

紫色玉髓的颜色成因初探

孟丽娟¹, 王时麒^{1,2}, 陈振宇³

(1. 北大宝石鉴定中心, 北京 100871; 2. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871;
3. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要: 以紫色玉髓样品为主要研究对象, 利用偏光显微镜、背散射电子图像、激光剥蚀-等离子体质谱、紫外-可见-近红外分光光度计等测试手段, 对其进行了图像、成分和光谱的分析, 对比其他学者的研究成果, 对紫色玉髓的颜色成因进行了探讨。研究认为, 3块紫色玉髓样品的紫色成因都可以用色心进行解释, 只是色心的形成过程各有不同。样品中微量杂质元素和水的存在, 对于颜色的形成也有一定的影响。

关键词: 紫色玉髓; 颜色成因; 色心; 微量元素

中图分类号: P619.28⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)S1-0078-07

A preliminary study of color-forming mechanism of purple chalcedony

MENG Li-juan¹, WANG Shi-qi^{1,2} and CHEN Zhen-yu³

(1. Gem Appraisal Center of Peking University, Beijing 100871, China; 2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: This paper focuses on three purple chalcedony samples. In order to explore the color-forming mechanism of these samples, the authors used such means as polarizing microscope, EPMA, LA-ICP-MS, and UV-Vis spectroscopy. The images and the trace element analysis results were compared with previous studies. It is very probable that the color center caused the pattern for color formation. The formation of purple color was also influenced by trace elements and water in the samples.

Key words: purple chalcedony; color formation; color center; trace elements

紫色玉髓是石英质宝石的一个亚种。对于石英质玉石颜色的成因, 尤其是玉髓的颜色成因, 目前多集中在红玉髓、黄玉髓、绿玉髓、蓝玉髓等的研究上(陈全莉等, 2011)。紫色玉髓, 以其高贵的颜色而广受消费者的青睐。对于紫色玉髓颜色成因的研究, 对其市场推广和优化处理方法等方面的研究将产生重要的影响。

对各类宝玉石颜色成因的研究结果认为, 宝石中含有如 Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu 等过渡金属元素, 这些元素是导致宝石呈色的主要原因, 也被称为致色元素。不同的致色元素产生不同的颜色, 如

红色红宝石为 Cr 致色(吴瑞华等, 1994; 张蓓莉, 2006; 余晓艳, 2009), 紫色翡翠为 Mn 致色(欧阳秋眉, 2001; 殷晓玲, 2004; 张希雨等, 2010), 紫晶为色心致色(李珍, 1997; 苏琳等, 2008)。总结这些颜色成因, 有如下几种解释:

(1)过渡金属离子内的电子跃迁: 微量元素与主体元素发生类质同像替代, 产生未成对的单电子, 在阴离子电子云或配位体的影响下, 电子发生能级分裂。当光与宝玉石相互作用时, 电子从低能级向高能级跃迁, 该过程吸收部分可见光而呈色, 如红宝石的红色、祖母绿的绿色等。

收稿日期: 2016-11-02; 修订日期: 2016-11-26

作者简介: 孟丽娟(1975-), 宝石学工学学士, 矿物理学硕士, 讲师, 在宝石、矿物学专业领域任教 10 年, E-mail: mljmaggie@163.com。

(2) 色心：微量元素与不等价电荷的主体元素发生类质同像替代，在此过程中，产生缺陷，形成色心。色心的本质也是造成未成对的单电子，形成能级分裂。在光的照射下，宝石吸收部分可见光而呈色。

(3) 离子间的电荷转移：当微量元素以类质同像替代形式进入到宝石晶格中时，如果类质同像替代发生在不等价电荷之间，则不同价态的电荷之间发生转移，此过程宝石吸收部分可见光而呈色。

这些解释中，无一例外地都提到了微量元素。在元素地球化学中，微量元素的定义是：只要元素在所研究的客体(地质体、岩石、矿物)中的含量低到可以近似地用稀溶液定律描述其行为，该元素可称为微量元素。矿物中，微量元素存在于囚禁带、晶格缺陷中，及在固溶体中替代主要相的原子(赵振华，1997)。微量元素，尤其是微量元素中的致色元素，对于宝石颜色的形成，起到至关重要的作用。

本次研究利用显微镜放大观察、电子探针背散射电子图像分析、激光剥蚀-等离子体质谱分析(LA-ICP-MS)、紫外-可见分光光谱分析(UV-Vis spectroscopy)等测试手段，对紫色玉髓样品的元素成分和结构进行测试分析，对玉髓紫色颜色的成因进行了初步的探讨。

1 样品特征

研究用样品均来自山西大同市赵家沟，样品编号分别为 S1、S2、S3，照片见图 1。样品均为玻璃光泽，半透明，其他特征见表 1。

2 样品的图像和成分测试分析

紫色玉髓样品的形态形貌图像分析采用的是偏光显微镜、电子探针下的背散射电子图像分析，成分测试采用的是激光剥蚀-等离子体质谱(LA-ICP-MS)微量元素成分分析和紫外-可见分光光谱分析。

2.1 偏光显微镜下特征

将研究样品切成薄片，在偏光显微镜下观察，得到如图 2 图像特征。样品具粒状(图 2a、2b)、纤维放射状(图 2c、2d)结构，同心环带构造(图 2e、2f)，具体特征见表 2。

2.2 背散射电子图像分析

背散射电子图像分析在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室完成，使用仪器为日本电子的JXA-8238型电子探针，工作电压和电流分别为



图 1 样品外观照片

Fig. 1 Photos of samples

表 1 样品特征

Tab. 1 Characteristics of samples

样品编号	形态	大小/cm	颜色	结构	备注
S1	不规则	3.0×2.5×2.0	紫色	隐晶质结构,无环带;切开后颜色均匀,样品中心有非常小的颗粒单晶	图 1a、1d
S2	椭球	2.5×2.7×2.0	紫色	隐晶质结构,无环带;切开后颜色、结构均匀	图 1b、1e
S3	球形	2.0×2.0×2.0	紫色,带有浅黄色调	隐晶质结构,肉眼不可见环带,切开后,由外至内,结晶颗粒变粗大,到中心区域,形成肉眼可见的无色结晶颗粒晶洞	图 1c、1f

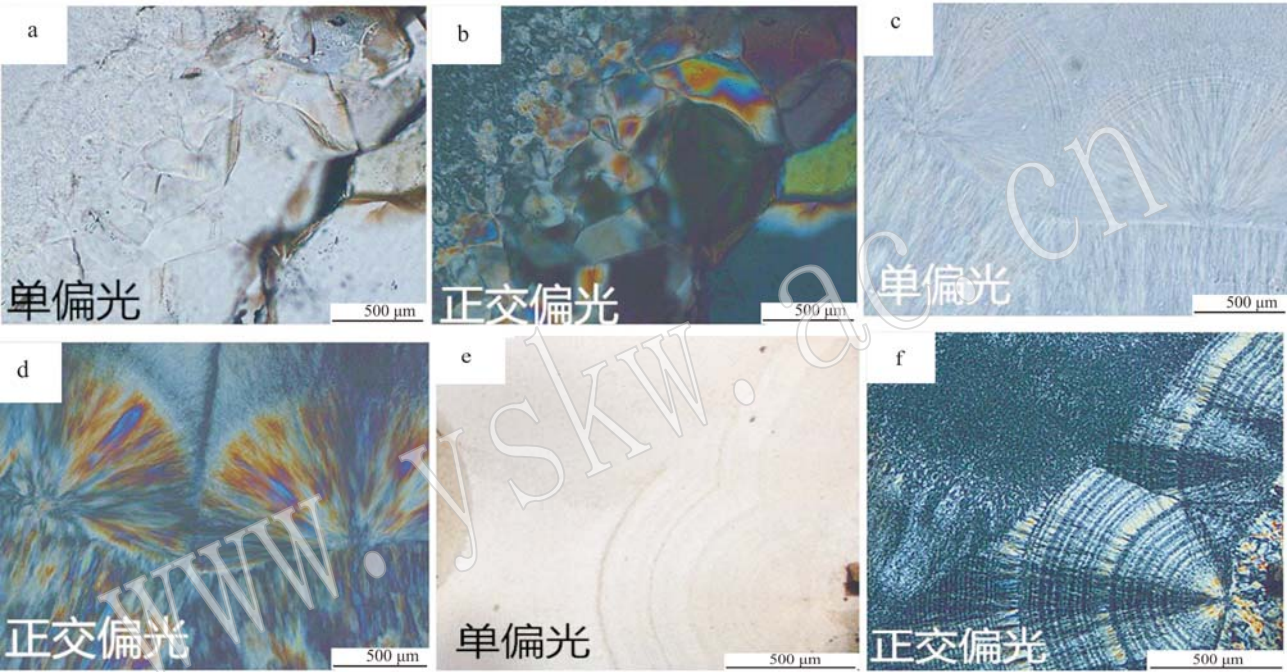


图 2 样品不同位置显微镜下图像

Fig. 2 Microscope photos of samples at different position

15 kV 和 20 nA。测试结果如图 3,样品显微细粒结构(图 3a、3b),排列方向一致(图 3c),具条带、同心环带构造(图 3a、3b、3d),具体特征见表 2。

2.3 LA-ICP-MS 微量元素分析

LA-ICP-MS 分析在国家地质实验测试中心完成。仪器使用 Element 2 型等离子体质谱仪(德国 Finnigan 公司)与 UP-213 型激光器(美国 New wave 公司)。激光波长为 213 nm,脉冲宽度为 4 ns。激光剥蚀多元素定量分析采取点剥蚀的方式,束斑大小为 30 μm,测试样品每分析 10 个点,穿插 2 个 MASC-3 和 2 个 NIST 610 标准物质点来进行校正。

测试时,根据背散射电子图像,沿着垂直条带或同心环带方向选取测试点位,尽可能在条带及环带

周边选择点位,每个样品测试 5 个点。测试结果见表 3。

从表 3 中可以看出,除了两个点位测得的 SiO₂ 含量为 96.84% 和 97.75% 外,其他点的 SiO₂ 含量基本都在 99% 以上,说明样品为石英质。此外,元素 Li、B、Na、Mg、Al、K、Ca、Ti、V、Cr、Co、Cu、Zn、Mn、Fe、Ni 及 Ga、Ge、In 等微量元素的总含量为 2.25% ~0.01% 之间。元素 Fe、Mg、Na、B 这 4 种元素为检出微量元素中含量较高的 4 种,尤其以 Fe 的含量为最高。Ti、V 这两种元素,在个别点位检出。

对比微量元素在样品中的含量,可以发现,样品 S2 中的 B 和 Al,仅在一个点位被检出。在其他两个样品中,也并非所有点位都检出有 Al 元素存在。

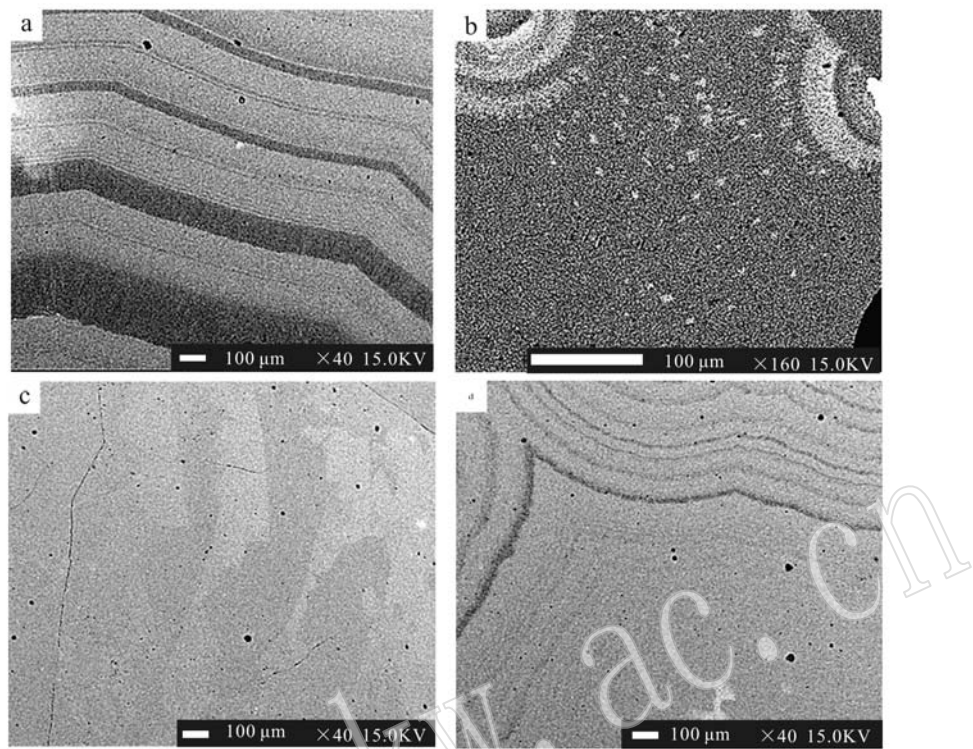


图 3 样品背散射电子图像

Fig.3 Backscattered electron images of samples

表 2 样品的显微图像和背散射电子图像特征

Tab. 2 Characteristics of samples under the microscope and BSE		
样品编号	偏光显微图像特征	背散射图像特征
S1	非自形到自形粒状、纤维状结构(图 2a、2b),多数粒度约为 50~350 μm;存在条带构造;个别最大粒度>350 μm,且大颗粒呈半自形到自形粒状	显微颗粒感明显(图 3a),且排布紧密,具有条带状构造
S2	非自形到自形粒状、纤维状结构(图 2c、2d),粒度约为 200~500 μm,存在放射状、同心环带构造,纤维束延长方向垂直环带壁;结晶颗粒明显比样品 S1 样品大	显微颗粒明显(图 3b),具同心环带构造
S3	非自形到自形粒状(图 2e、2f),颗粒大小发育相对较为均匀,约为 200~400 μm 存在放射状、同心环带结构,且同心环带内侧发育有一圈自形石英晶体	自形晶明显,且排列方向一致(图 3c);具纤维状结构,条带构造,纤维的延长方向垂直于条带(图 3d)分布方向

2.4 紫外-可见分光光谱分析

测试在中国地质大学(北京)珠宝学院完成,仪器为岛津的 UV-3600 型紫外-可见分光光度计,波长 300.00~2 200.00 nm,采用高速扫描方式,采样间隔 0.5 s,测定方式为反射率($R/\%$)。测试结果如图 4。

样品在 300~800 nm 之间出现宽峰(峰包含波峰和波谷,全文同),间杂尖锐的峰值。在 800~2 200 nm 之间的峰均表现较为尖锐。其中,样品 S1 有 3 个较宽的峰,中心点分别出现在 455、552.5 和 793.5 nm;样品 S2 有 3 个较宽的峰,中心点分别出现在 458、553 和 818 nm;样品 S3 有 4 个较宽的峰,

其中心点分别出现在 324.5、359、446 和 564.5 nm。其中,主峰在 540 nm 左右,吸收带的宽度(FWHM)都在 350 nm 左右。3 个样品最宽的峰均在 540 nm(± 30 nm)附近,其次出现在 440 nm(± 30 nm)之间。

3 讨论

3.1 环带分布与颜色关系

对比分析样品的肉眼特征和偏光显微镜下及电子探针背散射电子图像,发现样品均为隐晶质结构,透明、浅紫色-紫色。偏光显微图像及背散射图像下,可见纤维状定向排列,排列方向垂直于条带状、

表 3 测试样品的部分元素 LA-ICP-MS 定量分析结果

Table 3 Trace elements of samples analyzed by LA-ICP-MS

	SI-1	SI-2	SI-3	SI-4	SI-5	S2-1	S2-2	S2-3	S2-4	S2-5	S3-1	S3-2	S3-3	S3-4	S3-5
Li	<	4.849	7.778	<	57.78	210.1	<	235.3	63.02	<	<	78.31	294.8	<	<
B	50.41	18.64	1.528	103.4	49.37	418.7	<	<	<	<	<	131.1	310.5	107.4	319.6
Na ₂ O	<	309.4	193.5	317.1	2460	460.5	2443	<	<	<	11662	3960	1050	4243	<
MgO	<	43.78	198.6	239.2	18.60	1043	60.61	1141	384.0	<	1539	<	<	427.7	<
Al ₂ O ₃	<	58.75	18.71	340.6	<	<	178.7	<	<	<	<	<	<	709.7	1217
SiO ₂	998 948	997 233	995 512	975 705	984 769	993 304	982 411	997 326	993 856	998 685	968 423	986 196	989 672	989 642	992 972
P ₂ O ₅	<	138.9	<	<	627.9	403.5	<	<	790.1	173	635.1	2424	<	<	<
K ₂ O	<	128.2	<	<	876.0	132.5	1550	304.3	<	<	5650	1049	2229	<	<
CaO	<	1373	2183	21866	6350	<	10550	801.5	2489	<	<	5530	6202	2873	2034
Sc	8.292	5.001	8.785	<	2.103	<	<	<	14.21	<	29.93	14.53	17.53	<	<
TiO ₂	<	<	<	47.62	<	<	<	<	<	12.12	<	<	<	<	<
V	<	<	<	1.848	<	<	<	5.005	15.88	<	<	1.100	<	14.91	10.53
Cr	58.55	58.89	164.3	1225	521.4	249.2	<	<	471.6	39.45	1001	<	<	243.3	624.4
MnO	<	2.933	9.512	<	<	<	<	<	39.43	<	<	7.606	<	<	85.27
FeO(t)	<	588.4	1513	<	3969	<	2292	<	2011	577.7	7415	95.99	<	1029	232.0
Co	0.533	0.242	0.861	8.934	<	<	9.969	<	18.75	<	6.842	0.577	4.029	<	16.55
Ni	<	<	136.6	<	<	3246	<	<	50.1	<	2836	138.0	<	461.8	2194
Cu	2.719	8.438	6.089	<	142.3	<	22.81	<	48.90	<	355.4	77.32	23.22	111.7	102.3
Zn	<	7.069	5.790	58.67	18.49	336.4	50.46	<	10.41	8.602	<	49.26	34.62	45.07	77.26
Ga	4.783	1.577	1.252	<	2.554	28.99	0.618	<	12.04	<	47.56	23.08	<	6.114	<
Ge	14.76	7.777	17.49	39.95	29.56	<	129.5	<	3.506	41.36	230.4	87.08	14.62	66.11	19.94
As	<	0.690	<	3.011	<	94.53	37.20	4.061	145.2	<	<	<	<	12.03	25.71
In	0.667	<	0.984	0.799	4.733	8.361	<	<	<	<	12.37	<	<	<	<
Sn	0.945	<	8.044	<	79.10	61.63	82.56	41.86	<	<	<	39.55	<	<	6.268

说明:表中的“<”表示未检出;FeO(t)表示全铁含量。

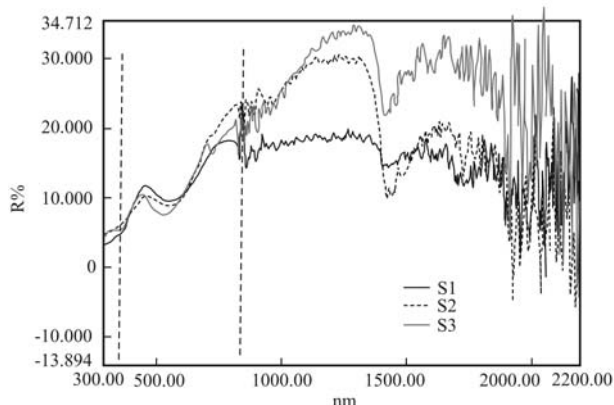


图 4 样品紫外-可见分光光谱

Fig. 4 UV-Vis spectra of samples

同心环带分布方向。但是,这些定向排列及形成的环状条带,明显与晶体的排列有关,而并未出现颜色分带。这与样品肉眼观察到的“颜色分布均匀,无条带和同心环带特征”一致。

3.2 微量元素与颜色关系

根据 LA-ICP-MS 微量元素分析和紫外-可见分光光谱分析结果可知,在 Fe(t)、Al 等微量元素与颜色之间存在一定的关系。

3.2.1 Fe 与颜色的关系

Fe^{2+} 在紫外到近红外的吸收主要有 1 000 ~ 1 100、550、510、430、450 及 1 800 ~ 1 900 nm。 Fe^{3+} 的吸收主要有 870、700、520、490、450、400 nm(燕守勋等,2003)。样品的紫外-可见分光光谱显示,所有样品中 Fe 同时以 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 形式存在。根据水晶的呈色机理(王萍等,2004; 苏琳等,2008),当 Fe^{3+} 以类质同像替代形式替代了 Si^{4+} 后,在辐照作用下, Fe^{3+} 的电子壳层中成对电子之一受到激发,将产生空穴色心($[\text{FeO}_4/\text{M}^+] + \text{e}^-$),水晶将呈现紫色调,该紫色在紫外-可见分光光谱中对应于 542 nm 的宽吸收。这与本研究的样品紫外-可见-近红外分光光谱在 540 nm 附近的宽吸收基本吻合。

Fe^{3+} 进入到石英的晶格中后,发生了 $2\text{Fe}^{2+} + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{O}^{1-}$ 的电荷转移(Lehmann and Moore, 1966)。当然,该过程最终也是形成了色心,而使石英呈紫色。由此可以判定,本研究样品均为 Fe^{3+} 进入到硅氧四面体中,形成空穴色心从而呈现紫色。

样品 S2 有 458 nm 宽吸收,样品 S1 有 455 nm 宽吸收,样品 S3 有 446、324、359 nm 这 3 个宽吸收,这表明 3 个样品发生了“蓝移”现象。样品 S1 和样品 S2 的“蓝移”,使其吸收了更多的紫色光,从而具

有更柔和的紫色。样品 S3 的“蓝移”范围更宽,吸收了更多的绿-紫区间的光,因而在色调上呈现偏黄的紫色。研究表明,324 nm 和 390 nm 附近形成的吸收带与 Fe^{3+} 的 d 电子跃迁 ${}^6\text{A}_1 \rightarrow {}^4\text{E}({}^4\text{D})$ 有关,而使玉髓呈现一定的黄色(王萍等,2004; 苏琳等,2008)。

3.2.2 Al 与颜色的关系

Al^{3+} 同样以类质同像替代形式进入到硅氧四面体晶格,形成 $[\text{AlO}_4/\text{M}^+] + \text{e}^-$ 空穴色心。这种空穴色心使得石英吸收可见光区大部分波长的光,形成烟色,在紫外-可见光分光光谱上对应于 390 ~ 580 nm 的宽吸收。并且该色心的存在会对 $[\text{FeO}_4/\text{M}^+] + \text{e}^-$ 色心造成干扰(Balitsky *et al.*, 1986; Rose. *et al.*, 1994)。

样品 S1 和样品 S3 中存在 Al,而样品 S2 中,仅检测到一个点位的 Al。在颜色表现上,样品 S1 和样品 S3 的颜色要比样品 S2 样品浅,尤其是样品 S3 中还呈现浅的黄色调。这也说明,在样品 S1 和样品 S3 中存在 $[\text{AlO}_4/\text{M}^+] + \text{e}^-$ 空穴色心,而样品 S2 中几乎不存在 $[\text{AlO}_4/\text{M}^+] + \text{e}^-$ 空穴色心。

3.2.3 B 与颜色的关系

在样品 S1 和样品 S3 中,检测到了较高含量的 B 元素。推测 B 是以 B^{3+} 形式进入到硅氧四面体,替代了 Si^{4+} ,形成类质同像替代系列,并在此过程中,形成色心,从而产生蓝色调。该颜色成因可能与含 B 的蓝色钻石成因相似。但需进一步实验证明。

3.2.4 其他微量元素与颜色的关系

在测试的 3 个样品中,还有 K、Na、Mg、Ca 等碱金属微量元素的存在,这些碱性微量元素本身并不会引起颜色变化,但是在晶格中会起到电荷补偿作用(Lehmann *et al.*, 1966)。

3.2.5 样品中的水

样品的紫外-可见光-近红外分光光谱图中,800 ~ 2 200 nm 之间的谱线密集且峰比较尖锐。吸收带 1 400 nm 附近归属于晶体中羟基($-\text{OH}$)伸缩振动的第一倍频,吸收带 1 900 nm 附近与晶体孔道中的分子水有关(燕守勋等,2003; 苏琳,2008)。在样品 S1 中,有 1 428 nm 和 1 908 nm 两条谱线与之相对,样品 S2 中有 940、1 888 和 1 954 nm 3 条谱线与之对应,样品 S3 中有 1 418 和 1 906 两条谱线与之对应。因此在 3 个样品中,均存在有分子水和结构水。这些水和羟基的存在,构成了阴离子基团。而阴离子基团会影响配位体,从而影响样品对可见光的吸收(Lehmann *et al.*, 1966; Balitsky *et al.*, 1986;

Rose *et al.*, 1994)。

4 结论

通过对紫色玉髓样品的偏光显微镜图像、背散射电子图像、LA-ICP-MS 元素分析及紫外-可见分光光谱等图像和数据分析,对玉髓的紫色颜色成因进行了初步探讨,认为紫色均是由色心引起的,只是色心的形成过程不同。

Fe 以类质同像替代形式进入到晶格中,形成 $[\text{FeO}_4/\text{M} +] + \text{e}^-$ 色心,该过程吸收黄绿色波长的光,而使玉髓呈现紫色。

Al 以类质同像替代形式进入到晶格中,形成 $[\text{AlO}_4/\text{M} +] + \text{e}^-$ 色心,该过程吸收黄绿色波长的光,而使玉髓呈现紫色。

$[\text{AlO}_4/\text{M} +] + \text{e}^-$ 色心会对 $[\text{FeO}_4/\text{M} +] + \text{e}^-$ 色心产生干扰, $[\text{AlO}_4/\text{M} +] + \text{e}^-$ 色心的样品会产生黄色调,但仍以紫色为主。

样品 S3 中的黄色调,还可能与 Fe^{3+} 的 d 电子跃迁 ${}^6\text{A}_1 \rightarrow {}^4\text{E}({}^4\text{D})$ 有关。

微量元素 B 的存在,可能会使样品产生偏蓝的色调,但是,需要进一步实验证明。

玉髓中的水会对色心的形成造成影响,从而影响颜色的色调。

紫色玉髓的颜色没有分带,因此不能用各颜色层不同颜色与微量元素关系进行颜色成因解释。

致谢 LA-ICP-MS 分析得到国家地质实验测试中心胡明月博士的帮助,紫外-可见分光光谱分析得到中国地质大学(北京)袁野博士的帮助,审稿人对本文提出了中肯的修改意见,在此一并致谢!

References

- Balitsky V S and Balitskaya O V. 1986. The amethyst-Citrine dichromatism in quartz and its origin[J]. *Phys. Chem. Minerals*, 13: 415~421.
- Chen Quanli, Yuan Xinqiang and Jia Lu. 2011. Study on the vibrational spectra characters of Taiwan blue chalcedony [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 31(6): 1 549~1 551(in Chinese).
- Lehmann G and Moore W J. 1966. Color Center in Amethyst Quartz [J]. *Science. New Series*, 152(3 725): 1 061~1 062.
- Li Zhen. 1997. The structure of agate and its color enhancement[J].

Jewelry Science and Technology, (3): 29~30(in Chinese).

- Ouyang Qiumei. 2001. The characters and coloring mechanisms of purple jadeite[J]. *Gem and Gemology*, 3(1): 1~7(in Chinese).
- Rose T P, Criss R E and Rossman G R. 1994. Irradiative coloration of quartz and feldspars with application to preparing high purity mineral separates[J]. *Chemical Geology*, 114: 185~189.
- Su Lin, Fan Jianliang and Guo Shouguo. 2008. Study on mineralogical characteristics and coloration mechanism of purple chalcedony[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 5: 21~26(in Chinese).
- Wang Ping, Li Guochang and Liu Shuguang. 2004. Analysis about the sorts and the color causes of Donghai quartz crystal[J]. *Jewelry Science and Technology*, 16(55): 28~32(in Chinese).
- Yan Shouxun, Zhang Bing, Zhao Yongchao, *et al.* 2003. Summarizing the VIS-NIR spectra of minerals and rocks [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 4(18): 191~201(in Chinese).
- Yin Xiaoling. 2004. The coloring mechanisms of purple jadeite[J]. *Jewelry Science and Technology*, 16(3): 40~42(in Chinese).
- Zhang Xiyu and Li Jingjing. 2010. Research on color-forming mechanism of purple jade[J]. *Journal of Shijiazhuang University*, 12(3): 40~44(in Chinese).

附中文参考文献

- 陈全莉,袁心强,贾璐. 2011. 台湾蓝玉髓的振动光谱表征[J]. *光谱与光谱学分析*, 31(6): 1549~1551.
- 李珍. 1997. 玛瑙的结构特征与改色[J]. *珠宝科技*, (3): 29~30.
- 欧阳秋眉. 2001. 紫色翡翠的特征及成色机理探讨[J]. *宝石和宝石学*, 3(1): 1~7.
- 苏琳,范建良,郭守国. 2008. 紫色玉髓的矿物学特征及其呈色机理研究[J]. *矿产保护与利用*, (5): 21~26.
- 王萍,李国昌,刘曙光. 2004. 江苏东海有色水晶的品种以及颜色成因分析[J]. *珠宝科技*, 16(55): 28~32.
- 吴瑞华,王春生,袁晓江. 1994. 天然宝石的改善及鉴定方法[M]. 北京:地质出版社.
- 燕守勋,张兵,赵永超,等. 2003. 矿物与岩石的可见-近红外光谱特性综述[J]. *遥感技术与应用*, 4(18): 191~201.
- 殷小玲. 2004. 紫色翡翠呈色机制探讨[J]. *珠宝科技*, 16(3): 40~42.
- 余晓艳. 2009. 有色宝石学教程[M]. 北京:地质出版社.
- 张蓓莉. 2006. 系统宝石学[M]. 北京:地质出版社.
- 张希雨,李敬敬. 2010. 紫色翡翠颜色成因探讨[J]. *石家庄学院学报*, 12(3): 40~44.
- 赵振华. 1997. 微量元素地球化学原理[M]. 北京:科学出版社.