

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2022.06.05

引用格式: 杨献忠,徐敏成,徐衍明,等. 山东郯城地区安山质岩石中斑晶斜长石的复杂环带结构: 岩浆混合作用的记录[J]. 中国地质调查,2022,9(6): 33-41(Yang X Z,Xu M C,Xu Y M,et al. Complex zoning texture of phenocryst plagioclase in andesitic rocks of Tancheng area, Shandong Province: Record of magma mixing[J]. Geological Survey of China,2022.9(6): 33-41)

山东郯城地区安山质岩石中斑晶斜长石的复杂环带结构: 岩浆混合作用的记录

杨献忠¹, 徐敏成¹, 徐衍明², 褚志远², 肖凡¹, 周延¹

(1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016;

2. 山东省第七地质矿产勘查院, 山东 临沂 276006)

摘要: 山东郯城地区的新生代地层中发现了大量大颗粒金刚石及多个金刚石砂矿体,但尚未发现金刚石原生矿。为探索金刚石的来源,对该地区出露的一套安山质火山岩开展岩相学研究,发现以下特征:①斑晶斜长石多具有复杂环带结构,内核主要为微晶斜长石及细小橄榄石,外环的斜长石具有正常环带结构;②橄榄石较均匀地分布于岩石中,含量大于20%,且具有3个世代特征,与金伯利岩中橄榄石的3个世代特征一致;③岩石具有“橄榄石+金云母+石榴石”与“斜长石+辉石+角闪石”矿物组合。岩相学证据表明该地区的安山质火山岩是安山岩岩浆与金伯利岩岩浆发生混合作用的产物,而斑晶斜长石的复杂环带结构记录了混合作用的演化过程。研究对郯城地区金刚石原生矿的勘探具有指导意义。

关键词: 安山质火山岩; 斜长石; 复杂环带结构; 橄榄石; 金伯利岩; 岩浆混合作用; 郯城地区

中图分类号: P575; P588.11

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2022)06-0033-09

0 引言

岩浆岩的结构与构造反映了岩石形成时的地质及物理化学条件,真实记录了岩浆的性质和成分变化,是鉴定岩石类型和探讨其形成条件的主要依据之一^[1-2]。岩浆岩中发育的角闪石、辉石、黑云母、斜长石等矿物及其结构^[3-5]可以示踪岩浆混合的整个演化过程^[6],其中斜长石成分和结构的变化受到周围岩浆的影响最为显著^[7]。岩浆混合作用形成的斜长石特殊结构多见于熔岩^[2]、火山岩、次火山岩及浅成侵入岩中^[5]。近年来的研究表明,深成侵入岩与下地壳花岗岩中的斜长石也具有复杂的环带结构^[8-9]。

自岩浆混合作用的概念提出以来,前人利用斜长石恢复岩浆历史^[7,10]、斜长石复杂结构与 NaSi-

Ca₁Al₁的置换关系^[6]、扩散率对斜长石复杂结构的保存、斜长石结晶、熔化及熔解的动力学试验^[11]、岩浆混合作用^[12]等研究,几乎均针对基性岩浆与(中)酸性岩浆的混合作用以及其中的斜长石^[6,9,13]。由于缺少野外证据和室内工作^[14],目前还没有针对镁铁质岩浆混合作用及其所含斜长石特征的研究。

笔者在对山东郯城地区安山质岩体的研究过程中发现了具有复杂环带结构的斜长石。本文介绍了该安山质岩石中斑晶斜长石内部所呈现的复杂环带特征以及橄榄石的3个世代,探讨了橄榄石的来源,为该地区中基性岩浆与超基性岩浆的混合作用提供证据。郯城地区位于郯庐断裂带内,先后出土了大量大颗粒金刚石,周边分布有多个金刚石砂矿体,但尚未发现原生含金刚石岩体^[15]。研究

收稿日期: 2021-12-10; 修订日期: 2022-10-27。

基金项目: 中国地质调查局“华东地区钨锡铋等矿产地质调查(编号: DD20221688)”“钦杭成矿带武宁—平江地区钨铜多金属矿地质调查”(编号: DD20190153)和山东省重大科技创新工程项目“隐伏金刚石矿评价理论与预测(编号: 2017CXGC1607)”联合资助。

第一作者简介: 杨献忠(1962—),男,教授级高级工程师,主要从事矿产资源调查与研究工作。Email: xzyang1010@sina.com

通信作者简介: 褚志远(1986—),男,高级工程师,主要从事高温高压矿物学和成矿流体研究工作。Email: 327245800@qq.com

成果可为郯庐断裂带内的基础地质研究及原生含金刚石岩体勘探提供参考信息。

1 地质背景

郯庐断裂带是中国东部滨太平洋构造域内规模最大的巨型断裂构造带,也是我国重要的原生金刚石成矿带,其在山东境内的部分称为沂沭断裂。该断裂纵贯山东中部,由一系列 NNE 向的断裂组成断裂系^[16](图 1(a))。断裂系内部广泛发育晚中生代火山作用,形成的火山岩充填在沿断裂展布的断陷盆地内,这些火山岩的源区普遍被认为与地幔柱活动引发的软流圈地幔上涌有关^[17-18]。

沂沭断裂带主要发育于中生代断陷型陆相火山盆地中,主体火山岩白垩系青山群为一套火山熔岩和火山碎屑岩(图 1(a)),在鲁东、鲁西和断裂带内部均有发育。其中鲁西主要发育中基性火山岩;断裂带内南部多为中基性火山岩;北部出现中基性火山岩夹酸性火山岩;鲁东火山岩具有双峰式特征^[19]。沂沭断裂带南段的郯城地区分布着一套安山质火山岩,其北部的神泉院岩体在地表出露盾状火山机构,岩石中含大量围岩角砾,具有明显的爆发特征,成岩年龄为(96.5 ± 1.4) Ma^[19]。区域上,这套火山岩下伏白垩系马连坡组浅紫色细砂岩,上覆白垩系马朗沟组紫色砾岩,倾向北东,倾角较为平缓,但局部受构造影响达到 40° ~ 50°。

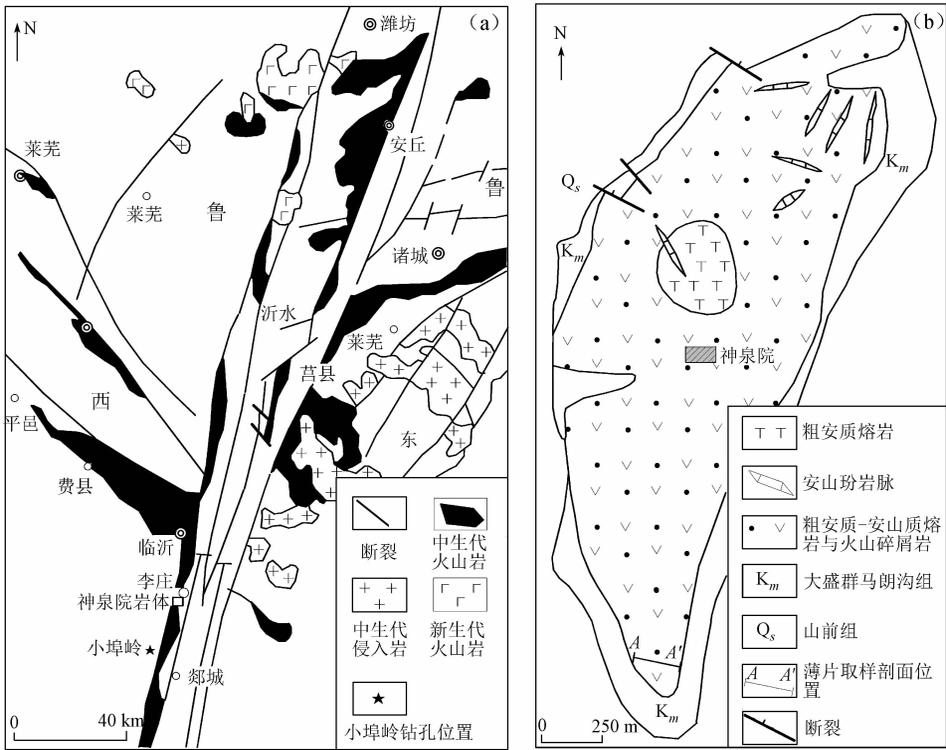


图 1 沂沭断裂带地质略图(a)与神泉院岩体剖面位置(b)^[19]

Fig. 1 Geological sketch map of Yishu fault zone (a) and location of Shenquanyuan rock body section (b)^[19]

2 岩性特征

2.1 样品采集

神泉院火山岩位于沂沭断裂带南段郯城县李庄镇东侧,为中心式喷发所形成的盾状火山机构。火山岩呈 NNE 向展布,平面上呈椭圆形,南北长约 3 km,东西宽约 1.1 km,面积约 3.2 km²(图 1(b))。

该区火山岩主体岩性为粗安质熔岩及潜火山岩,火山口呈椭圆形,位于神泉院北侧,主要为晚期喷发的粗安质火山熔岩,自火山口向外依次为粗安质-安山质火山熔岩与火山碎屑岩,在火山口边缘及盾状火山的北部发育晚期侵入的安山玢岩脉。火山机构东西两侧被大盛群马朗沟组灰紫色砂砾岩所超覆。

沿神泉院岩体南部新建公路(图 1(b)),自西向东以平均 50 m 为间隔采集样品,共 5 件。每件

样品磨制2个薄片,开展镜下观察鉴定。

2.2 宏观与显微特征

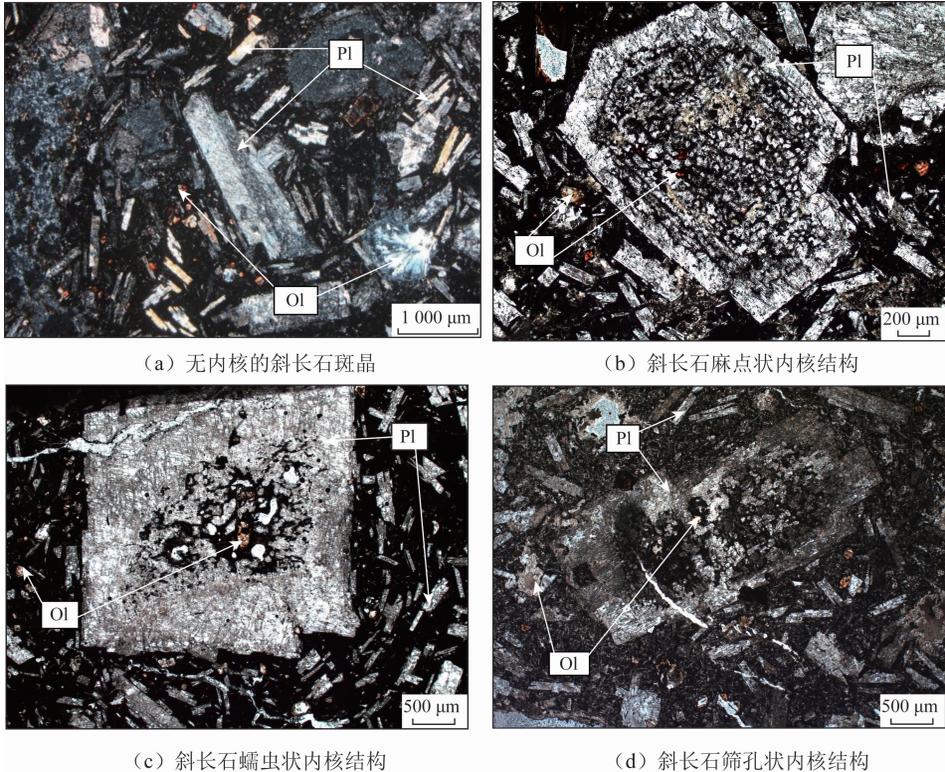
宏观上岩石多呈红褐色—紫褐色(图2),新鲜面呈灰紫色—灰黑色,斑状结构,气孔状—杏仁状构造,局部可见杏仁体定向排列。岩石具有典型的安山质岩石特征,但可见较多细小的橄榄石斑晶。



图2 神泉院火山岩手标本

Fig. 2 Hand specimens of Shenquanyuan volcanic rocks

镜下观察显示岩石具斑状结构(图3(a)),斑晶含量约50%,直径0.3~3 mm,大部分呈星散状分布,少数呈聚斑状、联斑状。斑晶矿物主要为斜长石和橄榄石,含少量角闪石、辉石或金云母,一些薄片中金云母含量可达15%。斑晶中的斜长石呈半自形板状、板条状,发育黏土化、绢云母化,部分可见熔蚀麻点;橄榄石呈半自形短柱状,含量约20%,发育伊丁石化、蛇纹石化,呈假象。基质主要由斜长石、橄榄石、玻璃质组成,斜长石呈半自形板条状、长条状微晶,粒径0.1~0.3 mm,分布杂乱;橄榄石呈半自形粒状,粒径0.05~0.2 mm,含量约5%,主要呈星散状分布,部分聚集分布于斜长石微晶之间,多发育伊丁石化,呈假象,少量有橄榄石残留;玻璃质为黑褐色,填隙状分布于斜长石粒间,局部可见脱玻化析出针状斜长石,呈似球粒结构。部分薄片的基质中也可见少量金云母、磷灰石、石榴石等矿物。



(a) 无内核的斜长石斑晶

(b) 斜长石麻点状内核结构

(c) 斜长石蠕虫状内核结构

(d) 斜长石筛孔状内核结构

Ol. 橄榄石; Pl. 斜长石。

图3 郯城地区安山质岩石中斜长石斑晶及其内部结构镜下特征

Fig. 3 Microscopic characteristics plagioclase phenocryst and its internal texture in andesitic rock in Tancheng area

2.3 斑晶斜长石内部结构

斜长石是本区安山质岩石的主要造岩矿物之

一,存在于岩浆演化的整个时期,在斑晶和基质中均有分布。斑晶斜长石发育聚片双晶,普遍具有环

带结构,根据内部特征可分为常见无内核的正常环带结构(图3(a)),以及具有内核的复杂环带结构,后者分为3种情况:

(1)斑晶斜长石呈较宽的板条状,外部环带宽度较狭窄且均匀,与内核之间的边界较清晰且规则;内核主要成分为发育聚片双晶的长条状、细粒状斜长石微晶,以及少量细粒状伊丁石化橄榄石,可能含有铁质及脱玻化的隐晶质物质或黑色玻璃。内核中的矿物整体呈麻点状分布,构成麻点状结构(图3(b))。

(2)斑晶斜长石的形状近似正方形,外部环带较宽且均匀,与内核之间的界线较模糊且不规则;内核主要成分为不规则状、蠕虫状的斜长石微晶,以及少量细粒状伊丁石化橄榄石,可能含有铁质及脱玻化的隐晶质物质或黑色玻璃。内核中的矿物整体呈蠕虫状、麻点状分布,构成蠕虫状结构(图3(c))。

(3)斑晶斜长石呈板条状—长条状,外部环带宽度不均匀,内核边界不规则,主要成分为不均匀分布的筛孔状、短柱状—粒状斜长石微晶,细粒状伊丁石化橄榄石,以及铁质、脱玻化的隐晶质或黑色玻璃。内核中的物质整体呈筛孔状分布,构成筛孔状内核结构(图3(d))。

斑晶斜长石的复杂环带结构形态上类似于熔岩中斜长石斑晶呈现的麻点结构^[2],以及中基性岩浆和酸性岩浆混合后斑晶斜长石呈现的筛孔结构^[6,9],但2种斑晶的主要矿物组合以不同牌品的斜长石为主,本文斑晶斜长石的成分则以“微晶斜长石+细小橄榄石”为主。

3 讨论

3.1 橄榄石的特征及来源

在讨论郯城地区安山质岩石中斑晶斜长石复杂环带结构的成因之前,有必要探讨岩石中大量橄榄石斑晶的特征及来源。

3.1.1 橄榄石的3个世代特征

橄榄石在岩石样品中的含量大于20%(斑晶橄榄石15%~20%,基质橄榄石约5%),分布较均匀,根据其粒径大小及熔蚀、蚀变特征,可以识别出3个世代的橄榄石(图4)。

第一世代橄榄石(Ol_1)以斑晶形式分布于岩石中,粒径以1~2 mm为主,少量大于3 mm,自形—

半自形,以长六边形居多,部分呈椭圆状或菱形,熔蚀后棱角钝化或圆化,呈似正方形或不规则状;凸透镜形斑晶内部发育(变余)网状构造,网纹和网眼都被蛇纹石交代(图4(a)),这一特征与山东蒙阴胜利I号岩管中部分橄榄石所呈现的网状构造^[20]相似。斑晶的主要发生碳酸盐化和蛇纹石化(图4(b))。

第二世代橄榄石(Ol_2)粒径为0.1~1 mm,大部分约0.5 mm,为显微斑晶,自形程度较高,以菱形或钝化的菱形、熔蚀港湾状居多。部分斑晶周围发育黑色蚀变边(图4(c)),主要发生伊丁石化(图4(d))。

第三世代橄榄石(Ol_3)粒径通常小于0.1 mm,多为0.05 mm左右,主要见于岩石的基质中,也可见于斑晶斜长石复杂环带结构的内核中,一般为半自形—它形。滑石化多发生在橄榄石晶体的边缘(图4(e)),而内部多发育伊丁石化(图4(f))。

3.1.2 橄榄石的来源

地幔橄榄石是古老克拉通地区产出的金伯利岩中的常见矿物^[20-22],但即使郯城地区的火山岩来源于含橄榄石的富集岩石圈地幔,理论上橄榄石含量也难以达到20%^[1],因此橄榄石可能有其他外来的岩石来源。晚中生代,尤其是白垩世中晚期,郯庐断裂带逐渐转变为巨型伸展构造,断裂引张程度不断增强^[23],同时郯庐断裂带是华北克拉通岩石圈减薄中的强减薄带,为软流圈地幔上涌及改造原有地幔提供了良好通道,为其他物质的加入创造了良好条件^[24]。

根据橄榄石的含量、形态特征以及岩石的矿物组合,郯城地区火山岩中的橄榄石可能来源于地幔成因的金伯利岩,有以下证据:①橄榄石具有3个世代特征,不同世代的橄榄石颗粒大小明显不同,这是金伯利岩中橄榄石所独有的特征^[20,25-30];②金伯利岩中橄榄石含量较高(25%~50%)^[27],如山东胜利I号岩筒中,呈浑圆状橄榄石假象的蛇纹石占金伯利岩总体积的40%~50%^[20],虽然地幔橄榄岩中含有大量橄榄石,但几乎没有世代特征,而其他基性—超基性岩石中的橄榄石含量较低;③镜下可见“橄榄石+金云母+石榴石”组合,这是寻找含金刚石原生金伯利岩的指示矿物组合。

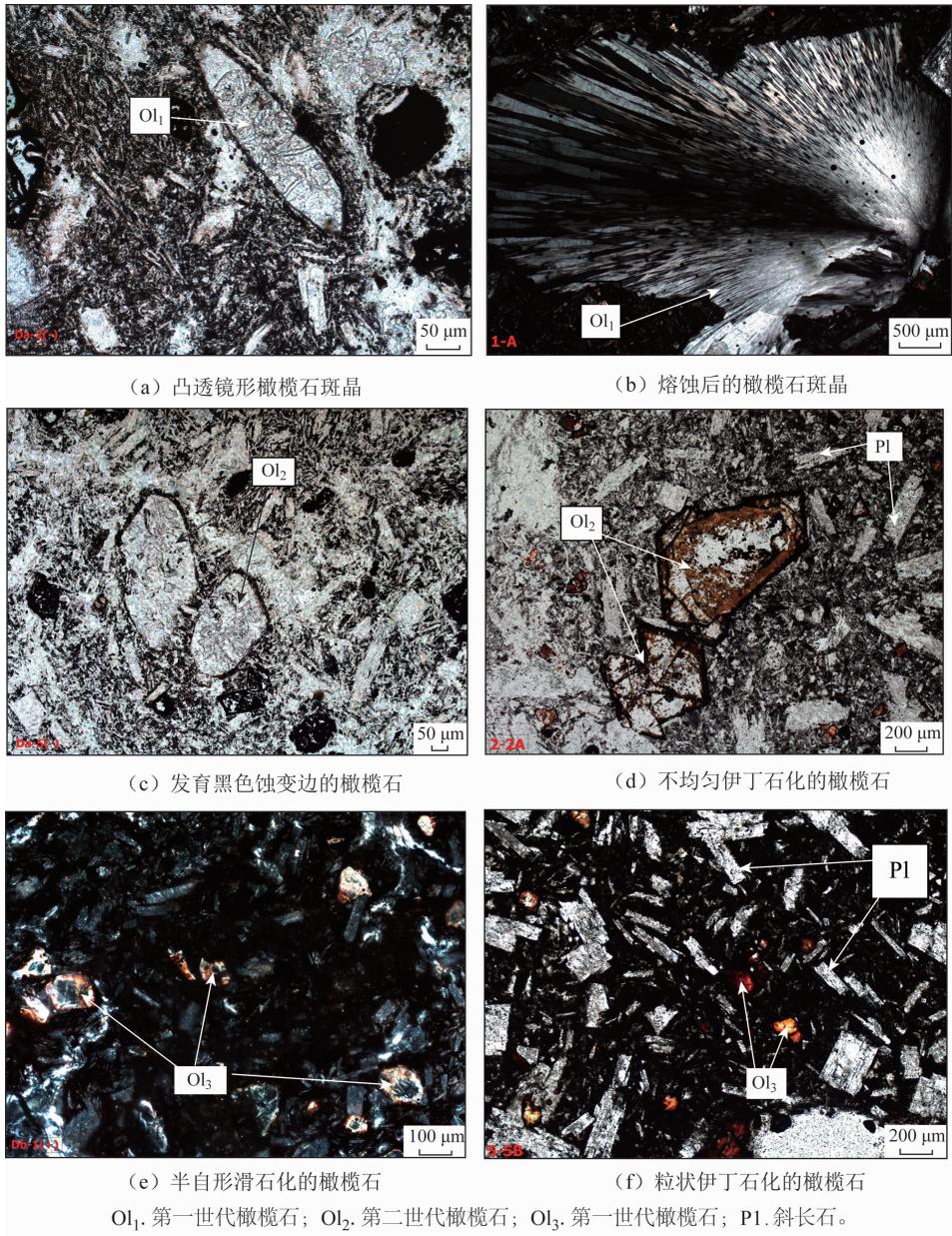


图 4 郯城地区安山质岩石中 3 个世代橄榄石镜下特征

Fig. 4 Microscopic characteristics of three generation olivines in andesitic rocks in Tancheng area

3.2 斑晶斜长石复杂环带结构的成因

在斜长石正常环带结构中,斑晶斜长石的组分从内核向边环改变,与正常结晶斜长石的成分变化趋势一致^[2],表现为核部至边缘由基性斜长石向酸性斜长石的渐变,一般被视为由中性-基性岩浆结晶演化形成^[6],其中中长石的环带结构最为发育^[1]。

除形成过程中温度、压力等物理条件的改变,晶体生长过程中周围成分的变化是斜长石复杂环带结构的根本成因^[7]。郯城地区的安山质岩石为

中性岩,酸性岩或超基性岩的混入可能导致岩石成分的改变。但手标本上未见岩石中存在明显的包体或暗色矿物集合体、淬火边、反向脉等指示基性岩与酸性岩发生混合作用的证据^[12,31],镜下观察未见到酸性斜长石、石英、钾长石等酸性岩的特征矿物,因此认为研究区安山质岩石中的成分变化是基性岩与超基性岩发生混合作用的结果。

金伯利岩是一种不含长石的偏碱性超基性浅成-超浅成岩石^[1],因此郯城地区安山质岩石中的斜长石应当来自安山岩。在高温金伯利岩岩浆与

低温安山岩岩浆的混合过程中,金伯利岩岩浆温度下降,而安山岩岩浆温度升高并发生部分熔融,产生不平衡的熔体,其产物分为2种情况:①金伯利岩岩浆与安山岩岩浆没有发生熔融的部分中,随着温度下降,金伯利岩岩浆、安山岩岩浆中的矿物各自结晶,安山岩中发育斑晶斜长石及正常环带斜长石、少量角闪石和辉石斑晶,基质中可见斜长石显微斑晶和微晶斜长石,金伯利岩中发育第一世代和第二世代橄榄石斑晶,基质中可见第三世代细小橄榄石颗粒;②部分熔融形成的新熔体中,同时含有安山岩岩浆和金伯利岩岩浆,随着温度下降,熔体中安山质岩石的斜长石结晶形成具有正常环带结构的斑晶,包裹斜长石与橄榄石形成新熔体,在显微镜下可见斑晶斜长石的复杂环带的外环为正常环带结构,而内核则为熔融后的新熔体成分,包括微晶斜长石、第三世代橄榄石及脱玻化的物质、玻璃质、铁质及少量其他矿物,这些矿物由于分布不

均匀、颗粒大小不一致等因素而形成类似麻点状、筛孔状的结构;内核部分的成分与未熔融的基质成分一致。

斑晶斜长石复杂环带结构的内核与外环之间接触界面的平直程度、内核大小及外环厚度,取决于新熔体周边温度下降的稳定性、成分均一性^[11]、新熔体与斑晶斜长石外环形成过程中的物质交换^[32]等因素。如果新熔体周边温度下降过程较稳定,且与斑晶斜长石外环在形成过程中不存在物质交换,则形成如图3(a)所示的斑晶斜长石复杂环带结构,反之则形成如图3(b)和图3(c)所示的斑晶斜长石复杂环带结构。显然,具有复杂环带结构的斑晶斜长石不是岩浆早期结晶的产物,而是以安山岩岩浆与金伯利岩岩浆为主要成分,在两者发生较充分的混合作用后结晶形成,属于后成斑晶,斑晶斜长石复杂环带结构的形成过程如图5所示。

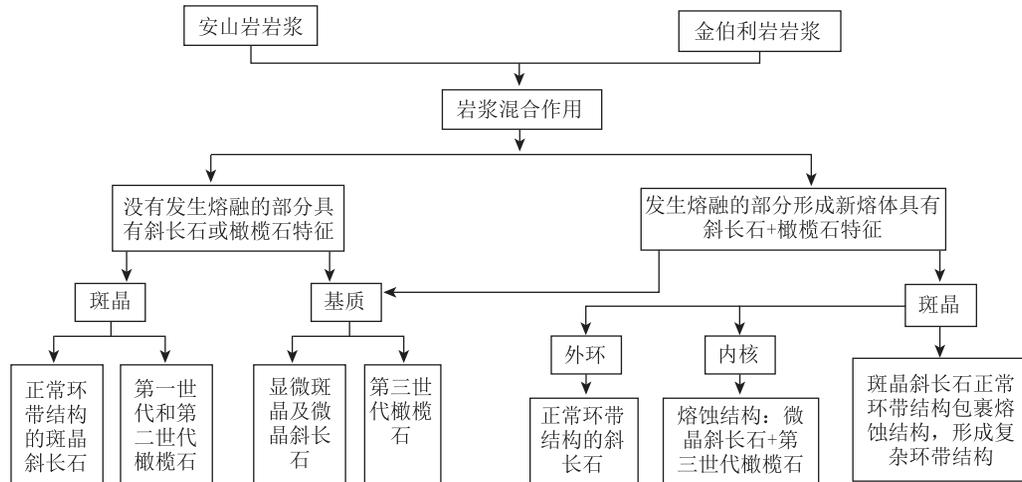


图5 安山岩岩浆与金伯利岩岩浆混合过程中斑晶斜长石复杂环带结构形成示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the formation of the complex zoning texture of phenocryst plagioclase during the mixed process of andesite magma and kimberlite magma

3.3 安山岩岩浆与金伯利岩岩浆的混合作用

野外调查未见金伯利岩角砾组分,以及暗色矿物集合体、淬火边、反向脉^[12,31];镜下观察未见金伯利岩的角砾或岩屑,或安山岩岩浆融化金伯利岩或与其发生反应,虽然可见数个橄榄石斑晶聚合的类似角砾特征,但这些橄榄石之间或周围未见金伯利岩的基质矿物。因此,该地区火山岩不是安山岩岩浆捕获已固结金伯利岩组分的产物。

本文认为,郟城地区的安山质岩石是安山岩岩浆与金伯利岩岩浆混合后的产物。主要证据有:

①斑晶斜长石复杂环带结构特征,这一结构特征可以示踪整个混合岩浆的演化过程^[6];②仅有金伯利岩中的橄榄石才具有3个世代特征;③“橄榄石+金云母+石榴石”与“斜长石+少量辉石+少量角闪石”是2个不平衡的矿物组合,矿物之间出现明显的不平衡现象是岩浆发生混合作用的证据^[1,14,26]。

安山岩属于中基性岩,而金伯利岩为来自地幔的超基性岩。如前所述,郟城地区的安山质火山岩来源于2种液相岩浆之间的混合,因此郟城地区安

山岩与金伯利岩的岩浆混合作用是一种狭义的岩浆混合作用^[12]。俯冲带是形成安山岩的重要场所,沂沭断裂一级构造单元在晚白垩世拉张作用的加剧,为这种岩浆混合作用创造了条件,而构造-岩浆活动形成了壳幔混合型岩石^[33]。

在地幔柱活动引发的软流圈地幔上涌作用下^[17-18],来自上地幔的金伯利岩岩浆在上侵过程中会冲进下地壳的安山岩岩浆房,或进入安山岩岩浆的喷发通道,由于存在成分、温度及密度梯度差异,2种岩浆的相遇会在一定动力驱动下产生扩散对流甚至漩涡、隐爆等,促使2种岩浆的混合趋于均匀,最终侵位至地表。

3.4 对郯城地区寻找金刚石原生矿的启示

郯城地区已经出土了大量超过100 ct的大颗粒金刚石,以及百余颗20~90 ct的金刚石,并在新生代地层中发现了于泉、陈埠、邵家湖、柳沟、小埠岭等5个达到工业品位的金刚石砂矿体以及其他不够工业品位的矿点,这些砂矿体或矿点中分布着大量镁铝榴石等金刚石指示矿物,但至今未发现含金金刚石的原生岩体。前人研究认为蒙阴盆地是郯城金刚石的供源地之一^[15];王思琪等^[30]通过系统对比郯城砂矿金刚石与蒙阴原生矿金刚石的颜色、表面形貌、晶体形态、晶体粒径大小、结晶度等,认为可能存在不同于蒙阴金伯利岩原生矿的含矿源岩,郯城大颗粒金刚石及附近出土的指示矿物难以从150 km远的蒙阴原生金刚石矿搬运而来,因此临沂南部地区可作为金刚石矿的重点找矿靶区^[34]。“橄榄石+金云母+镁铝榴石”是寻找金伯利岩的特征指示矿物组合,已经成为金伯利岩型金刚石矿床找矿标志^[29],本文在郯城地区发现的“橄榄石+金云母+石榴石”矿物组合是一个完整的金伯利岩矿物组合。区域上,北部蒙阴地区存在常马庄、西峪、坡里3个金伯利岩带^[15],结合郯城地区周边存在磁异常、南部小埠岭经钻孔证实存在隐伏岩体、西北部费县大井头地区存在钾镁煌斑岩、费县东小山地区存在煌斑岩^[35],推测该地区及其西北部可能存在第四成矿带的费县大井头地区^[36],平邑—费县—临沂一线的深部(图1(a))可能存在金伯利岩岩管或岩脉。

4 结论

(1) 山东郯城地区发育一套安山质火山岩,主

体岩性具有安山岩的基本特征,其中斑晶斜长石除发育正常的环带结构特征外,还具有复杂环带结构。具有复杂环带结构的斑晶斜长石记录了不同成分岩浆的混合演化历史,以早期岩浆为主要成分,后期混合了不同成分岩浆结晶形成,属于后成斑晶。

(2) 斑晶斜长石复杂环带结构的内核主要为微晶斜长石及细小橄榄石,外环为岩浆混合后斜长石正常结晶的产物;郯城地区安山质岩石中橄榄石含量大于20%,且较均匀地分布于岩石中;橄榄石具有明显的3个世代特征,与金伯利岩中橄榄石的3个世代特征基本一致;安山质火山岩出现的“橄榄石+金云母+石榴石”与“斜长石+辉石+角闪石”是2个不平衡的矿物组合。这些证据均表明,该地区安山质岩石是安山岩岩浆与金伯利岩岩浆混合作用的产物,且是一种狭义的岩浆混合作用,这对该地区寻找金刚石原生矿具有指导意义。

致谢: 南京宏创地质勘查技术服务有限公司协助了薄片制作;成文过程中,中国地质调查局南京地质调查中心黄光昭(已故)研究员与作者进行了多次有益讨论,南京大学杨经绥院士及其团队成员提出了诸多宝贵意见;匿名评审专家提出了建设性修改建议,在此一并致谢。

参考文献(References):

- [1] 邱家骧. 岩浆岩岩石学[M]. 北京:地质出版社,1985.
Qiu J X. Magmatic Rock Petrology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985.
- [2] 李兆鼎,王碧香,王富宝,等. 火山岩的分类命名和鉴定特征[J]. 中国地质科学院地质研究所所刊,第8号. 北京:地质出版社,1984.
Li Z N, Wang B X, Wang F B, et al. The Classification, Nomenclature and identification of volcanic rocks [J]. Bulletin of the Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, No. 8. Beijing: Geological Publishing House, 1984.
- [3] Kuşçu G G, Floyd P A. Mineral compositional and textural evidence for magma mingling in the Saraykent volcanics [J]. Lithos, 2001, 56(2/3): 207-230.
- [4] Cole J W, Gamble J A, Burt R M, et al. Mixing and mingling in the evolution of andesite-dacite magmas: Evidence from co-magmatic plutonic enclaves, Taupo Volcanic Zone, New Zealand [J]. Lithos, 2001, 59(1/2): 25-46.
- [5] Janoušek V J, Braithwaite C J R, Bowes D R, et al. Magma-mixing in the genesis of Hercynian calc-alkaline granitoids: An integrated petrographic and geochemical study of the Sázava intru-

- sion, Central Bohemian Pluton, Czech Republic [J]. *Lithos*, 2004, 78(1/2): 67-99.
- [6] 谢磊, 王德滋, 王汝成, 等. 浙江普陀花岗杂岩体中的石英闪长质包体: 斜长石内部复杂环带研究与岩浆混合史记录[J]. *岩石学报*, 2004, 20(6): 1397-1408.
- Xie L, Wang D Z, Wang R C, et al. Complex zoning texture in plagioclases from the quartz diorite enclave in the Putuo granitic complex, Zhejiang Province: Record of magma mixing[J]. *Acta Petrol Sin*, 2004, 20(6): 1397-1408.
- [7] Hibbard M J. The magma mixing origin of mantled feldspars[J]. *Contr Mineral Petrol*, 1981, 76(2): 158-170.
- [8] 董传万, 李武显, 陈小明, 等. 闽东南晚中生代岩浆混合作用: 平潭火成杂岩的岩石学证据[J]. *自然科学进展*, 1998, 8(5): 581-586.
- Dong C W, Li W X, Chen X M, et al. Late Mesozoic magma mixing in SE-Fujian: Petrologic evidence from the Pingtan igneous complex[J]. *Prog Nat Sci*, 1998, 8(2): 69-74.
- [9] 王德滋, 谢磊. 岩浆混合作用: 来自岩石包体的证据[J]. *高校地质学报*, 2008, 14(1): 16-21.
- Wang D Z, Xie L. Magma Mingling: evidence from enclaves[J]. *Geol J China Univ*, 2008, 14(1): 16-21.
- [10] Wilcox R E. The idea of magma mixing: History of a struggle for acceptance[J]. *J Geol*, 1999, 107(4): 421-432.
- [11] Tsuchiyama A. Dissolution kinetics of plagioclase in the melt of the system diopside-albite-anorthite, and origin of dusty plagioclase in andesites[J]. *Contr Mineral Petrol*, 1985, 89(1): 1-16.
- [12] 李昌年. 岩浆混合作用及其研究评述[J]. *地质科技情报*, 2002, 21(4): 49-54.
- Li C N. Comment on the magma mixing and their research[J]. *Geol Sci Technol Inform*, 2002, 21(4): 49-54.
- [13] Castro A, Stephens W E. Amphibole-rich polycrystalline clots in calc-alkaline granitic rocks and their enclaves[J]. *Can Mineral*, 1992, 30(4): 1093-1112.
- [14] 梁明宏, 周兴安, 龚全胜, 等. 岩浆混合作用——来自甘肃北山的野外证据[J]. *甘肃地质学报*, 2002, 11(1): 44-49.
- Liang M H, Zhou X A, Gong Q S, et al. Magma hybrid process: Field evidences from Gansu Beishan mountains[J]. *Acta Geol Gansu*, 2002, 11(1): 44-49.
- [15] 周登诗. 钻石之路[M]. 北京: 地质出版社, 2015.
- Zhou D S. *The Road of Diamond*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2015.
- [16] 许志琴, 张巧大, 赵民. 郯庐断裂中段古裂谷的基本特征[J]. *中国地质科学院院报*, 1982(4): 17-44.
- Xu Z Q, Zhang Q D, Zhao M. The main characteristics of the paleorift in the middle section of the Tancheng-Lujiang fracture zone[J]. *Acta Geosci Sin*, 1982(4): 17-44.
- [17] Furman T. Geochemistry of East African Rift basalts: An overview[J]. *J Afr Earth Sci*, 2007, 48(2/3): 147-160.
- [18] Shellnutt J G, Jahn B M. Origin of Late Permian Emeishan basaltic rocks from the Panxi region (SW China): Implications for the Ti-classification and spatial-compositional distribution of the Emeishan flood basalts [J]. *J Vol Geoth Res*, 2011, 199(1/2): 85-95.
- [19] 李友连, 邱检生, 刘亮. 山东郯城神泉钠质火山岩的年代学与地球化学: 对源区地幔性态与岩石成因的启示[J]. *岩石矿物学杂志*, 2012, 31(6): 783-798.
- Li Y L, Qiu J S, Liu L. Geochronology and geochemistry of sodic volcanic rocks from Shenquan in Tancheng County, Shandong Province: Implications for unraveling the nature of mantle source and petrogenesis[J]. *Acta Petrol Mineral*, 2012, 31(6): 783-798.
- [20] 黄蕴慧, 秦淑英, 周秀仲, 等. 华北地台金伯利岩与金刚石[M]. 北京: 地质出版社, 1992.
- Huang Y H, Qin S Y, Zhou Z X, et al. *Kimberlite and Diamond in the North China Platform*[M]. Beijing: Geological Press, 1992.
- [21] 董振信. 中国金伯利岩[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- Dong Z X. *Kimberlites in China*[M]. Beijing: Science Press, 1994.
- [22] 张宏福, 英基丰, 徐平, 等. 华北中生代玄武岩中地幔橄榄石捕虏晶: 对岩石圈地幔置换过程的启示[J]. *科学通报*, 2004, 49(8): 784-789.
- Zhang H F, Ying J F, Xu P, et al. Mantle olivine xenocrysts entrained in Mesozoic basalts from the North China craton: Implication for replacement process of lithospheric mantle[J]. *Chin Sci Bull*, 2004, 49(9): 961-966.
- [23] 朱光, 王道轩, 刘国生, 等. 郯庐断裂带的演化及其对西太平洋板块运动的响应[J]. *地质科学*, 2004, 39(1): 36-49.
- Zhu G, Wang D X, Liu G S, et al. Evolution of the Tan-Lu fault zone and its responses to plate movements in west Pacific basin[J]. *Chinese J Geol*, 2004, 39(1): 36-49.
- [24] 谢成龙, 朱光, 牛漫兰, 等. 郯庐断裂带巢湖-庐江段晚中生代火山岩地球化学特征与岩石圈减薄过程[J]. *岩石学报*, 2008, 24(8): 1823-1838.
- Xie C L, Zhu G, Niu M L, et al. Geochemistry of Late Mesozoic volcanic rocks from the Chaohu-Lujiang segment of the Tan-Lu fault zone and lithospheric thinning processes [J]. *Acta Petrol Sin*, 2008, 24(8): 1823-1838.
- [25] Clement C R, Skinner E M W, Scott Smith B H. Kimberlite redefined[J]. *J Geol*, 1984, 92(2): 223-228.
- [26] Mitchell R H. *Kimberlites: Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*[M]. London: Plenum Press, 1986.
- [27] 董振信. 山东金伯利岩中橄榄石的研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 1991, 10(4): 354-362.
- Dong Z X. A study of olivine from Kimberlites in Shandong Province[J]. *Acta Petrol Mineral*, 1991, 10(4): 354-362.
- [28] Arndt N T, Guitreau M, Boullier A M, et al. Olivine, and the origin of kimberlite[J]. *J Petrol*, 2010, 51(3): 573-602.
- [29] 胡建飞. 金伯利岩型金刚石矿床矿物特征[J]. *科技创新与应用*, 2015(14): 117-118.
- Hu J F. Mineral characteristics of Kimberlite-type diamond deposit[J]. *Technol Innovat Appl*, 2015(14): 117-118.
- [30] 王思琪, 郑建平, 韩双, 等. 辽南斑状金伯利岩岩相学特征

- 及其成因研究[J]. 地质学报, 2020, 94(9): 2676–2686.
- Wang S Q, Zheng J P, Han S, et al. Petrography and petrogenesis of porphyritic kimberlite from South Liaoning[J]. Acta Geol Sin, 2020, 94(9): 2676–2686.
- [31] 王玉往, 王京彬, 龙灵利, 等. 岩浆混合作用的类型、标志、机制、模式及其与成矿的关系——以新疆北部为例[J]. 岩石学报, 2012, 28(8): 2317–2330.
- Wang Y W, Wang J B, Long L L, et al. Type, indicator, mechanism, model and relationship with mineralization of magma mixing: A case study in North Xinjiang[J]. Acta Petrol Sin, 2012, 28(8): 2317–2330.
- [32] Castro A. Plagioclase morphologies in assimilation experiments. Implications for disequilibrium melting in the generation of granodiorite rocks[J]. Mineral Petrol, 2001, 71(1/2): 31–49.
- [33] 刘俊来, 倪金龙, 陈小宇, 等. 岩石圈伸展的壳/幔拆离模型(Parallel Extension Tectonics): 华北克拉通东部早白垩世岩石圈减薄与破坏机理[J]. 岩石学报, 2020, 36(8): 2331–2343.
- Liu J L, Ni J L, Chen X Y, et al. Parallel extension tectonics: Mechanism of Early Cretaceous thinning and destruction of the lithosphere of the North China Craton[J]. Acta Petrol Sin, 2020, 36(8): 2331–2343.
- [34] 丁毅. 金伯利岩的卫星影像识别标志及应用实例[J]. 地质与勘探, 2020, 56(5): 1050–1056.
- Ding Y. Satellite image index of kimberlite and its application[J]. Geol Explorat, 2020, 56(5): 1050–1056.
- [35] 高存山, 褚志远, 张勇, 等. 山东临沂东小山地区煌斑岩地球化学特征及其对成矿的启示[J]. 华东地质, 2020, 41(3): 271–278.
- Gao C S, Chu Z Y, Zhang Y, et al. Geochemical characteristics and indication for mineralization of Dongxiaoshan lamprophyre in Linyi City, Shandong Province[J]. East China Geol, 2020, 41(3): 271–278.
- [36] 杨献忠, 吕青, 周军, 等. 山东蒙阴地区三岩带南部第四成矿带存在的可能性分析[J]. 华东地质, 2017, 38(增刊): 55–57.
- Yang X Z, Lü Q, Zhou J, et al. Possibility of the existence of the fourth metallogenic belt in the southern part of the three rock belts in the Mengyin area, Shandong[J]. East China Geol, 2017, 38(Supp): 55–57.

Complex zoning texture of phenocryst plagioclase in andesitic rocks of Tancheng area, Shandong Province: Record of magma mixing

YANG Xianzhong¹, XU Mincheng¹, XU Yanming², CHU Zhiyuan², XIAO Fan¹, ZHOU Yan¹

(1. Nanjing Geological Survey Centre, China Geological Survey, Jiangsu Nanjing 210016, China;

2. The 7th Institute of Geology and Mineral Exploration of Shandong Province, Shandong Linyi 276006, China)

Abstract: A large amount of coarse grain diamonds and diamond placer deposits have been found in the Cenozoic strata in Tancheng area of Shandong Province, without primary diamond deposits so far. The petrography characteristics of outcrop of andesitic volcanic rocks in this area was investigated to explore the source of diamonds. The results show: ① Most of the phenocryst plagioclases have different complex zoning textures, and the core of phenocryst plagioclase is composed of microcrystalline plagioclases and fine olivines, with normal zoning texture crystallized by plagioclase in the outer rings. ② The olivines are evenly distributed in the rock, with content of more than 20%. It also has three generations characteristics, which is basically consistent with the three generations characteristics of olivine in kimberlite. ③ The mineral combinations of “olivine + phlogopite + garnet” and “plagioclase + pyroxene + hornblende” occurred in the rocks. These evidences indicate that the andesitic volcanic rocks in the area are the product of the mixing of andesite magma and kimberlite magma, which was recorded by the complex zoning texture of phenocryst plagioclase. The research in this paper is of enlightenment for the primary diamond ore research in Tancheng area.

Keywords: andesitic volcanic rock; plagioclase; complex zoning texture; olivine; kimberlite; magma mixing; Tancheng area

(责任编辑: 魏昊明)