

安徽月山矿田 成岩成矿作用

ANHUI YUESHAN KUANGTIAN CHENGYAN
CHENGKUANG ZUOYONG 周涛发 岳书仓 袁 峰 著

地质出版社

国家自然科学基金项目（批准号：49802007，40272048）

安徽省自然科学基金项目（批准号：01045202）

联合资助

安徽省优秀青年科技基金项目（批准号：04045063）

安徽月山矿田成岩 成矿作用

周涛发 岳书仓 袁 峰 著

p618.201
zh2-1

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书重点研究和论述了长江中下游成矿带矿田尺度上的矽卡岩-热液型铜、金矿田的成矿流体系统,运用多学科理论和方法,把成矿流体放在各种地质作用背景及构造环境中,对月山矿田成矿流体的来源、成矿流体将金属自多源区搬运到不同类型矿床最终定位的路径,以及在此过程中所发生的物理的、化学的和动力学的各种变化及其所显示出的特殊性质等成矿流体系统的形成和演化的过程和机制进行了系统深入的研究,并提出了矿床的找寻与评价的重要信息和标志。

本书内容丰富、资料翔实、论证严密、条理清晰,可供矿床学、地球化学等地球科学领域和相关学科的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

安徽月山矿田成岩成矿作用/周涛发,岳书仓,袁峰
著. —北京:地质出版社, 2005. 3
ISBN 7-116-04389-6

I. 安... II. ①周... ②岳... ③袁... III. 金属矿
床-成矿作用-研究-安徽省 IV. P618.201

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 021610 号

ANHUI YUESHAN KUANGTIAN CHENGYAN CHENGKUANG ZUOYONG

责任编辑:蔡卫东

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) 82324508 (邮购部); (010) 82324571 (编辑部)

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: 787mm × 1092mm^{1/16}

印 张: 9.875

字 数: 250 千字

印 数: 1—500 册

版 次: 2005 年 3 月北京第一版·第一次印刷

定 价: 30.00 元

ISBN 7-116-04389-6/P·2559

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社出版处负责调换)

序

成矿流体系统研究是当前矿床学研究的重要内容和前沿领域。本书作者在国家自然科学基金等项目的资助下，以长江中下游成矿带中较典型的月山矿田为研究对象，系统深入地研究了矿田尺度上的矽卡岩-热液型铜、铁、金矿田的成矿流体系统，取得了一系列具有创新意义的认识：①首次系统研究了矿田不同类型矿床演化过程中热液体系的氢氧同位素和硫同位素演化模型，很好地解决了一些长期争论的科学问题，如矿床中硫的来源问题等；②在成矿作用动力学方面进行了大量深入的研究，定量分析了成矿的热力学和动力学过程，揭示了相关成矿作用的本质；③从化学地球动力学角度，进一步论证了月山矿田燕山期成岩成矿作用发生于张性或向张性过渡的地球动力学背景的认识；④深入研究了月山矿田闪长岩类的岩石成因和成岩机制，论证了岩浆作用是在开放的岩浆系统中进行的，AFC过程是本区闪长岩类的主要成岩机制，并首次探讨了岩浆的物理性质、动力学行为以及岩浆的熔-离过程等及其与成矿作用的联系，系统分析了成矿流体系统的时空演化轨迹。此外，关于月山矿田成岩-成矿作用过程中的物质转换、岩浆-构造-流体-成矿系统以及构筑的矿田成矿流体系统的演化和成矿作用模式均具有先进性。

该项成果深化了长江中下游成矿带大型铜、铁、金矿田的成矿作用和成矿规律研究水平，对于发展和丰富流体成矿理论具有重要的科学意义，特别是在当前矿床学领域中区域成矿分析占“上风”，而“纯”矿床学研究相对沉寂的情况下，本书的出版无疑弥足珍贵，是在这一领域的一份力作。书中关于成矿潜力的计算与评价，对于区域成矿预测、勘查和评价有重要的参考价值 and 实际指导意义。

常印佛

2004年10月

前 言

自《地壳中的流体》(Fyfe et al., 1978) 著作出版以来, 地质流体的研究已成为地球科学的重要跨学科前沿领域 (Ernst, 1990; Etheridge et al., 1986; Mountain et al., 1996; Navon et al., 1988; Shmulovich, 1995; 王先彬等, 1996; 杜乐天, 1996; 郑永飞等, 1999)。成矿流体是地质流体的重要表现形式之一, 是贯穿于整个矿床形成过程的主要控制因素 (Garven, 1985; 翟裕生, 1999), 成矿流体系统研究已成为矿床学研究的主要内容和前沿课题 (Hedenquist et al., 1994; Parnell, 1993; 翟裕生, 1999; 贾跃明, 1995, 周涛发, 1999)。20 世纪 70 年代以来, 运用地球化学理论和方法如流体包裹体 (Roedder, 1979; Navon et al., 1988)、微量元素和稀土元素 (Bau, 1991; Taylor, 1982; Graff, 1977; 岳书仓等, 2000)、同位素 (Taylor, 1974; Rye, 1974; Banner et al., 1989; Barnicoat, 1995; 张理刚, 1989) 等示踪成矿流体的来源取得了很大进展。热液成矿作用的热力学 (Helgeson, 1979; 张哲儒, 1996; Leivin, 1992; 张德会, 1997)、动力学 (Oliver, 1996; 於崇文等, 1993, 1998; 邓军等, 1998) 和化学动力学 (Argue et al., 1999; Berman, 1988; 张荣华等, 1998; 张生, 1999) 研究也已取得很多成果; 不同构造体制下成矿带和典型矿床的成矿流体系统及成矿作用的研究已引起重视, 研究了拉张构造体制下洋壳热水沉积形成的多金属成矿系统 (Hutchinson, 1980; Meshri et al., 1994; White, 1981)、挤压构造体制下的岩浆热液成矿系统 (Nesbitt, 1988; Sillitoe, 1993, 1997) 和剪切-走滑构造体制下的热液成矿系统 (O'Hara, 1994; Brown et al., 1995; Huanzhang Lu, 1996); 深部流体 (包括地幔流体) (Navon et al., 1988; Anderson, 1989) 和盆地热流体 (Meshri et al., 1994) 等的成矿作用研究取得了重要进展; 国内外对分布广泛且经济价值巨大的斑岩型铜矿床 (Sillitoe, 1993, 1997; Hedenquist et al., 1994; Gustafson et al., 1995; 芮宗瑶等, 1999)、块状硫化物型矿床 (Soloman, 1976; Urabe et al., 1990; 顾连兴, 1999; 侯增谦等, 1996; 邬介人, 1994)、绿岩型金矿床 (Robert et al., 1991; Kerrich, 1989; Kerrich et al., 2000) 等典型矿床的成矿流体来源、类型、组成、性状及在一定环境中的活动机制有了较完整的认识; 热液流体成矿过程中的水(流)-岩作用研究进展突出 (Grant, 1986; Taylor, 1986; Criss et al., 1986, 2000; Nabelek, 1987; Ferry et al., 1992; Lasaga, 1993; Argue, 1999; 张荣华等, 1998; 王玉荣等, 1990); 矽卡岩型矿床的成矿作用也得到了大量研究 (Layne et al., 1991; Einaudi, 1982; 常印佛等, 1991; 翟裕生, 1992; 周涛发等, 1996, 2000; 唐永成等, 1998); 流体在大型、超大型矿床成矿中的作用已开始引起重视 (Sangster, 1994; Laznicka, 1989; Kirkham, 1994; Kerrich et al., 2000; 陈毓川等, 1995; 毛景文等, 2000; 涂光炽, 1998; 翟裕生等, 1997; 裴荣富, 1997)。地球动力学、大陆动力学、构造作用、岩浆活动等与流体成矿作用的耦合研究 (Fyfe, 1997; Oliver, 1990; Katia et al., 2000; 邓晋福, 1999; 华仁民等, 1999; 陈衍景等, 1999; 张文淮等, 1996; 马东升, 1998; Banner et

al., 1989) 已逐渐引入矿床学的研究。矿床成矿流体研究在取得上述进展的同时, 揭示了更多有待研究的领域和问题, 如不同构造背景和地质环境中, 不同层次和尺度的成矿流体系统研究亟待加强, 矿田及区域成矿流体系统研究已提到日程, 对我国具显著成矿特色的典型矽卡岩-热液型矿田和成矿带成矿流体系统的发生、发展与演化过程研究不够, 且定性研究较多、定量研究较少。

扬子地台北缘下扬子台坳是我国重要的铜(铁)、金(多金属)成矿带, 矿床研究程度高(常印佛等, 1991; 翟裕生等, 1992; 唐永成等, 1998), 该矿带中分布有多个具典型特色的矽卡岩-热液型铜、金矿田, 如湖北大冶、安徽铜陵、月山等矿田, 因此, 在该区开展矿田尺度上的成矿流体研究具有重要科学意义和实践价值, 且切实可行。

位于长江中下游成矿带中部的安徽月山矿田, 位于安徽省南部安庆市附近的月山镇至罗家岭一带, 为我国长江中下游铜(铁)、金(多金属)成矿带的重要组成部分, 现已发现、查明的铜、铁矿床 10 余处及众多矿点和矿化点, 提交铜金属储量 50 多万吨, 铁矿石储量 3000 多万吨。涉及该区的地质研究工作开始较早, 1919~1926 年, 章鸿钊、刘季辰、王竹泉、李捷等人在区内进行过一般的地质勘探工作; 日本侵华期间, 日寇华中矿业公司在该区(铜牛井)进行过掠夺性开采; 1945 年喻德渊也对该区进行过基础地质研究。但对月山地区全面的地质矿产调查和地质研究始于新中国成立以后, 几十年来, 原华东地质局、南京地质矿产研究所、地质部物探局及安徽省地矿局 326 队、物探大队、安徽省地质科学研究所、中国地质大学和合肥工业大学等生产、科研、教学部门曾先后对内区的岩浆岩、地层、构造与成矿的关系进行了大量的研究工作, 并在岩浆岩研究方面, 结合具体情况提出了许多行之有效的岩浆岩找矿标志。近年来, 常印佛、翟裕生、李文达、殷鸿福、周云生、徐克勤、顾连兴、陈江峰、董树文、赵斌等国内许多著名的地质学家, 也曾先后在区内进行过考察和研究工作。本书第一作者自 1992 年 4 月始, 在岳书仓教授的指导下, 结合国家“八五”“攀登计划”项目及原国家教委高等学校博士点学科点科研基金项目, 对区内月山、总铺、五横等闪长岩体及岩体含矿性进行了研究。在前人及过去研究基础上, 本书作者在国家自然科学基金委员会的支持下, 以安徽月山矿田为研究对象, 进行了国家自然科学基金项目“安徽月山矽卡岩-热液型铜、金矿田的成矿流体系统(批准号: 49802007)”研究, 该项目历时 3 年, 重点研究矿田尺度上的矽卡岩-热液型铜、金矿田的成矿流体系统, 旨在运用多学科理论和方法, 把成矿流体放在各种地质作用背景及构造环境中, 围绕成矿流体的来源、成矿流体将金属自多源区搬运到不同类型矿床最终定位的路径, 以及在此过程中所发生的物理的、化学的和动力学的各种变化及其所显示出的特殊性质等成矿流体系统的形成和演化机制进行系统深入的研究, 取得了一些研究成果。研究结果对进一步阐明金属矿床成矿作用本质、拓展和丰富流体成矿作用理论具有重要意义, 同时深化了长江中下游成矿带大型铜、金矿田的成矿作用和成矿规律研究, 为在该区开展隐伏矿床、深部矿床和潜在超大型矿床的勘查、找寻与评价提供重要信息和标志。本项目由周涛发主持, 岳书仓和周涛发参加了项目全过程研究, 袁峰、杜建国、刘晓东、赵勇等参加了部分研究工作。本书主要为上述自然科学基金项目研究成果的总结, 并同时得到了国家自然科学基金项目(批准号: 49802007, 40272048)、安徽省自然科学基金项目(批准号: 01045202)和安徽省优秀青年科技基金项目(批准号: 04045063)的联合资助。本书由周涛发、岳书仓、袁峰撰写。

本次研究工作的主要内容如下：

1) 根据区域地质地球化学和地球物理研究成果，研究了区域基底分区和地壳演化特征，分析了包括月山矿田在内的长江中下游成矿带区域成岩成矿的地球动力学背景和条件，阐明了壳幔作用、区域构造应力场转换及其与成岩成矿作用之间的关系，提出了燕山期成岩成矿作用发生于张性或向张性过渡的地球动力学背景的新认识。

2) 着重研究了月山矿田内月山、总铺、五横 3 个主要闪长质岩体的岩石学、地质地球化学特征、区域成岩规律，结合深入的定量计算和模拟，系统研究了矿田闪长岩类的岩石成因和成岩机制，论证了深源碱性玄武质岩浆的结晶分异和同化混染联合作用过程（AFC 过程）的存在，岩浆作用是在开放的岩浆系统中进行的，AFC 过程是本区闪长岩类的主要成岩机制。

3) 基于火成岩石学、流体动力学、流变学、传热学和热力学等的研究，计算和分析了月山矿田闪长质岩浆的分凝、上升、对流、定位和结晶等成岩过程的条件、速度与机理，建立了区域岩浆岩的 $t-f_{O_2}$ 计，首次探讨了岩浆的物理学性质和动力学行为如熔体的含水量、水的运动特征、岩浆上升速度和对流状态，以及岩浆的熔-离过程等与成矿作用的联系。

4) 依据矿床地质特征、稀土元素、微量元素和同位素地球化学体系特点，深入讨论了月山矿田中矽卡岩型矿床和热液脉型矿床成矿物质和成矿流体的来源、构造-岩浆-成矿流体的演化、矿田成矿流体的迁移通道、运移速度、规模，确定了流体系统运移和循环的速度与机理。特别是首次系统研究了矿田不同类型矿床演化过程中热液体系的氢氧同位素和硫同位素演化模型，为阐明成矿流体和成矿物质的来源与演化提供了有说服力的定量分析依据，解决了一些长期争论的科学问题。

5) 基于矿床地质和地球化学热力学理论，计算和讨论了矿田铜、金矿床成矿流体中成矿物质的迁移形式和沉淀的物理化学条件，同时，计算和讨论了成矿流体系统演化的物理场和化学场特点。

6) 分析、计算和讨论了水-岩作用过程中的质量-体积变化、水-岩作用的动力学过程及水岩比值，定量阐明了成矿作用的动力学过程。认为矿化、蚀变及相关岩石的分带是矿物和元素组合时空分离的结果，是流体的渗滤速度、流体相内的均相反应速率、水-岩间多相反应速率、溶解-沉淀波波速等因素综合效应的反映。

7) 在成矿流体系统物质源、热源确定的基础上，进行了成矿年代学测定，分析研究了成矿流体系统的时空演化轨迹；综合成矿作用热力学、动力学和地质地球化学研究，研究了成矿流体系统进入矿床定位场所发生卸载的可能机制。

8) 阐明了月山矿田成岩-成矿作用过程中的物质转换及岩浆-构造-流体-成矿的内在联系和特点，构筑了月山矿田成矿流体系统的演化和成矿作用模式。

本书研究取得以下主要进展和新认识：

1) 包括月山矿田在内的长江中下游铜、金成矿带的形成与区域壳-幔结构的特征、演化及壳-幔作用动力学过程密切相关。中生代地幔隆起并与构造作用耦合，诱发大规模岩浆侵入、火山作用及金属成矿作用。古、中元古代基底的分区性及构造-岩浆作用过程中壳-幔作用程度的差异是造成区域成矿带内矿化多样性的重要原因之一。

2) 包括月山地区在内的整个长江中下游成矿带的基底既具有南北分带，又具有明显

的东、西分区特点，基底主要是古、中元古代变质岩系，局部可能有太古宙变质岩系，构成“双层结构”和部分地区的“多层结构”，显示了区域地壳于古元古代或太古宙已初步形成，中元古代地壳继续增生，而新元古代地幔分异新地壳的比例较小。

3) 铜、金矿床形成于燕山期由古特提斯构造应力场控制向由濒太平洋构造应力场控制转变期，受两种动力学体制及与之相关联的深部作用过程的复合控制，成岩成矿构造环境属于碰撞造山作用的挤压-伸展转变期。

4) 月山矿田的燕山期岩浆岩的源区经历了地幔隆起和较强的地幔交代作用，蚀变了的地幔源区或下地壳不同部分的部分熔融作用形成了原始碱性橄榄玄武质岩浆，且具有较高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值（ $\approx 6.8\text{‰}$ ）。源于陆下岩石圈的碱性橄榄玄武质岩浆在上升过程中与10%~40%的地壳发生同化混染和结晶分异联合作用（AFC）形成中酸性侵入岩。岩浆作用是在开放的岩浆系统中进行的。AFC过程是本区闪长岩类的主要成岩机制。

5) 运用PER方法论证了对安徽月山矿田闪长岩类的岩浆演化的AFC过程，阐明了月山矿田不同闪长质岩体在物质来源上的内在联系。认为月山岩体主要由同源岩石组成，总铺岩体为单一岩体，五横岩体是由不同源的南北两部分组成的，五横岩体南部与月山岩体的物质来源具相似性。

6) 月山矿田侵入岩浆结晶的水逸度、水压较低，岩浆定位压力在 $6.5 \times 10^7 \sim 1.15 \times 10^8 \text{ Pa}$ 之间，对应的深度为浅成相；常规的地质温度计不能用来精确确定包括月山矿田在内的长江中下游地区中酸性侵入岩岩浆结晶的温度和 f_{O_2} 。通过对包括黑云母在内的中酸性侵入岩的典型矿物组合及其成分与结晶物理化学条件之间关系的研究构筑的 $t-f_{\text{O}_2}$ 图解研究表明，月山矿田侵入岩浆的结晶温度和氧逸度普遍偏高，其形成的物理化学条件有利于铜的成矿作用。

7) 从闪长质岩浆的含水量与成矿的关系上看，成矿的月山岩体的熔体含水量较高，岩浆侵位结晶时，岩浆中的水是过饱和的，满足岩浆发生熔-流分离作用的先决条件。水的运动特征与成矿有一定关系，当浅部岩株（浆）和深部岩浆房联合作用时，更有利于岩浆热液的活动与矿化，具“三层结构”岩浆系统特征的月山岩体的成矿作用优于总铺岩体和五横岩体。

8) 岩浆的上升速度和对流状况与成矿的关系明显，岩浆的上升速度不但与侵位机制有关，而且还主要受岩浆自身性质、岩浆的导岩构造和围岩的物理性质、区域构造应力场等因素制约。岩浆上升速度在一定程度上影响熔-流分离作用程度，因而与成矿具直接成因联系。高温时（ $\geq 1000^\circ\text{C}$ ），岩浆对流速度慢对成矿有利，接近固-液相温度（ 800°C ）时，对流速度相对较快对成矿有利，反之则不利于成矿。

9) 闪长质岩浆具宾汉体特性，早晶出的矿物晶体不会下沉；岩体的岩相学特点是上侵岩浆时的速度分布及冷却速度特点造成的。岩浆的物理性质直接影响岩浆上升和定位的动力学行为，与成矿亦具间接联系。岩浆冷却速度慢，冷却时间长，熔-流分离较彻底，有利于成矿；反之则不利于成矿。在一系列岩浆物理性质及动力学行为方面，月山岩体比总铺岩体和五横岩体对成矿更有利。

10) 月山矿田金属矿床总体上分为矽卡岩型矿床和热液脉型矿床两大端元类型，成矿热液离子组合类型主要为 $\text{Cl}^- - (\text{SO}_4^{2-}) - \text{Na}^+ - \text{K}^+ - \text{Ca}^{2+}$ 型。与月山岩体有关的两类矿床的主要矿化阶段热液活动强烈，热液流体含盐度高，热液演化过程中发生了流体相的沸

腾作用及大气降水的混合作用。与总铺岩体和五横岩体有关的成矿热液系统不发育,成矿溶液盐度低。矽卡岩型矿床和热液脉型矿床对应成矿阶段的 t 、 p 、 f_{O_2} 、 f_{S_2} 、 f_{CO_2} 、 $m_{\Sigma S}$ 等物理化学条件相似。成矿溶液中 $H_2S(aq)$ 的浓度占水溶硫化物种的98%以上,Cl是成矿溶液中主要的金属络合剂,硫的水溶物种在矿质的迁移与搬运过程中亦起到重要作用。

11) 月山矿田金属矿床成矿流体为具复杂演化历史的岩浆水或多成因水的混合。参与成矿作用的水的类型有:岩浆水、与沉积地层发生过氧同位素交换的岩浆水(漂移岩浆水)、与闪长质岩体发生过氢、氧同位素交换的岩浆水(演化岩浆水)和与沉积地层发生过氧同位素交换的大气降水(漂移大气降水)。一般说来,成矿早期阶段及主要成矿阶段成矿热液以岩浆水占主导,随成矿作用的不断进行,大气降水比例逐渐增加。

12) 闪长质岩浆熔-流分离作用形成的岩浆水本身所携带的成矿物质是矽卡岩型矿床成矿物质获取的主导机制,月山矿田闪长质岩石为硅饱和至弱过饱和,弱碱性,月山岩体熔体水含量较高,富氯,岩浆性质十分有利于Cu、Au和亲铁元素在熔-流分配过程中向流体相中大量分配而不利于Pb、Zn的分配。岩浆水与流经岩石(闪长岩或地层)的水-岩作用对成矿流体中矿质进一步富集具有一定意义。

13) 与月山岩体有关的岩浆热液体系发育,矿化作用强,成矿规模大,这是月山岩体在成矿作用方面有别于总铺岩体和五横岩体的最根本原因之一。在包括月山矿田在内的长江中下游地区,大型铜矿床的成矿热液绝大部分为广义岩浆水,小型矿床的成矿热液为混合热液。当热液中大气降水比例达30%以上时,不形成具工业意义的矿化。因此,岩浆热液体系的发育情况是本区及区域侵入岩成矿潜力的重要判别标志之一。与月山岩体有关的矽卡岩型矿床和热液脉型矿床为同源岩浆热液系统在不同的地质、地球化学环境下的演化产物。岩浆热液与流经岩石(闪长岩或地层)的水-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。

14) 月山矿田金属矿床硫的来源复杂,岩浆硫+碎屑地层硫+含膏盐地层硫是矽卡岩型矿床的硫源,矿床硫中岩浆硫约占78%(平均值),地层硫约占22%。热液脉型铜牛井矿床主要为岩浆硫+含膏盐地层硫,岩浆硫占79%~97.7%,地层硫占2.3%~21%。含矿岩浆热液与闪长岩及地层在特定构造条件下的有机结合,对矿液演化和矿质沉淀具有重要意义。地层为这类矿床提供了相当一部分硫源、少部分矿质及矿质沉淀场所。除三叠纪含膏盐地层外,某些前三叠纪碎屑地层亦积极参与了岩浆热液成矿系统的演化,并提供了部分硫源和少量成矿物质。

15) 月山矿田成矿流体在断裂中运移的速率主要受构造应力差控制,速率为 1.4 m/s ,在裂隙中的运移的速率主要受裂隙宽度限制,其速率为 $9.8 \times 10^{-1} \sim 9.8 \times 10^{-7}\text{ m/s}$,在多孔介质或微裂隙中的渗透速率主要受孔隙(微裂隙)密度值控制,其速率为 $3.6 \times 10^{-7} \sim 4.6 \times 10^{-7}\text{ m/s}$ 。成矿流体在深部主要沿着断裂或较大的裂隙运移,在浅部或接触带附近以渗透为主运移。高温时,流体通量为 $n \times 10^4 \sim n \times 10^5\text{ mol/cm}^2$,中低温时,流体通量为 $n \times 10^5 \sim n \times 10^6\text{ mol/cm}^2$,换算成体积流量为 $10^5 \sim 10^7\text{ cm}^3/\text{cm}^2$,流体中所携带的成矿元素Cu、Au分别为 $7 \times 10^4 \sim 7 \times 10^6\text{ t}$ 和 $0.28 \times (10^3 \sim 10^5)\text{ kg}$,基本具备形成一个大型铜矿床和小型金矿床的成矿潜力。

16) 月山矿田两类铜、金矿床成矿流体中铜主要以氯络合物 CuCl 、 CuCl_2^- 、 CuCl_3^{2-} 、 CuClOH ,金主要以硫络合物 $\text{Au}_2(\text{HS})_2\text{S}^{2-}$ 、 $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ 、 AuHS 、 AuH_3SiO_4 等形式进行迁

移。成矿流体中铜沉淀的主要物化条件是降温及氯离子浓度 m_{Cl^-} 下降, 引起的主要地质作用有冷却作用、流体沸腾作用及流体的混合作用; 流体中金沉淀的主要物理化学条件是 pH 值的降低 ($t < 300^{\circ}\text{C}$)、 $m_{\text{Zn}^{2+}}$ 的减少和 f_{O_2} 的降低, 引起的主要地质作用为流体沸腾作用及流体的混合作用。

17) 铜、金矿床是岩浆热液为主体的成矿流体的流动和化学反应的综合结果, 即输运和化学反应耦合动力学过程的产物。成矿流体汇集在岩体与围岩的接触界面处或聚集在岩体中心, 产生强烈的水-岩作用形成矿床。

18) 水-岩作用对成矿流体系统中矿化蚀变作用的发生、发展、成矿流体的形成、成矿物质的富集和矿床定位等具有重要意义。矽卡岩型矿床的矽卡岩和相关蚀变岩石和矿石主要是以渗滤交代作用为主形成的, 热液脉型矿床主要为动力学扩散作用形成的。矿化蚀变作用及分带是开放体系中一系列溶解-沉淀反应前锋发生水岩反应后矿物和元素组合的时空分离的结果, 经历了流体混合输运反应、等温输运反应、梯度输运反应, 是输运-反应耦合过程动力学的产物。

19) 月山矿田岩体的成岩年龄接近 136 Ma 或略大。月山矿田的主要成矿期与成岩时代大致相同, 矿化年龄在 130 Ma 以上。岩浆冷却和主要成矿作用的发生大致持续了 3~6 Ma。岩浆作用和成矿作用皆发生于燕山期, 二者是连续的过程。包括月山矿田在内的长江中下游成矿带铜、金矿床的成矿流体系统形成于燕山期, 是燕山期岩浆活动的产物。

但是, 由于时间及测试、实验条件的限制, 一些深层次问题尚待进一步研究, 本书对一些问题的认识和讨论必然存在许多缺点和不足, 敬请同行专家学者批评指正。

研究过程中, 曾先后得到李文达研究员、常印佛院士、翟裕生院士、王文斌研究员、兰天佑副教授、陈江峰教授、叶大年院士、陈毓川院士、刘宝珺院士、胡受奚教授、顾连兴教授、周云生研究员、陈衍景博士、倪培博士、郭吉保研究员、李钢教授、毛景文研究员、侯增谦研究员、K Zaw 博士和 G Voicu 博士等的指导和帮助; 野外工作期间, 安徽省地矿局 326 地质队、铜陵有色金属公司安庆铜矿、安庆市月山铜矿等单位以及陈夕坤高工、班宜忠高工、疏志明高工、郑甘林高工、江家义高工、王文章工程师等的多方面支持; 测试和实验工作得到了中国地质科学院矿产资源研究所、国家地质实验测试中心、中国科学院地质与地球物理研究所、南京大学成矿作用国家重点实验室、合肥工业大学资源与环境科学系实验中心、安徽省地矿局测试中心等单位和张荣华教授、胡书敏研究员、万德芳研究员、桑海清研究员、杜安道研究员以及实验中心熊传兰、陈彤和张洪春等同志的支持和帮助。作者在此对上述单位和个人一并表示深深的谢意!

衷心感谢常印佛院士在百忙之中为本书作序!

衷心感谢国家自然科学基金委员会和安徽省自然科学基金委员会的项目资助!

目 录

1 区域地质背景	(1)
1.1 壳-幔结构及地球动力学	(1)
1.2 基底特征与地壳演化	(3)
1.3 地层系统	(5)
1.4 构造动力学及构造格局	(8)
1.5 岩浆岩特征及岩浆活动时代	(10)
1.6 地球物理场与地球化学场	(12)
2 闪长岩类岩石学、岩石化学与地球化学	(13)
2.1 岩体地质与岩石学特征	(13)
2.2 岩石化学	(19)
2.3 稀土元素	(23)
2.4 微量元素和挥发组分	(26)
2.5 稳定同位素	(29)
3 侵入岩浆作用的热力学与动力学	(34)
3.1 岩浆结晶的物理化学条件	(34)
3.2 闪长质岩浆的熔体结构	(38)
3.3 岩浆熔体中水的含量和水的热力学性质	(39)
3.4 闪长质岩浆的黏度与密度	(41)
3.5 岩浆上升通道及岩浆上升速度	(42)
3.6 岩浆侵位机制、定位深度及侵位时的温度	(44)
3.7 闪长质岩浆对流分析	(44)
3.8 闪长质岩浆冷却速度	(46)
3.9 晶体的沉浮行为及分布机理	(46)
4 月山矿田侵入岩浆作用和岩石成因	(48)
4.1 常量元素对成岩机制的反演-PER 分析	(48)
4.2 微量元素对成岩机制的反演	(50)
4.3 Sr、O 同位素对成岩机制的反演	(51)
4.4 闪长岩类原始岩浆的性质与形成机制	(54)
4.5 成岩构造环境	(56)
5 铜、金矿床地质	(58)
5.1 矽卡岩型矿床	(58)
5.2 热液脉型矿床	(62)
5.3 矿床中金的赋存特征	(63)
6 成矿流体成分及物理化学条件	(65)

6.1	流体包裹体特征及成因意义	(65)
6.2	成矿流体成分	(66)
6.3	成矿物理化学条件	(68)
7	成矿作用的地球化学	(74)
7.1	矿床的稀土元素和微量元素	(74)
7.2	矿床的氢、氧、碳同位素体系	(77)
7.3	矿床的硫同位素体系	(83)
7.4	矿床的铅同位素体系	(91)
7.5	矿床的硅同位素	(92)
7.6	矿床的氮、氦同位素	(93)
8	成矿作用动力学过程	(96)
8.1	成矿流体的动力学参数	(96)
8.2	成矿流体的迁移速率和迁移通道	(96)
8.3	流体和成矿物质的迁移规模	(100)
8.4	成矿流体中成矿物质的迁移形式	(103)
8.5	水-岩作用	(106)
8.6	成矿流体输运-化学反应成矿动力学	(113)
8.7	成矿物质的沉淀条件与矿床定位机理	(115)
9	成矿流体系统演化模式	(122)
9.1	成矿物质来源	(122)
9.2	成矿作用	(123)
9.3	成矿时代	(126)
9.4	成矿流体演化模式	(128)
	主要参考文献	(134)
	英文摘要	(140)

1 区域地质背景

1.1 壳-幔结构及地球动力学

月山矿田位于扬子地块北缘下扬子台坳沿江断褶带中段（图 1.1），是我国重要金属成矿带——长江中下游铜（铁）、金成矿带中的典型矿田之一。长江中下游成矿带地质历史演化经历了前震旦纪基底发育阶段、震旦纪—早三叠世盖层沉积阶段和中三叠世—新生代板内变形阶段（常印佛等，1991）。过去对成矿带基底的认识常根据邻区（大别—张八岭和皖南—赣北）的变质岩系和地球物理资料推断，后来区内发现数处出露的基底变质岩系，使得对该成矿带基底的认识得以不断深化。

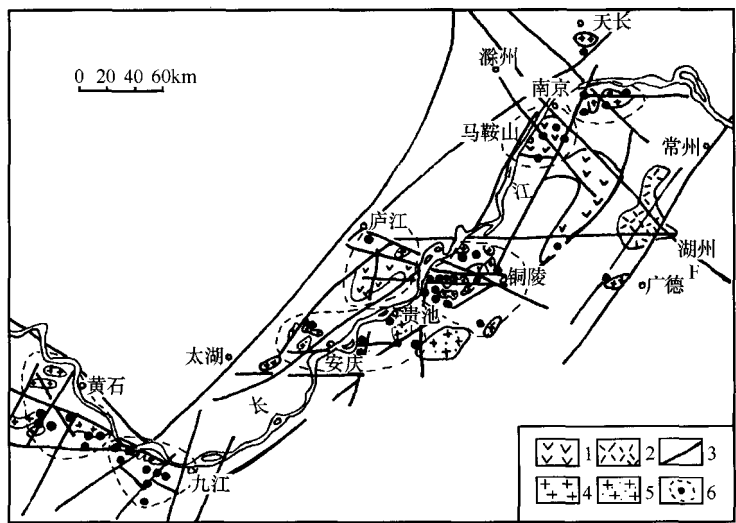


图 1.1 长江中下游成矿带构造、岩浆岩及矿床分布图

（底图据翟裕生等，1992 修改）

1—燕山期中性、中酸性火山岩及次火山岩；2—燕山期中酸性、酸性火山岩；3—断层；4—燕山期中酸性侵入岩；5—花岗岩；6—铜（铁）、金矿床和矿床密集区；F—滁州—湖州深断裂

出露在月山矿田东南侧的董岭群是下扬子台坳北部为数不多的可以直接观察到的基底变质岩系，其上与寒武系黄家榜群不整合接触，岩性可分为下部片麻岩段和上部片岩段，顶部有少量板岩和千枚岩，其时代属古元古代（邢凤鸣等，1993），它的原岩为一套中酸性火山岩、拉斑玄武岩及砂泥质沉积岩。因此，本区在前震旦纪主要为地槽发育阶段；古生代—三叠纪本区为地台型稳定沉积阶段，这一时期的地壳相对稳定；进入中生代以后，本区处于地台活化阶段，即板内变形阶段，伴随着燕山期强烈的断块运动，发生广泛的岩浆侵入和火山活动，形成了矽卡岩型 Cu（Fe）、Au 矿床及热液脉型 Cu、Mo、（Pb、Zn）、

Au 矿床 (点)。

本区地质历史演化所经历的 3 个不同阶段, 记录了硅铝质地壳的形成和发展所处的大地构造环境由活动到相对稳定, 再转向剧烈活动的历程。分别形成于这 3 个阶段的褶皱变质基底岩系 (I 层)、以海相沉积为主的盖层岩系 (II 层)、陆相红色碎屑岩和火山-侵入岩系 (III 层) 等, 构成了本区地壳表层的 3 层结构。地质地球物理及大地测量资料解译 (常印佛等, 1991; 陈沪生, 1988) 和分析结果还显示, 包括月山地区在内的长江中下游区域壳幔具明显的层状结构, 可分为 5 大层, 除上述地壳表层的 3 层结构外, 还有下地壳 (IV 层) 和上地幔岩石圈部分 (V 层)。其中壳-幔之间的莫霍面和岩石圈底部界面控制着巨大层圈的滑移 (拆离) 运动和区域升降运动。地壳深部结构在纵向上和横向上都存在不均一性。根据 HQ-13 线地球物理资料解译结果 (陈沪生, 1988), 区域下地壳 (硅镁层) 具波状流纹结构和柔性变形特征, 表明其曾经受到较强的水平挤压作用, 温度较高, 可塑性较强。第 V 层为上地幔岩石圈。徐师文等 (1988) 的大地测深资料表明, 长江中下游地区的地幔岩石圈厚度变化大, 且内部呈冷热不均的团块结构。团块结构是刚性层体被挤压破碎、软流圈物质沿破裂处上升且产生熔融而形成。如在郟庐断裂系、长江断裂带附近, 电阻率很低, 为几十至几百欧姆, 它与这些部位软流圈物质上涌, 温度升高有关。团块结构亦与地壳浅部的 Fe、Cu (Mo)、Au 等金属矿化关系密切, 月山地区正位于长江断裂带上和郟庐断裂系附近 (图 1.1)。

重磁资料表明, 长江中下游地区莫霍面轮廓形态特殊 (图 1.2), 即由数个莫霍面下沉区 (幔坳) 和上隆区 (幔隆) 组成, 大别、皖南、幕阜等区都对应于莫霍面下坳区, 而长江中下游成矿带对应于一个平面投影呈喇叭形的地幔上隆带 (吴言昌等, 1998; 唐永成等, 1998), 主要矿床几乎都集中分布于幔隆带最高的 “中轴” 附近。月山矿田所在的安庆地区位于长江中下游地区的沿江莫霍面的隆起带上 (图 1.3, 陈沪生等, 1999)。这种地幔隆起形成的莫霍面的轮廓可能最早发生于海西期, 在中生带早期已基本形成, 它是区域性壳幔演化和均衡补偿作用的结果。分析表明, 长江中下游地区的主要矿床及与之

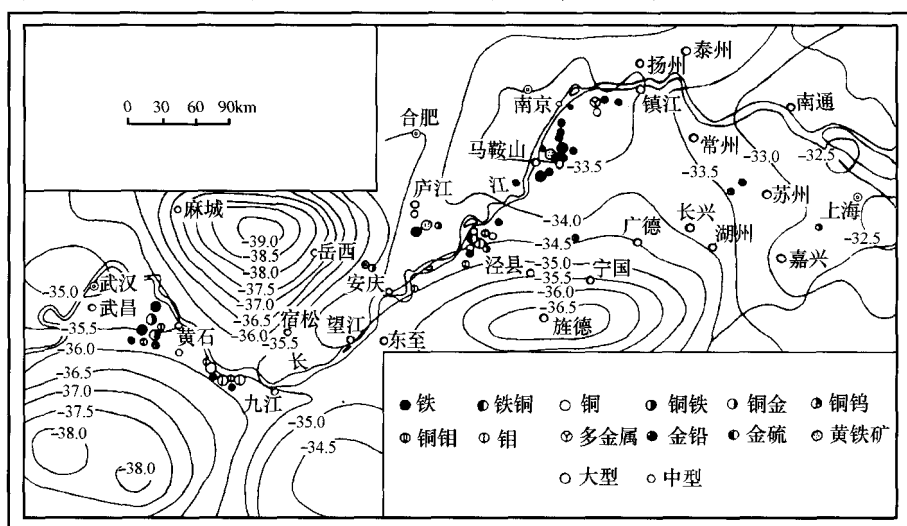


图 1.2 区域莫霍面深度及矿床分布图

(引自翟裕生等, 1992)

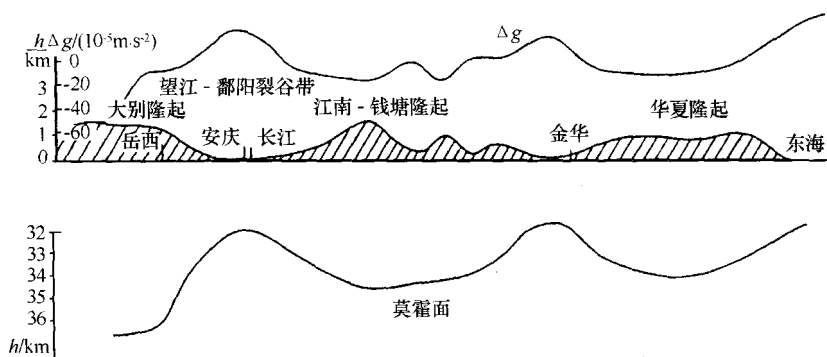


图 1.3 区域均衡效应对重力场的影响
(引自陈沪生等, 1999)

有关的火山-侵入岩均分布在沿江地幔隆起带或隆拗过渡带上, 说明莫霍面的形态与地壳浅部的构造作用、岩浆活动和成矿作用的发生等具密切的时间、空间和成因联系。成矿带与升高磁场吻合很好, 后者是中生代中基性岩浆活动 (岩浆岩) 的反映。因此, 印支运动以来的南 (扬子) 北 (华北) 地块的强烈作用和太平洋板块向欧亚板块俯冲碰撞作用的耦合, 诱发了地幔隆起带及其附近发生部分熔融作用, 随后的裂解和伸展作用, 发生大规模岩浆侵入、火山作用及金属成矿作用, 壳-幔界面的形态也发生一定程度的变化。所以, 在燕山期, 本区处于地幔上隆并有大量岩浆上升的时期, 长江中下游铜 (铁)、金成矿带的形成与本区壳-幔结构的特征及其演化密切相关。

1.2 基底特征与地壳演化

长江中下游成矿带前震旦系变质基底很少出露地表, 为大面积的震旦-三叠系覆盖, 目前仅在安徽安庆的月山地区和江苏埭城有变质基底出露, 前者称董岭群 (安徽省地矿局, 1987), 由一套长石质片麻岩夹斜长角闪片岩和白云石英片岩及少量板岩、千枚岩组成, 其 Sm-Nd 等时年龄为 1895 Ma (邢凤鸣等, 1995); 后者称埭城群, 分布于滁州-湖州断裂 (图 1.1) 以东的宁镇山脉东部的丹阳埭城地区, 为一套斜长变粒岩、斜长黑云片岩及浅粒岩、绿片岩和斜长角闪岩等构成的变质岩系, 斜长角闪岩中角闪石的 Ar-Ar 年龄为 1771 Ma (江苏省地矿局, 1987)。考虑到 Ar-Ar 年龄可能偏新的特点, 董岭群和埭城群应为古、中元古代的褶皱基底, 它们之下可能存在更老的基底岩系。以滁州-湖州断裂为界, 长江中下游成矿带的铅同位素可明显分为东、西两个铅同位素构造省 (图 1.4, Zhou Taofa et al., 2000)。在基底特征

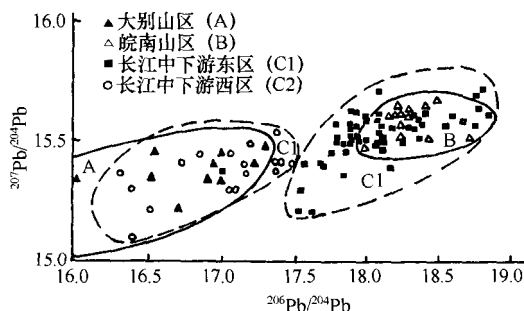


图 1.4 长江中下游及邻区中生代侵入岩长石
铅同位素组成

资料据张理刚等 (1993), 李文达等 (1997), 周涛发等 (1996), Zhou et al. (2000)

方面, 东区基底 μ 值低, 为古元古代或中元古代变质基底 (埤城群); 西区基底 μ 变化较大, 基底组成较复杂, 其中安庆地区基底 μ 值较低, 属古元古代基底, 如董岭群; 宁芜、宣城及铜陵地区的 Pb 同位素及 Nd-Sr 同位素对比, 推断其基底为中元古界上溪群; 九瑞和鄂东南地区的基底为中元古界。另据地球物理资料推断, 东区有深变质的片麻岩系组成的下地壳的存在, 埤城群之下仍可能存在古老结晶基底; 西区内, 九江北星子杂岩的锆石 U-Pb 年龄在 1850 ~ 2100 Ma 之间, 指示可能有古元古代古老基底存在; 邢凤鸣等 (1995) 研究也认为, 西区的董岭群之下仍可能存在太古宙地壳。运用壳-幔混合铅模式 (陈毓蔚, 1980), 计算得长江中下游成矿带全区侵入岩铅同位素模式年龄值 (t_1) 在 2000 ~ 4100 Ma 之间, 主要在 2600 ~ 3500 Ma 之间, 进一步显示本区可能存在太古宙基底。综上所述, 长江中下游成矿带的古老基底主要是古元古代和中元古代及太古宙变质岩系, 基底本身具“双层结构”, 部分地区可能具“多层结构”。

长江中下游成矿带东、西区岩浆岩 Nd、Sr 同位素组成分别位于亏损地幔 (DM) 和上地壳混合线 (UC) 及 DM 与下地壳混合线 (LC) 之间 (图 1.5, Zhou Taofa et al., 2000), 表明西区岩浆岩为源自上地幔岩浆的结晶分异并受到上、下地壳组分混染形成的, 东区岩浆岩则主要为幔源岩浆同化下地壳或主要由下地壳麻粒岩部分熔融形成的。

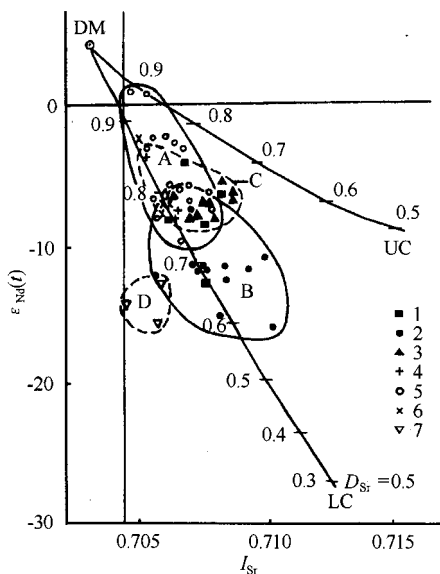


图 1.5 长江中下游成矿带中生代侵入岩的 Nd-Sr 同位素组成

A—宁芜、庐枞火山岩盆地; B—铜陵地区; C—贵池-安庆地区; D—宁镇地区; 1—鄂东南地区侵入岩; 2—铜陵地区侵入岩; 3—贵池地区侵入岩; 4—安庆地区侵入岩; 5—宁芜地区侵入岩; 6—庐枞地区侵入岩; 7—宁镇地区侵入岩; DM-UC 曲线为亏损地幔-上地壳混合线; DM-LC 曲线为亏损地幔-下地壳混合线 (DePaolao, 1981); UC, LC 端元据文献 DePaolao (1981) 和 McCulloch et al. (1982); 区域资料据邢凤鸣等 (1995) 和李文达等 (1997)

的, 东区岩浆岩则主要为幔源岩浆同化下地壳或主要由下地壳麻粒岩部分熔融形成的。基于 Nd 同位素二阶段演化模式 (DePaolo, 1981; McCulloch et al., 1982), 计算的长江中下游成矿带 Sm/Nd 比值在 0.14 ~ 0.24 之间的中生代侵入岩的亏损地幔 Nd 模式年龄 (t_{DM}) 变化于 953 ~ 2276 Ma 之间, 平均为 1518 Ma。 t_{DM} 变化范围大, 可能主要与这些侵入岩的源岩由不同比例的壳-幔物质混合组成有关, 地壳物质的加入是花岗岩 t_{DM} 降低的一个重要原因。 $\epsilon_{Nd}(t) - t_{DM}$ 相关性 (李文达等, 1997) 研究表明, 随着 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值增高, 本区花岗岩的 t_{DM} 降低, 即侵入岩中幔源组分增多, Nd 模式年龄降低; 壳源组分增多, Nd 模式年龄就高。据二元混合方程 (Faure, 1986) 计算得出, 长江中下游不同矿化密集区侵入岩中壳源组分 (f_c) 平均值在 23% ~ 64% 之间, 其中宁芜为 10% ~ 37% (平均 23%), 安庆为 31% ~ 55% (平均 42%), 鄂东南为 24% ~ 51% (平均为 36%), 铜陵为 33% ~ 94% (平均为 64%)。计算的侵入岩 t_{DM} 出现两个峰值: 18 亿 ~ 20 亿 a 和 12 亿 ~ 16 亿 a, 说明本区地壳主要形成于古、中元古代, 或者说, 1800 Ma 前古元古代地壳已初步形成, 中元古代地壳继续增生, 而新元古代地幔分异新地壳形成的比例较少, 这也与全球地壳演化相一致。另据研究, 安庆大龙山岩体继承性锆石 U-Pb 年龄为 3300 Ma (Zhang Bangdong et al.,

1985), 邻区皖南上溪群千枚岩 t_{DM} 在 2000 ~ 2100 Ma 之间 (周泰禧等, 1995), 赣东北双桥山群千枚岩 t_{DM} 为 1577 ~ 1699 Ma (凌洪飞等, 1992), 赣西北九岭群斑点板岩 t_{DM} 为 1650 ~ 1714 Ma, 修水群板岩 t_{DM} 为 1563 ~ 1859 Ma (李献华等, 1991), 大别山群 t_{DM} 为 1700 ~ 2900 Ma, 从另一侧面支持了长江中下游地壳主要形成于古、中元古代的说法。又因本区花岗岩属同熔型 (I 型) 花岗岩, 其 t_{DM} 值要明显低于大陆壳的实际形成时间, 故长江中下游成矿带地壳的实际形成时间可能比上述 Nd 模式年龄更早。

因此, 包括月山地区在内的整个长江中下游成矿带的基底除了具有南北分带 (马振东, 1999) 之外, 还具有明显的东、西分区特点, 基底主要是古、中元古代变质岩系, 可能有太古宙变质岩系, 构成“双层结构”和部分地区的“多层结构”, 显示了区域地壳于元古古代或太古宙已初步形成, 中元古代地壳继续增生, 而新元古代地幔分异新地壳的比例较小。长江中下游铜、金成矿带的形成与区域壳幔结构特征、演化及壳-幔作用动力学过程密切相关。中生代地幔隆起并与构造作用耦合, 诱发了大规模岩浆侵入、火山作用及金属成矿作用。古、中元古代基底的分区性及构造-岩浆作用过程中壳-幔作用程度的差异是造成成矿带内矿化多样性的重要原因之一。

1.3 地层系统

1.3.1 地层系统及地层分布特征

月山矿田所在的地层单元隶属于扬子地层区的下扬子分区。区域地层出露齐全, 总厚度超过 10000 m。根据野外测定和区域地层资料 (安徽省地矿局, 1987), 区域地层的总体特征如下:

前寒武系 称为董岭群, 为一套变质岩系, 总厚度大于 1779 m, 其中部和下部为浅粒岩、片麻岩段, 由浅灰色、肉红色长石片麻岩和角闪岩组成, 厚度大于 1500 m; 上部为片岩段, 由浅灰色、肉红色云母石英片岩构成, 上部见少量千枚岩和云母石英板岩, 厚度达 279 m。上下岩段之间为渐变过渡。董岭群与上覆寒武系呈不整合接触, 构成了董岭背斜的核部。

寒武系 称为黄家榜群, 其底部出现 0.1 m 厚的角岩, 下部为薄层状白云质大理岩和厚层大理岩, 上部为薄层状大理岩夹硅质条带和硅质、钙质和炭质结核。地层厚 175 m, 为浅海、滨海相沉积。

奥陶系 总厚度为 310 m, 主要为滨海台地相碳酸盐岩沉积。下统仑山组厚 244 m, 由下部的白云石大理岩和上部的大理岩组成; 中统汤山组由泥质条带大理岩和变余鲕状大理岩组成, 含腕足类化石碎片, 厚 50 m; 上统为汤头组和五峰组, 前者为钙质板岩和瘤状大理岩, 厚度 10 m, 后者由板岩、角岩或硅质板岩和黑色炭硅质页岩组成, 厚度 6 m。

志留系 广泛出露, 其下统高家边组厚 766m, 为黑色页岩、千枚岩、板岩, 含笔石化石, 属浅海潟湖相沉积。中统坟头组, 厚 115m, 由黄绿色、灰绿色长石石英砂岩、石英砂岩、粉砂岩和砂质页岩等组成, 含三叶虫、瓣鳃类和腹足类等化石。该组地层属浅海陆棚相沉积。本区缺失志留系上统。

泥盆系 本区仅发育上统五通组, 厚 94 m, 以陆相沉积碎屑岩沉积为主, 其底部为石英砾岩, 下部为石英岩, 上部为石英砂岩和粉砂岩。与下伏地层呈假整合接触。