吉林东部延边地区陆缘剪切火山岩及区域成矿模式*

Continental Margin Shear Belt Volcanic Rocks and Regional Metallogenic Model in Yanbian Region, Eastern Jilin Province

贾大成[1.2] 胡瑞忠[2] 卢 焱[1] 冯本智[1]

（1 吉林大学地球探测与信息技术学院，吉林 长春 130026；2 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学开放实验室，贵州 贵阳 550002）

Jia Dacheng[1.2], Hu Ruizhong[2], Lu Yan[1], Feng Benzhi[1]

(1 College of Geo-exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, Jilin, China;
2 LODG Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guiyang 550002, Guizhou, China)

摘 要 延边地区中生代火山岩系位于我国东北陆缘活动带，构成金、铜成矿集中区。通过对火山岩系的岩石化学和形成环境的分析以及与不同构造环境火山岩系的对比，认为该火山岩系属于偏碱质的钙碱性火山岩系，与由板块俯冲导致的典型岛弧和安第斯型活动大陆边缘的钙碱性火山岩系存在一定差异，推测其形成环境为陆缘剪切带，介于大兴安岭陆内偏碱性火山岩系与典型岛弧钙碱性火山岩系之间，构成活动陆缘剪切型火山岩系。区内火山热液型-斑岩型矿床与火山岩受同一成岩成矿系统控制，具有壳-幔混合的区域成矿模式。

关键词 陆缘剪切带 火山岩系 区域成矿模式 吉林东部

延边地区为我国东部大陆边缘的一个重要金、铜（多金属）矿化集中区。成矿带在时、空和物质组成上主要受控于中生代火山盆地和盆地间由浅成侵入体构成的隆起区，形成斑岩型、矽卡岩型、火山-次火山热液型等多种矿床类型组合的金、铜、及钼、铅、锌成矿带 (芮宗瑶等, 1995)。不同矿床在成矿时、空和物质组成上均与该区中生代火山-岩浆作用有着密切成因联系，构成一个完整的火山、次火山热液-斑岩型成矿系列。以往研究成果将该带的形成归属于太平洋板块的直接俯冲，属于一套钙碱性火山岩系列。通过对该区火山岩系的岩石化学、微量元素及其与成矿关系的研究，发现成矿火山岩系中不仅有钙碱性火山岩，而且有相当部分的偏碱性火山岩，其形成可能并非直接来自俯冲板块的部分熔融，而是与陆缘剪切环境下岩石圈拆沉和岩浆底侵的壳-幔作用有关。

1 延边陆缘剪切带火山岩产出地质特征

延边地区中生代火山岩处于欧亚大陆东部的活动陆缘剪切带，总体呈 NEE 走向，由上侏罗统刺猬沟组和下白垩统金沟岭组基性—中酸性火山岩构成。火山岩带表现为若干火山盆地的相间排列，在火山盆地中又表现为若干个火山机构的相间排列。从喷发旋回中火山碎屑岩→火山熔岩→沉凝灰岩→次火山岩的层序可以反映出先喷发后溢流，最后为次火山岩和浅成侵入岩的产出特征。火山岩产出严格受断裂构造控制，尤其是不同方向断裂的交汇部位控制。

控制火山岩带产出的断裂构造以 NE 向、NW 向、近 EW 向、和 SN 向断裂构造为主。近 EW 向和

* 由国家杰出青年基金项目(49925309),中国科学院知识创新项目 (KZCX2-102) 和中国科学院矿床地球化学开放实验室基金 (2000) 联合资助
第一作者简介 贾大成，男，1958 年生，博士，副教授，从事岩石地球化学和矿床地球化学研究。

SN 向断裂为基底断裂的再活化，以挤压性和张性为主；NE 向断裂为压扭性剪切断裂，并与郯庐左行剪切断裂向北延伸发散而成的两江断裂和鸭绿江断裂相对应，其活动时期为 145～115 Ma，与郯庐断裂的走滑时间基本一致(陈丕基, 1988)。NW 向断裂为与 NE 向左行剪切断裂同时的张扭性断裂。两江和鸭绿江两条剪切断裂与延边褶皱带中敦化—杜荒子和八道—三道沟近 EW 向基底断裂以及 SN 向图们江断裂的交汇处控制着火山岩-侵入岩带及成矿带的空间分布，而 NE 向与 NW 向剪切断裂的交汇部位控制着火山盆地的产出。火山岩和次火山岩的同位素年龄为 147.5～130 Ma(孟庆丽等, 2001)，浅成岩浆侵入体的同位素年龄为 140～130.1 Ma(孟庆丽等, 2001)，与区域上剪切断裂的主要活动时期相一致。

2　延边陆缘剪切带火山岩系

对于该区火山岩系列的属性问题，以往多认为属于钙碱性火山岩系，其形成与太平洋板块俯冲有关。然而近年来随着对钙碱性火山岩系研究的不断深入，提出钙碱性火山岩系是一个成分变化范围比较广，成因和构造环境复杂多样的岩石系列，不仅仅形成于大洋板块的俯冲消减带，也形成于陆内伸展和剪切带等多种构造环境(李伍平等, 1999)，因此有必要对该区火山岩系列进一步划分，用以突出火山岩岩石系列与形成矿构造环境的一致性。根据碱性长石与长石总量的比列，可将区内岩石分为安山岩-英安岩-流纹岩组合和玄武粗安岩-粗安岩-粗面岩组合。在火山岩分类 TAS 图解中，火山岩投点沿着钙碱性系列和碱性系列的界线呈线性分布，表明为统一的岩石系列，即属于偏碱质的钙碱性系列（图 1）。在 K_2O/Na_2O-SiO_2 和 K_2O-SiO_2 分类图解中（图 2），表现为中钾—高钾岩系的特点，表明区内火山岩系明显不同于典型的钙碱性火山岩系列，属于高钾钙碱性火山岩系列。该火山岩系列与大兴安岭陆内火山岩系列相比(许文良等, 1994)，其碱质含量略低，相当于李兆鼐 (1994) 提出的碱钙系列，类似于邓晋福等 (2000) 提出的高钾钙碱性系列，陶奎元 (1993) 研究中国东南大陆火山时也提出“中国东南大陆型钙碱性岩系”与环太平洋带中泛称的钙碱性系列有着不可忽视的差异。

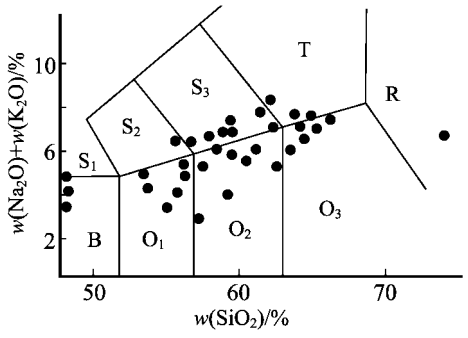


图 1　延边地区火山岩 TAS 图解

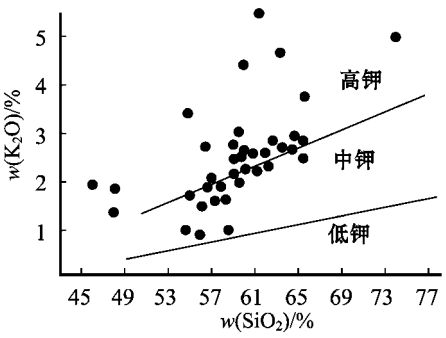


图 2　延边地区火山岩 w（SiO_2）-w（K_2O）图解

本区火山岩系与典型大陆裂谷火山岩相比，明显缺少双峰式岩石组合和碱性拉斑玄武岩系。与岛弧型和活动陆缘（安第斯）型火山岩系相比，以出现偏碱质的钙碱性系列、δ=1.8～4、较低的 Al_2O_3、较高的 K_2O/Na_2O 值（0.4～1.6）、（Fe_2O_3＋FeO）/MgO＞2、K_2O＋Na_2O＞CaO，较高的 Ba/Nb、Nb/Ta 和 Zr/Y 值 (分别为 126.32、16.99 和 15.28)、较低的 Zr/Hf 值（19.5）为特色。具有较高的 Σ REE 和 LREE 含量，基性岩石无负铕异常，而酸性岩石出现负铕异常，在微量元素蛛网图中富集 Rb、Ba、K，而 Sr 富集不明显，Nb、Ta、Ti、Zr、P 亏损。安山岩 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始比值为 0.7036～ 0.70503 (孟庆丽等, 2001) ，以及 Nb/Ta 比值与原始地幔值（17.0）相近，表示岩浆形成于地幔，但 Zr/Hf 值较低，接近地壳组成(11.0) 而显示成岩过程中有地壳物质混染。通过斜长石地质温度计方法计算(刘文达等, 1984; 孟庆丽等, 2001)，得出区域火山岩形成温度为 1117～1138℃，压力为(24～28.5)×10^2 MPa，相应形成深度为 80～95 km。

上述特征表明，延边地区出现的偏碱质的钙碱性火山岩系既不同于安第斯型俯冲钙碱性火山岩，也不同于与大陆裂谷有关的拉斑玄武岩系和碱性玄武岩系，与以往所论述的与太平洋板块俯冲有关的典型岛弧型钙碱性火山岩存在着一定差别。对美国西部盆岭区始新世到渐新世的钙碱性火山岩研究认为，这种火山岩形成与该区拉伸作用初期的剪切阶段有关(Hawkesworth et al., 1995)。Arculus（1987）研究了美国西海岸旧金山地区一套玄武岩-安山岩-英安岩-流纹岩和粗面岩组合的钙碱性火山岩系，该岩系形成于 5 Ma，明显晚于大洋板块的俯冲时间，处于一种走滑环境下的产物。本区火山岩系处于欧亚大陆的活动边缘，其总体特征和形成环境应与走滑剪切相一致。

3 区域成矿特征及成矿模式

3.1 区域成矿特征

在延边地区火山-岩浆侵入岩带内 Au、Cu、Mo 及 Pb、Zn 、Ag 等元素相对富集，形成以金及铜、钼为主的金属矿化集中区，构成东西长 135 km，南北宽 20～30 km 的成矿密集区。矿体形成于火山喷发的末期，与次火山岩脉互相穿切。闹枝金矿床矿石石英包体 ^{39}Ar-^{40}Ar 快中子活化年龄为 127.8 Ma (孟庆丽等, 2001)，小西南岔矿化花岗斑岩 K-Ar 年龄为 140 Ma，矿化闪长玢岩 K-Ar 年龄为 130.1 Ma (芮宗瑶等, 1995; 刘文达等, 1984)，表明成矿期为 140～127.8 Ma，构成成岩成矿的连续演化过程。不同矿床类型所表现出来的时间和空间上的一致性，表明区内不同矿床类型是受同一区域成矿作用而形成的，具有一个统一的成矿过程。只是由于具体控矿条件的差异而形成不同的矿床类型，这一总体成矿作用导致区内成矿系列的出现 (贾大成等, 2001)。

对火山岩带中不同矿床类型研究表明 (孟庆丽等, 2001)，成矿物质与火山岩同源，主要来自地幔在成因上与火山作用、次火山作用、浅成岩浆侵入作用有关， 表明它们受同一区域成矿地质背景下的火山喷发-次火山岩侵入-成矿系统控制，应具有一致的区域成矿模式。

3.2 区域成岩成矿构造环境

晚侏罗-早白垩世在吉林东部乃至整个亚洲大陆东部边缘的地史演化中是一个重要的构造环境转折时期，即由原来的古亚洲特提斯构造域转变为环太平洋构造域，构造方向也发生了重大转变。毛景文等 (1999) 等在研究了中国东部大规模成矿环境和特点时，提出大爆发式成矿作用往往发生于特殊的构造环境和构造环境转折变化的时期。这也正是区内出现 Au、Cu 成矿密集区的成矿动力学原因之一。

由于日本列岛大致在白垩纪（110 Ma 以后）才与亚洲大陆分离，因此东北地区中生代可能处于活动大陆边缘 (Qin et al., 1998)。但将本区火山岩作为大洋板块部分熔融的直接产物尚缺少充分证据。从欧亚大陆东部边缘火山岩带展布看，从俄罗斯滨海到锡霍特—阿林火山岩带构成安第斯型钙碱性火山岩系列，大兴安岭构成陆内富碱质钙碱性火山岩带，延边地区中生代火山岩带恰位于其间的过渡地带，反映大洋板块部分熔融所引发的火山-岩浆侵入作用向陆内逐渐减弱，取而代之的是陆缘和陆内火山—岩浆侵入作用，其形成和演化与板内岩浆底侵作用有关。中国东北及邻区晚侏罗-早白垩世火山岩的空间展布总体呈现为 NE—NEE 走向的近面形展布，与欧亚大陆 NE—NEE 向大陆边缘并非平行一致 (李锦轶等, 1999)，而主要是沿剪切走滑断裂方向展布。邵济安等 (2001)在研究大兴安岭地区岩浆与俯冲作用关系时，利用地震层析（ST）分析结果，较明显地 反映出太平洋俯冲板块在 300～400 km 深度出现变形，然后以陡直的块体下沉，认为与俯冲作用有关的火山岩分布范围不超过 1000 km。伊泽奈崎古板块北西斜向俯冲所产生的陆内剪切动力作用远大于板块下插对大陆内部的影响，大规模陆内剪切导致岩石圈拆沉，软流圈地幔上涌和岩浆底侵作用，区内北东向断裂带即为一系列平行的剪切带，构成剪切拉分火山盆地与断隆斜列式相间排列，形成区域内剪切拉分与剪切挤压斜列交互出现的动力学环境。这与该区偏碱质的钙碱性火山岩系所反映的构造环境相一致。

3.3 区域成岩成矿模式

伊泽奈崎板块 NNW 方向的斜向俯冲，产生活动陆缘的大规模左行剪切构造带，不仅形成了以郯—庐

断裂带、鸭绿江断裂带、大兴安岭主峰等一系列 NE—NEE 向断裂带为代表的大规模左行剪切带，而且形成断隆和断拗火山沉积盆地斜列式相间排列。这些大型走滑剪切断裂带可深达上地幔乃至切割岩石圈。这种剪切构造环境改变了原来地体拼贴挤压的构造环境和构造应力场，至使前侏罗纪基底岩系所构成的厚大岩石圈拆离并下沉，造成岩石圈减薄和软流圈地幔的上升，在约 100 km 深处首先交代和部分熔融岩石圈地幔，形成初始玄武质岩浆，初始玄武质岩浆在上升过程中及地幔岩浆房发生橄榄石和辉石的分离结晶作用，当向上运移到 80～90 km 时，其成分转化为碱质钙碱性的成岩母岩浆，其间可能伴随地壳物质的混染。成岩母岩浆沿剪切断裂喷发形成偏碱质的钙碱性火山岩系。

当深源流体及气体状态 Au、Cu、Mo 等元素随软流圈地幔流体/熔体向上运移到较浅部位，一部分气体转变为液相，形成气液混合相的幔源 HACONS 混合流体 (杜乐天, 1996)并进入地幔岩石部分熔融体中，因此含矿热液应是深源含矿流体与地幔岩部分熔融产生初始玄武岩浆过程中分离出来的含矿流体的混合。这种混合含矿流体沿火山通道网络向上运移，岩浆多旋回喷发、多期次侵入，成矿流体伴随次火山岩持续上侵，交代火山岩系，并与地表异源环流水结合，构成致使矿质沉淀富集的地球化学障，由于上升不同部位和不同围岩形成的物理化学条件差异，沿火山机构及脆性断裂贯入形成不同矿床类型组合。

上述成矿是一个复杂的深部壳-幔成矿作用过程，从地幔岩石部分熔融形成深部幔源含矿流体，到岩浆与含矿流体上升与地壳环流水部分混合，形成蚀变矿化带和矿体，构成一个完整的成岩、成矿演化过程。从火山岩形成时代 (147.5 Ma)，浅成侵入体年龄(137 Ma)，到矿体形成年龄 127.8～130 Ma，构成约 17.4 Ma 时间间隔的成岩-成矿期，如此长期持续的能量释放，为区域成矿系列的形成提供了丰富的物质和能量来源。

参 考 文 献

陈丕基. 1988. 郯庐断裂巨大平移的时代与格局. 科学通报，（4）：289～293.

邓晋福，赵国春，赵海玲，等. 2000. 中国东部燕山期火成岩构造组合与造山-深部过程. 地质论评，46（1）：41～48.

杜乐天. 1996. 地壳流体与地幔流体的关系. 地学前缘. 3（4）：172～180.

贾大成，胡瑞忠，冯本智. 2001. 吉林延边地区中生代火山岩金铜成矿系列及区域成矿模式. 长春科技大学学报，31（3）：224～229.

李锦轶，牛宝贵，宋彪，等. 1999. 长白山北段地壳的形成与演化. 北京：地质出版社. 78～89.

李伍平，路凤香. 1999. 钙碱性火山岩构造环境的研究进展. 地质科技情报，18（2）：15～18.

李兆鼐. 1994. 中国东部燕山期岩浆作用和深部过程. 见： 中国矿物，岩石，地球化学研究新进展. 兰州： 兰州大学出版社. 91～92.

刘文达，万玉胜. 1984. 吉林延边北部火山岩型金矿地质特征及成矿规律. 吉林地质，（4）：1～13.

毛景文，华仁民，李晓波. 1999. 浅议大规模成矿作用与大型矿集区. 矿床地质，18（4）：291～298.

孟庆丽，周永昶，柴社立. 2001. 中国延边东部斑岩-热液脉型铜金矿床. 长春：吉林科学技术出版社. 127～139.

芮宗瑶，张洪涛，王龙生, 等. 1995. 吉林延边地区斑岩型-浅成热液型金铜矿床. 矿床地质，14（2）：99～126.

邵济安，刘福田，陈辉，等. 2001. 大兴安岭—燕山晚中生代岩浆活动与俯冲作用关系. 地质学报，75（1）：56～63.

陶奎元. 1993. 中国东南大陆火山带在环太平洋火山带中的特殊地位. 李兆鼐，王碧香主编. 火山岩、火山作用及有关矿产. 第二届全国火山岩会议论文集. 北京：地质出版社. 23～30.

许文良，孙德有，周燕. 1994. 满洲里—绥芬和地学断面岩浆作用和地壳结构. 北京： 地质出版社.

Hawkesworth C, Turner S, Gall A K, et al. 1995. Calc-alkaline magmatism, lithospheric thinning and extension in the basin and range . J Geophys. Res., 100（B7）：10271～10286.

Qin K Z, Ishihara S. 1998. On the possibility of porphyry copper mineralization in Japan. International Geology Review, 40（6）：539～551.