

“昌化田黄石”的结构和成分研究

钱雪雯¹, 何雪梅²

(1. 上海建桥学院 艺术设计系, 上海 201319; 2. 中国地质大学 珠宝学院, 北京 100083)

摘要: 采用电子探针、扫描电镜、X射线粉晶衍射、红外光谱分析、热重分析、X射线能谱分析、激光拉曼光谱分析等测试方法对“昌化田黄石”样品的结构和成分进行了研究,并结合寿山田黄石进行对比,结果表明“昌化田黄石”样品主要以隐晶质结构、块状构造为主,主要矿物组成为地开石,并含有部分高岭石、高岭石-地开石的过渡物和微量明矾石,其成分和结构与寿山产田黄石基本一致。因此,本文提出了对田黄石定义的建议,即凡产于坡积层或田坑中,具有“细、洁、润、腻、温、凝”之“六德标准”且主要由地开石等高岭石族矿物组成的透有黄色调的块状独石均可称为田黄石。

关键词: 昌化; 田黄石; 结构; 成分

中图分类号: P619.28⁺3; P579

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)S0-0111-08

A study of structure and composition of Tianhuang Stone from Changhua

QIAN Xue-wen¹ and HE Xue-mei²

(1. Shanghai Jianqiao College, Shanghai 201319, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Using such means as EMPA, SEM, XRD, IR, TG, XEDS and RAMAN, the authors studied the structure and composition of Tianhuang Stone from Changhua. The results show that the samples are dominated by cryptocrystalline texture and massive structure. The main minerals include dickite, kaolinite, and transitional minerals of kaolinite, dickite and alunite. The structure and composition are quite similar to those of Tianhuang stone from Shoushan. It is held that the yellowish massive stones which are composed of such kaolinite-group minerals as dickite, produced in slope wash materials and paddy fields, and consistent with six morality standards can be called Tianhuang Stone without exception.

Key words: Changhua; Tianhuang Stone; structure; composition

“昌化田黄石”是昌化石之新秀,因对于“昌化田黄石”能否被称为田黄石在业内仍存在争议,因此本文称其为“昌化田黄石”。

1 样品及其结构构造

样品采自浙江昌化康山岭北坡的昌化鸡血石样品矿区,手标本观察多呈黄色,整体质地细腻,蜡状光泽,少量表面分布鸡血(图1中CH04、CH05),鸡血通常呈脉状、块状产出,亦可见部分样品表面分布

“石皮”(图1中CH01、CH02、CH05、CH06)、“萝卜纹”(图1中CH03、CH04)和“红筋”(图1中CH04、CH06)。

样品在显微镜下观察多呈显微隐晶质结构(图2a),部分可见显微粒状结构(图2b)或鳞片变晶结构(图2c)。

样品在扫描电镜下观察(由北京科技大学材料与工程学院实验测试中心薛润东测试),整体呈不定型(图3a)或假六方片状、板状(图3b),色皮和辰砂主要呈鳞片状结构(图3c和3d),鳞片大小为0.2~5 μm,

收稿日期: 2011-05-25; 修订日期: 2011-07-11

作者简介: 钱雪雯(1984-),女,硕士,助教,宝石学专业,主要从事宝石专业的教学和研究工作, E-mail: qianxuewen0301@163.com;

通讯作者: 何雪梅(1964-),女,副教授,硕士生导师,主要从事与珠宝玉石相关专业的教学和科研工作, E-mail: Hexuemei@cugb.edu.cn.



图1 “昌化田黄石”样品手标本照片

Fig. 1 Photo graphs of Tianhuang Stone from Changhua

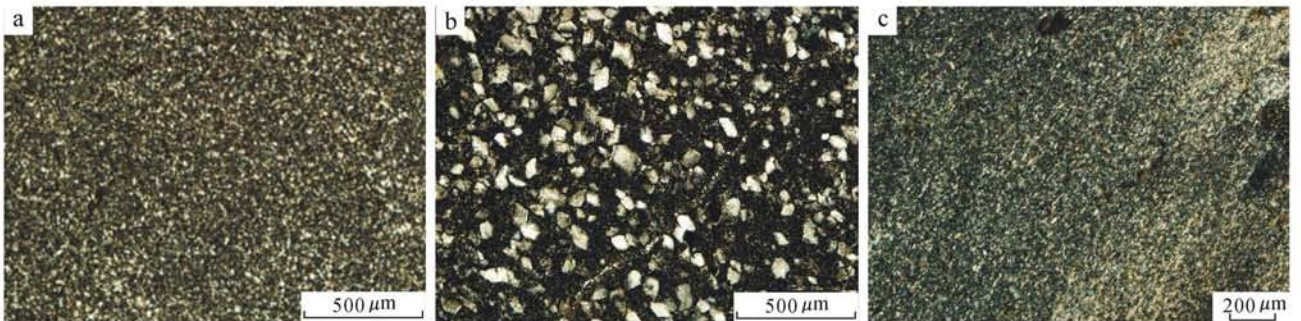


图2 “昌化田黄石”样品的正交偏光显微照片

Fig. 2 Micrographs of Tianhuang Stone from Changhua under crossed nicols

厚度为 $0.05 \sim 2 \mu\text{m}$ 。样品主要为块状(图1中 CH01、CH02、CH03)、斑状(图1中 CH04、CH05)和脉状(图1中 CH06)构造,以块状构造为主。

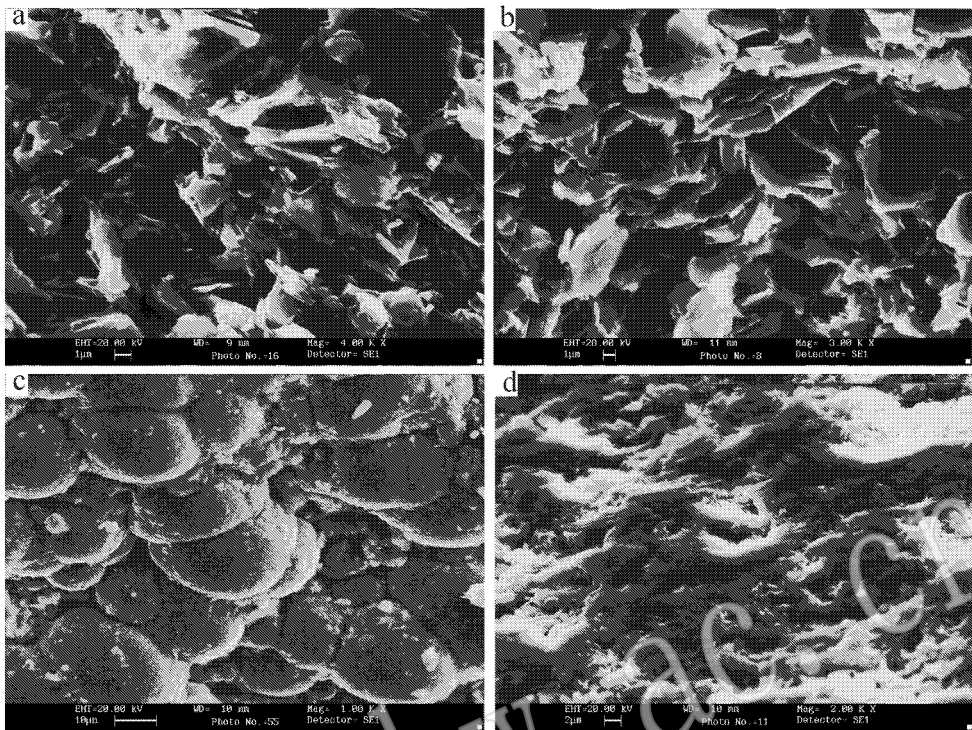


图3 “昌化田黄石”样品的扫描电镜照片

Fig. 3 SEM images of Tianhuang Stone from Changhua

2 成分分析

2.1 电子探针成分分析

选取具有代表性的样品(CH01、CH02、CH03、

CH04、CH06)进行电子探针成分分析,测试在中国地质大学(北京)电子探针实验室完成,仪器型号为EPMA-1600,加速电压15 kV,电流 7×10^{-8} A,电子束斑 $1 \mu\text{m}$,测试结果见表1。

表1 “昌化田黄石”样品电子探针分析结果

 $w_B/\%$

Table 1 Electron microprobe analyses of Tianhuang stone from Changhua

样品	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MnO	FeO	K ₂ O	Na ₂ O	总量
CH01	46.92	37.94	0.07	0.00	0.10	0.00	0.55	0.23	85.92
CH02	47.64	38.67	0.08	0.00	0.11	0.00	0.15	0.21	86.85
CH03	46.52	38.85	0.07	0.00	0.00	0.10	1.03	0.19	86.76
CH04	46.52	39.32	0.01	0.00	0.03	0.00	0.08	0.23	86.19
CH06	46.73	39.63	0.03	0.00	0.01	0.00	0.23	0.24	86.87

通过电子探针成分计算所得的“昌化田黄石”样品中的主要矿物的晶体化学式(表2)与理论的高岭石族矿物的晶体化学式 $\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2]$ 基本吻合,因此“昌化田黄石”样品的主要矿物组成为高岭石族矿物。从化学式可知高岭石族矿物存在类质同像替代,常有少量的Mn、Ti、Fe等替代八面体配位中的Al,Al代Si的数量通常很低,多为机械混入物。矿物中含有K元素,可能是因为钾长石蚀变成高岭石族矿物时的部分残留。

2.2 X射线粉晶衍射分析

选取样品(CH01、CH03、CH05、CH06)在中国地质大学(北京)X射线衍射实验室进行了X射线粉晶衍射分析,仪器型号为D/MAX-RC,工作条件:Cu-K α 1辐射,电压40 kV,电流80 mA,连续扫描。由X射线粉晶衍射的分析数据(图4、表3)可知,样品的主要组成矿物为地开石。高岭石族矿物典型的X射线衍射图 $d_{001} = 7.15 \text{ \AA}$, $d_{002} = 3.56 \sim 3.58 \text{ \AA}$, $d_{003} = 2.38 \text{ \AA}$ 。高岭石和地开石同为高岭石族矿物的主

表 2 “昌化田黄石”样品高岭石族矿物晶体化学式

Table 2 Chemical formula of Tianhuang stone from Changhua

样品	晶体化学式
CH01	$(Al_{3.849}Na_{0.038}K_{0.061}Mn_{0.007}Ti_{0.005})_{\Sigma 3.96}[Si_{4.039}O_{10}(OH)_2]$
CH02	$(Al_{3.881}Na_{0.035}K_{0.016}Mn_{0.008}Ti_{0.005})_{\Sigma 3.94}[Si_{4.005}O_{10}(OH)_2]$
CH03	$(Al_{3.844}Na_{0.032}K_{0.112}Fe_{0.007}Ti_{0.005})_{\Sigma 4.00}[Si_{3.953}Al_{0.047}O_{10}(OH)_2]$
CH04	$(Al_{3.950}Na_{0.038}K_{0.009}Mn_{0.002}Ti_{0.0005})_{\Sigma 4.00}[Si_{3.983}Al_{0.017}O_{10}(OH)_2]$
CH06	$(Al_{3.934}Na_{0.040}K_{0.024}Mn_{0.0005}Ti_{0.0002})_{\Sigma 4.00}[Si_{3.968}Al_{0.032}O_{10}(OH)_2]$

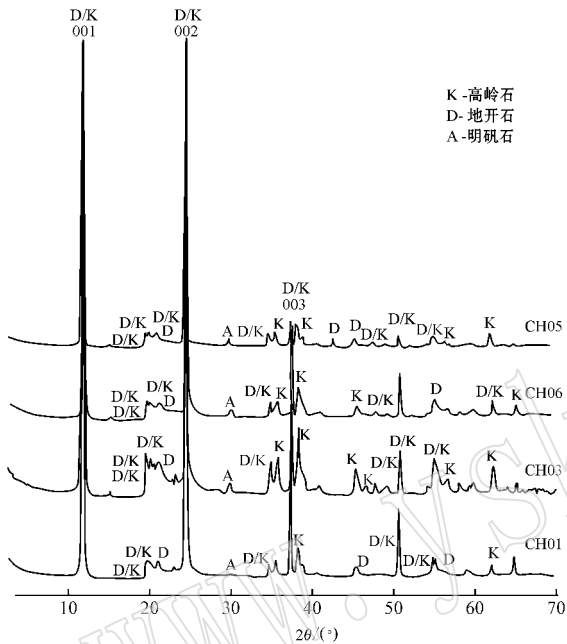


图 4 “昌化田黄石”样品的 X 射线粉晶衍射图

Fig. 4 XRD patterns of Tianhuang stone from Changhua

要成员,其化学成分相同,但层的堆叠方式不同,两者主要区别是 X 射线谱线中 2θ 角在 $19^\circ \sim 24^\circ$ 之间,地开石具有 3.95、3.79 的特征衍射峰,而高岭石则没有。在 $35^\circ \sim 40^\circ (2\theta)$ 之间,高岭石有 6 个衍射峰,分别以两个“山”字型出现;地开石则只有 4 个衍射峰,分别以两个“指”字型出现(汤德平,1999)。由此可判断样品主要由地开石组成,另外从 X 射线粉晶衍射图可知存在有高岭石的特征峰,因此判断样品还含有部分高岭石以及高岭石-地开石的过渡物,同时还可可见明矾石的特征峰。

Hinckley 结晶指数 $HI_k = (I_{1\bar{1}0} + I_{11\bar{1}}) / I_{1\bar{1}0}$ 可以反映高岭石的有序度,但是本文样品均以地开石为主,因此选取 (110) 、 $(11\bar{2})$ 晶面衍射峰计算结晶指数 $HI_D = (I_{110} + I_{11\bar{2}}) / I_{110}$ 即 $HI_D = (h_1 + h_2) / h$ (图 5),计算可得“昌化田黄石”样品中地开石的结晶指数主要为 0.5~1.3 之间,属于较无序-有序。

2.3 热重分析

在中国地质大学(北京)矿物岩石材料国家专业实验室对 4 个样品(CH01、CH03、CH05、CH06)进行了差热和热重测试,仪器型号为 UDT 热分析仪,工作气氛为空气,流量为 30 mL/min,升温速度为 10 K/min。

图 6 显示了样品的失重曲线在 $440 \sim 500^\circ\text{C}$ 之间均具失水现象,此主要为结构水,其中 3 个样品在 440°C 之前存在有少量的失水现象(表 4),这主要是因为样品中含有吸附水,这种形式的水含量最多可达 11.05%(杨雅秀等,1994)。存在此种水与样品所在的潮湿环境有关。

2.4 红外光谱分析

石皮是田黄石的一大特征,本文对肌理和不同颜色的“昌化田黄石”样品石皮进行了红外光谱测试,本次试验是在中国地质大学(北京)宝石检测中心完成,仪器名称:傅立叶变换红外光谱仪;仪器型号 V33;分辨率 4 cm^{-1} ;扫描范围 $4000 \sim 400\text{ cm}^{-1}$,电压 220~240 V,频率 50~60 Hz;功率 250 W。具体测试图谱见图 7。4 条谱线分别代表了样品的肌理、黑皮(乌鸦皮)、白皮、黄皮的红外光谱图。对照高岭石族矿物红外光谱图的整体特征以及表 5 其主要吸收带的归属,可以断定“昌化田黄石”样品的肌理与不同颜色的石皮均是高岭石族矿物。

观察红外光谱高频区的谱线特征,样品在 $3700 \sim 3600\text{ cm}^{-1}$ 之间有 3 个分裂的吸收峰,其峰值极其相似,均在 3693 、 3650 和 3619 cm^{-1} 左右,且强度从高频至低频依次增大,同时 OI (有序度指数) = H_1 / H_2 (H_1 表示 3700 cm^{-1} 吸收峰的强度, H_2 表示 3620 cm^{-1} 吸收峰的强度)比值在 0.772 7~0.944 2,因此样品主要为地开石。但是谱线仍存在有些微的差别,其中黑色的石皮(乌鸦皮)和黄色的石皮的谱峰强度从 $3693\text{ cm}^{-1} \pm$ 到 $3619\text{ cm}^{-1} \pm$ 依次增大,为典型的地开石;白色的石皮和肌理表现出强的 3619 cm^{-1} 和次强的 3693 cm^{-1} ,说明两者地开石的有序度降低,因为当地开石的有序度降低, 3700 cm^{-1} 的峰增强, 3620 cm^{-1} 的峰减弱,直至两者的强度相等(杨志琼等,1988;杨雅秀等,1994)。这大概是因为黑色的石皮(乌鸦皮)和黄色的石皮风化比较完全,地开石的颗粒比较完整,而肌理则因含有高岭石和高岭石-地开石的过渡物使其谱峰受到一定的影响,白色的石皮可能因为风化作用受到一定的影响,因此有序度降低。并且通过计算 OI 数

表 3 “昌化田黄石”样品中高岭石族矿物的 XRD 数据
Table 3 XRD data of Tianhuang stone from Changhua

高岭石 (Brindley and Brown, 1980)			地开石 (Bailey, 1963)			CH01		CH03		CH05		CH06	
<i>hkl</i>	<i>d/Å</i>	<i>I/I₀</i>	<i>hkl</i>	<i>d/Å</i>	<i>I/I₀</i>	<i>d/Å</i>	<i>I/I₀</i>	<i>d/Å</i>	<i>I/I₀</i>	<i>d/Å</i>	<i>I/I₀</i>	<i>d/Å</i>	<i>I/I₀</i>
001	7.16	100	002	7.152	100	7.144	100	7.167	100	7.144	100	7.165	100
020	4.46	40	020	4.44	230			4.454	4	4.454	2	4.458	6
110	4.36	50	110	4.36	230	4.358	2	4.350	4	4.371	2	4.354	6
			021	4.264	20								
111̄	4.18	50	112̄	4.119	65	4.114	1	4.126	2	4.126	2	4.118	6
			111	3.954▲	10								
021̄	3.845★	40											
021	3.741	20	022	3.790▲	55	3.799	1						
002	3.573	100	004	3.578	90	3.576	96	3.579	78	3.573	95	3.579	89
			023	3.261▲	8								
112̄	3.144★	30											
			024	2.794▲	10								
130	2.558	60	202̄	2.558	35	2.557	1	2.562	4	2.557	2	2.562	6
131̄	2.526★	40						2.532	2				
			200	2.505▲	50								
200	2.491	80						2.495	4	2.491	2	2.498	6
003	2.379	60	006	2.386	15	2.385	11	2.385	9	2.382	10	2.384	10
131	2.338★	90				2.331	2	2.339	7	2.333	4	2.338	9
			132	2.324▲	95								
131̄	2.288★	80											
			026	2.104	5						2.101	4	
203̄	1.989★	60						1.992	3	1.989	2	1.987	4
			134	1.974▲	40	1.974	1						
132	1.939	40	225̄	1.937	5			1.944	1				
133̄	1.896	30	044	1.896	10			1.895	2	1.891	1	1.897	2
004	1.781	40	008										
				1.790	10	1.789	5	1.789	5	1.787	5	1.788	5
			118̄										
133̄	1.662	70	240	1.668	10	1.662	2	1.663	4	1.660	2	1.661	4
			136	1.650▲	50	1.651	2						
133	1.619★	60						1.621	2			1.623	3
			137										
				1.556▲	20								
			208̄										
313̄	1.542★												
060	1.489★	30				1.487	2	1.486	2	1.488	2	1.490	5

注：表中★代表高岭石 ▲代表地开石。

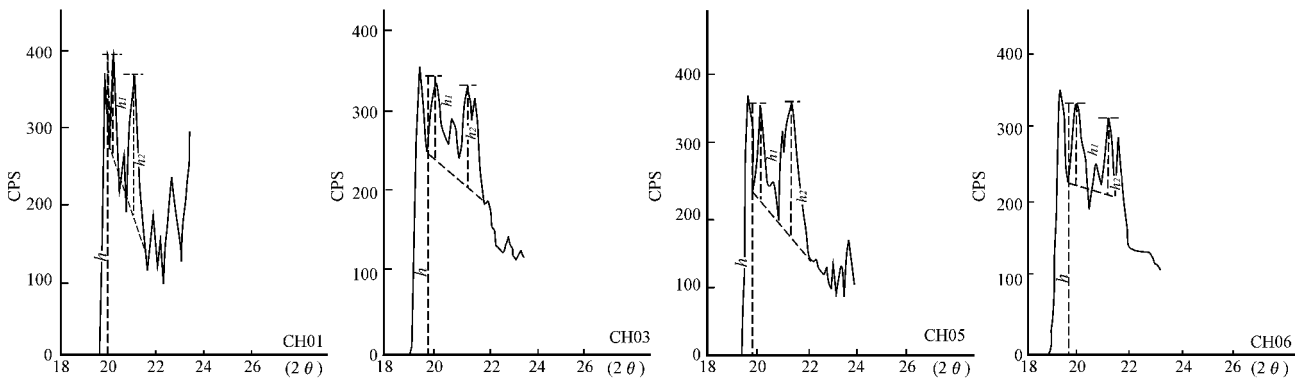


图 5 “昌化田黄石”样品结晶指数的计算方法图例

Fig. 5 Calculation of HI of Tianhuang Stone from Changhua

表 4 “昌化田黄石”样品的失重率

Table 4 TG rate of Tianhuang Stone from Changhua

样品号	温度	失重率
CH01	0~440℃	2.32%
	440~500℃	11.52%
CH03	0~440℃	0.00%
	440~500℃	11.59%
CH05	0~440℃	2.02%
	440~500℃	11.70%
CH06	0~440℃	1.98%
	440~500℃	11.29%

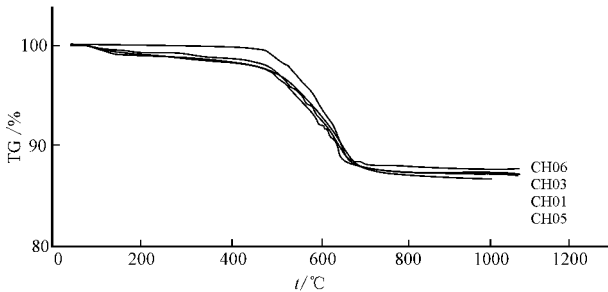


图 6 “昌化田黄石”样品的失重曲线图

Fig. 6 TG patterns of Tianhuang Stone from Changhua

表 5 “昌化田黄石”样品红外光谱主要吸收谱带及其归属

Table 5 IR absorption bands and their attribution of Tianhuang Stone from Changhua

谱带归属	肌理	黑皮(乌鸦皮)	白皮	黄皮
Al—OH 伸缩振动	3 693	3 696	3 693	3 694
	3 650	3 650	3 650	3 648
	3 619	3 619	3 619	3 621
Si—O 振动	1 114	1 114	1 114	1 116
	1 087	1 089	1 083	1 083
Si—O—Si 振动	790	792	792	794
	1 039	1 033	1 043	1 029
Si—O—Al 振动	1 002	1 002	1 002	1 000
	752	750	752	752
	686	690	688	688
Al—OH 弯曲振动	536	538	538	538
	929	933	925	925
Si—O 弯曲振动	912	912	912	912
	468	470	470	470
	428	426	428	430

值,也可以发现石皮的有序度要高于肌理。

2.5 X 射线能谱分析

通过北京科技大学材料与工程学院实验测试中心的 X 射线能谱分析得出,样品肌理含有微量的铁元素,但是石皮中含有铁元素的含量明显高于肌理(图 8),尤其以黑色石皮(乌鸦皮)和黄色石皮最为显著,这主要是因为色皮与外界发生反应由外界引入

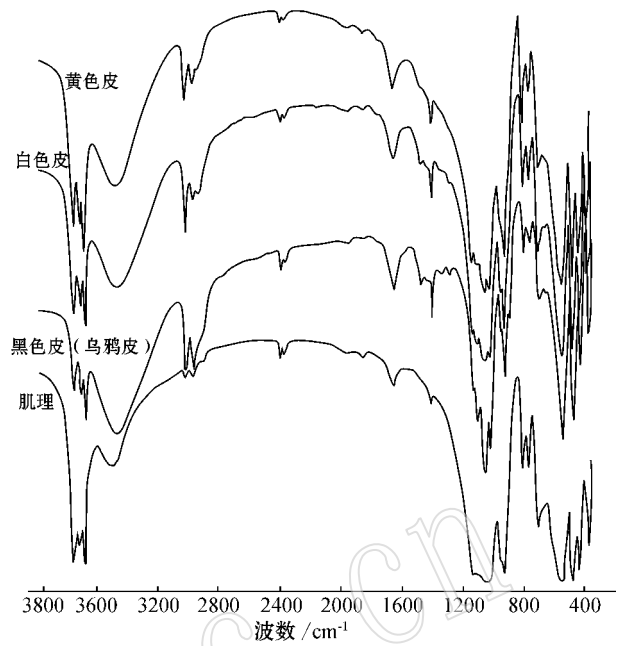


图 7 “昌化田黄石”样品的红外光谱图

Fig. 7 IR patterns of Tianhuang Stone from Changhua

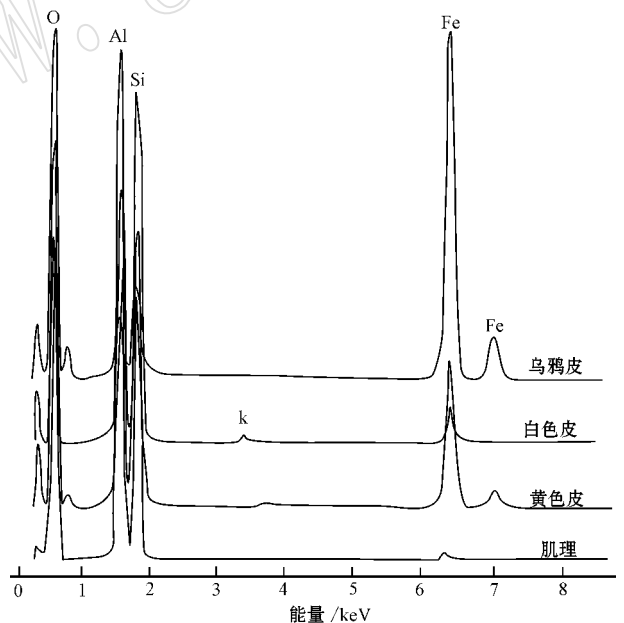


图 8 各种石皮与肌理的能谱图

Fig. 8 XEDS patterns of texture and percutaneous

了元素(崔文元等 2007)。白色石皮中铁元素较低,是色皮与外界发生反应时 Fe 流失所引起的(崔文元等 2007),但其含有微量的钾元素,可能是因为钾长石在风化成高岭石族矿物时所残留下来的。铁元素的存在使部分 Fe³⁺/Fe²⁺取代了 Al³⁺位置,而 K⁺主要取代了 Al³⁺的位置。实验仪器型号为 Link ISIS Oxford,工作电压 200 kV,分辨率 3.5 nm。

2.6 激光拉曼光谱分析

采用拉曼光谱仪进一步对样品中存在的萝卜纹的成分进行了测试。测试是在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室的流体包裹体实验室完成,所得结果见图9,分析数据见表6。测试仪器为英国 Renishaw 公司生产的 RM-2000 型激光拉曼探针仪,测试条件为:Ar⁺激光器,波长 514 nm,激光束斑大小约为 1 μm,测谱计数时间为 10 s,每 1 cm⁻¹(波数)计数 1 次,100~2 000 cm⁻¹取峰,光谱分辨率为 2 cm⁻¹。地开石因为矿物颗粒过小,表面更易发生漫反射,因此致使图谱的荧光背景较强。

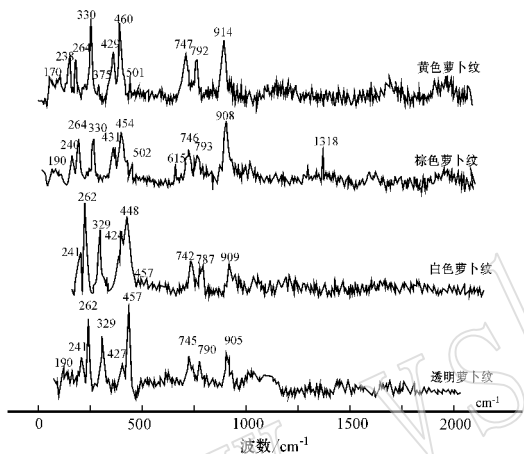


图 9 “萝卜纹”的拉曼光谱

Fig. 9 RAMAN spectra of radish vein

表 6 不同颜色“萝卜纹”的特征拉曼位移

Table 6 RAMAN displacement of different colors of radish vein

地开石	水铝石	赤铁矿	黄铁矿	cm ⁻¹
无色透明“萝卜纹”	190、241、262、329、427、457、745、790、905			
白色“萝卜纹”	241、262、329、424、457、742、787、909	448		
棕色“萝卜纹”	190、240、264、330、431、454、746、793、908		502、615、1 318	
黄色“萝卜纹”	238、264、330、460、747、792、914		501	375、429

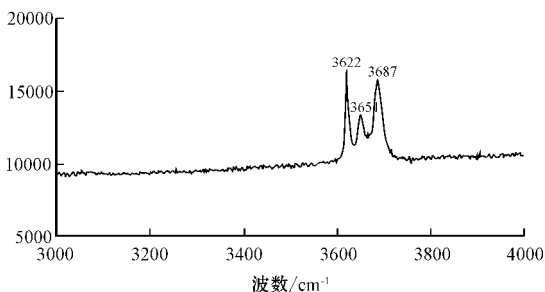


图 10 “昌化田黄石”样品中水的拉曼位移

Fig. 10 RAMAN spectra of water in Tianhuang Stone from Changhua

对以上样品又进一步进行了高频区拉曼光谱扫描,发现均存在 3 622、3 651、3 687 cm⁻¹的拉曼峰,结果见图 10,反映了 OH⁻ 伸缩振动,说明样品中含有水的成分,并且是以 OH⁻ 的形式存在的。

3 对比分析

通过对“昌化田黄石”样品的成分、结构等方面的研究,与寿山田黄石(孙旋等,2003)进行对比,对比分析结果见表 7。通过对比,得出“昌化田黄石”样品与寿山田黄石物质组成、结构特征基本相同,成因产状相似,并具有相似的外观。因此,本文建议田黄石应定义为:凡产于坡积层或田坑中,具有“细、洁、润、腻、温、凝”之“六德标准”且主要由地开石等高岭石族矿物组成的透有黄色调的块状独石。

4 结论

(1)“昌化田黄石”样品以隐晶质结构、显微粒状结构和鳞片变晶结构出现,构造主要有块状、斑状和脉状构造。在扫描电镜下呈不定型、假六方片状或板状,其中辰砂和色皮主要呈鳞片状结构。

(2)电子探针表明“昌化田黄石”样品的主要成分为高岭石族矿物。由 X 射线粉晶衍射分析等表明

其主要成分为地开石,样品还含有高岭石、高岭石-地开石的过渡物和辰砂,通过用 Hinckley 法估算结晶指数 HI,表明其地开石为较无序-有序。

(3)红外光谱和拉曼分析表明“昌化田黄石”样品中水主要以 OH⁻ 的形式存在,含有少量吸附水。且“昌化田黄石”样品中透明“萝卜纹”的主要成分为地开石;白色“萝卜纹”除了地开石还含有水铝石;棕色“萝卜纹”含有地开石和少量褐铁矿;黄色“萝卜纹”中除了地开石还含有褐铁矿和黄铁矿。

(4)从红外光谱和 X 射线能谱中,可知石皮与肌理的成分均为地开石,且石皮中 Fe 的含量高于肌

表 7 “昌化田黄石”样品与寿山田黄石的异同点

Table 7 The similarities and differences of Tianhuang Stone from Changhua and Shoushan

种类	“昌化田黄石”样品	寿山田黄石(孙旒等,2003)
颜色	黄色、白色、红色、黑色等	黄色、白色、红色、黑色等
光泽	蜡状-油脂光泽	蜡状-油脂光泽
透明度	不透明-亚透明	不透明-亚透明
折射率	1.56(点测)	1.56~1.57(点测)
相对密度	2.61(平均值)	2.57~2.67
摩氏硬度	2~3	2~3
断口	贝壳状断口	贝壳状断口
成因	原生矿脉滚入低洼的水田、湿地、溪涧等掩埋在泥沙层中经历了漫长岁月的地壳运动、分化作用等形成	原生矿脉滚入低洼的水田、湿地、溪涧等掩埋在泥沙层中经历了漫长岁月的地壳运动、分化作用等形成
产地	主要在梯田	主要在水田
结构	显微隐晶质结构、显微粒状结构和鳞片变晶结构,不定型、假六方片状或板状	隐晶质结构、细粒结构、显微鳞片变晶结构,不定型、假六方片状或板状
构造	块状、斑状和脉状构造	致密块状构造、网纹构造
石形	多棱角状	多卵石状
石皮	主要有黄色石皮、白色石皮和黑色石皮(乌鸦皮),呈鳞片状结构	主要有黄色石皮、白色石皮和黑色石皮(乌鸦皮)呈不规则板状紧密堆积在一起
石质	具有“六德”的标准	具有“六德”的标准
成分	地开石、明矾石、高岭石及高岭石-地开石的过渡物和辰砂	地开石、高岭石、伊利石和珍珠陶土
“萝卜纹”	无色透明“萝卜纹”主要为地开石,白色“萝卜纹”含地开石和水铝石,棕色“萝卜纹”含地开石和赤铁矿,黄色“萝卜纹”为地开石、黄铁矿和赤铁矿	白色“萝卜纹”含地开石和水铝石,棕色“萝卜纹”含地开石和赤铁矿,黄色“萝卜纹”为地开石、黄铁矿和赤铁矿
“红格”	含铁的氧化物的脉络	含铁的氧化物的脉络

理中 Fe 的含量。通过对 OI 数值的计算,得出石皮的有序度要高于肌理。

(5) 通过对比“昌化田黄石”样品和寿山田黄石,二者在物理性质、结构构造和成分等方面基本相同,只是寿山田黄石中含有珍珠石,而“昌化田黄石”样品含有明矾石,偶见辰砂相伴,同时寿山田黄石的石皮主要为不规则板状紧密堆积在一起,而“昌化田黄石”样品中石皮与“鸡血”主要呈现鳞片状结构。

(6) 通过对“昌化田黄石”样品和寿山田黄石进行对比,本文对田黄石提出了建议性定义:凡产于坡积层或田坑中,具有“细、洁、润、腻、温、凝”之“六德标准”且主要由地开石等高岭石族矿物组成的透有黄色调的块状独石。

References

- Bailey S W. 1963. Polymorphism of the kaolin minerals[J]. *Am. Miner.*, 48: 1196~1209.
- Brindley G W & Brown G. 1980. Crystal Structures of Clay Minerals and their X-ray Identification[M]. London: Miner. Soc., 450.
- Cui Wenyan, Xu Jianren and Wang Changqiu. 2007. Identification

standards of Tianhuang from Changhua[A]. *Proceedings of China and Jewelry Academic Conference*[C], 90~95 (in Chinese).

- Sun Ni, Cui Wenyan and Xu Xiang. 2003. Mineralogical characteristics and genesis of Shoushan Stone in Jialiangshan, Fujian Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 23(3): 273~278 (in Chinese).
- Tang Deping. 1999. Mineralogy and gemmology of Shoushan Stone[J]. *Journal of Gems & Gemmology*, 13(4): 28~36 (in Chinese).
- Yang Yaxiu and Zhang Naixian. 1994. Clay Minerals of China[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Yang Zhiqiong, Zhao Xingyuan and Zhang Ling. 1988. IR spectra analysis of kaolinite clays[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 3: 60~65 (in Chinese).

附中文参考文献

- 崔文元,徐健人,王长秋. 2007. 昌化田黄的鉴别标准[J]. *中国珠宝首饰学学术交流会议论文集*, 90~95.
- 孙旒,崔文元,徐湘. 2003. 福建加良山寿山石的矿物学特征及成因[J]. *岩石矿物学杂志*, 23(3): 273~278.
- 汤德平. 1999. 寿山石的矿物组成与宝石学研究[J]. *宝石和宝石学杂志*, 13(4): 28~36.
- 杨雅秀,张乃娴. 1994. *中国粘土矿物* [M]. 北京:地质出版社.
- 杨志琼,赵杏媛,章聆. 1988. 高岭石类粘土矿物的红外吸收光谱分析[J]. *石油实验地质*, 3: 60~65.