| 104 | 49.03            | 0.35             | 29.36                          | 0.20                           | 0.00                          | 5.92 | 2.50 | 0.28 | 0.00 | 0.00 | 0.09 | 0.15              | 8.16             | 96.04 | 鲁安怀,1993      |
| 105 | 51.39            |                  | 27.81                          | 0.20                           |                               | 1.00 | 3.53 |      |      |      |      | 6.13              | 10.08            | 99.73 | 鲁安怀,1993      |
| 106 | 51.68            | 0.51             | 27.71                          | 0.20                           |                               | 2.19 | 2.07 |      | 0.00 | 0.00 | 0.12 | 0.08              | 10.31            | 94.87 | 鲁安怀,1993      |
| 107 | 48.11            | 0.24             | 31.61                          | 0.19                           |                               | 2.96 | 1.34 |      |      | 0.00 | 0.07 | 0.07              | 10.79            | 95.37 | 鲁安怀,1993      |
| 108 | 48.19            | 0.26             | 31.35                          | 0.19                           |                               | 2.05 | 0.83 |      | 0.22 | 0.00 | 0.00 | 0.16              | 10.78            | 94.03 | Turner,1895   |
| 109 | 55.35            | 0.03             | 25.62                          | 0.18                           |                               | 0.92 | 3.25 |      |      |      | 0.07 | 0.17              | 9.29             | 99.53 | 鲁安怀,1993      |
| 110 | 51.12            | 0.10             | 30.15                          | 0.18                           | 0.00                          | 3.08 | 2.03 | 0.11 | 0.00 | 0.04 | 0.06 | 0.26              | 7.28             | 94.39 | Dietrich,1958 |
| 111 | 47.00            | 0.55             | 34.58                          | 0.17                           |                               | 0.29 | 1.30 |      |      |      | 0.14 | 1.99              | 7.90             | 99.81 | 鲁安怀,1993      |
| 112 | 46.73            | 0.38             | 32.32                          | 0.17                           |                               | 2.21 | 0.78 |      |      | 0.00 | 0.13 | 0.00              | 10.22            | 92.94 | 鲁安怀,1993      |
| 113 | 48.39            | 0.13             | 30.24                          | 0.17                           |                               | 2.50 | 0.98 |      | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.10              | 11.37            | 93.88 | 鲁安怀,1993      |
| 114 | 48.32            | 0.28             | 30.72                          | 0.17                           |                               | 2.57 | 1.00 |      | 0.12 | 0.03 | 0.00 | 0.00              | 11.07            | 94.28 | 鲁安怀,1993      |
| 115 | 46.94            | 0.56             | 28.43                          | 0.16                           |                               | 4.15 | 2.17 |      | 0.24 | 0.13 | 0.00 | 0.30              | 10.95            | 94.03 | 鲁安怀,1993      |
| 116 | 50.42            | 0.47             | 29.83                          | 0.16                           |                               | 1.31 | 1.29 |      | 0.11 | 0.00 | 0.15 | 0.20              | 10.41            | 94.35 | 鲁安怀,1993      |
| 117 | 47.95            | 0.14             | 33.62                          | 0.15                           |                               | 3.17 | 0.66 |      |      | 0.00 | 0.02 | 0.20              | 10.73            | 96.64 | 鲁安怀,1993      |
| 118 | 48.47            | 0.15             | 28.97                          | 0.15                           |                               | 2.37 | 1.45 |      | 0.19 | 0.00 | 0.03 | 0.05              | 11.13            | 92.96 | 鲁安怀,1993      |

注: (1) 化学分析法含 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的有 35 为 2.56%, 37 为 0.23%, 41 为 0.25%, 42 为 1.80%, 44 为 2.03%, 53 为 2.3%, 54 为 1.03%, 71 为 4.03%, 75 为 2.05%, 76 为 2.36%, 77 为 2.10%, 79 为 3.30%, 99 为 0.54%, 105 为 0.68%, 109 为 0.63%, 111 为 1.02%; 含 H<sub>2</sub>O 的 35 为 3.99%, 37 为 4.69%, 41 为 5.7%, 42 为 0.36%, 44 为 5.42%, 47 为 5.85%, 53 为 4.7%, 54 为 6.77%, 71 为 3.77%, 74 为 5.37%, 75 为 5.80%, 76 为 4.65%, 77 为 4.18%, 79 为 3.52%, 99 为 4.72%, 105 为 4.91%, 109 为 4.52%, 111 为 3.60%; 含 F 的 37 为 0.04%, 41 为 0.13%, 71 为 0.42%, 77 为 0.11%, 111 为 1.27%。

(2) 其余为电子探针分析, 其中含 BaO 的有 32 为 4.16%, 36 为 6.42%, 40 为 3.04%, 45 为 3.07%, 50 为 3.64%, 59 为 10.19%, 62 为 7.46%, 65 为 7.79%, 67 为 10.32%, 70 为 8.44%, 85 为 10.31%, 87 为 2.51%, 96 为 0.73%。

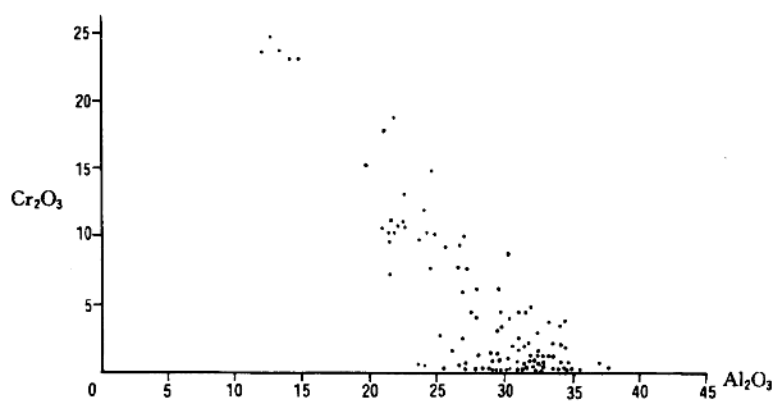


图 1—1 铬铝云母亚族中 Cr—Al 相关性

Fig. 1—1 Relationship between Cr and Al in subgroup of chromo-alumino-mica

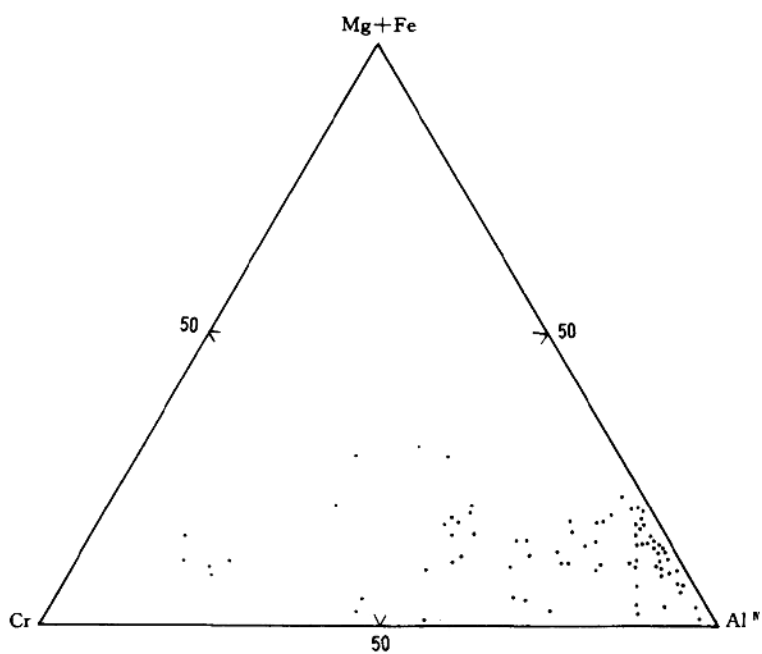


图 1—2 铬铝云母亚族矿物八面体中类质同象

Fig. 1—2 Isomorphism in octahedral sites in subgroup of chromo-alumino-mica

表 1—2 铬铝云母亚族中 Cr—Al 置换程度

Tab. 1—2 Degree of substitution of Cr for Al in subgroup of chromo-alumino-mica

| 编号 | $\frac{\text{Cr}}{\text{Cr}+\text{Al}^{\text{VI}}} \times 100\%$ | 编号 | $\frac{\text{Cr}}{\text{Cr}+\text{Al}^{\text{VI}}} \times 100\%$ | 编号 | $\frac{\text{Cr}}{\text{Cr}+\text{Al}^{\text{VI}}} \times 100\%$ | 编号  | $\frac{\text{Cr}}{\text{Cr}+\text{Al}^{\text{VI}}} \times 100\%$ |
|----|------------------------------------------------------------------|----|------------------------------------------------------------------|----|------------------------------------------------------------------|-----|------------------------------------------------------------------|
| 1  | 81.92                                                            | 31 | 19.66                                                            | 61 | 4.42                                                             | 91  | 1.16                                                             |
| 2  | 78.21                                                            | 32 | 19.66                                                            | 62 | 4.65                                                             | 92  | 1.15                                                             |
| 3  | 83.14                                                            | 33 | 19.08                                                            | 63 | 4.55                                                             | 93  | 1.09                                                             |
| 4  | 76.67                                                            | 34 | 13.74                                                            | 64 | 3.98                                                             | 94  | 1.08                                                             |
| 5  | 75.14                                                            | 35 | 13.76                                                            | 65 | 4.62                                                             | 95  | 1.20                                                             |
| 6  | 53.09                                                            | 36 | 15.66                                                            | 66 | 4.49                                                             | 96  | 1.14                                                             |
| 7  | 51.83                                                            | 37 | 14.62                                                            | 67 | 4.57                                                             | 97  | 0.60                                                             |
| 8  | 54.14                                                            | 38 | 13.33                                                            | 68 | 3.93                                                             | 98  | 0.56                                                             |
| 9  | 43.15                                                            | 39 | 12.78                                                            | 69 | 3.33                                                             | 99  | 0.54                                                             |
| 10 | 41.85                                                            | 40 | 15.13                                                            | 70 | 2.99                                                             | 100 | 0.61                                                             |
| 11 | 37.02                                                            | 41 | 11.28                                                            | 71 | 2.87                                                             | 101 | 0.58                                                             |
| 12 | 37.28                                                            | 42 | 9.40                                                             | 72 | 2.70                                                             | 102 | 0.52                                                             |
| 13 | 35.80                                                            | 43 | 10.42                                                            | 73 | 2.89                                                             | 103 | 0.55                                                             |
| 14 | 37.13                                                            | 44 | 11.73                                                            | 74 | 3.09                                                             | 104 | 0.63                                                             |
| 15 | 36.75                                                            | 45 | 12.33                                                            | 75 | 2.86                                                             | 105 | 0.64                                                             |
| 16 | 40.82                                                            | 46 | 8.56                                                             | 76 | 2.34                                                             | 106 | 0.62                                                             |
| 17 | 34.71                                                            | 47 | 10.19                                                            | 77 | 2.26                                                             | 107 | 0.58                                                             |
| 18 | 36.65                                                            | 48 | 11.03                                                            | 78 | 2.48                                                             | 108 | 0.56                                                             |
| 19 | 32.39                                                            | 49 | 7.91                                                             | 79 | 2.52                                                             | 109 | 0.63                                                             |
| 20 | 32.74                                                            | 50 | 7.39                                                             | 80 | 2.52                                                             | 110 | 0.62                                                             |
| 21 | 28.95                                                            | 51 | 6.95                                                             | 81 | 2.16                                                             | 111 | 0.53                                                             |
| 22 | 32.14                                                            | 52 | 6.22                                                             | 82 | 1.68                                                             | 112 | 0.56                                                             |
| 23 | 35.62                                                            | 53 | 6.75                                                             | 83 | 2.17                                                             | 113 | 0.58                                                             |
| 24 | 27.51                                                            | 54 | 7.24                                                             | 84 | 1.63                                                             | 114 | 0.58                                                             |
| 25 | 28.18                                                            | 55 | 5.91                                                             | 85 | 1.79                                                             | 115 | 0.65                                                             |
| 26 | 24.10                                                            | 56 | 5.59                                                             | 86 | 1.51                                                             | 116 | 0.58                                                             |
| 27 | 24.16                                                            | 57 | 5.14                                                             | 87 | 1.66                                                             | 117 | 0.56                                                             |
| 28 | 25.60                                                            | 58 | 5.33                                                             | 88 | 1.76                                                             | 118 | 0.59                                                             |
| 29 | 23.30                                                            | 59 | 5.33                                                             | 89 | 1.26                                                             |     |                                                                  |
| 30 | 25.81                                                            | 60 | 4.76                                                             | 90 | 1.14                                                             |     |                                                                  |

注：编号同表 1—1。

### 三、云母族中铬铝云母新亚族的建立

#### 1. 云母族矿物分类沿革

在过去的矿物学专著及教科书中认为云母族主要包括白云母亚族、黑云母亚族及锂云母亚族。云母的通式为  $\text{XY}_2\text{--}_3[\text{Z}_2\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ ；由 X、Y、Z 位上广泛类质同象形成的矿物种较多（表 1—3）。

##### (1) 白云母亚族

X 位上  $\text{K}^+$  与  $\text{Na}^+$ 、 $\text{NH}_4^+$  的替代，有白云母、钠云母和铵云母之分；

Y 位上  $\text{Al}^{3+}$  与  $\text{V}^{3+}$  的替代，有白云母、钒云母之分；其中钒云母中  $\text{K}^+$  被  $\text{Ba}^{2+}$  替代，出现钡钒云母；