

资助出版

中国地质大学学术著作出版基金
国家重点基础研究发展规划项目(2006CB403502)
国家自然科学基金重点项目(90714002)

青藏东缘 新生代高钾岩系 及其深源包体的研究

——以云南马关和六合地区为例

■ 魏启荣 著

Study on Cenozoic High-K
Magmatic Rocks and Deep-
derived Xenoliths in Eastern Qinghai-
Tibet Plateau
—A Case Study of Xenoliths at Maguan
and Liuhe in Yunnan

中国地质大学学术著作出版基金

国家重点基础研究发展规划项目(2006CB403502) 资助出版

国家自然科学基金重点项目(90714002)

青藏东缘新生代高钾岩系及其 深源包体的研究

——以云南马关和六合地区为例

魏启荣 著



中国地质大学出版社

ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

内容提要

青藏高原是全球海拔最高的独特构造单元,是全球唯一仍在活动中的大陆碰撞区。晚新生代以来高原大面积整体快速抬升和造山是地球演化史上最重大的事件之一。自 55 Ma 以来的印度与欧亚板块的碰撞以及其后的陆内变形不仅制约了青藏高原的形成和演化,而且还控制着青藏东缘新生代的构造和岩浆活动。

青藏东缘新生代构造活动大体分为 3 个阶段:①40~28 Ma 间大规模的陆内俯冲作用;②28~16 Ma 间大规模的转换伸展作用;③16~0 Ma 间区域性的东西向伸展作用。与之响应,青藏东缘新生代发育了早晚两期高钾岩浆活动:①晚期高钾岩浆活动(16~0 Ma)沿红河断裂带南段和印支块体南部分布。岩性主要为碧玄岩、碱性玄武岩、粗玄岩和粗面岩。该期岩浆产物中产出有丰富的地幔岩包体。马关地区的碧玄岩及其岩管中的地幔岩包体是其典型代表。②早期高钾岩浆活动(40~28 Ma)沿整个金沙江-红河构造带分布。岩石类型主要为正长斑岩、粗面岩、粗安岩和钾玄质煌斑岩。该期岩浆产物中发育有大量的中下壳源包体。大理-剑川地区的富碱斑岩及其中的镁铁质深源包体为其典型代表。

该书以云南马关和大理-剑川地区出露的新生代高钾岩系及其壳幔包体为研究对象,系统阐述了其岩石学、矿物学、岩石地球化学、同位素地球化学特征,以及其形成的构造背景和岩浆成因机制,探讨了青藏东缘新生代高钾岩系中壳幔包体的成因及其岩石圈结构。

图书在版编目(CIP)数据

青藏东缘新生代高钾岩系及其深源包体的研究/魏启荣著. —武汉:中国地质大学出版社, 2009. 6

ISBN 978-7-5625-2371-0

I. 青…

II. 魏…

III. 新生代-钾矿物-矿物包体-研究-云南省

IV. P578

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 128016 号

青藏东缘新生代高钾岩系及其深源包体的研究

魏启荣 著

责任编辑:赵颖弘

技术编辑:阮一飞

责任校对:张咏梅

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

邮政编码:430074

电 话:(027)67883511

传 真:67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

http://www.cugp.cn

开本:787mm×1 092mm 1/16

字数:163 千字 印张:5.875 图版:8

版次:2009 年 6 月第 1 版

印次:2009 年 6 月第 1 次印刷

印刷:湖北地矿印业有限公司

印数:1—500 册

ISBN 978-7-5625-2371-0

定价:48.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

目 录

第一章 绪 论	(1)
第二章 马关地幔岩包体的岩石学和矿物学	(7)
2.1 地幔岩包体的岩相学特征	(7)
2.2 地幔岩包体的矿物化学特征	(7)
2.2.1 橄榄石	(7)
2.2.2 斜方辉石	(10)
2.2.3 单斜辉石	(11)
2.2.4 尖晶石	(15)
第三章 马关地幔岩包体及其寄主岩的地球化学	(17)
3.1 寄主岩的地球化学特征	(17)
3.1.1 主量元素地球化学	(19)
3.1.2 稀土元素地球化学	(20)
3.1.3 微量元素地球化学	(20)
3.2 地幔岩包体的地球化学特征	(22)
3.2.1 单斜辉石的微量元素地球化学	(23)
3.2.2 斜方辉石的微量元素地球化学	(24)
3.3 地幔岩包体及其寄主岩的 Sr - Nd 同位素地球化学特征	(25)
第四章 马关地幔岩包体的平衡温压($T-P$)条件	(29)
4.1 幔源包体温压计的选择	(29)
4.1.1 地质温度计	(29)
4.1.2 地质压力计	(31)
4.2 马关地幔岩包体的平衡温压($T-P$)条件	(32)
第五章 六合-香多深源包体的岩石学和矿物学	(35)
5.1 深源包体的岩石类型和岩相学特征	(35)
5.2 深源包体的矿物化学特征	(37)
5.2.1 石榴石	(46)
5.2.2 辉石	(46)
5.2.3 角闪石	(50)

5.2.4 斜长石·····	(50)
5.2.5 金云母·····	(51)
第六章 六合-香多深源包体及其寄主岩的地球化学·····	(52)
6.1 寄主岩的地球化学特征·····	(52)
6.1.1 主量元素地球化学·····	(52)
6.1.2 稀土元素地球化学·····	(54)
6.1.3 微量元素地球化学·····	(54)
6.2 深源包体的地球化学特征·····	(56)
6.2.1 主量元素地球化学·····	(57)
6.2.2 稀土元素地球化学·····	(59)
6.2.3 微量元素地球化学·····	(59)
6.3 深源包体及其寄主岩的 Sr - Nd 同位素地球化学特征·····	(61)
第七章 六合-香多深源包体的平衡温压($T-P$)条件·····	(65)
7.1 地质温压计·····	(65)
7.2 六合-香多深源包体的平衡温压($T-P$)条件·····	(66)
第八章 壳幔包体的成因及其岩石圈结构·····	(68)
8.1 马关地幔岩包体的成因与上地幔结构·····	(68)
8.2 六合-香多深源包体的成因与中-下地壳结构·····	(70)
8.3 六合-香多深源包体中石榴石生长环带的发现及其意义·····	(71)
第九章 主要结论·····	(72)
参考文献·····	(74)
附表 矿物缩写符号·····	(83)
中英文摘要·····	(84)
图版说明及图版·····	(88)

第一章 绪论

青藏高原是全球海拔最高的独特构造单元,是全球唯一仍在活动中的大陆碰撞区。近几百万年来青藏高原大面积整体快速抬升和造山成为地球演化史上最重大的事件之一。显然,青藏高原是研究岩石圈形成演化、探讨地壳运动和造山机制的理想区域。晚新生代以来的高原隆起对高原及其毗邻地区自然环境的演变和分化具有深刻的影响。高原是东亚季风区气候变化的敏感地带,并与全球环境变迁息息相关。高原自然环境和生态系统的演变在全球生物学和地学研究中占有特殊的地位,是我国乃至全球山地生物物种最珍贵的基因库。现今高原内部及周边异常活跃的构造运动,强烈地影响着该地区动、植物赖以生存与发展的自然环境、资源和能源的配置及各种自然灾害的发生。因此,青藏高原是我国地学、生物学、资源与环境科学很有特色的、难得的天然实验室,对解决大陆地球动力学和全球环境变化问题具有重要的意义。

自 55 Ma 以来的印度板块与欧亚板块的碰撞及其后的陆内变形不仅制约了青藏高原的形成和演化(潘桂棠等,1990;Yin *et al.*, 1996, 2000),而且还控制着藏东新生代岩浆活动(Yin, 2000;Wang J H *et al.*, 2001)、盆地发育(Zhou *et al.*, 1999; Horton *et al.*, 1999)和成矿作用(马鸿文,1990;王江海等,1999, 2001;黄智龙等,1999;薛春纪,2000)。

在藏东地区,主要沿囊谦逆冲构造带和金沙江-红河走滑构造带发育一系列大小不等的新生代盆地、广泛的挤压冲断和走滑、大规模的岩浆活动和成矿作用(图 1-1)。在印度-欧亚板块碰撞诱导的印支块体向东南方向大规模挤出的构造背景下,块体在走滑挤出的过程中诱发了大规模的陆内俯冲(Wang J H *et al.*, 2001);在陆内俯冲过程中产生强烈的壳幔相互作用,并以大规模的带状岩浆活动和成矿作用表现出来。在构造上,藏东地区新生代构造活动大体可划分为 3 个阶段(图 1-2):① 40~28 Ma 间大规模的陆内俯冲作用阶段(Wang E & Burchfiel B C, 1997;Meyer *et al.*, 1998;Wang J H *et al.*, 2001)。表现在古近纪时期,藏东北部沿巴塘-丽江断裂系发生的压缩变形和南部兰坪-思茅褶皱带的形成上(潘桂棠等,1990;Wang E *et al.*, 1998)。② 28~16 Ma 间大规模的转换伸展作用阶段(Harrison *et al.*, 1996;Wang J H *et al.*, 2001)。红河剪切带的转换伸展活动即是这期构造活动的表现形式之一。③ 16~0 Ma 间区域性的东西向伸展作用阶段(Armijo *et al.*, 1989;Masek *et al.*, 1994;Harrison *et al.*, 1995;Rangin *et al.*, 1995;Chen & Kao, 1996;Wang & Burchfiel *et al.*, 2001;Wang J H *et al.*, 2001)。沿红河断裂带发育的一系列南北向正断层是这期构造活动的产物。该东西向伸展作用不只局限于藏东地区,它还广泛分布在东亚地区,如华北地区南北向的山西地堑(Wang J H *et al.*, 2001)、西伯利亚东南部的贝加尔裂谷(Delvaux *et al.*, 1997)都是这期东西向伸展作用的结果。显然,绝大多数东亚裂谷均伴有玄武岩浆的喷发和源于地幔深度的地震,表明伸展作用与软流圈流动有关(Masek *et al.*, 1994;Flower *et al.*, 1998;Hoang & Flower, 1998)。青藏地区和印支地块上出露的 16~0 Ma 高钾岩浆活动的构造背景可能代表在印度-亚洲板块一次重要的地球动力学背景的转变。

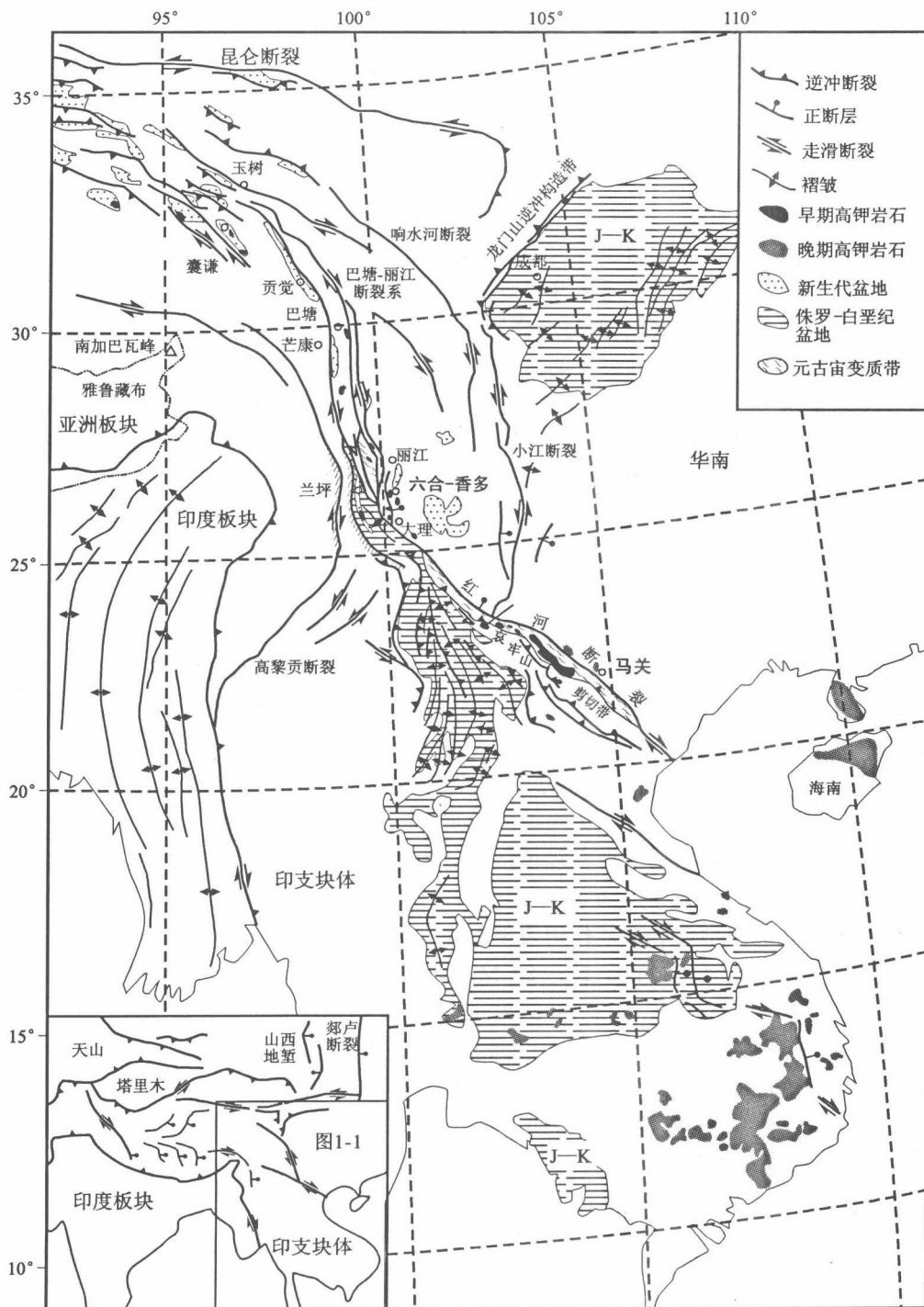


图 1-1 青藏东缘地区及邻区区域地质图

(据 Wang J H et al., 2001 修编)

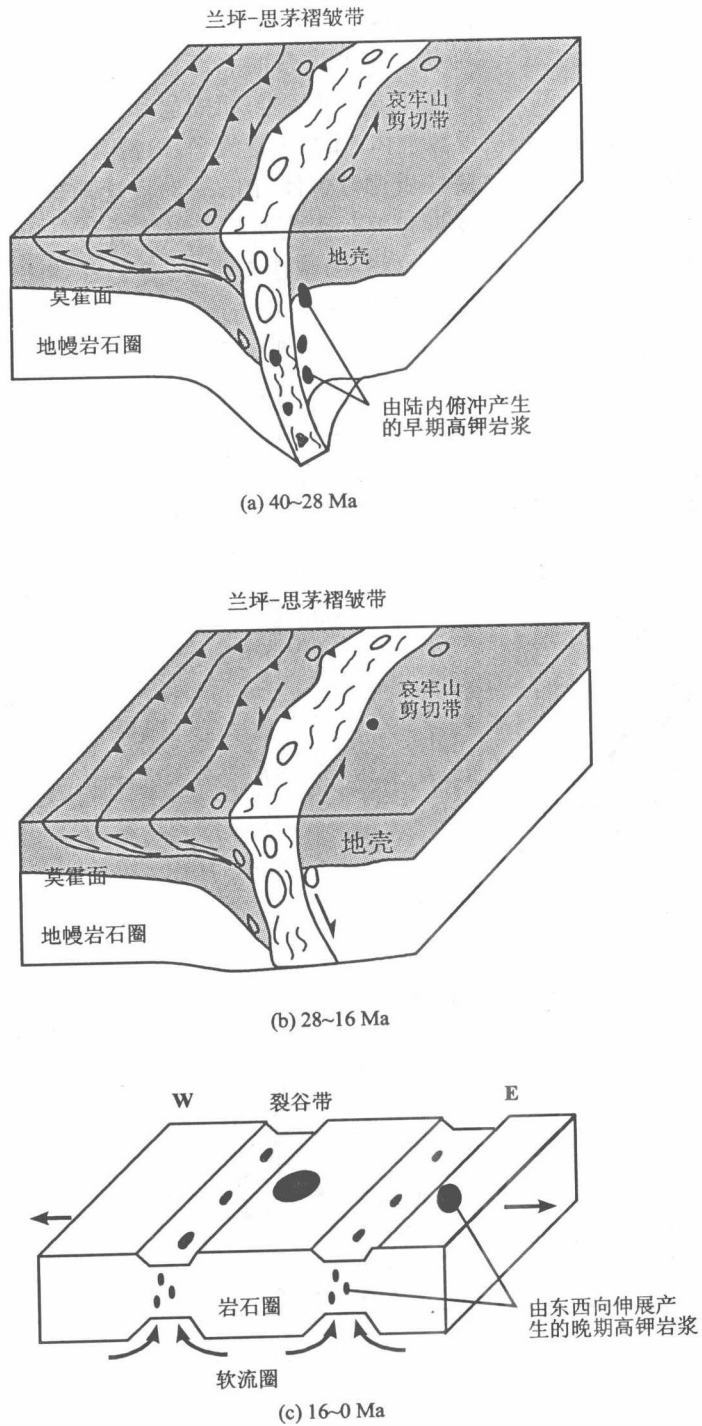


图 1-2 青藏东缘和东南亚新生代构造活动三阶段模型

(据 Wang J H *et al.*, 2001 修编)

- (a) 陆内俯冲作用阶段及早期高钾岩浆活动;
- (b) 转换伸展作用阶段及岩浆活动间歇期;
- (c) 东西向伸展作用阶段及晚期高钾岩浆活动

在藏东地区发育早晚两期与新生代构造活动相对应的高钾岩浆活动。①早期高钾岩浆活动(40~28 Ma)沿整个金沙江-红河构造带及该带的北部延长带(巴塘-丽江断裂带和囊谦逆冲断裂带)分布(图 1-1),其产物为正长岩、粗面岩、粗安岩和钾玄质煌斑岩。在该套岩浆岩系的若干地段发现含大量镁铁质深源包体,如在云南大理、洱源县北衙-鹤庆县六合、剑川及战河 4 个高钾岩系群中出露大量的镁铁质深源包体(图 1-3)。这期岩浆活动在时空上与该区陆内俯冲作用所引起的转换压缩变形相关。②晚期高钾岩浆活动(16~0 Ma)沿红河断裂带南段和印支块体的南部分布(图 1-1),岩性为碱性玄武岩、碧玄岩、粗玄岩和粗面岩。这套岩石含大量的地幔岩包体,如在云南马关县八寨-木厂街地区出露的碧玄岩岩管中发现地幔橄榄岩包体(图 1-4)。这期高钾岩浆活动在时空上明显受该区东西向伸展构造的制约。系统的同位素定年研究(Wang J H *et al.*, 2001)表明,自新近纪(约 16 Ma)以来,印支块体内的玄武质板内岩浆活动基本上是连续的,该时期与南中国海海底扩张的停止和沿金沙江-红河剪切带在约 16 Ma 转换伸展的停止是同时的。在早晚两期岩浆活动之间(28~16 Ma),存在明显的岩浆活动间歇期[图 1-2(b)]。

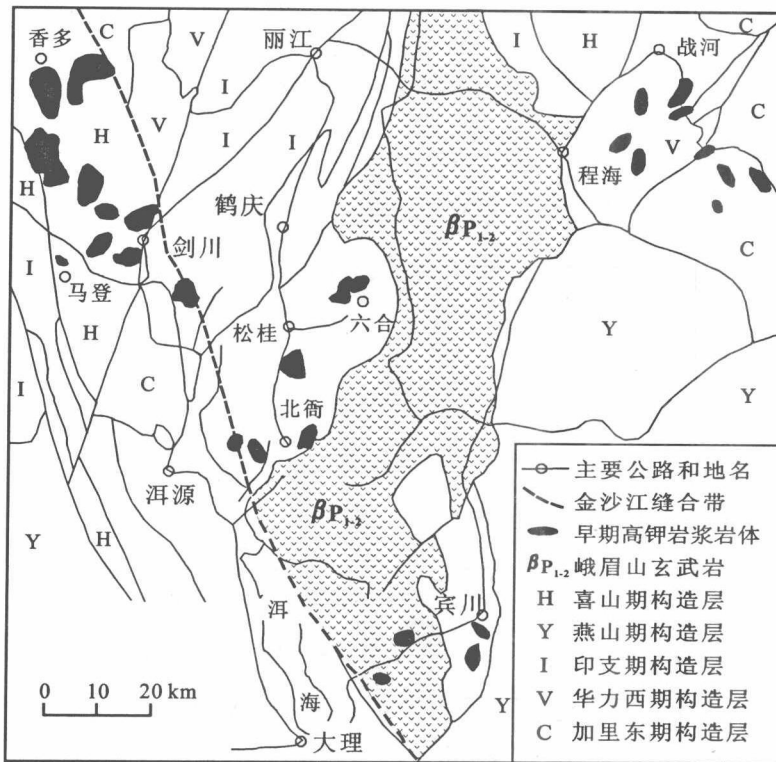


图 1-3 云南剑川-大理地区地质略图

(据邓万明等, 1998 修编)

在藏东地区以六合和马关为代表的新生代早晚两期高钾岩浆岩中, 镁铁质深源包体和超基性橄榄岩包体比较新鲜且非常发育, 为我们开展该地区大陆岩石圈组成、结构和热状态及岩浆的起源研究提供了可能性。显然, 对六合和马关深源包体及其寄主岩的研究, 有助于揭示该地区大陆动力学机制、大陆岩石圈组成和热结构。

六合、香多深源包体及其寄主岩出露于与红河-哀牢山大型左旋走滑剪切带伴生的古近纪小型拉分盆地中,分属大理-剑川地区剑川、战河、北衙-六合及大理4个岩群中的北衙-六合岩群和剑川岩群(图1-3)。寄主岩岩性为透辉正长斑岩、二长斑岩、透辉正长岩和石英二长斑岩。寄主岩的K-Ar法年龄为26.3~36.7 Ma(张玉泉等,1997), $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法年龄为28~40 Ma(Wang J H *et al.*, 2001)。镁铁质深源包体在寄主岩中杂乱分布,大小不一,大者6~8cm,小者1~2cm,平均3~4cm(图版I-A-I-H),且形状变化大,主要呈浑圆状和次棱角状。包体与寄主岩之接触界面清晰,个别包体可见约2mm宽的冷凝边。

马关高钾火山岩系沿一系列NW向断裂产出(图1-4)。围岩地层时代为寒武纪-奥陶纪。寄主岩为碱性玄武岩、碧玄岩、粗玄岩和粗面岩,但以碧玄岩为主。碧玄岩呈岩管群沿断裂分布。碧玄岩的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄为(12.4±0.2)~(11.9±0.3)Ma(Wang J H *et al.*, 2000),属新近纪。包体岩性为地幔橄橄榄岩,主要产于碧玄岩岩管中。包体呈浑圆状、椭球状,大小不一,直径在1~30cm不等(图版II-A-II-H)。

对早期高钾寄主岩系及其中深源包体的研究已有报道(如:蔡新平,1992;张玉泉等,1997,

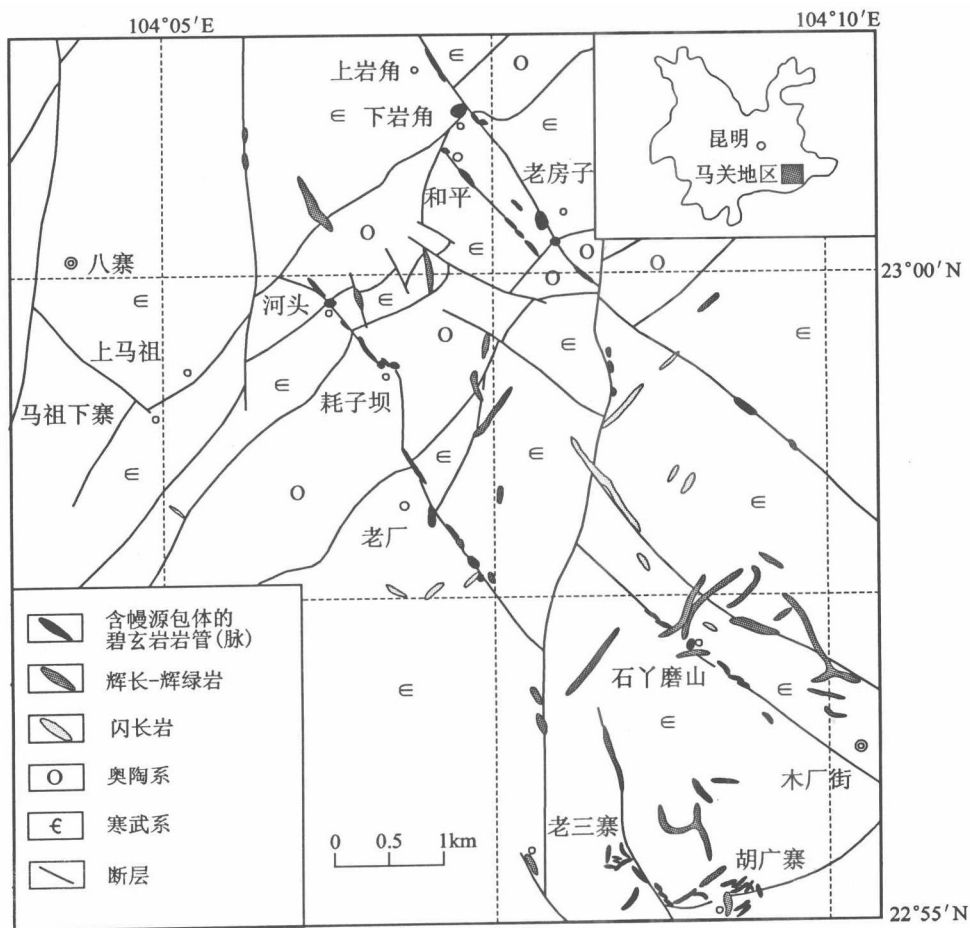


图1-4 云南马关八寨-木厂街地区地质略图

(据云南地矿局第一地质大队,1976 修编)

2000; 邓万明等, 1998a, 1998b; 刘显凡等, 1999; 吕伯西等, 1999; 王江海等, 2002), 但对包体的认识尚有分歧, 分歧主要集中在包体性质及与寄主岩的关系等问题上。归纳起来大体有如下 4 种认识: ①含石榴石和透辉石的超镁铁质包体为原始地幔部分熔融的产物, 包体中的微晶玻璃来自包体成岩后地幔去气产生的交代流体; 流体中聚集了碱质、大离子亲石元素以及成矿元素。这些包体也孕育了碱性岩浆(刘显凡等, 1999)。②包体为下地壳变质岩(蔡新平, 1992; 邓万明等, 1998a, b)。③碱性岩和辉石岩包体代表的是富集地幔顶部——二辉橄榄岩部分熔融形成的碱性超基性-基性岩、钙碱性岩片和楔形体(吕伯西等, 1999)。④包体为中、下地壳变质岩(Wang J H *et al.*, 2002; 王建等, 2002)。

与早期高钾岩系相比, 对晚期高钾岩系及其中的橄榄岩包体的研究较少因而显得非常薄弱。20 世纪 60 年代, 梅厚均(1966)在云南马关碧玄岩岩管中发现了地幔岩包体。直至 20 世纪 90 年代中后期, 舒小辛(1995)、孙宏娟(2000)和 Wang J H *et al.* (2002)才先后对马关高钾岩系的成因和年代学及其地幔岩包体开展进一步的研究, 但对这些包体的成因及其所指示的大陆岩石圈组成、热结构状态等方面的探讨仍十分缺乏。

基于对上述问题的考虑, 笔者拟用新获得的大量深源包体和寄主岩的矿物电子探针分析结果, 寄主岩的主量元素、稀土元素和微量元素分析结果, 以及对深源包体单矿物和全岩的稀土元素、微量元素和 Rb - Sr、Sm - Nd 同位素的分析结果, 探讨该地区大陆岩石圈性质和热结构等方面的科学问题。

第二章 马关地幔岩包体的岩石学和矿物学

2.1 地幔岩包体的岩相学特征

在云南马关八寨-木厂街地区发育的碧玄岩岩管中,发育了地幔岩包体。其主要岩石类型包括尖晶石二辉橄榄岩、尖晶石方辉橄榄岩、尖晶石单辉橄榄岩、尖晶石橄榄二辉岩和辉石岩以及金云母、单斜辉石、石榴石和透长石巨晶。本次所获样品主要为尖晶石二辉橄榄岩包体。

尖晶石二辉橄榄岩:手标本呈墨绿色,块状构造。主要为变晶结构,尤以镶嵌结构(图版Ⅲ-A、Ⅳ-C)为主,三连点发育。局部可见碎斑结构(碎斑为斜方辉石大斑晶)。矿物组合为橄榄石(Ol)+斜方辉石(Opx)+单斜辉石(Cpx)+尖晶石(Spl)及其粒间组分。此外,偶尔出现金云母和角闪石。橄榄石呈粒状,晶形不完整,发育扭折带(图版Ⅲ-B、Ⅲ-C),粒径大多为0.5~1.5mm,在岩石中的体积百分含量(下同)为60%~70%。斜方辉石(图版Ⅲ-D)呈板状、短柱状,晶面大多因遭受熔蚀而被破坏,淡褐色—浅棕色,解理缝细而疏,大多呈平行消光,粒径为0.25mm×0.5mm~0.75mm×1.5mm,最大颗粒可达3mm×6mm,含量约为15%。单斜辉石(图版Ⅲ-E)多表现为不规则板状,浅绿色,解理发育,解理缝粗而多,粒径多为0.25mm×0.25mm~0.5mm×0.75mm,含量为6%~10%。尖晶石(图版Ⅲ-F)呈棕色—棕褐色,形状十分不规则,多呈冬青树叶状,粒径一般为0.25~0.75mm,含量约为4%。此外,岩石中还含极少量的棕色—棕红色长条状金云母(Phl)(图版Ⅳ-A)。因此,从上述岩相特征可知,尖晶石二辉橄榄岩包体已遭受了明显的塑性变形,并经历了较强的重结晶和流体交代。

寄主岩:马关地幔岩包体的寄主岩主要为碧玄岩。碧玄岩呈墨黑色,块状构造,杏仁体极其发育。岩石为少斑结构。斑晶主要为碱性长石和辉石,含量极少。辉石斑晶呈短柱状,具有明显的成分环带(图版Ⅳ-D),粒径为0.01~0.5mm。碱性长石呈板状,聚片双晶发育,粒径为0.15~0.7mm;基质呈由长石和辉石及铁质和玻璃质构成的间粒间隐结构(图版Ⅳ-B)。基质长石呈针状,粒径为0.005~0.1mm,含量约为40%~50%。基质单斜辉石呈粒状,粒径为0.01~0.02mm,含量约为30%。铁质呈黑色粒状,含量约为10%。

2.2 地幔岩包体的矿物化学特征

由于地幔岩包体的矿物成分保存有深部地质过程的化学信息,故研究包体中矿物的化学成分,有助于揭示该地区岩石圈地幔的热结构。

2.2.1 橄榄石

橄榄石是尖晶石二辉橄榄岩包体中最主要的组成部分,其含量和 $Mg^{\#}$ 值能直接反映地幔的性质和热状态,即地幔岩的饱和和耐熔性质。马关地幔橄榄岩中橄榄石的电子探针分析结果列于表2-1中。

表 2-1 马关尖晶石相橄榄岩包体中橄榄石的电子探针分析结果(%)

样品	MG01-3	MG01-6	MG01-10	MG01-11	MG01-18	MG01-13	MG01-19
岩石类型	二辉橄榄岩	二辉橄榄岩	二辉橄榄岩	二辉橄榄岩	二辉橄榄岩	方辉橄榄岩	方辉橄榄岩
点数	4	2	2	4	2	2	3
SiO ₂	41.29	40.91	41.33	41.04	41.24	40.68	40.94
TiO ₂	0.05	—	—	0.01	0.03	0.12	0.02
Al ₂ O ₃	—	—	0.02	—	—	0.04	—
Cr ₂ O ₃	0.03	0.04	0.01	0.03	0.02	0.05	—
MgO	48.77	48.64	48.94	48.60	48.43	48.20	48.37
CaO	0.06	0.04	0.05	0.05	0.07	0.11	0.06
MnO	0.17	0.10	0.10	0.11	0.14	0.13	0.12
FeO*	9.63	9.90	9.15	9.64	9.64	9.48	9.58
NiO	0.43	0.44	0.46	0.43	0.35	0.38	0.42
Na ₂ O	0.04	0.02	0.01	0.01	—	0.03	0.02
K ₂ O	—	0.03	—	0.02	—	—	0.01
总计	100.47	100.12	100.07	99.94	99.92	99.22	99.54
O=4	阳离子数						
Si	1.007	1.003	1.009	1.006	1.010	1.004	1.008
Ti	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.000
Al	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000
Cr	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000
Mg	1.773	1.778	1.781	1.776	1.769	1.774	1.774
Ca	0.002	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003	0.002
Mn	0.004	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.002
Fe	0.197	0.203	0.187	0.198	0.198	0.196	0.197
Ni	0.009	0.009	0.009	0.009	0.007	0.008	0.008
Na	0.002	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001
K	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
总计	2.996	2.999	2.991	2.995	2.991	2.993	2.992
Mg#	90.02	89.75	90.51	89.99	89.96	90.06	90.00
Cr#	67.50	50.00	29.87	40.00	100.00	70.27	0.00
Mo	0.08	0.06	0.07	0.06	0.10	0.15	0.09
Fo	89.93	89.72	90.47	89.94	89.92	90.07	89.96
Fa	9.97	10.25	9.49	10.01	10.04	9.94	10.00
Li	0.41	0.43	0.46	0.43	0.35	0.39	0.43
Te	0.18	0.10	0.11	0.11	0.15	0.14	0.12

注: Mg# = $100 \times \text{Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$, Cr# = $100 \times \text{Cr} / (\text{Cr} + \text{Al})$, FeO* (total iron) = $\text{FeO} + 0.9 \times \text{Fe}_2\text{O}_3$ (下同)。

从表 2-1 看出,马关尖晶石二辉橄榄岩包体中橄榄石的 Fo 值较高且成分稳定,其 Fo 值在 89.7~90.5 之间变化,表明马关地幔岩包体中的橄榄石以贵橄榄石为主,部分为镁橄榄石。橄榄石的 $Mg^{\#}$ 值(89.7~90.5)低于 Kappvaal 克拉通岩石圈地幔橄榄岩中橄榄石的 $Mg^{\#}$ 值 [92.0(Boyd & Mertzman, 1987)] 而与中国东部新生代 I 型包体中橄榄石的 $Mg^{\#}$ 值(87.4~91.2)上限值相似(郑建平, 1999),并与大洋岩石圈地幔橄榄岩中的 $Mg^{\#}$ 值 [89.0~91.0(Griffin, *et al.*, 1999)] 相近。因此,马关地幔橄榄岩为相对耐熔的地幔,并具有大洋岩石圈地幔的特征。表 2-1 和图 2-1 显示,橄榄石中 TiO_2 的含量在 0.01%~0.12% 之间变化, CaO 为 0.04%~0.11%, Cr_2O_3 为 0.01%~0.05%。可见,橄榄石中 TiO_2 、 CaO 、 Cr_2O_3 的含量很低且成分变化较大。从图 2-1 上还看出,橄榄石的 $Mg^{\#}$ 值与其 TiO_2 、 CaO 和 Cr_2O_3 之间无相关性。此外,图 2-1 还显示出,该橄榄石中的 $Mg^{\#}$ 值和 NiO 含量都十分稳定且较高。橄榄石中 CaO 含量较低,则暗示该深源包体所代表的地幔温度较低。

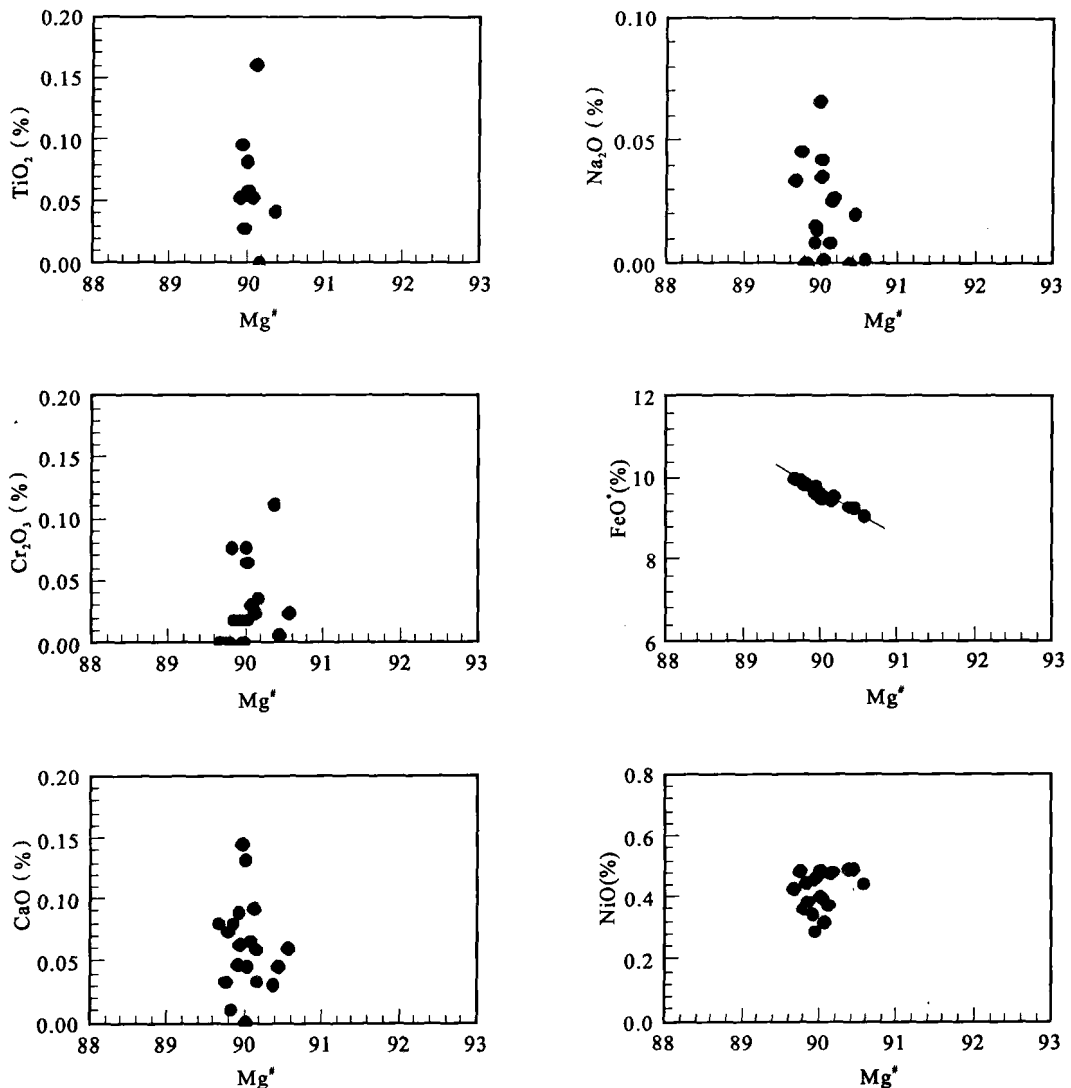


图 2-1 马关地幔岩包体中橄榄石的 $Mg^{\#}$ 值与氧化物成分变异图

2.2.2 斜方辉石

斜方辉石也是马关尖晶石二辉橄榄岩包体中的主要矿物。表 2-2 列出了马关尖晶石二辉橄榄岩中斜方辉石的电子探针分析结果。

表 2-2 马关尖晶石二辉橄榄岩包体中斜方辉石的电子探针分析结果(%)

样品	MG01-3	MG01-6	MG01-7	MG01-10	MG01-11	MG01-18	MG01-13	MG01-19
点数	4	2	2	2	4	2	3	3
SiO ₂	55.56	55.90	55.42	55.67	55.47	55.26	54.36	55.29
TiO ₂	0.14	0.19	0.07	0.15	0.15	0.12	0.17	0.19
Al ₂ O ₃	4.32	4.23	4.37	4.83	4.36	4.19	5.70	5.12
Cr ₂ O ₃	0.37	0.40	0.29	0.31	0.34	0.36	0.56	0.26
FeO*	6.18	6.00	6.31	5.65	6.00	6.18	6.05	5.98
MgO	32.95	32.96	32.59	32.72	32.68	32.61	31.49	32.42
CaO	0.64	0.68	0.66	0.73	0.64	0.67	1.14	0.81
MnO	0.14	0.10	0.14	0.18	0.17	0.14	0.14	0.14
NiO	0.09	0.06	0.07	0.07	0.05	0.08	0.08	0.09
Na ₂ O	0.10	0.06	0.10	0.11	0.11	0.08	0.16	0.11
K ₂ O	0.00	0.00	0.01	0.04	0.01	0.01	0.01	0.00
总计	100.49	100.58	100.03	100.46	99.98	99.70	99.86	100.41
O=6	阳离子数							
Si	1.908	1.916	1.913	1.908	1.913	1.913	1.882	1.899
Ti	0.004	0.005	0.002	0.004	0.004	0.003	0.004	0.005
Al	0.175	0.171	0.178	0.195	0.177	0.171	0.233	0.207
Cr	0.010	0.011	0.008	0.008	0.009	0.010	0.016	0.007
Fe ³⁺	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	1.686	1.684	1.677	1.671	1.680	1.683	1.625	1.659
Ca	0.024	0.025	0.025	0.027	0.024	0.025	0.042	0.030
Mn	0.004	0.003	0.004	0.005	0.005	0.004	0.004	0.004
Fe ²⁺	0.172	0.172	0.182	0.162	0.173	0.179	0.175	0.172
Ni	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003
Na	0.006	0.004	0.007	0.007	0.007	0.006	0.011	0.007
K	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000
总计	3.996	3.993	3.998	3.991	3.995	3.996	3.994	3.993
Mg [#]	90.48	90.73	90.21	91.16	90.65	90.39	90.26	90.63
Cr [#]	5.42	6.03	4.25	4.05	5.04	5.40	6.23	3.31
Wo	1.25	1.33	1.30	1.45	1.26	1.32	2.30	1.59
En	89.39	89.39	88.85	89.59	89.27	89.00	88.00	88.98
Fs	9.36	9.28	9.86	8.97	9.47	9.68	9.70	9.42

根据斜方辉石的电子探针成分(表 2-2)计算出的斜方辉石的 En 分子(%)为 88.0~89.6, Mg[#] 值在 90.2~91.2 之间变化, Cr[#] 值在 3.31~6.23 之间变化, TiO₂、Al₂O₃、Cr₂O₃、FeO^{*}、CaO 含量分别为 0.07%~0.19%、4.23%~5.70%、0.26%~0.56%、5.65%~6.31% 和 0.64%~1.14%, 而 MnO、NiO、Na₂O 含量则分别为 0.10%~0.18%、0.05%~0.09% 和 0.08%~0.16%。图 2-2 显示, 斜方辉石中的 Mg[#] 值非常稳定, 而 Mg[#] 值与 FeO^{*} 则显示明显的负相关关系。其他氧化物与 Mg[#] 值之间基本无相关关系。

2.2.3 单斜辉石

地幔岩中的单斜辉石通常含有丰富的深部构造作用的信息(Seyler & Bonatti, 1994; Rivalenti, *et al.*, 1996)。因此, 研究单斜辉石的化学成分有助于揭示以马关地幔岩为代表的藏东地区岩石圈地幔的性质。表 2-3 列出了马关地区 8 个尖晶石二辉橄榄岩包体中 22 个点的单斜辉石电子探针分析结果。

表 2-3 马关尖晶石二辉橄榄岩中单斜辉石的电子探针分析结果(%)

样品	MG01-3	MG01-6	MG01-7	MG01-10	MG01-11	MG01-18	MG01-13	MG01-19
点数	4	2	2	2	4	2	3	3
SiO ₂	52.49	52.12	52.50	52.24	52.41	52.46	51.71	51.98
TiO ₂	0.53	0.54	0.34	0.53	0.57	0.51	0.40	0.61
Al ₂ O ₃	6.44	6.20	6.00	6.70	6.89	6.44	7.30	7.30
Cr ₂ O ₃	0.75	0.87	0.60	0.79	0.98	0.71	0.94	0.59
FeO [*]	2.58	2.59	2.67	2.65	2.54	2.50	3.14	2.81
MgO	15.12	15.26	15.30	15.20	14.77	15.22	15.74	14.99
CaO	20.47	20.47	20.76	19.97	19.99	20.78	18.71	19.60
MnO	0.09	0.05	0.07	0.09	0.12	0.12	0.13	0.07
NiO	0.07	0.11	0.06	0.09	0.07	0.01	0.03	0.05
Na ₂ O	1.57	1.55	1.52	1.62	1.80	1.57	1.46	1.76
K ₂ O	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
总计	100.11	99.77	99.84	99.88	100.14	100.32	99.56	99.76
O=6	阳离子数							
Si	1.892	1.887	1.898	1.887	1.889	1.888	1.872	1.878
Ti	0.014	0.015	0.009	0.015	0.016	0.014	0.011	0.017
Al	0.273	0.265	0.256	0.285	0.293	0.273	0.312	0.311
Cr	0.021	0.025	0.017	0.023	0.028	0.020	0.027	0.017
Fe ³⁺	0.010	0.017	0.020	0.002	0.001	0.014	0.001	0.008
Mg	0.812	0.823	0.824	0.818	0.793	0.816	0.849	0.807
Ca	0.791	0.794	0.804	0.773	0.772	0.801	0.726	0.759
Mn	0.003	0.002	0.002	0.003	0.004	0.004	0.004	0.002
Fe ²⁺	0.068	0.062	0.061	0.079	0.075	0.062	0.095	0.077
Ni	0.002	0.003	0.002	0.003	0.002	0.000	0.001	0.002
Na	0.110	0.109	0.106	0.113	0.126	0.109	0.103	0.123
K	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
总计	3.996	4.002	4.000	4.001	3.999	4.001	4.001	4.001
Mg [#]	91.27	91.31	91.09	91.09	91.22	91.57	89.93	90.48
Cr [#]	7.26	8.64	6.34	7.31	8.74	6.89	7.97	5.13
Wo	47.25	47.25	47.55	46.22	46.95	47.62	43.35	46.15
En	48.54	49.00	48.73	48.92	48.25	48.51	50.75	49.08
Fs	4.22	3.75	3.73	4.86	4.81	3.88	5.88	4.77

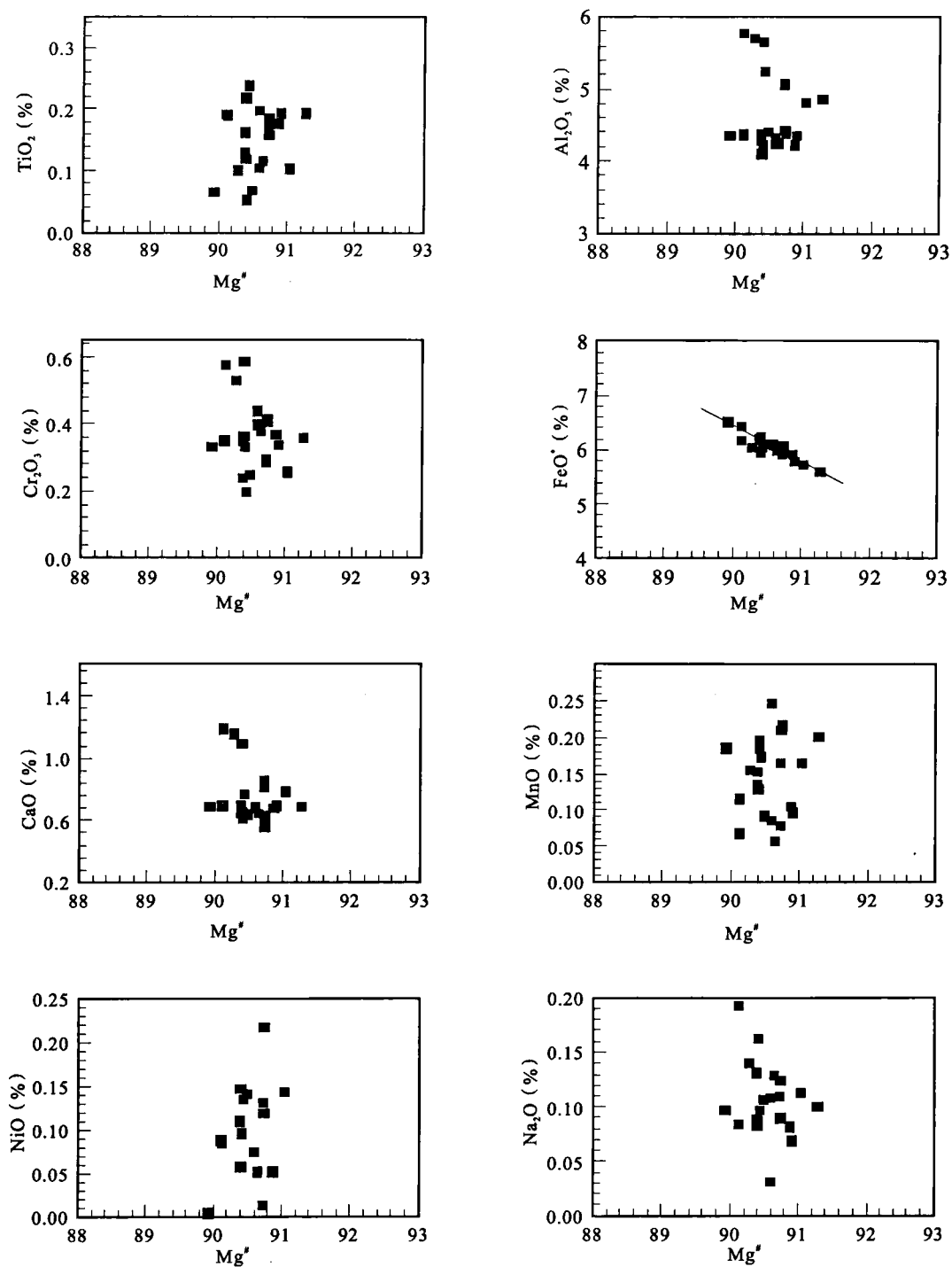


图 2-2 马关地幔岩包体中斜方辉石的 Mg[#] 值与氧化物成分变异图