

国家自然科学基金

教育部博士点基金

国务院博士后基金

陕西师范大学学术专著出版基金

联合资助出版

湘中区域古流体及 锡矿山锑矿成矿作用模拟

卢新卫 马东升 著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

区域古流体特征和大尺度空间区域地质问题已成为区域成矿规律和认识大规模流体体系中的关键课题。湘中(湘西)地区分布着大量中低温锑、砷、汞、金和铅锌矿床,是我国重要的矿床产地。本书首次应用分形理论和数学模拟技术,探讨了湘中锑矿床空间分布、锑矿带断裂体系的分形特征及湘中区域古流体在锡矿山锑矿成矿中的作用。分形研究结果表明:湘中锑矿床的空间分布及断裂体系具有分形自相似结构。且断裂体系的分维值与带内锑矿床分布的分维值呈正相关。断裂体系分维值愈大,表明各级断裂、裂隙愈发育,愈有利于成矿流体的运移与聚集、成矿。区域地球化学研究显示:湘中地区在地质历史时期区域地层中可能存在着由下而上、由外围区域向矿化集中区方向运移的大规模古流体活动。古流体的物理化学性质与区内典型矿床(锡矿山锑矿床)成矿流体性质相近,并存在着一定的演化关系。锡矿山锑矿床成矿过程的流场、温度场数学模拟结果表明,来源于大气降水的湘中区域古流体在锡矿山锑矿形成过程中起着非常重要的作用。锡矿山锑矿床的形成是区域古流体在重力驱动下长距离、大通量运移汇聚成矿的结果。

图书在版编目(CIP)数据

湘中区域古流体及锡矿山锑矿成矿作用模拟/ 卢新卫, 马东升著 .
-北京:地质出版社,2003.7
ISBN 7-116-03866-3

. 湘... . 卢... 马... . 锑矿床-成矿作
用-研究-湖南省 . P618.660.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 055252 号

责任编辑:陈 磊
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
电 话:(010)82324508(邮购部);(010)82324577(编辑部)
网 址:[http:// www.gph.com.cn](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:787mm×1092mm¹/₁₆
印 张:6
字 数:150 千字
印 数:1—600 册
版 次:2003 年 7 月北京第一版·第一次印刷
定 价:13.00 元
ISBN 7-116-03866 3 P·2387

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

前 言

湘中(及湘西)是我国重要的中低温矿床(锑矿、雄黄矿、汞矿、金矿和铅锌矿等)产地之一。这些中低温矿床均具低温度、低盐度,与岩浆关系不密切等特点。许多现代地热系统正在形成的锑—汞—砷—金矿的许多成矿特点与其相似(Krupp, et al., 1987; Karpov, 1991),它们在成因上具有一定的共性,即在减压区集中排泄,矿质大量堆积的结果。

在成矿的‘源—运—储’过程研究中,与20世纪70、80年代层控矿床研究特别关注成矿物质来源相比,20世纪90年代以来已将更多的注意力转向‘运’这一成矿中介环节。其中,地壳中的流体作用与成矿关系研究是阐明这一中介环节的关键所在。因此,地壳流体运移及其水岩反应机制与成矿关系已成为当今矿床成因理论研究中的前沿课题和热点。有关地热田的研究早已确定地下热水具有广泛的来源和较大活动范围,热水区面积可达上万平方公里以上,如中塔什干附近和西西伯利亚(Ellis, 1979)。Fyfe等(1978)在70年代末首先注意到地壳中大规模流体运移与成矿作用的关系。80年代以来,地壳中大规模流体运移与成岩成矿的关系开始受到重视。如Oliver提出了由陆壳碰撞产生大规模构造卤水运动,并在俯冲盘一侧成矿的新设想,以此解释石油、煤和中低热液矿床成因及石英岩化、白云岩化等成岩作用(Oliver 1986; 1992)。在过去的十多年里,越来越多的证据表明地壳中存在着大规模流体运移的地质现象。在流体力学上,这种大规模流体运移与地壳的构造演化相耦合(Oliver, 1986; Bethke, et al., 1990)。地壳中大规模流体运移的证据主要有:密西西比河谷型矿床的形成(Sverjensky, 1986; Leach, et al., 1986);热异常(Coveney, et al., 1987; Hathon, et al., 1987; Bethke, et al., 1990);钾质交代作用(Buyce, et al., 1975; Elliott, et al., 1987; Hearn, et al., 1987; Hay, et al., 1988);后生白云岩胶结及白云岩化(Bethke, et al., 1990);石油的运移和圈闭(Demaison, 1977; Garven, 1989)等。其运移机制根据驱动力的不同可以划分为三大系统,即重力驱动水流系统、浮力驱动水流系统和应力驱动水流系统(马东升, 1998)。近年来,通过众多研究(Sibson, et al., 1975; Russell, 1983; Hanor, 1987; Jowett, 1986; Ranganathan, et al., 1987; Dewers, et al., 1988; Shi, et al., 1988; Evans, et al., 1989; Sreaton, et al., 1990; Park, et al., 1990; Tarnay, et al., 1991; Pirajno, 1992; Ge, et al., 1992; 1994; Ortoleva, 1994; Raffensperger, et al., 1995a, 1995b;),对于各种水流系统的主要特征及其成矿意义已经得到很好认识。在涉及大规模流体运移的多种成矿模式中(如陆壳天水环流、重力驱动区域规模地下水流),以大气降水和地下水为代表的大范围、大流量流体过程受到高度重视。这方面以Garven等人的研究最为典型(Garven, et al., 1984a, 1984b; Garven, 1985, 1986; Garven, et al., 1993, 1994; Person, et al., 1996)。由此可见,80年代以来,成矿流体研究已从以往仅限于矿床内部的局部规模,发展到探讨区域性流体对成岩成矿

演化认识的新阶段。

在国内热液矿床成因研究中,对区域性流体运移与成矿关系的重视始于 20 世纪 80 年代末,如在季克俭(1989,1994)的“三源热液成矿模式”中,强调了透水含水“水源层”与地下水流动方向在成矿中的重要作用,但至今主要限于对岩体热场周围流体运动的研究。近年来,马东升(1990a,1990b;1991a,1991b)通过系统研究发现,在无岩浆活动或活动极弱的中—低温成矿带内,存在大范围地层金亏损与金矿伴生,即“贫化—富集地球化学共轭”现象,其亏损面积可达上千平方公里,垂深达几千米。国内外研究证实了该现象的普遍性(Quednau, et al.,1991;刘金钊,1992),并都认为是大规模流体运动使地层中的金产生活化再分配的结果。

湘中及湘西北地区广泛分布着锑、砷、汞、金和铅锌等中低温热液矿床,且经过多年研究与开发积累了较丰富的资料,是进行低温地球化学、古流体活动示踪研究的天然实验区,也是进行流体运移及成矿过程模拟研究的较好场所。基于此,作者选择湘中地区(重点包括庙山里、禾青、冷水江、锡矿山等地区),着重研究区域上古流体的活动特征及古流体的性质,古流体与成矿流体的关系,在此基础上通过数学模拟方法进一步探讨区域古流体在锡矿山锑矿成矿中的作用及锡矿山锑矿床的成因。

锡矿山锑矿发现于明嘉靖二十年(1541 年),1949 年以前锡矿山未进行过系统的地质勘探工作。解放后,许多单位及研究者对该矿床进行过多方面专题研究(湖南地质研究所,1983;刘光模等,1983;刘焕品等,1985;刘焕品,1986;吉让寿,1985,1987;李鸿儒,1986;杨舜全,1986;刘汉元等,1991;靳西祥,1993;湖南有色地质研究所矿床室,1993;易建斌等,1994;单业华等,1994;Xingwei Hu, et al.,1996;解庆林,1996a,1996b;1997;杨照柱,1998a,1998b),但对矿床成因认识仍存在一定分歧,部分学者认为属与火成岩(或隐伏火成岩)有关的中低温热液矿床(肖启明等,1984;林肇风,1987;李智明,1993),成矿物质主要来源于地壳深部,可能与深部岩浆(混合岩浆)有关;另一部分学者则认为是层控矿床(谌锡霖等,1983;涂光炽等,1984;曾允孚等,1987,1993;邹同熙,1988;庄锦良,1988;文国璋等,1993),泥盆系是锑矿形成的重要物源,矿田处在锑的地球化学高背景区内,是锑的矿源层,成矿热液为高盐度的热卤水;还有部分研究者认为是大气降水成因(解庆林,1996;杨照柱,1998),成矿物质来源于前泥盆系。

虽然前人对湘中中低温矿床做了许多工作,但仍存在一些薄弱环节:一是区域古流体研究尚属空白;二是区域古流体的活动特征及其与典型矿床成矿流体、成矿作用的关系研究不足;三是源—运—储作为一个整体研究不够。此外,对于成矿过程中流体的运移途径、流场、温度场特征、流体流速的大小了解甚少,这方面研究甚至是空白。针对上述情况,作者通过应用元素地球化学、包裹体地球化学、同位素地球化学等研究方法,并首次引入分形理论和数学模拟技术,探讨了湘中锑矿床空间分布及断裂体系的分形特征,深入研究了湘中区域古

流体的活动特征,古流体的性质及古流体在锡矿山锑矿成矿中的作用。定量分析了锡矿山锑矿成矿过程中的流场和温度场特征,本专著取得了如下主要研究成果。

- (1) 锑矿床空间分布具有分形特征,这种分维结构显示出流体运移与就位的空间规律。
- (2) 断裂体系具有分维结构,且断裂体系的分维值与锑矿床空间分布的分维值呈正相关,说明断裂构造分维值的大小对矿床定位和流体运移有着指示作用。
- (3) 微量元素、同位素特征研究首次揭示出区域上存在古流体的定向活动。
- (4) 区域古流体性质的研究,为分析探讨古流体与成矿流体及成矿作用关系提供了基础,填补了本区区域流体研究这一空白。
- (5) 首次应用流体力学和水动力学理论定量模拟分析了锡矿山锑矿成矿过程中的流场、温度场特征,并对该矿床的成因得出新的认识。

其中,在如下三个方面有所创新: 首次将分形理论引入湘中锑矿床空间分布特征及断裂体系的研究中,并对分维的地质意义做了探讨; 湘中区域古流体示踪及其性质的研究填补了本区这一研究空白,在国内区域流体的研究中也尚属首次; 定量地研究了锡矿山锑矿床成矿过程中的流场及温度场特征,并对该矿床的成因得出新的认识。

上述研究成果开创了我国区域流体地球化学特征及其成矿作用研究的先河,也为流体地球化学研究工作提供了丰富的资料和一定的认识。本书涉及区域流体和成矿作用等现代地质学的某些热点问题,相信定有不足和谬误之处,敬希读者批评斧正。

本书是作者博士学位论文的主体部分,也是导师马东升教授所承担的国家自然科学基金研究项目(批准号:49733012)及教育部博士点基金项目(批准号:98028422)的重要组成部分。从选题的确定、研究工作的开展到书稿的撰写和修改,始终是在导师的认真安排、悉心指导和严格要求下进行的,对此作者表示衷心的感谢。第六章第二节主要由马东升教授完成。

研究工作期间,得到了中国科学院长沙大地构造研究所易建斌博士,中南大学(原中南工业大学)刘继顺教授、吴延之教授,南京大学朱金初教授、王鹤年教授、陈培荣副教授、倪陪副教授、黄耀生老师、李哲敏老师的精心指导与帮助。野外工作期间,还得到湖南锡矿山矿务局于承武总工、刘健雄处长、邹利群工程师、袁晓军工程师、贺建湘工程师、苏楚平工程师等人和湖南地质勘探局246地质队、金竹山煤矿地质处、湖南有色地质研究所、中南大学地质系等单位的大力支持。书稿完成后,承蒙北京大学地质系陈衍景教授,中南大学地质系刘继顺教授、彭省临教授、吴延之教授,国土资源部南京地质矿产研究所叶水泉研究员、戚建忠研究员,南京大学陈俊教授、朱金初教授、王鹤年教授、顾连兴教授、华仁民教授、朱国荣教授、闵茂中教授等审阅和评议,并提出了许多宝贵的建设性意见。作者谨向以上有关人士和单位致以衷心的感谢。对国家自然科学基金会、教育部博士点基金会给予的研究经费资助以及国务院博士后基金会和陕西师范大学专著出版基金给予的出版经费资助,作者表示衷心感谢。

目 录

前 言

第一章 湘中区域地质背景 (1)

 第一节 大地构造位置 (1)

 第二节 区域地层及其水文地质特性 (1)

 第三节 区域矿产 (5)

 第四节 区域构造 (6)

 第五节 岩浆热事件与金锑矿床定位 (7)

第二章 构造—流体—成矿作用 (8)

 第一节 成矿过程中构造与流体的相互关系 (8)

 第二节 锑矿床空间分布的分形特征及其意义 (9)

 第三节 断裂构造体系分维及其对流体运移和矿床定位的指示作用 (13)

第三章 区域地球化学特征及区域古流体运移示踪 (18)

 第一节 地层中微量元素含量背景及共生组合 (18)

 第二节 后期叠加作用对地层中成矿元素含量的影响 (25)

 第三节 地层中易活动元素的趋向性分布及其对古流体活动的指示意义 (26)

 第四节 地层稳定同位素与区域古流体运移示踪 (28)

第四章 古流体的区域地球化学特征 (33)

 第一节 古流体的包裹体特征 (33)

 第二节 古流体的物理化学特征 (35)

 第三节 古流体的稳定同位素组成 (38)

第五章 锡矿山锑矿床流体成矿数值模拟研究 (41)

 第一节 重力驱动区域流体运移成矿及锡矿山锑矿床成矿概念模型 (41)

 第二节 区域地下水流成矿的数值模拟研究 (43)

 第三节 锡矿山超大型锑矿成矿过程中流场、温度场计算分析 (53)

第六章 区域大规模流体运移成矿机制讨论 (62)

 第一节 地壳中区域大规模流体运移现象及其地质作用 (63)

 第二节 区域大规模流体运移机理及其成矿意义 (65)

 第三节 流体成矿作用研究现状及发展趋势 (70)

主要结论 (71)

参考文献 (73)

英文摘要 (85)

Contents

Preface

Chapter 1 Regional geological background (1)

Geotectonics situation (1)

Regional strata and hydrological feature (1)

Regional deposit (5)

Regional structure (6)

Magmatic activity and locating of Au, Sb deposits (7)

Chapter 2 Geologic structure—Fluid—Ore Formation (8)

Relationship between geologic structure and fluid during ore formation (8)

The fractal feature of spatial distribution of antimony deposits and its significance (9)

Fractal dimension of fracture system and its indicating significance for migration
of ore forming fluids and location of ore deposits (13)

Chapter 3 Regional geochemical characteristics and migration tracing of regional
paleofluid (18)

Background of trace elements content in strata and their paragenetic association (18)

The effect of late geologic process on ore forming elements (25)

Distribution of active elements in strata and their indicating significances to paleofluid
migration (26)

Stable isotopes of strata and regional paleofluid migration tracing (28)

Chapter 4 Geochemical characteristics of regional paleofluid (33)

Inclusions characteristics of paleofluid (33)

Physical and chemical characteristics of paleofluid (35)

Stable isotopes composition of paleofluid (38)

Chapter 5 Ore-forming process numerical simulation of fluid of Xikuangshan antimony
deposit (41)

Ore forming of gravity drive regional fluid migration and ore forming concept
model of Xikuangshan antimony deposit (41)

Numerical simulation research of ore forming process of regional fluid flow (43)

Fluid field and temperature field analysis during Xikuangshan antimony formation ... (53)

Chapter 6 Ore-forming mechanism discuss of fluid regional-scale migration (62)

Fluid regional scale migration phenomenon in the earth 's crust and its geologic
process (63)

Mechanism of fluid regional scale migration and its ore forming significance (65)

Research status and development direction of fluid ore forming process (70)

Main conclusions (71)

References (73)

Abstract (85)

第一章 湘中区域地质背景

湖南锑矿共有大小矿床几十处,矿点百余处。具有工业意义的矿床集中分布于湖南中部(湘中)地区(图 1 1),该区已探明锑储量约 $127 \times 10^4 \text{t}$, 占湖南省锑储量的 98%(肖启明,李典奎,1984;史明魁等,1994)。我国是世界上锑矿储量最为丰富的国家。由此可见,湘中锑矿在中国以及世界锑资源中的重要地位。



图 1 1 研究区示意图

第一节 大地构造位置

湘中地区地处江南古陆东南部,主要由震旦系和古生界(寒武系—二叠系)沉积盆地(湘中盆地)组成。盆地基底由前泥盆系巨厚浅变质碎屑岩组成,主要分布于盆地边缘,及内部次级隆(凸)起上;盖层由晚古生界碳酸盐岩、碎屑岩系组成。

第二节 区域地层及其水文地质特性

湘中地区地层发育齐全,从中元古界至第四系均有存在。各时代地层分区、建造特征及其水文地质特性(表 1 1)从老至新简述如下。

一、元古宙地层及其水文地质特性

1. 中元古界冷家溪群

冷家溪群是湘中出露最老的地层,主要分布于沅陵、桃源、桃江、益阳等地,在长沙、衡阳、双峰也有零星出露,可与黔东的梵净山群、滇东的昆阳群和桂北四堡群等进行对比。它是一套浅灰、浅灰绿色为主的浅变质细粒碎屑岩、粘土岩及含凝灰质细粒碎屑岩组成的复理石建造,局部夹基性、中酸性熔岩,最大厚度超过 2500m,未见底,属活动型沉积,构成了本区褶皱基底。

岩石中空隙、裂隙均不发育,水力传导率极小,属于不透水层。

2. 新元古界板溪群

板溪群包括其下部的马底驿组(或高涧组)和上部的五强溪组(或漠滨组),可与黔东的下江群,桂北丹州群进行对比,主要分布于湘中盆地的北部和东部边缘,与下伏冷家溪群不整合接触(武陵运动)。它由一套厚度较大的砂岩、砂质板岩、凝灰质板岩夹少量碳酸盐岩、炭质板岩、火山熔岩及火山碎屑岩组成。通常以湘潭、溆浦、黔阳一线为界将其分为北区和中区。

表 1 1 湘中出露地层岩性特征及其水文地质单元

地 层 单 位				厚度/ m	岩 性 描 述	水文地 层单元
下三叠统	麒麟组			261.5	页岩、粉砂岩	G 弱透 水 层
	大冶组			587.6 ~ 696.9	下段为钙质页岩、灰岩, 上段为厚层灰岩	
二叠系	P ₂	大隆组		114.7 ~ 167.8	硅质页岩夹硅质灰岩	
		龙潭组		43 ~ 224.4	页岩、粉砂岩、砂质页岩, 含煤层	
	P ₁	茅口组		286.2 ~ 644.5	上段厚层灰岩, 下段钙质页岩, 泥灰岩	
		栖霞组		109.5 ~ 219.9	上段钙质页岩、泥灰岩, 下段厚层灰岩	
石炭系	C ₃	船山组		257.3 ~ 425.8	厚层灰岩, 白云质灰岩	F 含 水 层
	C ₂	黄龙组		407.5	厚层灰岩, 白云岩	
	C ₁	大塘阶	梓门桥段	31.2 ~ 137	中厚层状灰岩, 生物灰岩	E 弱透 水 层
			测水段	100 ~ 200	石英砂岩, 粉砂岩, 夹页岩, 含煤层	
			石磴子段	135.3 ~ 247	下部为灰岩, 上部为灰岩与泥灰岩互层	
		岩关阶		310 ~ 592	页岩、砂岩互层, 中夹厚层灰岩	
泥盆系	D ₃	锡矿山组	欧家冲段	116	页岩、粉砂岩, 泥灰岩	D 含 水 层
			马牯脑段	240	灰岩	
			长龙界段—泥塘里段	120	砂质页岩、钙质页岩夹生物灰岩	
		余田桥组		155.6 ~ 534.2	下段为砂岩, 中段为灰岩, 上段为页岩	
	D ₂	棋梓桥组		216.2 ~ 766	厚层灰岩, 生物灰岩, 夹泥灰岩	
		跳马涧组		95.5 ~ 536.4	石英砂岩, 粉砂岩	
志留系				1955.8	细砂岩, 粉砂岩, 板状页岩	C 弱透 水 层
奥陶系				1082.6	页岩, 泥岩, 硅质页岩, 砂质页岩, 粘土质页岩	
寒武系				551.2 ~ 636.1	下统为板状页岩, 中统为泥灰岩, 上统为钙质板状页岩和泥灰岩	B 含 水 层
震旦系				77.3 ~ 5664	下统为砂岩、板岩及冰碛砾岩, 上统为板状页岩, 硅质岩	
板溪群				1051 ~ 4661	低阻高导层, 为一套含凝灰质浅变质细粒碎屑岩	
冷家溪群				未见底	浅变质细粒碎屑岩、粘土岩及含凝灰质细粒碎屑岩组成的复理石建造	A 隔 水 层

北区:由紫红色、灰绿色浅变质砂岩、砂岩、板岩、凝灰岩及碳酸盐岩、炭质板岩组成,表现为两个大的旋回。据此划分为两个地层单位,即马底驿组及五强溪组,局部地区夹中基性和中酸性火山岩,具类复理石建造特征。总厚752~380m,与下伏冷水江群呈角度不整合接触。

中区:为一套灰绿色、灰—深灰色,少量紫灰色浅变质砂岩、凝灰岩、板岩组成。韵律发育,为较典型的复理石建造。总厚度 3290~4757m,与下伏冷水江群平行不整合接触。

深部地球物理研究(中国地质勘察技术院,1990 科研报告)揭示,湘中乃至华南的上部元古宇均属低阻稳定层,如华南上元古界的地层电阻率仅为 $n \times 10\Omega \cdot m$ 。地层、岩石的电阻率主要取决于岩性、孔隙水,以及孔隙的连通状态。以浅变质砂岩、砂岩、板岩及碳酸盐岩为主的板溪群内,孔隙及层间裂隙极为发育,且孔隙连通性好,因而极可能为研究区乃至华南地区的区域性含水层。

3. 震旦系

震旦系主要分布于盆地边缘及白马山 大乘山 龙山东西向隆起带上,自下而上分为下统(江口组、湘锰组、洪江组)和上统(金家洞组、留茶坡组)。下统主要为海洋冰川沉积类型和正常海洋与海洋冰川混合型沉积的冰碛砾岩、冰碛砾粉砂岩、粉砂岩及砂岩、板岩。上统主要为温暖气候条件下沉积的硅质岩、黑色板状页岩、碳酸盐岩。震旦系厚度 773~5664m,自北而南递增,与下伏板溪群呈假整合接触,各组间基本上为连续海相沉积。岩石中孔隙、层间裂隙发育,导水性能好,为一含水层。震旦系是湘中重要的锑矿赋矿层位,22.7%的锑矿产于该层位,较著名的矿床有龙山金锑矿床、钱江冲锑矿床(史明魁等,1994)。

二、古生代地层及其水文地质特性

1. 寒武系

本区寒武系发育较全,主要分布于雪峰山东侧及白马山 龙山、苗儿山 关帝庙等穹隆中。下寒武统主要为硅质、炭质、砂质板岩,厚度为 195~408m;中寒武统主要为炭质、泥质碎屑岩和纹层状泥灰岩,厚度为 113~718m;上寒武统为一黑色薄层泥灰岩、泥质灰岩为主的碳酸盐岩类,厚 70~255m。寒武系与上、下地层一般为整合接触。

碳酸盐岩富含地下水,裂隙、岩溶发育,是一较好的含水层。该套地层也是湘中较为重要的锑矿赋矿层,湘中 25.6%的锑矿赋存于寒武系(史明魁等,1994)。

2. 奥陶系

奥陶系发育完整,出露良好,分布范围大致与寒武系一致。岩性以碎屑岩为主,下统为灰绿、灰黑色的砂质页岩;中统为灰黑色粘土质页岩,夹含锰灰岩或钙质白云岩;上统以页岩、硅质页岩、泥岩为主。总厚度为 500~1000m,与下伏寒武系整合接触。

岩石中空隙度较小,含水、透水性极差,为弱透水层。

3. 志留系

出露在盆地边缘,仅发育下统。为灰、灰绿、黄绿色中厚层状细粒砂岩、粉砂岩、板状页岩,底部有少量黑色炭质板状页岩。总厚度为 723~400m,整合于奥陶系之上,而与上覆中

泥盆统跳马涧组或半山组呈不整合接触。

岩石中空隙、裂隙不发育,渗透率较小为弱透水层。

4. 泥盆系

泥盆系是湘中盆地中出露最广泛的地层之一,亦为锡矿山超大型锑矿田内出露和被揭露的主要地层。中统下、中部属滨海—陆相碎屑沉积,自中统上部至上统主要属浅海相碳酸盐岩。由南往北,碳酸盐沉积逐渐减少,泥砂碎屑沉积相应增加,相变为滨海至陆相碎屑沉积。沉积物厚度变化大(605~2028m),与下伏地层呈角度不整合。中统包括跳马涧组和棋梓桥组,上统包括余田桥组和锡矿山组,现对各组岩性特征及水文特性分别叙述如下。

跳马涧组:中下部为灰白色石英砂岩,上部为紫红色石英细砂岩、粉砂岩和砂质页岩,厚度 95.5~536.4m。孔隙不发育,导水性能差,为弱透水层。

棋梓桥组:岩性横向变化大,可大致分为灰岩区和页岩区,厚 216.2~766.1m。灰岩区主要分布于天马山、炉观、洋溪、锡矿山一带。在大观、禾青、严塘、猪婆山周围以及雷鸣桥一带,岩性主要为深灰色厚层状灰岩、生物灰岩夹泥灰岩,厚 173~721.9m。页岩区主要分布于金凤团、桃林、坪上及龙山周围,厚 200m。不同岩相区,其水文地质特性各异,总体上分析灰岩区为含水层,页岩区为弱透水层。

余田桥组:岩性变化极为复杂,大致分为页岩灰岩区、灰岩区和砂岩区,厚 110.1~708m。页岩灰岩区主要分布于西半部团山、天马山、炉观、桃林、大观及巨口铺、严塘、禾青和锡矿山等地;灰岩区分布于猪婆山周围,厚 110.1m;砂岩区分布于雷鸣桥一带,下段以泥灰岩、灰岩为主,上段为页岩、砂岩及厚层状石英砂岩。

在锡矿山,余田桥组按岩性分为三段:上段为钙质页岩,厚 40m;中段以深灰薄—厚层状灰岩为主,厚 220m;下段为灰、深灰色中厚—厚层状含白云母粉砂岩、钙质砂岩,厚 45m。该组水文地质特性变化复杂,孔隙度、导水能力中下段较大,平均渗透系数为 0.0017m/h(湖南有色地质勘探 246 队地质报告,1985),而上段为弱透水层。

锡矿山组:锡矿山组是区内最主要的含铁地层,下段为泥灰岩、泥质灰岩、灰岩互层;上段以碎屑岩为主,厚 155.6~534.2m,横向变化大。在锡矿山,该组由下而上分为五段(长龙界段、兔子塘段、泥塘里段、马牯脑段、欧家冲段)。长龙界段以钙质页岩为主,厚 70m;兔子塘段为深灰色瘤状灰岩,厚 30m;泥塘里段为黄绿色粉砂质页岩,夹鲕状赤铁矿,厚 20m;马牯脑段下部为蓝灰色泥灰岩,中部为深灰色瘤状灰岩与纯灰岩互层,上部为砂质灰岩,厚 240m;欧家冲段下部为黄绿色页岩,上部为灰白色薄至中厚层状石英砂岩,粉砂岩夹页岩,厚 116m。

该组各段水文地质特性各异,灰岩段含水性良好,平均渗透系数 0.0005m/h,属含水层,而砂岩段导水性能较差,属弱透水层,其中长龙界段页岩在锡矿山锑矿形成过程中起着隔水作用,使得成矿流体的向上运移受阻,于该岩性段下部地质构造有利部位汇聚成矿。

5. 石炭系

石炭系广泛分布于盆地内部,地层发育完好,主要为碳酸盐岩、含煤碎屑岩,厚度一般大

于 1000m,可分为上、中、下统。下统自下而上分为岩关阶和大塘阶。

岩关阶自下而上又分为邵东段、孟公坳段和刘家塘段。岩性主要以砂岩粉、砂岩、钙质页岩、泥灰岩为主。岩石含水、透水性差,为弱透水层。

大塘阶自下而上分为石磴子段、测水段和梓门桥段。石磴子段下部为灰岩,上部为灰岩与泥灰岩互层,厚 135 ~ 247m,含水性好。测水段主要为砂岩、粉砂岩夹砂质页岩、黑色页岩及煤层,厚 100 ~ 200m,为弱透水层。梓门桥段下部为灰黑色泥灰岩和灰岩互层,上部为灰岩、泥质灰岩夹泥灰岩和少量白云质灰岩及生物灰岩,厚 31 ~ 137m,为灰岩含水层。

中统黄龙组岩性单一,为巨厚层块状白云岩。在涟源、冷水江、田坪等地,下部见有厚 30 ~ 100m 浅灰色灰岩、白云质灰岩。总厚度 408m。为含水层。

上统船山组岩性甚为稳定,由浅灰色厚层块状灰岩、白云质灰岩夹白云岩、灰质白云岩组成,厚度 200 ~ 426m,为灰岩含水层。

6. 二叠系

二叠系在湘中广泛出露,是最重要的含煤地层,总厚 833 ~ 1040m。上统上部是含铁锰质的硅质岩和页岩;下部为含煤碎屑岩。下统为灰岩、硅质岩和泥砂质含煤沉积。

岩石含水、透水性较差,尤其页岩与煤层的渗透系数较小,为弱透水层。

三、中生代地层及其水文特性

1. 三叠系

三叠系发育不全,仅零星出露。下统主要由页岩、粉砂岩及厚层灰岩组成,厚 300 ~ 846m。中上统不发育/ 缺失。为弱透水层。

2. 侏罗系

侏罗系零星分布于盆地内部,海相和陆相两类沉积均有,且赋存有煤、油页岩等矿产。由于岩性以页岩、粉砂岩为主,其含水透水性较差,为弱透水层。

3. 白垩系

白垩系为陆相沉积,下统主要为滨海、浅湖相砂泥岩,局部夹盐湖相膏泥岩,其次为山麓相砾岩、砂岩。上统岩相复杂,除有山麓相砾岩、砂岩及滨湖相砂泥岩外,局部尚有盐湖相膏泥岩及火山岩。透水性能好,为含水层。

新生代地层为陆相沉积物,零星分布在山间盆地中。

对于湘中地区根据各地层单元的岩性特征、水文地质特性以及岩性组合、地层的区域性展布情况等,可建立其水文地层单元,如表 1 1 所示。

第三节 区域矿产

湖南的锑矿在储量、产量上及质量上均居全国首位。据统计仅湘中锑矿床(点)就有 172 处之多,其中锡矿山锑矿总储量(包括现有储量和推算出的已采量)约 200 万吨(史明魁等,

1994),是世界独一无二的超大型锑矿床。

根据锑矿赋矿围岩的性质、矿体产出形态、产状等特征可将湘中锑矿床划分为三类:第一类为产于碳酸盐岩中的锑矿床,以锡矿山锑矿为代表,矿体主要呈似层状,次为脉状。矿床远离火成岩体。矿物组合简单,矿石矿物以辉锑矿为主,其他金属矿物较少。脉石矿物以石英、方解石为主。围岩蚀变以硅化为主。此类矿床除锡矿山外还有牛山铺、甘溪、罗家塘等。第二类锑矿床产于碎屑岩中,矿体呈似层状、脉状,赋矿围岩主要为板溪群、冷家溪群、震旦系和寒武系板岩、千枚岩、页岩、砂岩等。矿床一般远离火成岩体。矿物组合较复杂,矿石矿物除辉锑矿外,还有自然金、白钨矿、黄铁矿和毒砂等。围岩蚀变有硅化、绢云母化、黄铁矿化、毒砂化和绿泥石化等。如沃溪、西冲、渣滓溪、板溪等。第三类锑矿床,矿体呈脉状、串珠状产于花岗岩、花岗斑岩或石英斑岩内外接触带中。矿石矿物主要有辉锑矿、黄铁矿和毒砂等,围岩蚀变有硅化、绢云母化,有时见电气石化。矿体规模小,品位变化大。如杏子铺、马鞍界等。

各类锑矿床在空间分布上有一定特点。锡矿山式似层状交代充填型矿床主要分布于城步—新化—桃江断裂带。脉状充填型分布区域较广。在安化—宁乡东西向构造带是钨锑金、钨锑及锑多金属石英脉型矿床(点)分布区,南部接近越城岭花岗岩体多出现钨锡锑矿点;白马山—龙山东西向构造带主要分布了锑、锑金、锑多金属矿床(点)。距离花岗岩体由近至远,其矿物组合的变化有钨锡锑—锑多金属—锑金—锑,即由中高温热液—中低温热液矿床的水平分带。

湘中地区还有大量的铅锌矿点。层控型铅锌矿主要分布在泥盆系和寒武系的碳酸盐岩地层中。另外,该区还有黄铁矿矿床,伴生银矿床以及大量沉积矿产如镍钼钒矿、石膏矿、煤矿、磷矿、锰矿等。

第四节 区域构造

湖南及其邻区断裂构造极其发育。从方向上看,有北东向、北北东向以及北西向构造,并具多期活动的特点。这些构造体系相互联合、复合、迁就利用构成区域主要构造格架。

湘中地区褶皱构造主要有前加里东期、加里东期和印支期。前加里东期褶皱主要分布在雪峰隆起北缘,古构造线展布多为东西或近东西向,常为紧密线形褶皱。加里东期褶皱主要分布在雪峰隆起内,构造线以北东向及北北东向为主,多为短轴状,主要分布在湘中坳陷内,呈弧形展布。一系列背、向斜呈疏密波状相间排列,向斜带比较宽阔,背斜带比较紧闭。湘中坳陷带的劈理前锋一般到达上泥盆统余田组灰岩的底界,中泥盆统棋梓桥组及其以下为下部变形层次,形成劈理褶皱或相似褶皱。加里东褶皱基底作为一个整体卷入印支期褶皱,因此泥盆系与加里东基底之间的不整合面与泥盆系岩层同步褶皱。余田桥组—三叠系为上部变形层次,形成同心或等厚褶皱。

构造体系是在漫长的地质历史中形成的,且对后期的沉积建造起控制作用。武陵运动

形成了湖南省最古老的安化—宁乡东西向构造带,控制了板溪期的沉积;雪峰运动,除安化宁乡东西向构造继续活动外,白马山 龙山东西向构造带已具雏形,安化 黔阳构造带及雪峰弧形构造已经出现;它控制了本区震旦纪—下古生代的沉积;广西运动除老的构造体系有继承性活动外,紫云山 牛头山 四明山隆起带,古北北东向构造带基本定型,它控制了上古生代的沉积建造;使本区由较活动的沉积环境演变为较稳定的沉积环境,晚古生代以广海式局限海台地型碳酸盐建造为主,间有含煤砂页岩建造;印支运动形成了祁阳弧形构造,基本结束了本区海相沉积的历史;强烈的燕山运动,形成了以北北东向为主的断陷盆地,构成了区内基本格架。

第五节 岩浆热事件与金锑矿床定位

湘中花岗岩发育,为多期次复式岩体,主要出露于西部、东北部盆地周边。区内出露面积较大的岩体有白马山岩体、沅山岩体、天龙山岩体、歇马岩体、关帝庙岩体(图 2-4)。按照岩体出露面积统计,湘中地区岩浆活动集中在晚三叠世—早侏罗世,其中早侏罗世为岩浆活动高峰期(200Ma 左右),岩体多为中深成岩基,中、晚侏罗世岩体多呈浅、超浅成岩株状。不同时间、不同侵位深度的岩体对古地温场的贡献不尽相同(胡雄伟等,1995;卢新卫等,1998b),早侏罗世岩基的分布控制了古地温场的区域格局,而中、晚侏罗世侵位的岩株(或隐伏岩体)导致局部古地温异常。

综合不同矿床的流体包裹体研究资料,锑、金、铅锌矿床矿物流体包裹体均一温度变化在 90 ~ 260 ℃,且主要集中在 120 ~ 220 ℃ 范围内。这种成矿流体的温度范围落在侏罗纪最大古地温范围内(胡雄伟等,1995)。区域成矿学研究表明,侏罗纪是本区主要的成矿期,龙山金锑矿成矿年龄为 (174 ± 27) Ma(史明魁等,1994),锡矿山超大型锑矿成矿年龄为 (156.3 ± 12) Ma(Hu, et al., 1996)。因此,可以推知湘中岩浆热事件所控制的古地温场与金锑矿床成矿作用之间存在内在联系。湘中区域上金矿床和矿化点多分布于花岗岩之岩凸(岩凹)部位,如古台山、太平等金矿分别产出于白马山、沅山等花岗岩体凸出部位的外接触带;金山里、杏枫山等金矿化产出于白马山岩体之港湾状内凹部位的外接触带。岩体之岩凸或岩凹部位是热力集中场所,围岩最易破碎形成裂隙,成为成矿流体运移的良好通道。成矿流体沿裂隙上升并在这些有利部位充填成矿。

湘中多数锑矿远离花岗岩岩体,尤其是碳酸盐岩中锑矿床(史明魁等,1994)。从矿化与花岗岩关系来说,锑矿属于远成矿床。然而,湘中地区中生代地温场研究表明(胡雄伟等,1995),锑矿床(点)分布皆为高古地温区。这些高古地温区与区域断裂、岩浆热事件密切相关。

第二章 构造—流体—成矿作用

区域性构造—流体—成矿作用研究只是近年来才引起人们的重视(翟裕生,1996;解习农等,1996;陈衍景,1996)。地壳中8~12km深处大量自由孔隙流体的发现(俄、德等国大陆深钻计划的成果),太平洋、大西洋等多处洋底热水沉积(及矿石堆积)的查明,一些大型油气田深部存在巨大的超高压流体房,以及山脉—盆地转换系统中含金属流体的区域运移(贾跃明,1995)等,这一系列的发现开阔了地质学家的眼界;另一方面,金属矿产勘查工作的区域展开,也需要新的理论来了解区域流体成矿作用以更全面地认识区域成矿规律。众所周知,区域构造(如区域断裂)对于流体(成矿流体)的运移及矿床定位起着重要的控制作用,尤其对于大型、超大型矿床。矿床的分布、定位反映了流体的聚集、就位,而流体的运移、聚集规律又揭示了一定的构造特征。因而,探讨构造、流体、成矿作用的特征及其关系意义重大。

第一节 成矿过程中构造与流体的相互关系

成矿作用是成矿物质由分散到富集并形成矿床的过程,受多种地质因素控制,其中,构造和流体起着重要作用。

在成矿过程中,从构造与流体的相互关系看,构造是控制一定区域内各地质体间耦合关系的主导因素,是驱动流体运移的主要动力。各种构造行迹如断层、裂隙、角砾岩带等为地球内部流体的运移提供通道。构造应力还对岩石的力学、物理性质发生影响,从而影响流体在岩石中的流动状态、速度和水岩作用过程。多种多样的构造扩容空间还是含矿流体大量停集和沉淀出矿床的场所。

从另一方面看,流体作为从矿源地汲取并搬运成矿物质的主要媒介,在促使矿质由分散到浓集、由无序到有序的过程中,起了极为重要的作用。流体由于其所处地质构造环境不同,而有不同的运动方式。地壳浅表层次级低势能的流体,受重力或热能的驱动,在岩石孔隙和裂隙中做缓慢运动。在此过程中,对流经岩石的力学、物理、化学性质有所改变,从而对作用于这些岩石的构造活动发生影响。处在高压或超高压状态的流体房蕴藏有巨大的内能,一旦其所处环境发生变化,如断层的切入,则引发瞬间的突发式运动,大规模的热液就可以快速喷流等形式向低压区涌流。在这个过程中,能强烈地破坏其临近岩石,产生水力断裂、角砾岩等非应力形成的构造型式。这即显示了流体的强大作用及其活动轨迹,也使其所在地段的构造复杂化,叠加、改造甚至破坏了原有的构造行迹。而区域中应力构造与流体成因构造相互重叠的地带,常是矿床形成的有利场所。

可见,在整个成矿作用过程中,构造和流体是相互作用的一对基本控矿因素。构造在总体上或经常状态下对流体的运动起着控制作用;而在特定的空间、时间条件下,流体又表现为十分活跃的地球物质,对构造作用发生物理和化学效应,其强大的能量可突破构造束缚和局限,并产出新的构造形式。构造和流体的相互作用对成矿物质的运移和富集状态起了明显的控制。

对于湘中地区而言,因经受多期构造活动作用,形成了 NE、NNE 向为主的构造格架,这一构造体系与区内矿床的形成和分布关系极为密切。尤其是燕山运动所产生的 NNE 向断裂构造控制着区域内流体的运移和矿床定位。由于流体与构造的相互耦合作用使得中生代成为本区的主要成矿区。

第二节 锑矿床空间分布的分形特征及其意义

勘探的目的主要是查明矿床(点)的地质特征、储量分布特征及构造,并在此基础上决定采矿策略。利用已有资料分析矿床的成因模式,空间分布特征,可以为进一步勘探决策提供重要信息。湘中是我国重要的锑矿床产地之一,近年来,已有许多工作者对该区锑矿床的成因模式及地球化学特征做了极为详细的研究(谌锡霏等,1983;肖启明等,1984;何江等,1995;1996;解庆林等,1996a,1996b),为锑矿床勘探、找矿工作起到了一定的理论指导作用。随着社会经济的发展,人类对资源需求的增长,许多矿产资源储量面临着危机,就连号称“锑都”的湖南锡矿山也不例外。在勘探找矿日益变得困难、费用日趋昂贵的今天,为减少风险性,运用新的理论方法,来定量评价矿产资源已成为找矿工作中一个不可缺少的组成部分。因此,加强矿床空间分布特征的研究具有重要的现实意义。另外,研究湘中锑矿床的空间分布特征可以进一步了解湘中流体的运移、就位规律。

分形、混沌、耗散结构、系统科学、协同学、负熵论、信息论等非线性科学的发展,为地学研究注入了新的活力,使得地学研究由定性走向定量,可以说是地学理论发展过程中的一次革命。20 世纪 80 年代末,分形理论开始引入成矿规律及成矿预测中。Turcotte(1993)对矿石平均品位和矿床累计储量的研究表明,二者之间存在幂函数关系,即分形结构。一些学者已开始利用分形理论研究矿床中某些问题的自相似性以及矿体中金属品位分布的分形结构特征等(秦长兴等,1992;沈步明等,1993;程小久等,1994),并试图解决某些矿床学理论和实际问题。有关矿床的空间分布模型,一些学者提出了泊松分布、负二项式分布及 Neyman-Scott 分布等(Griffiths,1962;Agterberg,1975)。Mandelbrot(1977)首先提出矿床空间分布模型为分形集。近年来研究表明,贵金属矿床空间分布在两个标度范围内具有分形特征(Carlson,1991;Blenkinsop,1994;李长江等,1996;丁式江等,1998)。矿床的分形分布预示成矿热液体系及裂隙系统具有分形特征,因而分维可定量地描述矿床的分布规律。鉴于此,本文首次将分形几何学理论中的计盒维数法应用于湘中锑矿空间分布的研究中,分析该地区锑矿床的分布是否具有自相似结构。

一、矿床分布的分维值计算方法

分形理论是由数学家 Mandelbrot(1977) 创立的。它是以分维数、自相似性、统计自相似性和幂函数为工具,研究不具有特征长度、极不规则和高度分割但有自相似性的复杂现象。锑矿床的地质特征与构造有着密切关系,其空间分布极其复杂(图 2 1),该复杂现象背后隐藏的自相似性本质可以运用分形方法来处理。

计算分维最常用的方法是改变粗视化程度的方法,其公式为:

$$D = - \frac{\lg N(r)}{\lg r} \tag{2 1}$$

式中: D ——分维值;
 r ——可以是与长度、面积、体积等有关的变量;
 $N(r)$ ——是以 r 作为观测的数目。

具体到湘中锑矿床空间分布的分形研究,其分形分析的方法如下:将研究区域用不同的边长离散化为小正方形,设 $N(r)$ 为有矿床进入的盒子数,如果锑矿床分布具有分形自相似性结构,则根据式(2 1)可得如下关系:

$$N(r) = Cr^{-D} \tag{2 2}$$

式中: C ——常数。

实际分析中,可在双对数坐标中作出 $N(r) - r$ 图解,并用最小二乘法拟合出一条直线,其斜率即为分维 D 值,利用上述方法求得的分维也称为熵维、度量维、对数密度等(张济忠, 1995)。该方法称为计盒维数法(Mandelbrot, 1982; Falconer, 1990)。

二、湘中锑矿床空间分布的分形分析

湘中锑矿床分布特征如 2 1 图所示,选取的初始网格以尽量少且覆盖所有矿床为原则。实际研究选取的初始正方形网格的边长为 4cm(约为 80km)。如图 2 1 对初始盒子进行编号,为 1~10。在此初始网格基础上,再分别划分为不同的小正方形进行盒子计数,应用上述方法求取分维。

对于图 2 1,用 0.1~4cm 的网格覆盖,统计全区各个尺度 r 下包含矿床的盒子数 $N(r)$ (表 2 1),在双对数坐标中投影点 $(N(r), r)$,用最小二乘法拟合求得分维值 $D = 1.142$,相关系数为 0.9991,剩余标准差和残差平方和分别为 0.126 和 0.067。说明湘中地区锑矿床(点)分布很好地遵从幂律关系式(2 2),回归曲线如图 2 2。

表 2 1 湘中地区的统计尺度及包含锑矿床的盒子数

尺度 r / cm	4	2	1	0.5	0.25	0.1
包含矿床的盒子数 $N(r)$ 个	10	28	51	95	233	692