

高等学校试用教材

730917

岩石化学

邱家骧 林景仟 主编



地质出版社

高等学校试用教材

岩石化学

邱家骧 林景仟 主编

地质出版社

※ ※ ※

本书由邓晋福主审，经地质矿产部岩石学课程教学指导委员会岩浆岩课程指导组于1988年12月召开全体会议审稿，同意作为高等学校试用教材出版。

※ ※ ※

高等学校试用教材

岩石化学

邱家骧 林景仟 主编

责任编辑：赵俊磊

地质出版社出版

（北京和平里）

地质出版社印刷厂印刷

（北京海淀区学院路29号）

新华书店总店科技发行所发行

开本：787×1092¹/₁₆ 印张：17.75 字数：420000

1991年3月北京第一版·1991年3月北京第一次印刷

印数：1—1505册 定价：4.60元

ISBN 7-116-00783-7/P·669

前 言

岩石化学这一学科领域的原理和知识,在国内外应用日广,研究日深,发展很快。而我国到目前为止,尚没有一本正式的岩石化学方面教材出版,与我国地质事业的发展极不相称,也不能适应我国地质教学和科研的要求。

1987年春在苏州召开的岩石学课程教学指导委员会期间,全国高等学校地质专业岩石学代表们普遍建议,应立即编写一本《岩石化学》,以解决教学之急需,并委托武汉、长春两个地质学院邱家骧、林景仟、王人镜、谭东娟负责编写。

编者经过一年的努力,完成了《岩石化学》初稿。在1988年12月在昆明召开的岩浆岩课程教学指导组会议上,与会代表对《岩石化学》初稿进行了评审。会后,编者又对初稿进行了修改。

这本《岩石化学》的服务对象是:岩矿、地化、地质、矿产、勘探、构造等专业的大学生与研究生以及地质战线上广大的教学、科研、生产工作者。

编写《岩石化学》的原则是:重视基础理论,基本知识,基本方法;强调科学的先进性,内容的系统性,教学的适应性;重视理论联系实际,方法与实例结合。

因此,《岩石化学》的特点是:既收集了国内外经典的与新颖的研究成果,也总结了编者们自己的体会与经验;既有大量岩浆岩方面的内容,也增加了变质岩、沉积岩方面的资料;既有常见的计算方法,也包括各领域的实际应用。

本书分为四篇,共十七章,自成体系,各具特色。

书中第一篇由第1—5章组成,其主要内容为岩石化学计算方法。这是岩石化学研究的基本内容,也是研究岩石化学的主要基础,因此首先予以介绍。虽然有些计算方法国内已有不少报道,但报道的内容多不够系统,而且有些新方法还缺乏介绍;此外,对影响标准矿物计算精度有关的铁的调整问题与化学成分及计算结果的变异线数学表达式,也在第一篇的开始与结尾进行了介绍。由于岩石化学计算方法较多,而且日新月异,本书只对目前国内外应用较广、行之有效的方法,有选择地进行介绍。为了计算方法的系统性,虽然某些方法在一些专著、教材中已作过介绍,但我们仍然在本书中予以阐述,以便利利用本书即能基本解决方法问题,而不需要用更多的精力查找文献,费事费时。

第二篇由第6—10章组成,主要内容为岩石化学在岩浆岩中的应用。过去岩石化学主要翻译国外的专著,特别是苏联的,这些岩石化学侧重于岩石化学计算方法,而对它们的应用则很少阐述。尤其在岩浆岩方面,岩石化学应用很广,但也很少介绍其应用。本书突破了传统岩石化学的范围,用大量篇幅介绍其在岩浆岩中的应用,反映了当代岩石学的研究水平,使之具有化学岩石学的特点,比前人岩石化学有了较大的提高。但限于篇幅,本篇重点放在岩浆岩分类、命名、环境、条件、矿产等方面的应用。

第三篇由第11—15章组成,主要内容为岩浆起源及演变的化学机理。该篇亦为岩石化学在岩浆岩中应用的另一个重要部分,但它侧重于岩浆岩的成因信息,重点阐述了地壳中分布最广的玄武岩、安山岩、花岗岩的来源及演化问题的化学机理。把岩浆岩的研究上升

为岩理学高度，反映了岩浆岩这一学科的前沿水平，它体现了本书理论联系实际及重视基础理论的特点，也是其它岩石化学书中基本见不到的内容。

第四篇由第16—17章组成，主要为沉积岩与变质岩的化学成分研究。过去岩石化学内容侧重于岩浆岩方面的研究，变质岩内容较少，而在沉积岩中应用则基本上是个空白。本书试图通过本篇内容，弥补变质岩应用方面的不足，填补沉积岩应用方面的空白。这是本书内容方面的一个新的尝试，也是本书体系方面的一个新的探索。虽然与变质岩及沉积岩石学内容似有不少重复，但专门列入岩石化学者，本书则是首次。其主要目的在于引起地质界的广泛重视，以期抛砖引玉，促进大量岩石化学应用方面新的成果问世，逐步改变某些学科对岩石化学尚不够重视的“冷清”局面。

本书各章编写者具体分工如下：

前言、概述，第一、六、七、八、九章 邱家骧

第二、三、四、五章 王人镜

第十一、十二、十三、十四、十五章 林景仟

第十、十六、十七章 谭东娟

本书在初稿完成后，承蒙在昆明召开的岩浆岩课程教学指导组与会代表张树业、李德惠、颜以彬、茅燕石教授，臧尧令、黄福生、钟自云、陈芝萱、邓文忠、黄月华、傅学明副教授，曾广策、潘鸿迪、陈彰瑞讲师等提供了大量宝贵意见；修改稿完成后，又承蒙主审邓晋福教授认真审阅，使本书能提高质量，及时出版。在此，谨向上述同志致以衷心的感谢！

本书的体系是编者近年教学和科研过程中体会的总结。由于本书的编写时间较紧，编者水平有限，错误之处，在所难免，如蒙赐正，不胜感谢！

编 者

1989年10月

目 录

概述	1
----------	---

第一篇 岩石化学计算方法

第一章 铁的调整	6
一、不需要调整铁的研究内容	6
二、 Fe_2O_3 、 FeO 对标准矿物的影响	8
三、 Fe_2O_3 的上限值	11
四、 Fe_2O_3 、 FeO 调整的常用方法	12
参考文献	14
第二章 全岩特征数值计算法	16
一、扎瓦里茨基岩石化学计算法	17
二、吴利仁岩石化学计算法	22
三、尼格里岩石化学计算法	26
参考文献	29
第三章 标准矿物计算法	30
一、CIPW 标准矿物计算法	30
二、巴尔特-尼格里标准矿物计算法	42
三、花岗岩类自然矿物计算法	49
参考文献	63
第四章 常用的岩石化学指数	64
一、钙碱指数 (CA)	64
二、组合指数 (σ)	65
三、碱度率 (AR)	67
四、分异指数 (DI)	67
五、固结指数 (SI)	68
六、长英指数 (FL) 和镁铁指数 (MF)	70
七、拉森指数 (LI)	70
八、氧化度 (OX°) 及氧化率 (OX)	71
九、镁铁比值 (M/F 、 m/f)	72
十、结晶指数 (CI)	73
十一、风化指数 (WI)	74
参考文献	75
第五章 化学成分变异线的近似数学表达式	76
一、选点法	76
二、平均值法	77
三、最小二乘法	79

四、拟合曲线方程的求法	81
参考文献	84

第二篇 岩石化学在岩浆岩中的应用

第六章 火山岩系列、类型的确定	86
一、火山岩系列的确定	87
二、火山岩类型的确定	91
三、火山岩不同系列、类型的岩石组合与矿物特征	92
参考文献	94
第七章 岩浆岩的化学分类命名	95
一、硅-碱法	95
二、QAPF 法	103
三、 Cr -“ An ”法	111
四、 $Ne-Ol-Hy-Q$ 法	112
五、碱性岩法	114
参考文献	117
第八章 板块构造环境的分析	119
一、玄武岩类	120
二、花岗岩类	127
三、消减带火山岩类	131
四、裂谷带火山岩类	134
五、其它	136
参考文献	210
第九章 岩浆岩物化参数的确定	138
一、地质温度计	140
二、地质压力计	147
三、氧逸度	149
四、密度	151
五、粘度	154
参考文献	155
第十章 含矿性的岩石化学标志	157
一、超镁铁-镁铁质岩浆岩含矿性的化学标志	158
二、中酸性岩浆岩含矿性的化学标志	168
参考文献	155

第三篇 岩浆起源及演化的化学机理

第十一章 镁铁质-超镁铁质岩的化学特征和演变	183
一、玄武质岩石	183
二、蛇绿岩	189
参考文献	193
第十二章 造山带火山岩的化学特征和演变	194

一、钙碱性系列和拉斑玄武岩系列	194
二、钾玄岩系列	199
三、酸性系列	202
参考文献	202
第十三章 花岗质岩石的化学特征及演变	203
一、S型花岗岩	203
二、I型花岗岩	205
三、英云闪长岩-奥长花岗岩系列	207
四、大洋斜长花岗岩	209
五、A型花岗岩	210
参考文献	210
第十四章 部分熔融生成岩浆的化学模型	212
一、化学模型的一般图式	212
二、花岗质低共熔体及其与残留体的混合模式	213
三、非低共熔花岗质岩石系列的成分	217
四、熔融矢量、源趋势及系列趋势	218
五、花岗质岩浆部分熔融成因的定量模拟	220
六、地幔岩石的主要元素组成	222
七、地幔岩部分熔融生成玄武岩浆的化学关系	224
参考文献	225
第十五章 岩浆演化的化学模型	226
一、分离结晶的化学模型	226
二、同化作用和岩浆混合的化学成分模型	236
参考文献	240

第四篇 沉积岩与变质岩的化学成分研究

第十六章 沉积岩的化学成分研究	242
一、沉积岩的化学研究	242
二、风化过程中母岩的化学转化	248
三、沉积环境和成岩环境的化学标志	253
参考文献	256
第十七章 变质岩的化学成分研究	257
一、主要区域变质岩的化学成分	261
二、变质岩原岩恢复的化学标志	261
三、变质交代作用中主要元素的迁移	274
参考文献	276

概 述

化学成分是岩石的主要成分的一种表现形式。岩石化学成分研究的范围日益广泛,其重要性也与日俱增。它已发展为岩石学的重要分支,早已成为一门独立的科学——岩石化学 (petrochemistry)。

岩石化学是研究岩石化学成分特征,比较化学成分之间关系,设计各种岩石化学计算方法,分析岩石及岩系的碱度系列、矿物组合、分类命名、成因来源、演化规律、构造环境、物化条件、有关矿产等问题的一门科学^{①②③④} [1-14]。

岩石化学主要应用于结晶岩(岩浆岩、变质岩)研究中,沉积岩中应用较少。在结晶岩中又以岩浆岩应用广泛,尤其是结晶程度差的火山岩研究中最为常用。它已成为研究岩类学、岩理学的最重要,也是最常用的手段之一。目前我国各地已经积累了大量有关火山岩化学分析数据,但由于岩石化学的研究方法及研究成果的普及、推广不够,因此未能充分利用,甚为可惜。为了迅速改变现状,岩石化学的研究更具有迫切性。

岩石化学的研究,在20世纪70年代以前,侧重于岩石的化学成分特征、分类命名及岩石化学计算方法等岩类学内容;其后,随着岩理学的飞速发展,测试计算技术的日益进步,岩石化学成分的大量积累,岩石化学计算方法与图解的不断改进、创新,电子计算机及数理统计的广泛应用与普及,因此,岩石化学的发展也突飞猛进,其应用随之更为普遍,研究的内容也更加广泛、深入。岩石化学在促使岩石学向岩理学、定量化发展上,起到了极为重要的推动作用与促进作用。

岩石样品经化学分析后,都以氧化物重量百分数 (wt%) 表示,现在则以质量百分数 ($w_b\%$) 表示。岩石化学成分用氧化物表示是人为的,实际上组成岩石的矿物成分并不是以氧化物形式结合的。硅酸盐熔体的近代物理及测试研究也表明,不存在氧化物。但是,用氧化物表示岩石化学成分已形成习惯,而且易于组合成造岩矿物成分,故仍以氧化物表示。岩石以硅酸盐为主,硅酸盐的化学分析一般为13项氧化物: SiO_2 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 FeO 、 MnO 、 MgO 、 CaO 、 K_2O 、 Na_2O 、 P_2O_5 、 H_2O^+ 、 H_2O^- , 为了详细研究某些岩石的成分或某些岩石的特殊需要,还可分析以下项目: ZrO_2 、 Cr_2O_3 、 V_2O_5 、 NiO 、 BaO 、 SrO 、 Li_2O 、 S 、 CO_2 、 F 、 Cl 等,但由于这些项目的含量一般很少,故很少分析。13项氧化物中, H_2O^+ 为结构水、结晶水; H_2O^- 为吸附水。结晶水以 H_2O 形式存在于矿物晶格中 (如石膏 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), 需加热 $200-500^\circ\text{C}$ 或更高才能失去; 结构水以 $(\text{OH})^-$ 或 $(\text{H}_3\text{O})^+$ 形式参加晶体结构中 (如云母、角闪石), 需加热 $300-1300^\circ\text{C}$ 时才开始分解放出; H_2O^- 是以水分子的形式存在于岩石、矿物的表面或孔隙中 (形成薄膜), 当温度升至 $105-110^\circ\text{C}$ 时全部逃逸。 H_2O^+ 是矿物的固有成分, 故参加氧化物质量百分数的总和计算;

① 王人镜, 1981, 岩石化学, 武汉地质学院。

② 赵崇贺, 1983, 岩浆岩化学, 武汉地质学院研究生部。

③ 邱家骥, 1982, 火山岩的研究方法, 冶金地质技术干部学校。

④ 林景仟, 1981, 岩浆岩的岩石化学方法, 长春地质学院。

而 H_2O 不是矿物的固有成分，不参加总和的计算。烧失量是岩石样品加热 1000°C ，灼烧 40 分钟左右所失去的总量，主要包括 CO_2 、 H_2O 及 S、F、Cl 及有机质，也包括 FeO 氧化成 Fe_2O_3 ，以及有机质多时 Fe_2O_3 还原成 Fe_3O_4 ，因此烧失量实际上是岩石在加热过程中各种化学反应所引起的质量的增加与减少之和。岩石化学全分析的总和应在允许的误差范围内，应接近 100%，根据我国地质矿产部规定，总和为 99.3—100.7%，最好在 99.5—100.5% 范围之内。凡是总和大于 101% 者，反映其精度不够，其分析结果不能使用，需要重新分析或另请其它单位分析；凡是分析结果 $< 99\%$ 者，可能某些氧化物缺乏分析，也可能有误差。

除了化学分析方法（湿法）测定氧化物外，还可用电子探针方法取代。电子探针的样品要求是玻璃质，或用天然的火山玻璃，或用把结晶岩石研成碎粉后熔融淬火成的人工玻璃。电子探针方法的优点是，样品仅需要在镜下能见到的大小即可，且测定速度很快；缺点是 Fe_2O_3 与 FeO 不分（全以 FeO 表示），且测不出 H_2O 的含量。此外，还可用荧光光谱方法测氧化物。

采集化学分析样品应注意以下几点：

（1）目的性 在野外地质及薄片观察基础上，根据研究的目的、任务取样，力求少而精，避免浪费。

（2）代表性 采集的样品应能代表所要研究的岩石。对于岩性略有变化的岩石，或按岩性系统取样，或拣块综合取样，才能反映岩体的实际成分。

（3）系统性 为了进行不同岩体或同一岩体在时间、空间上的变化，需要采集系统的岩石样品进行系统的分析。

（4）全面性 对于采集化学分析样品的岩石，均应采集切制薄片的岩石样品，如有需要及有可能，还应同时采集稀土、微量、重砂以及电子探针、同位素等样品，以便综合分析，得出全面性的结论。

（5）真实性 岩石应新鲜，没有风化、蚀变、交代作用；应无外来混入物，不要有杏仁体、包体（捕虏体、析离体、同源、异源包体等）、细脉体等，不新鲜不采，有外来物要严格除尽。总的要求是，岩石样品应能代表岩石的真正成分，宁缺勿滥。在碎样过程中也应注意混样、污染问题，不能用铁乳钵砸样，每加工一个样品前后，应把碎样设备洗净。

岩石化学分析结果应能达到国家统一规定的精度标准。不要送样到精度不够的化学分析单位，以免浪费时间、人力、财力。

要做化学分析的样品，需将岩石粉碎至 200 目，送交化学分析的样品一般要 20 g 左右。

为了更好地应用化学分析结果，更清楚地反映岩石的多方面信息，一般要进行化学计算。岩石化学计算方法随目的而异，或用单项与多项氧化物，或用化学全分析与除去 H_2O 、 CO_2 后的分析结果；或直接用氧化物质量百分数，或换算为分子数、原子数；或以百分数表示，或以分数表达；或计算为指数、参数，或计算为特征数值、标准矿物；或以数字、公式表示，或以图解、相图显示；或以数理统计方法，或用电子计算机处理。

为了对比岩石成分特征及鉴别岩石名称，有些学者把合乎精度要求的、代表性的岩石化学分析结果，按岩石大类、种属分别进行统计，计算出不同岩石的平均化学成分。这种平均值，国外学者统计者较多，但多缺少中国数据；国内学者也有统计，但多限于国内产

出的岩石。

岩石化学的研究是在地质学、构造学、矿物学、晶体化学、岩石学、地球化学、物理化学、矿床学等的研究基础上进行的,并为这些学科服务。故其研究方法是随研究目的及岩类不同而异,也随岩石学进展而不断变化。因此,必须针对具体情况,灵活运用各种岩石化学研究方法,并需不断查阅国内外有关文献,经常采用新的更加有效的方法。在应用中总结经验,摸索规律,以便有所创新,不断进步。

应该指出的是,岩石化学成分不能仅理解为岩石的主要氧化物,还应包括岩石中矿物的化学成分(氧化物),以及岩石与矿物中的稀土、微量、同位素成分。因此,岩石化学是一个总称,应包括狭义的岩石化学,以及矿物化学、地球化学。但是,由于本书限于篇幅,仅进行岩石主要氧化物方面内容的介绍。

还应说明的是,岩石化学虽然应用较广,行之有效,但它并不是万能的。它既不能代替地质分析,也不能代替岩相观察,当然也不能代替岩石实验与岩矿测试。正确的方法是,应把岩石化学的研究,与地质学、岩相学、矿物学、地球化学、实验岩石学、岩石物理化学、板块构造学等学科密切地结合起来,综合分析,才能更深入、更准确的解决地质学、岩石学等问题。不研究地质背景,忽视岩石学研究,仅靠岩石化学成分的计算与投图解决问题,是不全面的,也是不可能很准确的,甚至会得出错误的结论。

更要强调的是,过去不少化学分析的结果不理想,关键是化学分析的样品不能真正反映岩浆岩的真实成分。常见的问题是,岩石样品不新鲜及有外来混入物,这种样品的化学分析结果与岩石实际成分差别很大。不仅岩石的氧化物含量有差错,而且用该岩石测定的稀土、微量、同位素含量值,以及重砂矿物、同位素年龄等结果也都将不正确。不仅浪费了人力、经费,而且误己、误人,前车之鉴不少,应很好吸取教训。因此,采集样品必须新鲜及无外来物,应在看过薄片的基础上再选择化学分析等样品,这是关键问题,不得马虎。

对于已有化学分析样品,也应有所选择,一般硅酸盐分析中 $H_2O^+ > 2\%$, $CO_2 > 0.5\%$,二者总和大于 2.5% 者,反映其风化、蚀变较强,不能使用。为了计算标准矿物,应对 FeO 与 Fe_2O_3 的含量做调整,并去掉分析结果中的 H_2O 、 CO_2 ,再把其它各项氧化物计算成 100% 。

对氧化物的质量百分数($w_B\%$)除以分子量的值,我们仍沿用氧化物的“分子数”这一术语。对于分子数的总和计算成 100% 者,我们称之为分子百分数(分子%);对于分子数的总和计算成 1 者,我们称之为分子分数。对于阳离子(原子)数计算成 100% 或 1 者,我们同样称之为阳离子(原子)百分数或阳离子(原子)分数。

参 考 文 献

- [1] 扎瓦里茨基,1950,王德滋译,1962,火成岩岩石化学导论,科学出版社。
- [2] 契特维利科夫,1956,刘智星译,1963,岩石化学指南,中国工业出版社。
- [3] 里特曼,1973,金秉慧译,1979,火成岩的稳定矿物组合计算法,地质出版社。
- [4] 邱家骧主编,1985,岩浆岩岩石学,地质出版社。
- [5] 王仁民等,1987,变质岩原岩图解判别法,地质出版社。
- [6] 孙鼎、彭亚民主编,1985,火成岩,地质出版社。
- [7] 贺同兴等,1980,变质岩岩石学,地质出版社。

- 〔8〕 叶大年、从柏林主编,1981,岩矿实验室工作方法,地质出版社。
- 〔9〕 王德滋等,1982,火山岩岩石学,科学出版社。
- 〔10〕 Cross, W., et al., 1902, Quantitative classification of igneous rocks, *J. Geol.*, 10, 550—690.
- 〔11〕 Nockolds, S. R., 1954, Average chemical compositions of some igneous rocks, *Bull. Geol. Soc. Am.*, 65, 1007—1032.
- 〔12〕 Robert, F. M. et al., 1977, *Chemical petrology*, Springer-Verlag, New York, Inc.
- 〔13〕 Irvine, T. N. et al., 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks, *Can. J. Earth Sci.*, 8, 523—548.

第一篇 岩石化学计算方法

进行岩石化学的研究，除单项氧化物外，多数要进行合并、计算，包括全岩特征数值、标准矿物、岩石化学指数的计算。因此岩石化学计算是研究岩石化学的基本方法，也是岩石化学研究的必要基础。

为了更准确地计算标准矿物，必需首先调整岩石中的 FeO 与 Fe_2O_3 的含量。过去国内外对这方面重视不够，现在国外研究较多，国内也开始引进。为了让大家有更多的理解与掌握，我们在计算之前首先介绍了铁的调整，以便对调整的范围、内容、影响及方法等有一个全面的了解。

岩石化学研究中，常见岩石化学成分或计算数值中存在一定的消长关系，除了用图解法表示外，现代常定量地用数学方法求出它们的函数关系，用近似数学表达式或经验公式表示。因此，在岩石化学计算之后，我们又写了一章化学成分变异线的近似数学表达式（经验公式），作为第一篇的末尾，以期读者掌握几个常用的表达方法。

第一章 铁的调整

FeO 与 Fe_2O_3 是岩浆岩中主要变价元素。 FeO 与 Fe_2O_3 的含量, 是研究岩浆岩氧化程度及有关特征的常用数据, 又是影响标准矿物计算结果及精度的关键问题。因此 FeO 与 Fe_2O_3 是否要调整及如何调整, 是国际上岩石化学研究中的重点问题之一^[1,2]。

一、不需要调整铁的研究内容

FeO 与 Fe_2O_3 的含量及其比值与岩石的氧化程度有关。因此, 凡是研究岩浆岩氧化程度及有关特征者, 可直接使用化学分析结果中的 FeO 、 Fe_2O_3 的含量, 不必进行调整。调整了反而使氧化程度失真, 导致错误的结论。

反映岩浆岩氧化程度及有关特征者, 主要有以下内容^①:

(一) 岩体产状

岩浆岩所处的深度愈小, 喷发愈强者, Fe_2O_3 愈多, FeO 愈少。举例如下:

Le Maitre(1976) 对侵入岩与火山岩的 $\text{FeO}/(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO})$ 大量统计表明: 侵入岩(9604个) 为0.59; 火山岩(12961个) 为0.56。

Сукин(1962) 对哈萨克斯坦火山岩不同相岩石的 $\text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO})$ 研究表明: 次火山相为0.44, 火山通道相为0.60, 爆发相为0.66。他对天山火山岩的研究也得出相似的结论: 次火山岩为0.4, 熔岩为0.63, 凝灰熔岩为0.66, 凝灰岩为0.69, 熔结凝灰岩为0.73。

(二) 熔岩岩相

熔岩层中顶部相一般氧化、风化最强, 底部相次之, 中部相最差。因此, 一次喷发的熔岩流, 如未经蚀变, 其顶部常为褐红色, 底部常为褐灰色, 中部常为黑色。

以爱达荷州玄武岩^②为例, 如不考虑底部相, 从顶部到中部, Fe_2O_3 、 FeO 有以下变化—— Fe_2O_3 降低, FeO 增高:

岩流顶面向下距离 (ft)	Fe_2O_3	FeO
0	7.3	3.7
3	4.9	6.8
6	3.0	9.0
12	1.6	9.9
25	1.3	10.1

在海相火山岩中, 一般 FeO 较高, 而陆相火山岩中, 一般 Fe_2O_3 较高。

(三) 岩石酸度

酸度愈大的岩石, Fe_2O_3 愈高, 而 FeO 愈低。Le Maitre(1976) 统计不同酸度的岩浆

① 邱家骥, 1982, 火山岩的研究方法, 冶金地质技术干部学校。

② 施洛克, 1956, 层状岩石的层序, 地质出版社。

岩表明, 其 $\text{FeO}/(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ 是不同的:

火山岩: 玄武岩 (3504个) 为0.65, 安山岩 (2575个) 为0.55, 英安岩 (639个) 为0.48, 流纹岩 (664个) 为0.41。

侵入岩: 辉长岩 (1431个) 为0.71, 闪长岩 (865个) 为0.65, 花岗闪长岩 (837个) 为0.64, 花岗岩 (2459个) 为0.56。

库采夫 (1964) 曾统计过不同酸度岩浆岩在 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 上的不同 (图1—1), 同样说明, 酸度愈大, 侵入岩与喷出岩中 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 值均增大, 尤以喷出岩增大明显。

(四) 构造环境

不同构造环境中火山岩的 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 也不同。在相同碱的含量条件下, 岛弧造山带比板块内部 Fe_2O_3 高而 FeO 低。以日本火山岩与夏威夷火山岩

为例, 它们的 $\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{3+} + \text{Fe}^{2+} + \text{Mn})$ 与碱 (*Alk*) 的含量如图 (1—2) 所示, 它们的相关线可以下列方程式表示:

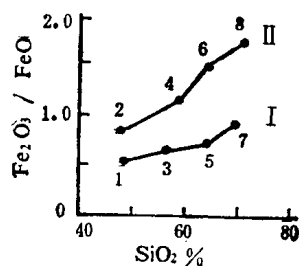


图 1—1 岩浆岩酸度与 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 关系

(库采夫, 1964)

I—侵入岩; II—火山岩; 1—辉长岩;
2—玄武岩; 3—闪长岩; 4—安山岩;
5—花岗闪长岩; 6—英安岩; 7—花岗岩;
8—流纹岩

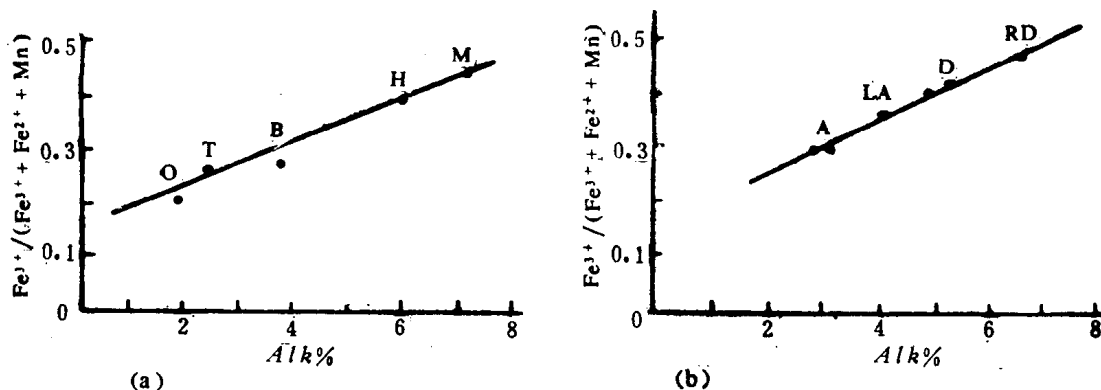


图 1—2 碱含量与 $\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{3+} + \text{Fe}^{2+} + \text{Mn})$ 的关系图

(里特曼, 1973)

(a)—夏威夷熔岩平均值; O—大洋岩; T—拉斑玄武岩; B—碱性玄武岩; H—中长玄武岩; M—橄榄粗安岩

(b)—日本熔岩平均值; A—暗色安山岩及安山岩; LA—安粗岩; D—英安岩; RD—流纹岩

1. 夏威夷 (板块内部) $\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{3+} + \text{Fe}^{2+} + \text{Mn}) = 1.2[0.1 + (\text{Na} + \text{K}) \cdot 10^{-3}]$

2. 日本 (岛弧造山带) $\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{3+} + \text{Fe}^{2+} + \text{Mn}) = 1.8[0.07 + (\text{Na} + \text{K}) \cdot 10^{-3}]$

(五) 次生变化

岩石的次生变化 (风化、蚀变等) 愈强, 一般 Fe_2O_3 愈高而 FeO 愈低。举例如下:

黑龙江省富钾火山岩带中, 第三纪火山岩 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO} = 1.33$, 第四纪火山岩 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO} = 0.85$ 。因为第三纪风化时间较第四纪长。风化愈强的岩石, 一般颜色愈红, 玄武岩如此, 沉积岩也如此。如 Янов (1956) 研究了 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 对沉积物颜色的影响, 有以下规律:

即 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+} > 3.0$, 红色 (红棕色、棕红色);

$= 1.6 - 3.0$, 紫色、棕色、砖红色;

< 1.6 , 浅绿灰色、绿色、灰色;

≈ 0 , 黑色。

蚀变的岩石一般也是 Fe_2O_3 升高 FeO 降低。如宁芜地区中段火山岩,新鲜岩石 $\text{Fe}_2\text{O}_3=4.45-4.99\%$, $\text{FeO}=3.12-3.75\%$; 绢云母化后则 $\text{Fe}_2\text{O}_3=9.61-9.75\%$, $\text{FeO}=0.55-1.09\%$; 再经高岭土及硅化后 $\text{Fe}_2\text{O}_3=8.82-10.85\%$, $\text{FeO}=0.26-0.45\%$ 。又如超基性岩蛇纹石化也是如此,如库兹涅佐夫研究的弱蛇纹石化超基性岩, $\text{Fe}_2\text{O}_3=4.91\%$, $\text{FeO}=2.22\%$; 而强蛇纹石化后则 $\text{Fe}_2\text{O}_3=7.11\%$, $\text{FeO}=0.43\%$ 。

凡是研究上述内容的岩石,化学分析的 Fe_2O_3 、 FeO 含量都不应进行调整。

二、 Fe_2O_3 、 FeO 对标准矿物的影响

凡是要计算标准矿物的岩石化学分析结果,而又 Fe_2O_3 过高及 FeO 过低的,应该进行铁的调整,使 Fe_2O_3 降低、 FeO 升高到正常状态。

在地表出露的岩石,由于风化、氧化、蚀变,常使 Fe_2O_3 升高, FeO 降低; 岩石在化学分析前的加热、熔融过程中,也常使 Fe_2O_3 升高, FeO 降低。在含铁量高的岩石、矿物中这种变化尤为显著(由于实验技术进步,目前已可控制 f_{O_2} , 使铁的价态不变)。

如 Yoder 等 (1962)^[3] 对玄武岩加热实验表明,原来玄武岩 $\text{Fe}_2\text{O}_3=1.60\%$, $\text{FeO}=9.94\%$, 在加热 1100°C , 历时 240 小时后,则该玄武岩的 $\text{Fe}_2\text{O}_3=11.50\%$, $\text{FeO}=0.98\%$ 。

又如周珣若 (1981)^[4] 对黑云母加热实验也表明,原来黑云母 $\text{Fe}_2\text{O}_3=1.94\%$, $\text{FeO}=6.37\%$, 在加热 1100°C 后, $\text{Fe}_2\text{O}_3=8.48\%$, $\text{FeO}=0.20\%$ 。

Fe_2O_3 升高、 FeO 降低,对岩石的标准矿物计算结果影响很大。以上述 Yoder 等的玄武岩为例,列其 Fe_2O_3 、 FeO 变化,对标准矿物计算结果的影响,从而对玄武岩定名的影响如下(表 1—1):

表 1—1 橄榄玄武岩(A)及其热处理后岩石(B)的化学成分、标准矿物①

氧化物	样 品		CIPW 法 标准矿物	$w\%$	
	A	B		A	B
SiO_2	50.87	50.87	q	—	5.82
TiO_2	0.79	0.79	ort	3.34	3.34
Al_2O_3	17.62	17.62	ab	24.63	24.63
Fe_2O_3	1.60	11.50	an	33.36	33.36
FeO	9.94	0.98	di	10.58	9.94
MnO	0.08	0.08	hy	18.90	11.00
MgO	6.25	6.25	ol	5.83	—
CaO	9.32	9.32	mt	2.32	1.16
Na_2O	2.94	2.94	hm	—	10.72
K_2O	0.59	0.59	il	1.52	1.52
总 和	100.00	100.94			

① Yoder 等 (1962)。

不难看出,由于 Fe_2O_3 、 FeO 的变化,计算的标准矿物结果差别较大。最大的差别是, A 样品中无 q、hm 而有 ol, 而 B 样品中则有 q、hm 而无 ol; B 样品比 A 样品中 hy、mt、di 则有不同程度降低。这样将使原来的橄榄拉斑玄武岩,误定为石英拉斑玄武岩。

造成上述标准矿物成分及数量变化的原因是, Fe_2O_3 的增加,使更多的 FeO 与 Fe_2O_3 分

子以1:1结合成磁铁矿(mt), 因此随后计算的透辉石、紫苏辉石、橄榄石等暗色矿物时, 可供结合的FeO分子将减少, 甚至已用完, 相应的减少了SiO₂的消耗, 从而使SiO₂增加、剩余, q增多。

为了进一步说明氧化程度对各类岩石标准矿物的影响, 述三种情况如下(Le Maitre, 1976)^[5]:

(一) 含标准矿物q的岩石

此种岩石可算出q、or、ab、an、di、hy、il、mt等标准矿物。q与主要氧化物的关系如下:

$$q = \text{SiO}_2 + 0.752\text{TiO}_2 - 0.589\text{Al}_2\text{O}_3 + 0.376\text{Fe}_2\text{O}_3 - 0.836\text{FeO} - 1.491\text{MgO} \\ - 1.072\text{CaO} - 4.847\text{Na}_2\text{O} - 3.190\text{K}_2\text{O}$$

如果除Fe₂O₃、FeO外, 其它氧化物数量不变, 则上式可改写为:

$$q = K + 0.376\text{Fe}_2\text{O}_3 - 0.836\text{FeO}$$

其中K是常数。进一步假设, Fe₂O₃ + FeO的总和(Σ)不变, 则:

$$q = K + 0.376(\Sigma - \text{FeO}) - 0.836\text{FeO} \\ = K' - 1.212\text{FeO}$$

式中K'是一个新的常数, $K' = K + 0.376(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO})$ 。它导致 $dq/d\text{FeO} = -1.212$ 。

也就是说, FeO减少1%, q就增加1.212%。因此, 当岩石中FeO减少, 也即Fe₂O₃相对增加时, q即随之增加, 直至出现hm为止。

(二) 含标准矿物ne的岩石

此种岩石可算出or、ab、ne、an、di、ol、il、mt等标准矿物。ne与主要氧化物有以下关系:

$$\text{ne} = -1.182\text{SiO}_2 - 0.445\text{TiO}_2 + 0.348\text{Al}_2\text{O}_3 - 0.222\text{Fe}_2\text{O}_3 + 0.494\text{FeO} \\ + 0.881\text{MgO} + 1.900\text{CaO} + 6.302\text{Na}_2\text{O} + 4.148\text{K}_2\text{O}$$

同样可以计算出 $d\text{ne}/d\text{FeO} = 0.716$ 。

也就是说, FeO减少1%, ne就减少0.716。因此, 当岩石中FeO减少, 也即Fe₂O₃相对增加时, ne即随之减少; 反之, FeO增加, ne也增加。在出现Lc之前, FeO每增加1%, ne就增加0.716, 但在出现Lc之后, ne则保持常数。

(三) 含标准矿物ol而不含q、ne的岩石

此种岩石可算出or、ab、an、di、hy、ol、il、mt等标准矿物。dol/dFeO是个复杂的函数。

纯铁橄榄石, $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}) = 0$ 时, $d\text{ol}/d\text{FeO} = 4.113$,

纯镁橄榄石, $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}) = 1$ 时, $d\text{ol}/d\text{FeO} = 2.840$,

也就是说, ol随FeO的减少(Fe₂O₃的增加)而减少。

紫苏辉石hy与FeO的关系也类似。

纯铁紫苏辉石, $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}) = 0$ 时, $d\text{hy}/d\text{FeO} = -2.661$,

纯镁紫苏辉石, $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}) = 1$ 时, $d\text{hy}/d\text{FeO} = -2.026$,

也就是说, hy随FeO的减少(Fe₂O₃的增加)而增加。

据里特曼(1973)^[6]研究的岩石氧化度(OX°)与矿物含量(vol%)关系(如图1—3、4、5所示), $OX^\circ = \text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{3+} + \text{Fe}^{2+} + \text{Mn})$, OX° 愈高, 氧化程度愈高。同样可以看出,