

凉山瓦西乡南红玉中的赤铁矿包裹体特征与成因

张良钜, 宋楚欣, 阮青锋, 曾伟来, 李东升, 曾南石, 胡惠驿, 覃敏锋

(桂林理工大学 地球科学学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 瓦西乡产出的南红玉中的红色点状及火焰纹典型包裹体分别是石英中的红色球粒与红色管状包裹体。镜下及扫描电镜(SEM)研究, 红色球粒分布在“三色”层水晶的菱面体单形晶面的间歇层面中, 由红色核、黑色壳和红色表层组成; 火焰纹管状包裹体主要出现在条带水晶中, 管的方向垂直水晶的菱面体晶面, 管的内壁呈黑色, 外壳为红色。其球粒表层或管外壳的颜色、厚度及透光性则直接影响南红的颜色质量与润泽性。研究表明, 球粒状和火焰状包裹体主要由片状、鳞片状或板片状赤铁矿组成; 球粒圈层中的赤铁矿晶体 c 轴取向呈规律变化, 可能与其 V_2O_5 含量有关。据水晶晶体中的球粒、管及共生矿物绿帘石、黄铜矿包裹体的红外光谱(IR)及流体包裹体均一法测温与激光拉曼(LRS)分析, 球或管的赤铁矿属含有机质的低温热液(约 160°C)成因, 成矿溶液中的有机质也是促使铁氧化物凝聚形成具不同圈层结构的红色球粒与管的主要原因。有机质可能来自下二叠统茅口组碳酸盐。

关键词: 包裹体; 红色点状与火焰纹; 红色球粒与红色管; 圈层构造; 石英与片状赤铁矿; 有机质; 成因; 川南瓦西

中图分类号: P619.28⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2015)02-0237-09

The features and genesis of hematite in Nanhong jade from Waxi Township, Liangshan

ZHANG Liang-ju, SONG Chu-xin, RUAN Qing-feng, ZENG Wei-lai, LI Dong-sheng, ZENG Nan-shi, HU Hui-yi and QIN Min-feng

(College of Earth Science, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: The red dot and flame figure inclusions in Nanhong jade are red spherulite and red tube-like inclusions in quartz. Microscope observations and scanning electron microscope studies show that the red spherulites include the red core, black coccosphere and red surface, and are distributed in the intermittent layers of rhomb in “three-color” type quartz. The flamed tube-like inclusions mainly occur in striped quartz, perpendicular to the rhomb of quartz. The interior of the tube is black with red shell. The color and transparency of the spherulite and red tube-like inclusions have directly effects on the color and luster quality of Nanhong jade. Studies show that the red spherulite and red tube-like inclusions are mainly composed of platy hematite. The directions of c -axis in hematite from spherulites change regularly, which is likely related to its V_2O_5 . The relationships between quartz and associated minerals and their analytical results indicate that hematite is of hydrothermal origin, and its temperature is about 160°C . The organic matter of the fluids, which led to the formation of spherulite and red tube-like hematite inclusions, probably came from the carbonate in Permian Maokou Formation.

Key words: inclusion; red dot and flame figure; red spherulite and red tube; circle layered structure; quartz and platy hematite; organic matter; genesis; Waxi Township in southern Sichuan

收稿日期: 2014-12-19; 修订日期: 2015-01-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41172054, 40572026)

作者简介: 张良钜(1949-), 男, 教授, 研究方向为矿物形貌-成因矿物学, E-mail: zljpgig@glut.edu.cn.

南红玉是指具有柿子红、大红、粉红及紫红的透明或半透明与不透明的石英(水晶、玉髓或玛瑙)的称谓。老南红又称“赤玉”,其产地为云南宝山及甘肃等地,由于其绺裂较发育,难以作为玉石或被收藏,渐渐地从人们的视线中消失。2009年前后,四川凉山美姑县多处的峨眉山玄武岩中发现以红色为主的石英,现在称为“川南红”或“南红玉”,它以完整度高、颜色红艳、润泽性及脂性俱佳的品质与翡翠、和田玉形成三足鼎立之势,因此川南红的行情持续走高。作者于2008年首次对产出在美姑县瓦西乡峨眉山玄武岩及火山碎屑岩晶洞中的水晶地质产出、成矿阶段、成矿世代及石英中球粒状、管状铁氧化物包裹体进行了研究报道(张良钜等,2008a,2008b),近几年虽有川南红的研究报道,但主要局限于川南红的宝石学特征及鉴别等(李圣清等,2014)。作者在前人研究的基础上,以川南红的地质产出特征为背景,通过镜下及现代测试技术(XRD、SEM、EDS、EPMA、IR、LRS)与包裹体测温对产于美姑县瓦西乡川南红中的红色点状及红色火焰纹的形貌、圈层结构与颜色、成分以及形成温度等进行研究,以探讨石英中的红色点状物及火焰纹的形成机理,川南红的成因及其与有机质的关系。

1 川南红的产地与颜色特征

2009年前后对产于川南美姑县峨眉山基性火山岩晶洞或裂隙及其残坡积物中的川南红进行开发利用。其产地主要有美姑县的联合乡、九口乡及瓦西乡等3个乡。不同产地的川南红特征如下:

联合乡(洛莫依达乡):川南红以樱桃红为主,其润泽性及脂性都好,但完整度不高。

九口乡一带:是著名的川南红产地。其川南红的颜色红艳,以正红、大红为主,其中包括柿子红和火焰纹,质地致密细腻,润泽性及脂性俱佳等特点。

瓦西乡:产地的川南红颜色丰富,多呈玫瑰红,即为紫红色或红色偏紫,火焰纹,偶见柿子红,但块度较小,绺裂较多。

根据镜下及扫描电子显微镜(SEM)的研究,川南红的颜色是由石英中的红色点状颗粒或火焰纹的包裹体所致。这3个乡川南红产出的地质环境条件的差异性,导致石英中的红色点状颗粒与火焰纹包裹体的颜色及颜色的饱和度、包裹体的形貌、排列方

式及分布密度的不同。由于工作条件的局限性,下面主要研究讨论瓦西乡峨眉山玄武岩中川南红的包裹体特征与成因。

2 瓦西川南红的地质产出概况

瓦西川南红产出在达拉阿莫水晶矿(图1a)中,水晶矿的围岩为上二叠统峨眉山玄武岩($P_2\beta$),其下为下二叠统(P_1)茅口组碳酸盐。根据资料(傅家谟等,1983),茅口灰岩是富含有机质的生物灰岩。水晶矿的成矿围岩先后经历了基性熔岩(半玻晶玄武岩)与火山碎屑岩的2次成岩作用。水晶成矿先后经历了3次成矿阶段:第1成矿阶段产出在玄武岩气孔中的锥状淡紫色水晶及“三色”层水晶中(图1b);第2成矿阶段产于玄武岩层间滑动裂隙和晶洞中的浅色、乳白色、纯净无色水晶与浅草绿色板状绿帘石中,从晶洞壁玄武岩到晶洞中心呈对称梳状生长;第3成矿阶段主要产出在火山碎屑岩的气孔、晶洞或裂隙脉中,以暗红色、鲜红色赤铁矿普遍发育为主,伴有暗绿色、黄绿色绿帘石与绿纤石,最后晶出的是玉髓与玛瑙。

第2成矿阶段是矿区最主要的成矿阶段,根据水晶的颜色、透明度、水晶晶体中的铁氧化物包裹体、水晶晶体形貌的对称性与矿物共生组合、产出部位,从裂隙或晶洞壁往晶洞中心依次产出4个世代的水晶。其中第1世代水晶为条带状水晶(图1c),第2世代为乳白色雾状水晶与自形方板状黄绿色绿帘石,第3世代水晶为对称性较好的浅色柱状水晶与黄色黝帘石,第4世代为R型水晶与暗绿色自形绿帘石等矿物的共生组合,它们呈对称梳状产出(张良钜等,2008a,2008b)。

红色点状颗粒的川南红产出在第1成矿阶段的“三色”层水晶的间歇层面中(图1b、1d),及第2成矿阶段第1世代的条带状水晶的条带中或间歇层面(相邻两条带间的界面)上(图1c),火焰纹川南红只发育在条带状水晶晶体中(图1c、1h、1i)。

3 红色点状颗粒及火焰纹包裹体的特征

3.1 红色点状颗粒

3.1.1 “三色”层水晶中的红色点状颗粒包裹体

“三色”层水晶,当地人俗称“中国红”,即由内部的淡紫色水晶与外部无色透明水晶之间夹一层极薄

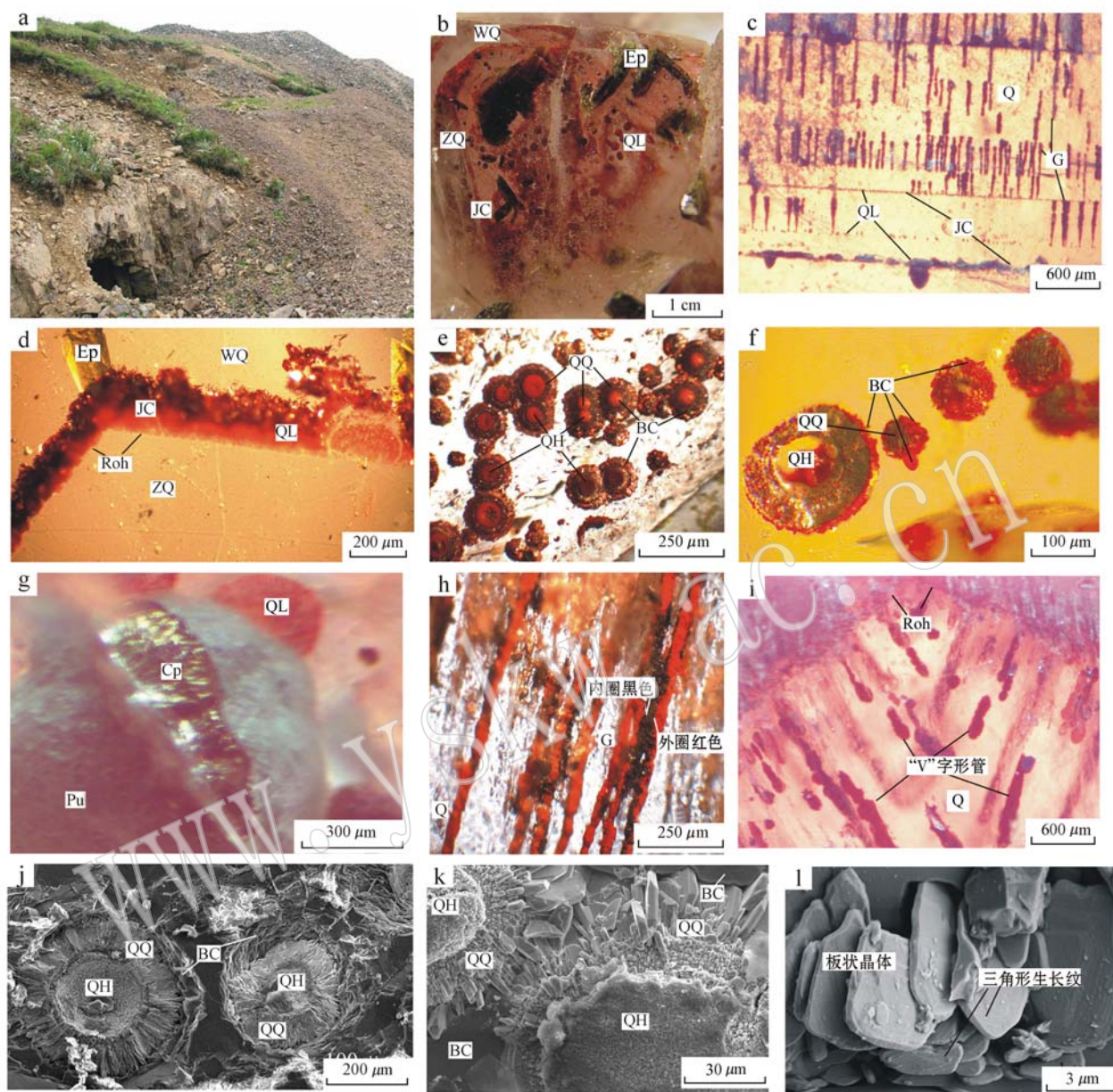


图1 矿区及南红玉中包裹体的显微照片

Fig. 1 Ore district and microphotographs of the inclusions in Nanhong jade

a—矿区; b—“三色层”水晶及绿帘石包裹体; c—一条带状水晶; d—红棕色间歇层; e、f—3圈层构造的球粒(球核、球壳、表层); g—红棕色间歇层面上的绿帘石及黄铜矿包裹体; h—两圈层管状包裹体; i—“V”字形管状包裹体; j、k—球粒的圈层形貌(SEM); l—赤铁矿的板状晶体与晶面条纹(SEM); QL—红色点状球粒; G—管; QQ—球壳; BC—球粒的表层; QH—球核; JC—红棕色间歇层; WQ—外层无色水晶; ZQ—淡紫色水晶; Q—石英; Ep—绿帘石; Cp—黄铜矿; Pu—绿帘石; Roh—菱面体单形晶面

a—ore district; b—“trichroic” rock crystals and epidote inclusion; c—striped rock crystal; d—reddish brown intermittent layers; e, f—spherulite with three-circle layers structure (spherulite, coccosphere, surface); g—chalcopryrite and pumpellyrite inclusions in the intermittent layer; h—tube-like inclusion with two-circle layers structure; i—tube-like inclusion with “V” morphology; j, k—circle layers morphology of spherulite; l—platy crystals and striations of hematite; QL—red dot spherulite; G—tube; QQ—coccosphere; BC—surface; QH—spherulite; JC—red-brown intermittent layers; WQ—achromatic color crystal; ZQ—pale purple crystal; Q—rock crystal or quartz or chalcedony; Ep—epidote; Cp—chalcopryrite; Pu—pumpellyrite; Roh—direction of the simple-form crystal face of rhombohedron

(0.5~0.8 mm)的红棕色并与晶体的菱面体单形晶面相平行的间歇层(图1d),即夹层组成。夹层的底面,即内部紫水晶的菱面体的晶面上分布有不同颜色圈层构造的点状球粒(120~180 μm),球粒分别由

球核、球壳及表层组成,其中球核与表层为红色或棕色,球壳为钢灰色、铁黑色,又称“红夹黑”(图1e、1f)。外层的无色层水晶的厚度为3.2~3.8 mm,平均厚3.5 mm。在棕红色夹层与无色层水晶的接触

部位产出有自形板状绿帘石晶体及黄铜矿包裹体(图 1b、1d、1g)。

3.1.2 条带状水晶中红色点状颗粒包裹体

条带状水晶的条带中或间歇层面上发育有红色点状颗粒包裹体,它们的颜色、形貌、内部结构等方面都有显著的特征。从水晶晶体中心往晶体 c 轴的尖锥状方向,在水晶晶体的菱面体单形晶面方向至少产出 4 个条带或间歇层,在每个间歇层面上分布有红色点状颗粒包裹体,不同厚度的条带中或间歇层面上的红色点状颗粒包裹体有如下特征(图 1c): ① 第 1 间歇层面上发育有一层半球形的铁黑色颗粒,球径一般为 $0.10\sim 0.15\text{ mm}$ 。② 第 2 间歇层面上红色点状微粒,其直径约 $10\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ 。③ 第 3 间歇层面上红色粒状的粒径一般为 $10\sim 15\text{ }\mu\text{m}$ 。④ 第 4 间歇层面上红色球粒的粒径为 $5\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 。

上述特征表明产于条带状水晶中的红色点状颗粒包裹体具有一定方向性、规律性,这种规律性表现在:从第 1 间歇层至第 3 间歇层的层面上红色点状颗粒由半球形向球形转变,球径由大变小,颜色由铁黑色、钢灰色逐渐演变为棕红色、红色,第 4 间歇层面上点状颗粒为鲜红色。间歇层条带中的红色点状球粒形貌与“三色”层水晶的红色夹层中的红色点状球粒的形貌相类似,也是由不同颜色的圈层构造组成,但多为两圈层构造,即由红色球核与铁黑色、钢灰色球壳组成,少数由红夹黑的 3 圈层组成。

3.2 火焰纹

瓦西川南红中的火焰纹只产于第 2 成矿阶段第 1 世代的条带状水晶中,火焰纹是具两圈层构造的管,管的长轴方向垂直水晶的菱面体单形晶面方向或间歇层(图 1c、1h、1i),管的内圈为铁黑色,外圈为厚度不一的红棕色,形成所谓的“外红内黑”的圈层构造。管的形貌有滴管状、钟乳状、倒葫芦状,从水晶晶体的中心往晶体的 c 轴的尖锥状方向,管的分布密度增大,管的长度增长,管径变粗,近菱面体单形晶面的锥顶三角形区间时,管排列成“V”形的火焰纹,“V”形管的夹角约 60° ,与水晶晶体 c 轴的夹角约 30° (图 1i)。因此,川南红的火焰纹是由红色管的长轴垂直水晶菱面体单形晶面方向呈“V”形排列所致,这种现象在水晶的尖锥顶部位最为明显(图 1i)。

4 球粒状与管状形貌的矿物学特征

4.1 球粒与管的微形貌

4.1.1 红色点状球粒

在“三色”层水晶的红色夹层(厚约 $0.5\sim 0.8$

mm)中的红色点状球粒在显微镜下呈不同颜色、不同圈层的球粒,球径多为 $120\sim 180\text{ }\mu\text{m}$ 。球粒由球核、球壳与表层组成,多数球粒为单核,少数球粒可见两个或多核组成,球核为棕红色,球壳是铁黑色,表层呈现的是大红色,俗称“红夹黑”(图 1d、1e、1f)。扫描电镜(SEM)表明(图 1j、1k),球核($\Phi=50\sim 100\text{ }\mu\text{m}$)由自形板状微晶呈定向似层状聚合组成,球壳由绕球核呈放射状排列的自形片状、板状晶体组成,在晶体的 $\{0001\}$ 晶面上有 3 组平行于 $\{0001\}$ 和 $\{10\bar{1}1\}$ 交棱方向的条纹(图 1l)(王濮等,1982)。球壳本身又由两圈组成,第 1 圈厚 $10\sim 15\text{ }\mu\text{m}$,第 2 圈厚 $30\sim 40\text{ }\mu\text{m}$,球核与球壳间有 1 圈明显的间断缝线(图 1j、1k),表明球核与球壳是在不同的条件下经历了两次的结晶生长;表层($30\sim 50\text{ }\mu\text{m}$)是由红色自形鳞片状晶体组成,鳞片状晶体的边缘在透射光下为透明的红色、橙色(图 1d、1e、1f)。球壳厚度越大,红色表层越薄,反之,红色表层越厚(图 1d、1e、1f);从球核往外,片状、板状晶体由小增大,球壳的板体绕球核大致呈放射状排列,晶体的 c 轴的取向(垂直板平面)绕球核基本呈圆环状,但表层片状晶体的 c 轴大致与球核中线平行,即 $\{0001\}$ 板面与球核中线垂直(图 1j、1k)。

条带状水晶中的间歇层面上的红色点状颗粒也呈不同颜色、不同圈层的球粒(图 1c),但球粒的粒径多为 $10\sim 20\text{ }\mu\text{m}$,且圈层发育不全,多数只有两个圈层,即红色的球核与铁黑色的外圈。

4.1.2 红色管状形貌

红色管状包裹体产出在条带状水晶的晶体中,管的长轴方向垂直水晶的菱面体单形晶面方向或间歇层(图 1c、1h、1i),SEM 表明,每个管都是由垂直管的长轴方向的宽窄不一的层纹圈构造堆叠组成的,管的内圈为铁黑色片状晶体,外圈为厚度不一的红棕色赤铁矿,形成所谓的“外红内黑”的圈层构造(图 1c、1h、1i)。

4.2 球与管的微区 X 射线衍射与电子探针(EP-MA)分析

将测试样品加工成光薄片,在中南大学谷湘平教授实验室对球、管进行微区 X 射线衍射分析。仪器:日本理学公司产的 Rigaku D/Max Rapid II R 型 X 射线衍射仪,测试条件:电压 45 kV ,电流 45 mA , $\text{CuK}\alpha 2\theta=5^\circ\sim 160^\circ$,步长 $2\theta=0.045^\circ$ 。对红色点状球粒从球粒中心(球核)往外的球壳及表层依次进行微区 X 射线衍射分析(图 1e、1f 及图 2),结果表明中心球核及球壳与表层的物相均为赤铁矿(图 3a、表 1、表 2),其空间群: $R\bar{3}c$,晶胞参数(球壳-1): $a=0.50322\text{ nm}$, $c=1.3725\text{ nm}$,与 JCPDS33-0664 号

卡吻合。扫描电镜(SEM)的背散射电子图像(SEM/SELA)(图 3b)显示球粒的各圈层的亮度是一致的,进一步证明了各圈层的成分是完全相同,即各圈层的物相都是赤铁矿。

表 2 中赤铁矿球粒从球核往外,其晶胞参数 a 值逐渐变小,而 c 值则有逐渐增大趋势,这种变化规

律可能与赤铁矿的成分差异有关(表 3),表 3 中电子探针成分表明,从球核中心至表层,其 V_2O_5 含量有明显的增加。据扫描电镜(SEM)对赤铁矿球粒的不同圈层微形貌的研究(图 1j、1k),从球核至表层,片状赤铁矿(镜铁矿)的片状、板状晶体由小增大,赤铁矿的 c 轴,即垂直赤铁矿的 $\{0001\}$ 方向绕球核基本

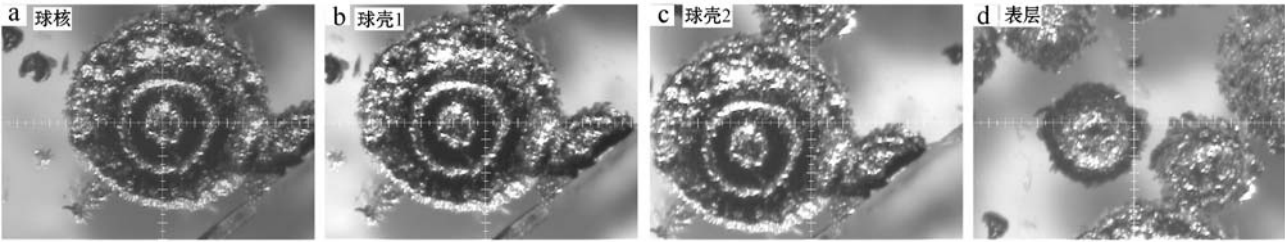


图 2 衍射样品的显微照片

Fig. 2 Microphotographs of diffraction samples

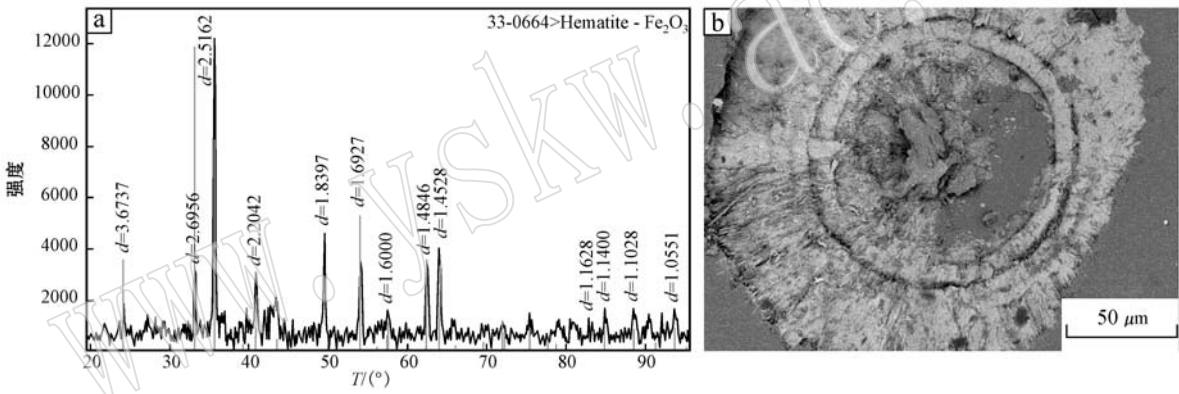


图 3 赤铁矿的微区 X 射线衍射图(a)和球粒各圈层的背散射电子图像(b)

Fig. 3 Micro-XRD pattern of hematite (a) and backscattered electrons image of different circle layers for red peloids (b)

表 1 赤铁矿的晶体衍射数据

Table 1 X-ray crystal diffraction data for hematite

2θ	$d/\text{\AA}$	I/I_0	hkl
24.207	3.673 7	11.4	012
33.208	2.695 6	22.4	104
35.653	2.516 2	100	110
40.909	2.204 2	20.5	113
49.504	1.839 7	36	024
54.137	1.692 7	26.6	116
57.557	1.600 0	8.3	018
62.508	1.484 6	25.6	214
64.039	1.452 8	31.8	113
75.469	1.258 6	7.5	220
85.012	1.140 0	10.1	204
88.609	1.102 8	9.1	226
93.783	1.055 1	9.5	2110

测试者：中南大学谷湘平。

表 2 红色球粒不同圈层的晶胞参数

Table 2 Crystal cell parameters of different circle layers for red peloids

圈层	a/nm	c/nm	备注
球核	0.503 25	1.370 8	棕红色
球壳-1	0.503 22	1.372 5	钢灰色
球壳-2	0.503 00	1.373 8	钢灰色
球壳-3	0.502 80	1.372 5	钢灰色
表层	0.502 50	1.372 9	大红色、透明片状

测试者：中南大学谷湘平。

呈圆环状,但表层的鳞片状晶体的 c 轴大致与球核中线平行,即 $\{0001\}$ 板面与球核中线垂直。不同圈层的片状赤铁矿的排列取向的明显差异可能与晶体的 a 值(表 2)的大小有关。

表 3 赤铁矿化学成分 EPMA 的分析结果

$w_B/\%$

Table 3 EPM analyses of hematite									
氧化物	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	TiO ₂	V ₂ O ₅	FeO	CuO	SrO
球核	0.039	0.122	1.050	0.160	0.000	0.000	86.763	0.000	0.000
球壳	0.010	0.075	0.930	0.256	0.000	0.015	87.746	0.025	0.002
表层	0.000	0.308	0.374	0.069	0.000	0.055	84.385	0.000	0.000
表层	0.033	0.303	0.448	0.045	0.001	0.062	81.641	0.035	0.038

测试者：成都地质矿产研究所徐金沙。

4.3 红色球粒与管的红外光谱

按球粒与管的不同颜色将样品进行红外光谱测试。测试是在美国 Nicolet 公司 iS10 型傅里叶变换红外光谱分析仪上进行,测试条件为:溴化钾压片法;测试波数范围4 000~400 cm^{-1} ,由桂林理工大学化生学院阮乐老师完成。测试结果表明(图 4),样品的红外光谱图的1 010 cm^{-1} 、533 cm^{-1} 、463 cm^{-1} 等与赤铁矿标准图谱基本一致(彭文世等,1982),与微区 X 射线衍射分析相一致(表 1、图 3a),证明所测试样品为赤铁矿。与标准图谱(彭文世等,1982)的差异在吸收光谱曲线中出现1 637 cm^{-1} 、1 400 cm^{-1} 、1 384 cm^{-1} 等 3 个吸收峰(图 4、5),其中1 637 cm^{-1} 、1 400 cm^{-1} 为 C=O 键的振动吸收峰,1 384 cm^{-1} 为一 CH_3 对称变角振动(剪式振动)吸收峰(徐惠生,2007; 边岩庆等,2010; 李炜光等,2012)。显示赤铁矿球粒与管结晶时存在有机质的组成。与球粒状、管状赤铁矿共生的绿帘石(图 1b、1c、1d)的红外光谱(图 6)与 EPMA 成分(表 4)测试,显示绿帘石的红外光谱与标准图谱基本一致(彭文世等,1982),但在图谱中也出现1 632 cm^{-1} 、1 400 cm^{-1} 、1 384 cm^{-1} 等 3 个吸收峰,且绿帘石的 EPMA 成分中 SrO 含量高(表 4)。与绿帘石、铁球粒、管共生的水晶晶体中的

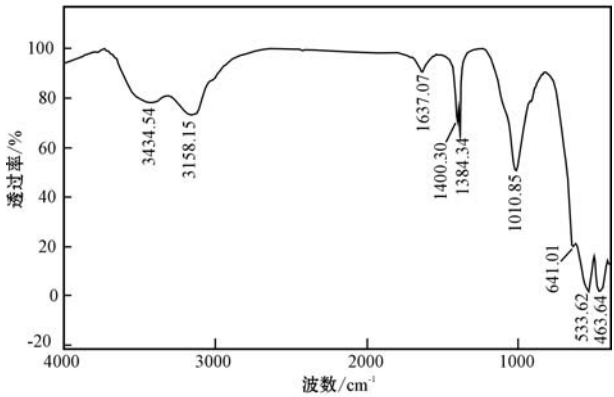


图 4 赤铁矿红外吸收光谱
Fig. 4 Infrared absorbed spectra of hematite

流体包裹体的均一温度及拉曼光谱的分析结果[图 7 (测试单位:南京大学地球科学系内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室激光拉曼光谱探针室),表 5],显示气液包裹体中含有 SO_2 、 CH_4 组成。综合测试结果都表明球粒状、管状赤铁矿结晶时存在有机质的参与。

5 几点认识

- (1) 瓦西川南红玉中红色点状、火焰纹分别由石英晶体中红色球粒与红色管状包裹体所致。
- (2) 红色球粒包裹体具有不同颜色的圈层结构,即由暗红色球核及钢灰色球壳与大红色表层组成,或称红夹黑的 3 圈层结构;红色管状包裹体是由内黑外红的两圈层结构组成。表层或外圈的颜色厚度与透光性直接影响瓦西南红玉的颜色质量与润泽性。
- (3) 镜下及微区 X 射线衍射、背散射电子图像与红外光谱研究,表明红色球粒、红色管状的不同颜色的圈层成分都属于赤铁矿(镜铁矿)成分的晶体结构,其形貌均为片状、鳞片状或板片状。
- (4) SEM 观察,显示红色球粒的不同圈层的片状赤铁矿(镜铁矿)晶体 c 轴取向不同,即由球核至表层,镜铁矿的 c 轴由绕球核呈环状取向与球核中线平行的取向,不同圈层镜铁矿晶体的 c 轴取向的差异可能与晶胞参数 a 值变化规律有关,而 a 值的大小可能又与成分中的 V_2O_5 的含量有关。
- (5) 根据水晶晶体中流体包裹体的均一化温度及水晶晶体中红色球粒、红色管与板状自形晶绿帘石、黄铜矿共生的包裹体,表明红色球粒与红色管状包裹体为低温(约 160℃)热液成因。
- (6) 根据水晶晶体中的红色球粒与绿帘石包裹体的红外光谱、绿帘石的 EPMA 成分中的 SrO 含量以及水晶晶体中流体包裹体的拉曼探针分析,一致显示含铁的成矿溶液中含有机质(原油),这种有机质可能来自玄武岩下伏的茅口灰岩的生油层。

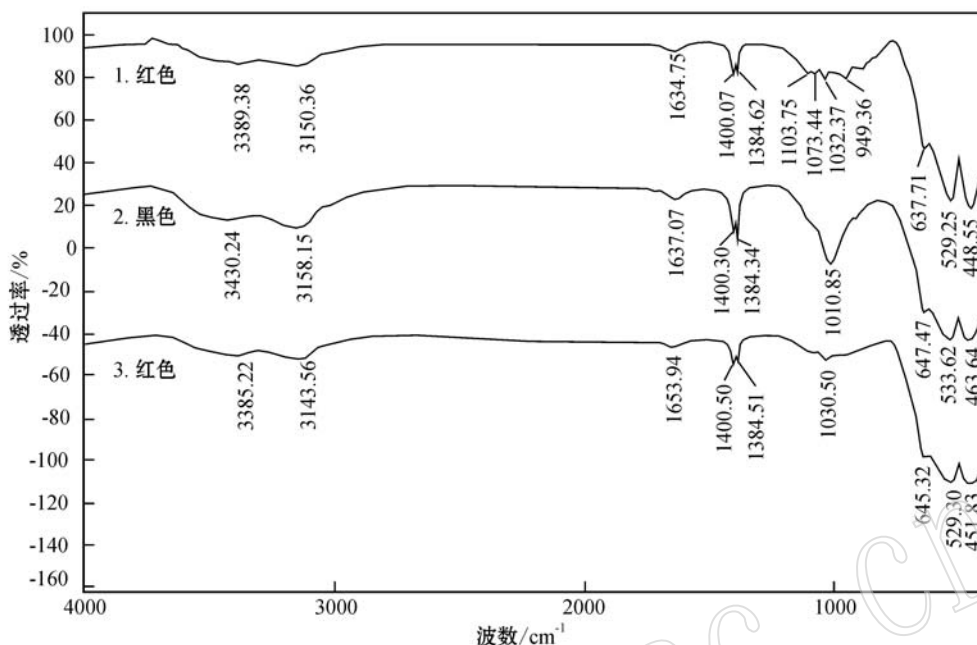


图 5 赤铁矿红外吸收光谱

Fig. 5 Infrared absorbed spectra of hematite

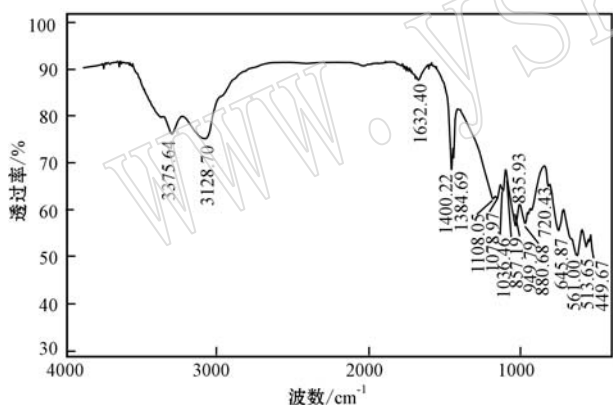


图 6 绿帘石的红外吸收光谱

Fig. 6 Infrared absorbed spectra of epidote

(7) 球粒中的不同圈层间的间歇层,表明赤铁矿球粒生长不是连续一次生长而成,而是经历多次反复时长时停而形成的。从球核至表层,赤铁矿的

圈层厚度由薄逐步增厚,赤铁矿的板片状晶体由小渐大,表明热动力环境由相对不稳定转变为相对稳定,赤铁矿生长速度相应由较快转变为较慢,同时也显示成矿热液的过饱和度由极高向高过饱和度演化。赤铁矿的自形板状晶形及{0001}单形晶面上的3组交棱的晶面花纹,表明赤铁矿球粒的各圈层的赤铁矿晶体是以层生长机制为主。3圈层构造的球粒是其环境条件的氧逸度及温度曾多次反复交替变化所致。球粒与管都是在低温、强酸性、氧逸度高的环境条件下形成。

(8) 三色层水晶中的矿物共生组合,表明矿物的生成顺序依次是:紫色水晶→不同颜色圈层的赤铁矿(镜铁矿)球粒→绿帘石→黄铜矿→无色透明水晶。也显示成矿环境经历由氧化→还原→氧化多次演变的转化。三色层水晶不是一次成矿作用的产物,而是经历了多次结晶作用。

表 4 绿帘石化学成分 EPMA 的分析结果

$w_B/\%$

Table 4 EPM analyses of epidote

氧化物	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	SrO	FeO	Al ₂ O ₃	MnO	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	总量
Mg-1	22.643	0.008	0.002	0.006	0.543	17.783	20.097	0.053	37.325	0.020	98.480
Mg-2	22.091	0.021	—	0.005	1.094	19.316	18.461	0.116	36.917	0.006	98.027
Mg-3	22.812	0.033	—	0.013	0.579	18.064	20.292	0.002	37.593	0.024	99.416
Mg-4*	22.328	0.033	0.298		0.494	17.590	17.783		39.294	0.024	98.049

测试者:成都地质矿产研究所徐金沙,*为桂林理工大学测试。

表 5 与绿帘石及铁球粒、管共生的石英晶体中两相流体包裹体的测温数据及盐度

Table 5 Measured temperature data and salinities of two phase fluid inclusions in quartz coexistent with epidote and iron spherulite and tube

编号	包裹体类型	点号	气液比	完全均一温度 $t_h/^\circ\text{C}$	盐度 $w(\text{NaCl})/\%$	备注
CM-1	L + V	1	10 %	160	13.72	三色层水晶
	L + V	2	5 %	165	13.18	
	L + V	3	5 %	150	12.62	
	L + V	4	5 %	158	12.58	
平均				158.25	13.03	
CM-5	L + V	1	10 %	145.2	5.71	条带状水晶
	L + V	2	5 %	158.5	6.16	
	L + V	3	5 %	171.5	6.30	
平均				158.4	6.06	

测试单位: 南京大学地球科学系内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室流体包裹体室。

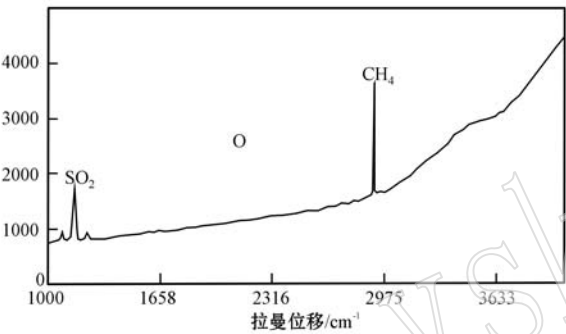


图 7 水晶晶体中流体包裹体的激光拉曼光谱图

Fig. 7 Laser Raman spectra of fluid inclusions in rock crystal

(9) 含铁成矿溶液中的有机质有利于铁氧化物的活化、扩散迁移与凝聚作用, 成矿溶液中的有机质也是促使铁氧化物凝聚形成具不同圈层结构的红色球粒与管的主要原因。根据作者对川南及滇东北峨眉山玄武岩中的晶洞及杏仁体中的球粒状矿物的研究, 认为川南雷波的球粒状绿帘石、普格的铜球粒、球粒沥青与球粒状葡萄石以及云南昭通的球粒状葡萄石、铁绿纤石与铜球粒等矿物的球粒形貌形成与成矿溶液中的有机质有关, 因为这些球粒形貌矿物的地质产出中的绿帘石成分中普遍含较高的 SrO 及水晶晶体中流体包裹体中含有 CH_4 (甲烷) 与沥青 (张良钜等, 2009, 2010, 2013)。

(10) 川南普格玄武岩晶洞的水晶晶体中共同产出自然铜、沥青及富含甲烷(CH_4)的流体包裹体, 研究认为水晶晶体中的沥青包裹体是含铜成矿热液中的有机质(原油)受热裂解(约 300°C)而成(张良钜等, 2013)。而瓦西水晶晶体中只产出球粒状或管状赤铁矿(镜铁矿)及 CH_4 (甲烷)包裹体, 而未见沥青包裹体, 这可能与成矿热液的温度较低(约 160°C)有

关, 因为温度较低($<200^\circ\text{C}$), 有机质(原油)的成熟度低, 有机质难以裂解出难溶物质沥青。

(11) 川南红的紫红色或红色偏紫是“三色”构造层水晶中的红色夹层(厚约 $0.5\sim0.8\text{ mm}$)中的红色点状颗粒与水晶的淡紫色的共同作用的综合效应。

References

Bian Yanqing and Tao Wen. 2010. The molecular structure changes of resin and asphaltene during the degradation of crude oil[J]. Journal of Yangtze University(Nat. Sci. Edit), 7(1): 177~179(in Chinese with English abstract).

Fu Jiamo, Wang Benshan, Shi Jiyang, *et al.* 1983. Evolution of organic matter and origin of sedimentary ore deposits-(1) origin and evaluation of crude oil and gas[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1(3): 51~57(in Chinese with English abstract).

Li Shengqing, Zhang Yicheng, Zu Endong, *et al.* 2014. Gemmological characteristics of Nanhong agate[J]. Journal of Gems and Gemmology, 16(3): 46~51(in Chinese with English abstract).

Li Weiguang, Duan Yanhong, Yan Luke, *et al.* 2012. Study on measuring method of asphalt use infrared spectrum characteristic of petroleum pitch[J]. Petroleum Asphalt, 26(4): 9~14(in Chinese with English abstract).

Peng Wenshi and Liu Gaokui. 1982. ERD Picture Collection of Mineral [M]. Beijing: Science Publishing House, 94, 97, 15, 352(in Chinese).

Wang Pu, Pan Zhaolu, Weng Lingbao, *et al.* 1992. Systemetic Mineralogy(1)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 422~423(in Chinese).

Xu Huisheng. 2007. The analysis of infrared spectrum for modified asphalt[J]. Anhui Zhang Liangju, Rao Can, Ruan Qingfeng, *et al.* 2010. The struture and genesis of epidote grains[J]. Acta Miner-

- ologica Sinica, 30(2): 174~178(in Chinese with English abstract).
- Zhang Liangju, Rao Can, Ruan Qingfeng, *et al.* 2010. The structure and genesis of epidote grains[J]. Acta Mineralogica Sinica, 30(2): 174~178(in Chinese with English abstract).
- Zhang Liangju, Rao Can, Zhang Changlong, *et al.* 2008a. Research on the mineralization and composition of the rock crystal mineral deposit in basalt of Meigu, Sichuan[J]. Journal of Guilin University of Technology, 28(3): 289~294(in Chinese with English abstract).
- Zhang Liangju, Rao Can, Zhang Changlong, *et al.* 2008b. The shape texture feature and genesis of pelletoidal and tubular iron oxides inclusion in Rock crystals[J]. Geological Review, 54(6): 731~737 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Liangju, Rao Can, Zhang Changlong, *et al.* 2009. The morphological textural features and genesis of pelletoidal pumpellyite(Fe^{2+}) [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 28(1): 45~50 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Liangju, Zeng Nanshi, Ruan Qingfeng, *et al.* 2013. Study on the genesis and characteristics of micro-morphologies for bitumen in amygdaloidal basalt at Southern Sichuan-Northern Yunnan area[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 32(4): 523~528 (in Chinese with English abstract).
- 边岩庆, 陶文. 2010. 石油的微生物降解过程中胶质沥青质的分子结构变化[J]. 长江大学学报(自然科学版), 7(1): 177~179.
- 傅家谟, 汪本善, 史继扬, 等. 1983. 有机演化与沉积矿床成因(I)——油气成因与评价[J]. 沉积学报, 1(3): 51~57.
- 李圣清, 张义丞, 祖恩东, 等. 2014. 南红玛瑙的宝石学特征[J]. 宝石和宝石学杂志, 16(3): 46~51.
- 李炜光, 段炎红, 颜录科, 等. 2012. 利用石油沥青红外光谱图谱特征测定沥青的方法研究[J]. 石油沥青, 26(4): 9~14.
- 彭文世, 刘高魁. 1982. 矿物红外光谱图集[M]. 北京: 科学出版社.
- 王濮, 潘兆枢, 翁玲宝, 等. 1982. 系统矿物学(上)[M]. 北京: 地质出版社, 422~423.
- 徐惠生. 2007. 改性沥青红外光谱分析[J]. 安徽化工, 33(1): 62~64.
- 张良钜, 饶灿, 阮青锋, 等. 2010. 球粒状绿帘石的结构特征与成因[J]. 矿物学报, 30(2): 174~178.
- 张良钜, 饶灿, 张昌龙, 等. 2008a. 四川美姑玄武岩水晶矿床的组成与成矿作用[J]. 桂林理工学院学报, 28(3): 289~294.
- 张良钜, 饶灿, 张昌龙, 等. 2008b. 水晶晶体中的球粒状与管状铁氧化物包裹体的形貌结构与成因[J]. 地质论评, 54(6): 786~791.
- 张良钜, 饶灿, 张昌龙, 等. 2009. 球粒状铁绿纤石的形貌结构特征与成因[J]. 岩石矿物学杂志, 28(1): 45~50.
- 张良钜, 曾南石, 阮青锋, 等. 2013. 川南滇北交界处杏仁状玄武岩中的沥青微形貌特征与成因研[J]. 岩石矿物学杂志, 32(4): 523~528.

附中文参考文献