

DOI:10.13232/j.cnki.jnju.2020.06.007

## 浙江常山砚瓦山组竹叶状灰岩成因探讨

陈小明<sup>1,2\*</sup>, 王德滋<sup>1</sup>, 舒良树<sup>1</sup>

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 南京, 210023;

2. 南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京, 210023)

**摘要:**浙江常山上奥陶统砚瓦山组竹叶状灰岩具有高度观赏性,然而长期以来其成因还存在很大争议. 竹叶状灰岩中竹叶状碎屑与基质显示出很大差异性. 竹叶状碎屑颜色均一,均为肉红色,主要矿物为方解石,鲕绿泥石作为微量组分存在,赤铁矿含量极低;竹叶状碎屑的总铁含量低(1.04%~1.21%), $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 比值高(1.28~1.75). 基质颜色由岩层上部的(紫)红色向下渐变为蓝绿色,主要矿物为黏土矿物(伊利石+鲕绿泥石),鲕绿泥石为常量组分,赤铁矿含量很低;基质总铁含量较高(4.16%~5.64%), $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 比值较低(0.63~1.4). 笔者认为砚瓦山组竹叶状灰岩是两个不同环境形成的物质沉积混合的结果:竹叶状碎屑是海盆斜坡相对氧化环境形成的肉红色沉积物,基质是海盆沉积物,形成于相对还原的环境;在地震作用下,海盆斜坡上的肉红色沉积物滑塌、破碎成竹叶状碎屑,并与周围海水形成重力流,滑入海盆的沉积物(基质)中,混合、再沉积形成竹叶状灰岩. 其颜色主要是因细菌铁还原作用引起基质沉积物从岩层上部的(紫)红色逐步过渡到下部的蓝绿色.

**关键词:**上奥陶统,竹叶状灰岩,颜色,沉积学,浙江常山

**中图分类号:**P588.24

**文献标识码:**A

## Study of the genesis of wormtalk limestone from the Yanwashan Formation, Changshan, Zhejiang Province

Chen Xiaoming<sup>1,2\*</sup>, Wang Dezi<sup>1</sup>, Shu Liangshu<sup>1</sup>

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, 210023, China;

2. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Nanjing University, Nanjing, 210023, China)

**Abstract:** The wormtalk limestone from the Upper Ordovician Yanwashan Formation exposed in the Changshan County, Zhejiang Province, is highly ornamental. Its genesis has long-term been debated. Our studies suggest that the wormtalk limestone from the Yanwashan Formation is composed of flat-pebble and matrix with distinctive differences each other. The flat-pebbles show an uniform flesh-red color and the major component is calcite with low-content chamosite and hematite. Chemically, the  $\text{FeO}^*$  value ( $= \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ ) of the flat-pebbles is low ranging from 1.04% to 1.21% whereas the  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  ratio is high (1.28~1.75). The matrix color changes from the purple red in the top to the blue-green in the bottom of strata. The matrix mainly consists of clay minerals including chamosite and illite as well trace-content hematite. The chemical composition of the matrix shows a high  $\text{FeO}^*$  value (4.16%~5.64%) and low  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  ratio (0.63~1.4). This study proposed that the wormtalk limestone derived from diagenesis, resulting from mixing of two-kinds sediments formed in different environments. The flesh red flat-pebble was accumulated in a relatively oxidizing environment and the matrix was formed in a relatively reduced environment in the same neritic basin. Under the action of earthquake, the flesh red sediments on the slope of the neritic basin may collapse and break into numerous flat-pebbles. Soon afterwards, following the formation

基金项目:国家自然科学基金(42072062)

收稿日期:2020-10-09

\* 通讯联系人, E-mail: xmchen@nju.edu.cn

of gravity flow, these pebbles were transported and dropped into the depositing carbonate sediments (matrix) in the neritic basin, mixed each other and re-deposited, and finally generated wormtalk limestone. The color change of the matrix was mainly caused by bacterial iron reduction, resulting in the gradually change of color from (purple) red in the top part to blue-green in the bottom part.

**Key words:** Upper Ordovician Series, wormtalk limestone, color, sedimentology, Changshan of Zhejiang

砾屑灰岩是由碳酸盐质碎屑和基质构成, 早先的文献<sup>[1-14]</sup>将其称为竹叶状灰岩或者瘤状灰岩, 其分布辽阔, 前人已对其成因进行了大量研究, 并认同其成因的多样性。

在浙江常山奥陶纪地层中, 分布有多层竹叶状灰岩, 其中又以上奥陶统硃瓦山组发育的竹叶状灰岩为典型<sup>[15-16]</sup>。对于硃瓦山组竹叶状灰岩的成因, 张霞等<sup>[5]</sup>认为浙江常山硃瓦山组瘤状灰岩是沉积物沉积时期周期性底流溶解和成岩作用过程中差异性压实、压溶联合作用的产物; 郭福生和梁鼎新<sup>[12]</sup>认为浙江江山硃瓦山组瘤状灰岩包括了五种特征和成因各不相同的岩石类型: 砾屑灰岩具原生沉积组构, 干裂角砾状灰岩属准同生阶段暴露成因, 揉皱角砾状泥灰岩显示了水下滑动形成的准同生变形构造, 压溶瘤状灰岩为成岩晚期缝合线发育造成的, 最为常见的压扁瘤状泥灰岩主要是成岩阶段差异压实的产物。

笔者在浙江常山硃瓦山村考察时, 发现当地居民采集的碳酸盐质笋状观赏石——常山石, 其原岩即为硃瓦山组竹叶状灰岩, 在刚开采出来的新鲜面上, 竹叶状灰岩具有非常丰富的颜色特征。由于该地区的硃瓦山组竹叶状灰岩还存在较大的成因争议, 笔者对硃瓦山上刚开采出来的硃瓦山组竹叶状灰岩特征, 特别是颜色特征进行了系统研究, 以探讨颜色所蕴含的沉积环境信息, 进而讨论硃瓦山组竹叶状灰岩的成因。

## 1 岩层特征

硃瓦山研究区位居江南造山带东段, 属于浙西早古生代浅海碳酸盐盆地范围。常山县硃瓦山村位于我国第一个“金钉子”剖面<sup>[17]</sup>(图 1 中标注为国家地质公园)的东面, 虽然两地仅距离约 10 km, 但中间却发育有数条断层。在硃瓦山村北侧的硃瓦山山腰上出露上奥陶统硃瓦山组的竹叶状

灰岩, 在采石场(图 1 中标注为采样点)上可见此处硃瓦山组至少是由十几层厚层状的竹叶状灰岩组成, 每一岩层厚度一般在 60~100 cm, 微层理不发育; 岩石的风化面多呈蜂巢状结构, 为竹叶状碎屑被溶蚀后形成, 少量可见灰白色碎屑呈现出的竹叶状结构。

图 2a 显示的为刚开采出来的一个完整岩层断面, 从图中可以清楚看出: 从岩层上部(图 2a 上部标注的“岩层顶”)向下部(图 2a 下部标注的“岩层底”)岩石的颜色从紫红色逐步变化到蓝绿色; 图 2b 和图 2c 分别为岩层上部紫红色竹叶状灰岩和下部蓝绿色竹叶状灰岩的抛光面, 图 2a 中的白色方框示意了其在岩层中的相对位置。从图 2b 和图 2c 可以看出, 不管是上部紫红色竹叶状灰岩还是下部蓝绿色竹叶状灰岩, 其中的竹叶状碎屑(P)均呈肉红色, 大小主要在 10 mm×30 mm, 形状主要为椭球体, 具定向排列; 竹叶状碎屑(P)与基质(M)间界线明显, 在靠近碎屑的局部位置特别是较贴近的碎屑(P)间, 基质颜色明显深于其他部位基质, 在岩层上部基质为紫红色部分的深色基质(DM)可达紫黑色(图 2b), 在岩层下部基质为蓝绿色部分的深色基质(DM)可达墨绿色(图 2c), 深色基质(DM)与主体基质(M, 除特指外, 文中基质都是指主体基质)间为过渡关系; 另外, 在岩层的顶板, 有一层很薄(0.5~1.5 cm)的红色灰岩, 由于太薄而无法在图 2a 中显示, 在岩层底部, 有 6~8 cm 厚的无竹叶状碎屑的蓝绿色灰岩(图 2a, 虽然这层无竹叶状碎屑的岩石经鉴定后发现方解石不是主要矿物, 但由于它位于竹叶状灰岩岩层底部, 所以本文还是将其称为灰岩)。

## 2 样品分析

本文主要围绕硃瓦山上出露的硃瓦山组竹叶

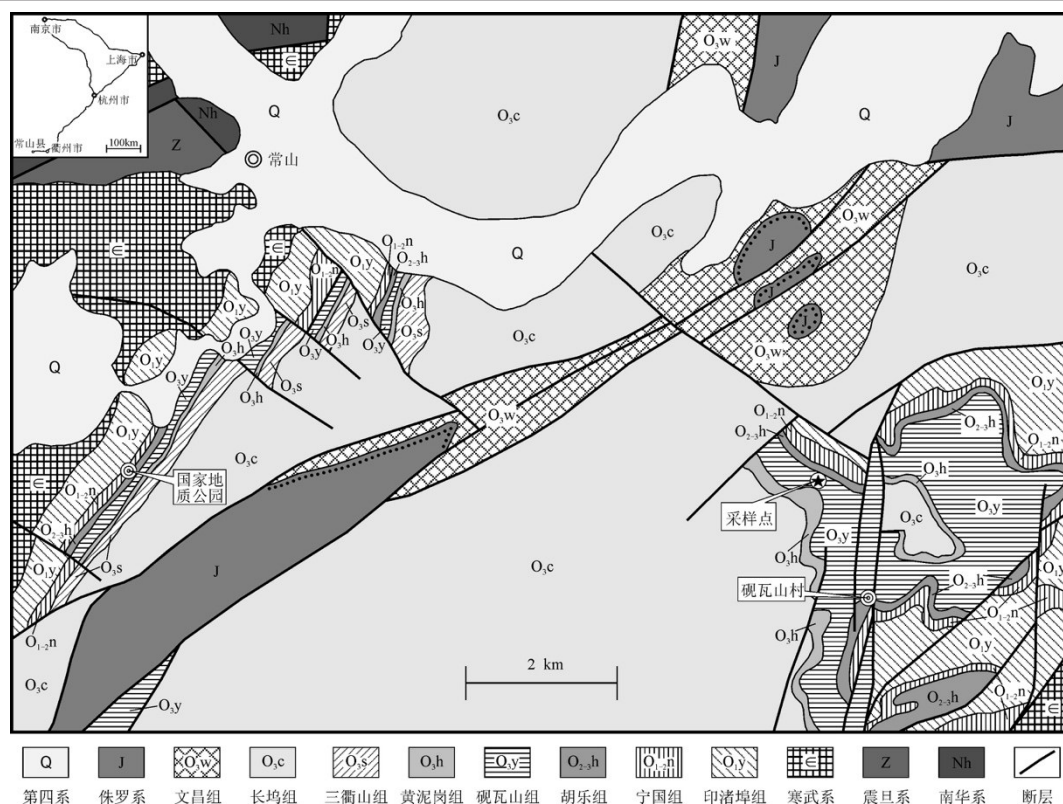
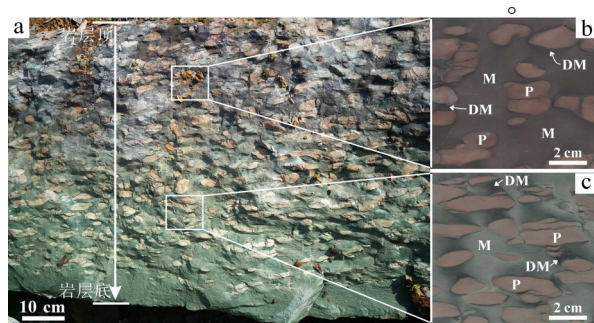


图1 浙江常山地区地质简图(据中国地质调查局浙江省1:5万地质图修改)

Fig. 1 Simplified geologic map of the Changshan area, Zhejiang Province



(a) 竹叶状灰岩的岩层; (b) 岩层上部紫红色竹叶状灰岩抛光面; (c) 岩层下部蓝绿色竹叶状灰岩抛光面. P-竹叶状碎屑, M-基质, DM-深色基质

图2 砚瓦山组竹叶状灰岩特征

Fig. 2 Characteristics of the flat-pebble limestone from the Yanwashan Formation

状灰岩中丰富的颜色所记录的环境信息展开研究,笔者在样品采集基础上,提取了样品的颜色信息,并对样品中的致色矿物及呈色元素进行了分析,进而探讨样品的形成环境和岩石成因。

首先,对砚瓦山出露的砚瓦山组竹叶状灰岩刚开采下来的新鲜岩层进行了系统采样。根据岩

层中岩性及颜色的变化特征,将样品区分为五个层位:顶板不含碎屑的红色灰岩、上部紫红色竹叶状灰岩、中部紫蓝色竹叶状灰岩(过渡区)、下部蓝绿色竹叶状灰岩和底部不含碎屑的蓝绿色灰岩。

然后对采集的样品进行预处理:将竹叶状灰岩样品利用切片机切割成1~2 mm厚的岩石片,用磨刀石碾磨岩片两面以消除切片机可能的污染,使用老虎钳、锤子和磨刀石将竹叶状灰岩的竹叶状碎屑(P)、基质(M)及深色基质(DM)三者分离出来,将分离开的样品用超声波进行清洗,低温(<40℃)干燥,用铜捣钵将所有样品捣碎,最后用玛瑙碾钵将样品碾磨成200目的粉末。

样品的颜色信息是在南京大学表生地球化学教育部重点实验室用Perkin-Elmer Lambda分光光度计测量,获取的样品漫反射光谱数据。测试分析步骤:将研磨好的粉末样品取一小部分放在干净的玻璃薄片上,加蒸馏水使粉末呈泥浆状,并将它涂平,在低温下(<40℃)慢慢烘干<sup>[18]</sup>。仪器的测量范围为可见光波段400~700 nm,样品所

测数据间隔为 1 nm,根据标准颜色波段<sup>[19]</sup>可见光分为六个波段,依次为:紫光,400~450 nm;蓝光,450~490 nm;绿光,490~560 nm;黄光,560~590 nm;橙光,590~630 nm;红光,630~700 nm. 各波段的反射率大小是指该波段的反射率占该样品的可见光总反射率(400~700 nm 的反射率之和,又称亮度)的百分比<sup>[20]</sup>.

由于样品颜色是样品中各组分颜色的综合体现,笔者对样品组分(物相)进行了分析. 物相分析在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室的 Bruker D8 advance 上用 X-射线衍射分析,用粉末压片法进行制样.

考虑到物相分析结果只反映样品中各组分(物相)的相对含量,各组分(物相)的赋存状态也同样影响样品的呈色,笔者利用南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室的日本电子 8100 型电子探针对样品光薄片各物相的赋存状态(大小和均匀程度)进行研究,探针束斑为聚焦状态(理论值为 0  $\mu\text{m}$ ),背散射电子成分像观察时探针电流为  $5 \times 10^{-9}$  A,元素 X-射线面扫描观察时探针电流为  $2 \times 10^{-8}$  A.

样品中铁的价态及其含量是考量样品颜色的主要化学指标,样品的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{FeO}$  分析在核工业 230 研究所进行, $\text{FeO}$  用化学分析测试, $\text{Fe}_2\text{O}_3$

用 X 射线荧光光谱仪测试. 用化学分析检测样品中  $\text{FeO}$  含量时,由于许多单个样品的重量达不到检测所要求,笔者对样品进行了合并,合并是按照同层位、同类型合并的原则进行的,即碎屑只能与同层位的碎屑合并,基质只能与同层位的基质合并. 如岩层上部紫红色灰岩的碎屑可以互相合并、基质也可以互相合并,上部的碎屑、基质不能与中部和下部的碎屑、基质合并;当然,由于每个样品的深色基质重量很少,所以深色基质只能合并成两个样品:上部与中部的合并成一个、下部的合并成一个.

### 3 测试结果

**3.1 可见光反射率** 表 1 为砚瓦山出露的砚瓦山组竹叶状灰岩可见光波段各色光的反射率数据,各色光的反射率变化幅度分别为:紫光 13.6%~16.5%,蓝光 11.5%~13.4%,绿光 22.3%~24.7%,黄光 10.1%~10.8%,橙光 13.4%~15%,红光 22.1%~26.7%;反射率变化幅度最大的红光为 4.7%,其次为绿光 2.4%. 由于岩层中基质主体颜色为紫红色与蓝绿色,笔者将紫光与红光的反射率之和以及蓝光与绿光的反射率之和作为考量样品颜色变化的指标.

表 1 砚瓦山组竹叶状灰岩漫反射光谱数据

Table 1 Diffuse reflectance spectral data of the flat-pebble limestone from the Yanwashan Formation

序号	样号	样品描述	反射率(%)					
			紫光	蓝光	绿光	黄光	橙光	红光
1	CS-1	岩层顶板红色灰岩	13.6	11.5	22.3	10.8	15.0	26.7
2	CS-2	岩层顶板红色灰岩	15.2	12.3	22.6	10.4	14.3	25.3
3	CS-3a	肉红色竹叶状碎屑	15.9	12.6	22.6	10.2	14.0	24.8
4	CS-3b	紫红色基质	16.3	13.0	23.1	10.1	13.7	23.8
5	CS-3c	深色基质	16.4	13.3	23.7	10.2	13.5	22.8
6	CS-5a	肉红色竹叶状碎屑	15.5	12.4	22.4	10.3	14.2	25.2
7	CS-5b	紫红色基质	16.3	12.9	22.9	10.1	13.7	24.1
8	CS-5c	深色基质	15.9	13.2	24.1	10.4	13.6	22.8
9	CS-7a	肉红色竹叶状碎屑	15.8	12.5	22.6	10.2	14.0	24.9
10	CS-7b	紫红色基质	16.3	13.0	23.0	10.1	13.7	24.0
11	CS-7c	深色基质	16.2	13.2	23.8	10.3	13.6	23.0
12	CS-8a	肉红色竹叶状碎屑	15.7	12.4	22.4	10.2	14.1	25.2
13	CS-8b	紫红色基质	16.3	13.0	23.0	10.1	13.7	24.0

基质呈紫红色



续表

序号	样号	样品描述	反射率(%)					
			紫光	蓝光	绿光	黄光	橙光	红光
14	CS-8c	深色基质	16.3	13.3	23.9	10.3	13.5	22.7
15	CS-10a	肉红色竹叶状碎屑	15.4	12.4	22.6	10.4	14.2	25.1
16	CS-10b	紫蓝色基质	16.1	13.1	23.4	10.2	13.6	23.5
17	CS-10c	深色基质	15.8	13.3	24.5	10.5	13.6	22.4
18	CS-12a	肉红色竹叶状碎屑	15.7	12.5	22.7	10.3	14.0	24.7
19	CS-12b	紫蓝色基质	16.3	13.2	23.5	10.2	13.6	23.3
20	CS-12c	深色基质	15.8	13.3	24.6	10.5	13.5	22.3
21	CS-13a	肉红色竹叶状碎屑	15.6	12.5	22.7	10.3	14.1	24.8
22	CS-13b	紫蓝色基质	16.3	13.2	23.5	10.2	13.5	23.4
23	CS-13c	深色基质	15.8	13.3	24.5	10.5	13.6	22.3
24	CS-15a	肉红色竹叶状碎屑	16.2	12.9	23.0	10.2	13.7	24.0
25	CS-15b	蓝绿色基质	16.2	13.3	24.0	10.3	13.4	22.8
26	CS-15c	深色基质	15.9	13.4	24.6	10.5	13.5	22.3
27	CS-16a	肉红色竹叶状碎屑	16.2	12.8	23.0	10.2	13.7	24.0
28	CS-16b	蓝绿色基质	16.1	13.3	24.0	10.3	13.5	22.8
29	CS-16c	深色基质	15.9	13.4	24.7	10.5	13.5	22.2
30	CS-18a	肉红色竹叶状碎屑	15.7	12.6	22.8	10.3	14.0	24.6
31	CS-18b	蓝绿色基质	16.3	13.3	23.9	10.2	13.4	22.9
32	CS-18c	深色基质	15.8	13.4	24.7	10.5	13.5	22.1
33	CS-20a	肉红色竹叶状碎屑	15.9	12.7	23.0	10.3	13.9	24.4
34	CS-20b	蓝绿色基质	16.5	13.3	23.8	10.2	13.4	22.9
35	CS-20c	深色基质	15.9	13.4	24.7	10.5	13.4	22.1
36	CS-24a	肉红色竹叶状碎屑	16.3	12.9	23.2	10.2	13.7	23.9
37	CS-24b	蓝绿色基质	16.3	13.4	24.0	10.2	13.4	22.8
38	CS-24c	深色基质	16.1	13.5	24.6	10.4	13.4	22.1
39	CS-27	岩层底部蓝绿色灰岩	16.3	13.3	24.0	10.2	13.4	22.7
40	CS-29	岩层底部蓝绿色灰岩	16.2	13.4	24.2	10.3	13.4	22.6

图3为砚瓦山组竹叶状灰岩(紫光+红光)的反射率与(蓝光+绿光)的反射率投影图,从图3中可以清楚地看出岩层各组成部分的(紫光+红光)反射率与(蓝光+绿光)反射率呈现比较好的负相关性。竹叶状碎屑投影点(圆形)集中在图的左上方,具有高的(紫光+红光)反射率,虽然从岩层上部的紫红色灰岩到下部的蓝绿色灰岩,竹叶状碎屑的(紫光+红光)反射率呈降低趋势、(蓝光+绿光)反射率呈增加趋势,但其变化幅度很小,(紫光+红光)反射率从40.9%降低到40.1%,(蓝光+绿光)反射率从34.8%增加到36.1%;基质投影点(菱形,包括岩层顶板和底部不含碎屑的灰岩)主要分布于图的中部,从岩层顶

板到底部,基质的(紫光+红光)反射率呈明显降低趋势、(蓝光+绿光)反射率呈明显增加趋势,变化幅度大,(紫光+红光)反射率从40.4%降低到38.8%,(蓝光+绿光)反射率从33.9%增加到37.5%;深色基质投影点(六角形)分布于图的右下方,具有最大的(蓝光+绿光)反射率,从岩层上部的紫红色灰岩到下部的蓝绿色灰岩,深色基质的(紫光+红光)反射率呈比较明显的降低趋势、(蓝光+绿光)反射率呈比较明显的增加趋势,(紫光+红光)反射率从39.3%降低到37.9%,(蓝光+绿光)反射率从37.0%增加到38.1%。

**3.2 X射线物相分析** 表2为砚瓦山出露的砚瓦山组竹叶状灰岩各组成部分的物相分析结果,

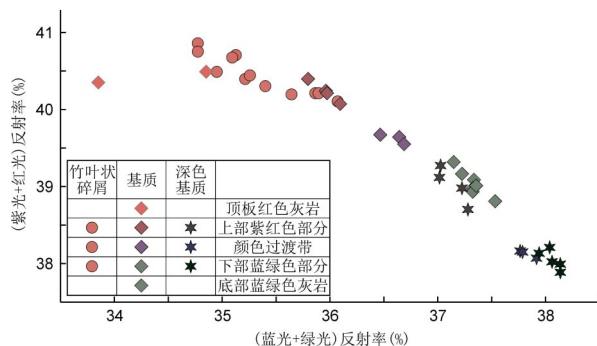


图3 (紫光+红光)反射率-(蓝光+绿光)反射率投影图

Fig. 3 The Violet+Red reflectance vs the Blue+green reflectance projection

表2中常量组分的相对含量用3,2,1表示,3代表含量最高,2代表含量较高,1代表含量较低但与2的含量差别不确定;微量组分(含量很低)的含量用小于1表示,0.1代表含量极低、有时可能与0的含义类似。物相分析结果(表2)表明竹叶状灰岩主要以内源沉积矿物方解石及陆源碎屑石英、斜长石和伊利石为主,鲕绿泥石含量变化较大,从微量组分演变到常量组分,而赤铁矿含量很低;虽然鲕绿泥石和赤铁矿含量较低或很低,但在本研究中意义非凡:鲕绿泥石形成于还原环境下的成岩阶段<sup>[21-23]</sup>,是沉积成岩阶段 $\text{Fe}^{2+}$ 的唯一赋存对象、是竹叶状灰岩呈蓝绿色的唯一贡献者。赤铁

矿形成于氧化环境,是竹叶状灰岩呈红色的唯一贡献者<sup>[24-25]</sup>。所以本文对样品中是否含有这二种矿物以及其相对含量进行了精细研判。鲕绿泥石除常量组分(标识为1)的样品外,还判别了微量组分(标识为小于1)的样品,特别是赤铁矿,虽然都属于微量组分,但还是研判出样品中相对的含量高低(分别标识为0.3,0.2,0.1),为探讨样品最终呈色提供依据。物相分析结果(见表2)显示:(1)竹叶状碎屑均以方解石(Ca)为主,鲕绿泥石(Cha)含量很低,而赤铁矿含量处于极低范围。(2)除顶板灰岩外,基质(包括深色基质)都是以陆源碎屑为主,在表2中显示为以石英为主,这似乎与张霞等<sup>[5]</sup>获得的基质是以黏土矿物为主的结果不一致,但如果结合电子探针研究结果(图5和图6)就不难看出,基质中伊利石加变为常量组分的鲕绿泥石,其含量就超过石英,即表2中虽然石英相对含量最高,但二种常量组分的黏土矿物(伊利石和鲕绿泥石)之和含量就超过石英了,因此基质的主要组分应该是黏土矿物,基质中鲕绿泥石作为常量组分,含量明显高于竹叶状碎屑中属于微量组分的鲕绿泥石,而赤铁矿属于微量组分,相对高于竹叶状碎屑中的赤铁矿。(3)顶板灰岩在物相上更接近于竹叶状碎屑的组分。

表2 砚瓦山组竹叶状灰岩物相分析数据

Table 2 Physical phase analytical data of the flat-pebble limestone from the Yanwashan Formation

序号	样号	样品描述	方解石	石英	斜长石	伊利石	鲕绿泥石	赤铁矿
1	CS-1	顶板红色灰岩	3	1	1	1	0	0
2	CS-2	顶板红色灰岩	3	1	2	1	0.3	0.1
3	CS-3a	竹叶状碎屑	3	1	2	2	0.5	0.1
4	CS-3b	紫红色基质	1	3	2	2	1	0.3
5	CS-3c	深色基质	1	3	1	2	1	0.3
6	CS-5a	竹叶状碎屑	3	1	2	1	0.3	0.3
7	CS-5b	紫红色基质	1	3	2	1	1	0.3
8	CS-5c	深色基质	2	3	1	1	1	0.3
9	CS-7a	竹叶状碎屑	3	1	2	1	0.3	0.1
10	CS-7b	紫红色基质	1	3	2	1	1	0.3
11	CS-7c	深色基质	2	3	2	2	1	0.3
12	CS-8a	竹叶状碎屑	3	1	2	2	0.3	0.1
13	CS-8b	紫红色基质	1	3	2	2	1	0.3
14	CS-8c	深色基质	1	2	2	2	1	0.3
15	CS-10a	竹叶状碎屑	3	2	2	1	0.3	0.1
16	CS-10b	紫蓝色基质	1	3	1	2	1	0.3

续表

序号	样号	样品描述	方解石	石英	斜长石	伊利石	鲕绿泥石	赤铁矿
17	CS-10c	深色基质	2	3	1	1	1	0.1
18	CS-12a	竹叶状碎屑	3	2	1	1	0.4	0.1
19	CS-12b	紫蓝色基质	1	3	1	2	1	0.3
20	CS-12c	深色基质	2	3	1	1	1	0.1
21	CS-13a	竹叶状碎屑	3	2	2	2	0.4	0.1
22	CS-13b	紫蓝色基质	1	3	2	2	1	0.3
23	CS-13c	深色基质	2	3	2	2	1	0.3
24	CS-15a	竹叶状碎屑	3	2	1	2	0.4	0.1
25	CS-15b	蓝绿色基质	1	3	1	2	1	0.1
26	CS-15c	深色基质	2	3	1	1	1	0.1
27	CS-16a	竹叶状碎屑	3	2	1	1	0.4	0.1
28	CS-16b	蓝绿色基质	1	3	2	1	1	0.2
29	CS-18a	竹叶状碎屑	3	1	2	1	0.4	0.1
30	CS-18b	蓝绿色基质	1	3	2	2	1	0.1
31	CS-18c	深色基质	1	3	1	1	1	0
32	CS-20a	竹叶状碎屑	2	1	2	1	0.4	0.1
33	CS-20b	蓝绿色基质	2	3	2	2	1	0.1
34	CS-20c	深色基质	1	3	2	2	1	0.1
35	CS-24a	竹叶状碎屑	3	2	1	2	0	0.2
36	CS-24b	蓝绿色基质	0.5	3	1	2	1	0.1
37	CS-24c	深色基质	0.5	3	1	2	1	0.1
38	CS-27	底部无碎屑灰岩	1	3	2	2	1	0
39	CS-29	底部无碎屑灰岩	1	3	2	2	1	0.1

注:表2中样号同表1. 数字表示各物相的相对含量:3含量最高,2含量较高,1含量较低但与2含量高低不确定;<1表示含量很低,0.1表示含量极低.

图4更直观地显示了物相分析结果,由于斜长石数据对本文的讨论没有什么影响,所以图4中没有反映斜长石的资料.图4的横坐标是各物相的相对含量,纵坐标是各样品在岩层中的相对上下位置.从图4中可以非常清楚地看出:竹叶状碎屑与基质(包括深色基质和底部无碎屑的灰岩)间在主要矿物组成、鲕绿泥石含量方面存在非常大的差异,竹叶状碎屑主要矿物为方解石,鲕绿泥石属于微量组分;基质主要矿物为陆源碎屑(图4中显示是石英,但实际上是黏土矿物,详见电子探针分析部分),鲕绿泥石为常量组分;而顶板红色灰岩的各物相组成更类似于竹叶状灰岩,与其他部位的基质(灰岩)存在很大差异.

**3.3 电子探针分析** 由于物相分析只显示了各组分(物相)在岩石中的相对含量,各物相在岩石

中的赋存状态并不清楚,而物质的赋存状态特别是大小、分布均匀程度等对整体岩石的颜色贡献是非常关键的,为此笔者利用电子探针对岩层上部的紫红色竹叶状灰岩和下部的蓝绿色竹叶状灰岩的光薄片进行了研究.

笔者主要利用电子探针的背散射电子成分像(COMP)以及配套的元素面扫描图像来探讨各物相的赋存状态,背散射电子成分像的亮度主要与各物相对入射电子背反射的强度有关,物相中重元素含量高,背反射电子强度大,物相的影像就亮,反之物相的影像就暗.元素X-射线面扫描图像上,亮点越密集元素含量越高,亮点分散、稀疏,说明在视域内没有富集该元素的物相或物相太小以至在电子探针放大范围内无法显示出来.考虑到所研究灰岩中主要呈色元素是铁,笔者重点对

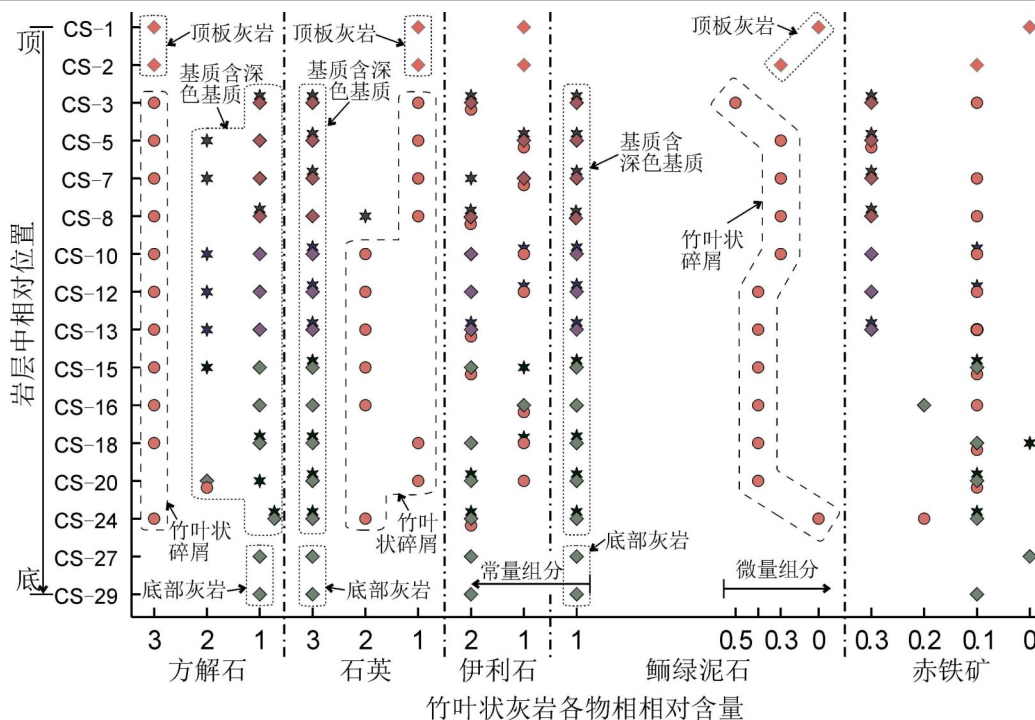


图 4 竹叶状灰岩物相分析数据图解(图例同图 3)

Fig. 4 Diagram of the physical phase analytical data of flat-pebble limestone

含铁矿物的赋存状态进行了研究. 在电子探针背散射电子成分像上, 陆源碎屑的石英、斜长石和伊利石(il)由于主要是由原子序数较小的元素构成, 影像均表现为深灰色到灰黑色, 其中石英和斜长石为架状结构矿物, 表面平整、光滑, 伊利石为层状结构矿物, 影像上表现为表面不平整、有较多孔洞或表现出片状结构特征; 方解石(Ca)和鲕绿泥石(Cha)的影像是比较亮的, 呈灰白色, 方解石(Ca)表面比较平整、光滑, 鲕绿泥石(Cha)由于是层状结构的矿物, 其表面不是很平整或表现出片状结构特征; 另外, 在铁的元素面扫描图像上, 方解石(Ca)不含铁, 鲕绿泥石(Cha)含铁. 成分像上有一些呈亮白色的小点, 这是一些含重元素的硅酸盐矿物.

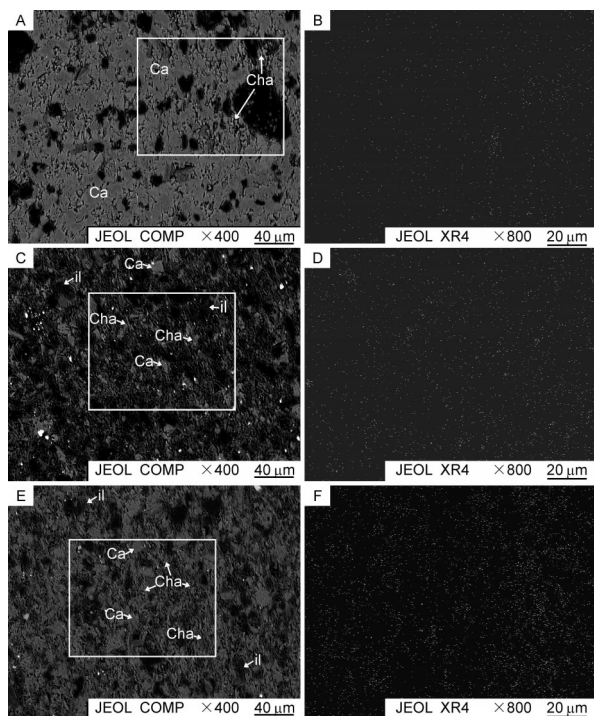
电子探针研究表明, 不管是岩层上部紫红色竹叶状灰岩还是下部的蓝绿色竹叶状灰岩, 其碎屑、基质以及深色基质分别具有很好的相似性. 为了更多地展示岩石结构, 笔者将背散射电子成分像设为放大 400 倍, 但由于含铁矿物比较小, 将铁元素 X-射线面扫描图像设为放大 800 倍, 即将成分像的局部(图中白色方框)放大. 图 5 和图 6

分别展示了竹叶状灰岩岩层上部紫红色竹叶状灰岩和下部蓝绿色竹叶状灰岩的电子探针研究结果.

对于竹叶状碎屑, 紫红色灰岩和蓝绿色灰岩差异不大, 主要是由方解石(Ca)构成, 陆源碎屑含量相对较低(图 5A 和图 6A), 没有发现铁含量高的物质, 只有极少量的含铁不高的鲕绿泥石(Cha), 鲕绿泥石一般呈 3~5 μm 的小片状, 在铁元素 X-射线面扫描图像(图 5B 和图 6B)上, 代表铁元素的亮点基本呈稀疏、均匀分布, 只有极少的小聚集区(鲕绿泥石位置).

对于基质, 上部紫红色灰岩与下部蓝绿色灰岩存在一定差异. 紫红色竹叶状灰岩基质中深色的陆源碎屑含量要稍高于影像较亮的方解石+鲕绿泥石, 陆源碎屑中表面孔洞较多或呈片状形态的伊利石(il)含量只是稍微低于石英+斜长石; 而影像较亮部分, 表面不平整或呈片状形态的鲕绿泥石(Cha)含量明显大于方解石(Ca); 因而导致其基质中黏土矿物(伊利石+鲕绿泥石)含量大于石英+斜长石(图 5C); 另外, 紫红色灰岩基质中含铁矿物明显增多, 除存在极少的含铁量很高





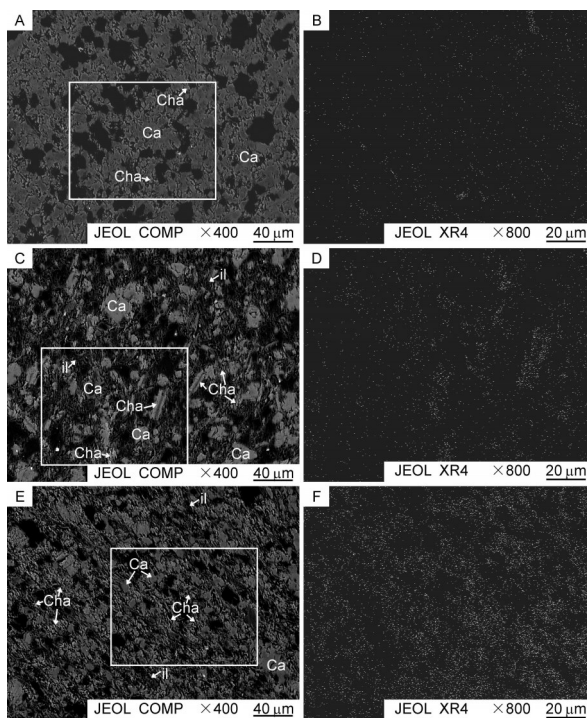
左侧为背散射电子成分像(COMP);Ca-方解石,Cha-鲕绿泥石,il-伊利石;右侧为COMP像上白框区域Fe元素扫描图像,亮点越密含量越高

图5 岩层上部紫红色竹叶状灰岩电子探针图像

Fig. 5 The electron probe images of the fuchsia flat-pebble limestone from the upper part of the rock layer

的、10~30  $\mu\text{m}$  的碎屑赤铁矿外,有较多的1~5  $\mu\text{m}$  的小片状鲕绿泥石(图5C),由于赤铁矿含铁量很高,在铁元素X-射线面扫描图像上如果显示赤铁矿,其他含铁矿物就基本看不出了,因此在基质的铁元素X-射线面扫描图像上就没有显示碎屑赤铁矿(图5D)。蓝绿色竹叶状灰岩基质中,深色的陆源碎屑含量基本与较亮的方解石+鲕绿泥石含量接近,虽然陆源碎屑中伊利石(il)含量较石英+斜长石少一点,但较亮部分中鲕绿泥石(Cha)含量等于或略大于方解石(Ca),最终导致蓝绿色灰岩基质中黏土矿物(伊利石+鲕绿泥石)含量大于石英+斜长石;另外,该基质中也含有碎屑赤铁矿,且含较上部紫红色竹叶状灰岩基质中更多的鲕绿泥石,除1~5  $\mu\text{m}$  的小片形态外,还有一种宽10~20  $\mu\text{m}$ 、长20~30  $\mu\text{m}$  的大颗粒(图6C至图6D)。可见竹叶状灰岩的基质主要是由黏土矿物(伊利石+鲕绿泥石)组成,含有较多的鲕绿泥石,且下部蓝绿色灰岩基质中鲕绿泥石含量

更高。



左侧为背散射电子成分像(COMP);Ca-方解石,Cha-鲕绿泥石,il-伊利石;右侧为COMP像上白框区域Fe元素扫描图像,亮点越密含量越高

图6 岩层下部蓝绿色竹叶状灰岩电子探针图像

Fig. 6 The electron probe images of the blue-green flat-pebble limestone from the lower part of the rock layer

紧靠在竹叶状碎屑边部的深色基质与主体基质基本类似,同样主要由黏土矿物(伊利石+鲕绿泥石)组成,鲕绿泥石含量较主体基质明显增多,均为1~5  $\mu\text{m}$  的小片状及其集合体(图5E和图6E),在铁元素X-射线面扫描图像(图5F和图6F)上,亮点的密度明显高于主体基质,鲕绿泥石的含量占主导地位,这与物相分析结果有出入,可能是由于深色基质太小,电子探针能精准地对深色基质进行研究,而进行物相分析的样品,在进行样品分离时混入了较多的主体基质,导致电子探针研究结果与物相分析结果有一点差异。

**3.4  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  比值** 表3为砚瓦山出露的砚瓦山组竹叶状灰岩各组成部分不同价态铁氧化物含量的分析数据,从表3中可以清楚地看出不同组成部分在铁总量( $\text{FeO}^* = \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ )、不同价态铁氧化物比值( $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ )方面的明显差异:肉

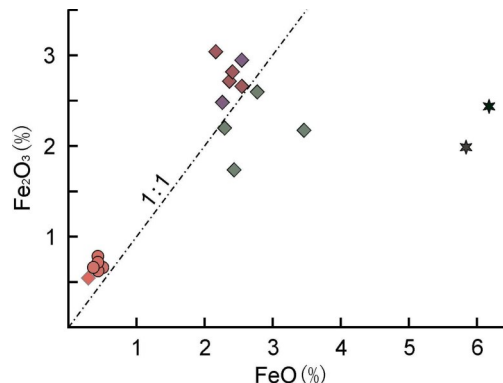
表 3 砚瓦山组竹叶状灰岩铁含量分析数据

Table 3 Analytical data of iron content of flat-pebble limestone from the Yanwashan Formation

序号	样号	样品描述	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /FeO
1	CS-3a	肉红色竹叶状碎屑	0.72	0.43	1.67
2	CS-5a+7a		0.77	0.44	1.75
3	CS-10a+12a+13a		0.62	0.44	1.41
4	CS-15a+16a		0.65	0.51	1.27
5	CS-18a+20a+24a		0.66	0.38	1.74
6	CS-1+CS-2	岩层顶板红色灰岩	0.54	0.29	1.86
7	CS-3b	上部紫红色基质	2.65	2.55	1.04
8	CS-5b		2.81	2.4	1.17
9	CS-7b		2.71	2.36	1.15
10	CS-8b		3.03	2.17	1.40
11	CS-10b+12b	紫蓝色基质(过渡带)	2.48	2.27	1.09
12	CS-12b+13b		2.94	2.54	1.16
13	CS-15b+16b	下部蓝绿色基质	2.59	2.77	0.94
14	CS-18b+20b+24b		2.2	2.3	0.96
15	CS-27	岩层底部蓝绿色灰岩	1.73	2.43	0.71
16	CS-29		2.18	3.46	0.63
17	CS-3c+5c+7c+8c+10c+12c+13c	岩层上部的深色基质	1.98	5.84	0.34
18	CS-15c+16c+18c+20c+24c	岩层下部的深色基质	2.44	6.17	0.40

红色的竹叶状碎屑 FeO\* 低, 在 1.04%~1.21%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeO 比值高, 在 1.28~1.75; 基质除顶板的红色灰岩外(包括底部蓝绿色灰岩), FeO\* 较高, 在 4.16%~5.64%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeO 比值在 0.63~1.4, 顶板红色灰岩在 FeO\* 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeO 比值方面更接近竹叶状碎屑; 深色基质 FeO\* 的含量最高, 在 7.82%~8.61%, 但 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeO 比值最低, 在 0.34~0.4。

在 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-FeO 图解上(图 7), 这些差异更加清楚。竹叶状碎屑(圆形)投影点位于图 7 的左下方, 均位于 1:1 直线的上方, 且非常集中。基质, 顶板的红色灰岩(红色菱形)投影点与竹叶状碎屑的投影点在一起, 位于图 7 左下方、1:1 直线的上方; 其他部位基质(菱形, 包括底部蓝绿色灰岩)投影点位于图 7 的中上部, 岩层上部的紫红色基质和过渡带紫蓝色的基质位于 1:1 直线的上方, 岩层下部蓝绿色的基质和底部蓝绿色灰岩位于 1:1 直线的下方; 从岩层上部向下部、底部, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeO 比值呈降低的趋势。深色基质(六角形)投影点位于图 7 的右中上部, 在 1:1 直线的下方且远离 1:1 直线。

图 7 竹叶状灰岩 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-FeO 图解(图例同图 3)Fig. 7 Diagram of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-FeO of flat-pebble limestone

## 4 讨论

**4.1 竹叶状碎屑与基质的差异性** 砚瓦山出露的砚瓦山组竹叶状灰岩, 其竹叶状碎屑与基质存在很大的差异。

在岩层中从上向下, 所有竹叶状碎屑的特征几乎完全一致。(1)颜色变化很小, 竹叶状碎屑肉眼观察均呈肉红色, 三原色反射率方面变化幅度很小: 红光反射率 39.8%~42.1%, 变化 2.3%;

绿光反射率 37.3%~38.6%, 变化 1.3%; 蓝光反射率 20.6%~21.6%, 变化 1%。(2) 组分变化很小: 物相分析显示竹叶状碎屑均以方解石为主, 标识为 3; 鲕绿泥石含量很低, 除个别标识为 0 外, 主要都在 0.3~0.5; 而赤铁矿含量处于极低范围, 除个别标识为 0.3 和 0.2 外, 主要都为 0.1 (见表 2)。(3) 赤铁矿均以微细颗粒形式存在, 电子探针下找不到赤铁矿颗粒, 应该属于纳米级颗粒<sup>[22]</sup>。(4) 铁总量低, 变化幅度小, 但  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  比值大。 $\text{FeO}^*$  为 1.04%~1.20%, 变化 0.16%;  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  比值 1.28~1.75, 变化 0.47 (见表 3)。

基质特征变化很大, 岩层的颜色变化主要通过基质颜色表现出来, 由于深色基质只是主体基质的很小一部分, 这里只对主体基质进行讨论。基质特征的变化表现在: (1) 颜色变化幅度很大, 从岩层顶板的红色→上部的紫红色→过渡区的紫蓝色→下部和底部的蓝绿色, 这些颜色是逐步过渡变化的。三原色反射率变化幅度较大: 红光反射率 37.6%~44.1%, 变化 6.5%; 绿光反射率 36.9%~40.2%, 变化 3.3%; 蓝光反射率 19.0%~22.2%, 变化 3.2%。(2) 组分变化很大, 特别是顶板红色灰岩与岩层其他部位的基质 (包括底部灰岩) 差别很大, 顶板红色灰岩以方解石为主 (标识为 3), 鲕绿泥石含量极低 (标识为 0 和 0.1), 赤铁矿含量也处于极低范围 (标识为 0 和 0.1); 其他部位基质 (包括底部的灰岩) 均是以黏土矿物 (伊利石+鲕绿泥石) 为主, 鲕绿泥石已经变为常量组分 (标识为 1), 赤铁矿虽然处于很低范围, 但还是有一些变化, 从上部和过渡区的标识 0.3 变化到下部和底部的 0.1 (见表 2), 呈现降低趋势。(3) 基质中存在碎屑赤铁矿。(4) 铁总量相对较高, 变化幅度较大,  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  比值有从上向下变小的趋势。 $\text{FeO}^*$  为 4.16%~5.64%, 变化 1.48%;  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  比值 1.85~0.63, 变化 1.22。

竹叶状碎屑与基质间巨大的差异, 只能说明砚瓦山出露的砚瓦山组竹叶状灰岩的这二大主要组分是来源于不同的海洋沉积环境。

**4.2 致色机理和沉积环境** 为了进一步探讨该岩层的呈色机理, 将岩层各组成部分的  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  比值分别与对应部分的 (紫光+红光) 反射率和 (蓝光+绿光) 反射率进行二维投影 (图 8), 其

中 (紫光+红光) 反射率和 (蓝光+绿光) 反射率分别为相关合并样品反射率的平均值, 从图 8 中可以清楚地看出: 各组成部分的  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  比值与 (紫光+红光) 反射率呈较好的线性、正相关性, 和 (蓝光+绿光) 反射率呈较好的线性、负相关性。这基本体现了铁价态对颜色的制约关系, 可见, 该岩层的颜色是由不同价态的铁元素所致。

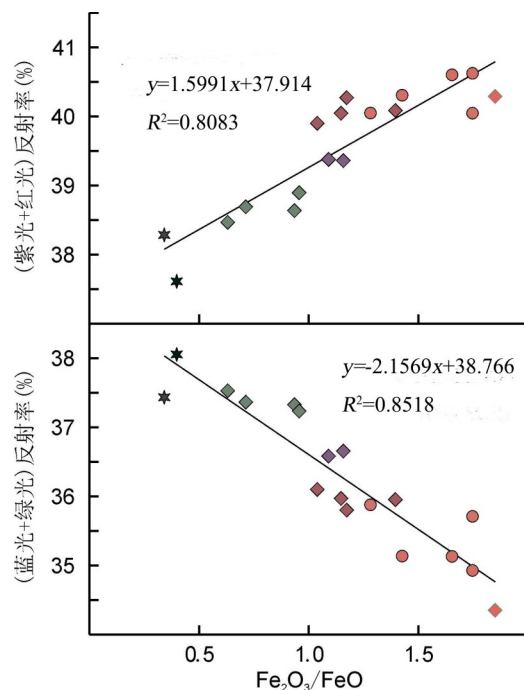


图 8  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  比值分别与 (紫光+红光) 反射率和 (蓝光+绿光) 反射率投影图 (图例同图 3)

Fig. 8 Reflectance projections of  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  Ratio vs Violet+Red reflectance and Blue+green reflectance

对于肉红色的竹叶状碎屑, 虽然其中赤铁矿 (导致样品呈红色) 含量极低 (表 2), 但由于在电子探针下没有找到赤铁矿, 说明赤铁矿是以非常细小的颗粒均匀分布于竹叶状碎屑中; 微量的鲕绿泥石 (导致样品呈蓝绿色) 虽然较赤铁矿含量稍高一点 (表 2), 但鲕绿泥石呈现可见的小颗粒状态, 这就导致赤铁矿对样品的呈色贡献大于鲕绿泥石, 赤铁矿就像颜料一样致使样品最终呈现出以红为主的颜色。这与化学分析获得的样品  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  比值高 (表 3) 的结果相一致。另外, 竹叶状碎屑的颜色及其特征基本一致并与岩层中所处位置无关, 说明所有竹叶状碎屑应该是由同期形成的同一层沉积物破碎而成, 沉积物的颜色呈



均一的肉红色。

Poulton and Canfield<sup>[26]</sup>认为在地球历史的大部分时间里,含铁的深海环境很可能占主导地位。Taylor and Konhauser<sup>[27]</sup>认为在中性的 pH 下,  $\text{Fe}^{2+}$  的非生物氧化是非常快速的,即  $\text{Fe}^{2+}$  会与氧迅速反应形成  $\text{Fe}^{3+}$ 。形成竹叶状碎屑的沉积物应该是在相对氧化环境中沉积,沉积时周围环境中的铁已经完全氧化形成  $\text{Fe}^{3+}$ ,并以纳米级赤铁矿均匀分布于沉积物中,使该沉积物呈现均匀的红色<sup>[28]</sup>。

对于基质来说,岩层顶板红色灰岩的物相特征(表 2)及铁含量特征(表 3)基本与肉红色的竹叶状碎屑相似,因此其呈色也应该与竹叶状碎屑的呈色机理一致,以纳米级的赤铁矿呈色。

对于岩层上部和过渡区的基质,虽然其赤铁矿含量稍微高于竹叶状碎屑,但还属于很低的范畴,而鲕绿泥石的含量已达常量组分,明显高于竹叶状碎屑中的微量鲕绿泥石组分(表 2),且基质中含碎屑赤铁矿。这导致赤铁矿对样品颜色的贡献减弱、鲕绿泥石对样品颜色的贡献增大;这也与样品铁含量的分析结果(表 3)吻合,与竹叶状碎屑相比,基质中  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{FeO}$  含量均增加了,  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  比值也大于 1,但从上向下呈降低趋势。结果导致从岩层上部到过渡区,基质颜色从紫红色逐步变化到紫蓝色。

对于岩层下部和底部的基质,由于其赤铁矿含量稍小于上部 and 过渡区的基质,与竹叶状碎屑的赤铁矿含量接近,而鲕绿泥石的含量还稍高于上部和过渡区(表 2,图 5C,图 5D 和图 6C,图 6D),且基质中也含碎屑赤铁矿,这导致鲕绿泥石对样品颜色的贡献相对于上部和过渡区更大;这同样与样品铁含量的分析结果(表 3)一致,基质中  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{FeO}$  含量明显增加了,  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  比值已从上部和过渡区的大于 1 转变为小于 1,且从上向下呈降低趋势;结果导致岩层下部和底部的基质颜色呈蓝绿色。

Taylor and Konhauser<sup>[27]</sup>认为  $\text{Fe}^{2+}$  到  $\text{Fe}^{3+}$  的氧化还原转化,对许多生物和元素循环过程具有重要意义,在没有游离硫化物的情况下,  $\text{Fe}^{3+}$  在低温下还原成  $\text{Fe}^{2+}$  是异化的铁还原细菌广泛介入的结果,这些微生物以厌氧方式消耗  $\text{Fe}^{3+}$  以获得

能量,但它们不利用产生的  $\text{Fe}^{2+}$ ,而是将其驱逐到周围环境中。另外,在沉积物表面下(在富含有机物的沉积物中不到几毫米),无氧(缺氧)条件是有有机物代谢有机碳消耗所有可用氧的结果,在这些条件下,铁被还原成  $\text{Fe}^{2+}$  是由在没有氧气中生存的细菌(所谓的厌氧菌)引起的,这种氧化还原反应被许多细菌用作主要的能源(这一过程称为细菌铁还原)<sup>[29]</sup>。根据岩层中基质的上述特征,笔者认为形成基质的沉积物应该是在相对还原的环境中沉积,沉积后又受到所谓的细菌铁还原作用,将沉积物中含有的少量  $\text{Fe}^{3+}$  进一步还原成  $\text{Fe}^{2+}$  并释放到沉积物中。这种还原作用随着沉积物深度的增加而增强,最终结果导致沉积物中  $\text{Fe}^{3+}$  随深度增加而减少、 $\text{Fe}^{2+}$  随深度增加而增加,基质沉积物的颜色也随之发生规律性的变化,红色光强度逐步减弱、蓝绿色光强度逐步增加。

**4.3 成因机制** 李文杰等<sup>[16]</sup>在对常山蒲塘口剖面上奥陶统沉积相特征进行研究时,发现在浙江西部和北部的晚奥陶世地层中,发育数十层斑脱岩层,显示了当时频繁的火山活动,“三山”地区(主要分布在常山)上奥陶统发育的多期次、大规模的滑塌构造以及丰富的重力流沉积、原位软沉积物变形构造等,指示着当时不断变陡的古海底地形,并说明可能发生过频繁的地震作用。常山地区晚奥陶世频繁发生的地震作用,既然已经引起多期次、大规模的滑塌构造,频繁的、小规模滑塌作用应该不可避免,笔者认为本文研究的砚瓦山上出露的砚瓦山组竹叶状灰岩与地震引起的滑塌作用有关。

竹叶状灰岩的竹叶状碎屑(灰岩)原先是在海水深度相对比较浅的海盆斜坡上沉积的、以碳酸盐为主的沉积物,此处是相对氧化的环境,海水中的铁全部氧化成  $\text{Fe}^{3+}$ 。Raiswell<sup>[30]</sup>认为海水中铁主要以纳米氧化物的形式存在,这种氧化物在物理和化学上介于水和颗粒之间,可通过增加结晶度、聚集和生长而转变为更稳定的形态,它们也会转变为其他纳米矿物。因此形成竹叶状碎屑(灰岩)的沉积物,在沉积过程中,海水中的铁纳米粒子通过某种方式转变成纳米赤铁矿,并均匀地伴随沉积物一起沉积,使沉积物呈现均匀的(肉)红色。



竹叶状灰岩的基质原先是在相对还原的海盆中沉积的,即使沉积时有一些铁是以 $\text{Fe}^{3+}$ 形态存在于沉积物中,沉积后的缺氧环境会使 $\text{Fe}^{3+}$ 在厌氧菌作用下还原为 $\text{Fe}^{2+}$ ,并排放到环境(沉积物)中,这些 $\text{Fe}^{2+}$ 在埋藏(成岩)过程中就成了鲕绿泥石的组分。由于埋藏越深缺氧越严重,细菌的铁还原作用就越强,甚至可能将沉积物中铁氧化物(或铁氢氧化物)还原和溶解产生 $\text{Fe}^{2+}$ <sup>[30]</sup>,这就可能造成埋藏越深 $\text{Fe}^{2+}$ 含量越高,形成的鲕绿泥石就越多。从而引起沉积物从上向下逐步由 $\text{Fe}^{3+}$ 主导的颜色转变为 $\text{Fe}^{2+}$ 主导的颜色,即由红色经紫红色逐步转变为蓝绿色,虽然顶部的红色可能只有几毫米。

处于海盆斜坡上未完全固结的肉红色沉积物,在地震作用下沿斜坡发生滑塌,沉积物在滑塌过程中不断破碎,并有一定滚动、磨圆,形成竹叶状碎屑,并与周围海水构成小规模重力流;海盆中未固结的沉积物在地震波的震荡作用下发生一定的松散,而斜坡上形成的小规模重力流的滑入,导致已松散的沉积物在重力流的冲击搅动下进一步发散,并与重力流不断进行混合,随着重力流的动能丧失,重力流就搅动起来,并和与之混合的海盆沉积物一起再沉降、沉积;由于重力流中裹夹了来自斜坡上的海水,这些海水含有一定的氧,根据 Raiswell<sup>[30]</sup>的观点“当还原沉积物中含 $\text{Fe}^{2+}$ 的淡水或孔隙水与氧接触时,溶解的铁被迅速氧化”,因此混入重力流的、海盆沉积物中的未被结合进鲕绿泥石的 $\text{Fe}^{2+}$ ,因与重力流中含氧海水的接触而迅速氧化成 $\text{Fe}^{3+}$ ;而在重力流冲入海盆沉积物内的过程中,会有少量海盆沉积物附着于重力流内的竹叶状碎屑上,这部分沉积物因相对比较密实,其中的 $\text{Fe}^{2+}$ 相对较少被氧化;这就造成在再沉积后,只有竹叶状碎屑边部极少的沉积物中自由的 $\text{Fe}^{2+}$ 没有(或很少)被氧化,主体沉积物中自由的 $\text{Fe}^{2+}$ 都被重新氧化,部分铁还再次进入了海水循环体系,最终导致成岩过程中在竹叶状碎屑边的局部位置形成比主体基质中更多的鲕绿泥石,相对于主体基质这局部位置就成为了深色基质(图2),主体基质不但被氧化致 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 比值增加、岩石的颜色变浅,而且铁总量也降低;成岩后在岩层底部存在不含竹叶状碎屑的灰岩,主

要是由于海盆沉积物下部比较密实,造成携带肉红色竹叶状碎屑的重力流并不能完全到达海盆沉积物的底部,虽然固态碎屑达不到沉积物底部,但重力流中的海水可能还是对底部的沉积物有影响。而在岩层的顶部,重力流之上的海盆沉积物很少,在再沉积时,顶部主要是由来自重力流的肉红色沉积物粉碎而成的细小碎屑再沉积,成岩后岩层顶板就形成红色灰岩,并与肉红色的竹叶状碎屑在组分、 $\text{FeO}^*$ 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 比值等特征上类似。竹叶状碎屑中存在的极少量鲕绿泥石,主要是在重力流滑入海盆沉积物内并与之混合、再沉积后,竹叶状碎屑在成岩过程中,也会与海盆中的沉积物一起共同经历一次细菌铁还原作用。但由于竹叶状碎屑中不存在自由的 $\text{Fe}^{3+}$ ,细菌只能将沉积物中铁氧化物(或铁氢氧化物)还原和溶解产生 $\text{Fe}^{2+}$ <sup>[30]</sup>,相较于自由的 $\text{Fe}^{3+}$ ,这种还原的难度肯定更大、速度也更慢,导致竹叶状碎屑在成岩阶段只能被还原和溶解出很少的 $\text{Fe}^{2+}$ ,也就只能在竹叶状碎屑中形成极少的鲕绿泥石。

## 5 结 论

浙江常山砚瓦山出露的晚奥陶世砚瓦山组竹叶状灰岩是由海盆斜坡上的肉红色沉积物,在地震作用下滑塌、破碎形成竹叶状碎屑,并与周围海水构成重力流,滑入海盆沉积物中,混合、再沉降、沉积形成的。海盆沉积物一方面因细菌铁还原作用引起沉积物从(紫)红色逐步过渡到蓝绿色的色变;另一方面因重力流混入引起的再氧化造成沉积物颜色的变化,最终导致成岩后岩层中竹叶状灰岩的基质出现从顶板红色→上部紫红色→紫蓝色→下部和底部蓝绿色,竹叶状灰岩的竹叶状碎屑则是均一的肉红色。

**致 谢** 浙江常山京源文化发展有限公司周建明董事长在野外调研、样品采集中提供了很大帮助;南京大学地球科学与工程学院林春明教授、胡修棉教授、蔡元峰教授和谢磊教授在成文过程中提供了很多有益建议,在此一并表示感谢!

## 参考文献

- [1] 林春明,张妮,张霞等. 安徽巢湖平顶山西坡剖面下三叠统殷坑组瘤状灰岩特征. 地球科学与环境学报, 2017, 39(4): 476—490. (Lin C M, Zhang N, Zhang X, et al. Characteristics of nodular limestone from the lower triassic Yinkeng formation at west Pingdingshan section in Chaohu of Anhui, China. Journal of Earth Sciences and Environment, 2017, 39(4): 476—490. )
- [2] 余宽宏,畅通,邱隆伟等. 华北地台早古生代竹叶状灰岩岩石特征及成因研究进展. 沉积学报, 2015, 33(6): 1111—1125. (Yu K H, Chang T, Qiu L W, et al. Research development of flat-pebble conglomerate characteristics and their origin in Early Paleozoic North China Platform. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(6): 1111—1125. )
- [3] 林春明,张霞,于进等. 安徽巢湖平顶山西坡剖面下三叠统殷坑组沉积及地球化学特征. 地质学报, 2015, 89(12): 2363—2373. (Lin C M, Zhang X, Yu J, et al. Sedimentary and geochemical characteristics of the Early Triassic Yinkeng Formation at West Pingdingshan section in Chaohu, Anhui Province. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(12): 2363—2373. )
- [4] 陈吉涛,韩作振,张晓蕾等. 鲁西芙蓉统条带灰岩早期成岩变形构造——竹叶状砾屑灰岩形成机理探讨. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39(12): 1732—1743. (Chen J T, Han Z Z, Zhang X L, et al. Early diagenetic deformation structures of the Furongian ribbon rocks in Shandong Province of China: A new perspective of the genesis of limestone conglomerates. Science China Earth Sciences, 2009, 53(2): 241—252. )
- [5] 张霞,林春明,凌洪飞等. 浙西地区奥陶系硯瓦山组瘤状灰岩及其成因探讨. 古地理学报, 2009, 11(5): 481—490. (Zhang X, Lin C M, Ling H F, et al. Nodular limestone and its genesis from the Ordovician Yanwashan Formation in Western Zhejiang Province. Journal of Palaeogeography, 2009, 11(5): 481—490. )
- [6] 丁玉,白志强,刘建波等. 山东省唐王寨上寒武统崮山组沉积环境及竹叶状灰岩的多成因分析. 古地理学报, 2008, 10(2): 125—138. (Ding Y, Bai Z Q, Liu J B, et al. Multiple origins for flat-pebble limestones and sedimentary environments of the upper Cambrian Gushan formation at Tangwangzhai in Shandong province. Journal of Palaeogeography, 2008, 10(2): 125—138. )
- [7] Rais P, Louis-Schmid B, Bernasconi S M, et al. Palaeoceanographic and palaeoclimatic reorganization around the Middle-Late Jurassic transition. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2007, 251(3—4): 527—546.
- [8] Kwon Y K, Chough S K, Choi D K, et al. Origin of limestone conglomerates in the Choson Supergroup (Cambro-Ordovician), mid-east Korea. Sedimentary Geology, 2002, 146(3—4): 265—283.
- [9] Chough S K, Kwon Y K, Choi D K, et al. Autoconglomeration of limestone. Geosciences Journal, 2001, 5(2): 159—164.
- [10] 王祥珍. 关于“竹叶状灰岩”的命名、分类、分布和形成机理的探讨. 矿物岩石, 1981(5): 31—40. (Wang X Z. Discussion on the name, classification, distribution and genesis of flat-pebble limestone conglomerates. Journal of Mineralogy and Petrology, 1981(5): 31—40. )
- [11] Mullins H T, Neumann A C, Wilber R J, et al. Nodular carbonate sediment on Bahamian Slopes: possible precursors to nodular limestones. Journal of Sedimentary Research, 1980, 50(1): 117—131.
- [12] 郭福生,梁鼎新. 浙江江山硯瓦山组瘤状灰岩的成因. 矿物岩石, 1993, 13(3): 74—80. (Guo F S, Liang D X. On the origin of nodular limestone in Yanwashan Formation in Jiangshan, Zhejiang. Journal of Mineralogy and Petrology, 1993, 13(3): 74—80. )
- [13] 李学清. 竹叶状灰岩之岩石研究. 中国地质学会志, 1927, 6(2): 121—126. (Li X Q. Study on petrologic feature of flat-pebble carbonate conglomerates. Geological Society of China, 1927, 6(2): 121—126. )
- [14] 林春明. 沉积岩石学. 北京: 科学出版社, 2019, 211—212.
- [15] 张元动,许红根,郭维民等. 浙江常山黄泥塘水库剖面的生物地层学. 地层学杂志, 2009, 33(4): 337—350. (Zhang Y D, Xu H G, Guo W M, et al. Biostratigraphy of the Huangnitang reservoir section in Changshan, Zhejiang Province. Journal of Stratigraphy, 2009, 33(4): 337—350. )

- [16] 李文杰,张元动,陈吉涛等. 浙西常山蒲塘口剖面上奥陶统沉积相特征. 地层学杂志, 2018, 42(4): 393—407. (Li W J, Zhang Y D, Chen J T, et al. Characteristics of the upper Ordovician lithofacies in the Putangkou section, Changshan, Western Zhejiang Province, South China. *Journal of Stratigraphy*, 2018, 42(4): 393—407. )
- [17] 陈旭,王志浩,张元动. 中国第一个“金钉子”剖面的建立. 地层学杂志, 1998, 22(1): 1—9. (Chen X, Wang Z H, Zhang Y D. The first GSSP (Golden Spike) in China. *Journal of Stratigraphy*, 1998, 22(1): 1—9. )
- [18] Balsam W L, Deaton B C. Sediment dispersal in the Atlantic Ocean: Evaluation by visible light spectra. *Reviews in Aquatic Sciences*, 1991, 4(4): 411—447.
- [19] Judd D B, Wyszecski G. Color in business, science, and industry. New York: Wiley - Interscience, 1975, 553.
- [20] 季峻峰,陈骏, Balsam W 等. 黄土剖面中赤铁矿和针铁矿的定量分析与气候干湿变化研究. 第四纪研究, 2007, 27(2): 221—229. (Ji J F, Chen J, Balsam W, et al. Quantitative analysis of hematite and goethite in the Chinese loess-paleosol sequences and its implication for dry and humid variability. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(2): 221—229. )
- [21] Tang D J, Shi X Y, Jiang G Q, et al. Ferruginous seawater facilitates the transformation of glauconite to chamosite: An example from the Mesoproterozoic Xiamaling Formation of North China. *American Mineralogist*, 2017, 102(11): 2317—2332.
- [22] Van Houten F B, Purucker M E. On the origin of glauconitic and chamositic granules. *Geo - Marine Letters*, 1985, 5(1): 47—49.
- [23] Mücke A. Chamosite, siderite and the environmental conditions of their formation in chamosite - type Phanerozoic ooidal ironstones. *Ore Geology Reviews*, 2006, 28(2): 235—249.
- [24] Li X, Cai Y F. Constraining the colouration mechanisms of Cretaceous Oceanic Red Beds using diffuse reflectance spectroscopy. *Cretaceous Research*, 2013, 46: 257—266.
- [25] Cai Y F, Hu X X, Li X, et al. Origin of the red colour in a red limestone from the Vispi Quarry section (central Italy): A high - resolution transmission electron microscopy analysis. *Cretaceous Research*, 2012, 38: 97—102.
- [26] Poulton S W, Canfield D E. Ferruginous conditions: A dominant feature of the ocean through Earth's history. *Elements*, 2011, 7(2): 107—112.
- [27] Taylor K G, Konhauser K O. Iron in Earth surface systems: A major player in chemical and biological processes. *Elements*, 2011, 7(2): 83—88.
- [28] 胡修棉. 显生宙海相红层的分布、类型与成因机制. 矿物岩石地球化学通报, 2013, 32(3): 335—342. (Hu X M. Distribution, types and origins of Phanerozoic marine red beds. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2013, 32(3): 335—342. )
- [29] Taylor K G, Macquaker J H S. Iron minerals in marine sediments record chemical environments. *Elements*, 2011, 7(2): 113—118.
- [30] Raiswell R. Iron transport from the continents to the open ocean: The aging - rejuvenation cycle. *Elements*, 2011, 7(2): 101—106.

(责任编辑 杨 贞)