

四川龙门山石炭纪鲕状赤铁矿及其古环境意义

张 扬^{1,2}, 郄文昆^{1,2}, 李益龙¹, 张雄华^{1,2}

(1. 中国地质大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430074;

2. 中国地质大学 生物地质与环境地质教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 四川龙门山地区石炭系总长沟组底部发育一层鲕状赤铁矿, 其内的铁质鲕粒由各种不同类型的核心和同心纹层构成。鲕粒核心主要有3种: 由纯赤铁矿颗粒构成的鲕粒核心、由破碎鲕构成的鲕粒核心、由夹有石英颗粒的赤铁矿构成的鲕粒核心。鲕粒同心纹层由赤铁矿及高岭石组成, 存在着明显的颜色、成分差别。纹层颜色有暗黑色、铁红色及亮白色, 与之相对应, Fe_2O_3 含量分别为 39.472% ~ 58.200%、12.988% ~ 24.275% 及 3.617% ~ 9.230%。三者交替出现, 构成鲕粒圈层。通过对鲕状赤铁矿的成分、结构及其他相关特征分析, 推测其形成于后砂坝环境。汤靶沟阶晚期存在一次规模较大的古暴露及古岩溶事件, 其间风化剥蚀形成的铁铝质风化壳为鲕状赤铁矿提供了物质基础。

关键词: 龙门山; 鲕状赤铁矿; 结构; 古环境

中图分类号: P578.4⁺4

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2009)01-0051-07

Carboniferous oolitic hematite in Longmenshan area of Sichuan Province and its paleoenvironmental significance

ZHANG Yang^{1,2}, QIE Wen-kun^{1,2}, LI Yi-long¹ and ZHANG Xiong-hua^{1,2}

(1. Faculty of Earth Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Key Laboratory of Biogeology and Environment Geology of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: A layer of oolitic hematite deposit occurs at the bottom of the Carboniferous Zongchanggou Formation in Longmenshan, Sichuan Province. The ferruginous oolite within it consists of various nuclei and concentric lamellar shells. The oolite nuclei are mainly comprised of hematite intraclast, fragmented oolite shells or hematite that contains terrigenous quartz sand. The obvious differences of colors and components exist between the oolite lamellar shells composed of hematite and those composed of kaolinite. The lamellar shells can be divided in color into dark black, ferruginous red and white, with the corresponding Fe_2O_3 content of the lamellar shells being 39.472% ~ 58.200%, 12.988% ~ 24.275% and 3.617% ~ 9.230% respectively. An analysis of components, texture and relative characteristics of oolitic hematite enables us to make an estimation. It is held that the oolitic iron was formed in a semi-closed or closed barrier-lagoon environment. The iron and aluminum weathering crust formed in late Yanguan stage provided the material foundation for the generation of oolitic hematite.

Key words: Longmenshan; oolitic hematite; texture; paleoenvironment

四川龙门山马角坝地区石炭纪地层发育全、露头好, 发育一套以局限-半局限台地、开阔台地相为

主的碳酸盐岩层序, 地层自下而上为马角坝组、总长沟组、黄龙组、马平组(覃建雄等, 1996)。根据露头

收稿日期: 2008-06-25; 修订日期: 2008-11-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49802002, 40372057); 中国石油化工股份有限公司海相油气勘探前瞻性项目(G0800-06-ZS-319)

作者简介: 张 扬(1982-), 男, 在读硕士, 主要从事地层古生物研究, E-mail: zycug518@yahoo.cn; 通讯作者: 张雄华(1963-), 男, 教授, 研究方向为地层古生物, E-mail: zhangxh6367@yahoo.com.cn。

层序地层原理,主要考虑层序关键界面、相序变化特征及准层序叠置样式以及层序区域追踪对比性,结合生物地层研究,将该区石炭系划分出14个三级层序(图1)。总长沟组底部(Sq5)为灰色、紫红色铁质

砂岩,在其中发现有鲕状赤铁矿。该套砂岩层之下为马角坝组顶部的岩溶角砾岩,之上为总长沟组的含生屑颗粒灰岩,鲕状赤铁矿层厚15~25 cm,横向不连续,局部呈透镜体。

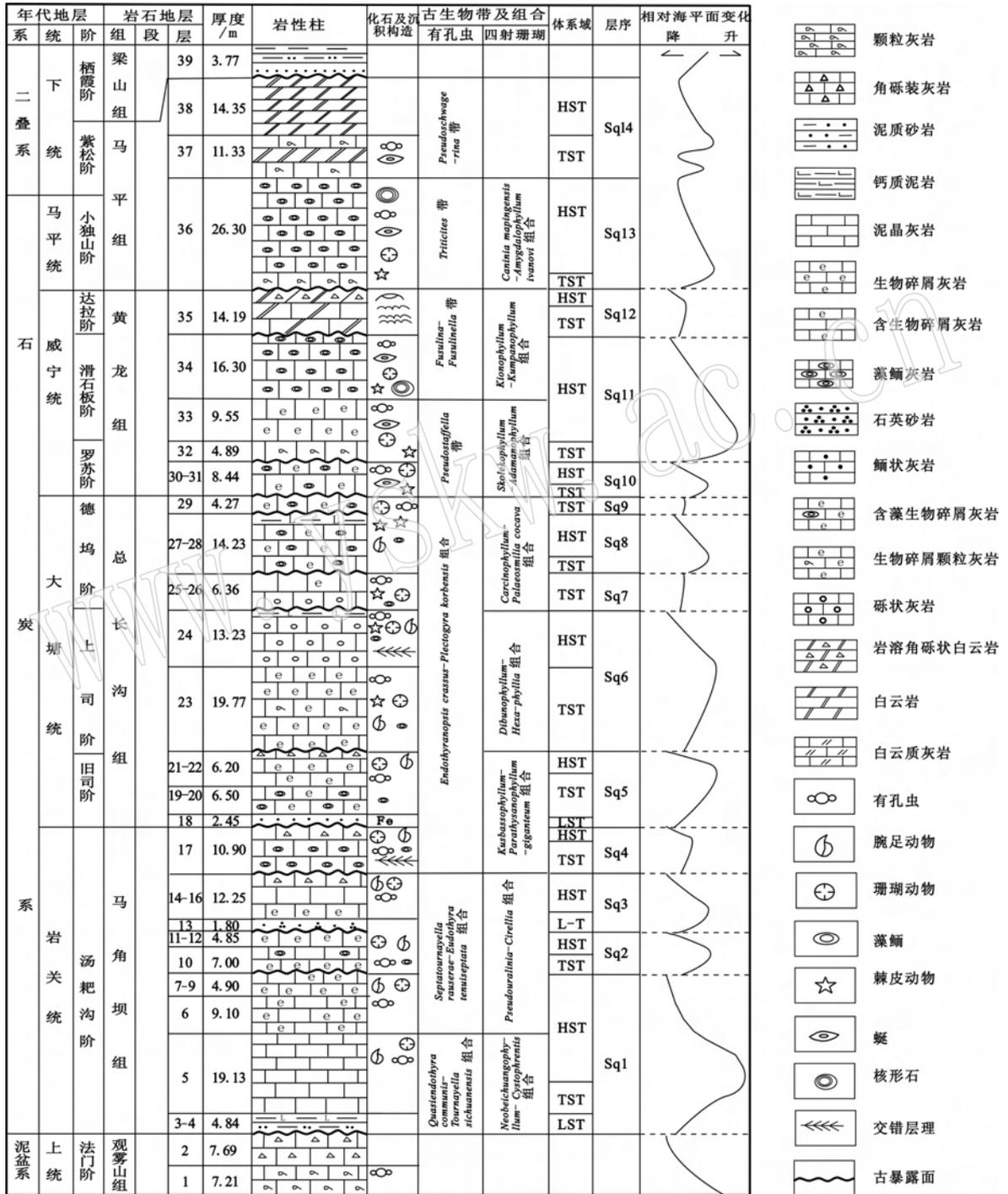


图1 四川龙门山马角坝石炭系地层序列及海平面变化曲线

Fig.1 Stratigraphic sequence and sea-level curves of Majiaoba Carboniferous in Longmenshan, Sichuan

HST—高水位体系域; LST—低水位体系域; TST—海侵体系域; L-T—低水位-海侵体系域; Sq—层序

HST—highstand system tract; LST—lowstand system tract; TST—transgressive system tract; L-T—lowstand-transgressive tract; Sq—sequence

中国的鲕状赤铁矿主要分布在前寒武纪、奥陶纪、泥盆纪及侏罗纪,其研究主要集中在前寒武纪龙式铁矿和泥盆纪宁乡式铁矿(朱世兴, 1980; 侯奎等, 1983; 赵东旭, 1994; 胡宁等, 1998),而石炭纪鲕状赤铁矿目前仅在四川龙门山马角坝地区下石炭统有发现。覃建雄等(1996)曾报道过总长沟组底部夹有鲕状赤铁矿层,但未详细描述,也未进行镜下研究和化学成分分析。本文对四川龙门山马脚坝总长沟组底部鲕状赤铁矿进行了样品采集,采样层位露头良好,样品新鲜,表面为铁红色,鲕粒肉眼可见。对采集的样品进行了X射线粉晶衍射及电子探针测试,结合偏光显微镜下观察结果,试图通过成分、结构及其他相关特征的分析,探讨总长沟组底部鲕状赤铁矿的成因,并以此来恢复当时的古环境。

1 鲕状赤铁矿的结构和组成

1.1 偏光显微镜下观察及分析

偏光显微镜下观察发现,鲕状赤铁矿由鲕粒、石英颗粒、赤铁矿碎屑颗粒、铁质胶结物及少量钙质胶

结物5部分组成,颗粒支撑,胶结类型为接触胶结及孔隙胶结(图2)。

鲕粒含量占全岩的75%,大小不等,形态不一,粒径集中在0.6~1.8 mm之间,属粗砂级,69%的鲕粒粒径>1 mm。个别含豆石,粒径>4 mm,极少数鲕粒粒径<0.3 mm。鲕粒呈圆形、椭圆形、卵圆形、不规则形等,少数被挤压呈扁豆状。每个鲕粒只有1个核心,外壳圈层较少,据鲕粒结构可分为表鲕(80%)、薄皮鲕(15%)及少量真鲕(5%)。赤铁矿含量约10%,大小不等,在0.8~1.8 mm之间,呈椭圆、圆、卵圆形及碎片状,常包裹少量细粒石英砂,零散分布。石英含量占全岩的5%,分选较差,粒径在0.08~0.34 mm之间,以细砂级(43.75%)和极细砂级(43.75%)为主,中砂级仅占12.5%,形状为棱角状-次棱角状,表面含较多的溶蚀坑,表明为化学风化成因,没有经历长时间的搬运及磨圆。它们或与鲕粒、赤铁矿颗粒混合沉积在一起,或与赤铁矿及早期的鲕粒碎屑共同构成鲕粒核心。胶结物含量约10%,包括铁质胶结和钙质胶结,以铁质胶结为主。

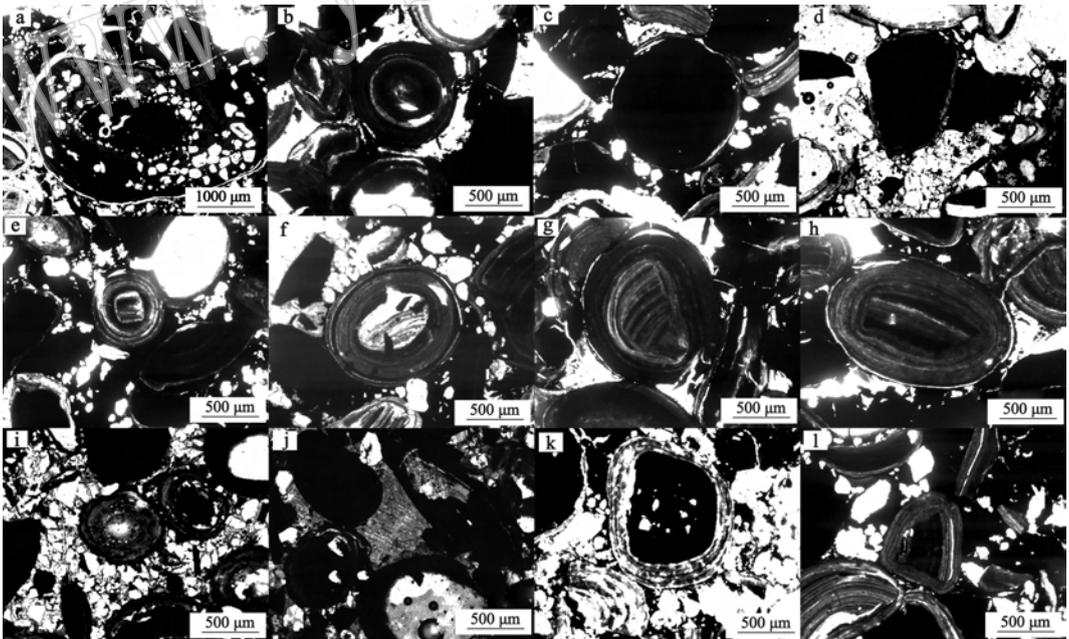


图2 鲕状赤铁矿显微镜下特征

Fig. 2 Characteristics of oolitic hematite under microscope

a—豆石(空心球为一钙球); b—圆形鲕粒; c—赤铁矿为核心的鲕粒; d—赤铁矿为核心的薄皮鲕; e—正方形核心; f—椭圆形鲕粒; g—卵圆形鲕粒; h—长柱状鲕粒核心; i—鲕粒间的石英颗粒; j—颗粒间的钙质胶结物; k—含石英颗粒的赤铁矿核心; l—不规则形鲕粒
a—pisolith; b—round oolite; c—oolith of hematite nucleus; d—thin shell oolite of hematite nucleus; e—square nucleus; f—elliptical oolite; g—oval oolite; h—oblong oolite nucleus; i—quartz grains among oolite; j—calcareous cement; k—oolith of quartz-bearing hematite nucleus; l—irregular oolite

1.2 X射线粉晶衍射分析

X射线粉晶衍射测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室X射线粉晶衍射实验室完成,仪器为Spectris. Pte. Ltd生产的X'Pert PRO型(新加坡思百吉公司)粉晶衍射仪,Cu靶,石墨单色器,电压40 kV,电流40 mA。实验结果如图3所示:鲕状赤铁矿的主要组成矿物是赤铁矿(约65%~70%)、高岭石(约15%~20%)和石英(约10%~15%)。

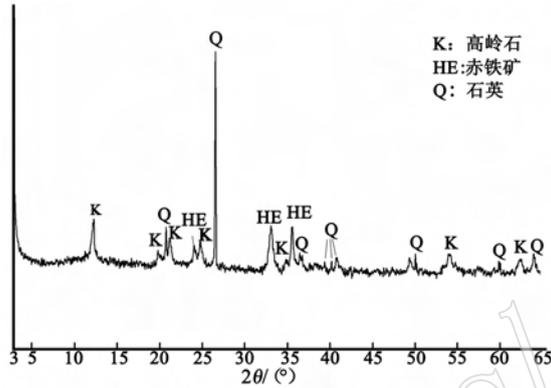


图3 鲕状赤铁矿的X射线衍射曲线

Fig.3 X-ray diffraction pattern of oolitic hematite

2 铁质鲕粒的结构、构造

2.1 鲕核

铁质鲕粒均含有1个鲕核,不见空心鲕与复鲕。鲕核可分为3类:较纯的赤铁矿、破碎的鲕粒圈层

(早期的鲕粒破碎而成)和夹有石英颗粒的赤铁矿(图2)。

较纯的赤铁矿构成的鲕核大小不一,直径0.5~1.7 mm,其中0.5~1.0 mm之间的鲕核含量约33%,1.0~1.7 mm的鲕核含量约67%。形状多为椭圆形,少量圆形及不规则形。多形成薄皮鲕,外圈往往仅有薄薄的一层。由破碎鲕粒圈层构成的鲕粒核心,形状各异,可见椭圆形、圆形、卵形、正方形、柱状、长条状、不规则状等,多形成真鲕及表鲕。由夹有石英颗粒的赤铁矿为核的鲕核,直径为0.96~1.40 mm,形状不规则,石英颗粒粒径0.04~0.10 mm,一般形成表鲕,其外部圈层比以赤铁矿为核心的薄皮鲕多。

对以破碎鲕粒圈层构成核心的鲕粒进行了电子探针分析,实验在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室电子探针实验室完成,实验仪器为日本生产的JXA-8100电子探针分析仪,加速电压15 kV,束流 1×10^{-8} A,束斑1 μm ,标准样品为美国SPI公司的53种矿物,分析数据见表1。因赤铁矿本身存在空隙,且部分褐铁矿化而含有结晶水,致使所得电子探针数据元素总量在90%左右。对应的打点位置见图4。结果显示鲕粒中 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 SiO_2 含量可占全部元素的85%以上,如图4中点2-1,3种元素可占90.318%,2-2中可占88.189%,结合X射线粉晶衍射分析,可知破碎鲕粒圈层核心成分为高岭石和赤铁矿。

上述情况表明,不同成分、结构和成因的核心都可以成为鲕粒外壳沉积的底质。只要有砂级颗粒以

表1 鲕粒核心及圈层电子探针测试结果

$w_B/\%$

Table 1 Electron microprobe analyses of oolith nuclei and shells

样号	1-1	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	4-1	4-2	4-3	4-4	4-5
Na_2O	0.034	—	0.015	0.008	0.022	0.040	—	0.058	0.056	0.004	0.035	0.064	0.012	0.004
K_2O	0.040	0.103	0.070	0.134	0.142	0.027	0.091	0.055	0.152	0.051	0.051	0.074	0.012	0.094
Cr_2O_3	—	0.094	0.104	0.122	0.163	0.124	0.176	0.083	0.156	0.113	0.318	0.132	0.091	0.187
MgO	0.016	0.353	0.439	0.431	0.465	0.375	0.407	0.508	0.528	0.421	0.321	0.437	0.267	0.378
CaO	0.049	0.204	0.179	0.249	0.282	0.154	0.303	0.246	0.232	0.236	0.216	0.279	0.112	0.201
MnO	0.045	0.036	0.030	—	0.002	0.010	0.004	0.013	0.009	0.020	0.001	0.024	0.060	0.004
Al_2O_3	0.048	19.720	20.349	36.874	34.883	17.447	36.162	29.180	29.197	30.963	22.337	28.758	12.069	35.306
TiO_2	—	0.566	0.515	0.110	0.158	0.565	0.143	0.462	0.414	7.155	0.495	0.391	0.358	0.202
Fe_2O_3	0.036	46.690	43.280	3.617	7.309	49.886	6.370	23.494	22.163	12.988	39.472	24.275	58.181	9.230
SiO_2	99.239	23.908	24.560	48.393	44.678	17.253	46.845	34.940	35.625	37.950	24.657	34.534	11.698	43.859
Total	99.507	91.674	89.541	89.938	88.104	85.881	90.501	89.039	88.532	89.901	87.903	88.968	82.860	89.465

—表示未检出。

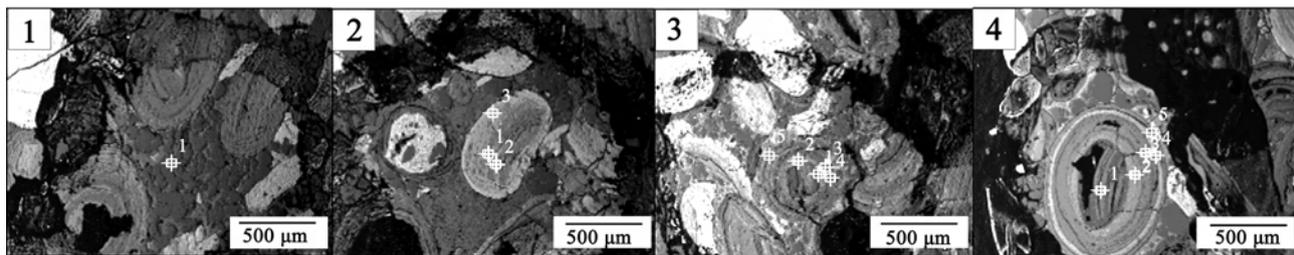


图4 电子探针测试点位置

Fig. 4 Positions of electron microprobe testing points

上的表面积、过饱和的溶质就可以在核心表面不断沉淀成鲕(赵东旭, 1994)。

2.2 鲕粒外壳

鲕粒外壳具同心环状、厚度均匀或较均匀的纹层状沉积构造,纹层沿不同的核心表面向外不断的生长,但明暗纹层的厚度相差较大。明暗纹层基本相间出现,反复交替,有时两者界限不清,呈过渡状态或无法区分。鲕粒外壳均呈同心环状,但是同心纹层层数差异明显,同心纹层数为1的含量约占15%,大于10的为45%,1~10层的为40%,主要是由鲕粒核心大小不一所致。

外壳纹层颜色主要有暗黑色、铁红色和白色,颜色变化主要是由于组成纹层的矿物含量变化引起的。外壳圈层组成矿物为赤铁矿及高岭石。通过对图4中2、3、4鲕粒外壳纹层显微镜下观察及电子探针测试结果分析,可以发现: Fe_2O_3 含量在39.472%~58.200%之间,纹层颜色为暗黑色; Fe_2O_3 含量在12.988%~24.275%之间,纹层颜色为铁红色; Fe_2O_3 含量在3.617%~9.230%之间,纹层颜色为白色,即外壳纹层颜色的深浅与Fe元素含量的变化呈很好的对应关系, Fe_2O_3 含量越高,纹层颜色越深,含量越低,纹层颜色相对越浅。 Fe_2O_3 含量高低则主要取决于赤铁矿晶体含量的高低,同时与赤铁矿晶体、高岭石晶体的大小和排列方式也有一定关系。鲕粒外壳形成时Fe质胶体的浓度是不断变化的,因此形成了这种明暗相间的外壳圈层。

以赤铁质沉积碎屑为核心的外壳通常为—层 Fe_2O_3 含量较少、颜色很浅的纹层。其他核心鲕粒的最外圈也可以观察到此种纹层,且厚度相近,表明各种颗粒及鲕粒被搬运到同一环境时形成了这一亮层。

鲕粒外壳是由赤铁矿及高岭石围绕鲕粒核心逐层沉淀而成,同心纹层很均匀,并没有发现生物活动作用,为化学作用沉积。

3 成因及古环境意义

上世纪80年代以来,国内外学者对鲕状赤铁矿研究极为重视,对地质历史时期铁质鲕粒的成因和沉积环境也有不同的认识(Kimberley, 1979; 朱世兴, 1980; Gygi, 1981; 侯奎等, 1983; 赵东旭, 1994; Utescher, 1992; Sruesson *et al.*, 1999; 胡宁等, 1998; 赵一鸣等, 2000; 戴永定等, 2003)。—般认为,铁质鲕粒中的铁或者来源于大陆风化(Utescher, 1992; 赵一鸣等, 2000),或者通过上升流来源于还原的大洋深处,因为在那里储存着由洋底热水喷溢、基性火山喷发和基性岩风化而产生的大量二价铁离子(戴永定等, 2003)。铁质鲕粒的形成环境范围很广,湖泊、泻湖、开阔海、浅海到较深海环境里均有分布。

就目前资料而言,石炭纪华南地区尤其是四川龙门山马角坝地区缺乏上升流及海底喷溢的证据,铁质鲕粒中的铁质最有可能来源于大陆风化。其主要证据有:①马角坝地区石炭系汤耙沟阶上部—旧司阶下部存在—区域性的平行不整合,马角坝组顶部发育的古岩溶灰岩及二者之间缺失—有孔虫带。Burke(1982)、卢武长等(1992)和石和等(2003)所做的锶同位素时代效应曲线表明汤耙沟阶—旧司阶锶同位素的“V”型谷具全球成因特征,该曲线与沉积连续的北美及华南其他地区对比在汤耙沟期与旧司期之间明显缺失—段,暗示区内汤耙沟期末的全球海退及古暴露剥蚀事件。②马角坝组和总长沟组具大量富含铁质的红色古岩溶沉积,这两组中共有12个古岩溶面,每个界面处均有红色泥岩、铁质砂岩和粉砂岩。现代碳酸盐地区古岩溶成因的红色土壤中 Fe_2O_3 含量很高,—般为3.1%~12.55%(李明琴等, 2005),其形成的速率在灰岩区为 $1\text{ m}/(2.8\sim 8.4)\times 10^4\text{ a}$,在白云岩区为 $1\text{ m}/(22.3\sim 79.3)\times 10^4\text{ a}$ (王世杰等, 1999)。通过古生物化石带分析,形

成这些古岩溶的时间至少有一百万年。按将今论古的原则,古岩溶时期的这一百万年里可以形成 1.78 ~ 17.8 m 厚的富含铁质的红色沉积,为铁质鲕粒的形成奠定了基础。

覃建雄等(1996)将马角坝地区含铁质鲕粒的红色碎屑岩定为大陆河湖相-残积相沉积。本次研究发现,在鲕状赤铁矿中豆石的核心里发现有钙球化石。古生代的钙球一般出现在浅海台地和碳酸盐缓坡中(Flügel, 2004)。此外,该红色碎屑岩虽然是铁质胶结,但颗粒成分成熟度及结构成熟度均较高,说明经过了长距离地搬运,且在其中见有不明显的低角度冲流交错层理,也显示其为滨浅海环境。

铁质鲕粒是海水中的铁质胶体在一定的 pH 值和 Eh 值环境中沉淀形成的,其形成海水中 Fe 浓度一定要达到其饱和度。如果当时该区处在一个完全开放的滨浅海环境,其 Fe 浓度很难达到铁质鲕粒沉淀所必须的饱和度。由此可以判断该区当时应是一种海侵初始、砂坝密布的半封闭环境,由于与外海沟通不畅,才能有较高浓度的铁质。受海平面变化、古气候及物源补给的影响,当时该区海水中铁质浓度发生过明显的变化,导致铁质鲕粒不同圈层中铁质含量的明显变化。

铁质鲕粒及大量古岩溶红色沉积的出现,反映了一种炎热、潮湿的热带亚热带环境。该套铁质鲕粒层上下的碳酸盐沉积中富含生物碎屑及鲕粒,还含有大量单体及复体四射珊瑚,也显示为温暖的热带亚热带环境。由此看来,当时龙门山地区处于热带亚热带开放的岩溶系统中,形成了大量的碳酸盐岩红色风化壳。大量的铁质从老的碳酸盐沉积中被淋滤出来,以胶体形式被地表水携带至海洋中,形成了 Fe 质饱和水条件,为鲕状赤铁矿及赤铁矿的形成提供了 Fe 质来源。由电子探针测试可知,赤铁矿核心及鲕粒外圈赤铁矿中 Al_2O_3 含量很高,可达 22.337%,通常在 17.447% ~ 22.337% 之间。这是因为在红色风化壳中氧化铁矿物(特别是针铁矿和赤铁矿)中普遍存在铝的类质同像,其含量可高达 26% 以上(朱立军等, 1997)。

综上所述,推测四川龙门山地区鲕状赤铁矿形成的主要机制是:在早石炭世时典型湿热型气候条件下,地表水携带了大量的石英颗粒、粘土矿物、铁氧化物胶体进入海洋,形成了砂坝,阻挡了潮流对后砂坝的作用,大量的铁质在坝后浅水的氧化环境下以赤铁矿的形式沉积下来,后期海平面的小幅度下

降,赤铁矿受到波浪的作用被打碎、磨圆、搅动,同时由于砂坝阻挡作用,致使后砂坝环境 Fe 质饱和,在水动力能量充分的情况下形成了以赤铁矿为核心并以化学方式沉积的鲕粒。赤铁矿鲕粒经过波浪和潮汐水流的再次搬运改造和富集,最终于后砂坝这一较深的环境沉积成矿。

4 结论

(1) 四川龙门山石炭纪鲕状赤铁矿主要由鲕粒、石英颗粒、赤铁矿碎屑颗粒、铁质胶结物及少量钙质胶结物 5 部分组成。鲕粒核心主要有 3 种:由纯赤铁矿颗粒构成的鲕粒核心、由破碎鲕构成的鲕粒核心、由夹有石英颗粒的赤铁矿构成的鲕粒核心。鲕粒同心纹层由赤铁矿及高岭石组成,存在着明显的颜色、成分的差别。纹层颜色可分为暗黑色、铁红色及白色,与之相对应, Fe_2O_3 含量分别为 39.472% ~ 58.200%、12.988% ~ 24.275% 及 3.617% ~ 9.230%。三者交替出现,构成鲕粒圈层。

(2) 通过对鲕状赤铁矿及上下地层的分析,可以确定该鲕状赤铁矿来源于汤耙沟阶晚期一次区域上重要的古暴露及古岩溶事件,该事件风化剥蚀形成的铁铝质红色沉积为鲕状赤铁矿提供了 Fe 质来源。鲕状赤铁矿及上下地层特征反映了该区属炎热、潮湿的热带亚热带古地理环境,鲕状赤铁矿沉积在其中的高能、半封闭的滨浅海环境中。海水中铁质浓度的变化导致铁质鲕粒不同圈层中铁质含量的差别。

致谢 感谢中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室郑曙老师在电子探针测试中给予的帮助。

References

- Burke W H. 1982. Variation of sea water $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ throughout Phanerozoic time[J]. *Geology*, 10(10): 1105 ~ 1107.
- Dai Yongding, Song Haiming and Shen Jiying. 2003. Iron fossil bacterial from the Xuanlong area, Hebei province [J]. *Science in China (Series D)*, 33(8): 751 ~ 759 (in Chinese with English abstract).
- Flügel Erik. 2004. *Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application*[M]. Springer.
- Gygi R A. 1981. Oolitic iron formations: marine or not marine? [J]. *Ecolgae Geologicae Helvetiae*, 74(1): 233 ~ 254.

- Hou Kui, Chen Zhiming and Yu Hao. 1983. Ore fabric and effect of blue-algae on iron richment in Xuanlong iron mine, Hebei[J]. Chinese Journal of Geology, (3): 246 ~ 250 (in Chinese with English abstract).
- Hu Ning and Xu Anwu. 1998. Horizon, Lithofacies and genesis of the Ningxiang-tape iron deposit in western Hubei, China[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 13(1): 40 ~ 47 (in Chinese with English abstract).
- Kimberley M M. 1979. Origin of oolitic iron of formation[J]. J. Sed. Petr., 49(1): 111 ~ 132.
- Li Mingqin, Zhang Zhuru, Wang Zhiyong, *et al.* 2005. Tracing the pedogenic process to Carbonate rocks in light of maceral and micropfabric characteristics of clay and Carbonate rocks; A case study of Dashandon at Guiyang rock-clay profile[J]. Geology-Geochemistry, 33(4): 77 ~ 82 (in Chinese with English abstract).
- Lu Wuchang, Cui Bingquan, Zhang Ping, *et al.* 1992. Strontium isotopic evolution of the Carboniferous marine carbonates from Majiaoba profile [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 12(2): 86 ~ 93 (in Chinese with English abstract).
- Qin Jianxiang and Zeng Yunfu. 1996. Carboniferous sequence stratigraphy and sea-level changes in the Majiaoba district, Sichuan [J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 16(1): 19 ~ 32 (in Chinese with English abstract).
- Shi He, Huang Sijing and Zhao Pengxiao. 2003. Sr isotope curve from the Carboniferous section in Jiangyou, Sichuan: Chronostratigraphic correlation and sea level changes [J]. Regional Geology of China, 22(2): 113 ~ 117 (in Chinese with English abstract).
- Torsten Utescher. 1992. A sedimentological study of Fe-oolite bearing carbonate rocks at the Lower-Middle Devonian boundary in the western Rhenish Schiefergebirge [J]. Neues Jahrbuch fuer Geologie und Palaeontologie. Monatshefte, (5): 303 ~ 320.
- Ulf Struresson, Andrei Dronov and Tonis Saadre. 1999. Lower Ordovician iron ooids and associated oolitic clays in Russia and Estonia: a clue to the origin of iron oolites? [J]. Sedimentary Geology, 123(1 ~ 2): 63 ~ 80.
- Wang Shijie, Li Hongbing, Ouyang Ziyuan, *et al.* 1999. Preliminary study on weathering and pedogenesis of carbonate rock [J]. Science in China (Series D), 29(5): 441 ~ 449 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Dongxu. 1994. Microstructures of ferruginous oolite and Their Genetic Characteristics in the Xuanlong iron deposit, Hebei province [J]. Scientia Geologica Sinica, 29(1): 71 ~ 77 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yiming and Bi Chengsi. 2000. Timespace distribution and evolution of the Ningxiang type sedimentary iron deposits [J]. Mineral Deposits, 19(4): 350 ~ 362 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Lijun, Fu Pingqiu and Wan Guojiang. 1997. Surface chemistry and adsorption mechanism of iron oxide minerals from the the laterite developed on the Carbonate rock [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 17(2): 174 ~ 178 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Shixing. 1980. Ferrous stromatolite and its significance in the Xuanlong area, Heibei province [J]. Bulletin of the Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources Chinese Academy of Geological Sciences, 1(1): 70 ~ 88 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 戴永定, 宋海明, 沈继英. 2003. 河北宣龙铁矿化石细菌[J]. 中国科学 D 辑, 33(8): 751 ~ 759.
- 侯奎, 陈志明, 于浩. 1983. 宣龙铁矿矿石组构特征及蓝藻对铁的富集作用[J]. 地质科学, (3): 246 ~ 250.
- 胡宁, 徐安武. 1998. 鄂西宁乡式铁矿分布层位岩相特征与成因探讨[J]. 地质找矿论丛, 13(1): 40 ~ 47.
- 李明琴, 张竹如, 王智勇, 等. 2005. 用岩-土显微特征示踪碳酸盐岩母岩的成土过程——以贵阳市大山洞岩土剖面为例[J]. 地球与环境, 33(4): 77 ~ 82.
- 卢武长, 崔秉荃, 张平, 等. 1992. 石炭纪海相碳酸盐岩的锶同位素演化及其意义[J]. 矿物岩石, 12(2): 86 ~ 93.
- 覃建雄, 曾允孚. 1996. 四川龙门山马角坝地区石炭纪层序地层及海平面变化研究[J]. 岩相古地理, 16(1): 19 ~ 32.
- 石和, 黄思静, 赵鹏肖. 2003. 四川江油石炭纪锶同位素曲线-年代地层对比和海平面变化[J]. 地质通报, 22(2): 113 ~ 117.
- 王世杰, 黎宏兵, 欧阳自远, 等. 1999. 碳酸盐岩风化成土作用的初步研究[J]. 中国科学(D 辑), 29(5): 441 ~ 449.
- 赵东旭. 1994. 宣龙铁矿铁质鲕粒的显微结构及成因[J]. 地质科学, 29(1): 71 ~ 77.
- 赵一鸣, 毕承思. 2000. 宁乡式沉积铁矿床的时空分布和演化[J]. 矿床地质, 19(4): 350 ~ 362.
- 朱立军, 傅平秋, 万国江. 1997. 碳酸盐岩红土中氧化铁矿物表面化学特征及其吸附机理研究[J]. 环境科学学报, 17(2): 174 ~ 178.
- 朱世兴. 1980. 河北宣龙区的铁质叠层石及其意义[J]. 中国地质科学院天津地质矿产研究所所刊, 1(1): 70 ~ 88.