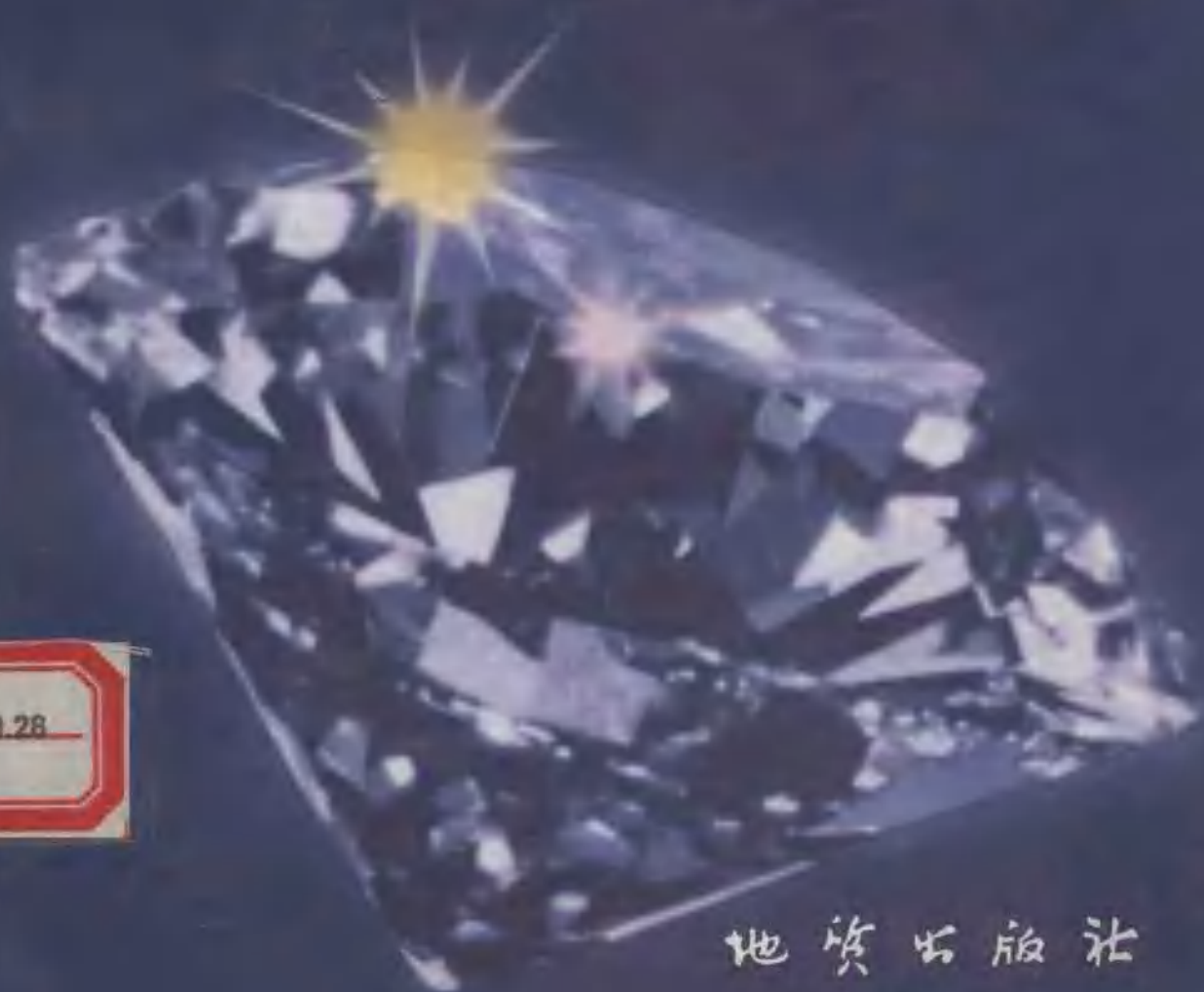


山东昌乐蓝宝石 矿物学及其改色

何明跃 郭涛 著



P619.28
H2

地质出版社

中国地质大学校友奖励基金资助

山东昌乐蓝宝石矿物学及其改色

何明跃 郭 涛 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书以我国最重要的宝石矿产之一——山东昌乐蓝宝石为研究对象,在研究昌乐蓝宝石矿的地质产状、矿物学特征及吸收光谱等特征的基础上,经过大量热处理改色实验,探索出山东蓝宝石有效的热处理改色工艺,并且对其改色效果进行了颜色指数的定量评价。本书的某些成果属首次公开发表,所介绍的热处理工艺具有可操作性及实用性,从事宝玉石生产、加工的企业若能应用,必能取得一定的经济效益。

本书可供从事宝石地质找矿及宝石学研究,尤其是从事宝石改善、鉴定等方面的技术、研究人员,以及有关院校宝石学专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

山东昌乐蓝宝石矿物学及其改色/何明跃,郭涛著. -北京:地质出版社,1999.8
ISBN 7-116-02742-4

I. 山… I. ①何…②郭… III. ①蓝宝石-矿物学-山东②蓝宝石-工艺美术-生产工艺,改色
IV. P578

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第00389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:叶丹

责任校对:关风云

*

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 1/16 印张:4.625 插页:1 字数:100000

1999年8月北京第一版·1999年8月北京第一次印刷

印数:1-1000册 定价:13.00元

ISBN 7-116-02742-4

P·1971

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

前 言

蓝宝石是世界上公认的四大名贵宝石之一，具有很高的美学价值和经济价值。宝石级刚玉家族中，除了红色的红宝石外，其它都可称为蓝宝石，只不过要加一些颜色名称而已。所以，Sapphire 一词不一定单指蓝色蓝宝石，还有黄色蓝宝石（Yellow Sapphire）、绿色蓝宝石（Green Sapphire）等。Sapphire 一词，意为蓝色，它来自希腊字 Sapphirus，波斯及犹太文中均有类似的字，而原始来源则未确定，可能是梵文。蓝宝石在 12 世纪的宗教中逐渐成为重要角色。当时，Bennes 主教特别赞赏蓝宝石，并将蓝宝石镶嵌于牧师的戒指上。蓝宝石是 9 月份的生日石，代表慈爱、诚实、德望。

蓝宝石主要产于变质大理岩、玄武岩或伟晶花岗岩中，也有一些产于冲积层和坡积层矿床中。下面对世界几个主要产地的蓝宝石特征进行简要介绍。

1. 缅甸蓝宝石

产于伟晶花岗岩、霞石刚玉岩和正长岩中，以冲积型矿床为主，产地靠近 Mogok，可有浅蓝—深蓝的各种颜色。高质量的缅甸蓝宝石以其纯正的蓝色或漂亮的紫蓝内反射色为特征，是目前市场上最重要的蓝宝石品种。1966 年发现的一粒最大的星光蓝宝石重约 12.6 kg (63000 ct)^①。

2. 泰国蓝宝石

主要产地有二，一是 Bang-Kha-Cha 近 Chantaburi 处；另一是 Boploi 近 Kanchanaburi 处。在曼谷西北 120 km 处，发育有含蓝宝石矿玄武岩，经风化作用冲积成矿，还伴生有石榴子石、红宝石、尖晶石等其它宝石，并有星光蓝宝石。宝石的颜色很多，一般呈深蓝色，略带紫色调的蓝色、灰蓝色三种颜色。常见发育完好的六边形色带，透明度低，颜色较深。

3. 斯里兰卡蓝宝石

主要产于斯里兰卡西南地区的 Ratnapura 冲积层中，它的母岩是白云岩化的石灰岩与伟晶片麻岩。在河床砾岩下 10 m 处有 30~60 cm 含矿层，当地土语称 Jllam。以总体颜色较浅、透明度高区别于其它任何产地蓝宝石。有各种不同的颜色，例如黄色、桔红色、绿色、粉红色、棕色、无色等。其中，无色者称牛奶石（Geuda）。最近，该国已开放牛奶石出口，经热处理后，牛奶石可改善为很漂亮的蓝宝石，目前在中国市场上销售量较大。

4. 印度喀什米尔蓝宝石

一般人认为它是品质最好的蓝宝石，是 1881 年一次雪崩中在 Zaskar 地区海拔 5000 m 的高山上发现的，其含矿围岩是富含钾的伟晶花岗岩，夹在结晶片岩中。该地所产的蓝宝石呈现所谓矢车菊蓝色，一直被誉为蓝宝石中的极品，在蓝色中泛出一丝紫光。其开采方法极原始，近年来产量十分稀少。现今市面上所谓的喀什米尔蓝宝石，大都为来自缅甸的蓝宝石。

① 1ct=0.2 g。

5. 澳大利亚蓝宝石

澳大利亚是世界上非常重要的蓝宝石产地,其宝石产出特点与中国山东、柬埔寨蓝宝石相似,在1870年发现于冲积层中,原生含矿围岩是玄武岩。蓝宝石都是从风化层中洗选出来的,一般颜色为透明度较低的深蓝色、黑蓝色,而淡颜色者都稍带一点绿色,也有黑色星光蓝宝石。其表面光泽略强,颜色不均匀,六边形色带十分发育,平行于底面或柱面。与泰国蓝宝石相比,澳大利亚蓝宝石颜色更深;与中国山东蓝宝石相比,澳大利亚蓝宝石颜色中缺少紫色色调,但透明度及表面光泽略高。

6. 美国蒙大拿州的蓝宝石

1894年发现,含矿围岩为安山岩脉,蓝宝石产于岩脉中,也有些产在风化层中。其颜色绝大部分为中等深浅的蓝色,少数为淡紫色,颜色分布均匀,很少出现色带,局部可见三角形生长带。

7. 柬埔寨拜林地区的蓝宝石

含矿围岩为碱性玄武岩,宝石呈明亮且纯正的蓝色,个别略带紫色,其内反射色为略浅的蓝色,样品表面具亮玻璃光泽,明显区别于其它产地的蓝宝石。该种蓝宝石近几年在国际上十分走俏。

在世界其它地区,如肯尼亚、坦桑尼亚、罗德西亚、马拉维、巴西、挪威、芬兰、原苏联、罗马尼亚等地都曾发现有蓝宝石。

70年代末至80年代初,在中国新生代碱性橄榄玄武岩及超基性岩体内的刚玉斜长岩中发现了蓝宝石,具体产地有海南省蓬莱文昌、江苏省练山、福建省明溪、山东省潍坊、黑龙江省穆林县及青海省西部。我国对蓝宝石的研究是最近才开展起来的。许多学者虽对蓝宝石进行了一些研究,但都侧重于矿床学和一般矿物学的探讨。

与我国其它产地蓝宝石相比,目前成规模开采的主要是山东潍坊地区的昌乐县五图镇,分布面积广(约300 km²),粒度较大,颜色很深,在自然光照射下通常呈现蓝黑色。

虽然山东昌乐地区产出的蓝宝石属于国内档次较高的宝石品种,但由于该蓝宝石颜色深、透明度低,磨制出的戒面反“火”较差,甚至不反“火”,从而大大影响了其观赏及经济价值。与世界著名产地的优质蓝宝石相比,山东蓝宝石要逊色许多。因此,近年来许多从事宝石行业的企业、公司、研究所及高等院校等单位对山东蓝宝石进行了大量的改色研究工作。由于各单位相互之间对工艺技术封锁和保密,缺乏必要的交流,重复性试验比较多。因此,我国对山东蓝宝石改色研究的整体水平还比较低,研究程度不深,进展也比较缓慢。从目前市场上出售的改色蓝宝石来看,颜色虽有一定程度变浅,但色调不理想,不少改色蓝宝石发蓝灰色或带绿色色调,这就影响了蓝宝石所应具有的价值。

由中国非金属矿工业总公司北京宝石研究培训中心承担的“宝石改色的研究”项目中的“山东昌乐蓝宝石改色”子项目,委托中国地质大学(北京)承担,属“八五”国家科技攻关85-14项目。该项目以山东昌乐深蓝色蓝宝石为研究对象,在详细研究地质成因、产状、颜色成因、宝石矿物学及谱学特征的基础上,进行热处理改色工艺及扩散改色工艺研究,确定各种条件(温度、压力、时间等)对改色工艺的影响,制订出蓝宝石的最佳改色工艺及与其相适应的技术设备,力争使改色后的蓝宝石的各项颜色指数达到或接近专题合同要求的指标。1995年10月,由中国非金属矿工业总公司组织专家通过评审,评审结论为:

1. 该专题基本上按合同要求全面完成了科研工作;

2. 在改色工艺设计方面,采用开放式炉子形成的局部高压氧化气氛及多循环扩散工艺研究,达到了国内领先水平,在国际上也达到了先进水平;

3. 用国际先进的测试技术建立并提供的宝石理论模式,具有国内领先、国际先进水平;

4. 希望该专题组继续努力,深入研究,以取得经济上和科研上的再进步,取得更大成果。

在本项研究过程中,得到了国家科委及中国非金属矿工业总公司等各级领导的重视和关怀,得到了中国地质大学、北京大学地质系、北京钢铁研究总院第九研究室、北京理工大学颜色科学与工程国家专业实验室、武汉大学穆斯堡尔谱室等单位的大力帮助和积极协作。中国非金属矿工业总公司北京宝石研究培训中心罗庆荣高级工程师,辛海、李三华、郑方同志做了很多野外及室内实验工作,还得到了沈宝林总工程师、王濮教授、邵洁涟教授、颜慰萱教授、赵永魁总工艺师等宝石界专家的热心指导,在此向他们表示衷心的感谢!

本书的出版得到了中国地质大学校友奖励基金的部分资助,并荣获 1997 年度中国地质大学青年教师出版基金奖。

目 录

前 言

第一章 地质概况	(1)
一、区域地质特征	(1)
二、矿区地质特征	(4)
三、蓝宝石成因简论	(9)
第二章 蓝宝石的矿物学	(11)
一、形态与物理性质	(11)
二、蓝宝石的晶体化学特征	(14)
三、蓝宝石的X射线粉晶衍射分析	(18)
四、蓝宝石的红外光谱分析	(19)
五、蓝宝石穆斯堡尔谱分析	(19)
六、蓝宝石中包裹体的研究	(23)
第三章 蓝宝石的光学吸收谱	(26)
一、晶体场理论中一些有关概念	(26)
二、近紫外-可见光吸收谱特征	(28)
三、吸收带成因归属	(29)
四、热处理后吸收光谱的变化	(36)
五、小结	(38)
第四章 蓝宝石改色工艺实验	(40)
一、实验设备	(40)
二、实验样品的制备	(40)
三、改色实验	(41)
四、两种较好的山东蓝宝石原石热处理(及扩散处理)改色工艺及一种较好的山东蓝宝石戒面成品热处理(及扩散处理)改色工艺	(41)
五、关于扩散工艺	(45)
第五章 蓝宝石颜色指数测量及改色效果评价	(47)
一、局部增压热处理改色工艺评价	(47)
二、多循环热处理改色工艺评价	(53)
三、蓝宝石戒面热处理改色工艺评价	(54)
四、结论	(58)
结 论	(59)
主要参考文献	(61)
中文摘要	(63)
英文摘要	(65)

第一章 地质概况

一、区域地质特征

(一) 地层

昌乐县位于山东地台中部,其地层分布及岩性特征见地质图和柱状剖面图(图1-1,图1-2)^①。

(二) 构造

在大地构造上,昌乐属鲁西台背斜泰沂降落之昌乐凹陷。东侧近邻为沂沐断裂带的郯部—葛沟断裂,其走向北北东,倾向南东,倾角 $70^{\circ}\sim 90^{\circ}$,延伸约160 km,属新华夏系构造带。此断裂在新生代的活化与本区第三纪玄武岩的多次喷发密切相关。

(三) 火山岩

昌乐地区新生代基性、超基性火山活动强烈,多期多旋回喷发的玄武岩遍布全国。根据喷发时代的不同,分为三期:牛山期, $14.48\text{ Ma}\pm 0.79\text{ Ma}$;山旺期, $9.97\text{ Ma}\pm 0.91\text{ Ma}$;尧山期, $4.34\text{ Ma}\pm 0.19\text{ Ma}$ (邹进福等,1990)。区内以牛山期和尧山期玄武岩为主,山旺期玄武岩仅见于荆山、李家河、南音三处。因此,下面仅对牛山期和尧山期玄武岩特征及喷发类型进行简单描述。

1. 火山岩基本特征

尧山期玄武岩 零星分布于昌临地区,是火山锥顶的主要组成部分。其产出特征为厚层水平状、近水平状,柱状节理发育。该玄武岩为灰黑色,风化面为土黄色;斑状结构,致密块状构造,或少量杏仁构造,杏仁体主要成分为白色方解石。岩石镜下特征:斑状结构,基质为拉玄结构。斑晶主要成分为橄榄石($15\%\pm$),自形,轻微蚀变。基质主要成分是基性斜长石、辉石和玻璃质、橄榄石等。矿物含量:橄榄石 $5\%\sim 10\%$,辉石 $20\%\sim 25\%$,基性斜长石 20% ,玻璃质 30% ,其它 $3\%\sim 5\%$ 。山东省地质七队对该期玄武岩取两个人工重砂样(重10 kg),未发现刚玉晶体^②。

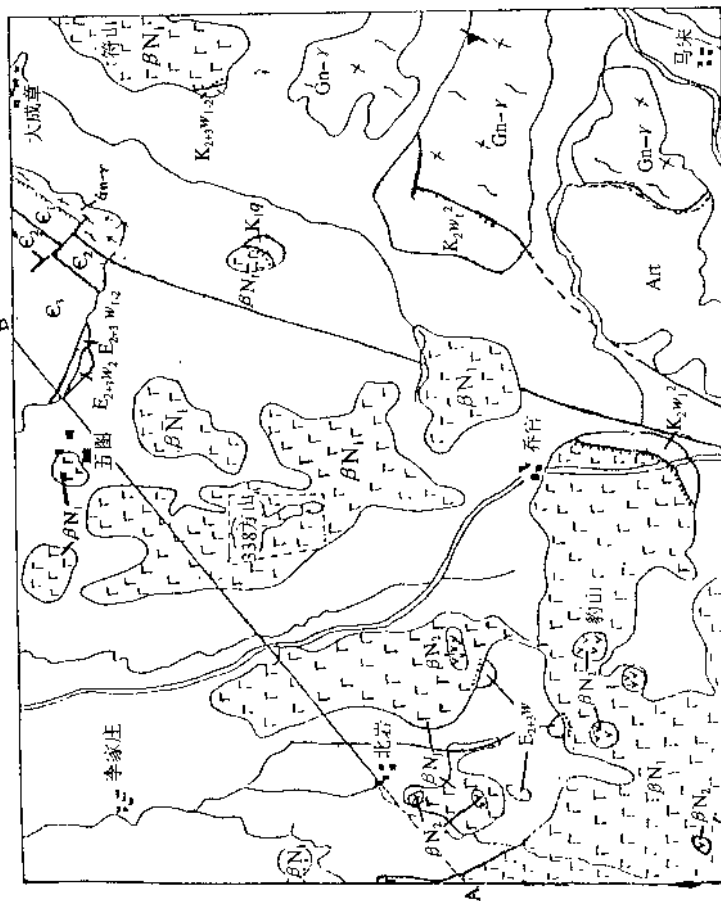
牛山期玄武岩 分布广泛,喷发旋回较多。在昌临地区该期玄武岩常构成低缓的熔岩台地或盾状火山锥、马蹄形破火山口;厚层近水平状产出,节理发育;斑状结构,气孔、杏仁状构造。气孔、杏仁体大小不一,多呈不规则状。杏仁体主要成分是方解石、绿泥石和沸石类矿物。岩石多发生较强烈的绿泥石化蚀变。其镜下特征与尧山期玄武岩相似,但橄榄石斑晶多已绿泥石化,常见呈橄榄石假像的绿泥石。此外,玻璃质较少,长石含量偏高。山东省地质七队在距破火山口较近的岩石中取5 kg人工重砂样品,选获三颗刚玉晶体^②。

2. 火山喷发类型

① 昌乐县方山玄武岩矿地质勘探报告,1958。

② 山东省地质七队,山东昌乐县北岩蓝宝石矿详查地质报告,1989。

比例尺



A-B剖面

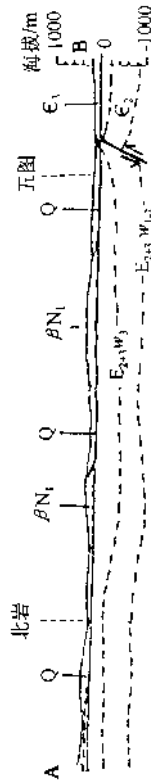
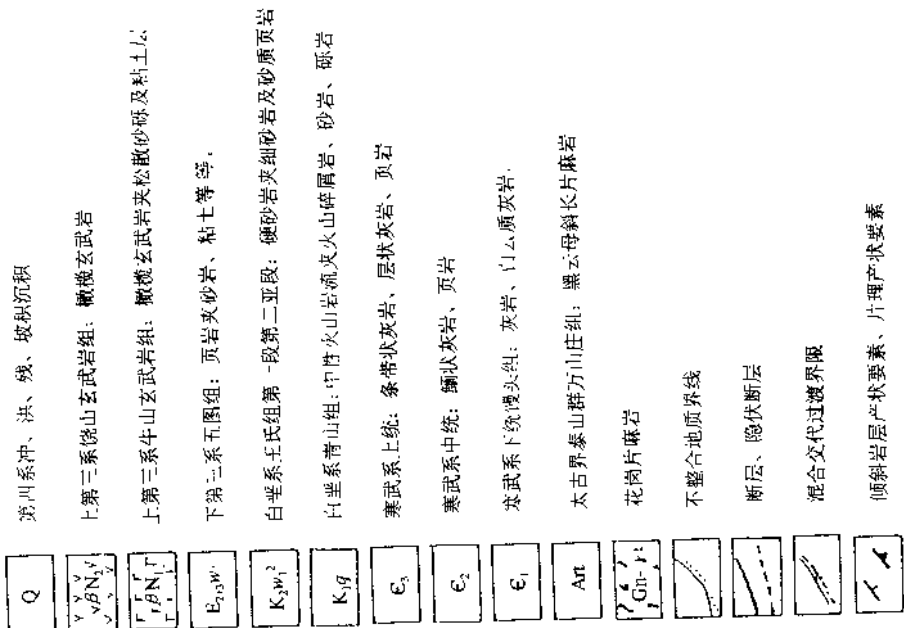


图 1-1 昌乐五图—北岩—马宋地质图
(据昌乐方山玄武岩矿地质勘探报告, 1958)

图例



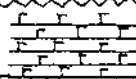
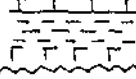
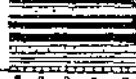
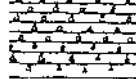
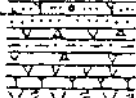
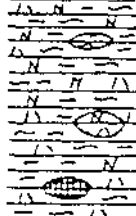
界	系	统	群	组	符号	柱状图	厚度 m	岩性
新生界	第四系				Q		2~40	冲积、残坡积、洪积 粗细砂、砂质粘土、粘土、粉砂夹砾石透镜体
	新第三系			尧山组	N _{2y}		178	碱性玄武岩、橄辉玄武岩
				山旺组	N _s		450	黄色松散砂砾岩,底部相变为硅藻土、凝灰质砂岩、页岩、粘土岩 产丰富的植物、食肉类、蛙类、鱼类化石
				牛山组	N _{1n}		200	橄辉玄武岩夹黄绿色粉砂质粘土,松散砂砾层,为蓝宝石主要含矿层
	老第三系			五图组	E _{2-3w3}		745	灰绿色页岩,黑色油页岩夹薄层砂岩、泥灰岩和数层柴煤
					E _{2-3w1-2}		1441	紫色砾岩,底部为角砾岩
中生界	白垩系	上统		王氏组	K _{1w1} ²		485	暗紫色细—粗粒硬砂岩夹薄层—中厚层状细砂岩和砂质页岩
		下统		青山组	K _{1q}		1200	下部紫色、褐黄色粗面岩,安山岩夹凝灰岩,安山角砾岩;中部为厚层安山角砾岩夹红色粉砂质页岩、泥质粉砂岩;上部为紫红色粉砂岩与凝灰质砾岩互层夹安山岩
古生界	寒武系	上统			C ₃		349 423	巨厚层状灰黑色条带状灰岩,层状灰岩夹竹叶状灰岩,页岩,黄绿色页岩夹灰岩透镜体。产 <i>Tsinania</i> sp., <i>Changshania</i> sp. 等
		中统			C ₂		332	厚层状鲕状灰岩,灰岩夹黄绿色页岩,薄层状灰岩透镜体,暗紫色云母页岩,产 <i>Damocella</i> sp. 等
		下统		馒头组	C ₁		70 554	底部为中—粗粒长英质砂岩,下部为灰黄色砂质泥灰岩灰褐色白云质灰岩、泥灰岩夹杂色砂质页岩。中部为灰岩灰色含砂质条带灰岩。上部为薄—厚层状灰岩、白云质灰岩
太古宇			泰山群	万山庄组	Arts		4000	下部为黑云母角闪石斜长石片麻岩夹黑云母片岩,斜长角闪片岩交代残余体,局部夹含石英岩小透镜体,上部为黑云母斜长石片麻岩夹角闪石质片麻岩及斜长角闪片岩交代残余体

图 1-2 昌乐地区地层柱状剖面图

按火山通道形状可将火山喷发类型分为熔透式、裂隙式和中心式。纵观昌临地区火山岩特征和分布,可归纳为:①分布面积近千平方公里,与沂沐断裂带关系密切;②主要为喷溢相的熔岩,而爆发相的火山碎屑岩少见,产状平缓,常构成熔岩台地;③火山锥呈近南北向串珠状或链状分布。因此,本区玄武岩的喷发类型主要为裂隙式喷发。

(四) 地貌

昌临地区主要以火山作用形成的火山地貌为格局。因长期剥蚀,山坡往往形成坡积裙。在火山锥之间流动的火山熔岩相互联接,形成平坦的熔岩台地,其上发育河谷地貌。纵观本区,呈南高北低之势,南部以火山锥为主,北部以熔岩台地及河谷地貌为主。

1. 火山剥蚀地形

指火山作用和剥蚀作用所形成的丘陵地貌,是区内地貌的基本成因类型。海拔高度小于 500 m,相对高差一般在 100~150 m 左右。据形态特征可分为盾状火山和锥状火山。

盾状火山 是昌乐主要火山地貌。表面起伏形态似盾状,平面呈长圆状、马蹄状或不规则状,底部较宽,坡度小,由流动的玄武岩质熔岩组成。

锥状火山 表面起伏形态似钟状或穹状,平面呈圆形,其底与高之比约为 2~3。

2. 剥蚀堆积地形

主要为火山锥锥坡及熔岩台缓坡堆积形成的坡积裙。据其表面形态特征及产出的部位,可分为坡积斜坡和坡积平台。

坡积斜坡 位于锥坡上半部,微向河床或洼地地方向倾斜,坡度为 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$,常被后期冲沟切割。

坡积平台 位于坡积脚地带,多被现代冲沟切割,切割深度常大于 5 m;向河床方向倾斜,坡度小于 10° 。后缘与坡积斜坡逐渐过渡,前缘逐渐消失,局部以明显的陡坎为界。

蓝宝石主要在坡积斜坡和坡积平台过渡带富集。

二、矿区地质特征

方山位于昌乐县城东南方约 12 km 处,地形比高约 120~160 m,山体由新生代玄武岩及其风化产物组成。由于长期风化剥蚀,山坡形成坡积裙,玄武岩仅在距山顶几十米内露头较好,山坡中下部多被残、坡积物及第四系覆盖。蓝宝石原生矿产于距山顶 30 m 附近的玄武岩中,而蓝宝石砂矿则多产于方山附近的洪、冲积物中。

(一) 方山玄武岩及含矿层特征

方山玄武岩产状平缓,层理清晰。层理之间有烘烤现象,但未发现明显的风化剥蚀现象。节理发育,破碎现象明显。根据岩石内部成分和结构特征,可将玄武岩由下到上初步分为八层(见信手剖面图 1-3)。

第一层:气孔状橄榄玄武岩。深紫粉色,厚度约 12 m,常成层出现,气孔较发育,内有钙质充填。矿物成分主要有橄榄石、辉石、长石和不透明矿物。

第二层:致密橄榄玄武岩。灰黑色,厚约 15 m,块状构造,偶见气孔。矿物成分主要有长石、橄榄石、普通辉石和不透明矿物。

第三层:气孔状玄武岩。灰黑色,厚度约 2~3 m,气孔状构造。矿物成分主要有长石、辉石、橄榄石、不透明矿物。

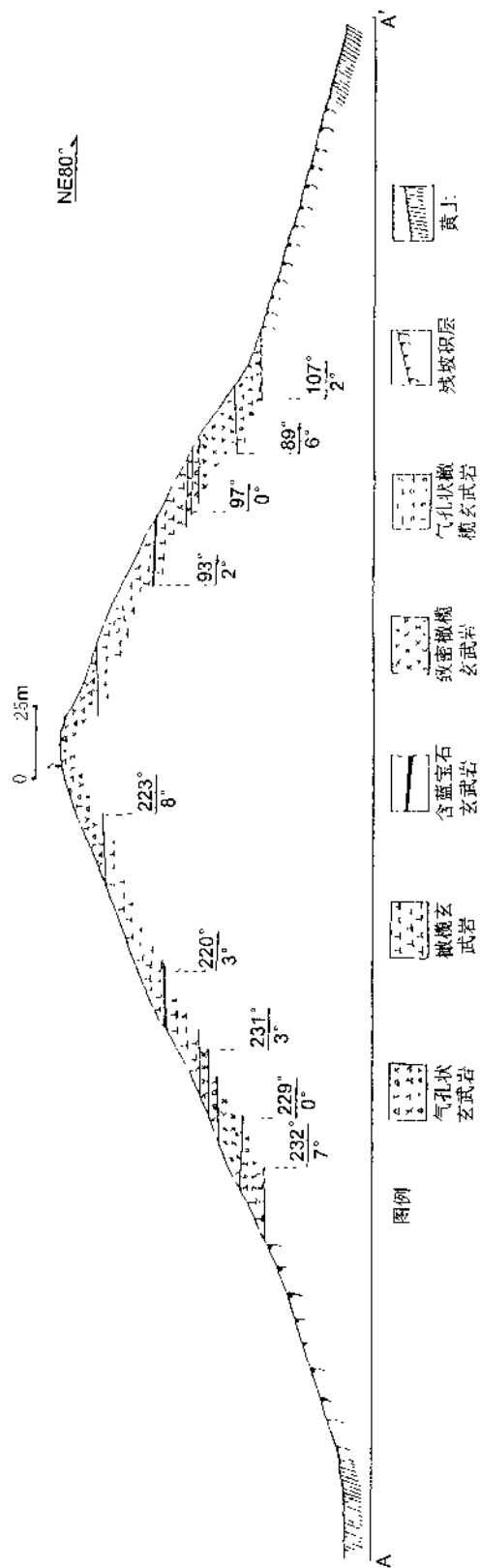


图 1-3 山东省昌乐县方山玄武岩 A—A' 信手剖面图

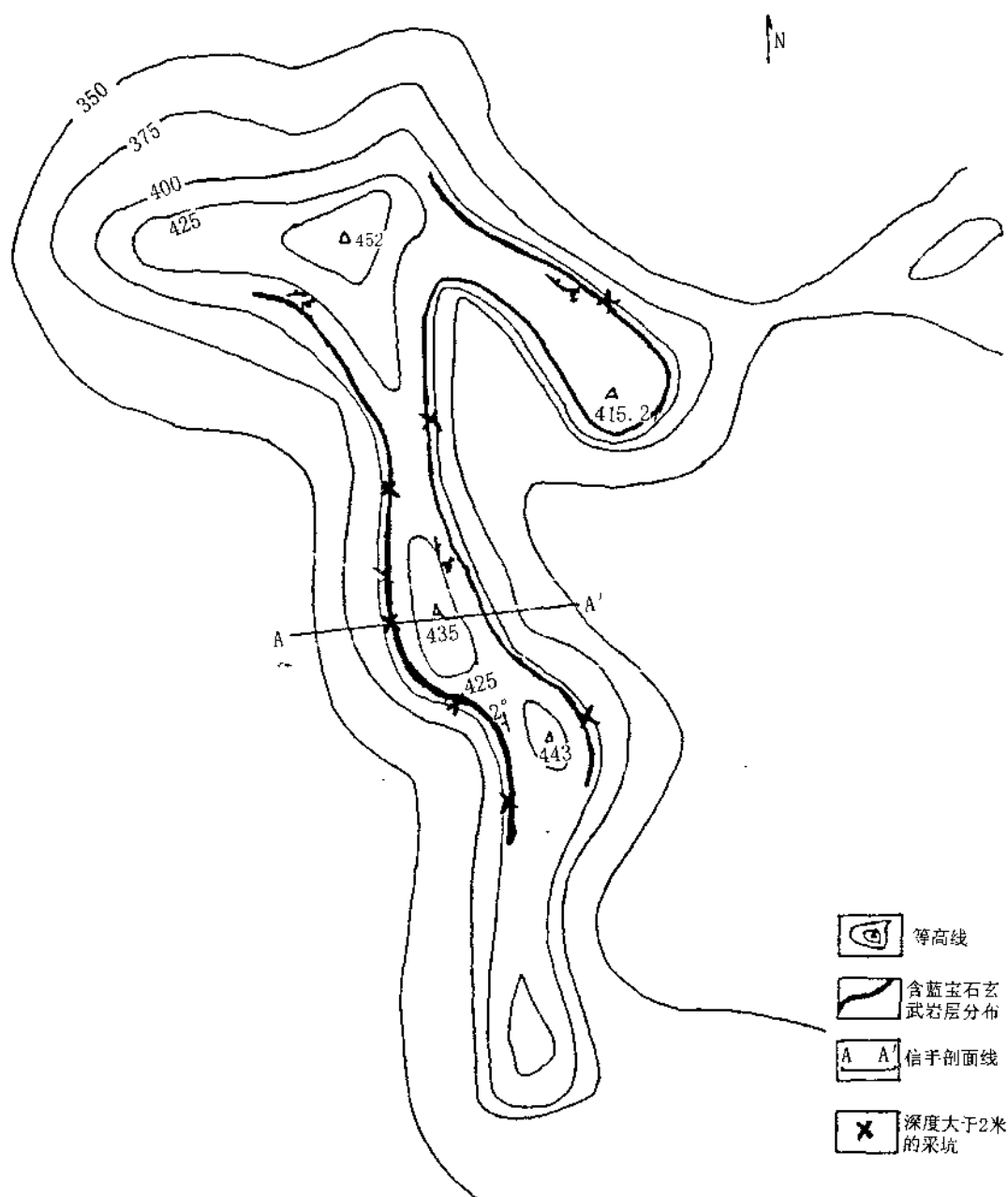


图 1-4 方山含蓝宝石玄武岩层分布草图

(据昌乐县方山玄武岩矿地质勘探报告, 1958)

第四层：致密橄榄玄武岩。紫黑色，厚约 3 m，致密块状构造，偶见气孔，矿物成分同第二层。

第五层：橄榄玄武岩。紫灰色，厚约 12 m。常成层出现，气孔、杏仁体少见。主要矿

物成分为橄榄石、长石、普通辉石、不透明矿物。

第六层：伊丁石化橄榄玄武岩。紫黑—黄绿色，厚约1~2.5 m，有大量强烈风化的黄绿色橄榄岩、二辉橄榄岩等幔源捕虏体，致密块状构造，可见气孔、杏仁构造。矿物成分主要为伊丁石化橄榄石、斜长石、辉石、不透明矿物等。由于风化十分强烈，岩石疏松。

第七层：橄榄玄武岩。紫灰色，厚约15 m。岩石特征及主要矿物成分同第五层。

第八层：气孔状玄武岩。灰黑色，厚约12 m。岩石特征及主要矿物成分同第三层。

蓝宝石主要产于第六层玄武岩中。此层玄武岩的分布见图1-4。此层玄武岩的最大特点是呈黄绿色，含大量幔源捕虏体及各种矿物巨晶。捕虏体主要为二辉橄榄岩、橄榄岩，约占玄武岩总体积的15%左右。风化强烈，结构松散。矿物巨晶常为刚玉和普通辉石。辉石巨晶粒度一般为0.5~1.5 cm，黑色，解理不明显，常呈贝壳状断口。曾广策等（池际尚等，1988）对海南碱性玄武岩中巨晶辉石的形成条件进行了系统的研究，认为其晶出的温压条件为1344℃，1.9 GPa，相当于深60 km的上地幔。王艺芬等（1989）对苏鲁晚新生代玄武岩中辉石巨晶进行成分、成因分析后，认为其形成条件为1353~1436℃，1.9~3.2 GPa，大致相当于上地幔60~100 km处。刚玉巨晶特征及成因将在后面详叙。对该玄武岩层中深1~80 m的矿坑（洞）进行观察，发现该岩层厚度不均，靠近山体核部，厚度由1.5~2.0减至0.5~0.8 m，同时岩层倾角也增大，岩层位置也渐向上移（图1-5）。

岩石镜下特征：斑状结构，基质为填间或填隙结构。斑晶为橄榄石（14%）、斜长石（1%），偶见富钛

普通辉石。橄榄石斑晶约0.3~0.8 mm，无色，正高突起，糙面显著，（010）解理不发育，常见裂纹，最高干涉色二级蓝，二轴（-），2V近于90°，为贵橄榄石。所有橄榄石都发生了伊丁石化蚀变，有的全部蚀变为具橄榄石假像的伊丁石。这种假像伊丁石约占岩石中矿物总含量的5%。伊丁石呈褐红色，多色性不明显，高正突起，干涉色为其自色所掩盖，平行消光；斜长石斑晶约0.2 mm，An=50~70，为拉或培长石；辉石斑晶0.15 mm，浅褐—淡紫色调，2V=48°~62°， $c \wedge n_x = 40^\circ \sim 54^\circ$ ，为富钛普通辉石。基质成分主要为斜长石（20%）、富钛普通辉石（35%）、伊丁石化橄榄石（5%）、碱性长石（8%）、方沸石（5%）、火山玻璃（2%）、不透明铁矿物（10%）。斜长石微晶约0.15×0.05 mm，用⊥（010）最大消光角法测得 $np' \wedge (010) = 32^\circ$ ，An=46，为中长石；富钛普通辉石半自形—自形，0.02×0.04 mm，浅褐—浅紫色，弱多色性；碱性长石呈板状或不规则状产出，波状消光，可见简单双晶，种属为歪长石；方沸石多呈不规则状，可见解理，均质性，负高突起；不透明矿物多为磁铁矿，自形—它形；火山玻璃无色透明，分布广泛。

此外，蓝宝石还产于第七层，但含量很少，仅有岩层底部有所发现。这一层中的蓝宝石可能是早期残留在岩浆房和岩浆通道中而被携至地表的。

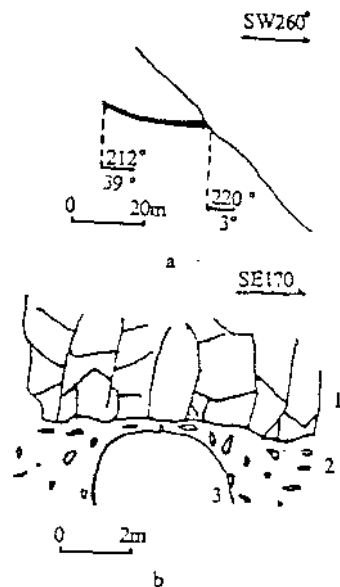


图1-5 昌乐蓝宝石采洞示意图

a—采洞纵剖面；b—采洞横剖面

1—第七层玄武岩；2—含蓝宝石玄武岩；3—采洞

在镜下对第五、六、七层玄武岩进行对比,发现矿物成分、结构特征、主要矿物含量几乎相同,只是风化程度上有较大的差别。第六层风化强烈,且主要以伊丁石化为主,而第五、七层风化不强,以绿泥石化为主。邹进福(1990)对方山玄武岩进行化学成分分析(表 1-1),其岩石化学成分、微量元素特征等都非常相似。总地看来,含蓝宝石玄武岩层最大特征是,除含巨晶矿物外,还含有大量幔源捕虏体。

表 1-1 碱性橄榄玄武岩岩石化学成分 (wt/%)

化学 成分 样品 性质	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O	lg	总量
含蓝宝石	44.34	2.80	13.20	4.42	8.40	9.58	0.17	9.53	4.04	1.08	0.54	1.06	1.18	100.34
	43.21	2.71	14.20	5.09	7.30	9.32	0.14	9.53	3.44	0.82	0.54	1.07	2.17	99.54
	43.54	2.78	14.35	4.93	7.40	9.32	0.15	9.53	3.36	0.90	0.50	0.96	2.17	99.89
	42.88	3.13	13.49	6.48	6.45	9.16	0.14	9.31	3.96	0.72	0.54	1.27	2.34	99.87
	43.73	2.99	13.08	5.24	7.43	8.99	0.15	9.98	3.80	0.82	0.48	1.03	1.88	99.60
	44.01	3.03	13.06	5.00	7.65	9.39	0.16	9.45	4.28	0.82	0.45	0.99	1.86	100.15
不含蓝宝石	46.85	2.44	13.33	6.92	6.98	8.05	0.26	8.75	3.28	1.24	0.36	0.47	0.34	99.70
	44.84	2.58	12.91	4.68	7.60	11.29	0.16	9.40	3.48	0.94	0.45	0.6	0.50	99.70
	43.88	2.71	13.18	2.96	8.80	11.38	0.21	9.59	2.76	1.86	0.74	0.74	0.91	99.59
	42.75	2.71	12.64	3.89	8.85	11.52	0.19	9.89	3.28	1.60	0.49	0.22	0.95	99.71
	43.28	2.21	12.84	3.13	9.03	11.77	0.25	9.65	3.18	1.88	0.38	0.19	1.68	99.78

据邹进福等, 1990。

金隆裕等(1982)对方山碱性橄榄玄武岩进行了 K-Ar 同位素年代测定,其喷出年代为 (16.40±0.31) Ma, 应属牛山期, 这一结论与省七队的重砂分析结果吻合得很好。

(二) 坡积、江冲积含矿层

由于蓝宝石物理化学性质稳定, 易形成残坡积、洪冲积砂矿, 这种产状在方山附近十分常见。蓝宝石经过自然分选, 其质量较原生矿更好, 经济价值更高。

含矿层主要是坡积及冲、洪积层中的粗碎屑岩层。据统计, 蓝刚玉在冲积层的最高品位是 56.211 ct/m³^①, 洪积层 105.693 ct/m³, 坡积层 4.99 ct/m³, 残积层目前尚未发现^②。蓝宝石在冲积层中最高品位为 10.005 ct/m³, 洪积层 16.748 ct/m³, 坡积层尚未发现。分别做重矿物分析, 发现矿物组合基本相同, 只在含量上有明显区别, 即赤铁矿、铁尖晶石、铁铝榴石经搬运含量渐减, 锆石和辉石经搬运富集。蓝宝石在洪、冲积层中含量较高也是运移富集的结果。

对不同碎屑物质成分进行对比, 发现冲积、洪积层中碎屑成分相对复杂, 有玄武岩、钙质结核、砂岩、脉石英、尖晶石、辉石及长石等, 而坡积、残坡积层几乎只有玄武岩一种, 且碎屑粒度变化很大。

冲积层砂砾含量>90%, 洪积层>80%, 残、坡积层约 60%。蓝宝石主要在粗碎屑物中富集, 因此在洪、冲积物中便于寻找。

① 1ct=0.2g。

② 山东省地质七队, 山东省昌乐县北岩蓝宝石矿普查地质报告。

三、蓝宝石成因简论

蓝宝石的化学成分是 Al_2O_3 。铝在地壳中的克拉克值为 7.51%，属高含量的亲氧亲石元素，大量集中于地球外层。地壳中 Al_2O_3 是仅次于 SiO_2 分布最广的氧化物，但自然界中结晶的 Al_2O_3 却为数不多，这是因为 Al_2O_3 对 SiO_2 的化学亲和力很大，易于形成铝硅酸盐。因此，只有在高温富铝贫硅的特殊条件下才能形成结晶体，或结晶体才能保存。

在碱性玄武岩中，蓝宝石是作为巨晶矿物与普通辉石、锆石等共同产出的。因此，有人就认为其属于同时晶出，可以用辉石的形成条件近似地代表蓝宝石的形成条件，即与玄武岩同源，是岩浆早期高压熔离的矿物相，形成时的温压条件均很高，大致相当于上地幔 60~100 km 深度（池际尚等，1988；王艺芬等，1989）。但是，蓝宝石和辉石是否属共生关系，并无确切的证据，仅由其经常同时产出不能得出形成条件相近这一结论。

昌乐蓝宝石与玄武岩的接触关系截然明显。在蓝宝石晶体外缘常有一层厚约 0.01~0.03 mm 的黑色不透明壳，用放大镜（10×）可初步将壳分为两大类：①熔蚀壳，有明显的熔蚀坑；②熔蚀“微晶”壳，壳上有大量不规则排布的微小似微晶物质。

探针分析表明，熔蚀壳成分为 Al_2O_3 ，熔蚀“微晶”壳上的“基质”和“斑晶”成分仍为 Al_2O_3 （表 1-2）。用扫描电镜对熔蚀“微晶”壳进行观察，得知叶片状物质并非细小晶体，其熔蚀现象也十分明显。

表 1-2 蓝宝石表面壳质成分

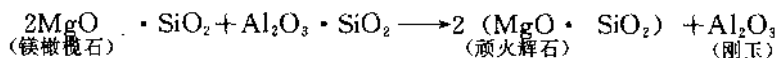
样品 成分 wt%/%	S ₁						S ₂ (熔壳)	江苏六合样品 ^①
	“微晶”				“基质”			
SiO_2	0.151	0.312	0.066	0.258	0.038	0.091	0.022	0.06
TiO_2	0.032	0.101	0.000	0.000	0.000	0.037	0.000	0.05
Al_2O_3	96.427	98.096	98.905	99.917	95.901	95.605	97.929	64.97
FeO	1.221	1.108	1.151	1.331	1.110	1.121	1.540	19.89
MnO	0.043	0.000	0.008	0.000	0.051	0.000	0.034	0.21
MgO	0.044	0.000	0.009	0.033	0.000	0.047	0.009	16.35
CaO	0.057	0.000	0.015	0.075	0.000	0.132	0.045	0.01
Na_2O	0.099	0.099	0.031	0.088	0.049	0.327	0.056	0.01
K_2O	0.027	0.000	0.007	0.095	0.012	0.321	0.017	—
P_2O_5	0.000	0.023	0.000	0.000	0.058	0.000	0.000	—
合计	98.102	99.741	100.192	101.797	97.219	97.681	99.651	101.55

测试单位：中国地质大学（武汉）测试中心。

①据韩俊杰，1988。

蓝宝石的产出特征：①薄层碱性玄武岩；②玄武岩中含有大量幔源捕虏体；③与上、下层不含蓝宝石玄武岩岩石学、岩石化学特征等极为相似；④与深大断裂相伴生；⑤山东省局曾观察到幔源捕虏体中产有蓝宝石晶体。可以推断，蓝宝石巨晶并非由玄武岩浆所析离

晶出，而是形成于上地幔，由于构造和岩浆活动，被碱性玄武岩浆捕获而带出地表。在捕获及上升运移过程中，温压条件改变使蓝宝石发生熔蚀，但由于新的体系富铝贫硅，因此熔蚀作用较轻微，蓝宝石晶体易于保存。同时，橄榄玄武岩浆中的橄榄石与氧化硅铝发生反应（苏良赫，1990）：



形成细小 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 晶体附着在幔源蓝宝石晶体表面，形成熔蚀“微晶”壳的雏形。上述反应，用热力学数据加以验证，反应自由能为 -6.052 J/mol ，表明在岩浆的温压条件下，反应向右进行。岩浆继续演化和运移，温压条件不断改变，蓝宝石晶体在低压下不稳定，再次发生熔蚀，大部分蓝宝石表面的微晶刚玉全部熔掉，仅部分蓝宝石表面还残留有早期“微晶”壳的某些特征。

韩俊杰对江苏六合蓝宝石壳进行了分析，发现有的壳化学式为 $3\text{MgAl}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{FeAl}_2\text{O}_3$ （镁铁尖晶石），是岩浆喷溢过程中，蓝宝石晶体与周边富 Fe、Mg 离子的岩浆发生化学反应的反应边。由于采集和测试样品有限，在昌乐蓝宝石中暂未发现这种反应边，但可以推测，这种反应边可能是存在的。

蓝宝石是幔源成因的观点，可以很好地解释昌乐蓝宝石的各种产状特征，同时也使人们认识到，岩石学特征及岩石化学特征不能成为蓝宝石母岩的判别依据，蓝宝石的形成既有必然性，也有偶然性，避免了找矿的盲目性。