

浙西新路盆地中生代岩浆作用 与铀成矿深部动力学过程

● 王正其 李子颖 著



地质出版社

浙西新路盆地中生代岩浆作用 与铀成矿深部动力学过程

王正其 李子颖 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书对浙西新路盆地中生代岩浆作用及其铀成矿的深部动力学机制开展了系统研究。查明了新路盆地从超酸性火山喷发开始,直至辉绿岩侵入为止,期间经历约 40 Ma 的岩浆活动过程,形成了一套高钾钙碱性(钾玄质)–钾玄岩系列岩石组合;阐明了自白垩纪以来,新路地区具有软流圈物质持续上升、地壳厚度明显减薄、岩石圈地幔逐步抬高的壳幔演化特征;建立了中生代岩浆作用过程主量元素、微量元素和 Sr–Nd 同位素地球化学演化轨迹;提出新路盆地铀矿床成矿流体具有壳幔源区物质混合特征,酸性系列岩浆岩与火山岩型铀矿在空间上的叠置,是壳幔作用机制下系列产物的耦合,来自富集地幔的以富含 LREE 及 K、Sr 等大离子亲石元素为特征的高温“轻物质流”持续上涌及由此诱发的壳幔作用,为新路盆地岩浆活动及火山岩型铀成矿作用提供了动力。

本书对从事铀矿地质科学研究与勘查工作人员、其他资源矿产领域研究人员、相关专业研究生具有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

浙西新路盆地中生代岩浆作用与铀成矿深部动力学过程 / 王正其等著. —北京:地质出版社, 2016. 6
ISBN 978–7–116–08247–2

I. ①浙… II. ①王… III. ①中生代—盆地—岩浆作用—研究—浙江省②中生代—盆地—铀矿床—成矿作用—动力学—研究—浙江省 IV. ①P588.11②P619.140.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 054941 号

责任编辑:李 佳 白 铁 李 华

责任校对:关风云

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) 66554528 (邮购部); (010) 66554625 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真:(010) 66554685

印 刷:北京地大天成印务有限公司

开 本:787 mm × 1092 mm¹/₁₆

印 张:9.25

字 数:260 千字

版 次:2016 年 6 月北京第 1 版

印 次:2016 年 6 月北京第 1 次印刷

定 价:30.00 元

书 号:ISBN 978–7–116–08247–2

(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

长期以来,关于火山岩型铀矿的铀源及流体问题存在较大争论。铀矿地质界通常以壳源铀成矿作用理论为基础,强调火山岩型铀矿成矿主要与壳内热液作用相关,铀源来自壳源岩石,不可能来自地幔。同时基于火山岩型铀矿床与富铀酸性火山岩在空间上的良好对应关系,认为两者是一种“热液蚀变导致围岩中铀活化迁移,并在适合的部位富集成矿”的“就地取材”式成矿物源关系。然而上述观点难以解释以下地质事实:具有类似地球化学组成和成因特征的火山岩带或同一火山构造单元内,铀矿床仅在某些特定构造部位发育,而且表现出与晚期岩浆产物更密切的空间关系;几乎所有的火山岩型铀矿与赋矿围岩之间均存在较大矿岩时差,铀成矿时代接近或滞后于火山构造单元内发育的辉绿岩成岩年龄;蚀变场岩石较正常未蚀变岩石的铀含量,通常是不降反升;铀矿石通常伴生大量具有幔源性质的萤石、方解石和富磷矿物等,近年来发现的众多的地球化学数据显示,很多原先认为是地壳或地壳浅层热液作用形成的铀矿床,实际上与幔源物质参与密切相关。众多学者业已认识到大陆岩石圈动力学及其演化过程对花岗质岩浆活动与内生金属成矿作用具有重要的制约作用,并将研究视角聚焦于深部壳幔作用过程与特点。那么,火山岩型铀矿与富铀火山岩体之间的空间对应关系,到底是一种“就地取材”式的成岩成矿关系,还是岩浆作用深部过程与铀成矿作用的耦合结果?诱发火山岩型铀成矿发生的动力学机制是什么?该问题已成为当前铀矿地学界倍受关注的前沿课题和争论焦点,对其展开深入探讨对热液型铀成矿理论研究与创新具有重要价值。

新路盆地是一个燕山期发育形成的火山断陷盆地,位于江山-绍兴深大断裂中段北侧扬子地块的南缘,是赣杭火山岩型铀成矿带的重要组成部分。作者选择新路盆地及其大桥坞矿床作为研究对象,选题新路盆地中生代岩浆作用、深部过程及铀成矿作用,针对盆地内共生发育的酸性系列岩浆岩(黄尖组火山岩、杨梅湾花岗岩、花岗斑岩)、辉绿岩和铀矿石,分别开展了岩石学、同位素定年,主量元素、微量元素和 Sr、Nd、Pb、S 同位素组成特征和岩浆作用过程的地球化学动态演化趋势特征等研究工作。旨在以热点(深源)铀成矿理论为指导,对新路盆地火山岩型铀成矿作用进行重新审视,探讨岩石圈地幔源区性质、壳幔作用过程对岩浆作用成因、成矿流体形成及其铀成矿的制约作用,为区域铀资源评价和深部铀矿找矿提供新的理论思路。

研究工作取得的新认识与新进展主要包括以下方面:

关于新路盆地火山岩形成时代归属问题存在不同的意见。本书作者开展的花岗斑岩锆石 U-Pb 法和辉绿岩 Ar-Ar 法定年结果表明,它们的成岩年龄分别为 125 ± 2 Ma、 93 ± 3 Ma。综合前人取得的数据基础上,本书将新路盆地劳村组、黄尖组和寿昌组时代归属修正为早白垩世(135~117Ma),认为新路盆地从超酸性火山喷发开始,直至辉绿岩侵入为止,期间经历约 40 Ma 的岩浆活动过程,形成了一套高钾钙碱性(钾玄质)-钾玄岩

系列岩石组合。

首次厘定新路盆地辉绿岩为钾玄岩,认为它是板内拉张构造环境下岩石圈地幔上侵的产物。提出包括新路盆地在内的衢州地区中生代地幔具有“双层”结构,上部岩石圈地幔以钾玄岩组成为特征,下部为由钠质橄榄玄武岩系列组成的软流圈地幔,两者均具富集型地幔性质;研究表明,在中生代-新生代期间,研究区岩石圈地幔物质组成发生了重大转变,至中新世时原由钾玄岩组成的岩石圈地幔已被同样具有富集地幔性质的软流圈物质替代,从而为新路地区中生代壳幔演化及其岩浆作用深部动力学机制研究提供了重要证据。认为自中生代白垩纪以来,新路地区具有软流圈物质持续上升、地壳厚度明显减薄、岩石圈地幔埋藏位置逐步抬高的壳幔演化特征。

基本查明了新路盆地酸性系列岩浆岩成因。提出酸性系列岩浆岩成因类型既不是I型,也不宜称之为S型或A型,而将其归属于钾玄质岩石系列较为恰当;酸性系列岩浆岩与华夏地块在浙西北地区发育的陈蔡群片麻岩具有相似的 ε_{Nd} 值和模式年龄($T_{2\text{DM}}$)等地质地球化学特征,表明其源岩物质与陈蔡群片麻岩密切相关,由此揭示了发生于1000~900 Ma时期或其后的扬子地块和华夏地块两大块体之间的陆陆碰撞,具有华夏地块向扬子地块下部俯冲的动力学特点,在碰撞拼贴之后,扬子地块在新路地区的下地壳已被华夏地块的变质基底陈蔡群替换;酸性系列岩浆岩是中生代壳幔作用的系列产物,具有来自岩石圈地幔的组分与陈蔡群熔融物质的混合特征,岩浆演化过程受到平衡部分熔融和壳幔源区混合作用共同制约。

基本确证新路盆地中生代壳幔作用过程及其系列岩浆岩形成与演化是在来自地幔的高温“轻物质流”持续上涌的动力学机制下发生的。高温“轻物质流”组成以富含轻稀土元素、大离子亲石元素(K、Sr、Ba等)为特点,贫高场强元素和过渡元素,富集地幔形成以及高温“轻物质流”持续上涌,与起源于软流圈底部或更深部位的地幔柱构造活动相关。

在铀成矿特征与物源示踪研究基础上,初步认为大桥坞矿床早期铀成矿作用时代为52.2 Ma左右,以扩散渗入形式成矿为特点,晚期则表现为沿裂隙或断裂充填成矿;早期成矿流体以 H_2O 为主要溶剂,晚期成矿流体以富F、S为特征; H_2O 主要来源于深循环的地表水或浅层裂隙水;F、S来自富集地幔源区;成矿流体中的铀主要来自壳幔作用源区或富集地幔。

通过综合分析提出了以下新观点:新路盆地火山岩型铀矿与酸性系列岩浆岩的关系不是“物源供给”关系,而是中生代壳幔作用机制下不同阶段系列产物在空间上的叠置与耦合;来自软流圈富集地幔或更深部位的高温“轻物质流”持续上涌及由此诱发的壳幔作用,对新路盆地中生代酸性系列岩浆活动及其铀成矿作用起着重要的控制作用,既是动力源,也是成矿流体的主要发源地。

本书研究工作开展与出版,得到了工业与信息化部国防科学局核能开发三期、国家自然科学基金(批准号:41040019)、东华理工大学放射性地质与勘探技术国防重点学科、东华理工大学资源与环境教育部重点实验室、地质学江西省重点学科、地质资源与地质工程江西省高水平学科的资助。黄志章、李秀珍两位老师在室内样品处理、单矿物分离、样品测试与数据处理等方面给予了大力指导、支持和帮助,正是他们的无私奉献,为研究工作的顺利开展创造许多有利条件。研究过程先后得到了中国核工业地质总局张金带总工程

师（研究员），核工业北京地质研究院的黄净白研究员、赵凤民研究员、秦明宽研究员、范洪海研究员、欧光习研究员、韩效忠高级工程师、王明太高级工程师、马汉峰博士、郭庆银博士、张玉燕硕士等，东华理工大学地球科学学院的饶明辉教授、余达淦教授、潘家永教授、谢才富教授等，浙江省核工业 269 大队的何胜忠研究员、汤江伟研究员等众多老师、专家、同仁和朋友们的大力支持、指导、关心和帮助，在此一并致以诚挚的谢意。

由于作者水平与时间等原因，书中一定存在不成熟甚至是不正确的观点，错误在所难免，敬请读者批评指正。

目 录

前 言

第一章 绪 论	(1)
第一节 选题依据和意义	(1)
第二节 国内外研究现状	(2)
第三节 研究内容与研究目的	(12)
第四节 研究思路与研究方法	(13)
第五节 实物工作量	(14)
第二章 区域地质背景	(15)
第一节 大地构造背景与基底组成	(15)
第二节 区域构造演化	(17)
第三节 新路盆地地质特征	(18)
第四节 区域莫霍面分布特征	(20)
第三章 新路盆地岩浆岩年代学	(23)
第一节 劳村组、黄尖组和寿昌组火山岩年代学	(23)
第二节 杨梅湾斑状花岗岩年代学	(24)
第三节 花岗斑岩年代学	(24)
第四节 辉绿岩年代学	(26)
第五节 超基性岩年代学	(28)
第四章 辉绿岩地质与地球化学特征	(29)
第一节 岩石学与矿物学特征	(29)
第二节 主量元素与微量元素地球化学	(32)
第三节 Sr、Nd、Pb 同位素地球化学	(37)
第四节 钾玄岩的厘定	(39)
第五节 构造环境分析	(41)
第五章 酸性系列岩浆岩地球化学特征	(44)
第一节 岩石学与矿物学	(44)
第二节 主量元素地球化学特征	(47)
第三节 稀土元素地球化学特征	(53)

第四节	微量元素地球化学特征	(56)
第五节	Sr、Nd、Pb 同位素地球化学	(60)
第六节	酸性系列岩浆岩物质来源与成因类型	(64)
第六章	新生代超基性岩地球化学特征	(73)
第一节	地质与岩石学特征	(73)
第二节	主量元素与微量元素地球化学	(76)
第三节	构造环境分析	(81)
第七章	岩浆作用与动力学机制	(83)
第一节	地幔组成与演化	(83)
第二节	中生代岩浆作用深部过程反演	(88)
第三节	酸性系列岩浆岩成因	(98)
第四节	深部动力学机制探讨	(100)
第八章	铀成矿特征与成矿物质来源探讨	(102)
第一节	铀成矿地质特征	(102)
第二节	铀成矿地球化学特征	(107)
第三节	铀成矿物质来源探讨	(118)
第九章	主要结论	(124)
参考文献		(126)
Abstract		(130)
图版及说明		(133)

第一章 绪 论

第一节 选题依据和意义

一、选题依据

随着我国大力发展核电,对铀资源需求量势必剧增,铀矿地质工作既迎来新机遇,也面临新的挑战。已经停止勘查近 10 年的热液型铀矿,将在今后较长时期内成为铀矿地质找矿工作的重点目标和找矿对象,切入点首先是已知矿区(矿田)的扩大。衢州地区是我国重要的火山岩型铀资源供给基地,应当作为首选地区之一。

对衢州地区新路盆地大桥坞铀矿田的新一轮找矿工作,已知矿区及外围,特别是深部的找矿扩大工作是工作重点,也是工作难点。在过去相当长一段时间内,衢州地区铀矿找矿主要是以壳源再造、浅成低温的理论为指导,尽管找到若干火山岩型铀矿床,成绩显著,但无法解释最新研究发现的一些地质事实与地质数据,也与新时期成矿理论发展现状和找矿工作的要求不相适应。新一轮铀矿找矿工作着眼于寻找中大型铀矿床,只有以新的铀成矿理论作指导,才能在原有找矿成果基础上有大的突破。以热点(地幔柱)成矿理论为指导,建立并完善深源铀成矿作用机制是一个重要的研究方向,显得十分迫切。

由于地幔流体具有充足的流体来源和稳定的热源条件,使成矿系统能够长时间维持;地幔流体具有较高的溶解能力,并含有丰富的矿化剂;地幔流体在穿越地壳向上迁移的过程中,既可激发、活化地壳中的矿质,也可促进浅部流体的循环对流,萃取更多的成矿物质。地幔流体的成矿作用逐渐被广大地质工作者所重视。研究表明,大型、特大型矿床的形成,通常与壳幔作用及其幔源物质活动存在密切关系。幔源物质成矿是当前矿床学研究的前沿课题,也是地学研究的热点和争论的焦点。传统的铀矿床学和铀地球化学认为,铀元素是亲石元素、不相容元素,在漫长的地球演化历史中,铀趋向于地壳富集,热液型铀成矿作用通常发生在壳内,主要与壳内热液作用相关,成矿物质主要来源于地壳。然而越来越多的地质事实和地球化学研究成果显示,很多原先认为是地壳或地壳浅层热液作用形成的铀矿床,实际上与幔源物质及其幔、壳体系之间的作用存在重要成因关联性。

热点(地幔柱)成矿理论假说的提出,对地幔源区性质,壳幔作用过程与作用形式,以及成矿作用的研究提出了新的研究思路和课题。众多资料表明,地幔柱的表现形式之一——大陆型热点作用对铀成矿的制约问题(李子颖,2004),已经成为众多铀矿地质工作者必须面对和解决的研究命题,这也直接关系到下一步铀矿找矿工作的深入及铀矿资源的可持续发展问题。选择衢州地区中生代岩浆作用、深部过程及铀成矿作为研究内容,探讨热点(地幔柱)活动特点及对岩浆作用、成矿流体形成与铀成矿作用的制约,揭示浙

江衢州地区新路盆地与火山岩相关的热液型铀成矿作用机制,既具有学科研究的前缘性,适应铀矿找矿当前形势与战略要求,也与该地区下一步深部铀矿找矿和扩大工作实际需要相一致。

二、选题意义

课题研究意义体现在:一方面,研究工作涵括岩石圈地幔物质组成及壳幔作用、热液型铀成矿作用两个理论研究热点领域,涉及岩石学、矿物学、矿床学及地球化学等学科内容与研究方法,旨在综合阐明热液型铀成矿作用机制,体现了多学科联合攻关及研究思路的先进性。通过本课题的研究,尝试将热点活动及壳幔相互作用特征与衢州地区火山岩型铀矿床成矿作用之间建立理论联系,并将研究领域由幔源流体成矿延伸至地幔源区性质对地幔流体及铀成矿的制约作用,有益于铀地球化学、铀矿床成矿作用基础理论的创新和发展。另一方面,本课题研究工作与衢州地区大桥坞铀矿田面临的深部找矿和前景扩大工作密切相关,课题研究的实施,对生产实践将起到重要的指导和促进作用;本课题研究成果对华东地区其他工作区热液型铀矿成因机理、铀成矿控制因素等深入研究与探讨,以及面临的找矿前景扩大工作也将起到积极的促进作用。因此,课题选题具有重要的理论意义和实践价值。

第二节 国内外研究现状

一、地幔组成、热点(地幔柱)与热液成矿作用

(一) 地幔组成

地幔是地球最大的圈层,介于莫霍面与核-幔边界(古登堡面)之间,体积占地球的83%,质量占67%。根据 v_p 及 v_s 波速特征,可将现今地幔分为上地幔(深度约10~400 km)、过渡带(400~670 km范围)和下地幔(670~2900 km)3层。地震资料显示,上地幔的上部(约200 km以上)又可分为坚硬的外壳(岩石圈)及下伏的部分熔融的软流圈;岩石圈地幔即指位于软流圈之上的上地幔部分。通常认为,现今地幔结构与组成是原始地幔进一步分异演化的结果。

地幔物质成分目前主要通过实验模拟、地幔岩包体和地震波数据等途径进行研究。自20世纪80年代以来,地幔地球化学研究的主要成果之一是查明了地幔组成存在垂向和侧向上的不均一性。主要依据同位素研究成果,Zindler等(1986)提出地幔由4种端元组成,它们分别是亏损地幔(DMM)及高 μ 值地幔(HIMU)、富集地幔I(EM I)、富集地幔II(EM II)(陈俊等,2004)。所谓亏损地幔是指相对于原始地幔亏损不相容元素,反之,则为富集地幔。研究认为,地幔部分熔融及岩浆析出,或地幔交代作用,或地壳及岩石圈物质重新进入地幔对流等作用是导致地幔不均一性的重要途径(Chase, 1981; Hauri et al., 1993; Michard et al., 1985; Weaver, 1991; Class et al., 1993; Tatsumoto et al., 1991; Hart et al., 1988)。通常认为,海洋沉积物是EM II型地幔的物源组成之一,EM I则代表陆源沉积物,源自交代的陆下岩石圈(陈俊等,2004)。洋岛玄武岩(OIB)

的同位素组成与洋脊玄武岩 (MORB) 之间存在明显的差异和变化是最早用来说明地幔不均一性存在的。最新研究表明, 地幔同位素组成的不均一性空间尺度可以从几厘米至数千千米大的规模, 时间尺度可达几十亿年的尺度 (Faure G, 2001; Gast et al., 1964; 陈俊等, 2004)。

(二) 热点概念和基本理论

“热点” (hotspots) 概念与地幔柱 (mantle plume) 构造的提出基本与板块构造理论的提出同期 (Davies, 2005; Hofman, 1982)。Wilson (1963) 在研究夏威夷-皇帝岛火山链 (洋岛玄武岩, OIB) 建造向西北方向逐渐变老, 并延伸几千千米的成因时, 推理认为大约 43 Ma 以前, 太平洋板块下部存在一个固定的“热点”, 其中蕴含大量的、绵绵不断的热能, 导致上部太平洋板块被部分熔融形成岩浆, 产生大量的火山活动并形成火山岛; 由于“热点”是相对固定的, 而上覆太平洋板块在不停地作横向运动, 致使已形成的活火山最终离开“热点”, 从而形成一条沿海底扩张方向火山岩年龄逐渐变老的夏威夷火山岛链。Wilson 认为热点位于一个地幔对流室的中心, 在这里地幔物质的运动是缓慢的, 而其上部的地幔对流较快, 并有助于上覆岩石圈板块的运移。地幔柱是在研究“热点”及其形成机制基础上, 由 W J Morgan 于 1972 年正式提出的 (Davies, 2005)。Morgan (1972) 在定性解释 Wilson 提出的在运动板块下存在地幔热点时, 认为热点起源于地幔柱构造, 即海山物质的部分熔融需要大量岩石, 并提出熔融点既提供了母岩物质, 也提供了热; 热点火山活动所需的岩浆物质来自地球深部的地幔深处 (670 km), 由于放射性元素分裂、释放热能导致地幔羽状物质的上升到达岩石圈底部, 并侧向扩张导致上部的坚硬的岩石圈运动, 中心部位由于高温地幔羽状物质对岩石圈物质的熔融而形成火山作用。

自热点概念提出以来, 很多学者从不同角度对地幔柱构造进行了探讨、补充和完善。经过理论与实验模拟、地震三维层析成像探索, 证实热点地区的岩浆活动不可能起源于岩石圈, 而必定与岩石圈下的地幔物质上浮有关 (Anderson, 1975, 1982)。Crough 等作了热点地区岩石圈减薄和被更热的软流圈物质取代的定量化分析, 结果支持热点海隆是与岩石圈下伏地幔热柱活动有关。关于地幔柱的起源深度, 尚存在不同的看法。Morgan (1972) 认为起源于上、下地幔之间的不连续热边界层 (670 km)。而 Deffeyes 则认为地幔柱起源于下地幔。Anderson (1975) 提出地幔柱起源于核幔底部的 D'', 认为 D'' 从外地核那里聚集了大量的放射性元素, 放射性热导致 D'' 具有高温低黏度的特征; 最新研究表明内核存在差速旋转 (宋晓东, 1998), 沿核南北向的 P 波波速较东西向速度快 3%; 在下地幔底部某些区域存在“超低速层” (ultra-low velocity zone, 又称 D''), 其厚度不到 40 km, 层中 P 波速度减少 10% (Garnero et al., 1996)。据此分析, 地核不仅具有巨量热能, 而且具有旋转能 (杨学祥等, 1996a, 1996b); 下地幔底部如此大的速度异常只能用区域性部分熔融来解释, 超低速层的位置与上部的地幔柱相关 (Williams et al., 1996); 重力分异使核幔边界 (CMB) 以上部分减压膨胀 (吸热过程), 边界以下部分增压收缩 (冷却发热), 一个热边界层 (D) 会在核幔边界之上形成, 并构成核幔边界成为重要的热交换界面 (Larson, 1991); 这一边界层随时间的演化而变得不稳定, 从而释放出由热物质组成的上升地幔柱 (周琪瑶等, 1998; Loper D E, 1991)。日本一些学者, 依据地震

层析成像、超高压实验等研究,使地幔柱研究更加丰富和具体化,依据核幔边界(2900 km)、上地幔底界(670 km)、岩石圈底界(100 km),将地幔柱划分为一、二、三等3级(Maruyama et al., 1994)。牛树银等(2001, 2002)提出了地幔热柱多级演化的认识,并将第三级地幔柱称之为幔枝构造;认为地幔热柱的形成和发展主要受地球各圈层温度差、压力差、黏度差、速度差等的控制,此外还受岩石圈特性、区域构造应力场的控制;不同地质时期、不同构造部位,幔枝构造发育特征有所不同。

国内外对地幔柱和热点的定义与理解不尽统一。Anderson (1975)认为地幔柱与其说是热柱,不如说它是一种化学柱;王登红等(2001)认为地幔柱为自核幔边界上升、在地幔中演化、到近地表与地壳发生壳幔相互作用的圆柱状地质体。李子颖(1999, 2006)对地幔柱定义进行了概括,认为地幔柱是指储藏巨大能量的热柱和化学成分与周围有明显差别的化学柱的综合。其基本思想可归纳为,在核幔边界(CMB)或过渡层(D'')产生的热物质(地幔羽状物质)在自身浮力驱动下,呈狭窄的柱状经过地幔上升到岩石圈底部,呈盆状向上张开形成巨大的球状顶冠(头部);侧向扩张导致上部的坚硬的岩石圈运动,中心部位由于高温地幔羽状物质对岩石圈物质的熔融而形成火山作用;地幔柱顶冠在向上接近地表处,则扩展成一个热物质的顶盘,直径约1500~2500 km,厚达100~200 km,因此地幔柱是由一个巨大直径的头部(即地幔柱顶冠)和一个比顶冠直径小得多的尾柱(直径几百千米)组成。地幔柱顶冠上升时会引起地壳上隆,形成大量的溢流玄武岩(Wilson, 1963, 1973; Morgan, 1972; Anderson, 1975; Burke, 1976; Maruyama, 1994; Opligge, 1997; 邓晋福等, 1994; 刘从强, 2004; 牛树银等, 1993、1996、2001; 侯增谦等, 1996; F. Pirajno, 2000)。

地质学家通常把“热点”与“地幔柱”紧密联系起来,认为“热点”是地幔柱存在和作用的结果(Burke 等, 1976)。众多文章把两者作为等同词(相同的代名词)看待,研究对象也更多集中在洋壳。李子颖(2006)对热点概念进行了拓展和延伸,赋予其深刻的地质内涵,认为热点是在地幔柱直接作用下或在其影响下较长时间多期次改造深部壳幔物质于地表的综合地质作用。同时指出热点可起源于地壳或地幔的不同深度,根据活动背景不同,将热点活动分为大洋型和大陆型热点活动,并对大陆型热点活动的特点以及形成的产物特征进行了阐述,为地幔柱构造以及热点理论的应用由海洋“走向”大陆奠定了理论基础。

通过对地幔柱构造和热点作用过程及其作用的产物特征研究、总结和概括,提出了在地表识别地幔柱构造(热点活动)存在的一系列标志。这些标志主要包括:①持续的岩浆活动形成大的火山岩省(LIP),主要以溢流玄武岩为特征。火山作用的空间范围并不大:仅限定在几十千米的“热点”上,由此推测上升通道较狭窄(几十到100 km宽,柱头),原因是火山作用是由减压熔融形成,减压熔融主要集中在主上升柱的中心,而板块下地幔柱物质以水平方向扩张为主,导致减压熔融有限。②热点轨迹,即火山岩年龄递变趋势。(但有的地幔柱年龄递变趋势不明显,原因决定于板块运动的速度)。③存在大规模的隆起:大约1 km高、1000 km宽。隆起不是地壳加厚造成,也不可能是由岩石圈的挤压造成,最有可能是由板块下低密度物质的浮力引起。④热点活动形成的岩石通常具有较高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值。⑤大陆型热点作用产物具有其独特性。由于较厚的陆壳硅铝层,当地幔柱在深部作用于壳幔边界时,一般产生熔融和混熔,并在热动力作用下出露地表,多产

生构造伸展、多期次成分复杂的岩浆活动和火山作用、流体活动和热泉等，且岩浆活动多以酸性组分为主。热点活动在浅部地壳或地表是以构造、岩浆、沉积、变质和成矿等地质作用的强度来体现，其变化主要取决于热点活动的强弱和发展演化阶段的不同，在热点活动的初期和活动强度较弱的热点之上，主要表现为穹隆和穹隆深部的侵入作用；热点活动的中期和活动强烈的热点之上，可能表现为具有强烈的火山活动；在热点活动的晚期，则可能主要表现为热流体的活动。

（三）热点活动与热液成矿作用

以地球系统科学和大陆动力学等新的地学理论为指导，将成矿作用与深部地质作用过程联系起来，从壳幔相互作用过程中物质和能量迁移、交换的角度去探讨成矿作用机制，用壳幔系统演化过程所控制的成矿地质环境演变来阐明成矿时空规律，在此基础上建立壳幔相互作用与成矿过程的框架模型，以指导对大型矿集区的寻找，已成为现代成矿学和矿床地质学发展的一种重要趋势。

板块构造理论研究对象是地球岩石圈构造，主要讨论发生在岩石圈板块水平运动及其边缘区域的地质作用和过程；热点是地幔柱在地表的体现，是地球深部物质垂直运动的结果，地幔柱-热点活动理论重视对地球深部构造与物质垂向运动的研究，在某种程度上有效解决了板块驱动力和板块内部地质问题，两个理论体系的结合可以更好地理解地球的演化过程以及地质作用与成矿作用的规律，地幔柱构造及热点活动在壳幔系统演化过程起着主要的纽带作用。因此，地幔柱构造和热点作用理论已引起众多矿床学家的兴趣和关注，对矿床学研究带来了深刻的影响，也对内生成矿作用及其机理研究带来重要影响。矿床学家注意到，一方面热点（地幔柱）是热流与物质流的统一体，能够满足流体源、物源和热源等热液成矿的重要前提条件；另一方面热点活动是地幔流体上升的重要途径，也是地幔流体对岩石圈，乃至与地壳发生作用、形成成矿流体的重要途径，而且地幔流体属于超临界流体，具有高溶解性和高扩散系数，其运移过程中对途经岩石中的成矿元素具有独特与异常强大的萃取和运载能力。鉴于上述认识，很多矿床学家认为应该重新审视内生矿床，特别是大型和特大型内生矿床的成矿物质来源、成矿作用过程及其成矿机理等重大基础理论问题。矿床学界逐渐趋向一个较为一致的观点，即大规模岩石圈成矿事件发生，大型、特大型矿床或矿集区的形成通常与地幔流体作用相关（杜乐天，1996，2001；邓晋福，1992；刘丛强，2004；Jiang Yaohui, 2002a, 2002b），而地幔流体的形成和活动往往与地幔柱构造及热点作用存在密切的成因联系，热点活动被认为有可能是导致地壳大规模成矿事件发生的重要原因（李子颖，2006；牛树银等，2002）。

近年来，国外在热点活动与成矿作用研究方面取得了一定程度的进展，如 Oppliger 等（1997）提出了卡林型金矿集区与黄石热点存在成因联系；Isley 和 Abbott（1999）建立了地幔柱与 BIF 型铁矿之间的联系；以 Naldrett 为首的研究组在 31 届国际地质大会上系统介绍了近年来取得重大突破的 Voisey' Bay Ni - Cu - Co - PGE 矿床与地幔柱的关系。近年来，国内在成矿学方面也开始较多地运用了热点作用和地幔柱构造理论，如牛树银等（1996，2002）对华北地区地幔柱多级演化、成矿物质来源、迁移通道和聚集成矿空间、成矿规律等问题的研究；陈毓川等（1996）对于分散元素形成独立矿床（如大水沟碲金矿）的研究；王登红等（1998，1999）对于胶东和滇黔桂两大金矿矿集区及新疆北部

Cu - Ni - PGE 成矿系列的研究; 谢谏克等 (1996a, 1996b)、李子颖等 (1999)、毛景文等 (1998)、华仁民等 (1999)、毛建仁 (1999) 分别对华南中新世大规模成矿作用的研究。刘方杰等 (2000) 对秦岭造山带多金属成矿作用的研究等。总体而言, 积累资料并加以探索, 是目前热点活动与热液成矿作用研究的主要现状。

众多研究成果表明, 世界范围内很多重要的矿床或矿集区, 地幔物质直接或间接参与成矿作用 (刘丛强等, 2004; Groves, 1993; Ledair, 1993; Mitchell et al., 1981; 曹荣龙等, 1995; 孙丰月等, 1995; 毛景文等, 1997, 2000; 牛树银等, 2002; Rosenbaum, 1996)。杜乐天 (1988, 1989) 较早就提出幔汁 “HACONS” 及幔汁成矿理论, 指出华东南地区分布的以赋矿围岩分类的花岗岩型、火山岩型和碳硅泥岩型等铀矿是幔汁作用的结果, 碱交代作用是幔汁成矿作用的最核心机制和基本表现形式。包括我国南方一些重要铀矿区在内的世界上许多重要铀矿区, 相继发现存在地幔流体及其参与铀成矿的证据 (李子颖, 2002; 邓平等, 2003; 王正其等, 2005)。Groves (1993) 认为西澳大利亚 Yilgarn 地块太古宙金矿是来自地幔的流体携带成矿物质——金, 同时壳幔混合流体从围岩中淋滤出金而形成的大型金矿床; Ledair (1993) 研究表明, 地幔流体在加拿大 Central Superior 金矿成矿过程中起重要作用; 孙贤术 (1993) 指出, 地幔流体不仅为南澳大利亚奥林匹克坝 U - Cu - Au - REE 矿床提供了成矿物质, 而且是成矿流体的重要来源; Mitchell 等 (1981) 认为南美的巴西、玻利维亚以及非洲尼日利亚的 Sn 矿带是地幔流体参与成矿的结果; 曹荣龙等 (1995, 1996) 从地质、地球化学等多方面论证了我国内蒙古白云鄂博 REE - Fe - Nb 超大型矿床的成矿元素来自地幔、成矿流体为富含深源 CO_2 - H_2S 挥发分体系的地幔流体, 是一个国内外罕见的地幔流体交代矿床; 孙丰月等 (1995) 认为幔源流体在胶东金矿成矿过程中具有重要作用, 表现为该区壳源花岗岩和金矿床的形成提供了热、流体、碱质、硅质及部分金; 毛景文等 (1997) 系统论证了湖南万古金矿床是一例以地幔流体为主形成的金矿床。此外, 有证据表明, 地幔流体在华南铀矿带、我国冀西北地区金银矿床、湖南柿竹园 W - Sn - Mo 多金属矿床、云南金顶 Pb - Zn 矿床、云南 “三江” 金矿成矿带、川滇黔 Pb - Zn 多金属成矿域、吉林夹皮沟金矿田、世界各地与碱性岩有关的金矿等成矿过程中有重要作用 (刘丛强, 2004)。

通过文献查阅不难发现, 众多的矿床研究工作多局限于矿床成矿作用是否存在地幔流体参与, 但避开或不涉及驱动与控制地幔流体上升活动的原因和机制问题。地幔柱构造、热点活动与地幔流体之间存在内在的成因联系, 密不可分, 热点成矿作用通常认为是通过地幔流体介质来实现的。虽说热点控制成矿作用的实例和直接证据尚有待深入探索, 有理由推断热点活动对地幔流体及其热液成矿过程起着重要的制约作用。

热点活动对于成矿作用的影响是个复杂的过程, 但意义重大。有关学者初步讨论了热点作用/地幔柱对于热液成矿的可能制约作用。概括之, 主要包括以下几个方面: ①地幔柱直接提供成矿物质, 并且成矿物质聚集、形成工业矿体的过程是在地幔柱自身的演化过程中完成的 (王登红, 2001); ②地幔柱通过热点活动提供成矿物质, 但成矿物质的聚集是在热点活动导致的火山岩喷发之后或侵入岩定位之后, 由各种性质的流体作用完成的; ③地幔柱作用下地壳表层环境发生巨大变化而导致的成矿作用, 包括生物的大规模灭绝导致有机能源矿藏的形成 (王登红, 1998); ④热点活动提供碱质、硅质以及成矿流体; ⑤上升幔流提供成矿物质的深部来源, 而幔枝构造为成矿作用提供有利的赋矿空间 (牛

树银等, 1997, 2002); ⑥热点作用发育的地质背景不同, 其构造特征、形成岩浆活动产物以及矿产组合是有区别的 (李子颖, 1998, 2006); ⑦地幔柱影响下导致原有的矿床遭受破坏。

迄今为止, 矿床学家及地球化学家, 已经初步建立了一套较为系统的识别地幔流体参与成矿的地质、REE 和稳定同位素地球化学证据。同时研究也表明, 地幔流体的成分, 在不同地区是有区别的, 甚至是显著的, 其形成的矿产种类、矿床组合或矿床规模等方面存在较大差异。导致这种区别的深层次原因研究目前似乎很少有人涉及, 还有待于深入。

中国南方或东部的内生成矿作用, 集中发生在燕山期 (华仁民等, 1999; 胡瑞忠等, 2003, 2004; 谢桂青等, 2001; 陈跃辉, 1997), 在很大程度上可能与地幔柱及其热点作用 (谢谏克等, 1996), 诱发地幔物质或地幔流体活跃并参与成矿有关 (李子颖等, 1998, 1999; 毛景文等, 1998, 1999; 王登红, 1998; 陶奎元等, 1999; 赵军红等, 2001; 黎盛斯, 1996)。地幔柱及其热点作用导致地幔物质或地幔流体的上升, 致使中生代中国东部岩石圈发生大规模减薄作用 (邓晋福, 1999; 路凤香等, 2000)。这种岩石圈物质大规模减薄、重熔和分异作用过程, 导致富集某类元素或某些元素的地质体 (岩浆岩体) 侵入形成, 由此形成某元素或某类元素的异常地球化学场; 该过程可能直接导致成矿, 也可能在后期的构造改造, 特别是构造伸展作用下, 导致地幔物质及地幔流体的进一步上升, 导致途经的深部岩石中矿质元素产生进一步的活化、迁移、富集并形成成矿流体, 在适合的构造部位或地球化学环境下聚集成矿。

二、与火山岩有关的热液型铀矿主要成因观点

火山岩型铀矿床因铀矿体的赋矿围岩为中-酸性火山岩或与该类型岩浆活动存在成因联系而得名。按照成矿作用分类, 可归属于热液型铀矿 (杜乐天, 2001; 李子颖, 2004; 黄世杰, 2006)。世界范围内, 火山岩型铀矿主要分布于俄罗斯和中国, 在世界其他国家或地区也先后发现有该类型铀矿床。典型的火山岩型铀矿床包括俄罗斯的 Streltsovka 矿田 (由 20 个矿床构成), 中国的赣杭火山岩铀成矿带 (如相山铀矿田, 目前已发现 23 个中、小型矿床), 蒙古的 Dornot 矿床, 澳大利亚的 Ben Lomond 矿床, 美国的 Marysvale、McDermitt 和 Thomas Range 矿床, 墨西哥的 Sierra Pena Blanca 矿床, 秘鲁的 Macusani 矿床等 (Georges Aniel et al., 1991; IAEA - NET, 1994; Cunningham et al., 1998; Castor et al., 2000)。前 3 个铀矿田 (成矿带) 是世界范围内该类型铀资源量的主要聚集地, 也是该类型铀资源的主要产出地 (IAEA - NET, 1994; Aliouka Chabiron et al., 2003)。其中 Streltsovka 矿田铀矿找矿工作已深达 2600 m, 控制的金属铀达 183200 t (品位大于 0.2%, RAR + EAR - I, 成本低于 130 美元/kg · U), 位居世界第一。火山岩型铀矿在我国铀矿资源中占居重要的主导地位。

中国与俄罗斯对火山岩型铀矿的找矿工作与研究工作最为深入, 找矿成果与研究认识也最为突出。在找矿深度方面, 俄罗斯的斯特列措夫铀矿床矿化垂幅达 2000 多米, 乌克兰的米丘林钠交代铀矿床矿化垂幅达 1000 多米, 我国诸广的棉花坑铀矿床矿化垂幅 1000 m 尚未封底, 相山的邹家山铀矿床矿化垂幅 700 ~ 800 m 也未封底, 且铀矿石品位存在越深越富的趋势。

长期以来, 铀矿地质界因循一些观念, 即火山岩型和花岗岩型铀矿床是浅成低温矿

床, 铀源来自储矿围岩, 储矿围岩形成于造山环境、具有地壳同熔的特征, 成矿期处于引张开放的构造环境。所以, 在成矿理论和成矿模式上侧重于浅源浅成理论体系, 地热体系的中低温浅成脉状矿床也成了该体系常用的模式。作为热液型铀矿中的一个亚类, 随着找矿深度的扩大, 无论从主观还是客观上, 为热液型铀矿成矿理论的突破以及热液型铀矿找矿空间、找矿前景的扩大提供了前提、基础和可能。纵观国内外发表的研究报道或论文, 随着研究工作的深入, 如矿岩时差现象的发现、稀土元素以及同位素资料的取得和积累, 与火山岩有关的热液型铀矿的找矿工作取得了重要突破和进展, 亟待热液型铀成矿理论的发展。

关于火山岩型铀成因问题一直存在众多的学术观点。按照对成矿流体及其铀的来源问题进行归类, 众多成因学说大致可归为 3 类。

1. 岩浆分异热液铀成矿观点

是在 J. 霍顿 (1788) 提出的岩浆热液成矿学说的基础上, 将该学说在铀矿床地质研究的应用过程中逐渐建立和发展起来的, 基本观点是认为充填于裂隙的矿物质是岩浆熔融体在冷却和结晶过程中, 从其释放的蒸汽中凝聚和沉淀出来的。其主要依据是: ①内生铀矿床多产在火山岩中或侵入岩体的内部及内外接触带附近; ②成岩成矿在时间上具有连续性; ③酸性和碱性火山岩或侵入岩具有较高的含铀量, 能够满足铀源供给需求; ④铀矿石与赋矿围岩的某些同位素成分相似。

该成矿学说与随后铀矿地质研究中发现的热液铀矿床通常存在较大的矿岩时差等地质事实相矛盾, 也无法解释 H、O、C 等同位素及 REE 地球化学特征所蕴示的成矿流体性质。该学说很难说明绝大多数铀矿床的成因。

2. 壳源多元叠加铀成矿观点

属于该类铀成矿观点的学说众多, 先后出现的有侧分泌成矿说 (又称热水汲取成矿说, 上升说) (德国, 鲍维尔, 1546), 认为铀矿床是由大气降水下渗到地壳深部受到加热、浸取围岩中的铀并搬运到成矿地段所形成; 季弗鲁瓦 (1958) 在侧分泌成矿说基础上提出浅成低温热液改造成矿说, 指出含铀溶液是由于地热加温而形成的热水沿构造破碎带上升并自富铀围岩中汲取铀形成的; 大陆风化说 (又称下降说) 是由法国的 M. 莫洛于 1966 年提出的, 认为富铀的花岗岩或火山岩出露地表, 遭受风化、剥蚀, 铀在风化过程中活化转移进入地下水, 沿裂隙构造向下运移, 在距地表不太深的空间部位富集成矿; 陈肇博 (1982, 1985) 在研究我国相山铀矿成矿作用的基础上提出了双混合成矿说, 其基本观点是强调成矿热液及成矿热液中铀都具有双重来源和混合性质, 即岩浆水和岩浆热场导生出来的地下热水体系混合, 原生流体的铀和从富铀地层及古老铀矿床所溶解的铀相混合。此外, 还有余达淦 (2001) 提出的火山-斑岩成矿模式, 强调岩浆体的主导作用 and 高温热液体的作用; 杨建明 (2003) 提出的以次火山岩体为先导、热液柱 (体) 为主导所控制的地下水-火山岩成矿模式; 古脉状承压热水排泄区 (减压区) 铀成矿说 (李学礼, 1979) 强调大气降水、地下水表层浸取铀, 深循环加热后上升至排泄区, 由于降温、减压、脱气和其他水文地球化学条件变化导致铀沉淀富集成矿 (周文斌, 1995; 孙占学, 1995)。

持有上述铀成矿观点的不同理论或学说共同之处是强调构成成矿热液中铀来源于已固结的储矿火山岩、花岗岩或基底岩石 (浅层, 壳源), 相互之间的差异主要表现在关于成

矿热液中流体来源问题的观点或成矿流体主体来源不同。

3. 地幔流体深源铀成矿观点

这是 10 余年来最新发展起来的铀成矿理论,代表性理论主要有地幔流体碱交代成矿理论、热点(地幔柱)铀成矿理论。

以杜乐天(1996, 2001)为代表的地幔流体碱交代铀成矿理论,其中心思想是上地幔是地球中最大的碱源、碱库;地幔与地壳中的岩浆作用、热液作用、成矿作用和大地构造作用之所以发生,根本因素在于由幔汁上涌、渗入、交代、富化所造成的溃变运动;形成铀矿床的流体来自“幔汁”(地幔流体, HACONS),幔汁在上涌、渗透过程中与途经的深部岩石发生碱交代作用,碱交代的结果是去硅、排铀,使得流体逐渐酸化及其中铀逐渐富集,因此成矿热液是幔汁的转化物,碱交代岩是矿源岩;铀主要沉淀于酸质场中,酸碱分离、先碱后酸、下碱上酸、下碱上硅、矿酸同步迁移、同步定位、同场共聚是热液铀成矿的基本规律。该成矿理论与前述铀成矿观点的不同及特色之处在于,首次将地幔流体与传统观点中的壳源成矿元素——铀成矿作用联系起来,强调成矿流体主体来自地幔,铀来自深部。

热点(地幔柱)铀成矿理论是以李子颖为代表提出的(李子颖, 1999, 2005, 2006)。类似的成矿理论有深部流体成矿系统(毛景文, 2005)、幔枝构造成矿理论。姜耀辉等(2004)、范洪海等(2003)、黄世杰(2006)等也开展了类似的研究或论述。热点铀成矿作用认为铀成矿作用是在大陆型热点活动或其影响下产生,成矿元素铀在复杂的多期次岩浆和流体作用过程的晚期熔体或流体中富集,铀主要来自深部,铀的富集沉淀主要是成矿流体在作用于近地表时,由于物理化学条件的改变而产生,控制铀矿的核心因素是热点活动与构造作用的叠合(李子颖, 2006)。姜耀辉(2004)则认为热液铀成矿与岩石圈之下存在一个富含放射性生热元素的富集圈有关,是地球内部的 U、Th 与以俯冲岩石圈板块等形式带来的挥发分和离子反应逐渐向上迁移而形成的。

热点(地幔柱)铀成矿理论与地幔流体碱交代铀成矿理论有共性之处,但其在强调地幔流体及深源成矿的同时,提出并强调地幔流体作用的驱动,成矿作用的发生与热点(地幔柱)活动相关,从更深层面来考量和探究热液铀成矿作用的机制问题,这对铀矿床学而言是一大进步,在研究思路及认识上也是一个重要创新。

需要说明的是,关于铀源及流体问题尚有较大争论(王正其等, 2011, 2012, 2013a; 陈肇博, 1982; 范洪海等, 2003, 2005; 孙占学等, 2001, 2004),如 Chabiron A 等(2003)认为富铀的过碱性流纹岩和年龄为 150 ~ 200 Ma 的基底富铀亚碱性花岗岩是斯特列措夫破火山口中铀资源量的主要贡献者,流体来源于岩浆房释放的酸性热液(Chabiron A et al., 2003)。持有地幔流体深源铀成矿观点的学者,在强调地幔流体构成成矿热液主体的同时,更多的研究者并不排斥在成矿过程中有其他流体(包括大气降水)的参与。已有的数据表明,一些热液型铀矿床(田)常是地幔流体成矿和地下水(大气降水)深循环成矿作用等的叠加,或是不同成因流体成矿作用的组合。在同一矿田中的同一成矿系列,常具有来自不同深度、不同物源、不同热液成矿作用汇聚于同一矿化集中区,但重视热点活动及其地幔流体作用、铀的深源性无疑应该成为铀矿床学研究的一个重要发展方向。