

邵 飞 徐恒力 著

水-岩相互作用 及其与铀成矿关系研究

SHUI-YAN XIANGHU ZUOYONG JIQI YU YOUCHENGKUANG GUANXI YANJIU

——以相山矿田为例



地 质 出 版 社

水-岩相互作用及其与 铀成矿关系研究

——以相山矿田为例

邵 飞 徐恒力 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书以中国目前最大、最富的火山岩型铀矿田——相山矿田为例开展立典型研究。较系统地对成矿系统中相互作用和相互依赖的关键要素——源、运、聚的演化和动力学过程进行了分析；提出了火山岩浆期后成矿热液系统的概念，认为相山矿田铀成矿作用是火山岩浆期后成矿热液系统演化的产物，铀成矿作用过程与火山岩浆期后热液系统活动相伴随。论述了区域地质背景及矿田地质特征；探讨了成矿物质及成矿溶液来源；讨论了成矿期相山火山盆地地下水流动系统及流动形式；在对火山岩浆期后热液系统成矿物质富集、成矿流体运移、成矿物质聚集系统进行研究的基础上，就成矿流体系统形成和演化的动力学过程进行了分析；最后，建立了相山矿田铀成矿模式，并对矿田深入找矿方向进行了评述。

本书可供从事铀矿地质勘查、开发和矿床研究方面的人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

水-岩相互作用及其与铀成矿关系研究：以相山矿田为例 / 邵飞等著. —北京：地质出版社，2009. 4
ISBN 978-7-116-05999-3

I. 水… II. 邵… III. ①水-相互作用-岩石-研究
②铀矿床-成矿规律-研究 IV. P59 P619.140.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 035382 号

责任编辑：吴宁魁

责任校对：黄苏晔

出版发行：地质出版社

社址邮编：北京海淀区学院路 31 号，100083

电 话：(010) 82324508 (邮购部)；(010) 82324513 (编辑室)

网 址：<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱：zbs@gph.com.cn

传 真：(010) 82310759

印 刷：北京印刷学院实习工厂

开 本：787 mm × 1092 mm $\frac{1}{16}$

印 张：9.75

字 数：240 千字

印 数：1—600 册

版 次：2009 年 4 月北京第 1 版·第 1 次印刷

审 图 号：GS (2009) 372 号

定 价：38.00 元

书 号：ISBN 978-7-116-05999-3

(如对本书有建议或意见，敬请致电本社；如本书有印装问题，本社负责调换)

前言

无论是内生矿床还是外生矿床，都是成矿物质在漫长的地质历史演化过程中经各种地质、地球化学作用自“源”区至“汇”（聚集）区长期反复、多次迁移和富集的结果。铀矿床亦不例外，铀成矿过程是源-运-聚的动力学过程，流体贯穿于矿床形成的全过程，水（流体）-岩相互作用促成了成矿物质由“源”到“汇”的迁移和聚集，或者在“汇”区内再迁移和聚集。因此，可以认为水（流体）-岩相互作用造就了成矿过程。

相山矿田是我国目前最大、最富的火山岩型铀矿田，也是我国重要的铀资源生产基地。矿田的铀矿地质勘查及研究工作历时 50 余年，但以往的研究多局限于源-运-聚这一复杂成矿过程的最后环节，将矿田内观察到的地质现象、客观事实结合分析测试数据进行归纳和演绎，停留在形成唯象理论的层次上。对于相山矿田许多问题、甚至包括成矿物质来源这样的基础地质问题，众多研究者历来是各持己见。

本书以作者 20 余年来先后在相山矿田勘查及研究成果为基础，应用系统科学思想为指导，从系统演化和动力学过程分析对矿田铀成矿作用开展了深入研究，强调成矿作用过程的系统性和整体性，突出的研究成果如下：

1) 基于区域成矿物质时空分布特征和历史演化的分析，认为相山火山盆地是区域成矿物质的“汇”区，突破了以往在“汇”区内找“源”的局限性，区域富铀层是矿田最根本的成矿物质来源，其在火山岩浆活动过程中的混染（被熔融）作用使得岩浆具较高的铀含量，随着岩浆演化铀得以进一步富集，为随后发生的成矿作用提供了物质前提和保证，岩浆及其期后热液是成矿物质迁移的载体。

2) 根据流体包裹体的基本特点，结合氢、氧同位素分析，认识到相山矿田在不同时空阶段，成矿流体的基本特征不同，成矿溶液是岩浆水与大气降水成分的混合，但在不同成矿阶段，成矿流体中大气降水成分来源不同。早期成矿溶液中大气降水成分源自包含不同地质时代降水成分的岩石熔融；晚期成矿溶液中大气降水成分源自成矿时期中生代雨水的混入。

3) 讨论了相山矿田铀成矿过程中外生地下水的的作用，成矿期相山地区外生地下水的运动是地形势及岩浆作用双“源”共同作用下的运动，在局部空间域内发生地下水的“湍流”运动，这种“湍流”运动可能促使了铀成矿作用的发生。

4) 提出了火山岩浆期后成矿热液系统概念，与区域构造环境演化密切相

关的火山岩浆期后热液系统的活动及演化，促成了相山矿田长达 50 Ma 的铀成矿作用。在成矿物质的富集过程及成矿流体系统演化过程中，水（流体）-岩相互作用发挥了积极的作用，并最终造就了相山矿田铀成矿作用。

5) 充分考虑到成矿物质来源及富集过程、成矿流体系统演化以及流体运移、成矿物质迁移形式和沉淀机理等因素，建立了相山矿田新的成矿模式。

研究工作得到孙占学教授、邹茂卿研究员、唐相生硕士、段隆臣博士、孙自永博士、李门楼博士、甘义群博士等的大力帮助，作者特向他们表示诚挚的谢意！

第一作者感谢挚友谢方辉，他曾在我撰写本书最困难、甚至想放弃的时候给予了极大的鼓励！

第一作者真诚地感谢赵梅秀女士！她的付出，促成了本专著的完成！

作 者

2008 年 12 月 28 日

目 次

前 言

第一章 绪 论	(1)
1.1 选题的意义	(1)
1.2 研究现状	(2)
1.2.1 水-岩作用研究现状	(2)
1.2.2 火山岩型铀矿研究现状	(5)
1.2.3 相山矿田研究现状	(7)
1.3 研究内容与研究思路	(8)
1.3.1 研究内容	(8)
1.3.2 研究思路	(9)
第二章 区域地质背景及矿田地质特征	(11)
2.1 壳-幔结构及区域构造环境演化	(11)
2.1.1 壳-幔结构	(11)
2.1.2 区域构造环境演化	(14)
2.2 区域地层	(15)
2.3 赣杭构造带中生代火山岩浆活动特征	(18)
2.4 矿田地质特征	(18)
2.4.1 地层、岩性、岩相	(20)
2.4.2 构造	(22)
2.4.3 相山火山活动史	(24)
2.4.4 相山火山盆地岩、矿石化学成分	(25)
2.5 矿田铀矿化特征	(27)
2.5.1 铀矿化空间分布	(27)
2.5.2 铀矿石特征	(29)
2.5.3 围岩蚀变	(32)
第三章 相山矿田成矿物质来源	(35)
3.1 区域成矿物质时空分布及对铀源分析的指示	(35)
3.1.1 区域铀丰度特征对铀源判定的一般意义	(35)
3.1.2 区域成矿物质时空分布及区域铀源层判定	(36)
3.1.3 区域成矿物质分布对相山矿田铀源分析的指示	(41)
3.2 相山矿田铀源分析的铅同位素证据	(41)
3.2.1 铅模式年龄对铀源的推断	(41)
3.2.2 相山矿田铅同位素特征及其对铀源判断的指示	(42)

3.3 相山矿田铀源分析的微量元素地球化学证据	(43)
3.3.1 岩石微量元素特征	(43)
3.3.2 矿石微量元素特征	(46)
3.3.3 微量元素特征对铀源分析的指示	(48)
3.4 小结	(49)
第四章 相山矿田成矿流体来源及成矿物质的迁移	(51)
4.1 流体包裹体的基本特点	(51)
4.2 成矿流体来源	(53)
4.2.1 成矿溶液的氢、氧同位素组成	(53)
4.2.2 成矿流体来源判断	(56)
4.3 成矿物质的迁移	(58)
4.3.1 稀土元素地球化学对铀迁移的指示	(59)
4.3.2 蚀变岩中物质迁移的定量计算	(67)
4.3.3 水-岩作用的地球化学模拟计算	(73)
4.4 小结	(85)
第五章 相山矿田铀成矿过程中外生地下水作用的讨论	(88)
5.1 古地理、古地形、古气候再造	(88)
5.1.1 古地理	(88)
5.1.2 古地形	(90)
5.1.3 古气候	(92)
5.2 构造-古水文地质期划分	(93)
5.3 相山火山盆地成矿期地下水流动系统	(95)
5.3.1 重力穿层地下水流动的基本理论	(95)
5.3.2 古地形势控制下的地下水流场	(96)
5.4 相山火山盆地成矿期地下水运动形式讨论	(97)
5.4.1 影响地下水运动的主要因素及其与区域铀成矿的关联	(97)
5.4.2 成矿期地下水的运动	(99)
5.5 小结	(103)
第六章 相山火山岩浆期后成矿热液系统及铀成矿作用	(105)
6.1 成矿的构造-岩浆-地球动力学背景	(105)
6.2 火山岩浆期后成矿热液系统	(106)
6.2.1 成矿物质的富集过程	(106)
6.2.2 成矿流体的运移	(111)
6.2.3 成矿流体系统的演化	(113)
6.3 铀的迁移形式及沉淀机制	(116)
6.3.1 成矿流体的性质	(116)
6.3.2 铀的迁移形成	(117)
6.3.3 铀的沉淀机制	(119)
6.4 相山矿田铀成矿模式及深入找矿	(125)

6.4.1 铀成矿模式	(125)
6.4.2 矿田深入找矿方向	(126)
6.5 小结	(128)
第七章 结论与建议	(131)
7.1 结论	(131)
7.2 建议	(134)
参考文献	(136)
Abstract	(141)

Contents

Preface

Chapter 1 Foreword	(1)
1.1 Significance of Selected Topic	(1)
1.2 Study Situation	(2)
1.2.1 Study Situation of Water-Rock Interaction	(2)
1.2.2 Study Situation of Volcanic Rock Type Uranium Deposits	(5)
1.2.3 Study Situation of Xiangshan Orefield	(7)
1.3 Research Content and Path	(8)
1.3.1 Research Content	(8)
1.3.2 Research Path	(9)
Chapter 2 Regional Geological Background and Geological Characteristics of the Orefield	(11)
2.1 Crust – Mantle Structure and Evolution of Regional Structures	(11)
2.1.1 Crust-Mantle Structures	(11)
2.1.2 Evolution of Regional Structures	(14)
2.2 Regional Stratigraphy	(15)
2.3 Mesozoic Volcanism-Magmatism Characteristics of Gan-Hang Tectonic Belt	(18)
2.4 Geological Characteristics of the Orefield	(18)
2.4.1 Strata, Lithology and Lithofacies	(20)
2.4.2 Structures	(22)
2.4.3 History of Volcanism in Xiangshan	(24)
2.4.4 Chemical Compositions of Rocks and Ores in Xiangshan Volcanic Basin	(25)
2.5 Uranium Mineralization Characteristics of the Orefield	(27)
2.5.1 Spatial Distribution of Uranium Mineralization	(27)
2.5.2 Features of Uranium Ores	(29)
2.5.3 Wallrock Alteration	(32)
Chapter 3 Metallogenic Material Sources of Xiangshan Orefield	(35)
3.1 Temporal and Spatial Distribution of Regional Metallogenic Materials and Indications for Uranium Source Analysis	(35)
3.1.1 Regional Uranium Abundance and Its General Significance for Discrimination of Uranium Sources	(35)
3.1.2 Temporal and Spatial Distribution of Regional Metallogenic Materials and Discrimination of Regional Uranium Source Beds	(36)

3.1.3	Indications of Regional Metallogenic Material Distribution for Uranium Source Analysis in Xiangshan Orefield	(41)
3.2	Pb Isotopic Evidences for Uranium Source Analysis in Xiangshan Orefield	(41)
3.2.1	Pb Model Age for Deduction of Uranium Sources	(41)
3.2.2	Pb Isotope Characteristics of Xiangshan Orefield and their Indication for Discrimination of Uranium Sources	(42)
3.3	Geochemical Evidences of Trace Elements for Uranium Source Analysis in Xiangshan Orefield	(43)
3.3.1	Trace Element Characteristics of Rocks	(43)
3.3.2	Trace Element Characteristics of Ores	(46)
3.3.3	Indications of Trace Element Characteristics for Uranium Source Analysis	(48)
3.4	Conclusions	(49)
Chapter 4 Sources of Metallogenic Fluid and Migration of Metallogenic Materials in Xiangshan Orefield		
4.1	Basic Features of Fluid Inclusions	(51)
4.2	Metallogenic Fluid Sources	(53)
4.2.1	H and O Isotope Compositions of Metallogenic Solutions	(53)
4.2.2	Discrimination of Metallogenic Fluid Sources	(56)
4.3	Migration of Metallogenic Materials	(58)
4.3.1	Indications of REE Geochemistry for Uranium Migration	(59)
4.3.2	Quantitative Calculation of Material Migration in Altered Rocks	(67)
4.3.3	Simulation Calculation of Geochemistry in Water-Rock Interaction	(73)
4.4	Conclusions	(85)
Chapter 5 Discussion on the Role of Epigenic Groundwater During Uranium Metallogenic Process in Xiangshan Orefield		
5.1	Paleogeographic, Paleotopographic and Paleoclimatic Reconstruction	(88)
5.1.1	Paleogeography	(88)
5.1.2	Paleotopography	(90)
5.1.3	Paleoclimate	(92)
5.2	Division of Tectono-Paleohydrogeological Stages	(93)
5.3	Groundwater Flow System during Mineralization Stage in Xiangshan Volcanic Basin	(95)
5.3.1	Basic Theory of Groundwater Flow by Gravity Penetration	(95)
5.3.2	Groundwater Flow Field Controlled by Paleotopography	(96)
5.4	Discussion on Groundwater Movement Ways during Mineralization Stage in Xiangshan Volcanic Basin	(97)
5.4.1	Main Factors Influencing Groundwater Movement and their Correlation with Regional Uranium Metallogenesis	(97)
5.4.2	Groundwater Movement during Mineralization Stage	(99)

5.5	Conclusions	(103)
Chapter 6	Metallogenic Hydrothermal System of Post Volcanic-Magmatism and Uranium Metallogenesis in Xiangshan Basin	(105)
6.1	Metallogenic Background of Tectonics-Magma-Geodynamics	(105)
6.2	Metallogenic Hydrothermal System of Post Volcanic Magmatism	(106)
6.2.1	Enrichment Process of Metallogenic Materials	(106)
6.2.2	Migration of Metallogenic Fluids	(111)
6.2.3	Evolution of Metallogenic Fluid System	(113)
6.3	Uranium Migration Ways and Precipitation Mechanisms	(116)
6.3.1	Features of Metallogenic Fluids	(116)
6.3.2	Uranium Migration Ways	(117)
6.3.3	Uranium Precipitation Mechanisms	(119)
6.4	Uranium Metallogenic Model and Further Exploration in Xiangshan Orefield	(125)
6.4.1	Uranium Metallogenic Model	(125)
6.4.2	Further Exploration Directions	(126)
6.5	Conclusions	(128)
Chapter 7	Conclusions and Suggestions	(131)
7.1	Conclusions	(131)
7.2	Suggestions	(134)
References		(136)
Abstract		(141)

第一章 绪 论

1.1 选题的意义

铀作为原子能工业的基本原料，自 1789 年被发现以来，为原子能工业的发展和人类社会进步发挥了重要作用。铀资源是一种军民两用、高度敏感的战略资源，在国防建设和国民经济诸多领域有着广泛的应用，尤其是对国家安全的保障及核电发展的资源供给具有举足轻重和不可替代的地位。人类已迈入 21 世纪，构建人口、资源、环境与经济社会相互协调的和谐世界，是本世纪人类共同追求的目标。因此，铀资源对国家综合国力和社会经济的影响，越来越受到各国政府的高度关注，铀资源的勘查和研究工作是各国地质工作者的重要任务之一。

我国专业铀矿地质勘查工作起步于新中国成立后的 1955 年，50 余年来取得了较丰硕的勘查成果，已探明铀矿床数百个，累计探明资源量达数十万吨，为我国国防建设和国民经济发展提供了战略资源保障。随着社会经济的可持续发展，积极发展核电对缓解我国能源短缺、改善环境和能源结构不合理的现状具有重要的战略意义和现实意义。根据国家核电发展规划，2020 年全国核电总装机容量将达一定规模。核电的大发展必然带来对天然铀需求的极大增长，我国已探明的经济型铀资源对国民经济中长期发展的资源保障尚有缺口。为此，我国铀资源勘查的任务仍然十分紧迫，尤其是加强高品位、大矿量硬岩型铀资源的勘查已经受到政府及有关部门的高度重视。在铀资源勘查的实践过程中，为了提高找矿的预见性和成功率，必须坚持科研先行及“模式找矿”，实践表明“模式找矿”在铀矿勘查中已发挥着越来越重要的作用。

相山矿田地处中国华南铀成矿省赣杭铀成矿带的西南端，自 1957 年在该矿田北部发现 903 航放异常以来，相继开展了铀矿地质普查、详查、揭露等勘查工作，先后在相山火山塌陷盆地（Chen Zhaobo, 1981）内发现了 20 余个矿床，累计探明铀资源量数万吨，预测潜在资源量尚有数万吨。为此，相山矿田历来是地学界关注的热点地区之一，也是国内外广大地学工作者研究的重点地区之一。

几十年来，在相山矿田已投入了大量的勘查工作，同时还开展了大量的研究工作，取得了较丰硕的勘查成果及研究成果，为研究提供了丰富的资料。但以往资料对矿田铀成矿作用的研究多是建立在勘查所揭示的客观地质现象观察及矿田内各类分析测试数据基础之上的归纳和演绎。我们知道，成矿作用是源-运-聚的链式过程，成矿作用中的物质来源、成矿流体迁移、矿质淀积过程是发生在开放-流动的体系中，即成矿作用过程是动力学过程（杜乐天，2001；张荣华等，2006）。由此可见，以往基于唯象学认识的相山矿田成矿作用的研究，是一种相对静态的研究，并且缺乏系统性。

铀源、成矿流体运移、矿质聚集是铀成矿作用过程中的关键要素，成矿作用不是这些要素的简单叠合，应把成矿作用作为系统来考虑，这些关键要素是相互作用和相互依赖

的。因而,从历史的、系统演化的角度和动力学过程对成矿要素开展系统性研究,才能深入剖析铀成矿作用过程。其成果不仅可以进一步丰富火山岩型铀成矿理论,也有助于深化铀成矿规律的认识及铀成矿机理的深入分析,而且可进一步完善成矿模式的建立。此外,研究成果对指导相山矿田新一轮勘查具现实意义,也可为相同成矿地质背景下老矿区找矿成果的扩大提供重要的借鉴。

本书依托中国核工业地质局“十五”科研专项“南方经济型铀矿成矿条件研究及其远景预测”,在综合前人研究成果的基础上,基于铀成矿作用是源-运-聚的链式过程,着重于成矿作用的动力学过程分析。从区域铀成矿物质的时空分布及历史演化对矿田成矿物质来源进行了探讨;然后分析了成矿物质迁移的载体以及成矿物质在火山盆地“汇”区内的再迁移、再分配;对外生水参与铀成矿作用的若干问题进行了讨论;最后,研究了成矿流体演化过程及成矿物质聚集机理,建立了相山矿田铀成矿模式,指出了矿田进一步找矿方向,预测矿田西部和北部是值得开展新一轮勘查的重要靶区。

对以下关键问题提出了作者的观点:①跳出了在相山火山盆地内找“源”的思路,根据区域铀成矿物质的时空历史演化,认为早寒武世富铀地层是相山铀成矿的根本来源,富铀地层的熔融使得相山火山盆地成为成矿物质的“汇”区。②明确提出相山矿田成矿溶液来源为岩浆水和雨水的混合,但不同成矿阶段雨水成分进入成矿溶液的途径不同,早期(碱交代型)铀成矿溶液中雨水成分源自熔融岩石中含的降水成分,它们随岩石经熔融作用一道进入岩浆;晚期(萤石-水云母型)成矿溶液中雨水成分主要为成矿期(中生代)降水的混入,外生地下水以“湍流”运动形式进入成矿溶液,并形成有利于成矿的“混沌”区。③首次提出了相山火山岩浆期后成矿热液系统概念,火山岩浆期后热液系统水-岩作用造就了铀成矿过程,受区域构造-岩浆-地球动力学背景控制的相山火山岩浆期后热液系统的演化,孕育了相山火山盆地在时间尺度上相对连续的 50 Ma 的铀成矿作用。④在综合分析矿田成矿地质特征基础上,考虑成矿作用过程中成矿物质来源及富集过程、成矿流体演化过程以及成矿流体运移、铀沉淀机理等因素,建立了相山矿田铀成矿模式,强调了火山岩成岩过程是铀的富集过程,岩浆期后热液系统演化也是成矿流体系统演化的过程,流体降温、浓缩、混合等成矿机制的耦合,促使铀沉淀、成矿。

1.2 研究现状

1.2.1 水-岩作用研究现状

水-岩作用(water-rock interaction)是自然界最普遍的地球化学过程,从地表到地幔流体无处不在,无时不在。水-岩作用是近 40 年来国际地学界非常活跃的研究领域,涉及岩石学、矿物学、材料科学、海洋地质、环境保护、自然灾害防治及核废料处置等。同时,水-岩相互作用研究所取得的进展,也大大促进了人们对岩石矿物成因和矿产资源形成的深入了解。

水-岩相互作用包括:①常温、常压下,外生成因地下水与含水介质的作用;②与岩浆作用及变质作用等有关的内生水、地幔流体(深部流体)与岩浆熔融体及岩石间的作用。与成矿作用、尤其是与热液矿床成矿作用有关的水-岩作用,主要是涉及后者。

常温、常压下水-岩作用的结果,人们可以直接观察到,如岩石的风化、泉华、抽注钻孔由于新矿物形成引起的堵塞等,此外,常温、常压下的实验也为人们了解水-岩作用的动力学过程提供了有力的支撑,并且实验结果可与直接观察结果进行互证。而处于高温、高压状态的内生水、深部流体与岩石的相互作用,人们更多的是通过水-岩作用的最终地质产物,如岩石化学成分的变化,流体成分的变化,矿床形成等的观察,借助于已经获得的热力学数据,应用热力学对水-岩作用的发生及其程度进行逻辑推论。为了知道或了解水-岩作用的动力学过程,人们通常开展实验模拟和地球化学模拟。综合国内外资料,水-岩作用的实验模拟研究和水-岩作用的地球化学模拟研究,也是当今水-岩作用研究主要集中的两个方向。

1.2.1.1 水-岩作用实验模拟

20 世纪 70 年代以后,水-岩作用实验模拟研究发展较快。早期主要是在封闭体系和静态条件下完成人为给定温、压值条件下的玄武岩、辉绿岩与海水及 Na-K-Ca-Cl 溶液的反应实验 (Hajash, et al., 1980; Crovisier, et al., 1983)。

20 世纪 80 年代初,开始出现开放体系、流动条件下的水-岩反应实验,开展了不同温度、压力、流速条件下 NaCl 溶液、海水与流纹质玻璃、玄武质玻璃的流动反应实验,证实了玻璃的溶解速率随流速增高而增加,乃至能在低温水溶液-岩石体系中达到稳定的矿物平衡 (Dibble 和 Potter, 1982; Pohl 和 Liou, 1983)。国内曾贻善等 (1984) 在 300℃、 $500 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、水岩比为 10 的条件下,研究了玄武质玻璃与水与钠碳酸盐作用下次生矿物的形成和反应溶液的变化;周文斌 (1995) 在 150 ~ 300℃、10 ~ 50 MPa、水岩比为 2.29 ~ 2.31 条件下,研究了碎斑熔岩、黑云母片岩、流纹英安岩与水与钠碳酸盐作用下岩石化学成分和反应溶液的变化;张荣华等 (2002) 完成了钠长石、方解石、阳起石、萤石与水、盐溶液的反应实验,在水、盐溶液与矿物的反应动力学方面取得了积极的成果。

近年来,水-岩反应实验技术已拓展到 170 ~ 1100℃、100 MPa ~ 30 GPa 的高温高压条件,实验成果获得了许多非稳态非线性动力学过程的重大发现,如长期观测矿物-流体反应动力学过程发现在开放-流动体系远离平衡态下的非线性动力学现象,在外界干扰时出现复杂动力学过程的非线性响应;对 NaCl-H₂O 溶液在 100 MPa ~ 1 GPa 和 850℃ 下,发现两相不混溶区特殊结构——溶质与溶剂的聚集体现象;钠长石与水反应在近临界态时出现大的涨落。

人们已经认识到地质系统的复杂性,地球的各种各样的物理化学过程中,最丰富的是远离平衡态的非线性动力学过程,如成矿作用中的物质来源、迁移及沉淀过程是发生在开放-流动体系中;矿石的形成、矿床矿石和岩石的时空分布的韵律特征、分形、混沌和非线性特征的普遍存在等等 (於崇文, 2003; 张荣华等, 2006)。尽管水-岩反应实验得出的是在一定温、压条件下的水和岩石之间的反应结果,而不是一定温压状态下自然界水岩作用的再现,但这些研究为水-岩作用的理论扩展提供了新的途径。水-岩相互作用的实验成果,可以延伸和应用到成矿作用的研究中,如流体从近临界到超临界时水-岩作用动力学涨落与矿床形成的关系受到关注。

1.2.1.2 水-岩作用地球化学模拟

随着水-岩作用实验模拟研究所积累的大量水化学分析数据和热力学数据,以及计算机的广泛应用,于 20 世纪 60 年代形成了水-岩作用地球化学模拟技术,最近 30 多年来,

地球化学模拟研究得到了迅速发展。

水-岩作用地球化学模拟方法包括正向模拟和反向模拟,前者是用假定的地球化学反应来预测水和岩石的组分,后者则是从观测到的流体化学、同位素组成来确定质量转移过程,再现水-岩反应的历史。Helgson (1968)是最初介绍正向模拟程序(PATHI)的学者之一,目前EQ3/6程序系列(Wolery, et al., 1990)和PHREEQM是正向模拟程序中较先进的,可模拟封闭或开放体系矿物、岩石-水之间的物质交换过程。Parkhurst等(1985)推出了反向模拟程序BALANCE软件,Plummer等(1992)将计算天然水化学平衡的计算机程序WATEQF和BALANCE结合起来,推出了NETPATH软件,BALANCE和NETPATH是目前反向模拟最常见的程序。地球化学模拟技术在美国、加拿大、英国、荷兰等国家已成为解决涉及水-岩作用研究的一种常用方法。目前,我国地球化学模拟技术主要是利用模拟程序进行应用研究,应用领域主要涉及地球浅表(低温、低压)系统内的水-岩作用,如沉积盆地流体研究、地热系统研究、水的地球化学演化、油田水化学形成作用等。

水-岩作用的地球化学模拟只能演绎水-岩反应体系变化方向与平衡的规律,它是建立在平衡状态基础之上的。地质作用过程中,平衡状态只是一种假设,水-岩作用实验模拟研究也已经获得许多非稳态非线性动力学过程的发现。可见,水-岩作用实验模拟研究,与成矿作用过程中空间和时间尺度上的实际水-岩作用相比较,还是在微观层面上进行的。成矿作用是发生于自然界中涵盖着物理的、化学的、动力学的一种宏观、复杂的水-岩作用过程。水-岩作用地球化学模拟研究,也受到动力学、热力学数据库的不完整性所导致的化学平衡模型局限性的限制,不能完全逼真于自然界的水-岩作用。尽管如此,水-岩作用的实验模拟及地球化学模拟研究,可以对成矿作用过程中的水-岩作用、成矿流体演化概化模型的建立及成矿机理的深入分析,提供理论支撑和参考。

1.2.1.3 水-岩作用与金属矿床成矿作用研究

金属矿床成矿作用过程是成矿物质来源-迁移-淀积的链式过程,成矿作用过程中最活跃的因素是流体,而流体问题的核心是流动。近年来,对许多大型矿床形成条件进行了分析,认为大型矿石堆积有一个必要的条件——长期流动的热液系统。该热液系统内水-岩作用是导致矿石成因的本质问题,金属矿床的形成是水-岩相互作用动力学过程中的产物(张荣华等,2002)。

理论和实验研究已证明卡林金矿是水-岩相互作用的产物;吕古贤等(1999)通过对西秦岭、胶东典型金矿田的研究,提出了构造应力场转化与水岩反应浓缩成矿理论的新见解;张荣华等(2002)对长江中下游典型火山岩区水-岩相互作用进行了研究,认为火山岩与火山岩浆有关的流体-岩石相互作用造就了长江中下游火山岩区铁、铜、铅锌等金属矿床的成矿过程;周涛发等(2005)通过安徽月山(铜、金)矿田成岩成矿作用研究,认识到岩浆水与流经岩石的水-岩作用不仅对成矿流体中矿质的进一步富集具有重要意义,而且水-岩作用、大气降水的混入作用引起的成矿热液系统物理化学条件的变化,是成矿物质从成矿流体中沉淀成矿的主要原因。

近年来众多学者在金、铜、铁、铅锌等金属矿床成矿作用过程中开展了水-岩作用研究,典型矿床实例的研究成果解决了一些长期争论的地质问题,尤其是对成矿流体的起源、成分、运移及运移过程中物理化学性状变化等方面,水-岩作用研究成果更为突出。由此可见,水-岩作用不仅是当前地学研究的前沿,也是解决金属矿床成矿作用过程中关

键问题的重要研究内容。

1.2.2 火山岩型铀矿研究现状

我国铀矿床分类一直以赋矿围岩为依据,已发现的铀矿类型主要有花岗岩型、火山岩型、碳硅泥岩型和砂岩型,其中花岗岩型和火山岩型铀矿无论是在矿床数量上还是在资源量上都占主导地位。需要指出的是,这种分类没有考虑成矿作用。就相山矿田铀矿床分类,本书沿用火山岩型铀矿术语。

火山岩型铀矿系指其成因和物质来源与火山作用及其产物有密切联系,并且以具有明显的热液蚀变和大多数矿体以脉型产出为主要特征。因而,火山岩型铀矿是一种热液脉型铀矿,在国内外一直是作为热液矿床(Hydrothermal deposit)进行研究的。

世界上目前有二十多个国家发现有火山岩型铀矿床,主要产于环太平洋带、阿尔卑斯-喜马拉雅山带、俄罗斯西伯利亚地台南部(覃慕陶等,2001)。火山岩型铀矿的研究成果表现在对其成因认识的不断深化,岩浆分异热液成矿说曾一度占统治地位,但随着资料的积累和成矿作用研究的深入,人们认识到岩浆分异热液成矿说并不能解释全部火山岩型铀矿床的成因。随后,众多学者根据火山岩型铀矿存在矿岩时差、含矿火山盆地长时间内存在承压水动力系统、成矿溶液的的稳定同位素组成等基本地质事实,结合典型火山岩型铀矿的观察和研究,相继提出了浅成低温热液改造成矿说、古脉状承压热水排泄区铀成矿说(李学礼等,2000)、双混合成矿说(Chen Zhaobo, 1981)和碱交代作用成矿说(杜乐天,2001)。

国外较系统的研究成果有:R. A. 里奇、H. D. 霍兰和 U. 彼得森(1976),他们通过大量的文献调研和野外工作,对北美洲、欧洲、大洋洲和非洲等地的许多热液铀矿床特征进行了总结,以传统地球化学理论为基础,认为包括火山岩型铀矿在内的热液铀矿床中的铀都是通过氧化溶液搬运的,并由六价铀还原成四价铀而沉淀成矿。高温高压条件下的化学动力学实验已对这一认识的普适性提出了质疑。图加林诺夫(1977)以前苏联某火山洼地中的铀矿床为例,从区域地质、矿床地质、矿物学、热液蚀变、矿床形成的物理化学条件等方面进行了剖析和研究,提出了如下基本论点:①成矿溶液是由渗流水沿顺层集水带潜入地下,并可能在陆相火山洼地下部层位与变质水或其他深层水混合而形成的;②火山洼地内水渗流时间长且有滞流性质,溶液成分中可能加入了大量岩浆活动的喷气物质,导致溶液与围岩发生剧烈反应;③复杂的岩性成分以及地层岩石的孔隙度和透水性各不相同,使溶液中富集包括铀在内的多种组分;④含铀溶液运移至减压区时,由于物理化学平衡受到破坏,因而发生成矿作用。需要指出的是,上述基本论点突出的是外生水在火山洼地内对成矿物质的二次迁移,没有揭示火山作用与铀成矿间的本质联系。

我国目前已发现的火山岩型铀矿床有80%左右分布在华南铀成矿省(图1.1)。已探明的火山岩型铀矿储量占我国铀矿总储量的1/4左右,火山岩型铀矿是我国主要铀矿床工业类型之一(覃慕陶等,2001)。

我国火山岩型铀矿近年来较系统的研究成果有:覃慕陶等(2001)以地质力学理论为指导,以地质构造环境为基础,对南岭地区花岗岩型和火山岩型铀矿开展了“构造-岩浆-成矿”三位一体的综合研究,探讨了成矿的地球化学过程、成矿机制,并指出花岗岩型铀矿主要是热液作用成矿,火山岩型铀矿以成岩作用成矿为主。杜乐天(2001)在对我国典

型热液铀矿床实例解剖的基础上,进而将中国热液铀矿床与俄罗斯、美国、巴西、南非、澳大利亚、法国等国家的同类矿床进行了对比,总结了我国热液铀矿基本成矿规律和一般热液成矿学,对以往热液铀矿的有关成矿理论提出了独特的见解,认为中国乃至全球包括火山岩型铀矿在内的热液铀矿是碱交代作用形成的,形成矿床的热液来自幔汁 (HA-CONS)。

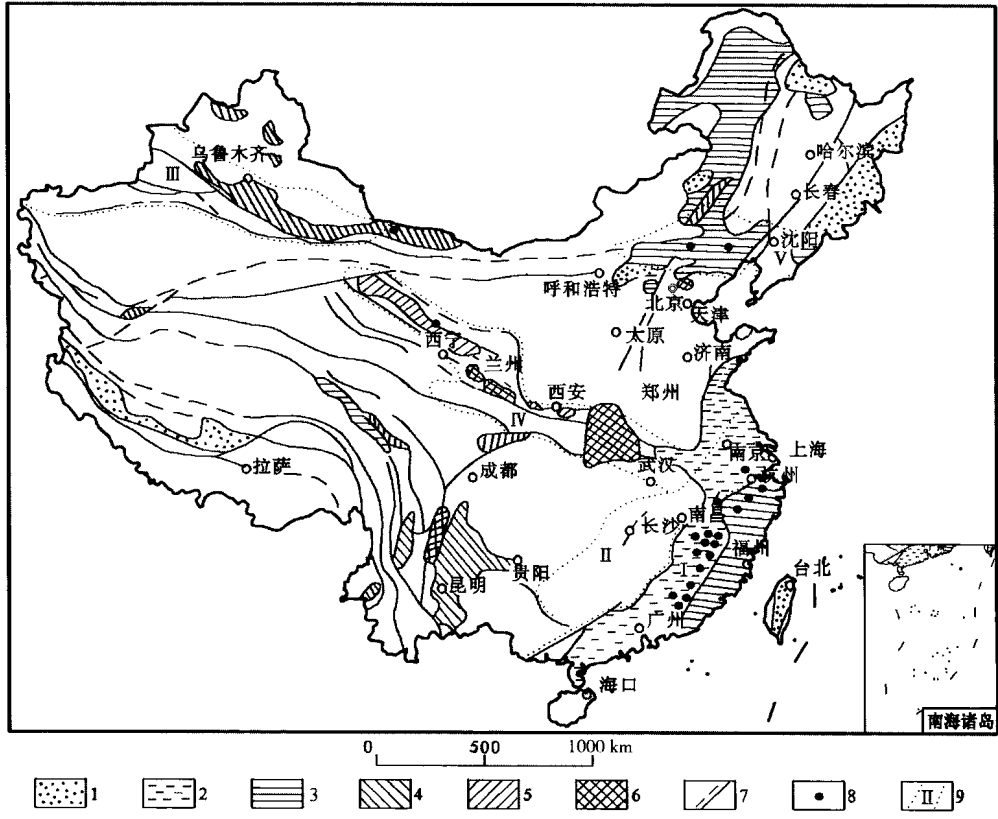


图 1.1 中国铀成矿省、火山岩及火山岩型铀矿床分布示意图

(据覃慕陶等, 2001)

1—新生代火山岩; 2—中生代火山岩散布区; 3—中生代火山岩; 4—晚古生代火山岩; 5—早古生代火山岩; 6—震旦纪火山岩; 7—区域性大断裂带; 8—火山岩型铀矿床; 9—铀成矿省 (I—华南活动带铀成矿省; II—扬子陆块东南部铀成矿省; III—天山铀成矿省; IV—祁连-秦岭铀成矿省; V—华北陆块北缘铀成矿省)

矿床的形成,一般都经历了由矿源、流体运输到矿石沉淀聚集的过程(翟裕生, 1996),铀成矿作用也不例外。火山岩型铀矿以往的研究多以成矿过程中的“聚”为重要对象,至于“源”何在?一直说不清楚,事实上,火山岩型铀矿床研究争论的焦点就是矿质、热液的来源。此外,成矿流体的演化、矿质的沉淀等,也见解不一。

综述火山岩型铀矿的研究,主要是以传统地球化学理论为基础,围绕已经形成的矿床客观实体开展成矿地质背景、矿床特征、控矿因素、成矿规律等研究,属包括假说推断、唯空间定位、缺少系统演化及动力学过程分析的唯象学研究方法,将观察所得到的经验事