

北祁连山海相火山岩岩石成因

夏林圻 夏祖春 徐学义 著

地质出版社



国家（85-901）科技攻关项目

北祁连山海相火山岩岩石成因

夏林圻 夏祖春 徐学义 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书以区域火山岩石学研究为主线,从深部地幔过程—海底火山作用—海底热液成矿作用互相关联的深层次上,系统介绍了北祁连山造山带造山之前的构造火山岩浆演化历史和成矿背景条件。该书指出:在北祁连山早期洋盆闭合过程中,相伴发生的大范围海相火山作用和受海底热液菌体系统制约的块状硫化物成矿作用,是该造山带地质历史发展中两个最鲜明的特色,也是该区地质研究中两个最为关键且相关联的应当给以特别关注的领域。

该书可供地质领域科研、教学及野外地质工作者参考、借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

北祁连山海相火山岩岩石成因/夏林圻等著. —北京:地质出版社, 1996. 10
ISBN 7-116-02121-3

I. ①北… II. ②夏… III. ③火山岩, 海相 岩石成因—中国—祁连山 IV. P588.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 03590 号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路 29 号)

责任编辑:叶一丹

北京地质印刷厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本: 787×1092 1/32 印张: 10 字数: 237, 000

1996 年 10 月北京第一版·1996 年 10 月北京第一次印刷

印数: 1—600 册 定价: 15.00 元

ISBN 7-116-02121-3
P·1104

前 言

本书为“八五”国家科技攻关计划 85-901 项目“紧缺矿产勘查与评价研究”的下属 85-901-02-1 专题（“北祁连山早古生代沟弧盆系细碧角斑岩形成、演化及其与铜、多金属矿产成矿关系”）的研究成果。它是作者在十分艰难的自然条件下，对一个地质情况异常复杂的造山带古海相火山岩系岩石成因进行研究取得的成果。该书由夏林圻、夏祖春主笔编写，自始至终参加全部研究工作的有夏林圻、夏祖春和徐学义，张诚曾参加 1991 年研究工作和 1992 年部分野外工作。

协助本项目进行测试的单位及人员有：中国科学院地质研究所同位素实验室黄萱、上官志冠，高能物理所中子活化分析实验室韩松、黄忠祥，地球化学研究所李荪蓉，国家地质实验测试中心宋尔良及西安地质矿产研究所电子探针实验室与质谱分析实验室等。

在研究过程中，曾得到甘肃省地质矿产局、青海省地质矿产局第二地质队及白银有色金属公司地质队的热情协助，工作中始终得到了地质矿产部科技司翟冠军、王瑞江及西安地质矿产研究所领导的大力支持和亲切指导。在本书定稿过程中，承蒙李廷栋院士、王德滋教授、邱家骧教授、邓晋福教授、莫宣学教授、周新民教授和张建中高级工程师等精心审阅，并提出宝贵的修改意见，在此一并致以诚挚的感谢！

作 者

目 录

前言

第一章 绪论	(1)
一、研究目的和意义.....	(1)
二、研究思路 and 主要进展.....	(1)
三、海相火山岩分类原则.....	(3)
第二章 火山作用与板块构造的关系	(5)
一、新元古代—寒武纪(679—514Ma)大陆裂谷型火山作用	(5)
二、寒武纪末—早奥陶世(522—495Ma)洋脊-洋岛型火山作用	(8)
三、奥陶纪(486—445Ma)沟弧盆系火山作用	(9)
四、晚奥陶世—志留纪(445—428Ma)海盆闭合期火山作用和 泥盆纪磨拉石盆地	(11)
第三章 新元古代—寒武纪大陆裂谷型火山作用	(12)
一、火山岩分布及时代	(12)
二、岩相学	(13)
三、“源”岩浆系列的判别	(22)
四、岩石主元素特征	(24)
五、微量元素地球化学	(28)
六、同位素地球化学	(42)
七、成岩作用模式	(45)
八、成矿作用与海相火山作用的关系及成矿远景分析	(47)
第四章 寒武纪末—早奥陶世仰冲洋壳残片区蛇绿岩型火山岩成因模式	(52)
一、时空分布	(52)
二、岩石共生组合	(52)
三、岩石类型	(55)
四、矿物学特征	(56)
五、火山岩化学成分	(60)
六、岩石成因模式	(72)
七、成矿远景分析	(73)
第五章 奥陶纪岛弧火山作用	(74)
一、时空分布	(74)
二、岩石共生组合	(75)
三、岩石类型	(76)
四、矿物学特征	(78)

五、火山岩化学成分	(85)
六、岩石成因模式	(102)
七、成矿远景分析	(103)
第六章 中—晚奥陶世弧后盆地火山作用	(104)
一、时空分布	(104)
二、岩石共生组合	(107)
三、岩石类型	(108)
四、矿物学特征	(114)
五、火山岩化学成分	(115)
六、岩石成因模式	(128)
七、成矿远景分析	(129)
第七章 晚奥陶世—志留纪海盆闭合期火山作用特点	(130)
一、时空分布	(130)
二、岩石共生组合	(130)
三、岩石、矿物学特征	(131)
四、火山岩化学成分	(136)
五、岩石成因模式	(144)
六、成矿远景分析	(145)
结语	(146)
参考文献	(149)

第一章 绪 论

一、研究目的和意义

现代火成岩岩石学研究是地球科学或全球动力学研究的一个重要组成部分。其中,区域火山岩石学研究正处于这一领域的前沿,它以查明区域火山岩石构造组合为核心,以探索不同构造环境火山岩浆的起源、演化及其深部过程为关键,已成为当代探索地球起源和演化的一个主要支柱。

尽管近 20 年来国际火山岩研究已取得重大进展,但其注意力主要聚焦于现代大洋及岛弧区,以及大陆边缘活动带和大陆内部活化断陷盆地和裂谷系中生代及中生代之后的火山岩和火山作用研究之中。对于前中生代地质历史时期,特别是古老大陆造山带内广泛发育的火山岩系的大范围的专门性区域岩石学研究开展甚少,是世界火山岩研究的薄弱环节,也是急待开拓和加强的重要方向和最有希望开创出新局面的国际研究前沿领域。

作者通过近 10 年(1986—1994 年)的研究工作发现,在横跨我国甘肃、青海二省的北祁连山系内,分布着一套类型十分齐全的早古生代海相火山岩系,东西绵亘千余公里。它们是在新元古代至寒武纪,在相当于现今塔里木—华北大陆板块南缘的位置发生裂谷拉张,并进一步裂解、大洋化,在此基础上洋盆扩张,继而在向北俯冲消减、碰撞拼合过程中所形成的裂谷-沟弧盆系火山活动的产物。该早古生代海相火山岩系经受后期构造作用轻微,在北祁连山造山带发生、演化和形成过程中,各个阶段火山活动的地质历史纪录保存得十分完整。诸如:①大陆板内裂谷拉张造成大陆分裂产生洋盆;②洋盆内沿洋脊发生扩张和火山活动形成洋壳;③大洋板块冷却、致密化后沿着海沟发生俯冲消减,从而诱发岛弧火山作用,直至在弧后拉张形成边缘盆地及一些不均匀分布的弧后扩张中心和相伴生的火山活动;④最后由于大洋板块的不断消减导致洋盆闭合,两边的大陆板块或地块碰撞造山,等等。这种自陆裂拉张形成洋盆,经洋盆扩张、俯冲-消减,直至海盆闭合碰撞造山的全过程(或称现代板块构造造山体制)被保存得如此齐全,无论在我国以至世界都相当罕见。此外,业已发现,与北祁连山早古生代海相火山活动相伴的海底热卤水对流循环作用,已使得该区火山岩系成为我国工业块状硫化物矿床的重要含矿岩系之一,仍然具有很大的找矿前景。因此,对北祁连山早古生代海相火山岩的研究,不仅具有十分重要的科学意义,而且也为研究区域成矿作用和指导找矿奠定了基础。

二、研究思路 and 主要进展

运用区域构造-火山岩浆演化动力学研究途径,从研究区域火山岩自然共生组合、岩浆系列和地质构造环境入手,以查明区域火山岩石构造组合为核心,以追溯不同构造环境的

火山岩浆的起源和演化过程为关键,从总体上探索大区域内古火山岩浆活动的发生—演化—消亡历史,乃是本书作者研究中遵循的总纲。针对研究区内早古生代火山岩曾经受不同程度变质的特点,我们特别强调惰性元素、微量元素、同位素地球化学和岩浆包裹体等研究手段,综合运用矿物学、岩石学、岩石地球化学和火山岩浆学等研究方法,在借鉴现代板块动力学理论和重视现代海洋火山学研究成果的同时,始终把握住重塑区域古板块构造—火山岩浆作用机制这一主线开展研究。

根据上述思路和方法,作者在“七五”期间(1986—1990)曾在祁连、秦岭山系海相火山岩研究中进行尝试,取得了初步成效,首次提出北祁连山早古生代海相火山岩应是在元古代末至寒武纪,在塔里木—华北大陆板块南缘裂谷拉张发生大洋化的基础上,继而在俯冲消减、碰撞拼合过程中所形成的大陆边缘沟弧盆系火山活动的产物,它类似于现代西太平洋的构造—火山岩浆活动格局(夏林圻、夏祖春等,1991,1992)。

近4年来(1991—1994),针对前期研究中的不完备和疏漏之处,我们又对北祁连造山带中数十条路线剖面进行了更为详细地观察研究。本着点、线、面结合,以面为主的原则,在着重区域构造—岩石地球化学研究的基础上,我们特意加强了火山熔岩的Sm-Nd和Rb-Sr法年龄测定。目前,根据区域海相火山作用的研究,我们已经比较准确地查明了北祁连山加里东洋盆开合的历史,及其相伴火山活动的发生、演化过程和时空展布格局,并对其成矿远景取得了更为明晰的认识:

1. 确认新元古代—寒武纪(679—514Ma)火山岩为大陆裂谷系火山活动产物

研究查明,从新元古代开始,由于来自软流圈的地幔柱上隆,导致北祁连山进入以前寒武系为基底发生断陷拉张、陆壳逐渐变薄向洋壳转变的过程。裂谷拉张初期,产生部分熔融程度低的不饱和碱性玄武岩浆;随着拉张程度增大,导致部分熔融程度较高的饱和性大陆拉斑玄武质岩浆溢出。这种从陆裂拉张开始,经大陆碎裂化向洋盆转变的过程,一直延续到寒武纪晚期。

2. 确认以仰冲岩片形式保存下来的位于北祁连造山带南缘的玉石沟—川刺沟蛇绿岩型火山岩带是北祁连山早古生代洋盆存在的标志。

研究查明,北祁连山早古生代洋盆的开启时限为晚寒武—早奥陶世(522—495Ma)。洋盆中洋脊、洋岛和洋内弧型火山作用发育齐全。我们首次在川刺沟蛇绿岩型火山岩底部的橄榄岩中发现有交代型金云母产出,从而为判明该区火山岩浆的源区性质属交代型富集地幔找到了确凿的直接证据。

3. 比较准确地划定了奥陶纪(486—445Ma)沟弧盆系火山活动的时空界限

根据前人对昌马—景阳岭俯冲杂岩带中蓝闪石、多硅白云母及白云母的同位素年龄测定结果(最大值为459Ma,吴汉泉,1987,肖序常,1988),并结合作者有关北祁连山古岛弧和弧后盆地型火山岩的最新科研成果,可以比较确切地判定,北祁连山早古生代洋盆向北俯冲作用几乎贯穿了整个奥陶纪始末。应当指出,由于俯冲作用诱发的陆缘岛弧火山活动不仅发育完善,表现为从早至晚由岛弧拉斑玄武质经岛弧钙碱质向岛弧橄榄玄粗质岩浆(Shoshonitic magma)的递进演化,而且位于前述古海沟俯冲带以北的该岛弧火山岩主体东西延伸稳定,颇具规模,现已查明,北祁连山奥陶纪陆缘岛弧火山岩带东西延展已超过800km。随着俯冲作用的强化,至中晚奥陶世,在岛弧后方,相当于现今走廊南山北坡,发生弧后拉张,发育弧后盆地型拉斑玄武质火山作用。东部老虎山和西部大坂—大岔、九个

泉—白泉门一带由于弧后拉张强烈，发育有一些具有完整蛇绿岩层序弧后扩张脊型海相火山岩。

4. 基本查明晚奥陶世—志留纪为北祁连早古生代洋盆闭合期

由于大洋板块的不断俯冲消减导致洋盆闭合，南北陆块(南为中祁连陆块，北为塔里木—华北板块)开始碰撞。此阶段零星分布的晚奥陶世和早志留世(445—428Ma)大陆型火山岩，乃是碰撞期火山作用的产物。

5. 成矿条件和找矿远景分析

研究查明本区已知工业块状硫化物矿床主要产于晚元古代—寒武纪大陆裂谷型酸性火山系之中，含矿与不含矿岩系具有迥然不同的岩石地球化学特点。此外，在奥陶纪洋脊和弧后扩张脊型基性火山岩中也发现有一些蛇绿岩型块状硫化物矿点和小矿床。它们的形成均受海底热卤水对流循环成矿机制的制约(夏林圪、夏祖春,1987;夏林圪、夏祖春等,1991)。导致海底发生热卤水对流循环的必要条件是存在“热引擎”或“热中心”。大型海底火山岩穹冷却缓慢，利于诱发和驱动海底热卤水发生对流循环。经对比研究后提出，白银厂和清水沟—白柳沟等两个大型新元古代—寒武纪火山岩穹发育区应为北祁连山工业块状硫化物矿床的主要找矿远景区。另外，对于黑石山和石头沟—香子沟等两个大型火山岩穹，也应当在找矿研究上予以重视。

三、海相火山岩分类原则

北祁连山早古生代海相火山岩以细碧-角斑质火山岩系为主，正常系列海相火山岩较少。现将本书所遵循的细碧-角斑质火山岩及少量正常系列火山熔岩的分类原则简述如下。

(一) 细碧-角斑质火山岩

细碧-角斑质火山岩最简单的定义是：“一套含有钠质斜长石及低温矿物(绿泥石、绿帘石、方解石等)的火山岩石，细碧岩为其基性端元，石英角斑岩为其酸性端元，角斑岩是介于其间的中酸性部分(夏林圪、夏祖春等,1991)。作者(夏林圪、夏祖春,1987)曾对细碧-角斑岩系编制出一个与习惯火山岩分类相平行的分类简表(表1-1)，它也是本书所遵循的分类原则。 $K_2O > 2\%$ 的细碧岩称为钾细碧岩， $K_2O > Na_2O$ 的角斑岩和石英角斑岩则称为钾角斑岩和钾石英角斑岩；对 $K_2O < 2\%$ 的细碧岩及 $K_2O < Na_2O$ 的角斑岩和石英角斑岩仍分别称为细碧岩、角斑岩和石英角斑。

表 1-1 细碧-角斑质火山岩分类简表 (据夏林圪、夏祖春, 1987)

SiO ₂ (%)	相	类	族	Na ₂ O+K ₂ O (%,平均值)	特 征 矿 物
>70	火 山 次 火 山 浅成侵入	酸性	石英角斑岩 石英钠长斑岩、钠长花岗斑岩 钠长花岗岩、钠长微花岗岩	5—13	钠长石、石英出现于 斑晶及基质中
55—70	火 山 次 火 山 浅成侵入	中性	角斑岩 钠长花岗闪长斑岩、钠长闪长玢岩 钠长花岗闪长岩、钠长闪长岩	5—13	钠长石(钠更长石)、 石英仅出现于基质 中
45—55	火 山 次 火 山 浅成侵入	基性	细碧岩、钠长粒玄岩、细碧玢岩 钠长粒玄岩、钠长辉绿岩 钠长辉长岩	4—10	钠长石(钠更长石)、 绿泥石

（二）正常系列火山岩

研究区内,正常系列海相火山岩分布零散,仅见于黑石山、老虎山、石灰沟、白泉门、九个泉及川刺沟等地。其命名采用化学成分和矿物成分相结合的方法。化学成分分类系依据国际地科联火成岩分类委员会的火山岩化学分类 TAS 图解(Le Bas et al., 1986),矿物成分分类标准主要参照王德滋、周新民(1982)的《火山岩岩石学》一书有关章节进行。

（三）一点说明

应当强调指出,本书作者无意于将细碧-角斑质火山岩系作为一个原生火山岩石系列或一个独立的源岩浆系列来看待。它只是正常的海底火山岩浆在海底沉积盖层中上升时,当沉积盖层很厚、岩浆上升速度缓慢,遭受海底对流循环的热卤水混染而产生的次生改造型混染岩浆结晶演化的产物。若沉积物很薄造成压力较低,以及岩浆上升过速、冷却很快,没有充足时间停滞于沉积物中时,则会对岩浆混染作用产生抑制,因此,并非所有的海底火山岩均为细碧-角斑岩。有关细碧-角斑质火山岩系的成因归属,作者在以往的论著中(夏林圻等, 1985; 夏林圻、夏祖春, 1987, 1988, 1989; 夏林圻等, 1991)已作过比较详细的讨论,本书不再赘述。

第二章 火山作用与板块构造的关系

现代板块构造理论为探讨火成活动的不同样式和地球化学特点提供了极好的格架。本书作者作为火山岩石学者只是从研究区域海相火山岩的角度探索北祁连山古板块构造体制与火山岩浆作用的关系,主要强调区域上不同特点火山岩的形成直接与构造环境有关。当今火山岩石学界通常采用“将今论古”的法则研究古老火山岩系,即首先比较详细地研究和了解现代火山岩的岩石地球化学特点与特定的构造环境的关系,进而利用和借鉴这些研究成果去特征比较古老火山岩系的古构造环境。现代是过去的钥匙,这对于显生宙($<600\text{Ma}$)基本上是正确的(Wilson, 1989)。即便如此,对于那些遭受过比较强烈后期变动的古老火山岩系也仍然需持谨慎态度,因为强烈的变质和变形有可能掩盖了它们的原始大地构造特征。幸运地是,北祁连山早古生代海相火山岩系经受后期变动比较轻微,这种特点在与邻区(如秦岭山系)的古火山岩系相对比时显示得尤为醒目,它们对北祁连山造山带成形前,各个阶段特征火山活动的地质历史记录保存得相当完整,为开展区域火山岩岩石学研究奠定了十分有利的地质前提。

自70年代中期以来,若干大地构造学者(王荃等, 1976; 肖序常等, 1978, 1988; 左国朝等, 1987; Zhang et al., 1984)曾从多种角度对北祁连山造山带的构造演化进行了探讨,概括起来,有两种认识:一种认为北祁连山曾是古特提斯洋的一部分,其构造演化应纳入到古特提斯构造带的范畴之中;另一种认为它曾经是华北大陆板块(或中朝克拉通)南缘的一个有限洋盆,是由陆缘拉张,进一步大洋化,尔后再行拼合而成的造山带。我们的区域火山岩研究成果赞同后一种认识,并于“七五”末首次明确提出,北祁连山早古生代海相火山岩系应是新元古代至寒武纪在华北大陆板块南缘裂谷作用及进一步碎裂、大洋化基础上,洋盆扩张向北俯冲消减,所形成的活动大陆边缘沟弧盆系火山活动的产物(夏林圻等, 1991, 1992),它类似于现代西太平洋的构造-火山活动格局。通过近4年(1991—1994)的进一步研究,目前已经比较准确地查明了该早古生代海相火山活动的发生、演化历史及其时空展布格局(图2-1),现简述如下。

一、新元古代—寒武纪(679—514Ma)

大陆裂谷型火山作用

从新元古代开始,由于软流圈地幔柱的上涌(这种地幔柱来自于洋岛玄武岩地幔源,极有可能始源于670km深处的上下地幔边界处, Wilson, 1989),导致北祁连山进入以前寒武系为基底发生裂谷断陷拉张,陆壳变薄向洋壳转变的过程(图2-2A),这种过程一直延续到寒武纪晚期。裂谷断陷作用初期,陆壳引张处于初始阶段,产生部分熔融程度低的不饱和和碱性玄武岩浆,由此而形成的大陆碱性玄武岩系在面碱沟、下沟、小黑刺沟和白银厂等地均有发育。随着拉张程度增大,导致部分熔融程度高(面碱沟地区可达7.7%,夏林圻等,

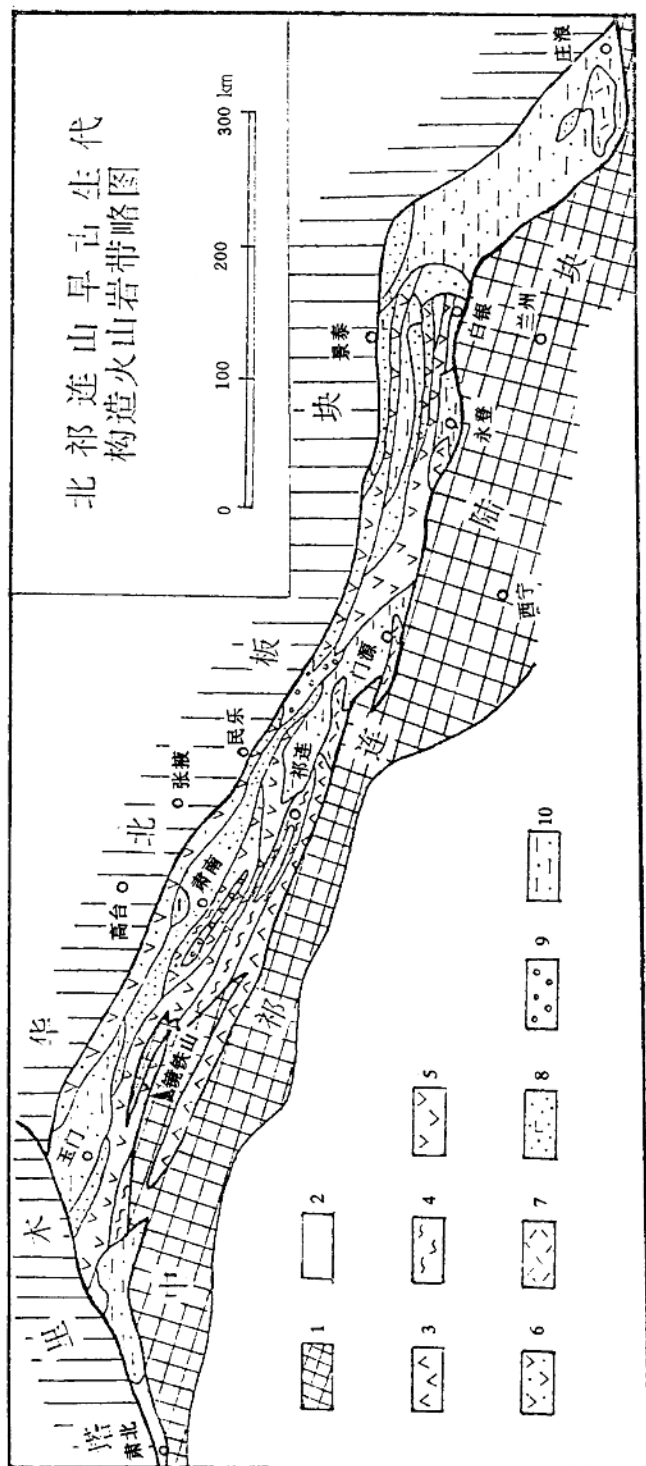


图 2-1 北祁连山早古生代构造火山岩带略图

- 1—前寒武纪镜铁山推覆体; 2—新元古代—寒武纪陆裂火山岩; 3—寒武纪末—早奥陶世洋脊—洋岛型火山岩带; 4—海沟俯冲杂岩带; 5—奥陶纪岛弧火山岩; 6—中—晚奥陶世弧后盆地火山岩带; 7—晚奥陶世残余海盆火山岩; 8—志留纪残余海盆(含零星大陆火山岩的复理石建造, 代表海盆闭合阶段产物); 9—泥盆纪磨拉石盆地(碰撞造山产物); 10—上覆盆地(石炭系至第四系, 代表山体长期隆升中形成的断陷及坳陷)

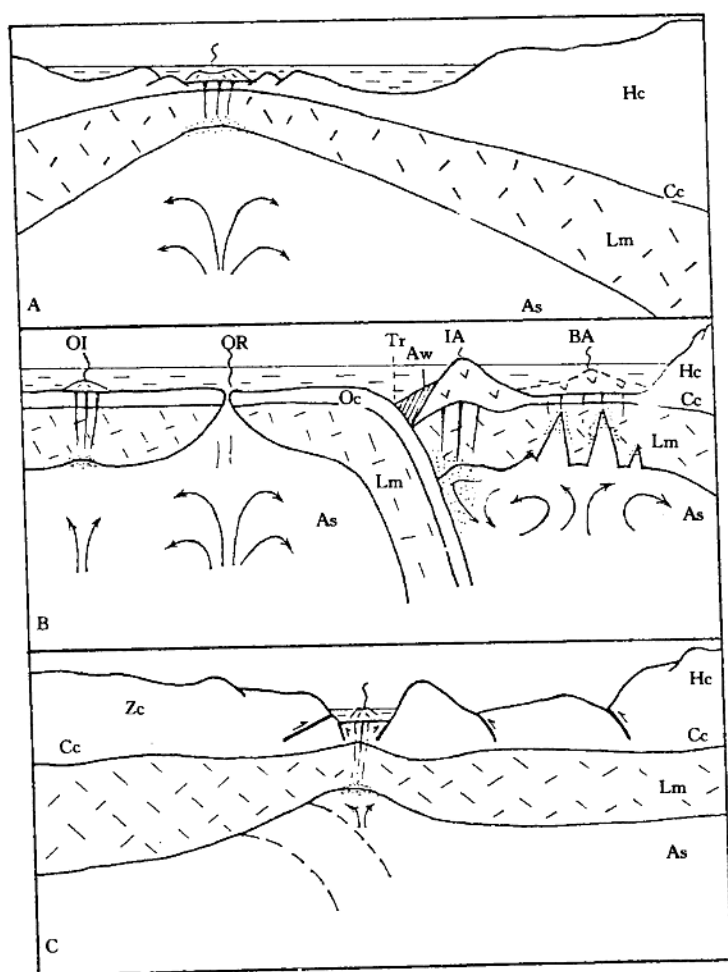


图 2-2 北祁连山早古生代火山岩浆活动演化示意图

A—新元古代—寒武纪大陆裂谷型火山作用；B—寒武纪末—奥陶纪沟弧盆系火山作用；C—晚奥陶世—志留纪海盆闭合期火山作用；Cc—陆壳；Oc—洋壳；Lm—岩石圈地幔；As—软流圈；OI—洋岛；OR—洋脊；Tr—海沟；Aw—增生楔沉积；IA—岛弧；BA—弧后盆地；Hc—华北大板块；Zc—中祁连陆块

1991) 的饱和性拉斑玄武质岩浆溢出，构成本区新元古代—寒武纪海相火山岩的主体。在相当一些地区（如白银厂和清水沟—白柳沟地区）由上地幔部分熔融产生的基性岩浆上升速度比较缓慢，当它们进入至陆壳之后，引起硅铝质陆壳下部发生深熔作用，产生富硅质岩浆，这种富硅质岩浆首先上升喷发形成酸性火山岩系，尔后是偏下部的基性岩浆上升喷发，形成层位偏上的基性火山岩，二者构成典型的双峰式火山岩组合。它们分别在甘肃省白银厂地区和青海省清水沟—白柳沟地区，形成白银矿田、黑石山、清水沟—白柳沟和石头沟—香子沟四个规模较大具明显双峰式特点的火山岩穹。火山岩的主元素、微量元素和 Sr 同位素初始值（基性火山岩：0.704—0.707，酸性火山岩：0.703—0.713）呈现清楚

的双峰式或双端元式分布特征。岩穹的基本结构是：中心及下部为酸性火山岩，边缘及上部为基性火山岩和少量中性火山岩。我们的研究查明：①白银岩穹：平面上呈椭圆形，东西长约 7km，南北宽约 5.6km，中心及下部为酸性石英角斑质火山岩（606—594Ma），边缘及上部为基性细碧质火山岩（522Ma）和少量中性角斑质火山岩；②黑石山岩穹：位于白银岩穹的东南，剥蚀程度相对较白银岩穹要低，主要由基性细碧岩（514Ma）及中性和中酸性角斑岩组成，仅在切割较深的沟谷中可见到有酸性石英角斑岩（535Ma）下伏；③清水沟—白柳沟地区：该区位于昌马—景阳岭俯冲杂岩带中，现查明该区原地产出的元古代末寒武纪（679—545Ma）火山岩系呈 NW—SE 向延展，并为两条近于平行的外来俯冲杂岩构造岩片切穿分割成为南北两个岩段，它们分别为两个平面上呈压扁椭圆形的火山岩穹，中心和下部为酸性石英角斑质火山岩系，边缘和上部为基性细碧质火山岩系。北部清水沟—白柳沟岩穹出露较为完整，长约 25km，宽 3—4km；南部石头沟—香子沟岩穹，在黑龙江以南为石炭—二叠系及更新地层覆盖，出露不全。上述岩穹不仅在卫星图像上表现为环形影像，而且其内部结构也已为钻探资料所证实。从理论上分析，大型海底火山岩穹可以起着驱动海底热卤水发生对流循环的热引擎的作用。循环对流的热卤水能够淋滤搬运火山岩系中的成矿元素，并在适合的条件下（如减压造成的成矿流体沸腾，以及氧逸度升高使得成矿流体沉淀）于喷口附近及其远侧沉淀，形成不同类型的块状硫化物系列矿床。经我们研究后提出上述大型火山岩穹应为北祁连山工业块状硫化物矿床的主要找矿远景区。

二、寒武纪末—早奥陶世（522—495Ma） 洋脊-洋岛型火山作用

寒武纪末，随着大陆碎裂化加剧，北祁连山已完成从大陆断陷向洋盆的转化。洋脊处，由于软流圈地幔柱物质的底辟上涌（图 2-2B），在地幔流体的参与下，通过绝热减压诱发部分熔融（夏林圻等，1992，1994；Xia Linqi et al., 1993），形成玄武岩浆，它们的喷发和侵入形成洋壳层。新形成的洋壳连续推动较老的地壳离开脊轴，而导致洋盆发生扩张。大洋板块随着离开洋脊脊轴而变冷、增厚，并在一些地幔局部上涌或热点（Hot spot）处，为所产生的玄武岩浆挤入，形成洋岛。

我们的研究查明，作为存在加里东古洋壳标志的洋脊-洋岛型火山岩带主要分布于托莱山北坡的玉石沟、川刺沟一带，向 NW 可追索至吊大坂，向 SE 已断续延至天祝县大克岔（图 2-1）。它们是以仰冲岩片（Obducted slices）的形式被保存于北祁连山体之中，其被保存程度是很低的，因为作为古大洋岩石圈的组成，大部分已由于板块俯冲消减作用又再循环回到地幔中去了。该洋脊-洋岛型火山岩系具有比较完整的蛇绿岩层序（现已倒转），底部为超基性岩，依次向上为辉长岩、席状辉绿岩墙群（相伴有大洋斜长花岗岩）、枕状细碧质熔岩、凝灰岩和硅质岩（夏林圻等，1994）。经岩石地球化学研究证明，这套火山岩组合的源岩浆系列为具有富集型洋脊玄武岩（E-MORB）和过渡型洋脊玄武岩（T-MORB）特点的低钾拉斑玄武岩系以及洋岛碱性和拉斑玄武岩系，由此可以反推它们并非源自于较浅层位的亏损软流圈上地幔源，而是来自更深层位与洋岛玄武岩源类似的比较富集的地幔柱（Mantle plume）或热点。应当指出，这种推断已在本次研究中被证实：我们首次在川刺沟

洋脊型火山岩蛇绿岩层序底部的橄榄岩中发现有交代型金云母产出,从而为判明本区火山岩的源区属交代型富集地幔找到了确凿的直接证据。

三、奥陶纪(486—445Ma)沟弧盆系火山作用

随着洋盆扩张,大洋板块冷却,逐渐致密,继而自SW往NE向华北大陆板块之下俯冲,沿走廊南山南坡产生深海沟俯冲带。由于大洋板块的俯冲消减,洋壳的玄武岩及在海沟处未被刮落的沉积物,随着被输送往地幔深处,而逐渐被加热,并经受了一系列复杂的脱水反应。脱水作用中释放出的含水流体上升进入到消减板片之上的地幔楔中从而诱发部分熔融产生岛弧火山作用,并进而在岛弧后侧发生拉张,引发次级洋底扩张,导致发育弧后或边缘盆地,及一些不均匀分布的弧后扩张中心和相伴生的火山活动(图2-2B)。需要指出,上述大洋岩石圈板块的俯冲消减作用主要发生于华北大陆板块的南部边缘,但也有局部属于洋内俯冲,因为我们在川刺沟剖面的上部,已发现有具有岛弧钙碱系特点的玄武质岩石,它们应为洋内弧火山作用的产物,规模很小,仅是一种由洋内俯冲作用引发的不成熟初始火山弧。业已查明北祁连山奥陶纪沟弧盆系自南向北(图2-1)为:

(一) 海沟俯冲杂岩带

已发现代表北祁连山早古生代古海沟俯冲部位的俯冲杂岩带共有两条。一条规模较大,西起玉门镇南昌马地区(吴汉泉等,1991),向SE经石油沟,中间为镜铁山前寒武系推覆体截断,再向SE经边马沟—清水沟—百经寺,直至景阳岭(吴汉泉,1982,1984),发育于托莱山北坡洋脊—洋岛型火山岩带的北东侧,东西延伸已达400km,它是由于大洋板块俯冲、铲削,不断在弧前增生而形成的楔形俯冲杂岩增生地体,包括有蓝闪片岩带(两条)、基性—超基性岩块、火山岩岩片、混杂堆积岩、放射虫硅质岩残片,以及由滑塌堆积、浊流沉积及复理石组成的增生楔(许志琴等,1994)。根据前人(吴汉泉,1987;肖序常等,1988; Liou et al.; 1989)报导的蓝闪片岩中蓝闪石、多硅白云母及白云母的K-Ar和 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 同位素年龄数据,最大值为459Ma,最小值为388Ma,大多为450—420Ma,并结合本书作者有关北祁连山古岛弧和弧后盆地型火山岩的最新Sm-Nd及Rb-Sr等时线年龄测定数据(486—445Ma),可以较为准确地判定形成该俯冲杂岩带的俯冲作用几乎贯穿了整个奥陶纪始末。第二条俯冲杂岩带规模很小,仅出露于白泉门以西至九个泉一带^①。我们目前在地表所见到的上述俯冲杂岩带,只是弧前俯冲杂岩增生体的深部经造山作用上升后而裸露的部分。

(二) 奥陶纪(486—445Ma)陆缘岛弧火山岩带

发育于前述古海沟俯冲带的北东侧,沿走廊南山分布,其典型发育地点为甘肃省永登县石灰沟地区。我们的研究(夏林圻、夏祖春,1989; Xia Linqi and Xia Zuchun, 1989; 夏林圻等,1991,1994)查明,该处岛弧火山岩系出露最为完整。它们作为岛弧火山作用的产物,随着岛弧演化阶段由早至晚,随着距离海沟俯冲消减带由近而远,呈现非常特征的递进式演变,即下部为岛弧拉斑玄武岩系,是岛弧发育初期拉斑玄武质火山作用的产物;继

① 丁宝元、刘童家、张安祥,1982,肃南九个泉一带发现蓝片岩及混杂堆积。

而,发育以岛弧钙碱系为主的海相火山活动,产生中部以中性火山岩占颇大优势的岛弧钙碱性火山岩系。至晚奥陶世($457\pm 8\text{Ma}$),该岛弧火山岩系的上部层位,出现一套以粗面玄武岩、白榴碱玄岩、白榴方沸岩和白榴粗面斑岩为典型组成单元的碱性火山岩系,岩石地球化学研究揭示,它们具有岛弧橄榄玄粗岩系(Shoshonitic series)的源岩浆属性。该橄榄粗玄岩系在整个岛弧型海相火山岩系中所占比例不到10%,是北祁连山古岛弧体系在晚奥陶世初期已达到成熟阶段的重要标志。由于消减带流体作用于消减板片之上的地幔楔进而诱发后者部分熔融所产生的岛弧火山岩浆十分富含挥发组分(主要为 H_2O),例如石灰沟钙碱性火山岩浆和碱性火山岩浆中所溶解的挥发组分总量分别可达2.5%—5%和0.7%—3.4%(夏林圻、夏祖春,1989; Xia Linqi and Xia Zuchun, 1989; 夏林圻等, 1991),从而造成其火山作用可以是高度爆发的,这从本区岛弧火山岩系十分富含爆发相火山碎屑岩(集块岩、角砾熔岩)已经得到佐证。我们的最新研究业已查明,该奥陶纪岛弧火山岩系延伸稳定、甚具规模,向东已达白银厂地区,叠加超覆于元古代末—寒武纪火山岩之上,向西可至民乐县西道流、祁连县边马沟及肃南县白泉门一带,沿NW—SE方向延展已逾800km(图2-1)。

(三) 中晚奥陶世(469—454Ma) 弧后盆地火山岩带

随着俯冲作用的加强,至中晚奥陶世,在岛弧系火山链的后方,即朝向火山弧前峰的大陆一侧,发生弧后拉伸,形成弧后或边缘盆地。其动力学机制当源于岛弧轴下深部软流圈地幔的底辟上隆(Crawford et al, 1981)。对于这种上隆的起因,还没有统一的认识,我们认为 Toksöz 和 Bird (1977) 的意见颇有参考意义,即沿着海沟消减带俯冲下降的板片对于软流圈会产生一种粘性拖曳,引起岛弧后方的地幔楔中发生补充性对流循环,导致地幔上隆,诱发弧后扩张(图2-2B)。尽管弧后盆地与洋脊处发生的海底扩张具有类似的拉伸性质,但本质上绝不相同,因为前者总是与消减作用密切相伴。一般而言,弧后盆地的发育总是标志着消减板片的消减角度较陡,这种从当今西太平洋消减系研究得出的规律(Cross and Pilger, 1982),也可用于反演北祁连山早古生代消减带的陡倾特征;相反,若消减板片呈低角度俯冲($30^\circ\pm$),如当今东太平洋所见,则弧后呈挤压特征,无弧后或边缘盆地产生。弧后盆地之下底辟上隆的地幔柱在消减带流体的作用下可以被诱发部分熔融,从而产生弧后盆地型火山岩浆,这种岩浆应当同时具有洋脊和岛弧岩浆的特点,本区中晚奥陶世弧后盆地火山岩的岩石地球化学特点完全证实了上述理论推测。

北祁连山弧后盆地火山岩带发育于走廊南山北坡。现已查明该火山岩带东起甘肃省景泰县老虎山,西经民乐县扁都口、张掖县苏优河,至肃南县大坂—白泉门一带宽度增大,最西端可能已到达榆树沟一带(图2-1)。东部老虎山和西部大坂—大岔、九个泉—白泉门一带由于弧后拉张强烈,发育有一些具有完整蛇绿岩层序的弧后扩张脊型海相火山岩,其底部为斜辉橄榄岩,向上为堆晶辉石岩和辉长岩,中部为被辉绿岩墙和辉石闪斜煌斑岩穿插的块状和枕状基性熔岩,上部为凝灰岩及硅质板岩。目前,其层序已经倒转,反映它们乃是弧后盆地的仰冲海底。该带中的火山岩具有十分清晰的岛弧和洋脊火山岩双重岩石地球化学特点。值得提及的是,本次研究中,我们首次在北祁连山弧后盆地火山岩系中发现有十分特征的高镁质(MgO : 4.20%—7.59%)中性(SiO_2 : 55.01%—62.00%)火山岩存在,它们的岩石地球化学特点完全可以和世界上一些典型现代弧后盆地,如巴布亚新几内亚 Cape Vogel 和日本 Bonin 群岛的高镁安山岩(Hikey and Frey, 1982)相比拟。

四、晚奥陶世—志留纪(445—428Ma)海盆闭合 期火山作用和泥盆纪磨拉石盆地

由于大洋板块的不断消减导致洋盆闭合,至晚奥陶世晚期陆-弧发生碰撞,于残余海盆中堆积了厚度大于 3000m 的初始磨拉石建造(马营沟群),主要由陆源碎屑岩(砾岩、砂岩、粉砂岩和板岩互层)组成,夹少量火山碎屑岩。与这套初始磨拉石建造相伴,在祁连县冰沟、门源县红沟和静宁县、庄浪县葫芦河,局部发育有晚奥陶世大陆型火山岩,其组成以大陆碱性火山岩为主,它们是陆弧碰撞作用的产物。

陆弧碰撞的晚期,可能是由于先期已经俯冲下插的大洋岩石圈板片又发生后继性俯冲(Subordinate subduction),并导致其上的楔形地幔区微弱部分熔融(图 2-2C),从而造成在古浪县南泥沟和景泰县等地零星产出有类似岛弧钙碱系特点的早志留世火山岩。

泥盆纪为南北陆块(南为中祁连山陆块,北为华北大板块)碰撞造山期,在北祁连山加里东造山隆起带的山间和山前盆地中堆积了厚约 3000m 的山麓相、山间河流相和湖相磨拉石砂、砾岩建造,其西部为老君山群,东部为雪山群,主要沿着肃南—冷龙岭—景泰一线迤迤展布(左国朝,1986)。