

Metallogenic prediction in big-data age

— Research on Late Paleozoic Mineralization Systems Simulation in western Tianshan

大数据时代的成矿预测

——西天山北部晚古生代成矿系统仿真研究

夏 换◎著



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

大数据时代的成矿预测

——西天山北部晚古生代成矿系统仿真研究

Metallogenic prediction in big-data age

——Research on Late Paleozoic Mineralization Systems Simulation in western Tianshan

夏 换 著



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

内容摘要

本书介绍了西天山北部的地质背景,包括地层分布、岩浆岩、地质构造和矿床分布特征等;归纳了西天山古生代的大量数据,对研究区地层、构造、成矿系统和典型矿床进行了解剖,重新厘定了晚古生代西天山北部各构造单元的大地构造属性,对其构造演化历史进行了仿真。通过对海量数据的分析,对区域内石炭纪活动大陆边缘成矿系统和二叠纪后碰撞阶段构造转换背景成矿系统进行了仿真,并对该区两大成矿系统内部的金、铜、铁和铅锌矿床的特点、成矿类型、成矿规律、控矿机制以及成矿模式进行了讨论。

本书读者广泛,西天山进行地质工作的科研人员,大数据分析工作的相关行业从业人员,构造地质学、古生物学与地层学、地球化学、矿床学等专业的学生都可以从中获益。

图书在版编目(CIP)数据

大数据时代的成矿预测——西天山北部晚古生代成矿系统仿真研究/夏换著. —武汉:中国地质大学出版社,2015.5

ISBN 978-7-5625-3417-4

I. ①大…

II. ①夏…

III. ①天山-多金属矿床-成矿预测-研究

IV. ①P618.201

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 022260 号

大数据时代的成矿预测——西天山北部晚古生代成矿系统仿真研究

夏 换 著

责任编辑:徐润英

责任校对:周 旭

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

邮政编码:430074

电话:(027)67883511

传真:(027)67883580

E-mail: cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cugp.cug.edu.cn>

开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16

字数:260 千字 印张:10.25

版次:2015 年 5 月第 1 版

印次:2015 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 978-7-5625-3417-4

定价:50.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前 言

“这是一种革命，我们确实正在进行这场革命，庞大的新数据来源所带来的量化转变将在学术界、企业界和政界中迅速蔓延开来。没有哪个领域不会受到影响，迎来大数据时代。”这是美国《纽约时报》对大数据最具代表性的精辟评论。人类已经进入了大数据时代，数字地球已经发展到了第二代“智慧地球”阶段，同时计算机技术也相应有了云计算、物联网、大数据等更强大和先进的体系。地质学界对大数据的重视才刚刚开始，赵鹏大院士曾说：“数据科学，应加强在资源勘测评价领域的应用。”“在实现全面数字找矿过程中，应加强数字地质研究，而着力培养既懂地质，又熟悉数学和信息技术的交叉复合型人才更是一项紧迫任务。”

地质学属于数据密集型科学，尤其是矿产资源预测更是数据密集的分支学科和应用领域。这些数据具有多元性、多源性、异构性、时空性、方向性、相关性、随机性、模糊性、非线性等特征，空间和时间跨度巨大，数据获取难度大、成本高、局限性强。我们必须明确目标，拓展思路，除了对成矿远景区或未知矿床进行定性、定量、定位、定概率的评估外，还要有效地将地球动力学系统、成矿系统、大数据分析系统、计算机计算系统、仿真分析系统及评价系统等有机结合起来，充分挖掘密切相关的成矿地质数据，对这些数据进行科学集成和智能分析，使“数字成矿预测”向“智慧成矿预测”迈进。笔者想通过本书从理论和实践的相结合上一次大数据在成矿预测中的尝试，书中笔者特别注重数据的收集、整理、统计、成图、分析，工作方法包括数据获取、数据挖掘与分析（建模、可视化等）、成矿系统仿真认识和理解三个层面。希望使用应该还算不上大数据的大数据对博士阶段的成果进行一些总结，为后面进行“智慧成矿预测”的学者抛砖引玉。

本书得到了我的博士后导师刘宝琛院士、博士生导师陈根文研究员、硕士生导师傅朝义的精彩指导；得到了蔡绍洪教授、缪坤和教授、陈建中教授、张文专教授、杨滋荣教授，张红博士、罗勇博士、任广利博士的帮助和宝贵意见，在此一并表示衷心感谢。同时感谢我的家人给予的无限支持，让我有了更多的精力完成本书。最后感谢广州科启奥电子科技有限公司的朋友们，特别是总经理李廷文给予的关心。

本书的出版得到了贵州财经大学、国家 305 项目（项目代号：2007BAB25B03，项目名称：楚伊犁——西天山成矿带成矿条件与勘查技术研究）和国家自然科学基金项目（项目代号：40773014，项目名称：西藏日喀则蛇绿岩中玻安质岩石的地球化学特征、成因与地质意义）的联合资助。

在本书的撰写过程中，笔者尽可能把大数据、系统仿真、成矿系统、成矿预测进行融合，以全新、全面的信息呈现给读者。书中存在的错误和不足之处，敬请读者批评指正。

夏 换

2014 年 10 月 8 日于永州

内容摘要

本书在广泛收集前人研究成果的基础上,通过野外地质工作,结合岩石地球化学、同位素地球化学、流体包裹体和同位素年代学等手段,对研究区地层、构造、成矿系统和典型矿床进行了解剖,重新厘定了晚古生代西天山北部各构造单元的大地构造属性,对其构造演化历史进行了恢复,同时建立了区域内石炭纪活动大陆边缘成矿系统和二叠纪后碰撞阶段构造转换背景成矿系统,并对该区两大成矿系统内部的金、铜、铁和铅锌矿床的特点,成矿类型,成矿规律,控矿机制以及成矿模式进行了讨论。

通过对巴音沟蛇绿岩的研究,认为在早石炭世西天山北部存在一初始洋盆,洋盆内发育一套洋岛玄武岩。在晚古生代该洋盆向南俯冲,在博罗科努山一带形成岩浆弧,部分岩体锆石定年数据显示其形成于 $306 \pm 5.7\text{Ma}$ 。与之配套的岩石组合是在博罗科努山以南广泛发育的早石炭世大哈拉军山组,根据岩石地球化学数据显示吐拉苏盆地大哈拉军山组火山岩形成于岩浆弧环境,其初始岩浆可能是由受俯冲流体交代的地幔部分熔融、上覆地壳混染作用后的产物。晚石炭世,哈萨克斯坦-准噶尔板块与中天山之间的海盆完全闭合,并形成准噶尔板块与伊犁地块拼合的统一大陆。到二叠纪,阿吾拉勒地区一带广泛分布具双峰式特征的火山岩(乌郎组、伊什基里克组和塔尔得套组),说明该区已开始发生伸展作用,并伴生具埃达克质特征的同期浅成侵入体,后者的地球化学特征指示岩石为岩石圈拆沉作用的产物,这些特征显示研究区从二叠纪开始已从原来的碰撞抬升向伸展背景转化。

受北天山洋俯冲作用影响,在伊犁微板块北侧形成活动陆缘,在伊犁盆地一带形成弧后盆地,并形成一套与活动大陆边缘有关的成矿系统,该成矿系统由吐拉苏盆地内的浅成低温热液型金矿、查岗诺尔一带的火山-次火山热液交代充填型铁矿、以阿尔恰勒铅锌矿为代表的早石炭世层控型铅锌矿床和以式可布台铁矿为代表的海底喷流沉积型铁矿床组成。

二叠纪加厚的岩石圈拆沉并发生伸展作用,形成了阿吾拉勒裂谷。该裂谷对研究区内铜及多金属元素成矿具有明显的控制作用,区内发育与浅成斑岩有关的热液型铜矿(群吉萨依铜矿、莫斯早特铜矿田)、与浅成斑岩有关的斑岩型铜矿床(109铜矿)和与火山热液有关的铜、金矿床(穷布拉克铜银矿床),这些矿床共同构成了二叠纪后造山阶段构造转换背景成矿系统。

通过对研究区内两套成矿系统内部矿床进行剖析,提出西天山早石炭世浅成低温热液型金矿为由低硫型、高硫富矿囊型、高硫热泉型和石英脉型组成的成矿系列,式可布台铁矿为岩浆喷溢-热水喷流沉积型矿床,查岗诺尔、备战铁矿区为火山-次火山热液交代型铁矿床,阿吾拉勒二叠纪铜矿床为一套由陆相火山-次火山热液充填形成的铜矿床系列。

Abstract

Based on wide collection of previous research work, this dissertation has investigated the stratum, tectonics, metallogenic systems and typical ore deposits of the study region by field geological work, combined with methods of petrogeochemistry, isotope geochemistry, fluid inclusion analysis and isotope chronology. The late Palaeozoic tectonic attributes of each unit of the north part of western Tianshan Mountain are redetermined, and their tectonics evolution history is reconstructed as well. At the same time, the regional Carboniferous metallogenic system on the active continental margin and the Permian metallogenic system in post-collision stage tectonic transformation context are established. A discussion about the character, metallogenic types, metallogenic regularity, ore-control factors and metallogenetic model of Au, Cu, Fe and Pb-Zn deposit, in these two metallogenic system has been made.

According to the research of ophiolite in Bayingou, a primitive oceanic basin existed at north part of the western Tianshan Mountain in early Carboniferous with the presence of a set of ocean island basalts in the basin. This ocean basin had subducted southward and the magmatic arc was formed in Boluokenu Mountain region in late Palaeozoic, with the zircon dating of some rock body indicating that it formed 306 ± 5.7 Ma ago. The early Carboniferous Dahalajunshan Formation is the associated rock assemblage which is widely distributed at the south region of Boluokenu Mountain. According to the rock geochemical data, the volcanic rock of Dahalajunshan formation originated in magmatic arc environment, and its initial magma was probably the product of partial melting of mantle metasomatized by subducted fluid and contamination of the overlying crust.

In late Carboniferous, the ocean basin between Kazakhstan-Junggar plate and middle Tianshan Mountain closed completely and a united continent was formed by combining Junggar plate with ILi block. The Permian bimodal volcanic rocks are widely distributed in Awulale region (e. g. Wulang Formation, Yishijilike Formation and Taerde Formation), which indicates that this region had been stretching and associated with contemporary adakitic hypabyssal intrusion. The geochemical characteristic of the adakitic rock indicates that it is the product of delamination of lithosphere. These characteristics mentioned above reveal that the tectonic setting had transformed from collision to stretching since Permian.

Under the influence of north Tianshan ocean subducting, active continental margin and back arc basin formed at north side of ILi microplate and ILi basin, respectively. A suite of metallogenic system associated with active continental margin formed as well, consisting of epithermal gold deposits in Tulasu basin, volcanic-subvolcanic hydrothermal metasomatic and filling Fe deposit in Chagangnuoer region, early Carboniferous stratabound Pb-Zn deposit represented by Aerqiale Pb-Zn deposit, and submarine exhalative sedimentary Fe deposits re-

presented by Shikebutai Fe deposit.

The Awulale rift formed as a result of the Permian thickened lithosphere delaminating and the following stretching. This rift has apparent effect on controlling Cu and polymetallic mineralization in research region. Hydrothermal related with Hypabyssal porphyry Cu deposit (e. g. Qunjisayi and Mosizaote Cu deposits), porphyry Cu deposit related with hypabyssal porphyry (e. g. 109 Cu deposit) and Cu, Au deposit related with volcanic hydrothermal (e. g. Qiongbulake Cu, Ag deposit) occur in research area and these deposits together constitute the metallogenic system under tectonic transformation background in Permian post-orogenic stage.

Based on the study of deposits in these two metallogenic systems of the research region, this work proposes that the early Carboniferous western Tianshan epithermal gold deposits are metallogenic series consisted of lowsulfur type, high sulfur ore-rich pocket type, high sulfur hot spring type and quartz vein type. The Shikebutai Fe deposit is Magmatic eruption and hydrothermal exhalative sedimentary Fe deposit, the Chagangnuoer and Beizhan Fe deposits are volcanic-subvolcanic hydrothermal metasomatic Fe deposits. The Permian Awulale Cu deposits are a suite of terrestrial volcanic-subvolcanic hydrothermal filling Cu deposit series.

目 录

第一章 绪 论	(1)
第一节 选题的目的与意义	(1)
第二节 西天山构造演化与成矿的研究现状	(2)
第三节 研究内容	(7)
第四节 样品测试方法	(7)
第二章 区域地质背景	(9)
第一节 地层分布	(9)
第二节 岩浆岩	(13)
第三节 地质构造	(15)
第四节 矿床分布特征	(18)
第三章 西天山古生代构造演化历史仿真	(20)
第一节 巴音沟蛇绿岩地质地球化学特征与构造背景	(20)
第二节 吐拉苏盆地大哈拉军山组地质地球化学特征与构造背景	(27)
第三节 博罗科努晚古生代岩浆弧年代学、地球化学与构造特征	(34)
第四节 阿吾拉勒地区伊什基里克组火山作用与构造背景	(40)
第五节 阿吾拉勒山地区乌郎组火山岩特征与构造背景	(44)
第六节 阿吾拉勒地区塔尔得套组火山岩特征与构造背景	(47)
第七节 区域构造演化仿真	(52)
第八节 区域构造演化与成矿的关系仿真	(54)
第四章 石炭纪活动大陆边缘成矿系统仿真	(56)
第一节 浅成低温热液型金矿	(56)
第二节 火山-次火山热液交代型铁矿	(84)
第三节 阿尔恰勒铅锌矿床	(101)
第四节 式可布台铁铜矿矿床研究	(107)
第五章 二叠纪后碰撞阶段构造转换背景成矿系统仿真	(116)
第一节 阿吾拉勒铜矿带二叠纪地质背景	(116)
第二节 与浅成斑岩有关的热液型铜矿床	(121)
第三节 火山热液型铜矿-穷布拉克铜银矿床	(124)
第四节 与浅成斑岩有关的 109 斑岩型铜矿	(126)
第五节 阿吾拉勒铜矿带矿床成因分析	(127)
参考文献	(133)
附 表	(147)

第一章 绪 论

新疆作为我国对外开放的重要门户,也是我国战略资源的重要储备区,丰富的战略资源是我国经济发展的重要支点,对确保我国的可持续发展能力具有重大战略意义。天山山脉是新疆境内的重要山系,习惯上将中国境内东经 88° 线以西称为西天山,在地理上大体包括由北侧的依连哈比尔尕山、博罗科努山与南侧的哈尔克山、那拉提山及霍拉山围成的三角形区域。传统上,天山从北向南可划分为北天山、中天山、南天山,北天山呈北西走向,包括依连哈比尔尕山和博罗科努山等;中天山大部分为伊犁盆地所占据;南天山由北东东走向的那拉提山、哈尔克山及北西西走向的霍拉山等组成(涂光炽,1999;何国琦,1994,1995)。

第一节 选题的目的与意义

我国地质学家对于西天山地区赋存的许多大中型矿床也进行了大量的研究,特别是典型矿床的成矿模式和找矿模型,在区域成矿、成矿规律、成矿预测、成矿模式、找矿模型等方面取得了较大的进展,成矿理论也上了一个新的台阶(涂光炽,1993;陈哲夫等,1997;马瑞士等,1993;李华芹等,1998,2004;王福同等,2001)。在哈萨克斯坦及中亚邻国与新疆邻近的地区接连发现多处大型超大型金属矿床(陈哲夫等,1999;聂凤军等,2004),且在其本国资源储备中占据重要地位。与我们的邻国相比,我国境内发现的矿山就相形见绌,有的只是小型或中型矿床,甚至是矿点,有的则根本无任何迹象,这与新疆广阔的地域和良好的成矿条件很不相称。

近20年来,随着国家305项目从“七五”到“十一五”、国家科技部两个973项目的实施,天山全区基础地质和矿产地质研究程度得到了很大提高。目前在西天山造山带研究方面取得了许多显著的成果,如西天山地区基底构造(胡霏琴等,2001)、构造单元划分(王宝瑜等,1993,1995,2000;张良臣,1995;何国琦等,1995;吴世敏等,1996;李锦轶等,1999,2004,2006)、区域构造演化(王作勋等,1990;肖序常等,1991,1992,2005;郝杰等,1993;高俊等,1995,1997,2006;宁晰春,1996;李向东等,1996,1998;梁云海等,2000;夏林圻等,2002a,2002b;成守德等,1993,2000;刘训等,1994,1995;王超等,2007b)等方面都取得了一系列重要成果。尽管如此,在大地构造属性(邬继易和刘成德,1989;徐学义等,2005,2006a,2006b)、古大洋封闭的时间(高俊等,2006;马中平等,2006b,2007)、造山带结束的时间(高俊等,2006;李曰俊等,2001,2004a,2004b;张立飞等,1998,2000,2007;肖文交等,2006a,2006b,2009)等方面仍存在争论。另外,一些与成矿密切相关的构造背景也存在争议,如与浅成热液型金矿有关的吐拉苏盆地大哈拉军山组属于岩浆弧构造形成还是火山盆地?石炭纪中与火山作用有关的铁矿床是否产于弧后盆地?二叠纪与火山-次火山热液有关的铜矿是否为后碰撞阶段(裂谷阶段)形成?上述争论也反映出该区大地构造演化的复杂性与重要性。

以上情况说明,在研究区开展地质研究工作对于认识并重建该区大地构造格架、层序、

古大洋演化、构造演化及成矿是十分必要的。西天山地区是斑岩型铜矿、浅成低温热液型金矿、火山热液型铁矿、火山-次火山热液型铜矿及层控铅锌矿的重要产地。深入研究西天山晚古生代的构造背景和演化对认识区域内矿床的分布规律、成矿机理,进而实现找矿突破具有十分重要的意义。配合《楚伊犁-西天山成矿带整体研究与勘查技术集成》项目中《楚伊犁-西天山成矿带成矿条件与勘查技术研究》专题的研究,笔者以涂光炽院士提出的“比较矿床学”理论为指导,实施过程中注重理论与实际结合、重点解剖与面上对比结合,遵循由已知到未知、由带至点、点面结合原则,在广泛收集前人研究资料的基础上,重视野外观察调研,并对野外采取的样品在室内进行综合测试分析,从而在理论和实验数据上对西天山地区古生代构造演化与成矿的关系提出了一些重要认识。深入研究区域内矿床的分布规律、成矿机理,并把区域内矿床放在一个统一的构造背景中解释,找出不同矿床之间的纽带,建立成矿系统。

第二节 西天山构造演化与成矿的研究现状

一、西天山构造格架的研究现状

天山是亚洲腹地的主要山系之一,地处我国西北边陲,对它的研究不仅对于整个亚洲的构造演化、新疆找矿研究有着重大的意义,而且还可以丰富造山带理论,因此历来受到地质学者们的青睐(马瑞士等,1993;王作勋等,1990;冯益民,1985,1986;肖序常等,1992;张良臣等,1985)。其中西天山造山带由于是东天山与中亚天山造山带之间的联接枢纽,除位置十分重要外,还在于它具有复杂的结构和独特的构造格局。随着地学领域各个学科的发展,各种分析方法的出现,特别是现代同位素测年技术的出现,在给地质学带来丰富多彩信息的同时,也给地质解释带来了新的困难,不同的研究者对同一数据结果给予不同的地质解释,这种现象在西天山构造单元划分上体现得更为突出。对于西天山构造格架的建立,学者们经过近半个世纪的努力研究提出了许多观点,但由于该区地壳形成演化和发展历史复杂,所以前人对西天山地区的大地构造格架意见不一。

刘东生(1981)提出以南天山北缘断裂为界,将天山分为北天山优地槽褶皱带和南天山冒地槽褶皱带,并认为该断裂带是一条古板块缝合线,塔里木板块沿此线向北俯冲。肖序常等(2005)提出古亚洲洋于志留纪-早二叠世闭合,天山地区在这一时期内以多岛洋为特征。以中天山南缘蛇绿岩为代表的洋盆在志留纪-泥盆纪期间闭合,形成了南天山北缘一系列蛇绿岩带和高压变质带,同时认为在已拼合的伊犁-塔里木板块的北侧古亚洲洋继续向南俯冲,南天山在晚古生代由于新的裂解形成了东浅西深的小洋盆。李春昱(1982)提出哈萨克斯坦(包括天山)陆壳在古生代不断增生的见解,认为中国南天山有三条不同时代的蛇绿岩带,分布与天山山脉大致平行,代表古洋壳不断向北消减,并构成西伯利亚、哈萨克斯坦及中朝板块之间最后的缝合带。陈哲夫等(1985)、汤耀庆(1989)及后来的吴世敏等(1996)进一步提出北天山为洋壳区,觉罗塔格为岛弧区,南天山为弧后盆地,主张天山地区只存在华力西褶皱带,天山是塔里木板块的一部分。吴世敏等(1996)认为古天山-准噶尔洋、南天山弧后盆地的演化一直从震旦纪持续到二叠纪才封闭。李继亮(1999a, 1999b)提出南天山的哈尔克山-迪那河-库米什蛇绿岩混杂带在奥陶-志留纪时是开阔的大洋,泥盆纪起洋内发

生俯冲,最后消亡于早二叠世晚期,导致中天山-星星峡前缘弧与塔里木北缘陆块碰撞。强调了南天山蛇绿岩混杂带代表北疆弧体系与塔里木北缘陆块碰撞的主缝合线的重要意义。何国琦等(1994)则强调新疆古生代地壳演化属于陆间型造山带地壳演化,并将整个过程归纳为五阶段模式,天山构造带以觉罗塔格北缘为界,以北划归为哈萨克斯坦板块,以南属于塔里木板块。成守德和张湘江(2000)认为那拉提-红柳河缝合带为南天山洋闭合、准噶尔-哈萨克斯坦板块与塔里木板块的碰撞缝合带。高俊等(2009)将西天山划分为北天山弧增生体、伊犁地块北缘活动陆缘、伊犁地块、伊犁地块南缘活动陆缘、中天山复合弧地体、西天山(高压)增生楔和塔里木北部被动大陆边缘。西天山增生造山与早古生代帖尔斯克依古洋、早古生代晚期-晚古生代南天山洋和晚古生代北天山洋3个代表洋盆的演化相关,增生造山结束的时间可能是早石炭世末。二叠纪时期,西天山至整个中亚地区进入后碰撞演化阶段。现有资料证实西天山为晚古生代增生造山带,并非三叠纪碰撞造山带(肖文交等,2006b)。近年来西天山也被认为是晚海西-印支期碰撞造山带或三叠纪碰撞造山带。西天山增生造山结束的时间,即塔里木地块北部的被动陆缘与围绕西伯利亚地台南侧的活动陆缘最后拼合的时间限定在晚二叠世-中三叠世(李曰俊等,2001;张立飞等,2005)。

二、西天山构造与成矿的关系

大地构造运动引起上部圈层的物质输运、能量交换和动力传递。从区域性层次看,构造运动能诱发沉积、岩浆、变质和液体作用,以及改变区域地球物理场的特征。在一定的时空域中,一定性质的构造环境和构造运动,对于成岩和成矿来说,均有其特定的物源、热源、物理化学和动力学条件,而这些因素又直接或间接地影响区域成岩、成矿的环境、因素和作用过程(王核,2001)。大陆动力学的发展推动了大陆成矿动力学的快速发展。有学者基于环太平洋成矿域的研究,提出了俯冲成矿理论,建立了岛弧带的斑岩型铜金矿、浅成低温热液金矿等多金属矿床的成矿模型(Sillitoe, 1972; Richards, 2003)。有人基于特提斯成矿域的研究,提出碰撞造山成矿理论,并建立了造山型矿床的成矿模式(陈衍景, 1999, 2002; Kent et al., 2002; Hou et al., 2003; 侯增谦等, 2003, 2006; Chen et al., 2006)。涂光炽(1993)对中亚造山带的研究揭示了成矿作用的多样性、复杂性和独特性,提出了“中亚成矿域”的概念,同时,认识到大陆内部广泛存在改造型成矿作用。翟裕生(2002, 2004)对成矿系统进行了定义与研究,认为成矿系统是在一定地质时空域中控制矿床形成和保存的全部地质要素和成矿作用过程,以及所形成的矿床系列和异常系列构成的整体,是具有成矿功能的一个自然系统,同时他还提出了古大陆边缘有利于多类成矿系统发育。陈毓川等(1998)将大陆地区的矿床划分出多种成矿系列。裴荣富等(2005)揭示了超大型矿床的成矿偏在性。许多学者发现了埃达克质岩浆与斑岩型Cu-Au矿床形成有密切联系,并进行了大量的研究工作(Thieblemont et al., 1997; Sajona, 1998; Oyarzumetal., 2003)。相对于洋壳俯冲成矿理论和陆陆碰撞造山成矿理论而言,大陆增生成矿理论尚处于探索阶段。中亚造山带包含多种属性的块体和多条蛇绿岩带,经历了小洋盆俯冲而致的陆壳增生、多块体拼贴和后续变形而致的陆壳改造,并伴随有多期次的岩浆活动与壳幔作用(Gao et al., 2002; Jahn, 2004)。显然,陆壳增生最为显著的中亚造山带孕育着大陆成矿学理论创新的机遇,亟待深入研究多块体增生拼贴及陆壳改造等过程中的各类成矿系统发育机理,建立相应的成矿理论和成矿模式。

西天山以其完整的构造演化历史、强烈的碰撞构造-岩浆活动和大规模成矿作用以及良好的后期保存条件而成为研究构造-成矿的理想地区,受到学者们的关注,对西天山构造与成矿的讨论主要表现为构造演化对成矿的作用、控矿地质因素对矿床的控制和主攻类型矿床及其在空间上的分布(肖序常等,1992;何国琦等,1994,2002;韩宝福等,1999;陈哲夫,2002,2003,2004;孙桂华等,2005;吴华等,2005;姜常义等,1999,2005;王京彬和徐新,2006;董连慧等,2001a,2001b)。20世纪80年代后期以来,随着国际地质对比计划和各类多国编图计划的实施,境内外基础地质的对比研究有所开展。与此同时,国家305项目在“七五”期间曾开展《中国新疆周边国家矿产地质特征及成矿规律》的专题调研。“八五”期间305项目曾与哈萨克斯坦科学院地质研究所进行合作实施了《中国和哈萨克斯坦阿尔泰多金属矿带地质及成矿对比研究》的专题研究,出版了相关专著;同时实施了《新疆北部与邻区超大型矿床成矿背景条件对比研究及其前景评估》、《中-乌西天山斑岩铜矿成矿条件对比与成矿远景预测》等专题的研究。2002年,西北地质矿产研究所编制了1:500万《中国西北部与周边国家毗邻地区矿产地质图》。2004年至2006年,何国琦教授编译了新疆毗邻地区地质矿产研究新资料两册,比较全面地反映了中亚地区地质矿产的研究进展。国土资源部信息中心和地质调查局于2001年又完成了《中国西部和毗邻国家铜金找矿潜力的对比研究》项目,为中国西部及其邻区的地质矿产对比研究积累了资料。西天山地区已完成1:20万区域地质调查、1:25万图幅修编,在主要成矿带还进行了1:5万区调工作。近年来,中国地质调查局又在部分重点成矿带安排了1:5万矿产地质调查。这些工作对研究区内的地层、构造、岩浆岩和矿产等进行了较为系统的综合调查,初步建立起了区域地质构造格架。另外,自2002年开始实施的国家重点基础研究项目(973)《中国西部中亚型造山与成矿》,从大陆动力学演化的高度对北疆地区古生代双向增生造山过程、中生代陆内造山过程及其成矿作用进行了高水平的综合研究,取得了一批新成果。所有这些研究极大地提高了研究区的地质研究程度,深化了对研究区以至中亚造山带的结构、组成、动力学演化过程及其成矿作用的认识。近年来,一些大型矿床靶区与矿床(点)经过多年反复研究与评价,已在认识上出现了“瓶颈”,进一步突破需要克服一系列关键技术,如矿床成矿构造系统的三维结构、不同景观区地球化学勘查方法及深穿透地球化学技术、高分辨大深度金属矿地球物理探测技术、隐伏矿床定位预测和定量评价的方法技术组合等。绝大多数隐伏矿床,其出露地表的部分或仅为“冰山一角”或仅有物化探异常显示,进一步评价与勘查,既需要在成矿理论上高度综合,又需要在方法技术上实行突破。在大型矿床靶区预测与评价中,准确厘定深部隐伏的、控制矿体的成矿构造的几何结构,是选择快速定位预测技术和正确解释异常的基础,而且可以节省大量的人力与物力。研究表明,已知矿体与未知矿体如果形成于同一构造体系或同一特殊地质作用过程中,控制所有矿体的成矿构造必然具有成因联系,不仅在矿床类型、矿化类型、成矿构造上具有相似性,而且一系列成矿构造在空间上组合成一个有机的整体,其控制的矿体在空间上具有一定的几何结构,形成的异常在空间上也具有一定的物化结构,因此,通过已知成矿构造的构造解析,完全可以建立包括已知与未知矿体在内的成矿构造系统结构,做到地质建模先行、技术方法选择后进的工作思路。

(1) 西天山地区自元古代以来就开始有成矿现象,前华力西期主要是以磷矿为主的沉积矿产,并富集了金、铜、铅锌等成矿元素,为后期成矿打下了一个非常好的基础。华力西早期,西天山地区在早志留世转入汇聚,志留纪末有花岗闪长岩基生成,泥盆纪时开始固结,

除了在赛里木地块、博罗科努山、依连哈比尔尕山等地区有钾长花岗岩侵入外,其他地方并没有强烈的构造运动出现。此时段形成许多与花岗岩有关的斑岩型铜矿床,如达巴特矿点(王核等,2000)。华力西中期是西天山地区金、铜等矿产的主要形成时期。在早石炭世,伊宁市以南的察布查尔地区形成与拉张阶段火山-沉积建造、火山-潜火山岩建造有关的铁、铜、铅、锌、锰矿化,如查岗诺尔铁铜矿(王庆明等,2001;田敬全等,2009)、加曼台锰矿等;石炭纪中期在博罗科努山、吐拉苏盆地等区域构造作用下形成上叠石炭纪火山盆地,同时在这些区域发生强烈的陆相火山作用,从而形成了许多有名的金矿床,如阿希、伊尔曼得金矿(冯娟萍等,2005,2007;沙德铭等,1996,1998,1999,2000,2003a,2003b);石炭纪中晚期在赛里木地块形成与石炭纪活化花岗岩类有关的斑岩-矽卡岩型铜(铅、锌)矿床,如喇嘛苏铜矿(隗合明等,1999a,1999b;王永新,1994)、汗吉尕铅锌矿(戴玉林,1994)。到了华力西晚期的二叠纪,尼勒克以南进入陆相裂谷阶段,阿吾拉勒地区同时形成了上叠火山裂谷,伴随出现与双峰式火山-潜火山建造有关的铜、银矿床,如群吉萨依铜矿床(王永新,1995;连小平,2004;韩刚,2010a)。

(2) 西天山地区金、铜、铅、锌等内生矿产的分布严格受含矿沉积建造、岩浆侵入、变质作用、喷发作用和构造作用等控制。

受沉积建造控制的矿产在西天山占有非常重要的地位,主要有海相中基性火山岩含铜建造、陆相中酸性火山岩含金建造等。本书研究对象下石炭统大哈拉军山组陆相(海陆交互相)中酸性火山岩建造,即为金及多金属矿床提供成矿物质,也是这些金属矿富集的容矿岩层,如著名的阿希金矿(毋瑞身等,1993,1996)、吐拉苏铅锌矿点,这些火山岩建造主要分布在伊犁盆地北缘断裂、科古琴山南坡断裂间和艾肯达坂一带。中石炭统东图津河组广泛形成火山质-复陆相碎屑岩建造,内常分布有海底火山喷气-热水沉积型铜(铁)矿床(张天继等,2006),该建造阿吾拉勒山一带出露较多。在阿吾拉勒山西段的二叠系陆相火山岩中分布有火山热液型铜矿,铜矿化呈浸染状或细脉浸染状,具层控特点,如穷布拉克铜矿床(莫江平等,1997a;杨明德等,2009)。

随着中酸性侵入体的侵位,各时代碳酸盐岩建造形成矽卡岩型和岩浆期后热液充填型铜多金属矿化,如博罗科努山一带的上奥陶统呼独克达坂组灰岩与华力西期二长花岗岩类接触带形成富含磁铁矿的矽卡岩型铜矿(李伍平等,1995a,1995b);在赛里木湖一带库松木切克群大理岩化灰岩与华力西中期斜长花岗岩接触带内形成矽卡岩型铜、钼矿(孙建华,2007,2008);在伊犁裂谷中下石炭统阿克沙克组碳酸盐岩与华力西晚期钾长花岗岩接触带形成规模较小的含黄铁矿矽卡岩型铜矿床(高永利等,2006;李永军等,2009,2010a,2010b)。华力西早期以由石英闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩及钾长花岗岩组成的侵入岩侵位于蓟县系库松木切克群、上奥陶统呼独克达坂群地层中,在赛里木和博罗科努山北坡一带形成矽卡岩型、斑岩型和岩浆期后热液充填型铜、钼多金属矿床(李永军等,2007),如王核等(2000)研究的达巴特铜矿。华力西中期由花岗闪长岩、二长花岗岩、钾长花岗岩、花岗斑岩组成的侵入岩侵位于蓟县系库松木切克群、上奥陶统呼独克达坂群和中石炭统陆源碎屑-火山建造中,在博罗科努山和伊犁地区形成矽卡岩型、斑岩型和岩浆期后热液充填型铜多金属矿床,典型矿床有喇嘛苏铜矿、肯登高尔钼铜矿、莱历斯高尔铜钼矿、东图津多金属矿等。华力西晚期属辉绿岩-花岗闪长岩序列的侵入岩在阿吾拉勒山地区形成群吉萨依铜矿等斑岩型铜矿床。

西天山地区的成矿与火山活动也极为密切，特别是在华力西中晚期的火山喷发为区内金铜等金属的富集提供了矿源，是该区重要的控矿因素之一。早石炭世早期，海相火山岩建造的伊犁地块内有铜、铅、锌、金矿化，并有较强烈的金迁移富集，构成了察布查尔铜金多金属矿化集中区；陆相火山岩建造的博罗科努山小型断陷盆地，产有阿希、伊尔曼得等浅成低温热液金矿，构成了吐拉苏金（银）矿化集中区。早石炭世中晚期，汗吉尕山、博罗科努山和伊犁地区形成了以中酸性火山喷发组合为主的火山岩建造，在其中的灰岩夹层中已发现多处热液型含铜石英脉及含多金属-碳酸盐岩脉。中石炭世，以中心式喷发为主的火山活动控制影响着区内铜铁矿的形成，爆发相及爆发沉积相内出现较多含铜重晶石脉，火山-沉积相内则发育含铜赤铁矿床及铜矿点，显示了由喷发中心到远离喷发中心的一系列控矿特征，此种成矿作用主要出露在阿吾拉勒山一带。

西天山地区金铜多金属矿床的形成与分布受构造活动的影响和制约也相当明显，主要表现为受华力西中-晚期构造-岩浆活动的制约。该区总的构造线方向为近 EW 向，控制着成矿元素地球化学场和成矿带，对于容矿构造来说，除近 EW 和 NWW 向构造外，还有近 NS 向和 NNW 向构造，如阿希金矿、喇嘛苏铜矿的控矿构造即为近 NS 向（隗合明等，1992；沙德铭等，2003；冯娟萍等，2005，2007；关瑞林，2008；单立华等，2010）。除此之外，NWW 向超岩石圈、岩石圈断裂，几组断裂交汇处都对本区的沉积建造、岩浆活动及成矿作用起着控制作用。从遥感影像中反映出该区环形构造十分发育，其分布与区域性近 NS 向构造关系密切，常位于近 EW 向与近 NS 向构造的交汇部位。这些环形构造反映了岩浆侵入活动及火山活动的迹象，与区内金铜多金属矿化关系密切，如国内外著名的浅成低温热液金矿阿希金矿就产于火山喷发作用而形成的环形构造内（贾斌等，2003，2004；单立华等，2010），矽卡岩型和斑岩型铜矿床也大多产于侵入作用而形成的环形构造内（孙恭安，1991；朱永田，1992；陈赶良等，1996；李东生，2001）。

（3）西天山地区的主攻类型矿床分布十分有规律，其中金矿床主要分布在博罗科努山和南天山等地区，铜矿床主要分布在博罗科努、阿吾拉勒、那拉提、赛里木湖等地区，铅锌矿床主要分布在博罗科努、阿吾拉勒-伊什基里克和巴仑台等地区。详细分布规律如表 1-1 所示。

表 1-1 西天山地区主要矿床分布规律一览表

名称	地区	类型	典型矿山
金矿	博罗科努西段	火山热液型（陆相火山热液型）	阿希金矿
	博罗科努东段	岩浆热液型（与韧性剪切带有关的蚀变岩型）	萨日达拉金矿
	哈尔克山和南天山	变质热液型（穆龙套型）	大山口金矿
铜矿	博罗科努中西段	斑岩型、矽卡岩型等铜矿、铜钼矿	
	阿吾拉勒山中、东段	海底火山喷气沉积改造型铜矿、海底火山喷气-沉积型铜矿、铜锌矿	莫斯早特铜矿
	阿吾拉勒山西段	陆相火山热液型铜矿和斑岩型铜矿	群吉萨依铜矿
	那拉提西段	镁铁-超镁铁岩型铜镍矿	
	赛里木湖地区	矽卡岩型、斑岩型及其复合型铜矿	
	西天山南部	沉积砂岩型铜矿	
铅锌	博罗科努古生代岛弧带西段	热液型铅锌矿	
	阿吾拉勒-伊什基里克，哈尔克-巴仑台	火山-沉积型铅锌矿	阿尔恰勒铅锌矿
	巴仑台莫托萨拉一带	沉积型铅矿	

第三节 研究内容

在系统收集地质、矿产和勘查资料的基础上,通过野外工作,对西天山地区区域地质背景、成矿条件进行了综合分析,并对区内典型矿床进行了重点解剖。

(1) 通过对前人资料的收集与分析,结合野外地质调查工作、区域大地构造环境研究,对西天山北部大地构造格架进行划分,并重建新疆西天山北部古生代地质构造演化过程。

(2) 查明西天山北部的区域成矿背景、条件、控矿因素,讨论矿床的主要类型与其时空分布,总结研究区内成矿系列与成矿规律。

(3) 重点讨论新疆西天山地区浅成低温热液型金矿、阿吾拉勒山陆相火山岩型铜矿、阿爾恰勒铅锌矿、阿吾拉勒铁矿带的成矿与构造的关系,建立研究区成矿系统。

第四节 样品测试方法

一、主、微量元素测试方法

选取新鲜的岩石样品去除风化面后破碎成岩屑,在前处理实验室用纯净水反复冲洗至清后用 5% 的盐酸溶液浸泡 10min,加入去离子水在超声波洗槽中清洗 15min,并重复 2~3 次,烘干后用玛瑙研钵磨至 200 目供化学分析。主量元素用 XRF 分析,微量元素用电感耦合等离子体-质谱(ICP-MS)仪分析。样品的熔解分两类,经 XRF 检测可用碱熔法的则用碱熔方法进行熔样,然后在 PE Elan 型 ICP-MS 上分析微量元素,详细的实验方法见李献华等(2002);不适用碱熔方法进行熔样的则用酸熔方法分解样品,即准确称取 100mg 样品置于 Teflon 密闭溶样器中,加入 1mL 浓 HF 和 0.3mL 1:1HNO₃ 溶液,用超声波振荡后置于 150℃ 电热板上将样品蒸干,再次加入相同量的 HF 和 HNO₃ 溶液,密闭加热(约 100℃) 7d,蒸干后用 2mL 1:1HNO₃ 溶解,加入 Rh 内标,稀释至 2000 倍,在 PE Elan 型 ICP-MS 上分析微量元素,分析精度优于 5%。详细的实验方法见刘颖等(1996)。Nd、Sr 同位素比值在激光探针-多接收器等离子体质谱(LA-ICP-MS)仪上测定,分析方法见 Zhao 等(1994),⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 和 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值分别用 ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr=0.1194 和 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd=0.7219 标准化。Sr 用标样为 NBS987,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.710 250;Nd 用标样为 Shin Eston Jndi-1,¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.512 115。以上各项分析均在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室完成。

二、年代学测试方法

锆石微量元素含量和 U-Pb 同位素定年在中国科学院广州地球化学研究所同位素重点实验室利用 LA-ICP-MS 同时分析完成。激光剥蚀系统为 GeoLas 2005,ICP-MS 为 Agilent 7500a。激光剥蚀过程中采用氦气作载气,氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合。在等离子体中心气流(Ar+He)中加入少量氮气,以提高仪器灵敏度,降低检出限和改善分析精密度(Hu et al., 2008)。每个时间分辨分析数据包括大约 20~30s 的空白信号和 50s 的样品信号。对分析数据的离线处理(包括对样品和空

白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算) 采用软件 ICP-MS DataCal (Liu et al., 2008; Liu et al., 2010) 完成。详细的仪器操作条件和数据处理方法见 Liu et al. (2008, 2010a, 2010b)。

锆石微量元素含量利用多个 USGS 参考玻璃 (BCR-2G, BIR-1G) 作为多外标、Si 作内标的方法进行定量计算 (Liu et al., 2010a)。这些 USGS 玻璃中元素含量的推荐值据 GeoReM 数据库 (<http://georem.mpch-mainz.gwdg.de/>)。U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 91500 作外标进行同位素分馏校正, 每分析 5 个样品点, 分析 2 次 91500。对于与分析时间有关的 U-Th-Pb 同位素比值漂移, 利用 91500 的变化采用线性内插的方式进行了校正 (Liu et al., 2010)。锆石标准 91500 的 U-Th-Pb 同位素比值推荐值据 Wiedenbeck et al. (1995)。锆石样品的 U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄权重平均计算均采用 Isoplot (Ludwig, 2003) 完成。

第二章 区域地质背景

第一节 地层分布

西天山北部地区各个时代的地层发育都比较完整,从元古宇到新生界都有出露,以古生界最为发育(表2-1)。按大地构造演化不同阶段及相应沉积特征,将研究区内的地层由老到新、由下往上进行简介。

表2-1 西天山北部地层分布表

界	系	统	岩石地层单位	
			组	厚度
中、新生界	第四系		独山子组 (N_2d)	—
	第三系 (古近系+新近系)	上新统		
上古生界	二叠系	上统	晓山萨依组 (P_2x)	2056m
		下统	塔尔得套组 (P_1t)	1014~3875m
			乌郎组 (P_1w)	941m
	石炭系	中统	伊什基里克组 (C_2y)	303~1500m
		下统	阿恰勒河组 (C_1a)	1289m
			大哈拉军山组 (C_1d)	2940m
	泥盆系	上统	吐乎拉苏组 (D_3t)	969m
		中统	汗吉杂组 (D_3h)	185m
下古生界	志留系	上统	博罗科努组 (S_3b)	522m
		中统	基夫克组 (S_2j)	132m
		下统	尼勒克河组 (S_1n)	372m
	奥陶系	上统	呼独克达坂组 (O_3h)	798m
		中统	奈楞格勒达坂组 (O_2n)	600m
	寒武系	上统	果子沟组 (ϵ_{3g})	<30m
		中统	肯萨依组 (ϵ_{2k})	157m
		下统	磷矿沟组 (ϵ_{1l})	138m
新元古界	震旦系		凯拉克提组 (Zk_{kt})	1400m
	青白口系		开尔塔斯组 (Qn_k)	3800m
中元古界	蓟县系		库松木切克组 (Jx_k)	2828m
	长城系		特克斯群 (Ce)	5850m
元古古界			温泉群 (Pt_1)	1744m