

谨将此书献给第三十届国际地质大会

地幔流体与软流层(体) 地球化学

(国家自然科学基金资助项目, 1992—1995)

主 编 杜乐天

副主编 刘若新 邓晋福



地 质 出 版 社

地幔流体与软流层(体)地球化学

(国家自然科学基金“八五”首批重点项目)

主 编 杜 乐 天

副主编 刘 若 新 邓 晋 福

地 质 出 版 社

· 北 京

内 容 简 介

本书是国家自然科学基金“八五”首批资助项目的最终成果,是关于地幔流体、软流层(体)研究的一部专著,全部是新成果。全书共11章,包括玄武岩、金伯利岩、煌斑岩、金刚石、巨晶对地幔流体与软流层的反演;地幔流体中微量元素及同位素;地幔流体中碱金属钠钾地球化学;地幔岩熔融和产浆机制;地幔气体及微粒合金;地幔岩形变;软流层(体)成因及判别标志;地幔流体与金属、天然气成矿关系等。全书有一系列新的发现和理论推进,广泛适合地球科学各有关领域科研、教学和找矿需要。

图书在版编目(CIP)数据

地幔流体与软流层(体)地球化学/杜乐天主编. -北京:地质出版社,1996.7

ISBN 7-116-02193-0

I. 地… I. 杜… II. 地幔-流体层-地球化学 N. P59

中国版本图书馆CIP数据核字(96)第11242号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路29号)

责任编辑:王星槐 赵俊磊

*

北京地质印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:27.625 铜版图:17页 字数:710000

1996年7月北京第一版·1996年7月北京第一次印刷

印数:1—350册 定价:55.00元

ISBN 7-116-02193-0

P·1644

前 言

本书是国家自然科学基金委领导和资助的“八五”首批重点项目《地幔流体与软流层(体)地球化学》(49133090)最终研究成果的专著。

本项目 1992 年启动,1995 年底全部结束,共 4 年。实际参项者计 24 人,参项单位有核工业北京地质研究院,地震地质研究所,中国地质大学(北京)(武汉),中科院广州地球化学所,兰州地质所,地矿部西安地矿所,北京大学地质系。经费第一批为 70 万元,于 1994 年又补加 15 万元,共 85 万元。参项人员尽管是来自各个部门的科研机构,但彼此在学术思想上志同道合,在事先商定的项目总题目及统一的科研思路要求下分工协作,发挥各自的优势和特长,紧紧围绕地幔流体成分和软流层(体)成因、特点、局部熔融和形变开展地球化学方面的研究,克服了种种困难(中外虽然地幔流体研究已有多年,但专门研究地幔流体和软流层(体)地球化学问题的集约性立项尚无先例)。在开拓中进行摸索,采用了当代一系列先进的测试、鉴定、实验方法、技术,取得了大批新结果、新数据、新认识,全面地完成了项目原订计划规定的任务。在项目进行期间大约发表了 60 篇以上学术论文或摘要(在国内外刊物和会议文集中,其中有一篇发表在《Nature》上而且被选为封面),最后又撰写了此本专著。在工作中还培养了一批新生力量,他们在此新领域研究上取得了显著的进步。另外,也开展了国际合作和交流。本项目的科学价值不仅是出了一批成果,更重要的是形成了一支中国在地幔流体研究上的骨干队伍和核心力量,在此力量的影响下又有广泛的年青研究者们的关注和靠扰。本项目研究在解决国民经济实际问题上也得出不少重要结论,例如内生成矿(Nb、REE、Au、Cu、U 等)的地幔流体成因和深层次天然气开发新方向等等。

地幔流体研究是当代地球科学发展的主流之一。在 80 年代后半期,这种动向就早已露出端倪。当时为了建立此项目,我们曾在学术界进行过多次接触、磋商和联络,开过一二十次大小商讨会。在此基础上,于 1989 年在基金委机关刊物《地球科学进展》(1990 年第一期)撰文正式提出了立项建议(该文题目是“当代地球科学的一项重大前沿课题——幔汁研究”)。在此建议中提出了深部地质研究的重点是上地幔;上地幔研究的核心是软流层;而软流层研究的关键则是幔汁(地幔流体)。今后在地幔岩石学研究的同时,有必要开展对地幔流体的专门系统研究,因为地幔是由地幔岩石和地幔流体两部分构成的。二者相比,地幔流体是更为主动的控制性因素。当前国际上流行的所谓“热流”、“Mantle plume”、“Megaplume”、“Hot spot”概念比较空泛,缺乏扎实的证据,尚处于前科学假设。在地幔地质学中仅强调热流是很不够的,“热性”不能脱离“热质”单独存在。热流究竟是什么物质?是哪些基本的化学组分?是否所有的不相容元素都算此流体?其中主控成员是什么?对地幔流体的主要成分的破解乃是这一前沿问题中的前沿问题。选准这一突破口攻克,会牵一发而动全身,这是地幔流体研究的关键问题之一。其实问题也不难理解,如果只是“热”,怎么能解释有的形成拉斑玄武岩浆而有时又是碱性玄武岩浆?为什么形成的是玄武岩而不是花岗岩或反之?为什么形成不同的岩浆矿床、热液矿床?仅有热怎么能会发生交代作用形成不同的金属、非金属、

盐、气、油等矿床?……更有甚者,现在已经有大量新资料证明,在岩浆的产生中“热”所起的作用也并不像传统观念那样是第一位的,降低岩石、矿物熔点的那些化学因素更为重要。总之,只要一日不把“热性”改为“热质”的基本概念加以转变,就很难形成一个整体地球科学体系。

大量自然界事实和中外已有研究成果早已表明,地幔流体运动和其与地幔、地壳固相岩石间的反应,乃是我们地球科学发展新阶段深入理解地幔上隆、软流层(实际上这不是一个连续的固定的层,而是可以出现在不同深度并具有各种形态的小分层、体、块)成因、大地构造、岩浆作用、热液作用、变质作用、热沉积作用以及金属、非金属、天然气、石油等成矿作用的关键问题。正是地幔流体的活动构成了地球内部不安定“病变”发作之灶源:地壳运动的强烈期正是深部地幔流体积聚旺盛上涌的发散期;地壳运动的相对宁静期则是地幔流体的再次逐渐积累期,大地构造的旋回性盖出于此。地台活化、地洼发育、板块开裂、俯冲与碰撞之发生、发展也是源于地幔流体(只要有 $0. n\%—n\%$ 体积即产生足够影响)类似细菌、病毒侵入感染,使地幔、地壳固相肌体“发炎”、“腐烂”、“溃疡”,粘滞度、密度、强度大降,流动性大增,直到形成岩浆(好比化脓),致使原有的地球重力、自转角动量差异旋转力和外星潮汐力三个基本力间失去平衡必然出现重新调整的动力表现方式。近代地球物理探测结果表明在地壳中发育多层平缓的韧性剪切带,类似破墙结构(既有多层性又有垂直或陡立断裂),一旦高压高温地幔流体渗入将起润滑、顶托,产生熔融或蚀变,类似冰筏,极大地利于大小板片和拆离构造的水平滑移、推覆、滑覆和垂直差异升降(块断构造)。

地幔流体研究对油气无机成因及开拓地下能源新思路将起重大推进作用。另外对研究地震的发生、大面积森林大火、厄尔尼诺等异常气候和自然灾害直到生命起源(地球内部生物圈及深海无阳光和缺氧水体生物群落)、比较行星学等都可以提供重要的新观点。总之,地幔流体(HACONS)实际上具备地球化学、地球物理、地球动力学三重内涵和诱发功能。

上述一文发表到现在已经五六年了,在此期间国内外许多新进展和新文献都在证明上述种种认识。虽然还很不成熟,但总体上是符合许多事实的。现在本项目研究已结束,读者从书中所展示的众多新结果中也可以看到地幔流体诸多的新特点和深化研究。

本书是在统一安排下分工分章来撰写的。各章都是以自己所做出的成果为主,也对该领域的总体认识做了阐明。它不是已经发表过的论文简单的集合而是又有新的提炼和再加工,其中还有不少是尚未在刊物中发表过的新内容。

分章作者如下:

前言、第一、五、十章、结语(杜乐天,第五章还有戎嘉树);第二章(刘若新、樊祺诚、林卓然);第三章(邓晋福、赵海玲、罗照华、赖绍聪、郭正府、李玉文);第四章(路凤香、赵磊、郑建平);第六章(夏林圻、夏祖春、徐学义);第七章(解广轰、张明、刘丛强);第八章(分四篇):第一篇(林传勇、徐义刚、张小鸥、史兰斌、陈孝德);第二篇(高平、母润昌);第三篇(金振民、H. W. Green、周翊、金淑燕);第四篇(刘瑞珣、朱平、叶有钟、叶桂顺);第九章(刘刚、王先彬、李立武);第十一章(曹荣龙、朱寿华)。

正如一般多作者专著中所难以避免的,各章编写由于作者不同,学术见解有的一致,也有的不尽相同;同一地区所得实际资料也各有侧重;文风也有不同特点。本着百家争鸣的精神,编者对此未做强求,相信读者的独立思考。

须加指出,本书作者们在项目进行中一致有一种挂虑,就是在地幔流体的研究方式、方

法和技术上面临着许多问题和困难。过去习惯用的研究固体岩石的许多方式、方法不够用了。国际上对地幔流体和软流层(体)地球化学研究多限于分散自发状态,这对大家都是新领域,无论在理论上还是方法上都没有成熟的经验可资借鉴,许多方面和问题都需要根据我国具体地质特点去摸索。情况表明地幔流体和软流层(体)这类新问题是相当复杂难搞的。直至目前,中外在这方面的认识和论述还存在着不少尚未加以严格辨析、揭示的朦胧或不实之处。应当说我们在这些问题上研究的起点和基础不够理想。一方面需要把很大的精力和工作量放到发现、揭示新现象、新事实上,这就够困难的了;另一方面还得对国际上现有的流行的概念、结论、理论、观点进行深入的检查和重新审鉴,远不是拿来就用。从客观条件上讲,地幔流体和软流层(体)在地下埋藏太深,研究难度很大。它们又非静止的固体而是流体,过去研究固体地质所习惯的概念和工作方法都不大能够适应,在工作中尚须摸索一些新的、过去不大采用的方式方法。利用上升到地表上来的岩浆流(玄武岩类、煌斑岩类、金伯利岩类包括金刚石等)和热液流(热液矿床、天然气等)进行反演研究可以提供大量可靠的深部流体信息。但也有不足的是一时还难以摸清在上升途中许多中间过程的诸多变化,特别是对极为活泼的气体而言更是如此。在直接岩石和巨晶样品的研究上,幸运的是地幔的岩浆作用比地壳岩浆作用有大许多倍的能量(温度、压力、热能、化学能等),地幔中的挥发分又极多,其爆炸威力之猛远非地壳所能比拟,故尔上升速度极快的气流、岩浆流(从六七十公里深处到达地表用不到一天时间)就把炸碎的地幔岩、软流岩、壳-幔过渡岩捕虏体(或称包体)(大者直径可达3—5 m)和地幔伟晶岩(巨晶)(大者可有数十厘米)统统带了上来供我们研究。这是打任何超深钻井取心都办不到的一个相当理想的好条件。不过另外也有不少未确定之数,例如它们在深部真实的产状、接触关系、产出部位和确切深度等都一时还来不及一一精确鉴定。从这些碎块标本上所得到的信息是很宝贵的,还有很多有趣的现象、产物尚待今后通过更多的观察、测试加以发掘。另外,大家也注意到气体的研究,它的莫大优越处(相对固体岩石研究来说)是尽管结果是从给定深度固体样品中测定出的气体,但其来源则更深。对金伯利岩(假定其中地幔捕虏体可以来自 ≈ 200 km深度),那么其中所包含的气体则完全有可能来自中下地幔,甚至能给出核气的信息。对于产出深度较浅的玄武岩类岩浆中的流体有一部分也有可能来自上述深度。充分注意 μm 级、亚 μm 级超显微气、液、浆包裹体成分和同位素测定,差应力下高温高压熔融实验,超微自然元素和天然合金,吸附碱喷膜等这类新的研究方法是本项目有别于前人的新尝试。

需要强调指出,地幔流体研究和过去固相物质研究不同,面临的是一个崭新的物态——超临界态。这种特殊的物质状态既不同于我们所熟悉的液、浆,也不同于一般的气体而是高压、高温(地幔条件)、高密度非水溶液也非硅铝酸盐岩浆的流体,它有一系列特殊的热力学和物理化学性能,例如极强的渗透能、化学反应能、爆炸力或反应速度、极高的热容、萃取能力和分相不混溶性等等。这在国际上也是崭新的研究领域。在微区、微量、微态、微构的研究上需要许多新的测试技术、仪器和实验方法、设备,有许多难关尚须克服。考察一个项目,当然首先要评价成果的硬件(数据和结论),但更要紧的是软件(研究方式、方法和测试技术的摸新),因为后者是前者之母。采用了以前中外同领域研究不大采用的新研究方法和新测试方法应当说是本项目的特色和之处,例如:第二章中的包裹体中微量元素 LAMMA、AEM、SPM 等分析及其中 C 同位素测定;第四章金伯利岩中自然元素研究和金刚石中流体测定;第五章中 ^{235}U 诱发裂变径迹、吸附碱研究;第六章中熔融包裹体均一法研究玄武

岩浆成因;第八章中差异应力高温高压下矿物粒间熔体实验、地幔岩物理性质测定及韧性剪切带研究;第十章中地幔捕虏体中自然元素微粒合金、氦渗透实验及氦含量测定;第十一章中 C、O、Sr、Nd 综合同位素分析及铈实验。

除上述各章外,本书其它章中也在研究方法上各有创新。

地幔流体研究本来发轫于英、美等西方,他们研究的地区主要是非洲、欧洲、澳大利亚和北美,在大地构造上除少数地区外很多是属于近代活动性较差或古老克拉通稳定地区。我们现在所研究的是中生代特别活动的中国大陆,地下为高地热异常场、地幔流体及软流层(体)广泛发育,因而大家发现了其它大陆很少见到的许多新现象、新产物和新关系(详见各章、节)。相信这会引来国外同行们的兴趣。

最后值得指出,本项目从立项之前的酝酿阶段到立项以及这以后的全过程都是在国家自然科学基金委、地学部关怀下进行的,并得到孙枢、张知非、马福臣、王永法等领导同志的指导。在 4 年的项目进行期间王永法同志给予了诸多热情帮助,郭进义同志也给予许多支持。在此请允许我们向上述各位致以衷心的、深深的谢忱。另外也向以涂光炽先生为首的当初地球化学评审组的全体成员以及社会上曾经热情支持过这个项目的同行们致以深切感谢。对地质出版社责任编辑赵俊磊同志热情协助亦深表谢意。

最后,谨祝第 30 届国际地质大会在北京胜利召开。此书也是对大会的一个献礼。

目 录

前 言

第一章	国内外地幔流体、软流层地球化学研究概况	杜乐天(1)
第二章	地幔流体及幔源岩石地球化学	刘若新 樊祺诚 林卓然(26)
第三章	玄武岩反演软流层地球化学与地幔流体	邓晋福、赵海玲、罗照华、赖绍聪、郭正府、李玉文(58)
第四章	与金伯利岩相关的地幔流体及软流层地球化学	路凤香 赵磊 郑建平(97)
第五章	地幔流体中碱金属地球化学	杜乐天 戎嘉树(154)
第六章	地幔橄榄岩捕虏体中的流体包裹体、岩浆包裹体和玻璃	夏林圻 夏祖春 徐学义(230)
第七章	地幔富集事件及地幔高压矿物含水性研究:地幔岩捕虏体及高压巨晶的证据	解广鑫 张 明 刘丛强(272)
第八章	地幔流体与地幔地球物理性质的关系	(311)
1.	中国东部上地幔岩石变形特征、流体的作用及软流层(体)初步探讨	林传勇 徐义刚 张小鸥 史兰斌 陈孝德(312)
2.	高温高压下地幔岩石物理性质及流体影响的实验研究	高 平 毋润昌(341)
3.	熔融流体对上地幔流变学性质的约束作用	金振民 H. W. Green Yi Zhou 金淑燕(357)
4.	上地幔中流体的存在空间及其对变形的作用	刘瑞珣 朱 平 叶有钟 叶桂顺(373)
第九章	地幔气体地球化学	刘 刚 王先彬 李立武(380)
第十章	地幔岩中自然元素和还原气体	杜乐天(409)
第十一章	地幔流体与金属成矿作用	曹荣龙 朱寿华(436)
结 语		(460)

Contents

Introduction

Chapter 1	The Current Status of Geochemical Studies on Mantle Fluids and Asthenosphere(Asthenoliths)	<i>Du Letian</i> (1)
Chapter 2	Geochemistry of Mantle Fluids and Mantle Derived Rocks	<i>Liu Ruoxin, Fan Qicheng, Lin Zhuoran</i> (26)
Chapter 3	Asthenosphere Geochemistry and Mantle Fluids deduced from Basaltic Volcanic Rocks.....	<i>Deng Jinfu, Zhao Hailing, Luo Zhaohua, Lai Shaocong, Guo Zhengfu, Li Yuwen</i> (58)
Chapter 4	Geochemistry of Mantle Fluids and Asthenosphere, Related with Kimberlites	<i>Lu Fengxiang, Zhao Lei, Zheng Jianping</i> (97)
Chapter 5	Geochemistry of Alkalis(Na, K)in Mantle Fluids	<i>Du Letian, Rong Jiashu</i> (154)
Chapter 6	The Fluid Inclusions, Magmatic Inclusions and Glasses in Mantle Peridotite Xenoliths	<i>Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi</i> (230)
Chapter 7	Mantle Enrichment Events and Hydrated Minerals: The Evidence from Mantle Xenoliths and High Pressure Megacrysts	<i>Xie Guanghong, Zhang Ming, Liu Congqiang</i> (272)
Chapter 8	The Relationship of Geophysical properties of Mantle with Mantle Fluids	(311)
	1. Deformation of Mantle Rocks(East China), Fluids and Asthenosphere	<i>Lin Chuanyong, Xu Yigang, Zhang Xiao'ou, Shi Lanbin, Chen Xiaode</i> (312)
	2. High P, T Experiments on Physical Properties of Mantle Rocks and Influence of Fluids	<i>Gao Ping, Mu Runchang</i> (341)
	3. The Constraints of Rheology Properties of Upper Mantle by Melts	<i>Jin Zhenmin, H. W. Green, Yi Zhou, Jin Shuyan</i> (357)
	4. Space of Mantle Fluid Filling in Upper Mantle and Its Influence on Deformation	<i>Liu Ruixun, Zhu Ping, Ye Youzhong, Ye Guishun</i> (373)
Chapter 9	Gas Geochemistry of Mantle	<i>Liu Gang, Wan Xianbin, Li Liwu</i> (380)
Chapter 10	The Native Elements and Reducing Gasses in Mantle Rocks	<i>Du Letian</i> (409)
Chapter 11	Mantle Fluids and Metallogeny	<i>Cao Ronglong, Zhu Shouhua</i> (436)
Remarks		(460)

第一章 国内外地幔流体、软流层 地球化学研究概况

杜 乐 天

(核工业北京地质研究院, 北京, 100029)

地幔流体和交代作用大体上是70年代初通过地幔捕虏体的精细研究开始被人们认识的。地幔捕虏体(xenoliths), 有的称为包体, 是被玄武岩或碱性岩浆、金伯利岩带到地表或浅处来的标本。至今才有20多年的研究历史。这个领域中所得出的成果尽管相当丰富, 可是至今只限于地幔岩石学家内部而不大为地质学界所知, 甚至连一般岩石学界都不太清楚他们的研究结果。今天如果提到“地幔交代作用”这一名词和概念, 许多矿床学家和大地构造学家都会觉得很生疏而且还可能以为这是一个偏僻无关大局的枝节性问题而放在一边。实际上, 地幔交代作用的研究乃是新的岩浆岩石学、热液矿床学、变质作用、大地构造以及地球动力学的最重要的生长点和突破点之一。另外, 它也将对地球物理学的发展产生深远影响, 因为已经可以采到具体标本进行参数测定及实验。

地幔交代作用(mantle metasomatism)的发现起始于英国学派。Oxburgh(1964)指出, 从无水的地幔岩石不可能产生玄武岩浆, 因为缺少Na、K、Ti和 H_2O 。后来Bailey, D. K. (1970, 1972)提出地幔交代作用。Lloyd和Bailey(1975)在研究东非、德国碱性玄武岩中发现辉石岩地幔捕虏体中有云母及角闪石的发育, 提出辉石岩可看作地幔橄榄岩经过交代的产物, 然后从中产生了玄武岩岩浆。当时有很多人, 如Nagasawa等(1969), Frey(1974)发现亏损的橄榄岩却富含LREE, 认为后者是由深部流体带入的。对交代作用的定义曾有过很多专门的讨论, 本书不拟赘述。“交代”的最核心的含义是组分的带出和带入, 它是开放性的而且是动力学内涵。

Frey和Green(1974)第一次发现玄武岩浆带到地表上来的地幔捕虏体橄榄岩是亏损性的(高镁低钙), 但显然又富集一系列不相容元素如K、P、Ti、LREE(轻稀土)、Th、U。Dawson(1980)称之为隐蔽交代(cryptic)。他认为这是流体为 CO_2 型的结果; 如流体是 OH^- 型则易出现显交代(patent)。

Harte和Gurney(1975)发现金伯利岩中地幔捕虏体中交代脉旁钛铁矿和硫化物增多, 后来称此为矿物(modal)交代。

世界许多碱性岩浆富LREE, 但研究证明是源出于LREE亏损地幔。Menzies和Murphy(1980)认为这是由于交代作用带入LREE, 然后发生了熔融产生此碱性岩浆。Lloyd和Bailey(1975), Boettcher和O'Neil(1980), Menzies和Murphy(1980)等都指出交代作用是产生碱性岩岩浆的先导。Frey和Green(1974)也指出地幔的交代和富集事件可以伴随有岩浆熔融, 可以用低密度流体加入来解释它们。实验表明只是纯 CO_2 流体并不会降低岩石的熔点,

硅酸盐及 SiO_2 在 CO_2 中的溶解度也都比以 H_2O 为流体时低得多。但在 CO_2 流体中碱/铝比值是增加的。实验还表明和金云母橄榄岩相平衡的流体中能含到80%的标准石英和正长石成分。硅、碱总是优先分配于流体相中。

Ellis 和 Wyllie(1979)通过实验证明在大约75 km 深度以下角闪石开始不稳定。在地幔深处由于橄榄岩可以和 H_2O 、 CO_2 化合形成水镁石和菱镁矿而不可能有 H_2O - CO_2 流体。

在70年代以前大多数学者认为超基性岩浆和基性岩浆乃是富化地幔不同熔融比例的熔融产物,拉斑玄武岩较之碱性玄武岩的部分熔融比例大,而碱性岩(霞石岩)则是低比例熔融产物。然而到了70年代发现地幔交代作用之后这种看法发生了很大变化,人们转而认为决定岩浆的碱性程度高低是一般的钙碱性还是碱性、过碱性关键还不在于部分熔融比例的大小,更重要的是地幔交代作用的发育程度。另外,有些研究者(Shilling 等, 1969; Mitchell, B., 1975)认为像金伯利岩这样的“岩浆”只能用石榴二辉橄榄岩1%或更低的局部熔融才能解释金伯利岩浆中如此高度富集的一大批不相容元素群。Wyllie(1987)指出,很多玄武岩浆中微量元素及同位素成分很难用部分熔融来解释。根据 Bailey(1984)的材料,金伯利岩中微量不相容元素比一般超镁铁质岩的富集倍数为:Cs(383);Th(229);La(163);C(162);U(124);Ce(104);Ta(90);Nb(85),即要高出85—383倍。这只有局部熔融比例小于1%才能在分异出来的岩浆中富集到如此之高的程度。这显然是与事实有矛盾的,因为1%这样低含量的熔体由于岩浆的粘度是不可能从地幔岩石的孔隙中分离出来的。众所周知,就拿原油为例,粘度比玄武岩浆低3个数量级的石油即使是人工加压也只能采收30%,其余的70%都采不出来,更何况岩浆。所以过去只是用低比例熔融来解释地幔岩浆的不同成分已经是过时的看法。

Sun(1975),Frey 等(1978),Clague 等(1982),Chauvel(1984)等均指出许多地区的上地幔比原始地幔高度富集不相容元素,例如玄武岩中的 REE 大于陨石10—30倍,碱性玄武岩就更高,尤其是 LREE 就更为富集(Kay 等, 1976; Frey 等, 1978)。经过 Menzies 等(1980),Waso 等(1982),Roden 等(1984),Cohen 等(1984),Stosch 等(1980),Bailey(1982)的研究发现以低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比和高 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比为特征的亏损型地幔和富含一系列不相容元素的碱性玄武岩间是不耦合(decoupling)的,这只有用地幔流体的交代作用才能加以圆满解释。

Wilshire 等(1975)把玄武岩中的地幔捕虏体分为 Cr 透辉石组及 Al 普通辉石组。后来 Frey 等(1978)又改称为 I 型、II 型。其实,据我们的研究发现地幔捕虏体远不只此两类。

Lloyd 和 Bailey(1975)详细研究了莱因地堑的 Eifel 及东非大裂谷南乌干达地区的第四纪至今的碱性喷发岩及其中的地幔捕虏体后指出,交代作用乃是地幔岩浆岩产生的必要大前提。

Dawson 等(1980)详细地研究了南非等地金伯利岩及其中的地幔捕虏体,发现金伯利岩中富含一系列不相容元素和含有自然元素如 Ag、Cu、 ΣPt 、Ni(Fe)、石墨,还有 Si、C 等。石榴石边部或全部晶体变为混浊不再透明,被微晶的金云母、角闪石、斜长石、尖晶石等集合体交代,称为次变边(Kelyphite)。他还发现金伯利岩的地幔捕虏体中有云母岩和 MARID 组合(Mica + Amphibole + Rutile + Ilmenite + Diopside),并称之为地幔中的伟晶岩(Dawson, 1977)。

Schneider 等(1984)指出地幔流体的成分取决于氧化状态。他认为二辉岩或辉石岩是二辉橄榄岩有碱、硅、铝被流体带入富集而形成的。后三者倾向于在流体中富集。

Wendlandt(1980)认为 CO_2 很重要。在小于 2.5 GPa 时, CO_2 在部分熔融体中溶解度

<2%;如大于2.5 GPa 则溶解度>20%,并使固相线温度降低了200℃,就会使此部分熔融由硅酸盐熔体变成纯碳酸盐熔体。

Wedepohl(1984)指出,从地幔上升的岩浆冲到地表速度很快,只要几小时到几天。剪切作用有利于流体渗入。

Holloway(1971)实验表明 H_2O (60%摩尔)+ CO_2 (40%摩尔)的流体在和结晶的及部分熔融的拉斑玄武岩平衡时 $[(2-8)\times 10^8 \text{ Pa}]$ 溶质是0.4%—1.8%(质量百分数),在每个压力下都是随温度而下降。除 Ti 在低压下,几乎所有的溶质在 H_2O 型流体中的溶解度都比在 $\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O}$ 型流体中高。在流体-熔体间所有元素的分配系数在同一压力同一类流体中大体都是一样的。

Harte(1984)根据 Goldschmidt(1922)指出过的不仅液体而且熔体也可以引起交代作用提出,IRPS 脉旁的蚀变交代现象。I——Ilmenite;R——Rutile;P——Phlogopite;S——Sulfide。此脉旁被交代围岩中有 Ti、K、S、Zr、Hf、Nb、Ta 的明显带入。

Smith 等(1987)指出地幔流体是 C—O—H—S 体系。

Lloyd 等(1987)认为地幔流体是 $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{F}-\text{Cl}$ 成分,并把 Al、Fe、Ca、Na、K、REE 带入溶液,此溶液可以清扫、浓集、迁移和沉淀不相容元素和 LILE(大型亲岩离子)并可促进地幔的熔融和交代。

Harte(1987)指出熔体渗滤和蒸气渗滤都有交代作用。他还提出交代作用应分为岩浆前交代作用和岩浆后交代作用。在地壳中则是后者最常见,但到了地幔则前者更为广泛,交代作用是产生岩浆作用的必要前提。

O'Reilly 等(1987)根据东澳深源捕虏体研究也主张交代作用在熔融之前发生或同时发生,挥发分流入或硅酸盐熔浆渗入都可以造成这个结果。

地幔交代作用的发现和深入研究大大改变了我们对岩浆作用成因的传统观念。过去总是以为岩浆的产生必须产生于岩浆,例如岩浆分异、岩浆结晶、岩浆混染等等。总之,好像岩浆总不能脱离前期岩浆而产生;如果没有前期岩浆岩出露,也总要设想一个深部隐伏的岩浆体。至于单纯地用深部热流来加以解释就更为勉强。硅酸盐介质环境由于导热性很差,而且温度越高导热性越差,不可能有脱离开物质流的单纯热传导能够导致岩石熔融而产生岩浆。

Haggerty(1987)系统地报道了上地幔捕虏体中的钛酸盐矿物,认为它们是上地幔不相容元素的主要载体而且是交代成因。此类矿物有很奇怪的一系列特征,是地壳中极少见到的。笔者将这方面的资料概括为以下诸特点:

(1)都是大分子,有不少矿物为 $\text{AM}_{21}\text{O}_{38}$ 。A 为大阳离子,主要是 K^+ 和 Ba^{2+} ;M 为小阳离子主要是 Ti^{4+} (占60%)其余也可以是 Fe^{2+} , Mg^{2+} , Cr^{3+} , Nb^{5+} , Zr^{4+} , Hf^{4+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} , V^{3+} 等。

山东的沂蒙矿是 $\text{K}(\text{Cr}, \text{Ti}, \text{Fe}, \text{Mg})_{12}\text{O}_{19}$

N 相矿物是 $\text{Ba}(\text{Ti}, \text{Cr}, \text{Fe}, \text{Mg})_{12}\text{O}_{19}$

Jeppeite 是 $(\text{K}, \text{Ba})_2(\text{Ti}, \text{Fe})_6\text{O}_{13}$

Shcherbakovite 是 $\text{Na}, \text{K}(\text{Ba}, \text{K})\text{Ti}_2\text{Si}_4\text{O}_{14}$

Wadeite 是 $\text{Zr}_2\text{K}_4\text{Si}_6\text{O}_{18}$

柱红石是 $(\text{K}, \text{Ba})(\text{Ti}_7, \text{Fe}^{3+})\text{O}_{16}$

金红石中可含1%—12%的 Cr_2O_3 ; 有的含 $\text{Nb}_2\text{O}_5=21\%$

Zirconolite 是 $\text{CaZrTi}_2\text{O}_7$,

Leuchite 是 NaNbO_3 ,

Laparite 是 $(\text{Na}, \text{Ce})\text{NbO}_3$,

Tausonite 是 SrTiO_3 ,

Freudeubergite 是 $\text{Na}_2\text{Fe}_2\text{Ti}_6\text{O}_{16}$

(2) 矿物成分极其复杂, 如同被清扫出来的垃圾, 故笔者称之为垃圾矿物。鉴于混杂元素众多, 又有多价态, 故矿物结构有众多的缺位。

(3) 它们的共同特点都是非硅铝酸盐, 是在富含大量不相容元素(即矿物式中的 A, M)而又极度缺硅铝介质中才能形成的矿物群。

(4) 这些奇怪的矿物绝大多数是出现于金伯利岩之中; 在玄武岩的幔源捕虏体中较为少见。这些矿物的发育与否恐怕也是判别金伯利岩和玄武岩的标志。

(5) 很多化学成分、矿物结构及产出条件表明它们乃是在一种特殊的气相中形成的, 是一种快速的极不平衡机械混杂, 尔后可以再结晶, 重新调整, 但很不彻底, 可能处于亚稳态。

关于交代作用剂也有很多学者加以研究。最流行的是 C—H—O 体系 (Wyllie, 1980; Eggler 等, 1982; Schneider 等, 1984; Pasteris, 1987)。

Bailey (1978) 指出地幔流体主要是 CO_2 , 同时带有碱、 H_2O 、Al、Fe、Mn、Ca、Ti、Rb、Sr、Ba、Zr、Nb、Y、La 等, 另外还有高浓度的 C、卤素、 N_2 。

Andersen 等 (1984) 认为地幔流体是 $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{F} + \text{Cl} + \text{S}$ 。

Spera (1987) 提出 H—O—C—S—F—Cl 为地幔流体。

Eggler (1987) 又提出地幔流体是 C—O—H—S。

Holloway (1987) 认为地幔流体是 $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 。

Lloyd (1987) 认为地幔流体成分是 $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{F} + \text{Cl}$ 。

Saxena 和费英伟等 (1988) 通过对具有炭质球粒陨石组成的原始地幔的相平衡计算认为地幔流体中约 90% 是 CH_4 , H_2 为 6%—8%。高压可抑制烃的分解 (Чекалюк и Бойко, 1982)。从前所述可看出, 在 C—H—O 系统中几乎所有的研究者只注意 H_2O 和 CO_2 , 都不大考虑 CH_4 或烃的重要性。尽管 CH_4 及烃类在地幔温压、 f_{O_2} 条件下的热力学参数还很少, 实验数据也少, 但却是不可忽视的。

最近一些年国际上越来越注意到 H_2 在地幔流体研究中的重要性。

Aines 和 Rossman (1984) 曾指出过镁铝榴石中有 OH^- 键, 如下式:



早在 1942 年, McConnell 就第一次假定 $(\text{O}_4\text{H}_4)^{4-}$ 可以类质同像取代 $(\text{SiO}_4)^{4-}$ 。后来 Cohen-Addad 等 (1967) 认为不能形成 $(\text{O}_4\text{H}_4)^{4-}$ 而是形成 $\text{AlO}_{6-x}(\text{OH})_x$ 。但 Foreman (1968) 研究又认为存在 $(\text{O}_4\text{H}_4)^{4-}$ 。最近 Lager 等 (1989) 揭示 $(\text{O}_4\text{H}_4)^{4-}$ 和 $(\text{SiO}_4)^{4-}$ 在石榴石中可以广泛取代。王阿莲和张安棣 (1991) 讨论了金刚石中镁铝榴石包裹体中的 OH^- 问题。郭立鹤 (1990) 也有此问题的研究。陈丰最近 (1994) 报道了在金刚石中发现了 H_2 峰。

最近一些年, 在地幔流体的研究中出现对 H_2 研究新结果。Young T. E. 和 Green I 等 (1992) 专门研究了橄榄石中的 OH^- 。在上地幔中主要是橄榄石 $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$ 。在过渡带的上半部 (400—550 km 深度) 主要分布 β - $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$ 。过去有不少研究揭示石英和橄榄石

这类无水矿物中少量 OH^- 的存在会产生物理机械性弱化效应(Griggs, 1965; Kekulawala 等, 1981; Mockwell 等, 1985)。Young(1992)用 β 相橄榄石(wadsleyite)和合成的亚稳橄榄石在 14 GPa 和绝对温度 1550—1650 K 有 H_2O 参与下的实验中得到以下 OH^- 溶解结果:

在 β 相橄榄石中 OH^- 浓度是 10000—65000 H/ 10^6 Si;

在橄榄石中 OH^- 浓度是 <300—1400 H/ 10^6 Si。

上述二相橄榄石中 OH^- 浓度比是 1:40, 在 β 相橄榄石中溶有更多的 OH^- , 这会造成低粘度和引发地幔上隆。

Romano Rinaldi(1992)报道含氢石榴石, Katoite-hibshite 系列研究结果。Katoite 是 1984 年发现, $(\text{O}_4\text{H}_4)^{4-} = (\text{SiO}_4)^{4-}$ 四面体类质同像取代, 已准确地测定了 H_2 的位置以及在氢化程度和 Ca 含量间的关系。高压结晶构造测量正在给石榴石的塑变研究提供可贵信息。

碳在地幔岩中的溶解和分布是地幔流体研究很重要的一个问题。现在已经进行了许多高温高压橄榄石实验。Tingle, T. N. 等(1986)实验结果证明在低压下 C 在橄榄石中不溶解, 但在高压(3 GPa)下则溶解度大大提高, 超过 100 质量单位/ 10^6 C, 和温度(由 1200—1500°C)无关。Kadik, A. A. 等(1992)报道实验结果是在 $(20-40) \times 10^8$ Pa, 1400—1600°C 下 C 在镁橄榄石和辉石中可溶解 10×10^{-6} — 100×10^{-6} , C 在熔体和晶体间的分布系数是 10—100。他们认为减压和介质氧化还原条件改变会促使岩浆发生排气作用。

Ballhaus, C. (1994)认为 C—H—O 流体在上地幔的局部熔融中起重要作用。究竟 C—H—O 呈 H_2O 、 CO_2 形式还是 CH_4 , 取决于 f_{O_2} 。压力会影响 f_{O_2} 。在上地幔存在 Mg_2SiO_4 (橄榄石) + $\text{SiO}_2 = \text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$ (斜方辉石) 缓冲, f_{O_2} 和 a_{SiO_2} 相关, 压力加大 SiO_2 活度降低。另外相转变也影响 a_{SiO_2} 和金属铁活度。从斜长石相转化为尖晶石相再到石榴石相就会冲稀地幔金属铁浓度, 使 f_{O_2} 随压力而降低。他和 Frost(1994)曾提出, 假定上地幔总成分不随深度而变, 大体每增加 1 GPa 压力, 相对 FMQ 缓冲要下落 0.5—0.8 个 $\lg-10^5$ Pa 单位。因此在地幔碱性岩浆如黄长岩、金伯利岩的源区其挥发分应在 CH_4 — H_2 ± H_2O 稳定场中。此结论和 CO_2 和 CO_3^{2-} 为主的看法是不同的。笔者同意这种分析。

Chazot, G., Menzies, M. A. 等(1994)报道了也门东南部两个产地的无水尖晶石二辉橄榄岩研究的结果。在 Ali、单斜辉石、尖晶石发生熔融, 产生新生的尖晶石、单斜辉石和熔体玻璃。在 Ataq 此橄榄岩中有角闪石, 偶尔浆胞(melt pockets)中见有残留的尖晶石、单斜辉石, 周围为硅酸盐玻璃和新晶出的橄榄石、单斜辉石、尖晶石。该区这些变化被认为是火成碳酸岩流体和橄榄岩的反应结果。

Harris, J. W. (1994)研究了榴辉岩中金刚石(E型)和橄榄岩中金刚石(P型)。在二辉岩和二辉橄榄岩(分别叫 W 型和 L 型)金刚石也有少量产出。 $\delta^{13}\text{C}$ 研究结果表明在金刚石生长中是流体而非熔体起重要作用。

Green, D. H. (1994)指出借岩浆和捕虏体研究已得悉上地幔一直到过渡带均有碳和氢的存在。

Harte, B. 等(1994)研究了地幔炭质流体在高压榴辉岩的碳酸化问题。在含橄榄石的橄榄岩地幔中在 >1.5 GPa 下富 CO_2 流体是不稳定的。

O'Nions, R. K. (1994)研究了地球的排气作用历史。尽管在历史上地球中的惰性气体由于排气散失比最初星云物质亏损了几个数量级, 但现在还不断在排气, 在排气中惰性气体丢失和地幔熔融作用成正比。现代上地幔的 ^3He 及 Ne、Ar 原生同位素只有少量来自下地幔,

在每 Ga 中,下地幔供给上地幔³He 只有约1%。地球形成最初的100—200 Ma 排气最多,Xe 比其它惰气逸失得更完全,丢失90%以上。但 Xe 可保存于大气之中。Kr 以及再轻的惰气现在在地球内部和它们存于大气中者相等或还多些。它们的排出要求更大的排气速率和熔融量。

Schrauder, M. 等(1994)指出金刚石可提供宝贵的地幔流体信息。Navon 等(1994)确认过去把金刚石中的杂质当成不纯物,实际上这是微包裹体,后者含有地幔流体,成分介于火成碳酸岩质流体与含水流体终端之间。利用中子活化来测金刚石杂质是有效方法,因为 C 对于中子是透明的。共测出金刚石中有下列元素富集:Na、K、Sc、Cr、Fe、Co、Ni、Zn、As、Br、Rb、Sr、Zr、Sb、Cs、Ba、La、Ce、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Yb、Lu、Hf、Ta、Ir、Au、Th、U,它们的总量在不同样品之间变动于 20×10^{-6} — 800×10^{-6} ,它们都富集于微包裹体的流体中。共分析了博茨瓦纳 Jwaneng 的3个立方体和纤维状内结构金刚石,一个透明的八面体作为空白样品。所有的样品都有 K 和 Ba、Br、Cs、Rb、Sr、Sc、Zr、Hf、LREE 的高度富集,其中 Ba=0.6%—0.4%; Sr=0.5%—0.2%; Br $\approx$ 50—20(以下均为 $\times 10^{-6}$), Cs=30; Rb=1000—500; Sc=50—20; Zr=2000。上述元素含量和 SiO₂成负相关。Sr、Ba 含量比金伯利岩要高2—5个数量级。在碳酸盐中 Zn 约 500×10^{-6} , Zr>1000, Th>30, U>10(以上均为 $\times 10^{-6}$)。

Burgess, R. 等(1994)指出地幔中 I 的测定很重要,能揭示沉积物进入地幔的再循环,和¹²⁹Xe 异常相联系用来探知消失了的¹²⁹I。分阶段加热发现南非的金刚石的 Ar 有两个释放峰:1200℃和石墨化的2000℃,给出高⁴⁰Ar/³⁶Ar 比值(2000—30000),和 MORB 相近。有过剩⁴⁰Ar,和 Br、Cl 含量有很好的正相关。⁴⁰Ar/Cl 在立方体金刚石中是比较固定的,为 $8.5 \pm 9 \times 10^{-4}$ 摩尔。Br 与 Cl 间也有良好的正相关,Br/Cl 平均(19个样)为 $1.4 \pm 0.3 \times 10^{-3}$,和海水及 MORB 大体相近。I 与 Cl 间相关性较差,I/Cl 远大于海水。被立方体金刚石拘留的地幔流体中卤素含量估计是:Cl=2%—5%, Br= 60×10^{-6} — 120×10^{-6} ; I= 1×10^{-6} — 3×10^{-6} ; ⁴⁰Ar= 1×10^{-2} — 3×10^{-2} ml/g。这比当代上地幔(MORB 源)的值大出5000倍。他们给出以下结果,见表1—1。

表 1—1 主要地质体中卤素含量

	Cl $\times 10^{-6}$	Br $\times 10^{-9}$	I $\times 10^{-9}$
金刚石 ^①	8	25	0.1—2.5
MORB ^②	7	20	0.8
地壳	130	2700	820
海水	19000	67000	64

①上地幔⁴⁰Ar= 4×10^{-6} ml/g (Allegre et al., 1986); ⁴⁰Ar/Cl= 8.5×10^{-4} M。

(Burgess, R. 等, 1994)

②Cl—Schilling et al., 1980; Br—Deruelle et al., 1980。

Shiano, P. et al. (1994)报道大陆、海洋边缘地幔矿物中有富硅熔体全球性的广泛产出。他们在另一篇文章中报道了南印度洋 Kerkuelen 群岛的地幔捕虏体中富硅熔体和富碳酸盐熔体在同一岩浆包裹体中共生产出。

Dreibus, G. 等(1994)指出 H₂O 在地壳(加水圈)中含量为6.95%,至于地幔中有多少是难以估计的。该作者用以下三个方法进行粗略估计:

(1)吸积模式:当时所有的 H₂O 都消耗于 Fe 的氧化和生 H₂。H₂已有巨量逸失。此法估

算地幔中 H_2O 含量为 420×10^{-6} 。

(2) 大洋玄武岩玻璃中 H_2O : 利用 $\text{F}/\text{H}_2\text{O}$ 比值计算结果是 330×10^{-6} 。

(3) 上地幔捕虏体中 H_2O : 不选蛇纹石化或其它干扰的新鲜干净尖晶石相方辉橄榄岩矿物分阶段加热到 1200°C 测定释放 H_2O , 结果是 (10^{-6}) : 橄榄石 73, 斜方辉石 162, 单斜辉石 548。整个岩石 H_2O 是 100×10^{-6} 。此结果表明上地幔含 H_2O 是较低的。但前述两种计算表明地幔中至今还有很多 H_2O 。

Haggerty, S. E. (1994) 报道了 Jagerfontein 金刚石筒超深 ($> 300 \text{ km}$) 带和过渡带地幔捕虏体研究结果。超深捕虏体指金刚石中镁铁石榴石 (Mj) 包裹体和金伯利岩 Mj 石榴石捕虏体。前者在石榴子石固溶体中保留辉石 ($\text{R}_4\text{Si}_4\text{O}_{12}$); 后者是沿石榴石的 (111) 面出溶辉石, Si^{IV} 和 Si^{IV} 镁铁石榴石固溶体的稳定场是 $p > 10 \text{ GPa}$ (300 km)。最深的捕虏体被确认来自过渡带 450 km 。

Tomilenko, A. A. 等 (1994) 研究了金刚石流体包裹体以推知上地幔中的挥发组分。样品采自东北西伯利亚, 可分出三种类型: $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{碳氢化合物} (?)$ (类型 I); $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ (类型 II); 碳氢化合物 (?) (类型 III)。在“和平”金伯利岩筒二辉岩镁铝榴石的原始流体和熔体包裹体中发现不少于 $\text{C}_5 - \text{C}_{11}$ 的 n 链烷。在 Fe-Ni-C 高压合成的金刚石中发现盘状、管状、透镜状单相流体包裹体, 拉曼谱线表明有饱和碳氢化合物 (链烷)。在雅库特的“成功”、“发现”筒金伯利岩中榴辉岩的石榴石中发现单相的液化氮。该等作者指出, 根据“和平”、“成功”及南非“Roberts Victor”各金伯利岩筒方辉橄榄岩、尖晶石二辉橄榄岩、石榴石辉岩、含金刚石的纯橄榄岩、榴辉岩的石榴石、橄榄石的挥发分气相色谱分析以及流体成分的热力学模拟, 可以确认所有样品中的流体主成分是 H_2O 、 CH_4 、 CO_2 。某些样品中还有 N_2 。其它成分可以忽略不计。

金振民等 (1994) 通过实验指出地幔岩中熔融不仅发育于颗粒三联点上, 在差异应力 ($5 - 30 \text{ MPa}$) 下还可在两个颗粒间隙形成熔体薄膜, 这将会大大影响熔体的汇聚以及地球物理性质。这是一个重要的新发现。

孔隙流体不仅影响岩石的地震波速, 还影响岩石机械性质和粘度, 也影响矿物表面化学。如果各种矿物相混合, 其中又含有碳氢化合物超临界态流体, 问题就更复杂, 含轻的气体和饱和以重油的岩石压缩速度是明显有别的 (Batzle, M. L. 等, 1994)。

Zimmerman, M. 等 (1994) 进行固定荷载压缩实验, 围限压力 300 MPa , 绝对温度 1373 K 和 1523 K , 样品地幔岩 H_2O 含量 $1 - 1000 \text{ H}/10^6\text{Si}$, 颗粒平均大小 $20 \mu\text{m}$, 扩散蠕变 ($n=1$) 和位错蠕变 ($n=3-4$), 发现当 H_2O 较少 ($30\text{H}/10^6\text{Si}$) 时在接近固相线时蠕变有显著变化。在位错蠕变机制中在固相线下应变速率对温度是敏感的; 在扩散蠕变机制中当接近固相线时应变速率随温度增高而减小。这种蠕变的异常是由于 H_2O 的扩散。 $< 10\text{H}/10^6\text{Si}$ 的干样品即无此异常。如样品为 $1000\text{H}/10^6\text{Si}$ 则比 $30\text{H}/10^6\text{Si}$ 者严重地出现弱化, 水弱效应将超过熔融效应。因此, 如果 H_2O 含量低时, 地幔岩的局部熔融会提高蠕变强度。

近代地球物理研究结果继续表明一个地区的稳定性或活动性是和软流体位置的深浅紧密相关的。在南非 Kaapvaal 克拉通这种稳定区慢波速热体埋藏很深, 达 $350 - 500 \text{ km}$ (Venik L. et al., 1995); 而高度活动区如我国的渤海竟浅到 28 km 。

在国际文献中 plume 一词用得广泛, 但也引起许多怀疑。White W. M. (1995) 指出, 自从 plume 概念提出以来的 25 年中, 对其物理、化学理解都有限: plume 的热流较比板块的

失热小得多,对地幔对流的作用也是第二位的。除放射性成因 He 外,地幔柱地球化学并不带有深部地幔印记。根据同位素可把地幔柱分成3—4类,但原始地幔并不具备其中任何一类特征。Hauri E. H. (1995)也提到只是在最近才充分注意 plume 的地球化学。笔者也同样认为,plume 的概念还远不成熟,尤其是其地球化学特征更是相当模糊。只是实验模拟和计算,其结果均难以令人信服。本项目的地幔流体研究在这方面提供了不少新的结果和启迪来表明 plume 论点的不足。

社会岛玄武岩的同位素组成变化极大,Nd 同位素组成是曲线形,反映两种成分的混合,具有特别富集型标记,其 Pb/Ce、Nb/U 比其它地区地幔高,反映幔源岩石不均质。纯地幔过程的 Pb/Ce 比值不会变,如有地壳成分和过程参与则发生变化。在粗面岩中此比值因部分结晶而增大(White, W. M., 1995)。

气体研究是地幔流体研究中很灵敏而重要的一环。Krueger, A. J. et al. (1995)指出,通过总体臭氧制图光谱仪对火山 SO₂ 的测量值远远大于熔体测量结果,这证明喷发前存在单独的气相。

有人专门研究了氮 N₂ 在玄武岩、钠长石熔体中的溶解度(1250℃, 3×10^8 Pa, WT、NNO、CCO 的 f_{O_2} 缓冲),用 γ 活化分析,¹⁴N(d, α)¹²C 以测 N₂。发现 N₂ 溶解量随压力加大而加大,在酸性熔体中低于基性熔体。N₂ 的溶解度和 f_{O_2} 有关,越还原 N₂ 溶解越多。N₂ 在熔体中溶解量小于惰性气体。在岩浆上升中氧化性增大, N₂ 就要发生排气。

Sato, H. et al. (1995)测定 Uzen 英安岩流的临界孔洞气体压力。岩石中 H₂O⁺ 含量为 0.2%—0.51%,熔浆基质的结晶度为 19%—31%(体积)。孔洞度 1%—72%,和 H₂O 含量没有任何关系。基质玻璃中计算 H₂O 含量为 0.1%—0.7%(质量百分数)。

1980—1994 期间对意大利 Stromboli 宁静火山航空遥感测量得悉每天 SO₂ 排放 ≥ 5000 t 而固体喷发物起泡每天只 400—800 t。在气相中高富集系数的有 S、Cl、F、Br、Se、Zn、As、Ag、Au、Sb。在气态中 U/Th 比值高于岩浆,每年平均排出 U ≈ 0.35 t(Allard, P. et al., 1995)。

在夏威夷地幔捕虏体剖面惰性气体测量中发现 ⁴⁰Ar/³⁶Ar 变动于 41000—9700, He(R/Ra) 从 7.7 到 9.9, 和 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 成反比。Ne、Kr、Xe 同位素组成和大气无区别,但 ⁸⁰Kr、⁸²Kr 较 ⁴⁰Ar/³⁶Ar 显得过剩,¹²⁹Xe 也过剩。可能有两种惰性气体的混合,一是高 ⁴⁰Ar/³⁶Ar 低 R/Ra 者,富 CO₂,由岩浆活动之前被交代流体带于次生流体包裹体;另一种惰性气体是和碱性玄武岩浆同期,被矿物晶格捕获(Rocholl, A. et al., 1995)。

以上大体是到 1995 年国际上对地幔流体和软流层(体)研究现状的一个很概略性的浏览。下面再看一看国内这方面的研究。鉴于许多有关专题性进展情况在本书每一章中都会相应地提到,故只作一般性综述。本章所述研究现状不包括各章中未发表过的最近结果和观点。本章叙述资料以 1990 年以后的结果为主,考虑到认识的历史演化,对 80 年代成果也有提及。

90 年代以来,我国在原来地幔岩石学研究的基础上又兴起了一个地幔流体研究热,出版了一批新的专著、论文。代表性者有:

《中国上地幔特征与动力学论文集》(1990),作者有刘若新、邓晋福、路凤香、曹荣龙、夏林圻等。

《东南沿海地区新第三纪—第四纪大陆裂谷型火山作用及深部作用过程》(1990),赵海玲著。