

祁连山主要矿床组合及其成矿动力学分析

李文渊^{1 2)}

1)西北大学 陕西 西安 710054 ;

2)中国地质调查局西安地质矿产研究所 陕西 西安 710054

摘 要 祁连山早古生代有色金属、贵金属成矿带 构造上划分为北祁连、中祁连和南祁连 3 个构造单元 成矿区划上一般分为北祁连成矿亚带和南祁连成矿亚带 后者由中祁连和南祁连 2 个构造单元组成。总体上北祁连由早古生代北祁连洋向北洋-洋俯冲的沟-弧-盆相和残留的大陆裂谷相火山岩系组成为特点 成矿主要表现为块状硫化物铜多金属矿床 西段为洋-陆碰撞的岩浆弧相的构造环境 有夕卡岩型的钨矿床发现 南祁连主要为大陆裂谷或陆间裂谷构造环境的复理石相、火山碎屑岩相和中祁连的古老基底组成 有岩浆铜镍矿床、铬铁矿矿床和大型造山型金矿床发现。祁连山中元古代早期曾是全球性超地幔作用的“热点”位置 金川超大型 Cu-Ni-PGE 矿床即是其超地幔柱作用的结果 早古生代增生作用推移至北祁连北侧 南祁连拉水峡一带可能是南侧金川式矿床的重要找矿选区 早古生代北祁连有限洋盆为古亚洲大洋诱发的边缘海环境 边缘海独特的消亡历程形式形成了特征的成矿组合响应。祁连山晚期地处青藏高原北缘整体受地壳缩短影响 造山前构造形迹和矿化岩相遭受显著改造 并形成“造山型”矿床。

关键词 祁连山 矿床组合 成矿作用类型 成矿动力

Main Mineral Deposit Associations in the Qilian Mountains and Their Metallogenic Dynamics

LI Wenyuan^{1 2)}

1) Northwest University, Xi'an, Shaanxi, 710069; 2) Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an, Shaanxi, 710054

Abstract The Qilian Early Palaeozoic metallogenic belt dominated by nonferrous and precious metal mineral deposits can be tectonically divided into North, Middle and South Qilian units. As for ore-forming regionalization, it is divided into North Qilian and South Qilian metallogenic subbelts, with the latter composed of the North and the Middle Qilian tectonic units. On the whole, the Early Palaeozoic marine volcanic rocks are considered to be rocks of island arc, deep sea trench and back-arc basin facies and rift remnants, which were formed in an environment of the northward North Qilian ocean-ocean subduction and contained polymetallic massive sulfide deposits. However, the western part of the North Qilian Mountains seems to be an environment of continental magmatic arc-facies formed by ocean-continent collision, with some skarn tungsten deposits in it. The South Qilian consists of flysch formations and pyroclastic rocks of continental and intracontinental rift-environments as well as the Middle Qilian old basement, and contains some magmatic copper-nickel deposits and chromium deposits and large-size orogenic type gold deposits. In the early stage of Middle Palaeozoic, the Qilian Mountains seemed to be the “hot point” position of ultra-plume, and the Jinchuan superlarge Cu-Ni-PGE deposit resulted from the ultra-plume action, by which the deposit was moved to the northern side of the North Qilian due to the Early Palaeozoic accretion. The Lashuixia area in the South Qilian is possibly an important area in search for the Jinchuan type deposits. In Early Palaeozoic stage the North Qilian ocean basin was a marginal sea environment induced from Paleo-Asiatic Ocean, and the special withering history of the marginal sea caused the formation of characteristic metallogenic associations. The crust shortening of the Qilian Mountains in northern Qinghai-Tabit plateau led to the intense transformation of the pre-orogenic structures and mineralized petrofacies and the formation of “orogenic type” mineral deposits.

Key words the Qilian Mountains ore deposit association ore-forming type metallogenic dynamics

自 20 世纪 50 年代白银厂铜多金属矿床发现并勘探利用以来 祁连山已成为中国重要的有色金属基地 海相火山岩及其相关块状硫化物矿床已进行

了卓有成效的调查研究(宋叔和,1985;夏林圻等,1996;孙海田等,1997)。近年来 除发现多处大中型金矿床(毛景文等,1999b)和石居里富铜矿床(李文

渊等,1998)外,又有小柳沟钨矿床的突破性发现(毛景文等,1999a),展示了祁连山成矿的复杂性和东、西段成矿上的差异。本文利用构造演化与矿产关联的区域成矿谱系观点,考察研究祁连山的成矿体系,探索其区域成矿动力性机制。

1 区域成矿地质构造环境

1.1 区域构造划分

祁连山地理上由河西走廊、走廊南山(北祁连)、托莱山(中祁连北)和众多山系、盆地的党河南山、宗务隆山、拉鸡山等(南祁连)组成。构造上一般划分为3个构造单元:北祁连构造带(河西走廊、走廊南山)、中祁连陆块(托莱山)和南祁连构造带(黄汲清等,1965)。板块构造研究初期曾将中祁连作为岛弧,河西走廊、走廊南山划为弧后盆地的古板块(Zhang等,1984),但北祁连山蛇绿岩(肖序常等,1978)和高压变质带(吴汉泉,1980)的研究深化了对该地区古板块的揭示。区域早古生代海相火山岩(夏林圻等,1996;1999)和俯冲杂岩(许志琴等,1994)的系统研究,已经比较清楚地鉴别出了北祁连洋中东段向北洋-洋俯冲形成的沟-弧-盆系产物;西段镜铁山微陆块和面积奥陶纪阴沟群大陆火山弧中酸性火山岩的分布,以及缺乏弧后拉张洋壳型基性火山岩系的特点,显示了北祁连洋西段早古生代为向北洋-陆俯冲形成的活动大陆边缘的构造转换(李文渊,1999a,1999b)。

中祁连陆块与南祁连构造带构造基底应是统一整体,南祁连党河南山、拉鸡山一带分布的火山岩是统一基底上新元古代—早古生代发生不同程度裂谷作用的产物,这些裂谷拉张的时限和程度,随着形成的大量火山-沉积岩系及相伴产出的花岗岩体和镁铁-超镁铁岩群不断的深入研究,已愈来愈趋于清晰。党河南山一带分布有2期火山岩系,其中分布在扎子沟-小红沟一带的一期火山岩,下部为基性火山岩,主要由枕状玄武岩、安山玄武岩组成,局部夹硅质岩,上部中性火山岩,主要为安山岩和安山质凝灰岩。基性火山岩全岩 Rb-Sr 等时线年龄分别为 684.87 ± 71 Ma,中性火山岩为 666.63 ± 1.6 Ma,为新元古代末期的产物(赵虹,2001)。联系相邻大道尔吉超镁铁岩被寒武纪扎子沟花岗闪长岩岩基(510.85 ± 14 Ma,全岩 Rb-Sr 等时线)①侵入的特点,大道尔吉纯橄岩和单斜辉石岩等可能与基性火山岩是同时期洋壳的产物(尹安,2001)。南祁连

党河南山一带新元古代末可能至少出现了已产生洋壳的陆间裂谷,甚至更大的拉张环境;另一期为下奥陶世的火山-碎屑岩组合,火山岩主要为英安岩、安山质凝灰岩等,为洋壳消减于陆壳之下岩浆作用的产物。

祁连山整体处于中国中部秦祁昆腰带的中段,呈 NWW 走向,其西被阿尔金走滑构造带所截,东延与北秦岭相连,南依柴达木地块,北接阿拉善地块的龙首山隆起。作为加里东期的造山带,祁连山早古生代构造环境主体应划分为北祁连和南祁连两大块(图1)。北祁连代表了早古生代北祁连洋消亡、俯冲、消减,最终于早志留世碰撞造山的早古生代构造演化环境,南祁连则为大陆裂谷或成陆间裂谷阶段即消亡的环境,中祁连属残留陆块,应属南祁连的组成部分。晚古生代以后,南、北祁连连为一体,经受了多期构造活动,总体表现为地壳缩短的构造演化特点。前寒武纪,南、北祁连的关系涉及到对北祁连洋的认识,是新元古代末大陆裂解生成裂谷(汤中立等,1995),最后形成有限洋盆(夏林圻等,1996),或远离的两陆块汇聚(冯益民等,1996),至今仍存在争议。

1.2 区域构造演化及控矿特点

祁连山早古生代南北部不同的区域构造演化特点,造就了不同的区域控矿演化系统。前寒武纪祁连山整体一般认为隶属于华北地块,南祁连的化隆群、皋兰群、野马南山群与北祁连的北大河群均可与华北地块西南缘龙首山隆起的太古-古元古代龙首山群相对比,系统一的结晶基底的分离(汤中立等,1995)。但近年来研究有不同认识②,龙首山 ϵ_{Nd} 为 $-4.8 \sim -23.2$ 、北大河群 ϵ_{Nd} 为 $-4.8 \sim -15.7$,二者数值近于一致,而与化隆群(-9.7)有较大差异,暗示北祁连与华北地块为统一的结晶基底,南祁连古元古代以后才得以拼贴。中元古代早期华北地块西南边缘发生大的裂解事件,形成北大河地区朱龙关群中的大规模大陆裂谷溢流玄武岩,其 Sm-Nd 等时线年龄为 1770.9 ± 333.0 Ma(夏林圻等,1999),并造就了金川超大型岩浆铜镍矿床,其岩石-矿物 Sm-Nd 等时线为 1509 ± 31 Ma 的生成,大陆裂谷成熟期形成了镜铁山大型沉积型铁矿床,其 Sm-Nd 等时线年龄为 1309 ± 80 Ma。祁连山中元古代早期这一成矿时期,可能代表一期中国古陆大规模的裂解事件,有核幔边界物质的上升,从而造成金川巨型矿床的形成。

① 王崇礼等,2000.甘肃南祁连党河南山北坡金铜矿成矿规律、控矿因素研究及找矿靶区优选研究报告(内部报告)。

② 董国安、杨宏仪等,2002.由钨-铀同位素及地球化学研究祁连山地区微板块演化之研究.第三届海峡两岸祁连山及邻区地质研讨会——中央造山带的演化(论文集)。

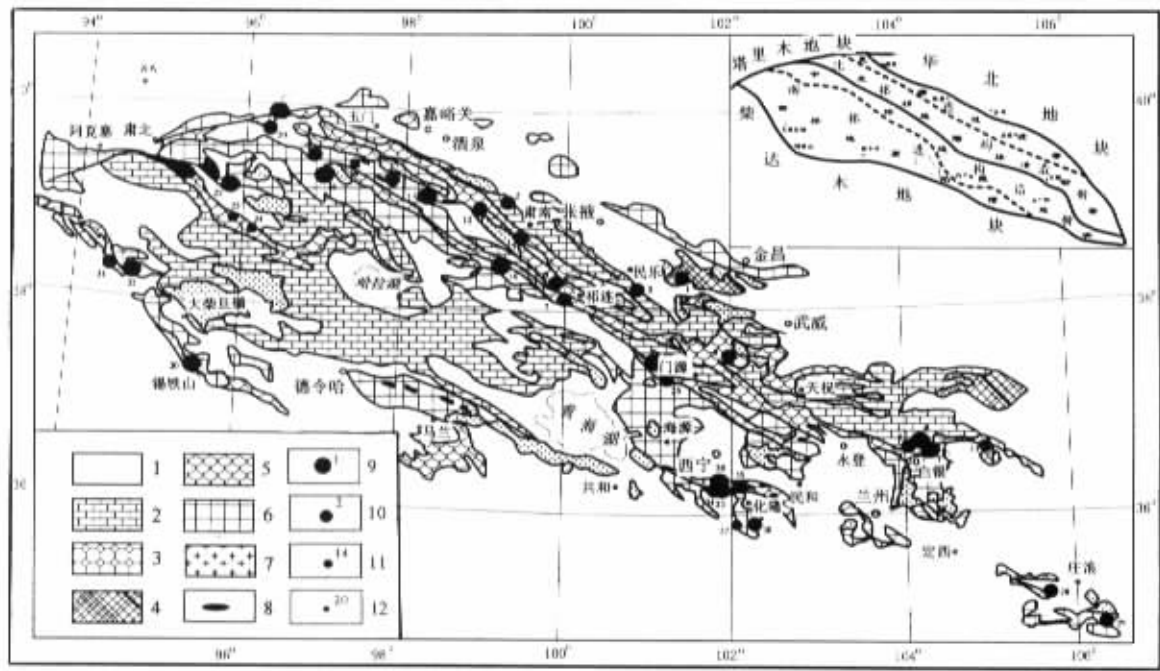


图 1 祁连山古生代矿床地质分布图

Fig.1 Geological distributions of Palaeozoic mineral deposits in the Qilian Mountains

1-中生界 2-晚古生代复理石建造 3-晚古生代火山岩系 4-中寒武世复理石建造 5-早古生代火山岩系 6-前寒武纪基底 7-中酸性岩体 ; 8-镁铁-超镁铁岩 9-超大型矿床及编号 ;10-大型矿床及编号 ;11-中型矿床及编号 ;12-小型矿床及编号(矿床编号及名称见表 1)

1-Mesozoic-Cenozoic Erathem 2-Late Palaeozoic flysch formations 3-Late Palaeozoic flysch volcanic rocks 4-middle Cambrian flysch formations ; 5-Early Palaeozoic flysch volcanic rocks 6-Precambrian terranes 7-intermediate-acidic rock bodies 8-mafic-ultra mafic rock bodies 9-ultralarger ore deposits and their numbers ;10-larger ore deposits and their numbers ;11-middle ore deposits and their numbers ;12-small ore deposits and their numbers (ore deposits and their numbers see table 1)

早古生代,祁连山壳幔物质的急剧交换,形成了祁连山最具特色的铜、铅、锌、钨、金等金属矿床聚集(图 1 表 1)。新元古代末期北祁连开始裂解,拉张至寒武纪形成白银厂式大型铜多金属块状硫化物矿床,奥陶纪北祁连洋扩张的同时开始向北消减,中东段洋-洋俯冲形成的成熟岛弧裂解产出黑矿型浪里克中型铜块状硫化物矿床,西段洋-陆俯冲形成类似安第斯山的活动大陆边缘,在酸性岩浆作用下形成小柳沟夕卡岩-石英脉型钨(铜、钼)矿床,与此同时,西段北祁连洋扩张形成的亏损型地幔岩石局部金矿化,产出鹰咀山中型金矿床,活动大陆边缘的中酸性火山作用形成寒山浅成低温热液型大型金矿床。中晚奥陶世北祁连中东段弧后盆地扩张,产生弧后型过渡壳-洋壳相关的塞浦路斯型铜(锌)块状硫化物矿床。志留纪北祁连洋闭合形成的前陆盆地,造就了天鹿沉积型中型铜矿床等。北祁连早古生代的构造演化对应于完整的成矿系统(图 2)。南祁连早古生代基本上属于陆内裂解环境,局部拉张出现洋壳,并形成大道尔吉岩浆分异型铬铁矿床。奥陶纪锡铁山铜多金属块状硫化物矿床的成生代表了南祁连南界相依的柴达木地块北缘在早古生代剧烈的拉伸环境,可能亦曾出现洋壳和洋壳的消减作用。值得注意的是北祁连南界的红沟铜矿床很可能是早古生代

北祁连洋南岸被动陆缘火山作用的产物,东端的蛟龙掌铅锌矿亦属此例,构造上应划归南祁连范畴。

晚古生代,祁连山与中亚构造域的构造演化不尽相同,火山作用不甚发育,联系整个中国西部的大陆构造演化格局,祁连山晚古生代已与华北地块、柴达木地块、塔里木地块连为一体,构成了北邻古亚洲洋的冈瓦纳大陆的边缘(任纪舜等 2003)。因此,祁连山晚古生代系陆内地质背景,但非稳定的构造环境,陆内局部伸张或挤压作用主要导致预富集贵金属活化和铜的改造作用等。北祁连表现为桦树沟式铜矿的构造热液富集成矿,寒山、鹰咀山金矿床金矿化的进一步浓集品位提高,南祁连也主要为尼旦山、滩间山等大型金矿床的富集成矿,拉鸡山一带形成上庄伟晶岩型磷、稀土大型矿床。分布于拉鸡山一带的拉水峡等岩浆镍矿床以往多认为属于古生代的产物,其产出于化隆群古老基底和成岩成矿类似于金川矿床的特点,很可能成生于中元古代早期大规模裂谷事件,对应于金川矿床,为分布于古裂谷南翼的矿化痕迹。

2 主要矿床成矿作用及典型矿床

2.1 中元古代大陆裂谷幔源岩浆不混溶成矿作用及金川矿床

镍金属储量占据世界超大型铜镍矿床第二位的

表 1 祁连山古生代主要矿床一览表
Table 1 Main Palaeozoic mineral deposits in the Qilian Mountains

编号	矿床名称	矿种*	矿床成因	成矿时代	赋矿岩石
1	曹家口	金、银	浅成低温热液 + 构造热液型	中寒武世	中寒武世大黄山群杂砂岩
2	天鹿	铜	沉积型	中志留世	中志留世肛门沟组砂砾岩
3	童子坝	金	浅成低温热液 + 构造热液型	泥盆纪	奥陶纪中酸性火山岩
4	折腰山	铜、铅锌	海底火山热液型	寒武纪	寒武纪中酸性火山岩
5	火焰山	铜、锌	海底火山热液型	寒武纪	寒武纪中酸性火山岩
6	小铁山	铅、锌	海底火山热液型	寒武纪	寒武纪中酸性火山岩
7	尕大板	铜、铅锌	海底火山热液型	寒武纪	寒武纪中酸性火山岩
8	浪力克	铜	海底火山热液型	奥陶纪	奥陶纪中酸性、中基性性火山岩
9	柳沟-下区	铜、铅锌(金)	海底火山热液型	奥陶纪	奥陶纪中酸性、中基性性火山岩
10	下湾	锰	氧化锰型	寒武纪	寒武纪细碎屑岩
11	石居里沟	铜、锌、金)	海底火山热液型	中晚奥陶世	中晚奥陶世基性火山岩
12	错沟	铜	海底火山热液型	中晚奥陶世	中晚奥陶世基性火山岩
13	银洞沟	铜	海底火山热液型	中晚奥陶世	中晚奥陶世基性火山岩
14	玉石沟	蛇纹石	构造蚀变热液型	寒武纪	寒武纪超镁铁岩
15	小柳沟	铜、钼、铜)	矽卡岩-石英脉型	奥陶纪	长城纪浅变质火山岩、碳酸盐岩、碎屑岩
16	塔尔尕	铜、钼)	夕卡岩-石英脉型	奥陶纪	长城纪浅变质岩
17	桦树沟	铜、金)	构造蚀变热液型	中志留世	蓟县纪浅变质碳酸盐岩、细碎屑岩
18	柳沟峡	铜	构造蚀变热液型	中志留世	蓟县纪浅变质碳酸盐岩、细碎屑岩
19	大东沟	铅锌	构造蚀变热液型	中志留世	长城纪浅变质细碎屑岩
20	鹰咀山	金	浅成低温热液 + 构造热液型	华里西期	奥陶纪超镁铁岩
21	寒山金矿	金(铜)	浅成低温热液 + 构造热液型	华里西期	中晚奥陶世中酸性火山碎屑岩
22	大道尔吉	铬	岩浆结晶分凝型	寒武纪	寒武纪超 铁岩
23	贾公台	金(铜)	浅成低温热液 + 构造热液型	早古生代晚期	奥陶纪变质火山碎屑岩
24	黑刺沟	金	浅成低温热液 + 构造热液型	早古生代晚期	奥陶纪变质碎屑岩
25	红沟	铜、金)	海底火山热液型	晚奥陶世	晚奥陶世中基性性火山岩
26	大滩	钛、铁、钒	结晶分异型	早古生代早期	早古生代镁铁-超镁铁岩
27	松树南沟	金	浅成低温热液 + 构造热液型	早古生代晚期	奥陶纪火山碎屑岩
28	蛟龙掌	铅、铜)	海底火山热液型	奥陶纪	奥陶纪中基性性火山岩、火山碎屑岩
29	陈家庙	铜	构造蚀变热液型	奥陶纪	中元古代浅变质碎屑岩质
30	锡铁山	铅、金、锡)	海底火山热液型	奥陶纪	奥陶纪中酸性、中基性性火山岩
31	青龙滩	硫铁矿	海底火山热液型	奥陶纪	奥陶纪火山岩
32	滩洞山	金	浅成低温热液 + 构造热液型	晚古生代	前寒武纪变质火山岩、碎屑岩
33	尼旦山	金	浅成低温热液 + 构造热液型	早古生代晚期	前寒武纪变质火山岩、碎屑岩
34	天重峡金矿	金	浅成低温热液 + 构造热液型	早古生代晚期	前寒武纪变质火山岩、碎屑岩
35	元石山	铁、镍	岩浆结晶型	早古生代早期?	镁铁-超镁铁岩
36	拉水峡	铜、镍(铂)	岩浆熔离型	早古生代早期?	基性-超基性岩
37	裕龙沟	铜、镍(铂)	岩浆熔离型	早古生代早期?	基性-超基性岩
38	上庄	稀土(磷、铁)	伟晶岩型	早古生代晚期	早古生代晚期花岗伟晶岩

注 矿床编号同图 1 矿床分布位置及规模见图 1 所示。

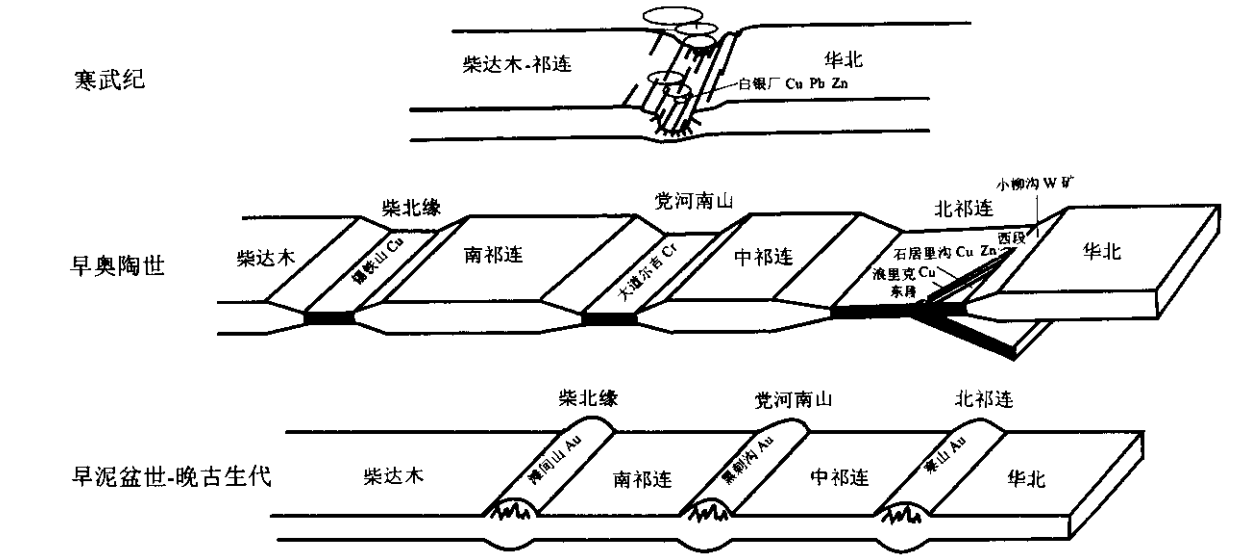


图 2 祁连山古生代构造演化及矿床分布示意图

Fig. 2 Sketch map of Palaeozoic tectonic evolution and distributions for mineral deposits in the Qilian Mountains

金川矿床其成矿岩体形成于中元古代早期长城纪,岩体集中于一个二辉橄榄岩为主体的单个岩体,岩体的60%矿化,如此巨大的镍金属元素的集中富集,肯定是超常地质作用的结果。根据地球元素分层,镍元素集中于铁镍地核的特点表明,地幔物质来源深度的不同决定了幔源金属元素富集物源的多寡,一般代表上地幔物质来源的洋壳镁质-超镁铁岩石难有大规模的镍金属富集。现代大洋调查证实了这一推断。形成金川成矿岩体的岩浆应来源于较深的位置,地球深部地震层析解释亦支持了来源于核幔边界(2 891 km)的超地幔柱低速异常体(许志琴等,2003)的存在。因此,金川含矿超镁铁岩应形成于地幔柱作用诱发的大陆裂谷环境,而其地幔柱可能发生于核幔边界,是超地幔柱作用的结果。即祁连山曾在中元古代早期是全球性的超地幔柱作用的“热点”位置,金川矿床是热点作用结果的直接反映,由于早古生代构造相占据祁连山主体,使中元古代形成的赋矿地质体推移到了祁连山侧翼,致使以往人们并不将金川矿床纳入祁连山矿床来认识,其实它代表了祁连山地质演化早期最重要的成矿事件。

金川矿床形成于“热点”环境的认识,有助于对该矿床超常富集的理解和进一步认识今后的找矿工作。超地幔柱提供了异常的金属物源,但大规模成矿还应具备足够的硫和岩浆体系中硫溶解度的急剧降低,否则,镍金属元素主要与硅酸岩结合进入造岩矿物。金川岩体中铬尖晶石镍普遍亏损(汤中立等,1998),表明成岩前有物理化学条件的骤变降低硫溶解度和足够的硫,发生硅酸盐岩浆与含镍硫化物液相之间的不混溶,而最终大规模成矿。造成岩浆体系中物理化学条件的骤变最直接的原因应是不同端元岩浆的混合作用(Lambert等,1989),金川岩体有不同端元岩浆混合的迹象(李文渊,1996)。因此,金川外围的找矿工作要重视祁连山中元古代早期热点裂谷作用基底的重塑,同时还应注重岩浆混合作用证据的调查。就祁连山金川式矿床进一步找矿而言,南祁连拉鸡山一带化隆群基底中镁铁-超镁铁质侵入体应是重要的调查研究选区,拉水峡矿床是重要显示。

2.2 早古生代海底火山岩浆流体循环成矿作用及白银厂、石居里沟矿床

与早古生代海底火山作用有关的铜多金属块状硫化物矿床是祁连山最显著的成矿特色(宋叔和,1985;孙海田等,1997)。总体来说,祁连山块状硫化物矿床主要可分为2类:①与中酸性火山岩或中酸性、中基性火山岩相关的矿床,类似于日本的黑矿,如白银厂、尕大板、浪里克等,其成矿环境应是陆壳或过渡壳背景的拉张环境;②与基性火山岩相关的

矿床,类似于塞浦路斯型矿床,成矿元素为富铜型或铜锌型,铅含量低,如石居里沟、九个泉、老虎山等,形成于洋壳的扩张环境。以前一类为主,后一类由于成矿规模较小,一直不为重视。近年来随着北祁连中西段石居里沟富铜矿床的突破(李文渊等,1999c),而受到关注。两类矿床的形成均与火山岩浆流体有关(Yang等,1996;李文渊,1999b)火山岩浆流体提供了大量聚集的铜、铅、锌、金等金属元素,应该说不论洋底还是陆上,凡是有火山喷发的地方均有形成此类矿床的条件,只是不同源的火山岩浆脱气形成的火山岩浆流体,所含金属元素的不同而造成成矿类型的差异。陆上(大陆裂谷)或过渡壳(成熟岛弧裂谷)火山岩浆熔融有大量硅铝层的物质,更富含水,易于陆壳铅元素的富集,洋壳(洋脊或弧后扩张脊)火山岩浆,系上地幔部分熔融岩浆源,缺少陆壳物质的加入,贫铅而仅富集铜、锌。对块状硫化物矿床的形成机理颇多争议,深入对石居里沟富铜矿床的勘查研究,发现矿化显著受火山机构制约的火山喷口的控制(李文渊,1999c),成矿作用发生于火山作用间歇期或火山喷发结束初期,携带大量成矿金属元素的火山岩浆流体与海水、地表水作用形成成矿热液系统,在岩浆热动力作用下循环喷流成矿,因此,形成的矿体总体形状应是一个呈“蘑菇状”的外形,与洋壳的扩张环境相关的石居里沟等塞浦路斯型富铜矿床,一般茎部矿体呈角砾状、块状矿石,外缘为浸染状矿石,富铜,锌含量较低,矿体产状切穿火山岩层,而蘑菇顶翼部矿体多呈似层状或块状,但铜含量低,锌含量增高,表现为锌高于铜,矿体产状多顺层分布(杨合群等,2002)。值得注意的是,祁连山块状硫化矿床形成于早古生代,矿床形成后遭受多期构造作用改造,原生构造与变形构造并存,现存的矿体形态不可能套合原生的产状形态。

2.3 早古生代晚期类活动大陆边缘花岗岩岩浆热液成矿作用及小柳沟矿床

夕卡岩型(石英脉型)钨矿床已知矿化仅见于前寒武纪陆块基底中,显生宙地层中少见,矿化密切与石英二长花岗岩相关,目前已知矿体主要赋存于石英二长花岗岩内、外接触带夕卡岩中和石英网脉中。足见成矿与祁连山前寒武纪岩层、入侵的酸性侵入体关系密切。成矿时代处于北祁连洋俯冲-消减碰撞时期(花岗岩锆石U-Pb法年龄为459 Ma,矿石中辉钼矿Re-Os等时线年龄为462 Ma;毛景文等,1999b,2000),成矿背景应属于活动陆缘,即洋壳俯冲于陆壳之下陆壳硅铝层重熔中酸性岩浆发育的构造-岩浆弧环境。这一认识,对以往北祁连洋自南而北整体洋-洋俯冲的沟-弧-盆系的消减模式(夏林圻等,1996;许志琴等,1994)提出了新的思考:早古生

代北祁连洋的消减存在构造转换,整体沟-弧-盆系向西在西段转换为洋-陆俯冲的活动大陆边缘(李文渊,1999a,1999b),即类安第斯型陆缘。

目前已查明的两处夕卡岩型(石英脉型)钨矿田均位于北祁连西段的镜铁山微陆块中,其中小柳沟矿田产出于一穹隆构造中,隐伏的石英二长花岗岩基是造成穹隆构造的动力机制,矿区围岩主要为长城纪朱龙关群变质基性火山岩和变质碎屑岩、碳酸盐岩,主要为云母角闪片岩、玄武岩、绿泥绢云千枚岩、灰岩和千枚状细砂岩等,赋矿围岩多样,反映了后期花岗岩浆热液活动成矿的特点,但成矿物质肯定与陆壳硅铝层相关,因为钨的丰度值,陆壳(1.2×10^{-6})远高于洋壳(0.9×10^{-6})和地幔($0.1 \times 10^{-6} \sim 0.3 \times 10^{-6}$),而花岗岩(2.2×10^{-6})远高于基性岩(0.7×10^{-6})。勘查表明,紧依石英二长花岗岩体的矿体主要为铜、钼、铋矿石组成,远离岩体矿体中钨含量增加,呈钨、铜、铋或钨、钼矿石。矿石矿物以白钨矿为主,次为辉钼矿、黄铜矿等,与相邻的塔尔沟矿田相别,后者以黑钨矿为主。值得注意的是,似乎凡是古老地层出露的地段均有白钨矿矿化的显示,例如白银厂附近的皋兰群、阿尔金地区的阿尔金群。有研究认为赋冲极性的反转是形成斑岩型铜金矿床、夕卡岩钨矿床的主要环境(Solomon,1990),可见对北祁连洋的消亡构造演化历史的研究还有待于深入。

2.4 古生代构造蚀变热液成矿作用及寒山、鹰咀山矿床

祁连山金矿具有显著特色,赋矿围岩多样,但均与构造蚀变热液活动有关。通常祁连山金矿的同位素测年资料主要集中于早古生代晚期、晚古生代和中生代,与加里东晚期陆-陆构造碰撞和华里西期、印支-燕山期陆内造山作用相关,可划归近年来所称的“造山带型金矿”类型(Groves等,1998)。后期的构造碰撞、构造逆冲作用过程中,构造变质脱水和其他来源流体在构造动力作用下活化围岩中分散或富集的金,进一步富集成矿。例如寒山金矿床其矿化带石英绢云母岩 K-Ar 法测年为 $213.95 \pm 3.10 \sim 224.22 \pm 3.26$ Ma(毛景文等,1998),这个年龄代表了一次重要的成矿事件。但就矿床赋存北祁连西段活动大陆边缘的安山质火山碎屑岩特点分析,矿区有明显的原生铜矿化,反映了早古生代活动陆缘火山作用期存在铜、金成矿作用,类似于北美洲安第斯陆缘的超浅成低温热液金等贵金属成矿作用和深部的斑岩型铜矿化的模式,金、铜矿源应来自于同火山作用。鹰咀山金矿床成矿岩石为强烈蚀变的蛇绿混杂岩组成的超镁铁岩石,其成矿物质亦应来源于岩浆作用本身,华里西期的同位素测年数据亦代表了

后期造山作用下构造蚀变热液成矿作用事件。

3 成矿动力学分析

祁连山大规模成矿作用主要集中于大规模大陆裂解的中元古代早期和古板块汇聚环境的早古生代,表现为强烈的地幔物质的交换,使幔源金属元素在地壳浅部超常富集;晚古生代至中生代主要表现为地壳的缩短造山环境,岩浆作用锐减,主要为地壳表层物质由于表壳构造作用下实现的金、铜等金属元素的重新分配,局部富集成矿。

形成于中元古代长城纪的金川铜镍矿床独有的分布和同位素特点,反映了大陆形成早期超地幔柱作用的结果,含矿超镁铁岩体 $\epsilon_{Nd}(t)$ 小于 0,为 $-2.9 \sim -4.0$, $\epsilon_{Nd}(t)$ 大于 0,为 $-2.1 \sim +128.8$,除显示岩浆曾遭受地壳污染外,可能示踪了下地幔或核幔边界的地幔柱起源。地幔柱在地表“热点”表现诱发的大陆裂谷,在地球表层应是面状的而非线型,即祁连山中元古代早期的超地幔柱大陆裂谷在宏观表现上是圆形、椭圆形或不规则状,并非线型。金川矿床成矿金属的大规模聚集,可能存在不同端元岩浆的混合,而不同端元岩浆源的存在,说明其超地幔柱活动的持续作用。很可能太古-古元古代的地球早期陆块(核)拼接成古大陆后,中元古代早期由于超地幔柱作用发生大规模裂解事件,而祁连山是当时全球性的重要持续热点位置,其持续的超地幔柱作用,造成先大陆裂谷溢流玄武岩,其火山岩全岩 Sm-Nd 等时线年龄为 1770.9 ± 333.0 Ma;火山岩中单颗粒锆石年龄为 $1840 \sim 1784$ Ma(夏林圻等,1996;毛景文等,1997),后下地幔源镁铁-超镁铁岩在陆壳 10 km 深处的大规模入侵(岩石-矿物 Sm-Nd 等时线为 1511 ± 168 Ma 至 1509 ± 31 Ma;汤中立等,1995),而镁铁-超镁铁岩浆入侵过程中,择不同端元岩浆混合而极端成矿,造就了金川小岩体成大矿的典范(汤中立等,1995,1998)。端元岩浆可能是初始熔融的富 PGE 拉斑橄榄玄武质岩浆,另一端元岩浆为再次熔融的亏损 PGE 科马提质岩浆(李文渊,1996),龙首山西段藏布太岩体等即为亏损 PGE 的科马提质单一岩浆结晶产物,尽管其岩体平均硫含量(0.4×10^{-2})高于国内外成矿岩体的含量[($0.01 \sim 5.00$) $\times 10^{-2}$],由于硫并未超饱和,而最终未能形成铜镍硫化物矿床。概括金川岩浆铜镍硫化物矿床的成矿动力学背景,应是在长城纪早期由于超地幔柱的作用而发生大陆裂解事件,这与普遍认为 1500 Ma 时发生一次超大陆裂解事件,并发育相关的非造山岩浆作用的认识(Windley,1995)是相吻合的。

祁连山早古生代洋的生成,不同于祁连山中元古代早期的球级规模的超地幔柱作用大规模大陆裂

解,而可能是古亚洲大洋俯冲作用诱发的边缘海环境,相当于现代太平洋东岸的特点,而且很可能是古亚洲洋的南岸。由此,北祁连狭窄洋或边缘海的打开,可能是古亚洲洋向南俯冲诱发形成的。以往的观点,古亚洲洋逐步向北俯冲增生大陆,并未重视向南俯冲的认识,西南天山柯坪地块新元古代高压变质带及天山前寒武纪蛇绿岩的存在可能印证这一假设。况且,如果存在古亚洲大洋,其双向俯冲是易于解释的。近年来,国外对全球地震层析剖面研究,代表下插冷板片的高速异常可超深俯冲抵达核幔边界 2 891 km 深处,而且下插冷板片在地幔深部会发生翻转、拆沉,而代表热的地幔羽的低速异常体,反映源于核幔边界的超地幔羽可上升至地表热点 (Arndt 2000)。这一系列新的发现,支持了对古生代陆壳较薄状况下,超深俯冲、下插板片翻转和拆沉的推论,其是祁连山壳幔物质交换的动力学机制,也应是祁连山早古生代大规模成矿作用的动力学机理 (图 3)。

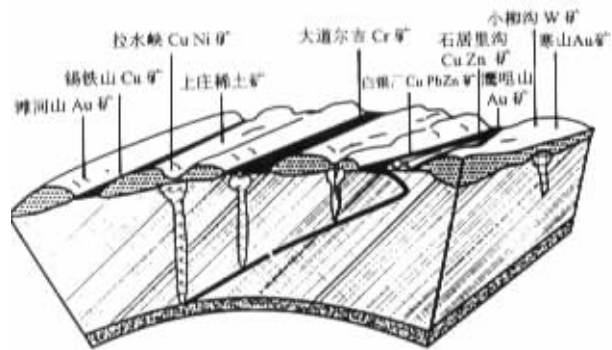


图 3 祁连山古生代主要成矿作用动力学分析示意图

Fig. 3 Dynamic model of Palaeozoic metallizations in the Qilian Mountains

北祁连洋向北开始洋-洋俯冲,形成沟-弧-盆系,在下插板片作用下,岛弧裂解、弧后扩张,形成不同系列的火山岩系,由于火山岩浆流体在喷发强烈的地段在火山机构有利环境的循环作用,形成不同类型的块状硫化物金属矿床;北祁连西段,由洋-洋俯冲转换为洋-陆俯冲形成陆弧 (Wilson, 1989),下插冷板片与热地幔作用形成地幔羽上升至陆壳混染形成花岗质岩浆侵入陆壳浅部,侵入岩浆流体造成夕卡岩化和石英脉形成钨 (钼铜) 矿,可能还有斑岩铜矿,最终陆-陆俯冲,下插板片翻转、拆沉,造成南祁连老地块形成类似北祁连西段活动大陆边缘的成岩成矿环境,有钨矿产生,并导致深地幔羽上升形成新的裂隙,有再次陆壳拉张型块状硫化物铜多金属矿床的形成,更多的是岩浆作用与构造作用相辅相成,促使金矿形成、伟晶岩稀土矿产生。晚古生代—中新生代祁连山的构造动力与来自南部大陆向北运移相关 (尹安 2001),并造成祁连山造山带的地壳增厚

缩短 (南祁连哈拉湖附近地壳厚度达 74 km,柴达木盆地仅 43 km;Gao 等,1996),而形成造山型金矿床,而同时使元古代形成的镜铁山沉积变质型铁矿床遭受构造变质热液改造形成铜的工业富集成矿,实际亦可称“造山型铜矿床”。

祁连山古生代的大规模成矿作用基本上属于热液成矿类型,且多与岩浆热液有关。其中块状硫化物矿床主要是火山岩浆-流体成矿热液系统作用的结果。大地构造环境决定了喷发前岩浆流体和其中挥发份的含量。高挥发份含量 (尤其是 H_2O) 的岩浆流体产生于汇聚型板块边界的岩浆中,多系消减洋壳脱水作用所致,岩浆是“湿”的,而离散型板块边界的岩浆作用,挥发份含量较低,且以 CO_2 为主,岩浆是“干”的 (Yang 等,1996)。当岩浆流体从岩浆分离时,携带走了岩浆中的金属。岩浆流体为火山-热液系统提供了大量的挥发份和成矿金属,并决定了与火山岩有关的金属矿化。与火山活动有关的铜 (铅锌)、钨 (钼铜) 等矿床的成矿作用,岩浆流体具有决定性的作用,但最终成矿流体,即成矿的热液系统,却是以海水、天水为主体的热液系统。与之有关的矿石主要表现为硫化物,在热源的驱动下成矿流体的对流循环是重要的,不同流体的混合作用也应是一种有效的成矿动力模式 (Craig, 1979)。

致谢 本论文在成文前曾就许多问题请教于汤中立院士、夏林圻研究员,初稿承蒙毛景文研究员审阅,并提出修改意见,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- 冯益民,何世平.1996.祁连山大地构造与造山作用.北京:地质出版社,1~150.
- 黄汲清,张正坤,张之孟等.1965.中国优地槽和冒地槽以及它们的多旋回发展.北京:中国工业出版社,5~41.
- 李文渊.1996.中国铜镍硫化物矿床成矿系列与地球化学.西安:地图出版社,1~228.
- 李文渊.1999a.北祁连山陆-陆碰撞的远程成矿效应——龙首山地区深成岩体定位及构造热液改造.见:邓乃恭,雷伟志主编.大陆构造及陆内变形暨第六届全国地质力学学术讨论会论文集.北京:地震出版社,166~169.
- 李文渊.1999b.聚敛型板块边缘火山岩浆流体的成矿作用.西北地质,33(3):6~11.
- 李文渊,夏林圻,夏祖春等.1999c.北祁连山早古生代弧后盆地火山作用与成矿——以石居里沟富铜矿床为例.地质论评,45(增刊):1047~1053.
- 毛景文,张招崇,杨建民等.1997.北祁连西段前寒武纪地层单颗粒锆石测年及其地质意义.科学通报,42(13):1414~1417.
- 毛景文,杨建民,张招崇等.1998.甘肃寒山剪切带型矿床地质地球化学和成因.矿床地质,17(1):1~15.
- 毛景文,张招崇,任丰寿等.1999a.北祁连西段金属矿床时空分布和生成演化.地质学报,73(1):73~82.
- 毛景文,杨建民,张招崇等.1999b.北祁连小柳沟钨钼矿床 Re-Os 同位素测年及其意义.地质论评,45(4):412~417.
- 毛景文,张作衡,简平等.2000.北祁连西段花岗岩闪长岩的锆石 U-Pb 年龄及其动力学意义.地质论评,46(6):616~620.
- 任纪舜.2003.新一代中国大地构造图——中国及邻区大地构造图 (1:5000000).地球学报,24(1):1~2.
- 孙海田,郎介人,李锦平.1997.北祁连金属成矿省时空格局、演化及成矿作用.地质学报,71(2):170~179.
- 宋叔和.1985.甘陕境内秦祁地轴两侧古生代断陷海相火山活动与多

- 金属成矿的探讨. 中国地质科学院矿床地质研究所刊, (2): 1~12.
- 汤中立, 李文渊. 1995. 金川硫化铜镍(含铂)矿床成矿模式及地质对比. 北京: 地质出版社, 1~209.
- 汤中立, Barnes S J. 1998. 岩浆硫化物矿床成矿机制. 北京: 地质出版社, 1~60.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 1996. 北祁连山海相火山岩岩石成因. 北京: 地质出版社.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 1999. 祁连山元古宙大陆溢流玄武岩. 地质论评, 45(增刊): 1028~1037.
- 肖序常, 陈国铭, 朱志直. 1978. 祁连山古蛇绿岩带的地质构造意义. 地质学报, 52(4): 281~295.
- 许志琴, 徐惠芬, 张建新等. 1992. 北祁连走廊南山加里东俯冲杂岩增生地体及其动力学. 地质学报, 66(1): 1~15.
- 许志琴, 赵志兴, 杨经绥等. 2003. 板块下的构造及地幔动力学. 地质通报, 22(3): 149~159.
- 吴汉泉. 1980. 东秦岭和北祁连山的蓝闪片岩. 地质学报, 54(3): 195~207.
- 尹安. 2001. 喜马拉雅-青藏高原造山带地质演化——显生宙亚洲大陆生长. 地球学报, 22(3): 193~230.
- 杨合群, 宋忠宝, 王兴安等. 2002. 北祁连山中西段塞浦路斯型铜矿特征、成矿作用及找标志. 西北地质, 35(4): 65~85.
- 赵虹, 金治鹏, 党. 2001. 甘肃省党河南山北坡早古生代火山岩时代探讨. 西安工程学院学报, 23(3): 26~29.
- 左国朝, 刘义科, 张崇. 2002. 北祁连造山带中-西段陆壳残块群的构造-地层特征. 地质科学, 37(3): 302~312.

References

- Arndt T N. 2000. Hot heads and cold tails. *Nature*, 407: 458~460.
- Craig, J R. 1979. Geochemical aspects of the origins of ore deposits: a review of research on modern problems in geochemistry. *Earth Sciences*, 16: 225~272.
- Feng Yimin, He Shiping. 1996. Geotectonics and orogeny of the Qilian Mountains. Beijing: Geological Publishing House, 1~135 (in Chinese with English abstract).
- Gao Rui, Wu Gongjian. 1996. Lithosphere structure and geodynamic model of Golmud-Ejin B. Geoscience Transect in North Tibet. *Acta Geoscientia Sinica*, Special Issue: 36~40.
- Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M et al. 1998. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geology Reviews*, 13: 7~27.
- Huang Jiqing, Zhang Zhengkun, Zhang Zhimeng et al. 1965. The eugeosyncline and miogeosyncline in China and its polycyclic development. Beijing: Chinese Industrial Press, 5~41 (in Chinese).
- Li Wenyan. 1996. Metallogenic series and geochemistry of nickel-copper sulfide deposits in China. Xi'an: Xi'an Cartographic Publishing House, 1~228 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenyan. 1999a. Metallogensis and fluid from volcanic magma at convergent plate margin. *Northwestern Geology*, 32(2): 6~11 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenyan. 1999b. Far metallogensis effects of continent-continent collision of the North Mountains: locations of hypogene ore bodies and hydrothermal replacement of structures in the Longshou mountains. In Deng Naigong, Lei Weizhi, eds. *The continental tectonics and intracontinental deformations*. Beijing: Seismological Press, 166~169 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenyan, Xia Linqi, Xia Zuchun. 1999c. On Shijilugou copper-enriched massive sulfide deposits, Sunun, Gansu, China: Implications for volcanism and metallization of early Palaeozoic back-arc basin, the North Qilian Mountains. *Geological Review*, 45(Sup.): 1047~1053 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Zhang Zhaochong, Yang Jianmin et al. 1997. Zircon in Precambrian Strate geochronometry and its geological significance western of Northern Qilian Mountains. *Chinese Sci. Bull.*, 42(3): 1414~1417 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Yang Jianmin, Zhang Zhaochong et al. 1998. Geology, geochemistry and genesis of the Hanshan ductile-brittle shear zone gold deposit in Gansu province. *Mineral Deposits*, 17(1): 1~13 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Zhang Zhaochong, Yang Jianmin et al. 1999. Re-Os age dating of molybdenites in the Xiaoliugou tungsten deposit in the Northern Qilian Mountains and its significance. *Geological Review*, 45(4): 412~417 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Zhang Zhaochong, Ren Fengshou et al. 1999. Temporal and spatial distribution and evolution of ore deposits in the west sector of the Northern Qilian Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 73(1): 73~82 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Zhang Zuoheng, Jian Ping et al. 2000. U-Pb zircon dating of the granitic intrusion in the western part of the North Qilian Mountains. *Geological Review*, 46(6): 616~620 (in Chinese with English abstract).
- Ren Jishun. 2003. A brief introduction of the latest tectonic map of China. *Acta Geoscientia Sinica*, 24(1): 1~2 (in Chinese with English abstract).
- Sun Haitian, Wu Jieren, Li Jinping. 1997. Spacious-temporal frame, evolution and mineralization of the Northern Qilian metallogenetic province. *Acta Geologica Sinica*, 71(2): 170~179 (in Chinese with English abstract).
- Solomon M. 1990. Subduction, arc reversal, and the origin of porphyry copper-gold deposits in island arcs. *Geology*, 18: 630~633.
- Song Shuhe. 1985. Discussion on submarine volcanic activities and poly-metallic ore-formation of Palaeozoic rifted geosynclines bordered by Qinji uplift, Northwest China. *Bulletin of the Institute of Mineral Deposits Chinese Academy of Geological Sciences*, (2): 1~12 (in Chinese).
- Tang Zhongli, Li Wenyan. 1995. Nickel-copper sulfide (platinum-bearing) mineral deposit and geologic contrast. Beijing: Geological Publishing House, 1~209 (in Chinese with English abstract).
- Tang Zhongli, Barnes S J. 1998. Mineralization mechanism of magmatic sulfide deposits. Beijing: Geological Publishing House, 1~70 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Xuchang, Chen Guomin, Zhu Zhizhi. 1978. The tectonic significance of ancient ophiolite of Qilian Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 52(1): 287~295 (in Chinese).
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi. 1996. The petrogenesis of marine volcanic rocks from the Northern Qilian Mountains. Beijing: Geological Publishing House, 1~153 (in Chinese with English abstract).
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi. 1999. Proterozoic continental flood basalts from Qilian Mountains. *Geologica Review*, 45(Sup.): 1028~1037 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Xu Huifeng, Zhang Jianxin et al. 1994. The Zhoulangshan Caledonian subductive complex in the Northern Qilian Mountains and its dynamics. *Acta Geologica Sinica*, 68(1): 1~15 (in Chinese).
- Xu Zhiqin, Zhao Zhixing, Yang Jingsui et al. 2003. Tectonics beneath plates and mantle dynamics. *Geological Bulletin of China*, 22(3): 149~159 (in Chinese with English abstract).
- Wilson M. 1989. *Igneous petrogenesis*. London: Unwin Hyman, 120~168.
- Windley B F. 1995. *The evolving continents*. New York: John Wiley, 1~526.
- Wu Hanquan. 1980. The glaucophane schists of Eastern Qinling and North Qilian Mountains in China. *Acta Geologica Sinica*, 54(3): 195~207 (in Chinese).
- Yin An. 2001. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen in the context of Phanerozoic continental growth of Asia. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(3): 193~230 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hequn, Song Zhongbao, Wang Xingan et al. 2002. The characteristics, mineralization and prospecting indication of Cyprus-type copper deposits in mid-west section of the North Qilian Mountains, China. *Northwestern Geology*, 35(4): 65~85 (in Chinese with English abstract).
- Yang K, Scott S D. 1996. Possible contribution of a metal-rich magmatic fluid to a sea-floor hydrothermal system. *Nature*, 383: 420~423.
- Zhao Hong, Jin Zhipeng, Dang Ben et al. 2001. Recognizing the time of early Paleozoic volcanic rocks in the north slope of Adanghe Southern Mountains in Subei County, Gansu Province. *Journal of Xian Engineering University*, 23(3): 26~29 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhimeng, Liou J G, Coleman R G. 1984. An outline of the plate tectonic of China. *Geo. Soc. Amer. Bull.*, 95: 295~312.
- Zuo Guochao, Liu Yike, Zhang Chong. 2002. Tectono-stratigraphic characteristics of continent crustal remnants in central-western sector of the North Qilian orogen. *Chinese Journal of Geology*, 37(3): 302~312 (in Chinese with English abstract).