

辽河裂谷东部凹陷粗面岩成因机理探讨

蔡国刚^{1,2)}

1)中国矿业大学, 北京 100083;
2)辽河油田公司研究院, 辽宁盘锦 124010

摘 要: 在渤海湾诸盆地中, 唯独辽河盆地东部凹陷发育粗面岩, 引起了国内地质学界的广泛关注。本文通过岩石学特征、构造运动背景和形成环境的综合分析认为: 粗面岩的原始岩浆来源于上地幔的较深部位, 与玄武岩等火成岩属同源岩浆, 但粗面岩经历了更长时间的结晶分异作用; 形成粗面岩的岩浆, 在上涌过程中未经历任何地壳混杂作用, 外部环境属于水下喷发; 构造运动是岩浆活动和火成岩性发育及其分布的内因, 东部凹陷沙三中段沉积时期所特有构造运动背景造就了粗面岩发育的内外部环境。

关键词: 东部凹陷; 粗面岩; 结晶分异; 混染; 水下环境; 成因机理; 构造运动

中图分类号: P588.143; P588.113; P542.5 文献标志码: A 文章编号: 1006-3021(2010)02-245-06

Genetic Mechanism of Trachyte in the Eastern Depression of Liaohe Rift

CAI Guo-gang^{1,2)}

1) China University of Mining and Technology, Beijing 100083;
2) Research Institute of Liaohe Oil Company, Panjin, Liaoning 124010

Abstract: In various basins of the Bohai Bay, only the East Liaohe depression has well-developed trachyte. This phenomenon has long aroused much attention among geologists in China. Based on an integrated analysis of rock characteristics, tectonic movement and formation background, this paper holds that the original trachyte magma was derived from the deeper part of the upper mantle, the basalt and other igneous rocks were comagmatic rocks, but the trachyte experienced a longer time of crystallization differentiation. It is also considered that the formation of trachyte magma in the upwelling process did not experience any mixing action, with the external environment being part of the underwater eruption, that the tectonic movement constituted the internal cause for the development and distribution of magmatic activities and igneous rocks, and that the unique characteristics of the three middle sedimentation periods of the eastern sag created the internal and external environment background for the development of trachyte.

Key words: east depression; trachyte; crystallization differentiation; contamination; underwater environment; genetic mechanism; tectonic movement

辽河裂谷是渤海湾裂谷系的一部分(图 1), 它的形成可能归因于渤海湾地区的郯庐断裂和地幔上隆的双重作用。在早第三纪, 辽河裂谷所在地区在其所对应的渤中幔隆区(三岔支中的北支)的上隆作用下, 使大陆地壳伸展裂陷而形成主动裂谷, 期间岩浆沿着地幔上隆区地壳裂开的通道而喷溢, 并在强

烈的伸展期伴有侵入作用。加之当时郯庐断裂的频繁活动, 致使本区裂谷作用表现为火山作用与裂谷作用同时发生, 而且在有些活动部位往往是以岩浆活动为先导, 继而才表现为正常的沉积作用或与火山作用相间出现, 这种作用基本贯穿于早第三纪的始终, 因而造就了辽河裂谷火成岩的高度发育。古

收稿日期: 2010-01-31; 改回日期: 2010-04-15。

第一作者简介: 蔡国刚, 男, 1965 年生。在读博士, 高级工程师。油田公司勘探部署专业岗技术专家, 现担任勘探开发研究院盆地勘探研究所所长。主要从事油气勘探部署研究工作。通讯地址: 124010, 辽宁省盘锦市兴隆台区石油大街 95 号。电话: 0427-7805578。Email: caiguogang@sina.com。

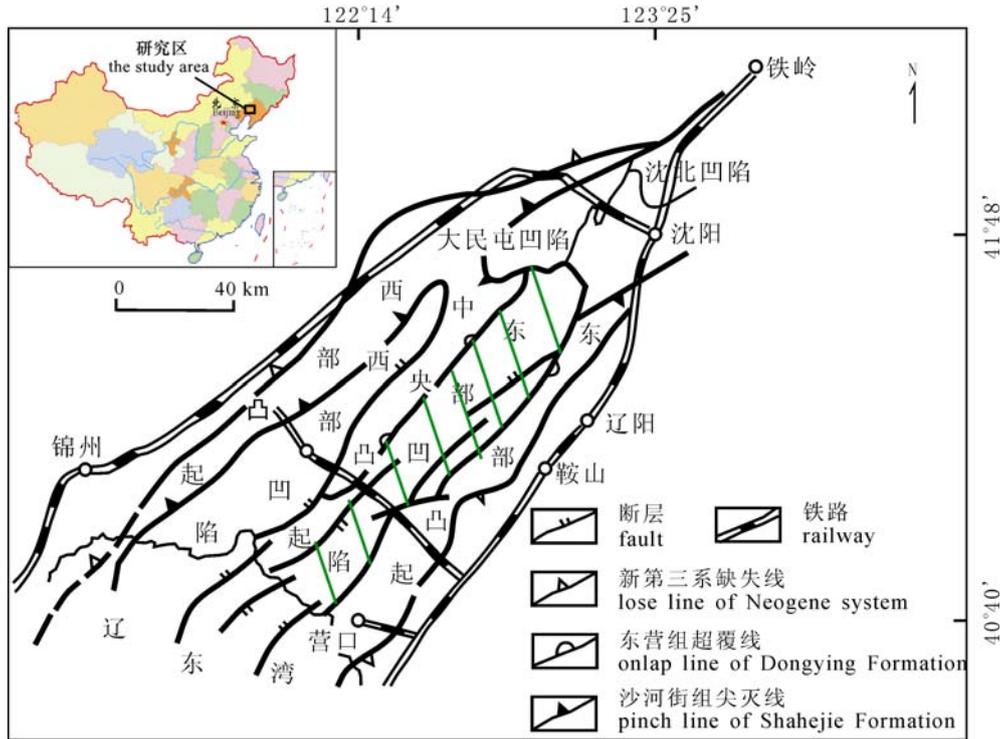


图1 辽河拗陷构造单元分区图

Fig. 1 Tectonic unit division of Liaohé Depression

新世以喷发作用为主,火山岩分布面积占裂谷的70%以上,西部和大民屯凹陷岩浆作用基本相似,均具有分布广的特点,而东部凹陷强度更大,最大厚度超千米;从始新世开始,岩浆活动中心整体转移到了东部凹陷,喷发作用和侵入作用都有发生,从始新统至上第三系明化镇组均不同程度地发育了大量的火成岩体,受裂隙和地幔上隆双重作用及其强度的影响,岩浆上涌速率和分异程度亦存在较大变化,造就了本区从基性到中性多种丰富岩石类型的发育。

经中国科学院地质所、中科院无锡实验室、中科院广州地化所、南京大学、长春地质学院和具有国家质量计量资质的中国石油辽河油田试验中心等多家权威试验机构的联合鉴定,辽河东部凹陷的岩石类型可划分为熔岩类(包括粗面岩、粗安岩、玄武安山岩、安山岩、粗玄武岩、安山玄武岩、玄武岩)、脉岩类(辉绿岩)、火山碎屑岩类(包括火山角砾岩、熔结凝灰岩、凝灰岩)3大类11个亚类。其中粗面岩、玄武岩、安山岩、辉绿岩为本区的主要火成岩类型,而粗面岩为渤海湾诸盆地中辽河盆地东部凹陷所特有。

1 岩石学特征分析源浆成因与演化

粗面岩系指以粗面岩为主要成分(含量)的岩石,它

的显著特点是斑晶发育,具有“粗面”结构,本区粗面岩的颜色多为灰、绿灰、深灰色,块状构造(图2、3)。岩石标本总体呈斑状结构、聚斑结构;基质为粗面结构、霏细结构。斑晶发育,一般占总体积的15%~30%,为碱性长石,种属主要为透长石和斜长石,也含少量歪长石、角闪石和橄榄石。透长石呈柱状或板条状有规律排列,斜长石多为环带结构,呈“净边脏心”形态,两者大多发生了中-深程度蚀变,为绿泥石化、方沸石化等;斜长石种属有钠长石、中长石、拉长石。暗色矿物含量低,为黑云母、辉石等,具暗化边,亦有中-深程度的绿泥石化。基质以微晶碱性长石为主,少量斜长石,长石排列具定向性,同时也发生了绿泥石化、方沸石化等次生变化;次含少量玻璃质、蚀变暗色矿物、铁质等。总体上,岩石长石含量较高(钾长石+钠长石均>55%),粘土含量低(<10%)。这些特征与粗面岩的源浆成分及后生环境密不可分。

1.1 主量元素特征

东部凹陷重点岩性的全碱与 SiO_2 确定的硅碱关系如图4所示,从中可以看出:岩石主要落入三个区域,即粗面岩-粗面安山岩区、粗面玄武岩区和玄武岩区,表明本区岩石偏碱性。此外,在粗面岩中还发现了霓辉石斑晶,亦进一步证明东部凹陷的粗面岩属碱性岩类。



图2 欧 15-2306.1m, 粗面岩, 粗面结构, 正交偏光 100×
Fig. 2 Ou15-2306.1m, trachyte, trachytic texture, crossed nicols 100×



图3 欧 52-2681.64m, 粗面岩
Fig. 3 Ou52-2681.64m, trachyte

而碱度分析结果表明, 本区粗面岩大多样品 δ 在 7.2~8.6 之间(表 1), 按 δ 的划分标准及 AR 和 SiO_2 关系, 不难证实本区的粗面岩属碱性系列。

表中: $\delta = (Na_2O + K_2O)^2 / (SiO_2 - 43)$

$AR = (CaO + Al_2O_3 + Na_2O + K_2O) / (CaO + Al_2O_3 + K_2O - Na_2O)$

将阳离子标准矿物计算结果投在 Trnive 的 Ab-An-Or 三角图上, 则分布于钾质系列范围; 在

$SiO_2 - K_2O$ 图解中, 本区粗面岩具有高钾含量的特点, 综上所述, 说明本区的粗面岩属碱性钾质系列。

总体来说, 东部凹陷的火成岩碱质和 Al_2O_3 含量较高, 并表现出较强的分离趋势, 各种主量元素与 Mg#(镁质, $Mg\# = (Mg^{2+} \times 100) / (Mg^{2+} + Fe^{2+})$) 的关系均呈连续变化的负相关, 显示了这些岩石可能源于同一岩浆系列的演化。粗面岩样品的 Mg# 变化范围在 30~47 之间, 表明该类岩石中发生了较高级别的

表 1 热河台—欧利坨子地区粗面岩 δ 与 AR 值统计表
Table 1 Statistics of trachyte δ and AR in Rehetai-Oulituozhi area

样号	51	52	55	56	57	58	59	61	66
SiO_2	60.23	58.83	58.25	60.46	58.72	58.80	58.92	60.10	59.93
δ	7.24	8.37	8.51	8.07	8.07	8.51	7.87	8.51	8.51
AR	2.85	2.70	2.50	3.55	3.58	2.66	3.16	3.16	3.55

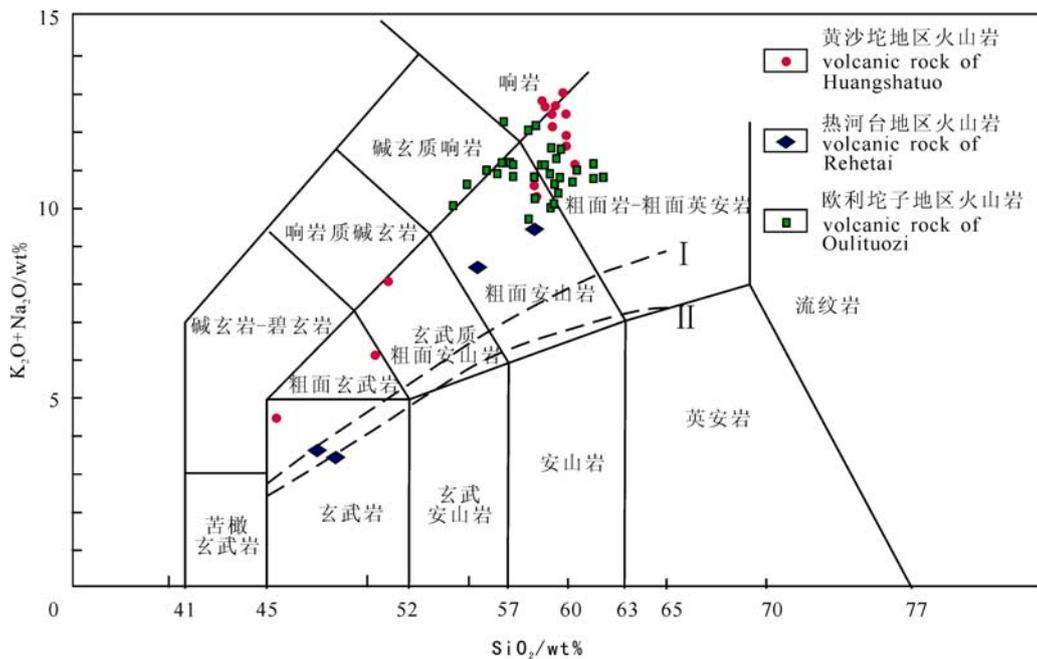


图 4 TAS 图解
Fig. 4 TAS diagram

分异结晶作用,或具有明显的壳源物质的混入(后文说明无此作用);而玄武岩仍具有很高的 $Mg\#$ 值,基本上所有的样品都大于 65,反映其岩浆基本没有受到地壳物质的混染。

K_2O+Na_2O 和 SiO_2 之间的关系呈现为连续变化的正相关,表明随着岩浆的演化,碱性元素含量增加,碱度增加。一般认为,碱性火成岩来自较深的、部分熔融程度低的源区,其构造背景为张裂的环境。这一点可以由对压力灵敏的 Ti 元素含量的变化来进行判断,从 Al_2O_3/TiO_2-TiO_2 图中(图 5)可看出,研究区的样品跨越了从夏威夷型火山岩到红海裂谷型火山岩的区域,反映了它们形成于张裂环境的特征。本区火成岩形成于张裂构造环境,不同类型的火成岩的主要元素由基性到碱性呈现出连续的变化趋势,和本区的中生代火成岩相比,这一特征尤其明显。上述主要元素的变化特征表明,本区不同类型的火成岩呈现出一个岩浆序列的演化趋势,可能是同一个源区岩浆演化的结果。

1.2 稀土元素特征

稀土元素(REE),是岩浆岩成因的良好标志,其特征可以分析确定岩浆形成的构造环境,划分岩石类型,以及岩石是部分熔融还是分离结晶的产物等。

本区粗面岩的稀土总量 ΣREE 变化于 138~2288 ppm 之间, $(La/Lu)_C$ 为 8.9~17.5,稀土配分曲线呈右倾型,为轻稀土富集型, δEu^* 为 0.5~0.94, Eu 呈明显呈负异常(图 6)。

粗面岩与本区另外两种主要岩石——玄武岩、辉绿岩的一个共同特征是均具轻稀土富集、曲线形态为明显的右倾形式,分配型式相似,反映了它们具有相似的源区特征。但粗面岩的稀土总量 ΣREE 普遍高于玄武岩和辉绿岩,轻重稀土元素分馏程度高,并出现了明显的 Eu 负异常,反映了早期的成岩过程中斜长石的结晶分异作用的影响及可能混有壳源物质的特点。

综上所述,本区的粗面岩与玄武岩类(包括辉绿岩)都具有碱性特征,来源于上地幔较深部位,属同源岩浆,粗面岩是同源的碱性玄武岩浆后期演化的结果。

1.3 微量元素特征

微量元素,随着主量元素含量的变化也呈有规律的变化,是岩石形成的物理条件的重要指示。从本区玄武岩微量元素球粒陨石标准化比值蛛网图中可见,随元素在从左到右相容性逐渐增大,元素含量总体降低。但其中有明显的 Rb 和 Pb 的亏损, Ce 也略有亏损(图 7)。其中 Rb 和 Pb 为上地壳明显富集

的元素,由此可见,该区玄武岩几乎没有受到上地壳混染作用。

此外,蛛网图上本区的各类岩石基本表现出相同的配分模式, K 呈现正异常,这和本区岩石偏碱性的岩石特征是一致的; Ta、Ti 等高场强(HFS)元素呈现负异常,表明早期钛铁矿的结晶分离作用的发生,反映了岩浆曾发生过结晶分异作用,这和前面的结论是一致的; Sr、P 等元素具有不同程度的亏损,以

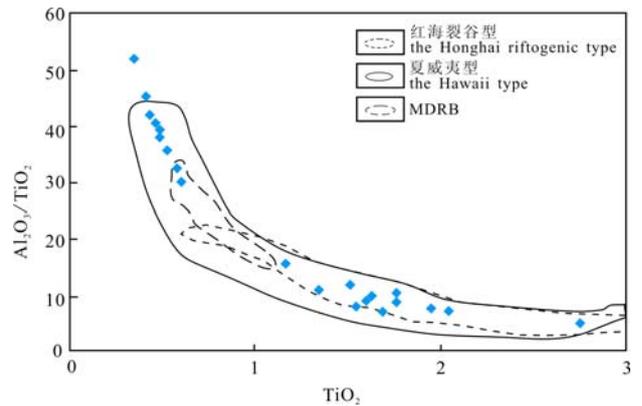


图 5 Al_2O_3/TiO_2-TiO_2 关系图

Fig. 5 Al_2O_3/TiO_2-TiO_2 diagram

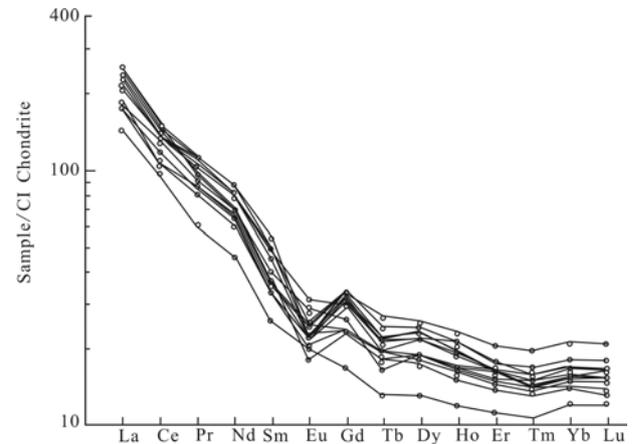


图 6 粗面岩岩稀土元素配分曲线图

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns of trachyte

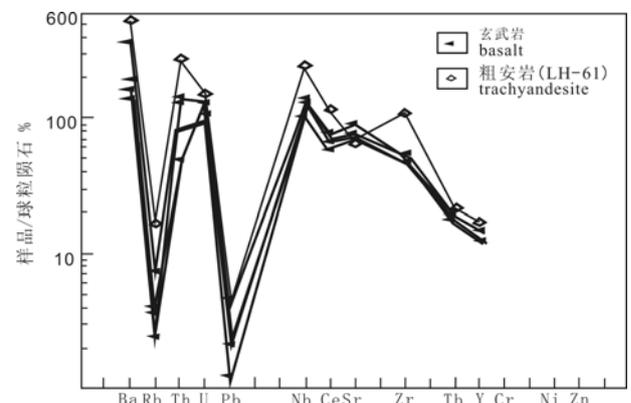


图 7 球粒陨石标准化比值蛛网图

Fig. 7 Spidergram of chondrite-normalized ratios

及 Nb 的正异常表明岩浆演化过程中没有明显的壳源物质混入。

普遍的 Ta、Ti、P、Sr 的负异常, K、Rb、Th 的正异常是本区火成岩主要特征, 这些异常特征都与世界上板内岩浆系列的特征相似, 考虑岩性偏碱性具有高钾的特性, 因此认为这一看法是合理的。

1.4 同位素特征

同位素地质学在解决火成岩的年龄、岩石成因、成岩、成矿物质的来源及地壳、上地幔的演化问题中都具有较好的应用, 在源区特征研究中, Rb-Sr、Sm-Nd 同位素的研究, 占有重要地位。东部凹陷粗面岩样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 含量为 0.7046~0.7049, ϵ_{Nd} 为 +1.4~+1.9。由于粗面质岩浆本身铷含量很低, 如有地壳物质加入, 即使其量甚微, 也会使 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值明显升高, 证明本区粗面岩的源浆上涌过程中未经任何地壳混染作用。

根据东部凹陷早第三系火成岩代表岩石同位素组成变化特征、Sr-Nd 同位素数值以及区域地幔地球化学的综合分析, 本区火成岩的源区可能有三种来源: (1) 亏损的上地幔软流圈, 其成分相当于大洋中脊玄武岩(MORB, $\epsilon_{\text{Nd}} = 10\sim 12$); (2) 略亏损的地幔源, 其成分相当于主体大洋岛玄武岩($\epsilon_{\text{Nd}} = 0\sim 6$); (3) 略亏损-富集的古老岩石圈地幔。三种源区不等比例的混合, 有可能说明本区岩浆源区的特征。

2 构造演化与岩浆活动

按板块构造观点, 辽河断陷属大陆裂谷盆地, 是渤海湾裂谷系的一部分, 大地构造位置处于华北板块东北部。整个渤海盆地是晚白垩世至早第三纪时期由地幔底辟所导致的伸展裂陷作用的构造背景上发育起来的含油沉积盆地。地震测深和大地电磁测深及地热资料, 证明辽河盆地下面存在地幔上隆构造。根据渤海湾盆地莫霍面埋深、重力等地球物理资料, 结合火山岩在喷发地区的时空分布所反映的岩浆活动特点, 该盆地应属于软流圈底辟和区域应力场联合作用的结果。在区域应力场的作用下, 太平洋板块对欧亚板块的俯冲可能起着主导作用。软流圈底辟促使地幔热柱的形成, 从而使岩石圈上隆及伸展减薄, 导致大陆裂谷扩张。辽河断陷是郯庐断裂和地幔上隆的双重作用下发育的主动裂谷盆地, 岩浆是沿着地幔上隆区地壳裂开的通道而喷溢或侵入的。

东部凹陷是其中一个北东向展布的箕状凹陷, 主干断裂走向和盆地边界基本一致。作为各时期的岩浆活动中心, 从上到下, 具有晚第三纪拗陷构造

层—中新代断陷构造层—被改造的古老印支期褶皱构造层。其形成演化可分以下几个阶段: (1) 裂前成弯期(k_2) - 热柱生成: 由于太平洋板块俯冲, 上地幔物质热膨胀作用造成局部异常, 在 400 km 处诱发上地幔熔融, 形成一热柱。垂直上升的热柱或对流上升的地幔物质对岩石圈的加热必然使岩石圈软化、上隆。(2) 张裂破碎期(E_1) - 热柱迅速上升: 太平洋板块俯冲强烈, 上地幔物质热膨胀作用加剧, 岩浆沿岩石圈的弱化带或破裂带喷出地表, 地壳拉伸, 产生营口-佟二堡等深大断裂, 断裂活动导致盆地初始断裂, 并伴有强烈岩浆活动, 形成巨厚的火山岩层。(3) 拉张沉陷期(E_{3s} -Ed) - 热柱迅速上升: 中国北方大陆下的地幔亚热柱, 相对长期地固定在辽河地区, 控制了辽河裂谷的火山活动和裂谷演化, 断块、断陷差异陷落十分强烈, 形成新生代断陷构造层。(4) 拗陷发育阶段: 太平洋板块俯冲减弱, 俯冲带向东迁移, 上地幔物质由热膨胀转为冷却收缩, 本区脱离了地幔热柱的控制, 引起上部地壳整体下沉, 形成近于水平状态的沉积层。

早第三纪晚期太平洋板块西缘俯冲方向由 NNW 转变为 NWW; 同时, 印度板块向 NE 方向运动, 在这种情况下, 郯庐断裂从左旋活动向右旋活动。在它影响下新生代以来, 发生的 6 次构造运动伴随有强度不等的火山喷溢和喷发, 尤其是新生代早期最为发育, 早期(下第三系)以碱性玄武岩、拉斑玄武岩和粗面岩为主, 晚期(上第三系)以碱性玄武岩和辉绿岩为主, 与整个渤海湾盆地具有一定的可比性, 具有沿北东向主干断裂展布的特点。

综上所述认为, 东部凹陷之所以不同地区或不同期火成岩岩石类型不同, 原因可能有以下几点: (1) 岩浆房内岩浆成份有差异; (2) 断裂切入岩浆房内深度不同, 导致岩浆类型不同, 一般认为岩浆房内主要有三层岩浆, 底下较厚为玄武岩岩浆, 中间较薄过渡带为粗面岩岩浆, 上部较厚为花岗岩岩浆。那么断裂切入较深可形成玄武岩, 较浅则形成花岗岩, 只有当深度适中时, 才可形成粗面岩。(3) 受力机制或断裂性质不同, 导致岩浆上涌通道是否畅通, 进而导致结晶时间和程度不同, 所形成的岩石类型不同, 如在黄沙坨-欧利坨子地区, 受沙三段沉积中期界西断裂活动特征影响, 岩浆上涌速度慢, 结晶充分, 多形成粗面岩。

3 粗面岩形成机理分析

3.1 粗面质岩浆起源与演化分析

据目前资料分析认为, 东部凹陷主断裂活动具

有多期性,在沙三沉积时期,驾掌寺、界西等断裂强烈活动;其中驾掌寺断层生长指数一般为 2.0,最大生长指数为 4.0,活动速率最大达 120 m/Ma,最大古落差达 600 m;界西断层早期活动速率一般为 150 m/Ma,最大达 522 m/Ma,最大古落差为 2610 m,生长指数为 10。由于断裂活动强度大,岩浆沿断裂快速喷发,形成玄武岩。沙三中期这些断层的活动强度明显减弱,活动速率降低,导致岩浆喷溢速度降低,造就了岩浆能够长时间分异的外部条件。因此,对于整个渤海湾盆地唯独辽河地区出现粗面岩的问题可解释为:本区的粗面岩均发育在沙三中沉积时期,这是辽河裂谷扩张深陷期,构造运动相对平静-持续稳定沉降,尽管深大断裂仍在活动,但由于强度弱,岩浆上涌速度大幅度减慢,结晶分异作用加强,镁、铁矿物大量析出, SiO₂、钾、钠矿物含量增高,进而形成了粗面岩,而其它地区不具备这些条件。

传统的相平衡实验研究认为,粗面质岩石只能在高压环境下(>1.5 GPa),由下地壳物质部分熔融产生(造山带环境橄榄安粗岩系中的粗面质岩石),或在低压环境下(<1.0 GPa),由碱性或过渡性玄武质岩石直接分离结晶产生(裂谷或地幔柱环境的粗面岩),后者以较大的 Eu 负异常为特征。本区粗面岩产于辽河盆地早第三纪裂谷盆地之中,粗面岩中地壳物质加入很少,具较高的 Nb 值,较低的 Pb、Rb 及 Sr 含量;经历过显著的斜长石分离结晶作用,具强烈的 Eu, Sr 负异常;粗面岩的稀土元素特征表明它可由伴生玄武岩岩浆经历斜长石的分离结晶作用产生;未发现与下地壳部分熔融有关的花岗质岩石;这些特征均表明,辽河盆地早第三纪粗面岩不是下地壳物质高压下部分熔融的结果,而是玄武岩浆在低压(<1.0 GPa,相当于 32 km 的深度)环境下经历了橄榄石、辉石、斜长石和钾长石等大比例分离结晶作用的产物。此外,辉石和长石中的包裹体研究还发现,这种成因类型粗面岩浆分离结晶过程的压力极低(约为 100MPa),而温度较高(950~1200 °C),这也与中国东部早第三纪总体拉张的构造背景以及渤海湾盆地早第三纪较高的大地热流背景相一致。

3.2 粗面岩喷发环境

东部凹陷的火山岩喷发环境有水上和下水两种类型,粗面岩主要发育于沙三中段,属陆相水下火山喷发。主要依据有以下几点:

A. 粗面岩中的正长石、钠长石和歪长石斑晶具有中空骸晶,反映在水下喷发所特有的急速冷却特点;

B. 上、下均为湖相泥岩、砂岩组合,尤其是欧利坨子和黄沙坨地区,岩体上部均覆盖了湖相暗色

泥岩,湖相沉积岩明显上超于岩体表面,其上覆地层披盖现象明显;

C. 粗面岩均显示深灰、灰绿、褐绿等水下喷发所特有的还原色;

D. 绝大多数样品 Fe²⁺含量高于 Fe³⁺,证明喷发于还原环境中;

E. 分布范围局限,而局部厚度大,原始倾角较大,为陆相喷发所特有现象;

F. 化学成分上的高碱,亦显示为陆相喷发特征。

4 结论

根据上述对粗面质岩浆的起源与演化分析和喷发环境的分析可知,这种特有的水下喷发环境,构成了本区粗面岩结晶成岩的重要外部条件,导致其成岩过程散热慢,结晶充分,斑晶粗大、定向排列等,在未发生次生变化时,颜色多呈与主要造岩矿物相一致的灰色、浅灰色等,是造就本区粗面岩裂缝高度发育,成为良好油气储集体的重要因素之一。

参考文献:

- 陈义贤,陈文寄,周新华. 1997. 辽西及邻区中生代火山岩——年代学、地球化学和构造背景[M]. 北京:地震出版社.
- 蔡国刚,徐丽英. 2002. 火成岩储层识别与预测技术研究——以辽河盆地东部凹陷为例[R]. 辽宁盘锦:辽河油田公司研究院.
- 高知云,章濂澄. 1994. 辽河盆地老第三纪火山岩及其构造环境分析[J]. 西北大学学报, 24(4): 365-370.
- 李石,王彤. 1981. 火山岩[M]. 北京:地质出版社.
- 邱家骥. 1985. 岩石学[M]. 北京:地质出版社.
- 赵澄林,孟卫工,金春爽. 1999. 辽河盆地火山岩与油气[M]. 北京:石油工业出版社.

References:

- CHEN Yi-xian, CHEN Wen-ji, ZHOU Xin-hua. 1997. The West Liaoning and its adjacent areas of the Mesozoic volcanic — chronology, geochemistry and tectonic setting[M]. Beijing: Earthquake publishing(in Chinese).
- CAI Guo-gang, XU Li-ying. 2002. Igneous rock reservoir prediction techniques to identify and study of Liaohe basin in the East of depression[R]. Panjin, Liaoning: Research Institute of Liaohe Oil Company(in Chinese).
- GAO Zhi-yun, ZHANG Lian-cheng. 1994. Liaohe Basin in the Neogene and analysis of volcanic and tectonic setting[J]. Journal of Northwestern University, 24(4): 365-370(in Chinese).
- LI Shi, WANG Tong. 1981. Volcanic rock[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- QIU Jia-xiang. 1985. Magma lithology[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- ZHAO Cheng-lin, MENG Wei-gong, JIN Chun-shuang. 1999. LiaoHe basin volcanic rocks and hydrocarbon[M]. Beijing: Oil Industry Press(in Chinese).