

祁连造山带与花岗岩有关的 钨钼多金属成矿系统

QILIAN ZAOSHANDAI YU HUAGANGYAN YOUGUAN DE
WUMU DUOJINSHU CHENGKUANG XITONG

高兆奎 丁振举 宋史刚 著
韩要权 陈守余



中国地质大学出版社有限责任公司
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE YOUXIAN ZEREN GONGSI

图书在版编目(CIP)数据

祁连造山带与花岗岩有关的钨钼多金属成矿系统/高兆奎,丁振举,宋史刚,韩要权,陈守余著. —武汉:中国地质大学出版社有限责任公司,2011.5

ISBN 978-7-5625-2602-5

- I. ①祁…
- II. ①高…②丁…③宋…④韩…⑤陈…
- III. ①祁连山-钨矿床-成矿系列②祁连山-钼矿床-成矿系列
- IV. ①P618.605

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 053877 号

祁连造山带与花岗岩有关的钨钼多金属成矿系统		高兆奎 丁振举 宋史刚 著 韩要权 陈守余
责任编辑:赵颖弘		责任校对:戴莹
出版发行:中国地质大学出版社有限责任公司(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)		邮政编码:430074
电话:(027)67883511	传真:67883580	E-mail:cbo@cug.edu.cn
经 销:全国新华书店	http://www.cugp.eug.edu.cn	
开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16	字数:384 千字 印张:15 彩页:5	
版次:2011 年 5 月第 1 版	印次:2011 年 5 月第 1 次印刷	
印刷:武汉中远印务有限公司	印数:1—500 册	
ISBN 978-7-5625-2602-5		定价:88.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

目 录

第一章 前 言	(1)
§ 1.1 研究现状及选题依据	(1)
1.1.1 花岗岩成岩、成矿研究现状	(1)
1.1.2 研究区现状及主要问题	(8)
§ 1.2 研究内容与技术方法	(11)
§ 1.3 主要完成工作量与主要成果	(12)
第二章 区域成矿背景与成矿条件	(15)
§ 2.1 祁连造山带结构与建造特征	(15)
§ 2.2 祁连成矿带区域地球物理场特征	(16)
2.2.1 祁连山地层物性特征	(16)
2.2.2 重磁场特征	(17)
2.2.3 重磁异常解译	(25)
2.2.4 地球物理场与矿产分布	(28)
§ 2.3 祁连成矿带区域地球化学场特征	(31)
2.3.1 主要成矿元素地球化学异常特征	(31)
2.3.2 地球化学分布分配与组合分析	(35)
§ 2.4 祁连成矿带主要成矿系统和矿床组合	(45)
第三章 祁连造山带前寒武纪基底岩系年代学与构造演化	(46)
§ 3.1 前寒武纪基底岩系年代学框架	(47)
3.1.1 祁连地体前寒武纪基底岩系组成	(48)
3.1.2 祁连地块前寒武纪变质基底岩系的时代	(48)
3.1.3 祁连地块前寒武纪盖层岩系组成及时代	(56)
3.1.4 北祁连俯冲杂岩带前寒武纪岩系组成及时代	(57)
§ 3.2 前寒武纪基底岩系年代信息与构造属性	(61)
3.2.1 碎屑锆石年龄谱系与基底构造归属	(61)
3.2.2 变质岩、花岗岩 Nd 模式年龄与地壳增长历史	(64)
§ 3.3 祁连地块前寒武纪构造演化	(69)
第四章 祁连造山带结构、组成及古洋盆格局	(71)
§ 4.1 北祁连构造带结构与组成	(71)
4.1.1 蛇绿岩或蛇绿杂岩	(71)

4.1.2	岛弧火山岩与俯冲杂岩·····	(83)
§ 4.2	中南祁连构造带结构与组成·····	(84)
§ 4.3	柴北缘连构造带结构与组成·····	(85)
§ 4.4	祁连加里东造山带形成的构造体制·····	(86)
4.4.1	祁连地体与柴达木地块汇聚机制·····	(86)
4.4.2	祁连地体与阿拉善地块汇聚机制·····	(87)
4.4.3	祁连造山过程及时间·····	(87)
第五章	祁连花岗岩构造环境与岩浆源区特征 ·····	(88)
§ 5.1	祁连造山带花岗岩时代与分布·····	(88)
§ 5.2	花岗岩类岩石地球化学特征与构造属性·····	(89)
5.2.1	野牛滩岩体·····	(89)
5.2.2	野马南山、黑沟梁子花岗岩·····	(107)
5.2.3	小柳沟花岗岩·····	(115)
5.2.4	金佛寺花岗岩·····	(131)
5.2.5	其他花岗岩的构造属性和源区特征·····	(143)
§ 5.3	祁连造山带构造体制与花岗岩响应·····	(148)
5.3.1	不同阶段花岗岩成岩环境与源区组成变化·····	(148)
5.3.2	花岗岩对造山过程的响应·····	(150)
第六章	祁连造山带钨钼等成矿作用及其相关的花岗岩成矿系统 ·····	(152)
§ 6.1	典型矿床特征及其成因·····	(152)
6.1.1	塔尔沟钨矿床·····	(152)
6.1.2	小柳沟钨钼矿床·····	(161)
6.1.3	金佛寺钨钼多金属矿床·····	(177)
6.1.4	石硐沟银多金属矿床·····	(184)
§ 6.2	钨钼多金属成矿作用及主要控制因素·····	(190)
6.2.1	钨钼成矿作用·····	(190)
6.2.2	祁连成矿带银多金属成矿作用·····	(192)
6.2.3	祁连成矿带与钨钼多金属成矿有关的花岗岩成矿系统·····	(192)
第七章	祁连成矿带综合成矿预测和优化选区 ·····	(195)
§ 7.1	定量预测理论方法、准则和工作思路·····	(195)
7.1.1	综合预测准则·····	(195)
7.1.2	最优化准则·····	(195)
7.1.3	尺度对等准则·····	(195)
7.1.4	定量预测准则·····	(196)
§ 7.2	祁连成矿带区域矿产预测证据权模型及优化选区·····	(196)
7.2.1	矿产评价的证据权模型·····	(196)
7.2.2	铜矿床证据权预测与评价·····	(199)
7.2.3	钨、钼、金、铅锌矿床证据权预测与评价·····	(208)

第八章 结 论.....	(214)
§ 8.1 主要认识和进展	(214)
§ 8.2 存在问题或不足	(215)
参考文献.....	(216)
图 版.....	(229)

第一章 前言

祁连造山带位于秦祁昆中央造山带的中段,是中央造山带的主体构成之一。祁连造山带发育蛇绿岩、海底火山岩、俯冲杂岩以及高压变质岩,是中国蛇绿岩发育较齐全和最早应用板块构造理论研究造山过程与演化的造山带之一。同时,祁连造山带也是中国有色金属矿床的重要成矿区带,不仅发育以白银为代表的海底块状硫化物矿床,也发育与造山花岗岩相关的钨、钼、金、银等多金属矿床。因此,祁连造山带是研究造山过程中不同演化阶段构造体制和相关的金属成矿作用的有利地区。

§ 1.1 研究现状及选题依据

1.1.1 花岗岩成岩、成矿研究现状

花岗类岩石是组成大陆地壳的重要岩石类型,它的成生与大陆深部动力学过程及体制有密切的关系,是深部动力学的岩浆响应。已有的研究表明,花岗岩可以产出多种构造环境并与多种构造体制有关。由于许多热液矿床形成与花岗岩有关,因此二者关系一直是矿床学研究中研究时间最长、争议较多的问题。从 20 世纪上半叶花岗岩成矿观点一统天下,到 70 年代海底同生成矿等现象的发现而淡化了岩浆对成矿所起的作用,再到近年来对花岗岩在成矿中所起作用的再度重视,体现了人们对花岗岩成矿作用的认识经历了一个逐步深化的过程。一般认为不同类型的花岗岩具有不同的成分和成因,形成于不同的大地构造背景,而一定类型和成分的花岗岩中产生一定的成矿元素组合,因此,大地构造环境是控制花岗岩及成矿元素组合的重要因素(Pirajno,1992;汪雄武等,2002)。同时,花岗质岩浆的成矿还受控于源岩成分、氧化-还原状态、结晶分异程度和挥发组分等因素。

花岗类岩石作为壳内物质循环、质量-能量传输的重要载体,其形成对壳内物质组成、元素的再分配和热结构特征具有重要的控制作用。花岗岩的形成受控于深部动力学过程和大地构造环境,而元素的浓集则与元素地球化学行为相关,受控于岩浆形成时部分熔融、岩浆上侵过程中元素在晶体/熔体/流体间的再分配。因此,与花岗岩类有关的矿床,其形成不仅取决于岩浆源区含矿元素的丰度,也与元素在分异结晶和流体作用中的地球化学行为密切相关。而元素地球化学行为又与岩浆组分、温压条件、氧化-还原条件以及流体组分等有关。因此,从某种意义上看,大陆动力学提供了花岗岩成岩的动力和能量,而花岗岩的源区和岩浆演化则决定了成矿的可能性。

1.1.1.1 花岗岩类型与大地构造环境

通常认为花岗岩与大地构造环境之间存在密切联系(Pitcher,1983;Pearce et al,1984;Batchelor & Bowden,1985;Harris et al,1986;Barbarin,1999;肖庆辉等,2002)。目前对花岗岩成因分类,文献出现最多的是按照地球化学特征所划分的 I 型、S 型、A 型和 M 型。Chappell 和 White(1974)从花岗岩成岩物质的来源角度划分为 I 型和 S 型两类。徐克勤等则将花岗岩分为陆壳改造型、同熔型或壳-幔混源型。20 世纪 70 年代末还几乎同时提出了 A 型(Loiselle et al,1979)和 M 型花岗岩(Pitcher,1979,1983)。英国地质学家 Pitcher(1977)基于“不同成因类型的花岗岩代表不同的活动带”的观点,把不同类型的花岗岩与不同的构造环境相结合,提出了花岗岩的构造环境的分类方案,即将花岗岩成因的类型划分为海洋岛弧型(M 型)、活动大陆板块边缘型(科迪勒拉 I 型)、造山期后隆起区型(加里东 I 型)、克拉通褶皱带和大陆碰撞带型(S 型)、稳定褶皱带和克拉通的隆起-裂谷型(A 型)。这种分类的实质是建立在动力学构造环境与源区类型存在固定对应关系假设的基础上,而对不同历史演化阶段花岗岩类源区类型及形成方式有不同的控制作用,特别是对目前广为人知的花岗岩与软流圈或岩石圈地幔的热输入到地壳引起地壳深融、岩石圈减薄与伸展环境注意不够,因此对花岗岩成因类型与构造环境的关系远不是所设想的那样可以简单对应。90 年代以来,由于越来越多的证据表明,S 型和 I 型花岗岩在化学成分、同位素成分上发生重叠,而且这两种类型花岗岩中均存在岩浆型包裹体(Collins,1996;Alver,2000),表明有许多的镁铁质岩浆和/或其他火成岩浆卷入了这两类花岗岩浆。因此,Castro 等(1999)提出了混源(H)型花岗岩的概念,建议用 H 型花岗岩来代替 I 型花岗岩。

目前对花岗岩形成的大地构造环境判别,主要依靠岩石的地球化学标志(Pitcher,1983;Pearce et al,1984;Batchelor & Bowden,1985;Harris et al,1986;Barbarin,1999)。花岗岩地球化学图解可否用于构造环境判别一直存有争议。对此问题,中国科学院地质与地球物理研究所张旗教授等在 2007 年《岩石学报》上专门撰文《花岗岩构造环境问题:关于花岗岩研究的思考之三》进行了系统的讨论。他们认为“花岗岩地球化学性质主要反映的是花岗岩源区性质和构造环境,而非花岗岩形成时的构造环境”。因此,借助于地球化学判别图解所识别的构造环境,并不一定能够反映花岗岩本身形成的大地构造环境。

1.1.1.2 花岗岩源区与成矿

花岗岩源区是花岗岩研究中最令人关注的问题之一(张旗等,2008)。花岗岩源区通常被分为幔源、壳源和混合源 3 种(Barbarin,1999)。幔源通常被理解为由地幔熔融形成的玄武质岩石的再次熔融的产物(如 I 型花岗岩),而壳源则通常指地壳物质直接熔融的产物(如 S 型花岗岩)。不少人认为花岗岩的成分与构造环境有关:与岛弧有关的花岗岩具有幔源特点,多为 I 型花岗岩;而与碰撞有关的花岗岩则具有壳源特征,多属 S 型花岗岩。但越来越多的证据表明,花岗岩成因类型的主要控制因素是花岗岩的源岩而不是构造环境(Brown et al,1984;毛建仁等,1990;李兆鼎等,2003;张旗等,2008)。李兆鼎等(2003)认为特定的源岩可以被不同的构造作用过程所活化,结果产生相类似的花岗岩。花岗岩的地球化学特征所反映的主要是源岩的成分、性质、熔融和岩浆结晶的过程,而不是岩浆生成时的构造环境。即使构造环境相同,不同地区花岗岩的特征也不尽相同(张旗等,2008)。实验岩石化学也证实,岩浆化学成分主要取

决于源岩的成分和残留体的矿物组合,其次才是温度、氧逸度和水活度等(Patino Douce et al, 1991, 1995, 1999)。花岗岩的多样性主要取决于源岩特征,不同的源岩熔出不同花岗岩已经被越来越多的人所承认(Gerdes et al, 2000)。

不同成因的花岗岩所伴生的矿床类型有所不同,即花岗岩成矿专属性差异。I型花岗岩有关的矿产主要以上地幔中较富有的铁、铜、钼为主,还有金、银、铅、锌、硫等。矿床类型有斑岩型、矽卡岩型、热液叠加型、玢岩型和中低温热液型。S型花岗岩主要以在地壳中丰度较高元素,如W、Sn、Nb、Ta、Bi、REE、Be、U等浓集成矿为主。矿床一般产在大岩基浅部、顶缘或边缘的小岩体接触带,有强烈的蚀变交代,常出现明显的蚀变-矿化分带,以蚀变花岗岩型、云英岩型、矽卡岩型、脉型等热液矿床为主。A型花岗岩有关的矿产则主要以铁、铌、稀土、金、铍、铀、锆、锡、萤石和磷灰石等矿产为主。正如前面所讨论的,成矿专属性很大程度上取决于源区组成特点。

除源区控制花岗岩成分及成矿专属性之外,温度是制约花岗岩浆形成的主要因素。地壳中典型的地温梯度为 $20^{\circ}\text{C}/\text{km}$,平均厚度 $35\sim 40\text{km}$ 。虽然在水饱和的条件下岩石发生初熔的温度最低可达 650°C ,但由于实际的岩石熔融大多是在缺水条件下发生的,并且受到源岩成分对固相线以及熔融度对岩浆分凝的制约,因此,一般地壳岩石通常在 800°C 以上才能形成岩浆(Thompson, 1999)。研究表明,即使在 40km 深度的莫霍面上,温度也只能达到 370°C (古老地盾)至 610°C (年轻的地壳)(Chapman, 1986),远低于实验岩石学所阐明的花岗质熔体与麻粒岩共生的温度。因此,除非有大量的热能和/或水加入,否则大规模的熔融通常难以在地壳范围内发生。在缺水条件下,只有在造山带才能在下地壳达到形成花岗岩浆的温度。因此,在非造山地区,花岗岩的形成必须要求有下伏地幔基性岩浆侵入所提供的热量,即岩浆底垫作用。在分离板块边缘,如大洋中脊、板块内部热点或裂谷来自地幔的玄武质岩浆上涌-底垫-加热是造成地壳部分熔融的有效过程。

水是地壳温度、压力条件下影响地壳部分熔融形成花岗质岩浆的另一个重要因素。地壳部分熔融所需的水主要来自3个方面:①邻近围岩;②洋壳俯冲-变质-脱水反应;③岩石本身的含水矿物。第一种仅具有局部意义,后两种可以促使大规模的地壳部分熔融。常见的含水造岩矿物是白云母、黑云母和角闪石,它们广泛分布于各种沉积岩、变质岩和中酸性火山岩中。在地壳俯冲-挤压-增厚的俯冲造山后期,岩石会因流体的加入而产生少量的部分熔融($<25\%$)。大洋岩石圈俯冲过程中,细碧岩转变成高压绿片岩或蓝片岩,随着温度、压力增高和脱水反应的发生,进而变质为角闪岩,最终形成榴辉岩。变质脱水反应能使上覆地幔楔和下地壳发生部分熔融。因此含水矿物的脱水熔融是形成花岗岩浆的重要机制。

形成花岗岩浆的源区岩石组成及其含水量决定了部分熔融的温度和岩浆中水的含量。白云母、黑云母和角闪石在平均地热梯度脱水熔融时水的含量,从白云母 $8\%\sim 10\%$ 到黑云母 $3\%\sim 5\%$ 再到角闪石 $2\%\sim 3\%$,水的含量逐渐降低(图1-1)。可见在地热梯度条件下,首先形成的岩浆将含有 7.4% 的水(点A),而如果源岩主要以黑云母作为含水相,则形成岩浆的水含量将仅为 3.3% 。类似地,如果角闪质的源岩脱水熔融,形成的岩浆将含有 2.7% 的水。很明显,不同地壳水平起源的花岗岩浆将含有不同的水。因此,起源于不同源岩的岩浆,其水的含量将有明显差异。同时,不同组成的源岩发生熔融的温压条件也不同:白云母或含黑云母和白云母的源岩相当于变质沉积岩,很可能产生出过铝质组成的S型花岗岩。这种类型花岗岩含有较高的初始水,相对较“湿”,与Sn-W-U矿化组合关系密切。相反,含黑云母或黑云

母和角闪石的源岩,相当于变质火山岩,其脱水熔融将形成偏铝质的、初始水含量相对较低的“干”的I型花岗岩,经常产出斑岩型Cu-Mo矿床系列。

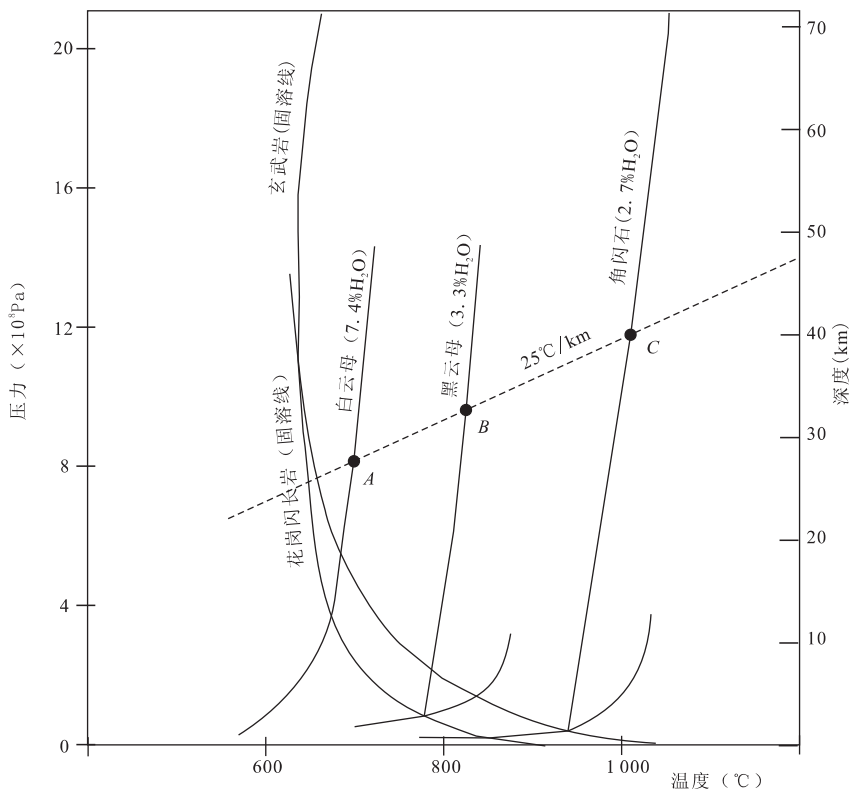


图 1-1 在平均地热梯度条件下白云母、黑云母和角闪石脱水熔融的温度-压力关系
(A、B、C 点分别代表不同的初始水含量)

花岗岩浆中的水同样可能控制着岩浆的侵位深度。与花岗岩有关的矿床,如斑岩铜矿、浅成低温热液金-银矿床与高侵位的岩浆有关。这些类型的矿床普遍位于火山或次火山环境。其他类型的矿床,像斑岩型的 Mo 和花岗岩类的 Sn-W 矿床一般与侵位相对较深的岩浆有关。岩浆侵位深度、岩浆组成以及初始水含量对研究和确定与花岗岩类有关的矿床的特征和成因具有重要意义。

以白云母为主的岩石可能在较浅的地壳水平条件发生脱水熔融,而角闪石源岩的脱水熔融发生需要较深地壳水平条件。因此 I 型花岗岩浆将由深部地壳派生,部分可能有上地幔的贡献。而 S 型花岗岩浆产生于相对较浅的中到下地壳。几个研究者用这个概念发展成了成矿与花岗岩侵位深度相关联的成矿模式(Hyndman, 1981; Strong, 1981)(图 1-2)。

图 1-2(a)显示岩浆自初始熔融点开始在地壳内向上迁移,直到切穿水饱和的花岗岩固熔线而固化停止上侵。实际情况中由于岩浆上侵过程中不断地向围岩散失热量,可能在达到固熔线之前就会固结。因此 S 型花岗岩浆将可能侵位到中地壳深度($4 \times 10^8 \sim 5 \times 10^8$ Pa), I 型花岗岩将侵位到更浅的地壳水平(1×10^8 Pa 或更少)。图 1-2(b)显示侵位深度与各种花岗岩有关的矿床类型成矿特征之间的关系。I 型花岗岩浆产生于岩石圈深部,通常形成于靠近俯

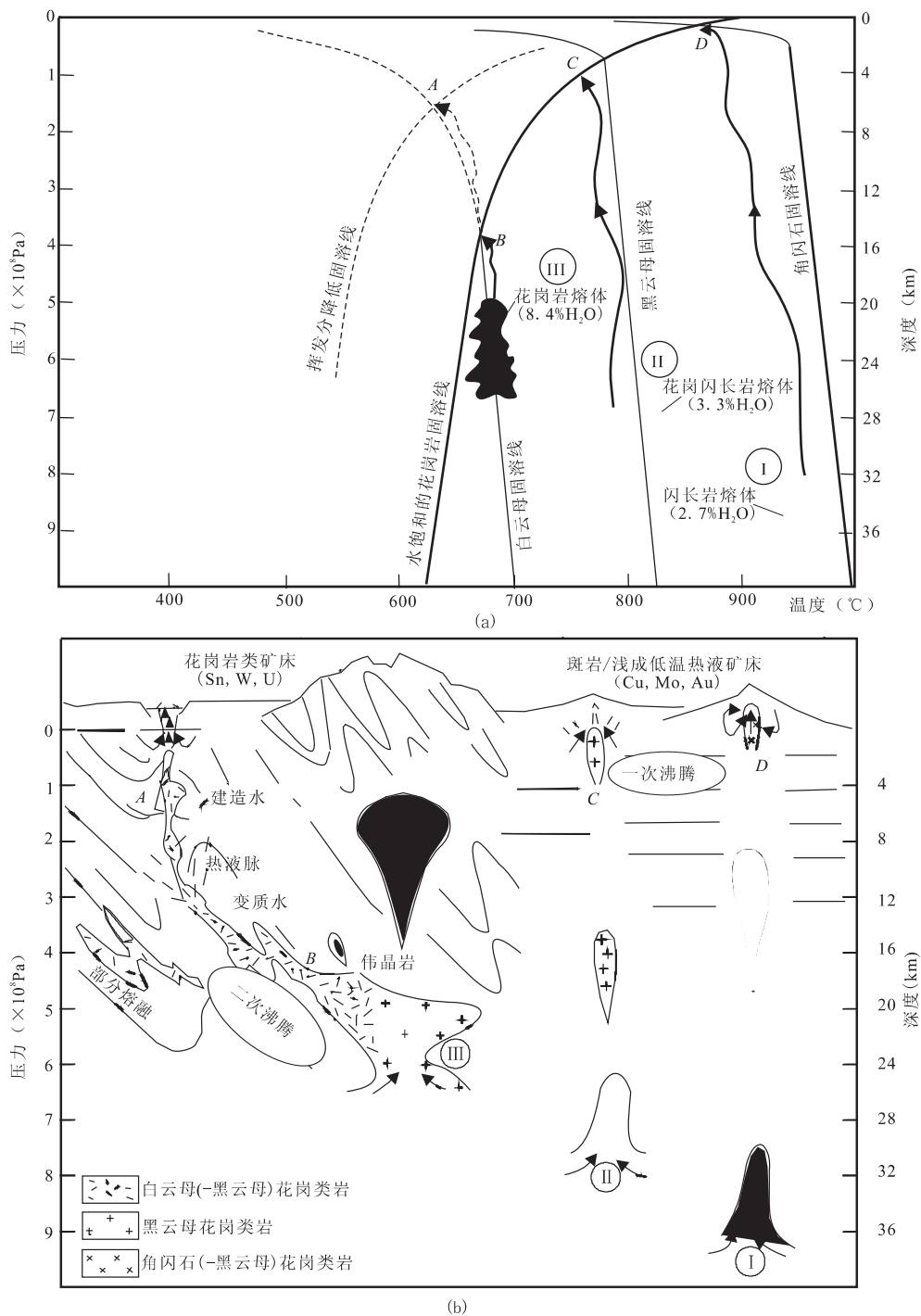


图 1-2 花岗岩侵位水平与成矿特征关系模式

(据 Strong, 1988)

冲带的位置,普遍接受来自地幔派生出的镁铁质岩浆的贡献。形成于相对高温(1 000℃或更高)、较干(<3%~4%水)的环境,可以上侵到较浅的地壳甚至喷出地表形成火山机构。这样的岩浆将发生气相沸腾,促进水力破裂、角砾岩化作用,发生围绕岩体的流体循环。这是斑岩铜、浅成低温热液 Au-Ag 矿床类型发育的有利环境。

相反,S型岩浆主要由沉积岩在中到下地壳水平上部分熔融形成,熔体形成温度相对较低(700℃左右)、具有较高水含量。这样类型的岩浆结晶于中地壳深度,并不远离其生成的地点,一般相对贫化。然而,如果有重要的结晶分异作用发生,不相容元素将在残留岩浆中趋于富集。在残留熔体中因为二次沸腾同样达到水流体饱和,形成伟晶岩及相关的矿床。挥发分以及水从残余岩浆的析出,将降低水饱和固熔线的温度,使岩浆继续向上迁移至地壳的高位。在这种情况下,流体的压力可能不足以使岩石破裂,但其他的构造因素将因此促进流体的循环,产生云英岩化的 Sn 矿床、斑岩型 Mo 矿床和多金属矽卡岩、中温热液脉型矿床。

斑岩型铜-钼矿床成矿一般认为与俯冲板块或陆内俯冲机制有关。但斑岩型钼矿无论在空间的分布位置和含矿岩体方面都与斑岩铜矿存在一定的差异。斑岩钼矿一般分布于环太平洋成矿带的外带,这些地带都有老的前寒武纪基底或较老的褶皱基底分布。这一现象在秦岭、祁连等地区具有普遍意义。为此,胡受溪等(1984)曾指出矿源层对斑岩钼矿的形成具有重要的控制作用。

Cu 与 Mo 在花岗岩浆结晶分异过程中地球化学行为是不同的,前者为相容元素,倾向于优先进入矿物晶体中,而后者为不相容元素,倾向于在残留的熔体中富集,因此结晶分异作用对两者有着截然不同的影响。两者之间的关系可用图 1-3 来加以说明。

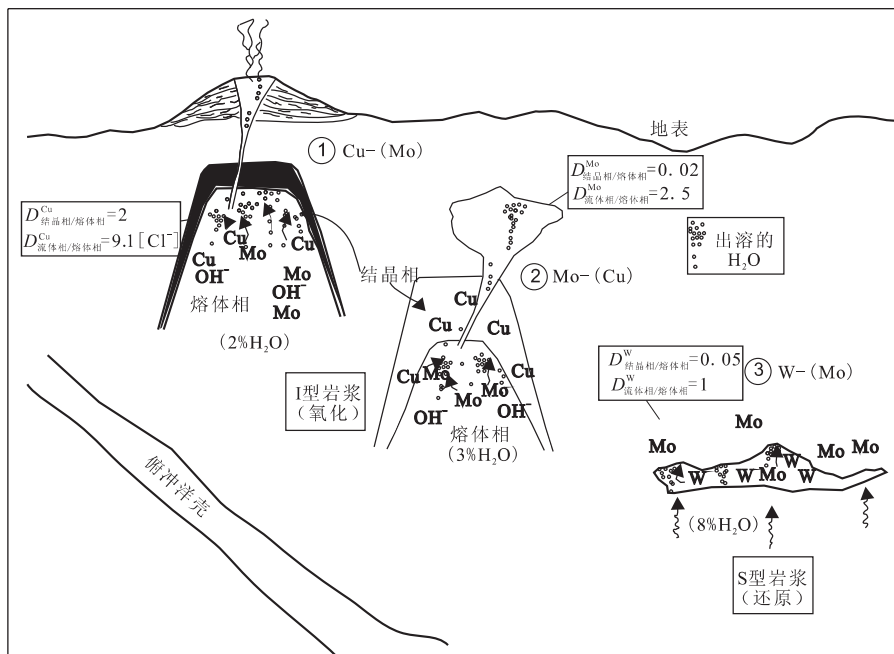


图 1-3 斑岩铜、钼、钨矿床成矿模式

(据 Candela & Holland, 1984, 1986; Strong, 1988; Candela, 1992)

花岗岩浆上侵过程中岩浆结晶分异作用将使 Cu 进入矿物中,而分散于岩体内部,不利于元素的集中和富集成矿。同时,Cu 在流体/熔体之间,优先进入流体相,且分配系数与流体盐度呈正比,因此铜的成矿有利条件是低的分异程度和高盐度流体存在。而对 Mo 而言,岩浆的分异演化将促使 Mo 在残留熔体中进一步富集。同时 Mo 在流体/熔体之间的分配与流体的盐度无关,优先进入流体相,但较 Cu 的分配倾向要弱。因此,高位侵位的花岗闪长岩浆将形成以铜为主、含有少量钼的斑岩 Cu-(Mo)矿床。相对含铜斑岩,含钼斑岩也许起源于更富水的源岩,岩浆也不能像含铜斑岩那样侵位于地壳浅部,在水达到饱和之前重要的结晶分异作用可能发生,而分异作用可使铜进入早期结晶的矿物,而在后期的残留熔体中发生亏损,此时尽管 Cu 较 Mo 有向流体更强的分配倾向,但因熔体中 Cu 的亏损,而使形成的矿化以 Mo 为主。

斑岩型钨矿主要与 S 型花岗岩有关。正像图 1-3 所显示的那样,W 矿主要分布在离俯冲带更远的位置。Candela(1992)强调富钨斑岩矿床与更还原的、钛铁矿的 S 型花岗岩之间的关系。这种花岗岩通常在相对较深的地壳水平发生结晶作用。相对氧化的 I 型花岗岩,W 从岩浆热液系统中抽取而进入矿体的效率较低。因此,W 一般不是斑岩铜钼矿床的正常组分。然而,在还原条件下,W 在晶体/熔体分配过程中显示不相容的地球化学行为,因此将伴随结晶分异程度的增加,而趋向在熔体中富集。当变沉积岩部分熔融形成 S 型花岗岩的过程中,熔体将是相对富水的,并在地壳深部发生结晶作用。在此种情况下,岩浆饱和水的含量相对较高,在达到水饱和之前,将有重要程度的分异结晶作用发生。由于 W 是强不相容的,而 Mo 相对 W 显示相容性,因此,随岩浆演化,W/Mo 比值将增加,Mo 的浓度降低。在流体达到饱和而从岩浆析出时,因为 W 相对 Mo 向流体分配的倾向弱,W 在流体饱和之前已具相当的浓度。所以 W 矿床将与低侵位的、高度分异的 S 型花岗岩相伴,而仅有少量的 Mo 含量。现知的黑钨矿-石英脉型矿床几乎无例外地与改造型花岗岩有成因联系,而且常与多旋回构造演化的中晚期花岗岩有关。环太平洋成矿带内带没有斑岩型钨矿存在,而钨矿主要分布在褶皱基底上形成的改造花岗岩内,受基底含钨性质的明显控制。

以上讨论不难看出,花岗岩与钨钼矿床的关系,不仅取决于岩浆源区组成,同样也与元素的地球化学行为有关,而源区组成对成矿控制重要性可能更大。

1.1.1.3 中国钨钼的大规模成矿的若干特点

我国钨钼矿产在国际上占有重要地位,是钨钼矿产的重要生产国和输出国。钨在世界上分布极不均匀,我国华南钨成矿区仅占世界陆地面积的 0.7% 左右,却集中了超过一半的世界钨矿储量。而小秦岭地区钼矿床则是中国最主要的钼矿床集中产区。

根据多年的研究,对华南钨矿成矿条件的认识已逐渐趋于一致,华南钨矿成矿主要受改造型花岗岩的控制,而改造型花岗岩的 W 丰度受到原始岩石丰度的制约,普遍具有较高的含量,因此花岗岩的源岩 W 丰度对花岗岩的含矿性控制对该区大范围成矿具有根本的约束。其次,岩浆的分异演化对矿床的形成作用明显,演化晚期的岩体相对早期的花岗岩 W 含量明显增高。因此,华南钨矿成矿集中区钨矿化,形成了以改造花岗岩为主,包含斑岩型、矽卡岩型、石英脉型,以及具有层控特征的黑钨矿或白钨矿矿床。

小秦岭地区钼矿主要和燕山期花岗岩类有关,主要产在秦岭造山带主造山后由挤压向伸展转化的阶段,岩浆岩为壳-幔混源的同熔型浅成侵入岩,矿化类型包括斑岩、矽卡岩及二者复合型 and 脉型。岩体侵位于太华群或熊耳群中,钼可能主要来自深源,但不排除基底岩石对其的贡献。

1.1.2 研究区现状及主要问题

1.1.2.1 研究现状

祁连地区地质调查可以追溯到 19 世纪 70 年代,至今已有 120 多年的历史。解放前由个别学者通过路线地质考察,对祁连地层系统、地质构造特征鉴定和构造单元划分等开展了许多开拓性的地质工作。而系统又全面的地质调查工作则主要是在新中国成立后开展的。1956—1958 年,以中国科学院地质研究所及兰州地质研究室、北京地质学院等单位为主体组成的祁连山队,对祁连山地层、古生物、岩石、构造和矿产进行了全面调查,出版了 4 卷《祁连山地质志》,较全面地提供了有关祁连山区域地质、地质发展史、构造岩相带和矿产分布规律等基础地质资料。

20 世纪 70 年代后期,随着板块构造理论引入中国,以及一些新的地质找矿手段的运用(如化探方法),祁连地区的基础地质研究和找矿工作进入了一个新的发展阶段,相继对祁连地区蛇绿岩、高压变质带、俯冲杂岩、构造变形、海相火山岩、板块构造体制和板块动力学等开展了专题研究。李春昱等(1975,1978)最先提出了祁连山存在板块构造体制;肖序常(1978)对祁连蛇绿岩的论述,则确立了北祁连早古生代洋壳的存在;吴汉泉(1980)以对北祁连高压变质岩的研究对进一步确定祁连古板块构造体制具有重要意义。此后,左国朝等(1987)对北祁连板块碰撞拼合和构造演化进行了论述,对进一步确立祁连板块构造格架奠定了重要基础。

进入 90 年代以来,随着国家“八五”攻关项目和自然科学基金项目在祁连的实施,对祁连山蛇绿岩等板块构造基础问题和与海底块状硫化物矿床成矿和找矿有关问题进行了系统的研究。夏林圻等(1991)根据北祁连海相火山岩研究,确认了北祁连沟-弧-盆构造体系的存在。许志琴等(1994)通过对北祁连俯冲杂岩增生的动力学机制的研究,提出了俯冲带向洋退却的岛弧增生动力学模式。张旗等(2001)在所著《中国蛇绿岩》一书中,对祁连造山带蛇绿岩的类型、属性等进行了系统的总结。冯益民等(1996)所著的《祁连大地构造与成矿作用》、邬介人等(1994)所著的《西北海相火山岩地区块状硫化物矿床》以及夏林圻等(1996)所著的《北祁连山海相火山岩岩石成因》等,对祁连造山带海相火山岩的成因、构造属性以及与海相火山岩有关的火山块状硫化物矿床的成矿机制、成矿动力学环境等进行了研究,极大地提高了整个祁连火山作用及其成矿作用地质认识水平。

近年来围绕祁连山成矿有关的系列专著相继问世,如汤中立等(2002)《华北古陆西南缘(龙首山-祁连山)成矿系统及成矿构造动力学》、毛景文等(2003)《北祁连西段铜金铁钨多金属矿床成矿系列和找矿评价》、李文渊(2004)《祁连山岩浆作用有关的硫化金属矿床成矿与找矿》、贾群子等(2007)《祁连山铜金钨铅锌矿床成矿规律和成矿预测》等,正如不同专著的题目一样,分别从不同角度或尺度探讨了祁连造山带的金属成矿与找矿问题。

除此之外,许多学者从变质作用、沉积作用和花岗岩对板块构造作用过程的不同响应角度,利用年代学、地球化学等方法从不同的侧面对祁连前寒武纪基底构造属性、板块构造演化 and 造山过程等细节作出了进一步限定。这些研究成果,对进一步认识该区矿床产出的地球动力学环境、形成机制具有重要的意义。但正如人们对任何问题的认识都受当时理论或方法限制,具有局限性一样,对祁连造山带基础地质和成矿地质的认识方面都存在着许多有待进一步

明确或需要进一步补充完善之处。

1.1.2.2 主要问题

1. 前寒武纪中祁连地块的归属问题

前寒武纪中祁连地块归属的认识,直接牵扯到祁连古洋盆的发育基础问题。“中央造山带”在西秦岭以西的祁连—柴达木—昆仑地区由众多微陆块和分隔这些微陆块的早古生代蛇绿岩带组成,构成条块分割格局,总体为多岛洋的构造格局(潘桂棠等,1996;殷鸿福等,1998;陆松年等,2004;许志琴等,2006,2007),北祁连作为柴达木—中祁连板块与华北板块的缝合带,已是不争的事实(李春昱等,1978;肖序常等,1978;左国朝等,1987;夏林圻等,1991;许志琴等,1994;冯益民等,1996;张旗,1997)。但这些蛇绿岩带所代表的古洋盆是统一大陆裂解、洋盆化的结果,还是洋盆原本就已经存在呢?这直接涉及到对早古生代中央造山带古洋盆的认识问题。对北祁连早古生代洋盆发育背景目前主要存在两种观点:一种认为中祁连地块是在新元古代从华北地块裂解出来,经过裂谷、洋盆化形成古祁连洋,到奥陶纪—志留纪时伴随古祁连洋的闭合,再拼贴回华北地块(左国朝等,1987;夏林圻等,1991;冯益民等,1996)。另一种认为祁连地块原非华北地块的一部分,是新元古代从扬子地块(冈瓦纳大陆)裂解出来的,所谓的古祁连洋原本就是存在于劳亚大陆和冈瓦纳大陆之间的大洋,即属于原特提斯洋的一部分(万渝生等,2003;徐旺春等,2007;董国安等,2007)。因此,其争论的关键在于中祁连地块在前寒武纪时的归属问题,即中祁连古陆块是属于华北陆块还是归扬子陆块。

在以往传统的认识中,中祁连、欧龙布鲁克(全吉)、柴达木等这些较小的微陆块一般被当作从华北—塔里木古陆块裂离出来的碎块。近年来随着同位素年代学进展以及碎屑锆石 U-Pb 年代学数据的积累,根据不同陆块碎屑锆石 U-Pb 年龄谱、Nd 模式年龄谱系所记录的岩浆—热事件,来比对不同陆块构造演化和增长的历史,进而判断其相互之间的亲缘关系,已成为恢复古大陆和研究古陆归属的一种重要方法。从现有的碎屑锆石、岩浆锆石 U-Pb 年龄数据到变质岩和花岗岩的 T_{DM} 年龄谱系特征,均支持中祁连与扬子陆块更具亲缘性的观点。祁连地块和扬子地块应同属新元古代冈瓦纳大陆的一部分,它们是在新元古代末期从冈瓦纳大陆裂解出来,并进入当时冈瓦纳大陆与西伯利亚陆块、北美陆块和波罗的陆块之间的原特提斯构造域(潘裕生,1994;潘裕生等,1996;Xu et al,2000;陆松年等,2004;董国安等,2007)。故此认为古祁连洋应是原本就存在于华北与扬子之间的大洋,而非从华北陆块裂解的基础上经洋盆化后所产生。但很显然,对中祁连地块的归属问题还远未解决,目前的证据也是粗线条的,有待更多更精确的地质地球化学工作。

2. 早古生代洋板块的俯冲极向问题

虽然对北祁连在早古生代洋盆的存在争议不大,但对洋盆俯冲极向认识却存在较大的分歧。多数人也主张北祁连通过向北俯冲而闭合(许志琴等,1994;夏林圻等,1991,1996;冯益民等,1996;张建新等,1997)。北祁连早古生代活动陆缘增生带位于阿拉善地体与祁连地体之间,发育宽 60~80km 的“弧—沟—盆”体系,包括火山岛弧带、弧前增生楔、弧后盆地,它们与由蛇绿岩、高压变质带、混杂堆积组成的俯冲杂岩带相伴随。根据早古生代“弧—沟—盆”格局的空间展布和具有造山极性的早古生代韧性逆冲构造研究,表明两地块间曾有洋盆发育和祁连地体俯冲于阿拉善陆块之下(Xu et al,2000)。少数人持有北祁连洋向南俯冲的观点(王荃、刘雪亚,1981;宋述光,1997)。向南俯冲的主要证据为北祁连存在南北两条俯冲杂岩带,其中南带

为深层次俯冲杂岩,北带为浅层次俯冲杂岩(宋述光,1997)。另外,近年花岗岩大地构造学和年代学研究也提供了可能向南俯冲的证据(吴才来等,2006)。因此,除了向北俯冲、向南俯冲观点外,还存在第三种认识,即北祁连洋盆沿南北两大陆边缘分别向中祁连地块、阿拉善地块双向俯冲(李春昱,1978;左国朝等,1987;吴才来等,2006)。新近在北祁连东段石洞梁岩体、北祁连牛心山岩体被认为其具有埃达克岩石(王金荣,2006)或岛弧花岗岩(吴才来等,2006)的属性,因此北祁连造山带存在双向俯冲的可能性较大。

造成上述意见分歧的很大原因,是以往多侧重于某一方面的证据,而缺少从构造、岩浆、沉积等方面多重限制。特别是以往工作中,对作为造山过程中主要岩浆响应的花岗类岩的研究较为薄弱,既缺少对花岗岩系统对比分析,又缺乏必要的年代学和同位素地球化学资料的限制,由花岗岩所提供的本区俯冲极性的信息非常有限,需要进一步加强。

3. 祁连花岗岩成矿与找矿问题

花岗岩成岩成矿受板块构造体制的制约。不同板块构造体制的岩体可能发育不同的成矿系统。因此对祁连花岗岩的成岩成矿特征需要在大的动力学背景下去分析。由于祁连地区以往的工作多围绕火山成矿作用进行,对花岗岩有关的成岩或成矿作用研究较少,主要表现在许多与成矿有关岩体缺乏精确的年代学数据,有些岩体虽然开展过同位素定年工作,但由于方法等方面限制,其数据可信度低。

从现有的年代学数据来看,除少数花岗岩时代为元古代外,其他都集中于加里东期:野牛滩岩体锆石 U-Pb 年龄(459.6 ± 2.5)Ma(毛景文等,2000);金山寺岩体 Rb-Sr 年龄 404—420Ma(张德全等,1995);柴达诺尔岩体 Sm-Nd 等时线年龄 427Ma(夏林圻等,2001);北祁连东部的黄洋河岩体和井子川岩体锆石 SHRIMP 定年分别为 372—408Ma,平均 383Ma 和 (464 ± 15)Ma(吴才来等,2004);老虎山闪长岩体单颗粒锆石 U-Pb 年龄 423Ma(钱青等,1998);中祁连野马南山两个岩体分别获得锆石 U-Pb 年龄 444Ma 和 445Ma;南祁连柴达木山花岗岩的锆石 SHRIMP 定年 435—436Ma,平均 446Ma(吴才来等,2001);噶崂山花岗岩锆石 SHRIMP 定年 445—496Ma,平均 473Ma(吴才来等,2001)。但总起来看,整个祁连造山带花岗岩同位素年代数据还是偏少。另外,祁连地区花岗岩也缺乏系统地质学、地球化学研究和对比,尚缺乏从区带尺度上对花岗岩浆源区组成、时空演化和分布特征与祁连造山之间的动力学关系的系统对比研究。

根据目前有限的同位素年代数据和常量、微量的地球化学资料,祁连造山带加里东期花岗类岩石多为俯冲或同碰撞花岗岩。从矿化与岩体在空间上的关系看,目前所发现的祁连钨钼矿床或异常区均与花岗岩有关。但除个别矿床或岩体具有可靠的年龄数据外,祁连钨钼矿床(点)或缺乏岩体的年龄或缺乏成矿的年龄,缺少从时间角度对矿化与岩浆活动之间必要的限制。

随着地质找矿难度的加大,地质找矿越来越依赖于成矿区地质找矿模式或模型的理解和运用。运用矿床模型开展找矿评价的关键是正确识别矿床类型,合理运用矿床模型,把握矿化之间的时空关系,正确部署探测工程,达到预期目标。合适的地质找矿模型建立和适当的运用,对指导区域矿产的找矿战略部署以及矿区的矿床勘查都具有重要意义。

围绕花岗岩体所建立的成矿蚀变分带模式、钨矿“多层楼”分带模式、斑岩或次火山岩有关的浅成低温热液矿床的模式等都对地质找矿起到了重要的指导作用。单个矿床模式或模型在祁连地区的某些矿区的找矿工作中已得到初步应用。如根据花岗岩元素分带模式在塔尔沟钨

矿外围找到了石硐沟银多金属矿床。目前所提出的模型主要考虑了岩体温度对元素分带的控制,但岩体对矿床分带的控制其实际情况可能要复杂得多,需要从成矿要素角度来进一步研究各要素与花岗岩的关系。另外,祁连花岗岩多表现 I-S 型过渡特征,已有成矿模式未必符合或能够概括祁连的矿床实际特点。因此,以祁连的花岗岩和矿床为研究对象,以便建立适合祁连造山带实际情况花岗岩钨钼成矿模式,即祁连地区花岗岩成矿系统模型,将对祁连的地质找矿与评价具有重要的指导意义。

4. 祁连地区金属矿产预测与评价问题

祁连地区经历了广泛而强烈的加里东造山作用,发育了包括俯冲-碰撞和造山后不同类型的岩浆岩,为与花岗岩有关矿床的形成奠定了重要的物质和能量基础。通过大量地质、矿产、物化探、遥感资料的整理和研究,经过多轮次、多矿种、单矿种和多比例尺的成矿预测工作,目前已圈出了成矿远景区 69 处,其中 A 类 5 处,B 类 23 处,C 类 49 处。1994 年完成的甘肃省两轮成矿远景区划工作将祁连金属成矿带划出Ⅳ级成矿带 17 个,Ⅴ级成矿带 38 个。资源总量预测,预测铜资源量 1 000 万吨以上,铅锌 800 万吨以上,金 600 吨以上。由于这些数字只是根据少数矿床所进行的预测得到的,其可信度总体来看较低。诸如近年来找矿工作显示有较大潜力的钨、钼、优质锰等矿产的找矿潜力尚不清楚。另外,因为祁连地区地质研究或工作程度总体较低,其资源量预测无论是精度还是可信度都需进一步提高。

在该区 1 000 多处矿产地中,作出勘查评价的尚不到 20%,而且有些评价极不彻底。近期完成的 1:20 万化探扫面,仅对极少数化探异常进行查证,绝大多数未查证的异常区具有良好的找矿前景,亟待进一步工作。因此需要在对已有资料充分分析研究的基础上,运用新的成矿理论,利用新的找矿方法和数据处理手段(如基于 GIS 的多源信息复合找矿与评价方法等),对已有找矿线索的有利成矿前景地区开展新的矿产资源评价工作,是祁连地区扩大找矿成果,实现找矿重大突破的切实可行的方法之一。

鉴于目前祁连钨钼矿床成矿与找矿所存在的问题,甘肃省有色金属地质勘查局与中国地质大学(武汉)先后于 2004 年和 2008 年联合开展了“祁连成矿带多金属矿床成矿规律与找矿靶区优选”和“祁连西段多金属矿床预测研究”项目,项目的科研任务是以解决祁连钨钼矿床成矿与找矿问题作为主要目标,以与成矿关系密切的花岗岩作为研究对象,以构建祁连与钨钼成矿有关花岗岩成矿系统作为研究的核心,以期实现对祁连钨钼矿床找矿的战略部署和为选区优化提供理论指导。两课题的主要任务虽各有侧重,研究范围和研究的内容也各有不同,但总体目标与研究内容都是围绕祁连的钨钼矿床成矿与找矿两方面所展开的,相互之间存在密切的联系。本书即是在上述课题研究成果的基础上,对与祁连造山带花岗岩有关的成矿和找矿问题研究过程中取得的认识和成果的总结。

§ 1.2 研究内容与技术方法

本书以区域成矿系统理论和板块构造作为指导,以典型矿床作为重点解剖对象,通过野外地质调查、室内观察研究,将宏观地质研究与微观的地球化学示踪相结合,在区域成矿地质背景、成矿构造体制研究基础上,通过典型矿床解剖,对祁连钨钼矿床成矿要素、成矿条件和控制因素及成矿作用特征进行了系统对比和总结。特别通过对小柳沟钨钼矿床、塔尔沟钨矿、石硐

沟银多金属矿床以及金佛寺等典型钨钼矿床的剖析,采用多种地质和地球化学方法,包括稳定同位素、放射性同位素、同位素年代学和元素地球化学等,从成矿物质来源、流体来源以及成矿年代等方面对矿床与早古生代花岗岩之间的关系进行了论证。在此基础上,构建了祁连西段钨钼矿床成矿的花岗岩成矿系统模式。

在成矿模式研究基础上,根据祁连地区已有的地质、物探、化探和遥感资料,采用 GIS 多源信息处理方法及技术手段,对资料进行了二次开发和处理,基于证据权法和多元信息的融合处理,开展了祁连地区钨钼多金属矿床的定量预测研究,对有利成矿区进行了评价和优化,圈定了进一步工作的有利区域。

§ 1.3 主要完成工作量与主要成果

本书是在已有工作基础上,先后于 2003 年、2004 年、2006 年、2007 年数次到祁连地区开展野外地质调查工作,实地考察了包括小柳沟钨钼矿床、塔尔沟钨矿、石硐沟银多金属矿床、朱岔钨矿点、后长川钨矿点、石居里铜矿、镜铁山铜铁矿床、吊达坂铅锌矿带牛毛圈铅锌矿点、白银铜多金属矿床及其白银外围的猪嘴哑巴铜矿床、石青铜铅锌矿床等。与本书有关的主要实物工作量如下:

(1)野外路线地质调查剖面	100km
(2)采集岩石、矿石标本	240 块
(3)岩石薄片、光片及测温片	114 件
(4)岩石化学常量元素分析	44 件
(5)微量与稀土元素 ICP-MS 分析	44 件
(6)成矿元素分析	44 件
(7)流体包裹体镜下测温	28 件
(8)激光拉曼光谱分析	21 件
(9)氢-氧同位素分析	15 件
(10)流体成分气相、液相成分分析	10 件
(11)硫同位素分析	10 件
(12)铅同位素分析	15 件
(13)白云母 Ar-Ar 定年样品	3 件
(14)辉钼矿 Re-Os 定年样品	2 件
(15)流体包裹体 He-Ne-Ar 同位素分析	9 件
(16)多源地学信息处理机时	500 小时
(17)野外及镜下照片	400 余张

本次研究取得了如下主要认识和成果:

(1)在收集前人资料的基础上,根据不同地块锆石和 Nd 模式年龄 T_{DM} 谱系结构特征及所揭示的构造-岩浆-变质等热事件信息,对分布于北祁连、中南祁连的前寒武纪基底陆块的构造属性进行了综合分析和对比,进一步确认了北祁连前寒武纪基底陆块与祁连陆块同属冈瓦纳大陆的一部分。因此,前寒武纪时祁连陆块不是华北克拉通的一部分,祁连洋也不是在华北陆