

# 深部矿源与幔枝 构造成矿

王宝德 牛树银 孙爱群 张建珍 编著



地质出版社

国家自然科学基金项目 (40272088, 40872137)

河北省自然科学基金项目 (D2007000751)

资助

石家庄经济学院学术专著出版基金

# 深部矿源与幔枝构造成矿

王宝德 牛树银 孙爱群 张建珍 编著

地质出版社

· 北 京 ·

## 内 容 提 要

集20年成矿物质来源的研究成果,从典型矿床成矿物质来源研究到中国北方大区域近百个矿床硫、铅、氢、氧、碳、硅、氮、氩等同位素资料研究,提出深部矿源及深部矿源运移动力学机制——地幔热柱多级演化。而区域矿产及成矿系列受控于地幔热柱的三级构造单元——幔枝构造。

本书汇集了大量与成矿作用有关的同位素数据,可供地质科研工作者及地矿类高等院校有关专业师生参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

深部矿源与幔枝构造成矿 / 王宝德等编著. —北京:  
地质出版社, 2010. 9

ISBN 978 - 7 - 116 - 06904 - 6

I. ①深… II. ①王… III. ①地幔涌流 - 成矿作用 -  
研究 IV. ①P611. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 189867 号

### Shenbu Kuangyuan Yü Manzhi Gouzao Chengkuang

---

责任编辑: 李 莉 张荫芳

责任校对: 王素荣

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

咨询电话: (010)82324508 (邮购部); (010)82324567 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: [zbs@gph.com.cn](mailto:zbs@gph.com.cn)

传 真: (010)82310759

印 刷: 北京天成印务有限责任公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 16.75

字 数: 400 千字

印 数: 1—600 册

版 次: 2010 年 9 月第 1 版

印 次: 2010 年 9 月第 1 次印刷

定 价: 55.00 元

书 号: ISBN 978 - 7 - 116 - 06904 - 6

---

(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

成矿物质的来源一直是困扰成矿理论研究和确定找矿方向的重大理论和实践问题。受“绿岩带成矿”思想的影响者，过去多注重矿源岩（层）的寻找，往往单纯把某矿床产出的空间位置周围的岩层（体）的微金含量作为重要的评价指标，并在此基础上进行物质成分分析，找矿方向也仅停留在片麻岩区。受“岩浆成矿”思想影响者，多注重矿体所赋存的岩浆岩体含矿性的研究，找矿方向也仅停留在岩浆岩区。而受“卡林型成矿”思想者认为，金来自于古生代碳酸盐岩，提出“长城式金矿”，找矿方向也仅停留在古生代碳酸盐区。

随着工作的不断深入，资料的积累（特别是大量同位素资料、包裹体资料及与金矿成矿关系密切的燕山期花岗质岩浆岩微金含量资料等），一些具普遍性的规律就逐渐显现。近年来的深入研究表明，金、银多金属矿床的成矿物质应主要来自地球深部，并在地幔热柱、幔枝构造多级演化（特别是燕山期岩浆活动）、上侵过程中萃取了部分围岩中的成矿物质而造成金、银多金属矿的集中产出。地幔柱理论在成矿学中的应用，使矿质来源的研究与地球的演化联系起来，而不再是简单地识别地壳来源或地幔来源。

成矿物质深部来源研究是幔枝构造成矿理论的重要组成部分，其中绝大部分资料是课题组在近20年来，分别在河北、山东、河南、内蒙古等50余个大型、中型、小型金、银多金属矿床成矿物质来源研究的一次系统总结。研究过程中得到国家自然科学基金委员会、河北省地矿厅、中国地质调查局、内蒙古地矿厅及生产单位等的资金支持。研究期间，积累了大量第一手资料，出版了一系列著作，并在学术理论上形成了自己的观点。本书的推出，将会促进对华北地区金、银多金属矿床成矿物质来源的研究。

书中用大量矿床年龄测试结果，硫、铅、氢、氧同位素及稀有气体同位素等特征的研究表明，金、银等元素主要来源于地球深部，更可能来自核幔交界处的D''层。其上升动力机制应是地幔热柱多级演化。对成矿物质迁移和成矿起重要作用的热流体应以岩浆水为主，并不同程度加入了其他来源的水。地幔热柱多级演化是金、银多金属元素向上迁移的主要动力机制，而中生代大规模花岗质岩浆活动及大规模的碱化作用是金向上迁移的主要载体。在地球深部超高温、超高压环境下，金及其硫化物只能以气相状态存在并随地幔柱多级演化不断向上迁移，随着物理化学条件的变化在适当的构造位置卸载成矿。

在本书的编写过程中，得到了河北地矿厅、中国地质调查局、内蒙古地矿厅，以及各矿山领导和工程技术人员的大力支持和热情帮助，在此深表谢意。同时书中引用了大量科研成果资料、勘查报告、专著和论文，在此也向其作者表示衷心的感谢。

由于编著者水平有限，文中不当之处，望读者不吝赐教。

作 者  
2010年5月

# 目 录

## 前 言

<b>第一章 地幔热柱与幔枝构造</b> .....	(1)
<b>第一节 地幔热柱</b> .....	(2)
一、地幔柱理论的提出 .....	(2)
二、地幔热柱的形态特征 .....	(4)
三、地幔热柱的起源 .....	(5)
四、地幔热柱动力学机制 .....	(7)
<b>第二节 地幔亚热柱</b> .....	(8)
一、地幔亚热柱的形成 .....	(9)
二、华北东部的地幔亚热柱 .....	(10)
<b>第三节 幔枝构造</b> .....	(14)
一、幔枝构造概述 .....	(14)
二、幔枝构造的展布规律 .....	(16)
三、幔枝构造的形态特征 .....	(17)
四、幔枝构造的规模 .....	(18)
五、幔枝构造的划分 .....	(19)
<b>第二章 冀东幔枝构造成矿区典型矿床成矿物质来源</b> .....	(28)
<b>第一节 冀东幔枝构造区金、银、铜铅矿产成矿物质深部来源的主要证据</b> .....	(29)
一、金、银多金属矿床与燕山期岩浆活动的关系 .....	(29)
二、金、银多金属矿床同位素特征 .....	(32)
<b>第二节 典型金矿床及成矿物质来源研究</b> .....	(42)
一、金厂峪金矿 .....	(42)
二、峪耳崖金矿 .....	(48)
三、长城式金矿 .....	(55)
<b>第三节 典型多金属矿床及成矿物质来源研究</b> .....	(61)
一、小寺沟铜铅矿 .....	(61)
二、寿王坟铜矿 .....	(66)
三、洞子沟银铜矿 .....	(71)
<b>第三章 冀西北幔枝构造成矿区典型矿床成矿物质来源</b> .....	(76)
<b>第一节 冀西北幔枝构造区金、银多金属矿产成矿物质深部来源的主要证据</b> .....	(77)
一、成矿时间分布特征 .....	(77)
二、成矿空间分布特征 .....	(78)

三、金、银、铅锌矿床同位素特征 .....	(79)
四、水泉沟杂岩体的形成年龄及与金、银多金属矿的关系 .....	(87)
五、成矿流体深部控制机制 .....	(91)
第二节 典型金矿床及成矿物质来源研究 .....	(93)
一、东坪金矿 .....	(93)
二、小营盘金矿 .....	(102)
第三节 典型银金矿床及成矿物质来源研究 .....	(106)
一、万全寺银金矿的成矿作用 .....	(106)
二、丰宁银金矿 .....	(113)
第四节 典型多金属矿床 .....	(117)
一、蔡家营铅锌银多金属矿床 .....	(117)
二、相广锰银矿床 .....	(123)
<b>第四章 阜平幔枝构造成矿区典型矿床 .....</b>	<b>(129)</b>
第一节 阜平幔枝构造区金、银多金属矿产成矿物质深部来源的主要证据 ...	(130)
一、阜平幔枝构造区花岗质岩浆岩及其来源 .....	(130)
二、阜平幔枝构造成矿区金、银多金属矿床形成时限 .....	(132)
第二节 成矿流体特征 .....	(133)
一、硫同位素特征 .....	(133)
二、铅同位素特征 .....	(134)
三、碳、氢、氧、硅同位素特征 .....	(135)
四、稀有气体特征 .....	(137)
第三节 典型金矿床及成矿物质来源研究 .....	(140)
一、柴厂-孔各庄金矿田 .....	(140)
二、石湖金矿田 .....	(145)
第四节 典型铜铅多金属矿床及成矿物质来源研究 .....	(152)
一、大湾锌铜矿床 .....	(152)
二、木吉村铜铅铁矿床 .....	(160)
三、镰巴岭铅锌多金属矿床 .....	(166)
<b>第五章 区域成矿物质深部来源 .....</b>	<b>(175)</b>
第一节 地层的含矿性 .....	(175)
一、金矿产出的空间分布 .....	(175)
二、基底岩石的金含量 .....	(177)
第二节 金、银多金属成矿物质来源与花岗岩的关系 .....	(182)
一、金、银多金属矿床与印支-燕山期花岗岩的时空关系 .....	(183)
二、印支-燕山期花岗质岩浆岩的成因讨论 .....	(185)
第三节 区域成矿物质深部来源的同位素证据 .....	(187)
一、区域硫同位素特征 .....	(187)
二、区域铅同位素特征 .....	(192)
三、区域成矿热流体的来源 .....	(200)

四、硅同位素 .....	(205)
五、氦、氩同位素 .....	(207)
<b>第六章 幔枝构造与深部成矿控制 .....</b>	<b>(213)</b>
<b>第一节 金属元素的形成 .....</b>	<b>(213)</b>
<b>第二节 成矿物质的运移途径 .....</b>	<b>(214)</b>
一、成矿物质的“反重力”迁移 .....	(214)
二、幔壳运动与地幔热柱多级演化 .....	(217)
三、地震层析(CT)反演 .....	(219)
四、地幔热柱与成矿物质来源 .....	(222)
五、地幔热柱的实验模拟 .....	(223)
六、金、银多金属元素的储集场所 .....	(224)
<b>第三节 金、银等元素的迁移形式 .....</b>	<b>(225)</b>
一、金、银的地球化学特性 .....	(225)
二、金、银多金属元素在深部的迁移 .....	(226)
三、金、银等成矿元素在浅部的迁移 .....	(227)
四、金、银等元素的迁移形式 .....	(228)
<b>第四节 幔枝构造对成矿作用的控制 .....</b>	<b>(228)</b>
一、幔枝构造对矿床空间展布的控制 .....	(229)
二、成矿元素的赋存特征 .....	(229)
三、不同元素的成矿序列 .....	(231)
四、幔枝构造对矿集区矿化分带的控制 .....	(233)
<b>第五节 幔枝构造成矿过程 .....</b>	<b>(235)</b>
一、金、银多金属的聚集特性 .....	(236)
二、金、银等元素的共生组合特征 .....	(238)
三、金、银多金属元素的沉淀 .....	(239)
四、金、银多金属矿床的成矿模式 .....	(240)
<b>第六节 几点基本认识 .....</b>	<b>(243)</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>(246)</b>

# Contents

<b>Chapter 1 Mantle plume and mantle branch structure</b> .....	(1)
Section 1 Mantle plume .....	(2)
1. The presentation of mantle plume theory .....	(2)
2. The shape of mantle plume .....	(4)
3. The origin of mantle plume .....	(5)
4. The dynamics of mantle plume .....	(7)
Section 2 Sub-mantle plume .....	(8)
1. The formation of sub-mantle plume .....	(9)
2. The sub-mantle plume in the east of North China .....	(10)
Section 3 Mantle branch structure .....	(14)
1. The overview of mantle branch structure .....	(14)
2. The distribution pattern of mantle branch structures .....	(16)
3. The shape of mantle branch structure .....	(17)
4. The scale of mantle branch structure .....	(18)
5. The division of mantle branch structure .....	(19)
<b>Chapter 2 The source of metallogenetic materials for typical deposits in metallogenetic province of eastern Hebei mantle branch</b> .....	(28)
Section 1 The deep source evidences for the metallogenetic materials of Au, Ag, Cu, Mo deposits in eastern Hebei mantle branch .....	(29)
1. The relationship between Au, Ag, polymetallic deposits and Yanshanian magmatism .....	(29)
2. The isotope characteristics of Au, Ag and polymetallic deposits .....	(32)
Section 2 Typical Au deposits and the source of ore-forming materials .....	(42)
1. Jinchangyu gold deposit .....	(42)
2. Yuerya gold deposit .....	(48)
3. Changcheng-style gold deposits .....	(55)
Section 3 Typical Cu-Mo deposits and the source of ore-forming materials .....	(61)
1. Xiaoshigou Cu-Mo deposit .....	(61)
2. Shouwangfen Cu deposit .....	(66)
3. Dongzigou Ag-Cu deposit .....	(71)



<b>Chapter 3 The source of metallogenetic materials for typical deposits in metallogenetic province of northwest Hebei mantle branch</b>	(76)
Section 1 The deep source evidences for the metallogenetic materials of Au, Ag and polymetallic deposits in northwest Hebei mantle branch	(77)
1. The time distribution of metallogenesis	(77)
2. The spatial distribution of metallogenesis	(78)
3. The isotope characteristics of Au, Ag and Pb-Zn deposits	(79)
4. The geochronology of Shuiquangou complex and its relation to Au, Ag and polymetallic deposits	(87)
5. The deep evolution mechanism of ore-forming hydrothermal fluids	(91)
Section 2 Typical Au, Ag and polymetallic deposits and the source of ore-forming materials	(93)
1. Dongping Au deposit	(93)
2. Xiaoyingpan Au deposit	(102)
Section 3 Typical Ag-Au deposits and the source of ore-forming materials	(106)
1. The metallogenesis of Wanquansi Ag-Au deposit	(106)
2. Fengning Ag-Au deposit	(113)
Section 4 Typical Ag, Pb-Zn polymetallic deposits and the source of ore-forming materials	(117)
1. Caijiaying Pb-Zn-Ag polymetallic deposit	(117)
2. Xiangguang Mn-Ag deposit	(123)
<b>Chapter 4 Typical Deposits in Fuping Mantle branch structure</b>	(129)
Section 1 The deep source evidences for the metallogenetic materials of Au, Ag and polymetallic deposits in Fuping mantle branch	(130)
1. The granitic rocks and their sources in Fuping mantle branch area	(130)
2. The mineralization time of Au, Ag and polymetallic deposits in Fuping mantle branch area	(132)
Section 2 The characteristics of Ore-forming fluids	(133)
1. The characteristics of S-isotopes	(133)
2. The characteristics of Pb-isotopes	(134)
3. The characteristics of C, H, O and Si isotopes	(135)
4. The characteristics of noble gases	(137)
Section 3 Typical Au deposits and the source of ore-forming materials	(140)
1. Chaichang-Konggezhuang ore field	(140)
2. Shihu Au ore field	(145)

Section 4	Typical Cu-Mo and polymetallic deposits and the source of ore-forming materials .....	(152)
1.	Dawan Zn-Mo deposit .....	(152)
2.	Mujicun Cu-Mo-Fe deposit .....	(160)
3.	Lianbaling Pb-Zn and polymetallic deposits .....	(166)
<b>Chapter 5</b>	<b>Deep source of regional metallogenic materials .....</b>	<b>(175)</b>
Section 1	The mineralization of strata .....	(175)
1.	The distribution of Au deposits .....	(175)
2.	The concentration of Au in basement rocks .....	(177)
Section 2	The source of Au, Ag, polymetallic deposits and its relationship with granites .....	(182)
1.	The time-spatial relationship between Au, Ag, polymetallic deposits and Indosinian-Yanshanian granites .....	(183)
2.	Discussion on the genesis of Indosinian-Yanshanian granites .....	(185)
Section 3	The isotope evidence on the deep origin of regional metallogenic materials .....	(187)
1.	The characteristics of regional S isotopes .....	(187)
2.	The characteristics of regional Pb isotopes .....	(192)
3.	The source of regional ore-forming fluids .....	(200)
4.	Si isotope evidences .....	(205)
5.	He and Ar isotopes .....	(207)
<b>Chapter 6</b>	<b>Mantle branch and its controlling to deep metallogenesis .....</b>	<b>(213)</b>
Section 1	The formation of metal elements .....	(213)
Section 2	The moving path of metallogenic materials .....	(214)
1.	The “anti-gravity” migration of ore-forming materials .....	(214)
2.	Mantle-crust movement and the multiple evolution of mantle plume .....	(217)
3.	Reverse emulation of seismic CT section .....	(219)
4.	Mantle plume and the origin of ore-forming materials .....	(222)
5.	The simulation experiment of mantle plume .....	(223)
6.	The preservation place of Au, Ag and polymetallic elements .....	(224)
Section 3	The migration of elements such as Au, Ag .....	(225)
1.	The geochemistry of Au and Ag .....	(225)
2.	The migration of Au, Ag and polymetallic elements in deep Earth .....	(226)
3.	The migration of Au, Ag and polymetallic elements in shallow Earth .....	(227)
4.	The migration of elements such as Au, Ag .....	(228)

Section 4	The controlling of mantle branch to metallogenesis .....	(228)
1.	The controlling of mantle branch to the spatial distribution of deposits .....	(229)
2.	The existence character of ore-forming elements .....	(229)
3.	The metallogenetic sequence for different elements .....	(231)
4.	The controlling of mantle branch to the mineralization zones in deposits concentration areas .....	(233)
Section 5	The metallogenetic process of mantle branch .....	(235)
1.	The concentration of Au, Ag and polymetallic elements .....	(236)
2.	The paragenesis of Au, Ag and polymetallic elements .....	(238)
3.	The deposition of Au, Ag and polymetallic elements .....	(239)
4.	The metallogenetic mode of Au, Ag and polymetallic deposits .....	(240)
Section 6	Some primary understandings .....	(243)
<b>Reference</b>	.....	(246)

# 第一章 地幔热柱与幔枝构造

自 20 世纪 60 年代末以来, 板块构造理论经过地质学家近几十年不懈的探索, 其不断发展和完善, 特别是在解释全球板块边缘上的构造运动、岩浆活动、变质作用、成矿分带等各种地质作用方面获得了巨大成功。但是, 作为板块构造学说最基本的驱动力问题一直未得到很好的解决。另一方面, 在把经典板块构造理论运用于大陆地质过程中, 随着新的地球物理探测技术迅速发展和深部地质新的发现, 人们逐渐认识到大洋岩石圈与大陆岩石圈有着本质的差别, 大陆岩石圈远不是像刚性大洋板块那样呈简单的水平运动, 它在垂向上极其不均一, 并随其深度增大具有明显的塑性流变特征, 可以发生广泛弥散渗透性变形, 因此, 大陆造山带的形成与演化远比大洋变形复杂得多。

地球是物质的, 物质是运动的。由于历史的和科学技术发展的阶段性, 以往地学研究多注重地壳运动, 研究范畴也主要是地壳或岩石圈。近年来, 随着地学理论的研究进展、超高压实验研究 (Olson, 1985; Loper, 1991)、地球动力过程模拟 (Ribe, 1988; Manglik 等, 1997; Anderson 等, 2005; Davies 等, 2006; Tachibana 等, 2006; Gorczyk 等, 2007; Parkin 等, 2007)、地震层析成像 (Fukao 等, 1994; Maruyama, 1994)、地幔对流的计算机模拟, 以及最后 180Ma 地球的板块构造史研究, 地质学家逐渐认识到大洋与大陆既有区别, 又有联系, 它们应该是一个对立统一体系中矛盾的两个方面, 它们相对立而存在, 相转化而统一。而在不同时期、不同地点的表现特征是这对对立统一体系转化过程中的瞬时表现形式。

一般认为, 地球形成初期其成分是相当均一的星际物质, 在其聚集、分异过程中, 在热力膨胀和引力收缩的统一作用支配下, 地内物质开始对流。密度大、熔点低的铁、镍等呈熔融状态渗透过硅酸盐物质沉向地心形成地核, 铁镁硅酸盐物质上浮形成地幔。地幔的表层由于散热及挥发分物质的逃逸很快冷却, 并逐渐演化为刚性地壳。这种密度分异作用目前仍在进行着。

随着地球核-幔-壳的形成, 特别是核内温度的大幅度提高, 地球不仅具有明显的圈层结构和显著的内外温差, 而且垂向物质运动逐渐强烈, 并呈地幔热柱的形式发生热、冷物质的对流, 重力分异和物质对流互为依托, 相互转化。尽管对地幔热柱、地幔冷柱的认识尚不完善, 但是, 地球除圈层分异外, 存在着强烈的物质垂向运动是毫无争议的, 也是符合客观规律的 (Fukao, 1994; Maruyama, 1994; 王登红, 1996, 1998, 2001; 侯增谦等, 1996; 牛树银等, 1996, 1999, 2001, 2002, 2007; 王宝德等, 2002, 2003, 2006)。

地幔热柱、地幔冷柱的对流是地球内部热传导的主要形式。地幔热柱经过地幔上升到冷的岩石圈底部时会呈喇叭状或伞状散开, 形成巨大的球状顶冠, 其直径可从几百千米到上千千米, 并可引起地壳的上隆、减薄、伸展、古陆解体和洋壳增生, 以及大规模的玄武岩溢流或喷发。同时, 还可能伴有构造变形、区域变质、地壳重熔等, 甚至引起全球气候变化、大地水准面升降和生物灭绝等 (杜乐天, 1996; 肖龙, 2004)。大洋热点火山链和

大陆溢流玄武岩就是地幔热柱多级演化在地表的具体表现形式。

## 第一节 地幔热柱

地幔热柱构造研究，被称为继大陆漂移、板块构造之后的第三次地学浪潮，成为地学研究的前沿课题（Morgen, 1972; Deffeyes, 1972; Anderson, 1975; Sengor 等, 1993; Fukao, 1994; Maruyama, 1994; Kumazawa, 1994; White, 1995; Clift, 1995; 莫宣学等, 1996）。

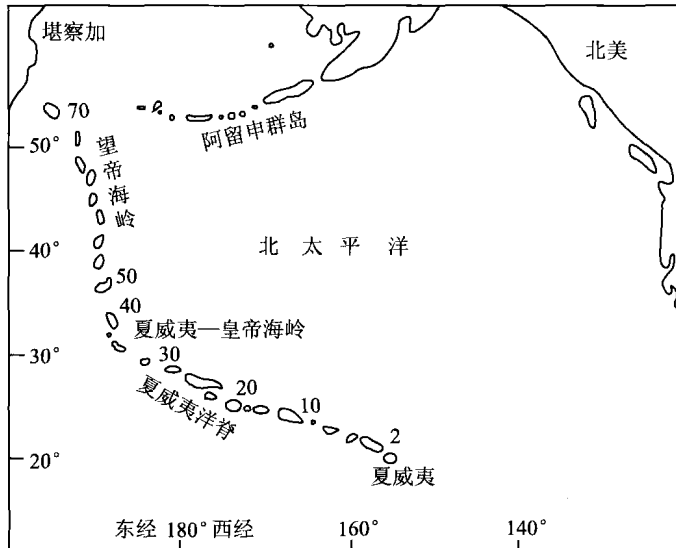
### 一、地幔柱理论的提出

地幔柱构造（Mantle plumes tectonics）的概念源自热点构造。尽管 Wilson（1963）提出的热点假说主要用于解释夏威夷群岛次火山的成因，但却引起了地质学家的广泛兴趣，并逐渐发展成地幔热柱（Mantle plume）理论，尤其是日本地质学会学报（J. Geol. Soc. Japan, 1994, 100（1））集中发表的 Fukao, Maruyama, Kumazawa 等学者的文章，从地质学、地球物理学等方面探讨了幔柱构造（Mantle plume tectonics）。英国地质学会学报（J. Geol. Soc. 1995, 152（6））集中讨论了冰岛地幔热柱及其有关的区域地质背景、大陆开裂、岩浆作用、化学成分、同位素特征等（Nadin, Barton, Fitton, Kont）。中国中青年地质学家（侯增谦等，李红阳等，王登红，牛树银等，卢记仁）还专门组织了专题性研讨（地球学报，1996（4））。进入新世纪，地幔热柱研究已形成热潮（谢鸿森等，2005；舒良树等，2006；徐义刚等，2007；杨文采等，2007；Aiqun Sun 等，2005；Anderson 等，2005；Baode Wang 等，2005；Shuyin niu 等，2005；Tachibana 等，2006；Davies 等，2006；Parkin 等，2007；Pik 等，2008），但仍以理论的探索为热点，以夏威夷、冰岛等热点地区研究更多（Sheth, 1999；Ursula 等，1999；Keller 等，2000；Lapierre 等，2000；Pirajno, 2000）。地幔热柱成矿作用方面的研究相对较少，Oppliger（1997）等提出内华达盆区（the Great Basin of Nevada）卡林型金矿可能与黄石热点有关，Hedenquist（1998）等认为菲律宾的某些斑岩型和浅成低温热液型铜金矿床与幔柱有关。国内则认为白云鄂博、华南等地的某些矿种与地幔热柱有关（曹荣龙，1996；王登红，1998，2007；黎盛斯，1996；毛景文等，2006），看来，越来越多的学者已经认识到，地幔热柱多级演化应该是幔壳演化及多金属成矿作用的重要控制因素。

地幔柱构造的基本涵义是深部地幔热对流过程中，一股上升的圆柱状热塑性物质流从核幔交界处或下地幔涌起，并穿透岩石圈而成的热地幔物质柱状体，称为地幔热柱。它在洋底出露时就表现为热点。热点上的地热流值大大高于周围广大地区，甚至会形成孤立的火山，如非洲大陆板块内的东非阿法尔区和太平洋板块内的夏威夷火山区。地幔热柱观点的基本理论可以归纳为：①地幔热柱的根在深部地幔或核幔边界；②垂直上升的地幔热柱到达岩石圈底部时，其物质流动方向变为水平方向，导致火山活动和岩石圈凸起；③与地幔热柱集中的上升流相平衡的回流，通过地幔其他部分缓慢向下运动，称地幔冷柱；④放射性流体施加给岩石圈板块的力和岩石圈板块边界相互制约产生的力，确定了岩石圈板块

的运动方向。

1963年，加拿大地质学家 Wilson 解释固定热地幔源区夏威夷群岛火山成因(图 1-1)，美国普林斯顿大学、加利福尼亚大学、科罗拉多大学以及台湾国立大学的地球物理学家运用从全球 3 000 个地震监测站采集到的地震波数据，对地球的内部结构进行了研究。这些监测站监视记录了自 1964 年以来发生的 86 000 次地震。科学家分析了地震体波的速度变化，并根据这些数据绘制出了一张三维地形图。他们注意到，在这张非常清晰的地图上，地球地幔上有凸起的柱状体——地幔热柱。全球板块理论创始人之一的 Morgan (1974) 则认为 Wilson (1963) 所指出的固定热地幔源区实际上是一个产生于地幔底部边界附近的热幔柱。Deffeyes (1972) 提出了热幔柱是下地幔上涌形成的观点。Anderson (1975) 研究则表明热幔柱与其说是热柱，不如说是一种化学柱。它的化学成分与周围地幔物质有明显差别，它来源于地幔底部 D'' 层(即核-幔边界)。D'' 层从地核那里聚集大量放射性元素，放射热导致 D'' 层具有高温、低黏度特征，从而产生热幔柱。Maruyama (1974) 等日本学者则根据 P 波层析成像技术测得全地幔内部结构，并以 2 900 km, 670 km 和 100 km 深度为界划分出地幔热柱的一、二、三次柱(图 1-2)。



70数字为(Ma)

(图中数字单位为Ma)

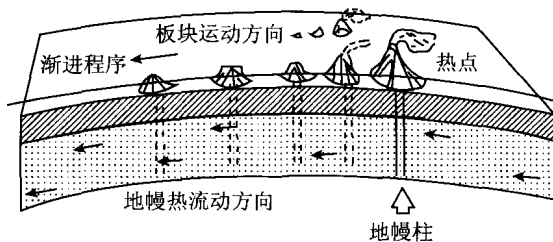


图 1-1 夏威夷-皇帝海岭火山链及其形成过程图示

Fig. 1-1 The formation of Hawaii-Emperor volcanic chains

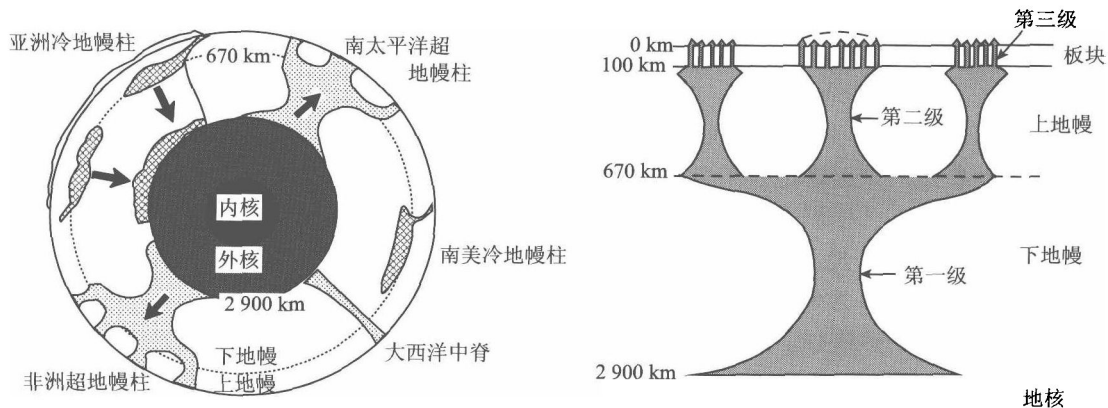


图 1-2 地幔热柱结构示意图

(据 Maruyama 等, 1994, 有修改)

Fig. 1-2 Sketch map showing structure of mantle plume

至于地球上有多少个地幔热柱, 不同的研究者有不同的认识, 已划分出的热点 (热柱) 大致在 3~117 个, 已鉴别的约 50 个, 冷柱约 10 个。而 Maruyama (1994) 认为地球上仅有 3 个超级地幔柱, 其中 2 个是热地幔柱, 一个在南太平洋, 另一个在非洲; 1 个是冷幔柱。现代地球上的约 50 个地幔柱中的大多数可按由非洲和南太平洋超级地幔柱, 或中央原始地幔柱链的分支地幔柱来解释。主要分布在于北极、冰岛、亚速尔群岛、西非、南非和库吉伦。

通过现代化测试技术, 地幔热柱不但能够直接观察到, 而且也存在很多间接证据。其中包括: ①局部高热流值和相关的火山活动 (热点) 出现在远离板块边界的地方; ②热点不随板块漂移而迁移, 几乎静止不动, 暗示起源于活动岩石圈之下的深部地幔; ③热点火山玄武岩的地球化学性质不同于位于离散板块边界、起源于浅部地幔的玄武岩 (如 MORB), 说明其源区为比软流圈更深的地幔库; ④位于热点之上的大洋岛屿通常具有规模较大的地形隆起, 这需要有额外的幔源热能以使岩石圈膨胀; ⑤最令人信服的证据来自最近的地震学研究。例如地震层析揭示冰岛地幔存在一低速柱状物质流, 至少延伸至 400 km 以下, 地幔热柱的直径为 300 km; ⑥高温可能是造成地幔热柱中低速物质的主要原因。

## 二、地幔热柱的形态特征

实验模式和理论模式表明, 地幔柱的明显形态特征是具有巨大的球形顶冠区和柱形尾柱区。20 世纪 90 年代初, Griffiths 和 Campbell (1990) 成功地解决了热驱动和大黏滞度对比这两大模拟热柱的基本问题, 建立了动态热柱结构模型。根据其实验结果和数值模拟, 认为热柱由两部分组成: 巨大的蘑菇状柱头和细长的热柱尾 (图 1-3)。柱尾主要由起源于核幔边界或上地幔-下地幔边界的热物质流组成。地幔柱的尾柱所代表的柱状体是一个长期生活动部分, 这是一种使热的上浮物质赖以从深部边界层排放到地幔至近地表面地区的通道。尾柱的长期活动则将会导致大洋热点火山链的形成。地幔柱顶冠上升时会引起地壳上隆, 形成了大量迅速溢出的熔岩, 所以, 大陆溢流玄武岩区是与地幔顶冠有关的火山作用。当然, 实际地幔热柱的形态不会像图 1-3 那样简单和规则。

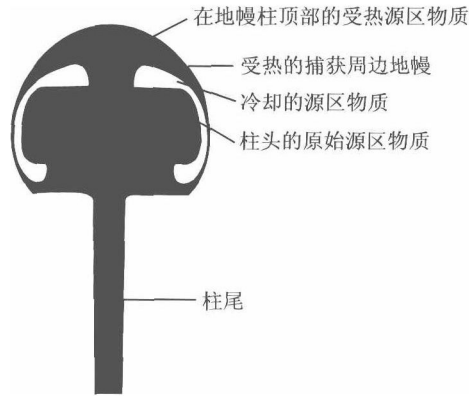


图 1-3 实验模拟的地幔柱的轴对称图形  
(据 Griffiths 等, 1990)

Fig. 1-3 An axisymmetric photograph of a laboratory starting plume

热柱的形态特征是在其上升时, 不同部位受周围地幔物质高黏滞系数限制而形成的。基本规律是, 热柱头的上升速率小于柱尾中物质的上升速率。由于有柱尾物质的不断供给, 柱头逐渐变大。热柱头在长大过程中因热浮力会同化和捕获温度较低的周边地幔, 因此柱头是热柱源区物质和较冷地幔物质混合而成的。有时, 捕获的周围地幔物质质量可占初始热柱头质量的 90%。热柱头大小取决于它在地幔中上升所经过的距离。起源于核幔边界的热柱头的直径约为 1 000 km。当上升抵达刚性岩石圈底部受阻时, 其头部可横向逐渐伸展形成直径约为 2 000 km, 厚度为 100 ~ 200 km 的蘑菇状热物质体。而起源于上地幔 - 下地幔边界的热柱头则小得多, 直径只有 500 km 左右。尽管地幔柱可能起源于上地幔底部或下地幔底部, 但结合由地幔热柱多级演化带到近地表的大量原本应在地核中的金、银多金属元素, 我们认为后一种的可能性更大, 即起源于核幔边界之上的 D''层 (D''层是指位于核幔边界附近地震波速梯度异常低的区域) (Campbell 等, 1992; Davies 等, 1992)。

Hill 等 (1992) 认为地幔柱可分为两部分, 一部分是地幔柱顶冠的冲撞区, 如西印度德干溢流玄武岩、西澳大利亚伊尔岗地块新太古代花岗岩绿岩地体; 二是地幔柱的尾柱区, 相当于著名的热点踪迹区, 如黄石地幔柱和夏威夷 - 皇帝海岭火山链。

### 三、地幔热柱的起源

地幔柱起源于地球内部的热界面层, 与热界面层间的热扰动有密切关系。地震波研究表明, 地球内部有两个热界面层, 一个是位于 670 km 处的上下地幔不连续面 (ULMB); 另一个是 2 900 km 处的核 - 幔不连续面 (CMB) 附近的 D''层。地幔柱究竟起源于哪一热界面层? 第一种可能是上下地幔热界面层, 前提是上、下地幔是分层对流的。第二种可能是起源于 D''层, 前提是整个地幔为一对流整体 (Davies, 1990)。第二种观点目前已被大多数地质学家所认可。主要证据有: ①理论计算表明, 地幔柱释放出的热量仅占整个地球放热的 10% 左右, 这个范围与地核释放出的热量比例相吻合。②理论模拟表明, 在所许可的上升速度范围内, 从上、下地幔之间热界面启动的地幔柱穿过上地幔最多只能形成直径为 30 km 的球形顶冠, 而实际上许多地幔柱的球状顶冠直径都超过 1 000 ~ 2 000 km,



这只能用起源于核-幔热界面层解释。③地幔柱位置相对固定难以用地幔柱起源于上、下地幔界面层解释，但这与地幔柱起源于核-幔界面相吻合。一些相关证据如下：

1) 大陆溢流玄武岩和大洋岛弧玄武岩(OIB)富含大离子不相容元素,反映“富集型”地幔特点,而上地幔由于分异出地壳后一般表现为“亏损型”地幔特点,大洋中脊玄武岩和岛弧玄武岩地球化学研究已证实这一点,因此,地幔柱不可能起源于上地幔。

2) 与大洋中脊玄武岩(MORB)相比,大洋岛弧玄武岩(OIB)具有较高的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值。 $^3\text{He}$ 这种同位素在地球形成以后再没有因有其他放射性元素衰变或地壳再循环而增加,因此,大洋岛弧玄武岩中较高的 $^3\text{He}$ 丰度表明地幔柱来源于地幔更深部位,反映原始地球形成时的物质特点。同铁陨石一样,地核应该富集Os,并具有比地幔更高的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值(Walker等,1995)。因此,起源于D''层的地幔柱物质会受到地核放射性成因Os的污染。一些热柱成因的玄武岩的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值比原始地幔高出20%。德保罗等(1991)对夏威夷火山岩特征做了报道,认为大多数火山的最终阶段涉及从拉斑玄武岩质熔岩到碱性熔岩的过渡。其中对洛伊希及基拉韦厄东部裂谷带海底部分的观察表明,碱性玄武岩在火山的整个生存期内可能是普遍存在的。但在一些火山内部含有的熔岩流在地球化学特征方面不同于出露的熔岩流。而在哈里阿卡拉玄武岩中却出现一种从侵蚀期后碱性熔岩至晚期主阶段碱性熔岩再到过渡期拉斑玄武岩的趋势。夏威夷熔岩,包括洛伊希海山的熔岩,具有很高的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值,这表明岩浆来源于比大洋中脊玄武岩来源更原始的地幔源,认为可能来源于地幔柱。

3) 理论模拟计算表明,如果地幔柱起源于上地幔底部,那么由地幔柱释放出的热量将占整个地球放出的热量的60%(Davies,1990)。而实际上,地幔柱释放出的热量仅占整个地球放热的6%~10%(Davies,1990),这个热量释放范围恰好与地核释放出来的热量比例相当。这说明地幔柱来源于核-幔边界负责释放地核那部分热量,而地幔热量主要由板块边界来释放(约占整个地球放热的80%,Richard,1989)。

4) Davies(1992)、Loper(1991)和Richard(1991)的理论模拟表明,在所许可的上升速度范围内,从上、下地幔之间热边界层启动的热幔柱穿过上地幔的距离最多只能形成直径为300 km的球状顶冠,而实际上多数地幔柱的球状顶冠的直径超过1 000~2 000 km。这样巨大的球状顶冠要求地幔柱必须穿过整个地幔才能形成,即地幔柱只能起源于核-幔边界附近。计算机模拟揭示,只有起源于深部地幔,热柱头才能达到足够大,以形成规模巨大的溢流玄武岩省。

5) 上、下地幔之间不连续面的性质目前并不完全清楚,许多地震资料显示该面为一个相转变界面并非是化学界面。这样,从核/幔边界附近的D''层启动的地幔柱完全可以穿过该界面达到地表。针对上述争论,一些学者采取了折中方案,认为既有起源于核-幔边界附近的D''层地幔柱,也有起源于上、下地幔之间的地幔柱。那些具有巨大的球状顶冠的地幔柱(直径大于1 000 km)是起源于核-幔边界附近的D''层,而那些球状顶冠较小的地幔柱则是起源于上、下地幔之间的热边界层。另外,起源于上地幔的热柱难以解释热点相对固定的位置。总之,目前有关地幔柱来源于何处仍众说纷纭。但随着深部地球物理和模拟实验研究的不断深入,这一问题将会得到解决。

6) 热柱活动与磁极倒转之间的相关性暗示,只有起源于D''层的地幔柱才能通过经核幔边界的热传递而改变外核物质的对流方式,最终影响地球的磁场。