

河北地质大学

中国地质大学(北京)

联合资助

国土资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室

栾川矿集区钼多金属矿 构造-岩浆成矿作用

李 冬 张寿庭 宋要武 付芳芳 李大鹏
马振波 于延秋 张敏杰 曹华文 裴秋明 著
程光锁 李 杰 谭和勇 韩江伟 刘 冲

地质出版社

河北地质大学国家级教学示范中心——地学实践教学中心

河北地质大学资源勘查工程综合改革试点

河北地质大学地质工程（工程硕士）学科点建设

河北省重点学科“矿产普查与勘探”建设经费

资助出版

栾川矿集区钼多金属矿 构造—岩浆成矿作用

李 冬 张寿庭 宋要武 付芳芳 李大鹏
马振波 于延秋 张敏杰 曹华文 裴秋明 著
程光锁 李 杰 谭和勇 韩江伟 刘 冲

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

栾川矿集区因其优越的成矿背景和复杂的地质演化历史,一直都是地学界研究的热点区域。晚中生代钼多金属大规模成矿作用与中酸性小岩体密切相关。本书通过与老君山岩体综合对比,讨论晚中生代东秦岭地区构造体制转折过程;结合成岩成矿年代学及岩石地球化学数据,提出“连续体岩浆房演化模型”,从而为解释东秦岭地区钼多金属巨量堆积提供可能的约束机制。

本书可供地质学及相关专业科研人员及高校师生参阅。

图书在版编目(CIP)数据

栾川矿集区钼多金属矿构造-岩浆成矿作用 / 李冬等著. —北京:地质出版社, 2016. 10

ISBN 978-7-116-10042-8

I. ①栾… II. ①李… III. ①钼矿床-多金属矿床-成矿作用-栾川县 IV. ①P618.650.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第245007号

责任编辑:柳青

责任校对:王洪强

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)66554528(邮购部);(010)66554632(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

传 真:(010)66554686

印 刷:北京地大天成印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:6.75 图版:4面

字 数:170千字

版 次:2016年10月北京第1版

印 次:2016年10月北京第1次印刷

定 价:38.00元

书 号:ISBN 978-7-116-10042-8

(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

东秦岭钼多金属成矿带,因其独特的成矿地质背景,吸引了国内外大批地质学家纷至沓来,开展了大量研究,积累了丰富的研究资料。栾川矿集区地处东秦岭核心成矿部位,栾川断裂北部中酸性小岩体(以下简称含矿岩体)具有典型“小岩体成大矿”特征,与晚中生代钼多金属大规模成矿作用密切相关;栾川断裂南部老君山,主体岩性为二长花岗岩,呈大的岩基状分布,局部零星钼矿化。两类岩体均为高硅、钾玄岩系列到高钾的钙碱性系列,与I型花岗岩类似;均富集轻稀土元素(LREEs),具有Eu负异常。 $(La/Yb)_N$ 、 $(La/Sm)_N$ 、Eu值在含矿岩体中均要高于老君山岩体,表明含矿岩体经历比老君山岩体更为强烈的分异作用。老君山岩体重稀土(HREEs)元素含量高于含矿岩体,表明在演化过程中,老君山岩体混入更多的地壳物质。同位素综合研究表明,成岩成矿物质主要来源于下地壳,并有地幔成分的混入。

含矿岩体多为复式岩体,岩性由早到晚为花岗闪长岩、二长花岗岩、花岗斑岩(部分为细晶岩脉)。与成矿相关的二长花岗岩,锆石U-Pb测年结果分别为 (153.2 ± 1.3) Ma, (154.1 ± 1.8) Ma;细晶岩锆石U-Pb测年结果为 (148.3 ± 1.0) Ma,表明含矿岩浆具有长期演化历史,矿集区内辉钼矿Re-Os测年数据集集中在146Ma左右。

扬子板块和华北板块在晚三叠世末完成陆陆碰撞,东秦岭地区进入陆内造山演化阶段,形成区域上北西—近东西向基本构造格架。晚中生代地壳旋转作用,是地表浅部形成北(北)东向构造的原因,构成区域上以北西向构造为主,叠加次级北(东)向格子状构造格局。含钼花岗质岩浆沿断裂交汇处侵位,形成区域上众多中酸性斑岩体和钼多金属斑岩和矽卡岩成矿系统。矿集区范围内,构造裂隙产状主体与地层方向一致,沿北(西)西向展布;局部与热液活动密切相关的裂隙沿北(北)东向展布于张性裂隙脉中。约157Ma,构造环境由同碰撞转变为后碰撞,进入汇聚型构造体制下的应力调整阶段;约115Ma,构造环境已转变为板内环境,为拉张型构造体制;约146Ma,板片俯冲作用,是含矿岩体沿构造有利部位(北西

西—北东交汇部位) 上升的驱动力。

经过综合研究, 本书提出“连续体岩浆房演化模型”来解释栾川矿集区巨量钼的富集作用, 正是通过这些花岗质岩浆房的富集作用, 形成栾川矿集区巨量的钼多金属堆积。该模型可作为中国东部晚中生代广泛钼成矿作用的典型代表。

书中实验及野外工作得到国家科技支撑计划课题“河南省栾川铅锌矿区深部资源勘查技术集成研究”(No. 2011BAB04B06), 中国地质调查局工作项目“大型—超大型矿床形成的地球动力学背景、过程与定量评价”(No. 1212011220925), 国土资源部公益性行业科研专项经费项目(No. 201111007-4)的资助; 出版过程得到国土资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室开放课题“华北克拉通周边典型碲金矿床的对比研究(No. 2014002)”; 河北省人力资源和社会保障厅留学归国人员科技资助项目“栾川矿集区铅锌矿微区痕量元素组成及对矿床成因指示意义”(No. C20153048)及河北地质大学国家级教学示范中心——地学实践教学中心、河北地质大学资源勘查工程综合改革试点、河北地质大学地质工程(工程硕士)学科点建设、河北省重点学科“矿产普查与勘探”建设经费的资助。

限于作者研究水平, 书中难免有疏漏之处, 欢迎广大同行交流指正。

作 者

2016年10月于石家庄

目 录

前 言

1 绪 论	(1)
1.1 研究背景	(1)
1.2 研究现状	(3)
1.3 研究内容	(7)
1.4 研究方法和技术路线	(8)
1.4.1 研究方法	(8)
1.4.2 技术路线	(9)
1.5 主要工作量	(9)
1.6 主要成果和创新点	(11)
2 区域地质背景	(12)
2.1 区域地层	(12)
2.1.1 结晶基底	(12)
2.1.2 盖层特征	(13)
2.2 区域构造	(16)
2.2.1 基底岩系变形特征	(17)
2.2.2 盖层构造变形特征	(17)
2.3 区域岩浆岩	(19)
2.4 区域地球物理	(21)
2.4.1 区域电法特征	(21)
2.4.2 区域重力特征	(21)
2.4.3 区域磁场特征	(21)
3 栾川矿集区中生代构造格局及演化	(23)
3.1 构造组合特征	(23)
3.1.1 褶皱构造	(23)
3.1.2 断裂构造	(25)
3.2 构造裂隙分布特征	(28)
3.3 中生代构造格局	(30)
3.3.1 近南北向低角度逆冲推覆构造 (D1)	(31)
3.3.2 走滑断层 (D2)	(33)

3.3.3 高角度拆离断层 (D3)	(35)
3.4 栾川推覆构造系演化	(35)
4 栾川矿集区钼多金属矿成矿地质特征	(37)
4.1 含矿岩体地质、地球化学特征	(38)
4.1.1 含矿岩体地质特征	(38)
4.1.2 岩石地球化学特征	(39)
4.2 典型矿床成矿地质特征	(45)
4.2.1 典型矿床矿化蚀变类型	(47)
4.2.2 矿化蚀变阶段	(47)
4.2.3 矿石类型	(48)
4.3 流体包裹体地球化学特征	(48)
4.3.1 测试方法	(48)
4.3.2 显微测温和分析结果	(49)
4.3.3 流体演化特征	(52)
4.3.4 讨论和小结	(55)
4.4 矿床成因	(56)
5 栾川矿集区超大型矿床成矿地质过程	(59)
5.1 东秦岭钼多金属成矿演化特征	(59)
5.2 东秦岭晚中生代演化过程	(61)
5.2.1 物质源区讨论	(61)
5.2.2 构造体制转化	(63)
5.2.3 东秦岭晚中生代演化模型	(65)
5.3 含钼多金属花岗质岩浆演化	(66)
5.3.1 年代学研究	(66)
5.3.2 年代学统计及讨论	(76)
5.3.3 钼多金属富集模型	(81)
6 结 论	(85)
参考文献	(87)
图 版	

1 绪 论

1.1 研究背景

东秦岭地区以其独特的地质背景和成矿条件,被众多地质学者关注(许志琴等, 1988; 黄典豪等, 1994; 李宪梓等, 1993; 张本仁等, 1996; 陈衍景等, 1992, 2000; Chen et al., 2005; 罗铭玖等, 2000; 卢欣祥等, 2002; 张国伟等, 2001; 毛景文等, 2005a, 2005b; Mao et al., 2008, 2010)。然而,从华北陆块与扬子板块在三叠纪末拼合的陆-陆碰撞阶段,转为与钼成矿作用密切相关的陆内造山阶段,直到整个东秦岭地区转为伸展作用为主的后造山阶段。在碰撞-造山演化过程中,以构造-岩浆钼多金属成矿作用为切入点,鲜有人研究。至于东秦岭钼矿带巨量金属聚集机制和成矿相关的岩浆演化过程更是需要深入研究。本次研究重点在于东秦岭栾川矿集区钼多金属矿成矿动力学背景、过程和钼矿带巨量金属聚集机制。

大陆环境斑岩型矿床包括斑岩型 Cu (Mo-Au), 斑岩型 Mo, 斑岩型 Au 和斑岩型 Pb、Zn 等矿床类型,在地球动力学背景、深部作用过程、岩浆起源演化、流体与金属来源等方面,与大洋板块俯冲形成岩浆弧环境斑岩型矿床存在重要差异。斑岩型 Cu、Mo、Pb、Zn 矿床,通常沉淀于流体分相和流体沸腾过程中,而 Au 则主要沉淀于岩浆热液过渡阶段(侯增谦等, 2009)。

我国学者根据造山型矿床概念及其变质流体成矿的实质,建立矿床、矿田和成矿省等不同尺度的造山型矿床模式及其随时间演化的 3 阶段模式,强调汇聚造山作用的伸展转变期是大规模成矿时间,同造山成矿系统的特点是成矿年龄滞后于造山作用时间(陈衍景, 2006)。

热交换、化学侵蚀作用使岩石圈地幔底部转化为软流圈的一部分,或是拆沉作用引起的岩石圈减薄,被认为是中国东部地区在侏罗纪-白垩纪大量岩浆活动和成矿作用原因(Deng et al., 2004, 2007);下地壳沉没(founding)进入对流循环的地幔,是大陆型地壳物质循环基本方式之一,可能是华北板块壳幔相互作用的原因(Gao et al., 2004)。

关于大陆碰撞的含义,不同学者有不同解释,比较代表性的观点有 3 种:①将碰撞作用看作广义的含义,洋盆消失之后的陆-陆碰撞及其后的继续会聚均看作同碰撞(syn-collision)(Harris, 1986)。②将陆-陆碰撞(collision)看作主洋盆消失后较短的一次事件处理,碰撞之后的继续会聚直至后造山伸展之前,统称为后碰撞环境(post-

collision setting) (Liegeois et al., 1998)。③将陆-陆(陆间)碰撞造山(continent-continent collision orogeny)和陆内的大陆碰撞作用(inter-continent collision)统称为大陆碰撞造山(continental collision orogeny),随后是后造山(post-orogenic)阶段(邓晋福等, 2007)。

本次研究依托团队项目:中国地质调查局项目:“大型-超大型矿床形成的地球动力学背景、过程与定量评价”,所属分课题“栾川钼铅锌多金属矿集区大型-超大型矿床形成的地球动力学背景、过程与定量评价”(No. 1212011220925);中国地质调查局矿产资源调查增量评价项目“河南杜关-云阳地区钼铅锌多金属矿评价”(No. 1212010881001);国家科技支撑计划项目“河南省栾川铅锌矿区深部资源勘查技术集成研究”(No. 2010BAB04B06);国土资源部公益性行业科研专项经费项目:“河南省栾川矿集区深部找矿示范研究”(No. 201111007-4);河南省“两权价款”地质科研项目:“豫西南地区多金属矿集区深部找矿示范研究”(No. 2010-61-2);与河南省地质调查院合作参加“河南杜关-云阳地区钼铅锌多金属矿评价”、“河南省潭头-陶湾地区矿产远景调查”的部分野外和资料整理工作。在中国地质大学(北京)、河南省地质调查院、栾川县地矿局产学研相互配合下,项目开展得到产学研基地的大力支持,使得许多野外工作得以顺利开展。

(1) 栾川矿集区具备研究超大型矿床成矿背景的良好条件

栾川矿集区,地处华北地块南缘与东秦岭的交接处,紧邻栾川深大断裂,成矿地质条件非常优越,是东秦岭钼成矿带的核心区域,其中南泥湖、三道庄、上房沟以露天方式开采,初期探明的钼金属储量已达 $205 \times 10^4 \text{t}$ 。除此之外,在栾川矿集区还存在如马圈、石宝沟等大、中、小规模钼矿床,以及最近整装勘查过程中发现的鱼库隐伏钼矿床,初步探明达到大型规模。在钼矿田周围,存在着与钼成矿密切相关的铅锌矿,如冷水北沟铅锌矿(大型)、骆驼山硫铁锌矿(中型)等。

(2) 巨量钼多金属聚集机理与赋存规律亟须深入研究

东秦岭是我国最重要的钼矿带,也是世界最重要的钼矿带之一,西起陕西洛南的金堆城矿床,拥有东沟、金堆城、南泥湖、三道庄、上房沟等5个世界级超大型钼矿床和雷门沟等5个大型钼矿床以及为数众多中小型钼矿床(李诺等, 2007)。大别地区的沙坪沟钼矿(安徽金寨),初步控制钼金属量超过 $50 \times 10^4 \text{t}$,达到超大型矿床规模,目前是秦岭-大别成矿带最大规模的斑岩型钼矿(张红等, 2011; 孟祥金等, 2012)。这显示出秦岭-大别地区巨大成矿潜力。

巨量的金属资源富集在成矿带内,其富集机理与赋存规律便成为亟须解决的问题,以便推动基础地质与区域找矿工作的发展。通过对不同阶段含矿花岗岩的研究,解决对于含矿花岗岩从部分熔融到侵位到地表整个过程中,成矿物质在上升过程中如何富集,最终卸载成矿的问题。

(3) 完善栾川矿集区矿产勘查理论

选取栾川矿集区南部的老君山岩体和北部与 Mo、W 相关的小岩体为研究对象,进行岩石地球化学、成矿年代学、锆石微量元素和同位素的研究,对研究区内新发现大

型矿床加强矿床学方面研究。研究成矿岩体和非成矿岩体（老君山岩体）之间的区别和联系。

对于研究区内代表性的岩体，如南泥湖、上房沟、石宝沟、鱼库等岩体，重点阐明其形成的大地构造背景及其深部的物质来源；阐述深部矿体的一般赋存特征，为下一步的深部找矿工作提供理论上的支持；阐述深部成矿模式，确定深部岩体对于矿床形成的贡献，及与成矿的关系。从而对栾川矿集区下一步的找矿工作提供指导，对于矿集区范围内的三维建模研究起到相互促进作用。

1.2 研究现状

(1) 超大型矿床理论基础研究

我国关于超大型矿床及大型矿集区的研究始于 20 世纪 90 年代。1992 年，国家科委批准的攀登计划 A 的实施，其中一个项目就是以涂光炽院士为首席科学家的“与寻找超大型矿床有关的基础研究”。1995 年，在攀登计划 A 的基础上，国家科委批准的攀登计划 B，由谢学锦和刘光鼎两位院士任首席科学家的“找寻难识别及隐伏的大矿、富矿的新战略、新方法、新技术基础性研究”项目实施。1999 年，科技部在国家重点基础研究发展规划（简称“973 计划”）中，以毛景文、胡瑞忠为首席科学家的“大规模成矿作用与大型矿集区预测”项目实施。

翟裕生等（1997）研究提出超大型矿床成矿 5 要素：①充足的矿源、水源和热源；②简捷、紧凑、高效的成矿系统；③适合的成矿空间和足够的成矿时间；④及时的成矿启动及以后的多重富集作用；⑤良好的保存条件。

(2) 岩浆演化基础理论研究

花岗岩产生过程可以归结为 4 个阶段：熔融、分离、上升、侵位（Vigneresse, 2004）。熔体从热的源区分离过程也是脉动形式。构造脉动作用，岩浆楔入到低黏度岩石和由挥发分主导的侵入作用是花岗质岩浆上升动力来源。在深部岩浆过程中，挤入作用能够导致近于等温线解压作用，是花岗质岩浆上升的主要原因。经过大量去气作用，贵金属和贱金属可以在富硫岩浆挥发分阶段从熔体中脱离出去，并被带入岩浆热液流体中。如果在花岗质岩浆上升过程中，有水加入，饱和作用和出溶作用将在更深处发生（Annen, 2005; Larocque, et al., 2000; Halter, et al. 2002; Weinberg, 1997, 1999; Teyssier, Whitney 2002; Tomkins, Mavrogenes, 2003）。

经过模拟实验发现，岩浆熔体在脆韧性转化界面，是以挤入构造（韧性）和岩脉状形式（脆性）共同控制的。高温脉体和成矿作用发生在侵入体顶部，而不是存在侵入体之中。与成矿作用相关流体在热液系统只存在较短时期内（Hedenquist and Lowenstern, 1994; Shinohara et al., 1995; Sumita, I. and Y. Ota, 2011）。

(3) 东秦岭造山带研究现状

20 世纪 80 年代，由中国地质科学院和法国研究所组成的中法联合研究小组，对秦

岭地区展开联合考察,并在《Nature》上发表了系列文章,提出东秦岭地区的大地构造演化模式,指出东秦岭地区中生代的构造主要是板内的,浅层次的地壳内变形,其水平缩短的距离至少在 100km 以上。

东秦岭成矿带成矿年代学和大陆动力学研究方面近 10 年有了长足的发展,典型的观点有:东秦岭地区钼矿床的大规模成矿可以分为 3 个时期,对应的地球动力学背景为华北克拉通与扬子克拉通的碰撞造山后陆内造山局部伸展过程、中国东部地球动力学体制大转换晚期、岩石圈拆沉及伸展时期(毛景文等,2005a,2005b,2009;Mao et al.,2010)。成矿作用由 A 型俯冲所致,大规模成矿作用发生在陆-陆碰撞过程的挤压-伸展转变期。CMF 模型,即碰撞造山成岩成矿与流体作用模式,推动了陆-陆碰撞和地体增生体制的流体与成矿作用的理解。进一步阐释同造山热液矿床与碰撞造山作用在时间、空间和动力学机制等方面的关系(陈衍景等,1992,2000,2008,2009)。

通过秦岭地区的构造地层、年代学和变质变形历史,认为开始于三叠纪末期的南北向地壳缩短作用一直持续到侏罗纪;从白垩纪开始,北西-北东向的左行走滑作用,紧邻大面积的地壳伸展作用,北大别地区亦受此影响(Ratschbacher et al.,2003)。

用微观构造与宏观构造相结合的新方法研究东秦岭山链的岩石圈变形及动力学,提出东秦岭是一个以“大推覆、大平移、大滑脱”为主要构造格局的特殊复合山链,并确定岩石变形阶段,变形机制、重大构造事件的时代,大型韧性剪切带形成的热动力条件,南、北中国板块碰撞的时间以及山链形成及演化的板块动力学模式。深入探讨秦岭造山带岩石圈现今三维结构及其动力学特征,秦岭造山作用和造山过程,并对秦岭造山模式与大陆动力学模型进行总结。讨论中新元古代准确的时间界线,地质演化过程。(许志琴等,1988;张国伟等,2001;陆松年等,2003)。

石铨曾等(2004)结合多年在栾川地区的野外实际调研,研究中生代从碰撞造山到陆内造山阶段出现的两期推覆构造,探讨这一区域两期推覆构造及一期伸展拆离构造形成的地质背景,研究了东秦岭北缘推覆构造及北秦岭山麓推覆构造带的几何学及运动学特征,对豫西出露的 3 个变质核杂岩的构造特征、区域构造对成矿及控矿作用的关系进行初步研究。

豫西地区中生代花岗岩划分为 3 期,大规模的成矿作用主要与高分异 I 型花岗斑岩相关,3 期花岗岩类的时间演化揭示区域大地构造背景由后碰撞向非造山的转变过程,中生代大规模岩浆活动和金矿化可能与碰撞后加厚陆壳的拆沉作用有关(韩以贵,2007)。秦岭花岗岩的形成时代、物质组成特征、年龄和同位素组成上存在不同的时空变化特征(张宗清等,2006)。通过对豫西鱼池岭钼矿同位素年代学和流体地球化学方面的研究,认为鱼池岭含矿斑岩与合峪花岗岩基形成于加厚造山带地壳的快速隆升过程。研究认为,晚中生代花岗质岩浆活动存在多期性(李诺等,2007,2009)。

罗铭玖等(1991,2000)在综合研究基础上,从矿床的成矿系列和成矿模式角度入手,总结河南省主要矿床的成矿作用及其形成的地质背景、成矿控制因素、矿化特征,建立河南省主要矿产的成矿系列和成矿模型。

(4) 栾川矿集区研究现状

1) 地质背景研究。俯冲的扬子板块部分熔融,与富集的地幔熔体相互作用,经过扬子板块脱水交代作用,是栾川矿集区内大范围存在的花岗斑岩体和相关的钼成矿作用产生的原因(Bao et al., 2014)。栾川地区中生代与钼(钨)矿化密切相关的斑岩体,将南泥湖、石宝沟岩体划分为含矿岩体,将火神庙、老君山岩体划分为非含矿岩体,进行岩石地球化学方面的研究,从而阐述成矿岩体和非成矿岩体在地球化学成分和岩浆演化方面的差异(杨荣勇等, 1997)。洛南-栾川断裂带具有左旋斜向俯冲-汇聚的运动学特征,秦岭北缘强变形带内由南向北面理走向与剪切带走向的夹角逐渐增大,岩石剪应变变量依次递减,造山带变形具有“三斜对称”特点(宋传中等, 2009)。韩以贵(2007)在马超营断裂带脆性断层中,对石英-钾长石脉体中的钾长石的 Ar-Ar 测年得出的结果,提出马超营断裂在约 120Ma (119.5 ± 0.7 Ma) 时期发生左行走滑断层,这可以解释为华北陆块南缘的脆性活动的最晚时代,同时与区域上的金、钼成矿作用密切相关。

2) 流体包裹体方面。分别对栾川矿集区内最大的 3 个矿床:上房沟、三道庄、南泥湖矿床,进行流体包裹体方面的研究,成矿阶段进行划分,对不同成矿阶段的流体的温度、盐度、成分都进行详细的讨论。指出中阶段流体沸腾作用强烈,是成矿物质快速沉淀的重要机制。大陆碰撞造山带斑岩成矿系统,成矿流体以富 CO_2 为特征(杨艳等, 2009; 石英霞等, 2009; 杨永飞等, 2009)。对南泥湖矿床进行石榴子石和辉石矿物形成时代的划分,通过对各阶段流体包裹体显微测温和气相成分分析以及碳、氢和氧稳定同位素研究,认为形成该矿床的成矿流体来源以岩浆源为主,含少量有机质的碳酸盐岩地层的贡献次之,大气降水可能没有贡献(向君峰等, 2012b)。

3) 铅、锌矿基础研究。栾川矿集区内有关铅锌矿的观点主要有 2 种:一种观点认为是岩浆热液成因,岩体主要呈脉状赋存在北东向的构造中;另一种观点认为研究区内铅锌矿是受地层控制的层控型铅锌矿。矿床地质特征和 S 同位素、C-O 同位素等地球化学方面的研究,指出栾川地区的铅锌矿主体应为受燕山期构造-岩浆控制的中高温热液矿床(段士刚等, 2010)。栾川矿集区以燕山期花岗岩为中心,矿种分布和成矿元素组合存在明显完整的分带,中心部位是斑岩型-矽卡岩型高温成矿元素组合;外围是中低温热液脉型成矿元素组合,整体上构成矿集区 Mo-W-Cu-Pb-Zn-Ag-Au 元素内生矿系统(王长明等, 2007)。通过对矿体、矿石特征、围岩蚀变的研究,将栾川矿集区内重要铅锌矿床进行分类,认为栾川百炉沟和赤土店铅锌银矿床为碎屑岩和碳酸盐岩有关层控型铅锌银矿床。通过典型矿床的解剖和不同成矿组合,提出赋存于官道口群碳酸盐岩内的铅锌矿为 MVT 铅锌矿床,赋存于栾川群三川组碎屑岩内的硫锌铅矿床为 SMS 型矿床,探讨铅锌银成矿的物质供应和来源、时间演化和矿床(点)的空间分布规律,指出东秦岭地区铅锌银矿进一步找矿方向(燕长海, 2004; 燕长海等, 2009)。通过对矿石中 Pb 同位素、矿石和地层中 S 同位素、矿石中碳酸盐和石英中 D 同位素的研究对比,综合分析得出,栾川地区的铅锌矿主要分为两类:一类为岩浆热液型,其形成与燕山期花岗岩岩体有关,成矿物质主要来源于地幔和下地壳,一类

为沉积层控型,成矿物质主要来源于围岩地层(邢矿,2005)。

4) 成岩成矿年代学。栾川矿集区内的含矿小岩体 U-Pb 年代学研究主要集中于 157~146Ma 之间,而与之相关的辉钼矿的 Re-Os 同位素年代学主要集中于 146Ma 左右。胡受奚等(1988)从 20 世纪 80 年代开始,K-Ar 法在南泥湖矿田内获得斑状黑云母花岗闪长岩的形成年龄为 $(104.3 \pm 2.9) \sim 255.0$ Ma,采用 Rb-Sr 法获得斑状花岗岩的形成年龄为 $(130.9 \pm 4.5) \sim (272.3 \pm 22.0)$ Ma,并通过对比分析后认为 (142.5 ± 15.0) Ma 的全岩 Rb-Sr 等时线年龄更接近南泥湖岩体的形成时代。石宝沟岩体全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 (142.7 ± 5.0) Ma,火神庙岩体全岩的 Rb-Sr 等时线年龄为 (162.8 ± 6.2) Ma(杨荣勇等,1997)。冷水北沟铅锌矿中的石英重结晶颗粒的 Ar-Ar 测年结果为 139Ma,在年代学方面证明为燕山期铅锌矿的成矿作用(燕长海等,2009)。随着高精度测年技术的成熟,锆石的 ICP-MS 和 SHRIMP 能够精确测量岩体形成的时代,李永峰(2005)用锆石 SHRIMP 法测得南泥湖岩体形成时代为 (157.1 ± 2.9) Ma。包志伟等(2009b)通过对赤土店矿区内切穿铅锌矿脉的辉长岩进行锆石同位素年代学的研究,得出该矿区铅锌银成矿年龄的上限;对南泥湖花岗斑岩中的锆石进行测定,获得年龄为 (149.56 ± 0.36) Ma,并认为成岩物质来源以下地壳为主,并有少量地幔物质的加入。对矿集区内石宝沟岩体的岩石地球化学、成矿年代学和锆石的 Hf 同位素的研究,认为石宝沟花岗岩的源区物质以壳源物质为主,也有年轻的地幔物质的参与(杨阳等,2012)。近年来,对于辉钼矿的 Re-Os 法年代学研究是一种成熟的方法。南泥湖地区的辉钼矿 Re-Os 的等时线年龄为 147Ma(黄典豪等,1984)。Mao et al(2008)在大王沟(石宝沟东南部)测得辉钼矿 Re-Os 模式年龄 $(141.5 \pm 2.0) \sim (147.5 \pm 2.2)$ Ma,向君峰等(2012a)测得南泥湖矿区和三道庄矿区辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为 (147.3 ± 1.1) Ma。对南泥湖矿区细晶花岗斑岩脉进行锆石 U-Pb 年代学分析,得出与成矿时代一致的年龄。对于成岩成矿的存在约 12Ma 时差的问题,向君峰等(2012a)认为由于岩浆岩中的锆石来源不均一,而测试的锆石数量有限,不能真实反映岩浆岩中全体锆石的年龄特征,导致测得岩体形成时代与其年龄相差较大。

5) 岩浆源区讨论。东秦岭钼矿带 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ 变化于 0.6931~0.7329 之间,而 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值变化于 -12.4~-18.4 之间,位于亏损地幔与古老下地壳两元混合线附近,但集中于下地壳端元(侯增谦等,2009)。

6) 成矿预测与三维建模。对于不同地球物理的勘查方法的组合应用,是提高深部找矿应用的有效手段,对于矿集区范围内的三维地质模型和矿产勘查模型的建立,是未来矿产勘查的重要发展方向。①对于构造裂隙方法在矿产勘查方面的应用。孙岩等(1998)强调运用耗散结构理论研究断裂构造作用过程中的力学-化学耦合以及构造岩的分异耗散顺序;韩润生等(2003,2005)将矿田地质力学和地球化学结合起来,不仅强调构造带中元素的地球化学行为,而且也注重研究构造本身的时空演化,划分构造期次和控矿构造型式、分析其力学性质转变,模拟构造应力场;吕古贤等(2012)提出用构造变形岩相形迹填图法进行构造地球化学方面的研究;王志华(2010)探讨

矿床构造地球化学与构造成矿学之间的关系,在构造动力为主导的成矿作用过程中,成矿物质分异、运移、富集成矿特征、机理和影响因素。②栾川矿集区内重力异常的分析研究,指出新发现断裂构造和隐伏花岗岩体的复合部位是有利找矿靶区。栾川山区隐伏金属矿产勘查中,可控源音频大地电磁测深法(CSAMT)与频谱激电法(SIP)的技术组合具有勘探深度大、对异常区分能力强、深分辨率高等特点。鱼库隐伏大型钼矿的发现,证明该技术组合是一种有效的勘查技术手段。运用线性层次分析法集成多元信息的基础上,进一步用“Kriging + Natural Breaks”和C-A分形法在豫西南杜关—云阳圈定不同级别的找矿靶区,从而指导矿产勘查工作(王纪中等,2010;马振波等,2011;Wang G et al., 2012)。③以栾川钼多金属矿区为例,开展基于地质与重磁正反演集成技术组合的三维地质模型研究,对栾川成矿的核心及周边地区,进行矿集区尺度的三维地质建模研究(Wang G et al., 2011)。基于栾川地区地质资料、地球化学、地球物理和深部钻孔信息,运用多重分形和概率神经网络法(PNN)建立三维矿产预测模型,在矿集区尺度的三维地质建模与成矿预测方面的研究达到领先水平(Wang G et al., 2011, 2012)。

1.3 研究内容

在总结前人研究成果的基础上,针对栾川矿集区构造—岩浆成矿作用与深部找矿预测为主题,本书开展了以下5个方面的研究。

(1) 栾川矿集区地质背景

栾川矿集区地处华北陆块南缘和北秦岭微板块拼合部位,以区域上的黑沟—栾川断裂为界。栾川矿集区主要含矿岩体位于华北陆块南缘,具有典型克拉通结构,书中主要分为沉积盖层和结晶基底两个方面,总结研究区地层和构造变形特征。系统收集东秦岭地区岩浆岩、区域地球物理(如区域电法、区域磁法、区域重力成果)。

(2) 栾川矿集区构造解析研究

栾川断裂带是一条多期次、多层次活动规模巨大的构造边界。前人经过专题研究提出栾川推覆构造系概念。华北板块与扬子板块碰撞拼合,开启东秦岭地区陆陆碰撞到陆内造山构造体制转化过程。碰撞造山过程中,发育一系列自北向南的叠瓦状推覆构造,在浅地表往往形成北西(西)向褶皱和断裂构造;晚中生代大规模中酸性岩体的侵位,在地表形成了广泛的构造裂隙。通过系统收集野外的典型现象,推断中生代构造分期演化特征;在前人资料的基础上,总结栾川地区推覆构造活动的简史。

(3) 隐伏矿床成矿地质背景及流体包裹体研究

栾川矿集区北部南泥湖矿田以露天形式开采,成矿类型以矽卡岩型和斑岩型为主,矿集区南部黄背岭—石宝沟一带新发现的隐伏矿床,则研究程度相对不足。本次研究样品主要采自深部钻孔数据,在加强岩石地球化学、岩相学研究的基础上,根据穿插关系划分其生成时代,对不同类型的包裹体类型进行显微测温与成分分析,进行与

含矿石英脉体 H-O 同位素的测定, 结合前人资料, 从而讨论整个矿集区含矿流体演化特征。

(4) 东秦岭晚中生代大地构造背景演化

栾川断裂北部中酸性小岩体与钼多金属成矿作用密切相关, 位于栾川断裂南部的老君山岩体是一个巨大的花岗岩基, 在缺少岩石地球化学和同位素年代学方面的证据情况下, 很容易得出栾川含矿岩体是南侧老君山岩体的一个分枝。在收集前人资料的基础上, 对栾川矿集区晚中生代的花岗岩体进行综合对比研究, 经过对两类岩体系统采样, 进行全岩主微量元素分析, 利用微量元素的判别图解, 来讨论大地构造体制转化过程; 通过 Sr-Nd-Pb 同位素分析, 讨论花岗质岩浆和钼多金属的物质源区性质; 通过精确的同位素年代学研究, 对大地构造体制转化的关键时限进行约束, 从而讨论东秦岭晚中生代大地构造背景演化。

(5) 钼多金属巨量堆积动力学模型

通过系统收集和补充测试栾川矿集区内花岗质岩体同位素年代学数据发现, 成岩和成矿作用不同步, 与钼多金属相关小岩体年龄主要分布在 146~157Ma, 与不同类型的岩性相对应: 从花岗闪长岩、二长花岗岩到花岗斑岩脉(细晶岩脉), 成矿年龄比较集中, 约 146Ma。这个现象甚至在整个中国东部存在, 成岩年龄和成矿年龄相差 5~10Ma。从这一现象入手, 分析两类锆石中结晶锆石和捕虏体锆石年代学、微量元素的特征, 深入讨论含矿岩体和老君山岩体之间的关系; 利用岩浆演化观点, 讨论花岗质岩浆从源区部分熔融、分离、上升, 到最终的地表侵位过程, 从而提出栾川地区钼多金属巨量堆积动力学模型。

最后, 在前述研究的基础上, 总结归纳得出结论。

1.4 研究方法和技术路线

1.4.1 研究方法

本次研究以成矿系统和地质异常致矿理论为指导, 对栾川矿集区钼多金属矿相关的成岩成矿大地构造背景以及深部含钼岩浆演化展开研究。

首先是充分收集整理前人资料, 对国内外涉及该区域最新的研究成果、典型的理论模型进行系统的总结, 然后有的放矢进行野外样品采集、室内整理的工作。采集不同类型岩石样品, 如栾川断裂南部的老君山岩体, 南泥湖复式岩体中的花岗闪长岩, 石宝沟岩体中的二长花岗岩和暗色包体, 上房沟与鱼库地区深部钻孔的二长花岗岩和花岗斑岩, 鱼库平硐中的细晶岩脉, 及相应不同的蚀变类型的钼钨矿石样品。对不同类型的样品磨制薄片、光薄片、光片, 进行系统的显微镜岩相学和矿相学研究。对于不同类型样品(未蚀变或弱蚀变)进行全岩主量、微量元素分析, 便于对比研究。根据鱼库隐伏矿体钻孔中采集的石英脉的穿插关系, 划分生成时代, 进行隐伏钼多属矿床的包裹体的成分和显微测温的研究, 从而与南泥湖矿田前人发表数据进行对比, 讨

论栾川流体演化特征。对于前人资料中研究较少的岩体补充进行锆石 U - Pb 同位素年代学和锆石微量元素的研究,选取典型岩体进行花岗岩钾长石铅同位素测定,从而进一步约束成岩物质源区特征。最终,建立东秦岭晚中生代大地构造背景演化模型和钼多金属富集模型。

1.4.2 技术路线

根据研究思路,系统收集并整理区域上前人的研究成果,具体技术路线分为以下几方面进行分述:

(1) 样品采集和产状信息

对前期资料总结过程中,基础数据缺少的鱼库隐伏矿床深部钻孔中花岗岩进行全岩主微量、Sr - Nd - Pb 同位素的研究和锆石 U - Pb 同位素年代学和辉钼矿 Re - Os 年代学的研究;对老君山岩体进行全岩的主微量和锆石同位素年代学研究。根据样品中,石英脉体穿插关系和矿物组合,划分流体成矿阶段。详细记录岩性特征和钻孔中不同岩层的产状信息,为三维矿产模型的建立收集基础数据。

(2) 矿相学研究

对野外采集的样品进行系统整理和手标本拍照之后,选取不同矿床、不同岩性、不同蚀变和矿化类型的岩矿石样品磨制薄片、光薄片、光片和包裹体片。然后选择代表性样品进行系统的显微镜岩相学和矿相学研究,进一步确定矿石结构和构造。

(3) 样品测试分析

在流体包裹体岩相学研究的基础上,对少量约束性较好、与成矿同阶段的石英中流体包裹体进行显微测温以及成分分析,流体包裹体的研究在中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。

锆石 LA - ICP - MS U - Pb 测试工作在锆石透射光、反射光显微照相以及锆石阴极发光(CL)基础上,选择结晶环带和捕掳体锆石进行同位素年代学的研究,在中国地质大学(北京)激光等离子体质谱实验室完成。

全岩主微量和 Sr - Nd - Pb 同位素,石英 H - O 同位素的研究在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。部分花岗岩的全岩微量元素分析,花岗岩中钾长石 Pb 同位素分析在佛罗里达州立大学国家高磁场实验室完成。

(4) 总结归纳得出结论

结合前人研究成果,对成矿流体特征进行总结,利用不同成矿阶段石英的氢氧同位素分析,对成矿流体来源进行初步探讨。根据全岩的主微量分析、微量元素的判别图解,同位素分析和精确的年代学约束源区信息。从而讨论东秦岭大地构造演化模型和钼多金属聚集模型。

1.5 主要工作量

在与河南省地质调查院、栾川县地矿局产学研合作的基础上,先后在栾川及其周

边地区开展了 15 个月的野外工作，进行相关样品的整理。在佛罗里达州立大学国家高磁场实验室进行了为期 12 个月地球化学实验分析和本书的写作。具体工作量见表 1.1。

表 1.1 实物工作量表

序号	项 目	单位	工作量	第一作者贡献	备 注
1	地质图件收集	幅	60	参与	
2	论文、报告收集	篇	600	参与	
3	野外工作	月	15	参与	与河南省地质调查院、栾川县地矿局合作
4	矿床调研	个	18	参与	钼矿 8 个、铅锌矿 10 个
5	路线地质调查	km	30	参与	
6	坑道观测	km	5	参与	
7	钻孔观测	km	20	参与	
8	土壤、岩石剖面	条	60	参与	共计 8km
9	构造地球化学剖面	条	29	参与	其中长剖面 9 条、短剖面 20 条
10	采集样品	件	400	参与	
11	野外拍照	张	2000	参与	
12	地质体产状测量	个	1000	参与	
13	绘图	幅	100	参与	
14	挑选单矿物	件	300	送测	廊坊市地源矿物测试分选技术服务有限公司
15	光薄片鉴定	件	320	负责	河南省地质调查院裴玉华协助完成
16	包裹体片鉴定	件	75	负责	
17	光学显微镜照片	张	200	负责	
18	电子探针分析	点	30	参与	中国地质大学（北京）科学研究院电子探针实验室协助完成
19	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析及锆石稀土元素分析	点	200	参与	中国地质大学（北京）科学研究院同位素实验室苏犁、张红雨协助完成
20	S 同位素（硫化物）	件	39	负责	核工业北京地质研究院分析测试研究中心
21	Pb 同位素（全岩、硫化物）	件	7	送测	核工业北京地质研究院分析测试研究中心
22	Nd-Sr 同位素（全岩）	组	7	送测	核工业北京地质研究院分析测试研究中心
23	岩石化学全分析	组	230	送测	核工业北京地质研究院分析测试研究中心
24	流体包裹体均一温度	件	20	负责	中国地质大学（北京）地质过程与矿产资源国家重点实验室
25	流体包裹体成分拉曼分析	件	15	参与	中国地质科学院地质研究所
26	花岗岩的微量元素分析	件	25	负责	佛罗里达州立大学国家高磁场实验室
27	花岗岩中钾长石的 Pb 同位素分析	件	10	负责	佛罗里达州立大学国家高磁场实验室
28	数据处理	机时	300	负责	