

地质学报
Acta Geologica Sinica
ISSN 0001-5717, CN 11-1951/P

《地质学报》网络首发论文

题目: 红层砂岩纳米级致色剂赋存状态及地质意义——以鄂尔多斯盆地下白垩统志丹群红层砂岩为例
作者: 马勇, 杨程宇, 蔡超, 秦长彩, 张朝辉, 李磊, 钟宁宁
DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023334
收稿日期: 2023-07-10
网络首发日期: 2024-03-28
引用格式: 马勇, 杨程宇, 蔡超, 秦长彩, 张朝辉, 李磊, 钟宁宁. 红层砂岩纳米级致色剂赋存状态及地质意义——以鄂尔多斯盆地下白垩统志丹群红层砂岩为例 [J/OL]. 地质学报. <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023334>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式 (包括网络呈现版式) 排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊 (网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊 (网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物 (ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

红层砂岩纳米级致色剂赋存状态及地质意义 ——以鄂尔多斯盆地下白垩统志丹群红层砂岩为例

马勇¹⁾, 杨程宇^{*1)}, 蔡超²⁾, 秦长彩¹⁾, 张朝辉³⁾, 李磊³⁾, 钟宁宁¹⁾

1) 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京, 102249;

2) 中国石油辽河油田公司勘探开发研究院, 辽宁盘锦, 124010;

3) 内蒙古煤炭建设工程(集团)总公司, 内蒙古呼和浩特, 010090

内容提要:红层是地球上广泛分布且具有特定指示环境意义的沉积物, 一般认为在水体氧化环境下形成的赤铁矿胶结物是其主要致色矿物。目前针对红层致色矿物的研究多停留在矿物识别层面, 缺乏对其微观赋存状态及成因机制的深入研究。本文以鄂尔多斯盆地下白垩统志丹群陆相红层为例, 采用岩心—薄片—阴极发光—氩离子抛光扫描电镜的多尺度表征技术, 首次揭示了红层砂岩纳米级致色剂—赤铁矿胶结物的微观赋存状态, 并在此基础重新探讨了其成因机制。研究发现, 红层砂岩致色剂—赤铁矿胶结物主要为针状或片状, 具有两种微观赋存状态: 一种呈包裹型发育在净砂岩的颗粒周缘, 单个矿物颗粒长度在 500~1000 nm 之间, 宽度在 50 nm 以下; 另一种呈充填型发育在黏土矿物及云母等矿物颗粒的解理缝中, 常常顺解理定向排列, 受解理缝空间限制, 单个矿物颗粒更小, 长度一般小于 500 nm, 宽度在 30 nm 以下。红层砂岩中赤铁矿的产状和赋存状态表明其为褐铁矿早期脱水形成, 在此之后又发育两期方解石胶结物, 因此赤铁矿胶结物应主要形成于沉积和浅埋藏期, 而非沉积后的抬升期。砂岩中赤铁矿胶结物的形成过程指示了一个干旱内陆沉积背景下大气水氧含量高的环境特征, 这同样也是地质历史时期内的冰室状态, 说明鄂尔多斯盆地下白垩统志丹群的红层砂岩对研究该时期全球冰室状态也具有重要启示意义。

关键词: 赤铁矿; 胶结物; 红层砂岩; 志丹群; 鄂尔多斯盆地

前人对红色砂岩的研究发现, 以赤铁矿为代表的致色剂是造成砂岩呈红色的主要原因, 一般认为红色砂岩中赤铁矿主要形成于抬升期的风化改造(Rainoldi et al., 2014; Bankole et al., 2016; Wang et al., 2017; 张龙等, 2017; 郭艳琴等, 2019)。然而, 目前针对红色砂岩致色剂的研究, 主要停留在基于露头、岩心和薄片有限微观尺度的观察以及元素地球化学分析对致色剂矿物识别的层面上, 缺乏对其微观产状和赋存状态的深入研究, 这也导致红色砂岩中赤铁矿胶结物的成因机制研究较为薄弱。

鄂尔多斯盆地白垩系地层是一套广泛分布的大陆红层沉积物, 其中最具有代表性的底部志丹群红层

砂岩是鄂尔多斯盆地中广泛分布的一套碎屑岩(谢渊等, 2010; 杨华等, 2015), 其中的红层砂岩中普遍存在赤铁矿胶结物(张龙等, 2017; 郭艳琴等, 2019)。对志丹群风化壳的分析表明, 来自盆地北缘山系内富含铁变质岩和岩浆岩碎屑物源导致以黑云母为代表的大量铁质矿物进入盆地内, 这些矿物的分解可能为沉积物提供了大量的铁离子(和政军等, 1998; 阎国翰等, 2000; 赵国春, 2009), 最终形成以赤铁矿为代表的胶结物从而使砂岩呈红色(Chandler, 1980; Turner, 1980; Eriksson and Cheney, 1992; Mucke, 1994)。

白垩纪是地质历史时期上最为典型的极端温室气候期, 对应极端温室气候同样出现了极端的冰室

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号 42173030, 41802149)和内蒙古自治区地质勘查基金项目(编号 20-1-MT01)联合资助的成果。

收稿日期: 2023-07-10; 改回日期: 2023-09-17; 责任编委: 任东; 责任编辑: 李明。

作者简介: 马勇, 男, 1988 年生。博士研究生, 副教授, 主要从事油气地质和地球化学研究。E-mail: mayong@cup.edu.cn。

* 通讯作者: 杨程宇, 男, 1987 年生。讲师, 主要从事油气地质和地球化学研究。E-mail: cmbruceyoung@163.com。

引用本文: 马勇, 杨程宇, 蔡超, 秦长彩, 张朝辉, 李磊, 钟宁宁. 2024. 红层砂岩纳米级致色剂赋存状态及地质意义——以鄂尔多斯盆地下白垩统志丹群红层砂岩为例. 地质学报, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023334.

Ma Yong, Yang Chengyu, Cai Chao, Qin Changcai, Zhang Zhaohui, Li Lei, Zhong Ningning. 2024. The occurrence state and geological significance of nanoscale colorants in red bed sandstones: a case study of red sandstone of Lower Cretaceous Zhidan Group, Ordos basin. Acta Geologica Sinica.

状态,两种异常的地质状态表现的是白垩纪特殊的富氧、缺氧循环以及相关的地球环境变化(Miller et al., 1991; Broecker, 1997; Holland, 2002; 翟明国等, 2003; 王成善, 2006; 孙枢和王成善, 2009; Kidder and Worsley, 2010, 2012; Bekker and Holland, 2012; 王成善等, 2017)。一般认为黑色页岩之上的大洋红层,是白垩纪特殊碳、氧循环的重要标志,但是目前对于大陆红层的相关研究较为欠缺(王成善, 2006; 孙枢和王成善, 2009; 王成善等, 2017)。

因此,本文以鄂尔多斯盆地北部下白垩统志丹群陆相红层砂岩为例,基于岩心、薄片、阴极发光及氩离子抛光扫描电镜等观察精细表征红层砂岩致色剂在纳米级尺度上的产状及赋存状态,在此基础上结合红层砂岩成岩作用重新讨论了赤铁矿胶结物形成过程,最后阐述了这套大陆红层沉积背景及地质

意义。

1 地质背景

1.1 构造特征

鄂尔多斯盆地位于我国中部,是东、西两大构造区的结合部位,面积约 $25\times 10^4\text{ km}^2$,横跨四省(图 1a)。盆地周缘环绕了平均海拔约 $1\sim 2\text{ km}$ 的山脉,内部沉积了自古生代到新生代的巨厚地层,有着丰富的矿产资源,其中以石油和煤炭资源尤为丰富(图 1b)。鄂尔多斯盆地整体上可以划分为 6 个构造单元(图 1a),分别是伊盟隆起、渭北隆起、晋西挠褶带、陕北斜坡、天环坳陷带以及西缘断褶带,其中陕北斜坡位于盆地中部,是盆地的主体构造单元(刘池洋等, 2006; 赵振宇, 2012; 杨华等, 2015)。鄂尔多斯盆地是一个典型的克拉通盆地,自中生代以来保持了较稳定的构造特征,具体表现为中生代

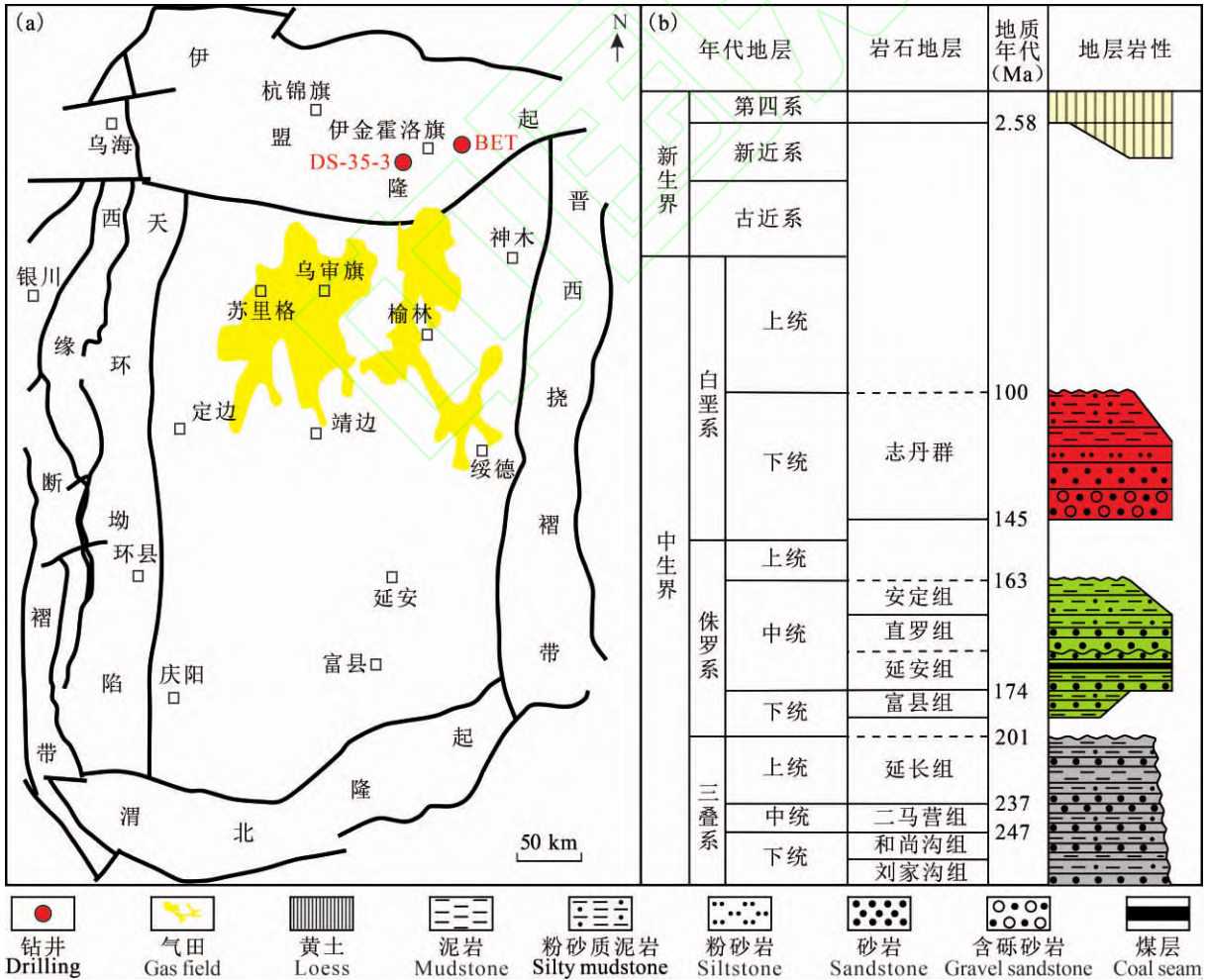


图 1 鄂尔多斯盆地构造分区及取样位置(a)和盆地北部中生代地层分布(b)(据 Zhang Long et al., 2019 修改)

Fig. 1 Tectonic zoning and sampling location of Ordosbasin (a) and Mesozoic stratigraphic distribution in northern Ordos basin (b) (modified after Zhang Long et al., 2019)

早中期的持续沉降和中生代晚期的显著抬升,特别是志丹群沉积期内持续抬升的构造背景使盆地中的湖泊逐渐消失(李孝泽, 1999; 程守田等, 2000; 杨华等, 2015)。

1.2 地层沉积特征

鄂尔多斯盆地是一个典型的克拉通盆地,自古生代以来沉积了巨厚的地层(刘池洋等, 2006)。其中古生代海相碳酸盐岩和中生代碎屑岩中分别发育了规模可观的油气藏,古生代—中生代碎屑岩中还发育了大规模的煤层(刘池洋等, 2006)。

盆地中—新生代地层均为陆相碎屑岩,主要沉积物为砂岩、泥岩以及煤层(张泓等, 2008; 杨华等, 2015)。自三叠纪起至今,盆地总体上经历了水体面积不断减小,气候由湿润转变为长期干旱的过程(刘池洋等, 2006; 杨华等, 2015)。白垩纪时期,盆地大部分区域长期暴露并形成了风化壳(赵俊峰等, 2008; 杨华等, 2015; 张龙等, 2017)。干旱的气候形成了内部沙漠沉积,周缘的山区形成了冲积扇、小型辫状河以及局部微小型绿洲湖泊的沉积格局(图 2)。

盆地中的下白垩统志丹群曾被命名为保安群,可进一步自下而上划分为洛河组、环河华池组、罗汉洞组和泾川组,然而各组地层在盆地的不同位置厚度差异较大(刘池洋等, 2006; 杨华等, 2015)。志丹群最显著的特征是多种颜色的砂岩、泥岩交替出现,具体包括绿色砂岩、白色砂岩以及红色砂岩,以及绿色、红色泥岩,不同颜色的砂岩和泥岩可见层状

交替,也可见条状、指状穿插,其中以广泛出现的层状紫红、砖红色砂岩为典型标志(李孝泽等, 1999; 程守田等, 2000; 张龙等, 2017; 郭艳琴等, 2019)。

2 红层砂岩特征

2.1 岩石学特征

志丹群的主要岩性有 3 种,分别是中细粒石英净砂岩、长石石英粉砂岩、和长石石英杂砂岩(图 3)。其中相对较粗的中、细粒石英净砂岩主要来自河流沉积和沙漠沉积,粉砂岩主要来自沙漠沉积,而杂砂岩主要来自冲积扇沉积。

岩石的主要矿物成分为石英、长石和岩屑,重矿物中黑云母的含量较高(表 1),但多遭受了较强烈的蚀变而形成了蛭石、绿泥石以及水黑云母和白云母等衍生矿物(赵俊峰等, 2008; 杨华等, 2015; 张龙等, 2017)。各类岩石中长石、石英和岩屑的比例相当,但绿泥石及其蚀变矿物的含量差异较大(表 1)。黑云母及其蚀变产物在粉砂岩和杂砂岩中含量相对较高,薄片中的面积占比甚至可达 10% 以上,而在净砂岩尤其是相对粗粒的净砂岩中,黑云母及其蚀变矿物的含量明显降低(表 1)。

2.2 赤铁矿胶结物

志丹群红层砂岩中不同沉积相的岩石具有明显的差异成岩作用特征。河流和沙漠相中沉积的中—细粒净砂岩,普遍有压实作用相对较弱的特征,颗粒多为点接触,长条形颗粒弱定向排列(图 3c、f)。然

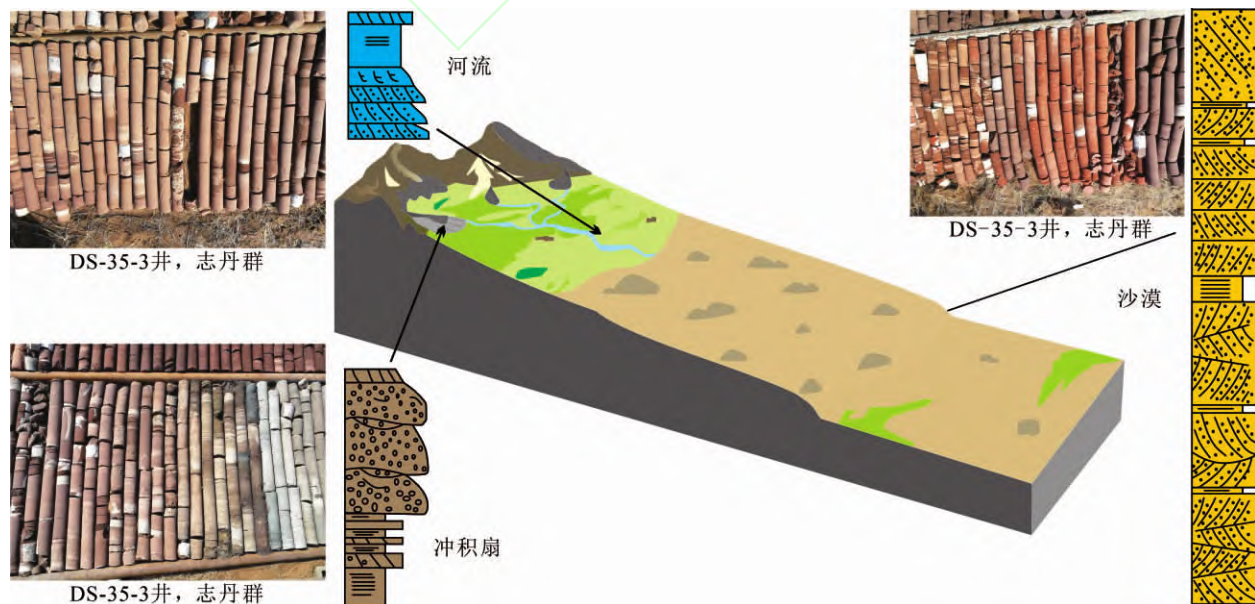


图 2 鄂尔多斯盆地北部志丹群砂岩沉积模式

Fig 2 Sedimentary model of sandstone in Zhidan Group, northern Ordosbasin

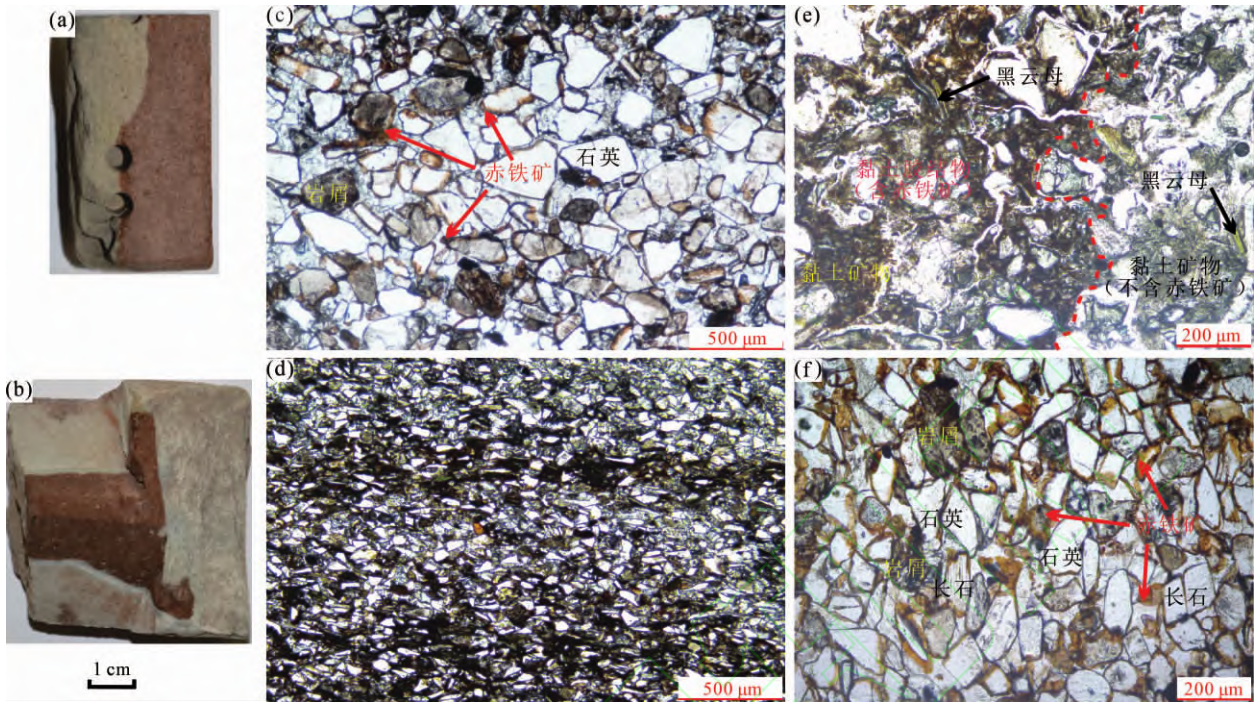


图 3 鄂尔多斯盆地北部志丹群红层砂岩岩性特征

Fig 3 Lithologic characteristics of red-bed sandstone in Zhidan Group in northern Ordos basin

(a)一层状红、白砂岩界面岩心,DS-35-3-461 m;(b)一块状红、白砂岩界面岩心, DS-35-3-580 m;(c)—红色中细粒净砂岩,DS-35-3-192 m,单偏光;(d)—长石石英粉砂岩薄片,暗色纹层主要为黑云母, DS-35-3-580 m,单偏光;(e)—红、白色杂砂岩薄片,红色虚线左侧为红区,右侧为白区,DS-35-3-173 m,单偏光;(f)—净砂岩中包裹颗粒表面的赤铁矿,DS-35-3-461 m,单偏光

(a)—layered red and white sandstone interface core,DS-35-3-461 m;(b)—massive red and white sandstone interface core,DS-35-3-580 m;(c)—red medium fine net sandstone,DS-35-3-192 m,polarized light;(d)—feldspar quartz siltstone sheet,dark grain layer is mainly biotite,DS-35-3-580 m,polarized light;(e)—red and white miscellaneous sandstone sheet,red area on the left side of the red dotted line,white area on the right,DS-35-3-173 m,polarized light;(f)—hematite on the surface of the wrapped grains in the net sandstone, DS-35-3-461 m,polarized light

表 1 砂岩样品薄片矿物成分分析结果

Table 1 Results of analysis of mineral composition in thin sections of sandstone samples

井号	深度(m)	岩性	颗粒(100%)					填隙物(100%-颗粒%)			
			石英	长石	岩屑	黑云母	其他重矿物	杂基	铁质胶结	碳酸盐胶结	黏土胶结
DS-35-3	173	长石石英粉砂岩	48	28	5	17	1	7	6	1	2
	192	长石石英细中砂岩	49	39	8	2	2	2	4	18	2
	342	长石石英细砂岩	45	33	7	12	1	5	4	3	2
	461	长石石英中细砂岩	49	28	16	4	2	2	5	15	1
	496	长石石英细中砂岩	45	37	10	6	2	4	3	2	9
	580	长石石英杂砂岩	51	31	9	8	1	35	2	2	11
BET	69	长石石英细中砂岩	44	41	11	2	2	2	4	17	2

而相对较细颗粒的净砂岩,压实作用明显增强,常见颗粒呈线接触、长条形颗粒定向排列明显(图 3d)。冲积扇沉积中常见的不等粒杂砂岩,杂基含量较高并在局部形成了杂基支撑(图 3e)。

中粒和细粒净砂岩中杂基含量较低,填隙物以胶结物为主(图 3c、f)。粉砂岩中胶结物含量降低,但可见杂基和由颗粒受压形成的假杂基(图 3d)。而杂砂岩则主要填隙物是黏土矿物杂基(图 3e)。铁质胶结是志丹群砂岩中最显著的特征,特别是赤

铁矿胶结,是志丹群砂岩形成红层的根本原因(Cornel and Schwertmann, 1996; 张龙等, 2017)。铁质胶结物普遍存在于各种岩性中,矿物颗粒,杂基、黏土胶结物均可见被赤铁矿浸染成为红色(图 3c、e、f)。

总体来看,赤铁矿主要有包裹型和充填型两种产状,包裹状赤铁矿主要包裹石英、长石、岩屑等颗粒边缘并且能对颗粒进行一定的交代(图 4a)。从 SEM 照片可以看到包裹和交代颗粒的赤铁矿胶结

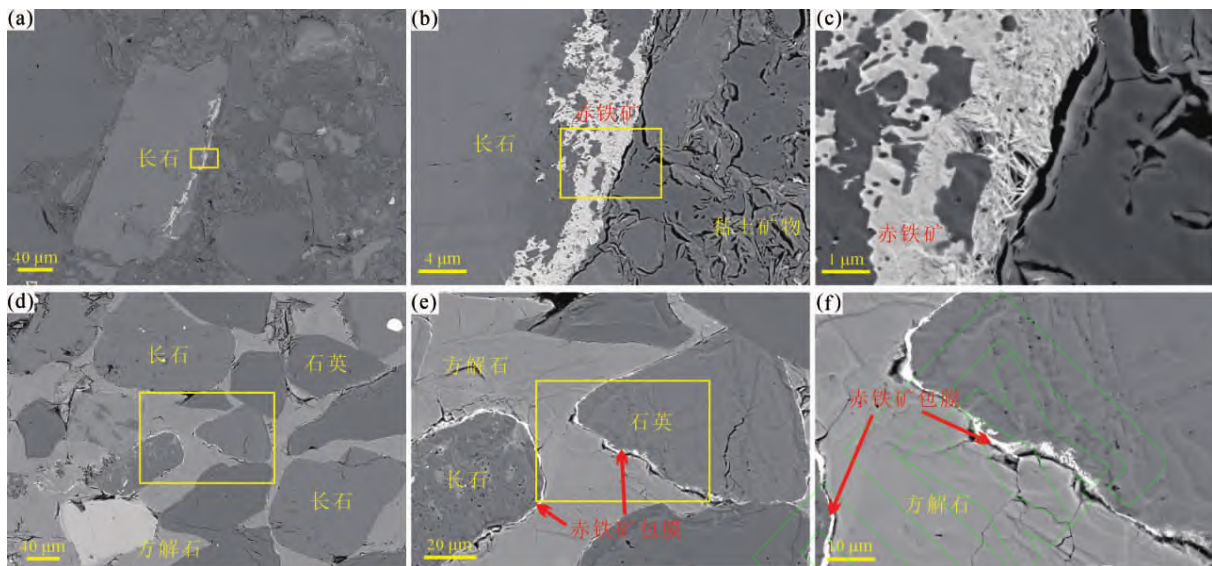


图4 鄂尔多斯盆地北部红层砂岩中纳米级包裹状铁质胶结物的扫描电镜观察结果

Fig. 4 Scanning electron microscope observation of rim ferric cement in red sandstone in northern Ordos basin

(a)—长石边缘的包膜状赤铁矿胶结物,DS-35-3-580 m;(b)—照片(a)中黄色方框放大,DS-35-3-580 m;(c)—照片(b)中黄色方框放大,DS-35-3-580 m;(d)—净砂岩中包裹碎屑颗粒的赤铁矿包膜,BET-2-69.4 m;(e)—照片(d)中黄色方框放大,BET-2-69.4 m;(f)—照片(e)中黄色方框放大,BET-2-69.4 m

(a)—encapsulated hematite cementation with feldspar edges,DS-35-3-580 m;(b)—enlarged yellow box in photo (a),DS-35-3-580 m;(c)—enlarged yellow box in photo (b),DS-35-3-580 m;(d)—encapsulated hematite with detrital grains of net sandstone species,BET-2-69.4 m;(e)—enlarged yellow box in photo (d),BET-2-69.4 m;(f)—enlarged yellow box in photo (e),BET-2-69.4 m

物在净砂岩中几乎包裹了全部颗粒(图4a、c),随后这些被包裹的颗粒由方解石胶结成岩(图4d、f)。作为致色剂的赤铁矿单体多为针状和片状,但在某些部位由于紧密堆叠而形成块体,总体上片状和针状赤铁矿颗粒宽度均不足50 nm,长度多集中于500~1000 nm(图4c),表明绝大多数赤铁矿单体颗粒的大小都在纳米级。

充填型赤铁矿可以充填杂基、黏土矿物及云母等矿物的解理,常常顺解理定向排列(图5),可见个别颗粒由于赤铁矿的充填交代而形成赤铁矿的假晶(图5a~c),部分矿物的解理由于赤铁矿的充填而产生了变形(图5d~f)。通过扫描电镜可以清楚地观察到,充填状的赤铁矿均也主要为片状或者针状(图5f、g),这表明岩石中的赤铁矿可能是由早期的针铁矿转变而来(Cornel and Schwertmann, 1996)。诸多纳米级的细小赤铁矿颗粒在矿物颗粒内部的各种空隙种密集排列,除沿着解理定向排列之外,还有部分颗粒垂直层理排列,单个赤铁矿矿物颗粒宽度不足30 nm,长度多小于500 nm(图5e、f)。大部分充填状的赤铁矿颗粒比包裹状的更加细小,这可能是由于包裹型赤铁矿颗粒生长在粒间孔内,其较大的空间使得赤铁矿颗粒能尽量长大;充填型赤铁矿的生长则受到了颗粒内微小生长空间的限

制(图4、图5)。

除了铁质胶结物和黏土胶结物以外,砂岩中还可可见亮晶方解石胶结物(图6),方解石呈粒状和嵌晶状分布(图6a、b)。从阴极发光观察中可以得知,一期方解石胶结物不发光,另一期方解石胶结物发橙黄光(图6d、e)。从两期胶结物的结晶次序可知,发黄光的一期方解石更靠近孔隙外壁,而不发光的方解石更靠近孔隙中心,说明发黄光的一期方解石的形成时间早于不发光的一期方解石(图6d、e)。包裹状赤铁矿显然形成于两期方解石之前,因为其位置最靠近颗粒。充填状赤铁矿同样主要充填了各种矿物颗粒,而没有充填任何类型的碳酸盐胶结物,因此其也形成于碳酸盐矿物胶结之前。由于方解石在阴极发光下的颜色表示了其内部锰、铁元素的比例,因此志丹群红层砂岩中的早期方解石胶结物中铁元素含量相对较低,而晚期形成的方解石中铁元素含量升高,这说明可能随着埋藏作用有部分赤铁矿中的铁离子重新被还原后进入地层水中,导致晚期形成的方解石中铁元素含量增加。

3 红层砂岩成因

3.1 碎屑沉积过程

形成砂岩中大量铁质胶结的前提条件是沉积物

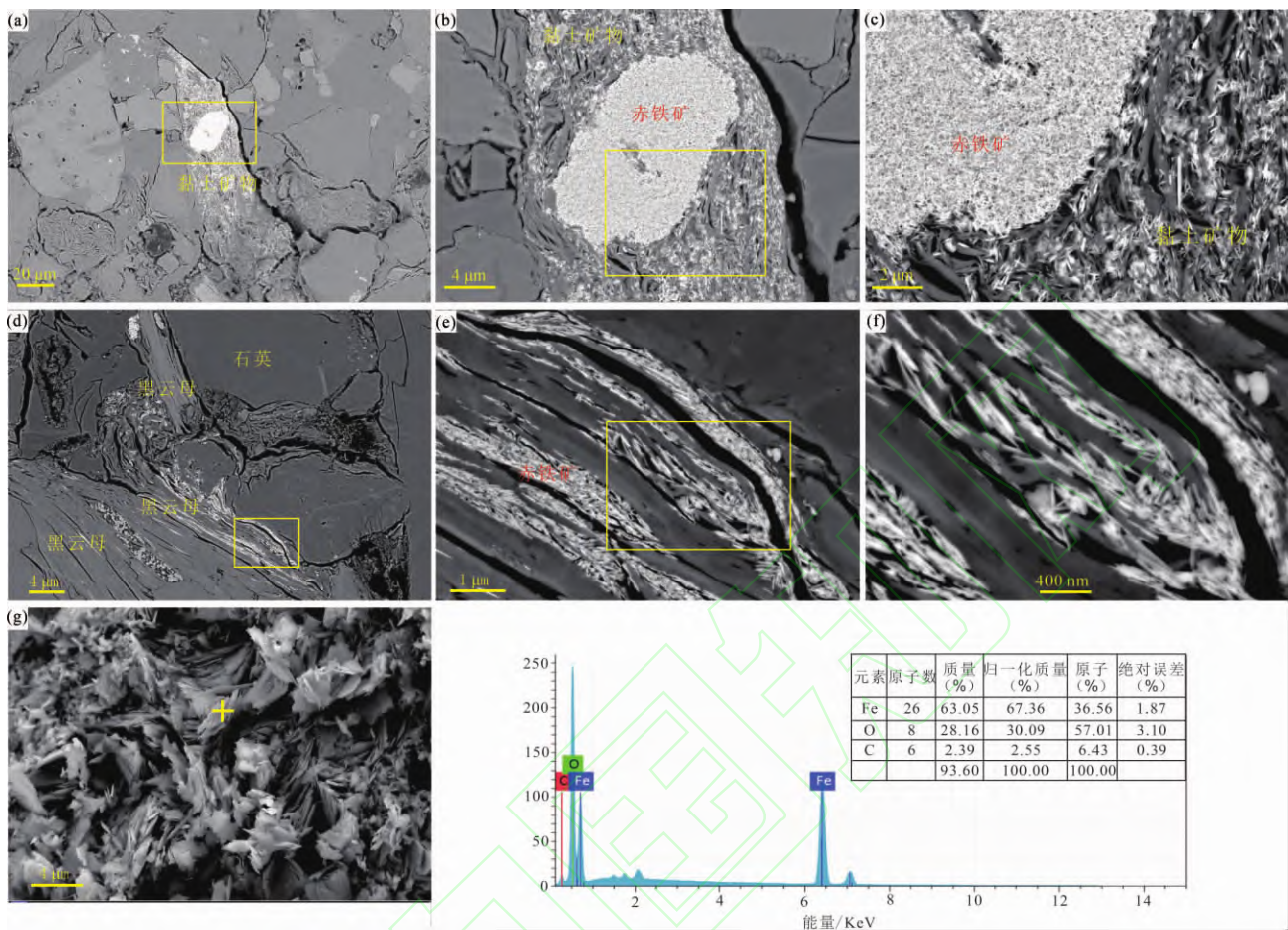


图 5 鄂尔多斯盆地北部红层砂岩中纳米级充填状铁质胶结物的扫描电镜观察结果

Fig 5 Scanning electron microscope observation of filling ferric cement in red sandstone in northern Ordos basin

(a)—充填解理缝和交代黏土矿物的赤铁矿,DS-35-3-173 m;(b)—照片(a)中黄色方框放大,DS-35-3-173 m;(c)—照片(b)中黄色方框放大,DS-35-3-173 m;(d)—蚀变的黑云母中充填的赤铁矿胶结物,DS-35-3-173 m;(e)—照片(d)中黄色方框放大,DS-35-3-173 m;(f)—照片(e)中黄色方框放大,DS-35-3-173 m;(g)—赤铁矿的能谱分析结果,DS-35-3-173 m

(a)—hematite filled with cleavage joints and metasomatic clay minerals,DS-35-3-173 m;(b)—yellow box in photo (a) enlarged,DS-35-3-173 m;(c)—yellow box in photo (b) enlarged, DS-35-3-173 m;(d)—hematite cement filled with altered biotite,DS-35-3-173 m;(e)—yellow box in photo (d) enlarged,DS-35-3-173 m;(f)—yellow box in photo (e) enlarged, DS-35-3-173 m;(g)—energy spectrum analysis of hematite,DS-35-3-173 m

源能提供足量的铁元素,常见的沉积铁元素供给可以是火山物质、生物或者含铁矿物的风化(袁见齐等,1985)。研究区白垩纪早期地层中没有发现明显的火山喷发记录,同时干旱的沙漠环境也很难提供大量生物来源的铁矿,因此含铁矿物的风化是志丹群红层砂岩中铁元素的主要来源。前人研究表明,鄂尔多斯盆地北部和东部可以向盆地内提供以片麻岩、闪长岩和花岗岩风化产物为主的沉积物源,这些岩浆岩和变质岩富含黑云母,而黑云母可以为沉积物提供足量的铁元素(和政军等,1998;阎国翰等,2000;赵国春,2009)。

研究区的相对粗粒的净砂岩中黑云母含量较低(图 3c、e,图 6a)。而相对粒度较细的粉砂岩、细粉

砂岩中,黑云母的含量陡然上升,大量的黑云母在砂岩中定向排列并且连接成为纹层,这些黑云母在薄片中的目估含量可达 15%以上(图 3d,图 6c、f)。大部分黑云母遭受了较强的蚀变,蚀变产物有绿泥石、蛭石以及白云母、水黑云母等(张龙等,2017;郭艳琴等,2019)。

导致黑云母在细粒净砂岩和杂砂岩中大量出现的原因,除物源供给较为丰富以外,沉积分异作用也是其大量出现的重要条件。与颗粒状的沉积物不同,黑云母由于其片状的外形和较轻的重量,更容易在较弱水动力条件下保持漂浮,因此黑云母往往会和颗粒直径更小的碎屑共同沉积,这就是细粒和细粉粒的净砂岩中集中出现黑云母纹层的原因。

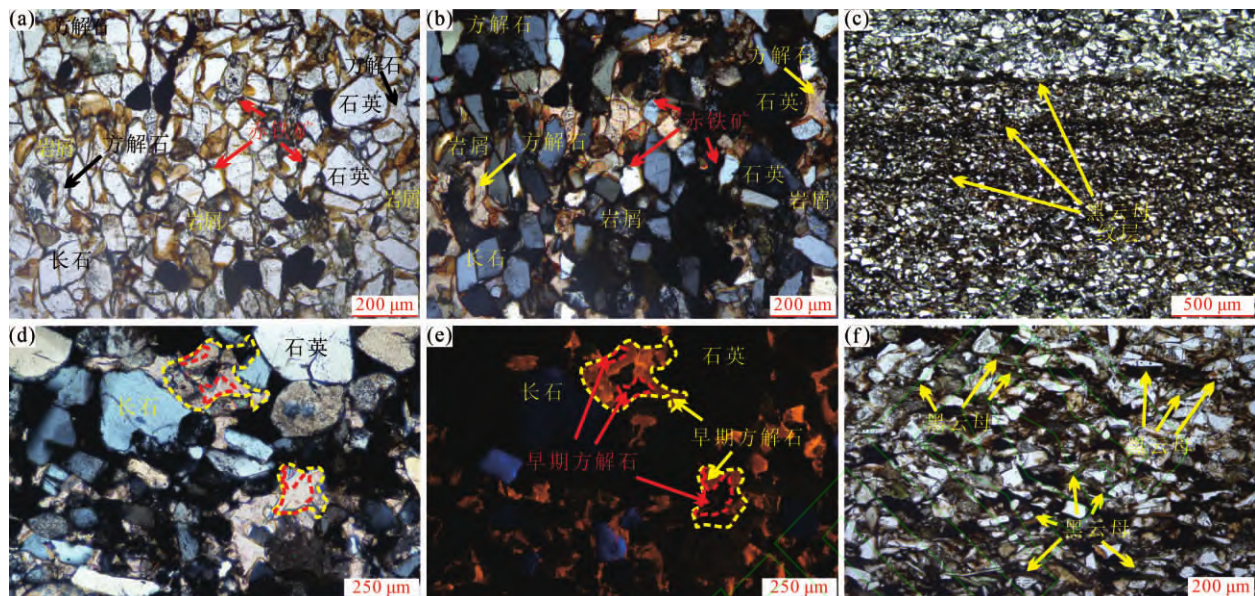


图6 鄂尔多斯盆地北部红层砂岩中的方解石胶结物

Fig. 6 Calcite cement in red sandstone in northern Ordos basin

(a)—净砂岩中的方解石基底式胶结,DS-35-3-461 m,单偏光-;(b)—净砂岩中的方解石基底式胶结,DS-35-3-461 m,单偏光-;(c)—细粉砂岩中的黑云母纹层,DS-35-3-173 m,单偏光-;(d)—净砂岩中的两期方解石胶结,DS-35-3-192 m,单偏光-;(e)—净砂岩中的两期方解石胶结,DS-35-3-192 m,阴极发光-;(f)—细粉砂岩中的黑云母,蚀变较明显,DS-35-3-173 m,单偏光-

(a)—calcite basement cementation in net sandstone, DS-35-3-461 m, polarized light-;(b)—calcite basement cementation in net sandstone, DS-35-3-461 m, polarized light-;(c)—biotite grain layer in fine silt sandstone, DS-35-3-173 m, polarized light-;(d)—two-stage calcite cementation in net sandstone, DS-35-3-192 m, polarized light-;(e)—two-stage calcite cementation in net sandstone, DS-35-3-192 m, CL-;(f)—biotite in fine siltstone, with obvious alteration, DS-35-3-173 m, polarized light-

3.2 砂岩成岩演化过程

3.2.1 含铁矿物的水解

沉积物源供给和分异作用使砂岩富集了大量以黑云母为代表的高含铁矿物,这些矿物在蚀变的过程中产生了大量的铁元素(赵俊峰等,2008;杨华等,2015;张龙等,2017)。从铁质胶结物与矿物以及其他胶结物的关系可以得知,铁质胶结在砂岩中形成的时间较早(图6a、b),因为大量风化溶蚀扩大的长石解理、边缘凹坑以及云母、黏土等矿物风化变宽的解理内都充填了针状赤铁矿(图4、图5),这说明在地表风化阶段刚结束不久,铁质胶结就开始显著影响志丹群砂岩。

在早期埋藏阶段压实过程中相对细粒的净砂岩和杂砂岩排水量较大,而这些岩石恰恰是黑云母的主要富集区,以黑云母为代表的含铁矿物风化后产生的大量铁离子随着地层水的排出,向临近的相对粗粒净砂岩扩散,这导致砂岩所含地层水中铁离子浓度的升高(图7),为铁质胶结的形成创造了条件。

3.2.2 早期铁质胶结物的形成

铁离子在地表水中往往以 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体的形式完成迁移和扩散,随着沉积水体的化学环境随之

改变, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体会开始沉淀并形成针铁矿(袁见齐等,1985;Cornel and Schwertmann,1996)(图7)。由于早白垩时期,研究区的沉积背景是干旱的沙漠环境,周围高地间歇性水流的补给不足以形成稳定的地表水体,这导致沉积物间歇性的暴露和埋藏。地表水体和浅部地下水体中形成的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体在净砂岩中包裹颗粒(图7),在杂砂岩中充填颗粒的解理缝、颗粒缺口和溶蚀凹坑(图7),这种铁的沉淀过程类似鲕粒状沉积赤铁矿的形成过程(袁见齐等,1985;Guilbert and Charles,2007),然而研究区碎屑颗粒的总量太大,稀释了总矿物颗粒中含铁矿物的浓度,故而没能形成高富集度的铁矿层。

3.2.3 中—浅埋藏和碳酸盐胶结物的形成

针铁矿和进一步脱水形成的赤铁矿是研究区碎屑岩中最主要的早期胶结物,然而随着埋藏阶段的开始,大部分铁离子已经以赤铁矿的形式沉淀。在净砂岩中, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体影响过的区域基本都形成了包裹型的赤铁矿胶结物,随后部分砂岩孔隙又被碳酸盐胶结物充填;没有受到 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体影响的区域则直接形成了碳酸盐胶结物。杂砂岩中残留

了少部分含低价态铁的黑云母及其蚀变产物,大部分孔隙也被高价态的赤铁矿胶结物所充填,但是由于杂砂岩孔隙度较低,少量的赤铁矿胶结物已经几乎将孔隙填满,因此后期的碳酸盐胶结物几乎不发育(图 7),砂岩在沉积和浅埋藏期内,赤铁矿胶结物的形成过程就已结束。

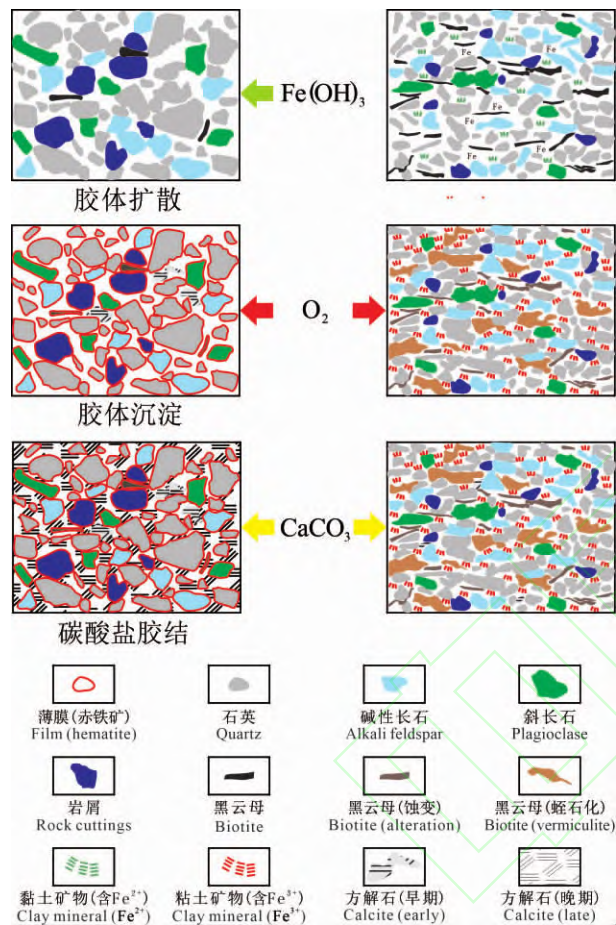


图 7 鄂尔多斯盆地北缘志丹群红砂岩的成岩演化模式

Fig. 7 Diagenetic evolution model of red sandstone in Zhidan Group, northern margin of Ordos basin

4 红层砂岩的沉积背景和地质意义

4.1 白垩系红层沉积背景

鄂尔多斯盆地北缘志丹群红层砂岩在构造抬升和气候干旱的背景下,由于少雨的环境,盆内平缓的地区形成了大面积的沙漠,周缘山区斜坡带季节性的降水和冰川融水形成了冲积扇和辫状河,但由于总体缺水的环境这些流水难以延伸到盆地内的平缓区,少数靠近斜坡的洼地可能存在一些小型或者微型的绿洲湖泊(图 2)。这种大环境说明志丹群红层砂岩多来自于间歇性的瞬间堆积,这种沉积模式在单位时间内的平均沉积速率可能并不低,然而沉积

物堆积之后会保持长期的暴露(刘池洋等, 2006; 杨华等, 2015; 张龙等, 2017)。总之,研究区的沉积背景可以概括为:①沉积物源中有足量的铁质矿物;②沉积物间歇性快速堆积,间歇期内长期暴露;③赤铁矿胶结物形成后未经历强还原物质或还原性环境的影响而发生转变。

全球气候和海平面变化研究表明,白垩纪开始时,全球海平面高度虽然也整体较现今更高,但仍处于整个白垩纪时期的最低位,随后直到白垩纪末期的海平面持续升高,这说明早白垩统是整个白垩纪相对海平面最低的时期,较低的海平面往往意味着较高的大气含氧量,这种环境特征与志丹群陆相红砂岩标志的气候干旱和长期氧化环境完全吻合(王成善等, 2017)。在铁离子供给较充足的情况下,随着氧化还原条件的不同,铁质在沉积物中的存在形式有明显差异(袁见齐等, 1985),在酸性的强氧化条件下,受氧化程度最高的铁离子会形成针铁矿、赤铁矿等铁的高价氧化物,而偏酸性的弱氧化条件下铁离子更倾向于形成以鲕绿泥石为代表的硅酸盐矿物(图 8)。在白垩纪早期,由于长期干旱的大环境背景,研究区水体酸性和氧化性强,因此大量铁元素形成了 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体,这些胶体在沉积期以赤铁矿的形式沉淀。相反,鄂尔多斯盆地侏罗系和三叠系中富含绿泥石的河湖相砂岩代表了相对于志丹群红层砂岩更弱的水体氧化性和酸性(Worden and Morad, 2003; 郭彦如等, 2012; 陈宝赞等, 2014; 付金华等, 2015; 周晓峰, 2017)。值得注意的是,志丹群红层砂岩的沉积相表明,大部分砂岩在快速堆积之后就长期暴露,地表状态下可能没有足够的水体使铁离子发生迁移,因此研究区红层砂岩中的部分铁质矿物的分解和迁移可能是在浅埋藏的状态下由近地表的地下水完成,这说明该时期地下水含氧量异常高。

4.2 红层砂岩的地质意义

志丹群红层砂岩沉积时的环境背景说明,大部分针铁矿、赤铁矿的形成是在埋藏早期的地下水环境中完成的,因为极端干旱的环境下研究区缺乏地表水,季节性的流水只能对地下水进行一定的补充,难以在地表形成稳定的水体进而形成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体。在这种情况下,要使砂岩中的铁离子在有一定埋藏深度的情况下几乎全部转变成赤铁矿,就需要大气水中具有非常高的含氧量。长期极端干旱的环境、间歇性的快速沉积和异常高的含氧均对应了冰室环境的特征。由于大气中氧含量的异常高,臭氧

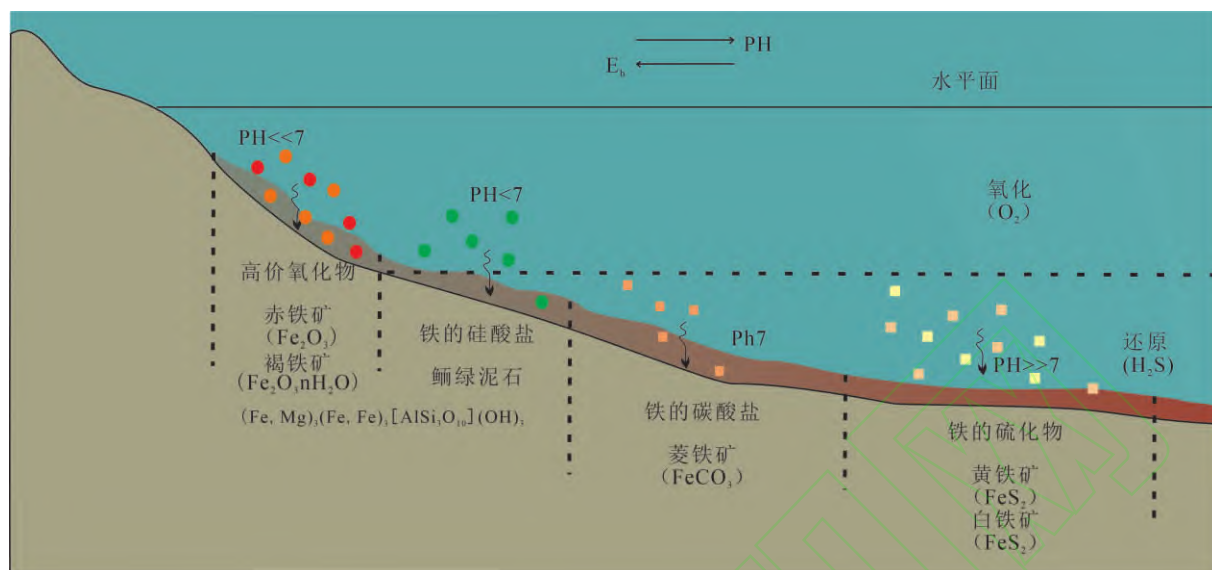


图 8 沉积铁矿床铁相示意图(据 Guilbert and Charles, 2007 修改)

Fig 8 Iron facies diagram of sedimentary iron deposit (modified from Guilbert and Charles, 2007)

层变厚导致全球气温下降,更多的冰川和更少的蒸发使降雨变少、气候干旱,而季节性的温度波动导致冰川融化仍然能形成间歇性的洪水和对应的沉积,而大气水中高浓度的氧气可能使赤铁矿的形成更加容易。

鄂尔多斯红层砂岩所标志的冰室状态是否对应了早白垩纪的一次全球冰室事件,还需要进一步的研究来证实,但就目前的资料而言,红层砂岩的形成最匹配沉积物间歇性快速堆积、大气水氧含量异常高的地质环境条件,与冰室事件的特征有很好的对应关系。

5 结论

(1)志丹群陆相红层砂岩显色的主要原因是铁质矿物分解导致砂岩中富含赤铁矿,纳米级的显微分析表明这些赤铁矿为褐铁矿脱水形成的针状赤铁矿,存在包裹和充填颗粒两种主要的赋存状态;

(2)志丹群的陆相中细粒、粉粒净砂岩和杂砂岩主要经历了压实、铁质胶结和碳酸盐胶结等成岩作用的影响,岩石先遭受纳米级颗粒的赤铁矿、针铁矿为代表的铁质胶结,随后是方解石形成的两期碳酸盐胶结。

(3)红层砂岩在沉积物间歇性快速堆积和大气水氧含量偏高的环境背景下最容易形成,而该环境对应了冰室状态,因此较大规模的红层砂岩的广泛出现可能是地质历史时期内一次冰室事件的重要标志。

致谢: 内蒙古煤炭建设工程(集团)总公司的相关人员对本文提供了重要协助,特此感谢。

References

- Bankole O M, El Albani A, Meunier A, Rouxel O J, Gauthier-Lafaye F, Bekker A. 2017. Origin of red beds in the Paleoproterozoic Francevillebasin, Gabon, and implications for sandstone-hosted uranium mineralization. *American Journal of Science*, 316(9): 839~872.
- Bekker A, Holland H D. 2012. Oxygen overshoot and recovery during the Early Paleoproterozoic. *Earth and Planetary Science Letters*, 317-318: 295~304.
- Broecker W. 1997. Willour ride into the greenhouse future be a smooth one. *GAS Today*, 71~6.
- Chandler F W. 1980. Proterozoic red bed sequences of Canada. *Geological Survey Bulletin*, 311: 62.
- Chen Baoyun, Li Rongxi, Liang Jiwei, Huang Kezhou. 2014. Authigenic chlorite and its impact on reservoir physical properties: An example from the Yanchang Formation of the southwest Ordos basin. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 33(3): 389~394 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Shoutian, Liu Xing, Guo Xiurong, Li Zhide. 2000. Palaeo-desert deposition and sequence stratigraphic units: An example from cretaceous continental palaeo desert basin in ordos. *Earth Science*, 25(6): 587~591 (in Chinese with English abstract).
- Eriksson P G, Cheney E S. 1992. Evidence for the transition to an oxygen-rich atmosphere during the evolution of red beds in the Lower Proterozoic sequences of southern Africa. *Precambrian Research*, 54: 257~269.
- Fu Jinhua, Luo Shuenshe, Niu Xiaobin, Lv Qiqi, Xu Liming, Feng Shengbin, LI Shixiang. 2015. Sedimentary characteristics of channel type gravity flow of the Member 7 of Yanchang Formation in the Longdong area, Ordos basin. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(1): 29~37 (in Chinese with English abstract).
- Guilbert J M, Charles F P. 2007. *The Geology of Ore Deposits*. Long Grove, IL: Waveland Print.
- Guo Yanqin, Li Wenhui, Guo Bincheng, Zhang Qian, Chen Qiang, Wang Ruogu, Liu Xi, Ma Yao, Li Zhichao, Zhang Mengting, Li Baiqiang. 2019. Sedimentary systems and palaeogeography

- evolution of Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography*, 2: 293~320 (in Chinese with English abstract).
- Guo Yanru, Liu Junbang, Yang Hua, Liu Zhen, Fu Jinhua, Yao Jingli, Xu Wanglin, Zhang Yanling. 2012. Hydrocarbon accumulation mechanism of low permeable tight lithologic oil reservoirs in the Yanchang Formation, Ordos basin, China. *Petroleum Exploration and Development*, 39(4): 417~425 (in Chinese with English abstract).
- He Zhengjun, Li Jingtie, Niu Baogui, Ren Jishun. 1998. A Late Jurassic thrusting-uplifting event in the Yanshan-Yinshan area, northern China, and its sedimentary response. *Geological Review*, 44(4): 407~418 (in Chinese with English abstract).
- Holland H D. 2002. Volcanic gases, black smokers, and the great oxidation event. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66: 3811~3826.
- Kidder D L, Worsley T R. 2010. Phanerozoic large igneous provinces (LIPs), Heatt (haline euxinic acidic thermal transgression) episodes, and mass extinctions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 295: 162~191.
- Kidder D L, Worsley T R. 2012. A human-induced hothouse climate? *GSA Today*, 22: 4~11.
- Li Xiaozhe, Dong Guangrong, Ji Heling, Su Zhizhu, Wang Yuangping. 1999. Discovery of Cretaceous dune rock in Ordos. *Science Bulletin*, 44(8): 874~877 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chiyang, Zhao Hongge, Gui Xiaojun, Yue Leping, Zhao Junfeng, Wang Jianqiang. 2006. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos basin. *Acta Geologica Sinica*, 80(5): 22 (in Chinese with English abstract).
- Miller K G, Wright J D, Fairbanks R G. 1991. Unlocking the ice house: Oligocene-Miocene oxygen isotopes, eustasy, and margin erosion. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 96(B4): 6829~6848.
- Mücke A. 1994. Part 1: Postdiagenetic ferruginization of sedimentary rocks (sandstones, oolitic ironstones, kaolins, and bauxites)—Including a comparative study of the reddening of red beds. In: Wolf K H, Chilingarian G V, eds. *Diagenesis IV*; Elsevier, *Developments in Sedimentology*, 51: 361~395.
- Rainoldi A L, Franchini M, Beaufort D, Patrier P, Giusiano A, Impicini A, Pons J. 2014. Large-scale bleaching of red beds related to upward migration of hydrocarbons; Los Chihuidos High, Neuquén basin, Argentina. *Journal of Sedimentary Research*, 84(5): 373~393.
- Sun Shu, Wang Chengshan. 2009. Deep Time and Sedimentology. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(5): 19 (in Chinese with English abstract).
- Turner P. 1980. Continental red beds; Elsevier. *Developments in Sedimentology*, 29: 577.
- Wang Chengshan. 2006. Coupling of the earth surface system: Inferring from the Cretaceous major geological events. *Advances in Earth Science*, 21(8): 838~842 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chengshan, Wang Tiantian, Chen Xi, Gao Yuan, Zhang Laiming. 2017. Paleoclimate implications for future climate change. *Earth Science Frontiers*, 24(1): 1~17 (in Chinese with English abstract).
- Wang Ren, Shi Wanzhong, Xie Xiangyang, Wang Liaoliang, Busbey A, Manger W, Xia Zhimin. 2017. Hydrothermal indications of Early Cretaceous red beds in lacustrine successions, North Yellow Sea Basin, eastern China. *Marine and Petroleum Geology*, 88.
- Worden R H, Morad S. 2003. Clay minerals in sandstones: Controls on formation, distribution and evolution. In: Worden R H, Morad S, eds. *Clay Mineral Cements in Sandstones*. Oxford: Blackwell Publishing, 3~41.
- Xie Yuan, Wang Jian, Li Lingxi, Xie Zhengwen, Deng Guoshi, Li Minghui, Jiang Xinshe. 2010. Distribution of the Cretaceous clay minerals in Ordos basin, China and its implication to sedimentary and diagenetic environment. *Geological Bulletin of China*, 29(1): 93~104 (in Chinese with English abstract).
- Yan Guohan, Mou Baolei, Xu Baoliang, He Guoqi, Tan Linqun, Zhao Hun, He Zhongfu, Zhang Rengu, Qiao Guangshen. 1999. The chronology and Sr, Nd and Pb isotopic characteristics of Triassic alkaline intrusive rocks in Yanliao-Yinshan and their significance. *Science in China (Series D)*: *Earth Science*, 42(6): 582~587.
- Yang Hua, Liu Xinshe, Yan Xiaoxiong. 2015. The relationship between tectonic-sedimentary evolution and tight sandstone gas reservoir since the late Paleozoic in Ordos Basin. *Earth Science Frontiers*, 22(3): 174~183 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Jianqi, Zhu Shangqing, Zhai Yusheng. 1985. *Mineral Deposit Science*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Zhou Xiaofeng, Jiao Shujing, Yu Junming. 2017. Occurrences and origin of chlorite films in the Yanchang Formation sandstones, Ordos basin. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 36(5): 834~842 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo, Zhu Rixiang, Liu Jiangming, Meng Qingren, Hou Quanlin, Hu Shengbiao, Li Zhong, Zhang Hongfu, Liu Wei. 2003. Geological features of Mesozoic tectonic regime inversion in eastern North China and implication for geodynamics. *Science in China (Series D)*: *Earth Science*, 11(3): 285~298.
- Zhang Hong, Jin Xianglan, Li Guihong, Yang Yzhiyuan, Zhang Hui, Jiang Jiancheng. 2008. Original features and palaeogeographic evolution during the Jurassic-Cretaceous in Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography*, 10(1): 1~11 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Long, Liu Chiyang, Lei Kaiyu, Sun Li, Cun Xiaoni, Du Fangpeng, Deng Hui. 2017. White Bleached Sandstone Genesis and Paleo-Weathered Crust Forming Environment of the Jurassic Yanan Formation in the Northeastern Ordos Basin. *Acta Geologica Sinica*, 91(6): 1345~1359 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Long, Liu Chiyang, Lei Kaiyu. 2019. Green altered sandstone related to hydrocarbon migration from the uranium deposits in the northern Ordos Basin, China. *Ore Geology Reviews*, 109: 482~493.
- Zhao Guochun. 2009. Metamorphic evolution of major tectonic units in the basement of the North China Craton: Key issues and discussion. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1772~1792 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Junfeng, Liu Chiyang, Yu Lin, Wang Xiaomei. 2008. The transfer of depocenters and accumulation centers of Ordos basin in Mesozoic and its meaning. *Acta Geologica Sinica*, 82(4): 540~552 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhengyu, Guo Yanrui, Wang Yan, Lin Dongjuan. 2012. Study progress in tectonic evolution and Paleogeography of Ordos basin. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 19(5): 15~20 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 陈宝赞, 李荣西, 梁积伟, 黄克洲. 2014. 自生绿泥石及其对储层物性影响研究——以鄂尔多斯盆地西南缘延长组为例. *矿物石油地球化学通报*, 33(3): 389~394.
- 程守田, 刘星, 郭秀蓉, 李志德. 2000. 古沙漠沉积及其层序单元——以鄂尔多斯白垩纪内陆古沙漠盆地为例. *地球科学: 中国地质大学学报*, 25(6): 587~591.
- 翟明国, 朱日祥, 刘建明, 孟庆任, 侯泉林, 胡圣标, 李忠, 张宏福, 刘伟. 2003. 华北东部中生代构造体制转折的关键时限. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 33(10): 913~920.
- 付金华, 罗顺社, 牛小兵, 吕奇奇, 徐黎明, 冯胜斌, 李士祥. 2015. 鄂尔多斯盆地陇东地区长 7 段沟道型重力流沉积特征研究. *矿物石油地球化学通报*, 34(1): 29~37.

郭彦如, 刘俊榜, 杨华, 刘震, 付金华, 姚泾利, 徐旺林, 张延玲. 2012. 鄂尔多斯盆地延长组低渗透致密岩性油藏成藏机理. 石油勘探与开发, 39(4): 417~425.

郭艳琴, 李文厚, 郭彬程, 张倩, 陈强, 王若谷, 刘溪, 马瑶, 李智超, 张梦婷, 李百强. 2019. 鄂尔多斯盆地沉积体系与古地理演化. 古地理论, 2: 293~320.

和政军, 李锦轶, 牛宝贵, 任纪舜. 1998. 燕山—阴山地区晚侏罗世强烈推覆—隆升事件及沉积响应. 地质论评, 44(4): 407~418.

李孝泽, 董光荣, 靳鹤龄, 苏志珠, 王远平. 1999. 鄂尔多斯白垩系沙丘岩的发现. 科学通报, 44(8): 874~877.

刘池洋, 赵红格, 桂小军, 岳乐平, 赵俊峰, 王建强. 2006. 鄂尔多斯盆地演化-改造的时空坐标及其成藏(矿)响应. 地质学报, 80(5): 22.

孙枢, 王成善. 2009. "深时" (Deep Time) 研究与沉积学. 沉积学报, 27(5): 19.

王成善. 2006. 白垩纪地球表层系统重大地质事件与温室气候变化研究——从重大地质事件探寻地球表层系统耦合. 地球科学进展, 21(8): 838~842.

王成善, 王天天, 陈曦, 高远, 张来明. 2017. 深时古气候对未来气候变化的启示. 地质前缘, 24(1): 1~17.

谢渊, 王剑, 李令喜, 谢正温, 邓国仕, 李明辉, 江新胜. 2010. 鄂尔多斯盆地白垩系黏土矿物的分布特征及其沉积-成岩环境意

义. 地质通报, 29(1): 93~104.

阎国翰, 牟保磊, 许保良, 何国琦, 谭林坤, 赵晖, 何中甫, 张任祐, 乔广生. 2000. 燕辽—阴山三叠纪碱性侵入岩年代学和 Sr, Nd, Pb 同位素特征及意义. 中国科学 D 辑: 地球科学, 30(4): 383~387.

杨华, 刘新社, 闫小雄. 2015. 鄂尔多斯盆地晚古生代以来构造-沉积演化与致密砂岩气成藏. 地质前缘, 22(3): 174~183.

袁见齐, 朱上庆, 翟裕生. 1985. 矿床学. 北京: 地质出版社.

张泓, 晋香兰, 李贵红, 杨志远, 张慧, 贾建称. 2008. 鄂尔多斯盆地侏罗纪—白垩纪原始面貌与古地理演化. 古地理论, 10(1): 1~11.

张龙, 刘池洋, 雷开宇, 孙莉, 寸小妮, 杜芳鹏, 邓辉. 2017. 鄂尔多斯盆地东北部侏罗系延安组漂白砂岩成因和古风化壳形成环境探讨. 地质学报, 91(6): 1345~1359.

赵国春. 2009. 华北克拉通基底主要构造单元变质作用演化及其若干问题讨论. 岩石学报, 25(8): 1772~1792.

赵俊峰, 刘池洋, 喻林, 王晓梅. 2008. 鄂尔多斯盆地中生代沉积和堆积中心迁移及其地质意义. 地质学报, 82(4): 540~552.

赵振宇, 郭彦如, 王艳, 林冬娟. 2012. 鄂尔多斯盆地构造演化及古地理特征研究进展. 特种油气藏, 19(5): 15~20.

周晓峰, 焦淑静, 于均民. 2017. 鄂尔多斯盆地延长组砂岩中绿泥石膜的赋存状态及成因. 矿物岩石地球化学通报, 36(5): 834~842.

The occurrence state and geological significance of nanoscale colorants in red bed sandstones: A case study of red sandstone of Lower Cretaceous Zhidan Group, Ordos basin

MA Yong¹⁾, YANG Chengyu^{*1)}, CAI Chao²⁾, QIN Changcai¹⁾,
ZHANG Zhaohui³⁾, LI Lei³⁾, ZHONG Ningning¹⁾

1) National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

2) Research Institute of Exploration & Development, Petro China Liaohe Oilfield Company, Panjin, Liaoning 124010, China;

3) Inner Mongolia Coal Construction Engineering (Group) Corporation, Huhhot, Inner Mongolia 010090, China

* Corresponding author: cmbruceyoung@163.com

Abstract

Red beds are widely distributed sediments on Earth with specific environmental significance. It is generally believed that hematite cement formed under water oxidation conditions is the main color-producing mineral. At present, the research on red-bed coloring minerals mostly remains at the level of mineral identification, lacking in-depth study on their microscopic occurrence states and genetic mechanisms. Taking the continental red beds of the Lower Cretaceous Zhidan Group in the Ordos basin as an example, this paper adopts multi-scale characterization techniques of core, thin section, cathodoluminescence, and argon ion polished scanning electron microscopy to reveal the microscopic occurrence of nano-scale colorant-hematite cement in red bed sandstone for the first time, and re-explore its genetic mechanism on this basis. The study found that the colorant of red bed sandstone, hematite cement, is mainly needle-like or sheet-like, with two microscopic occurrence states: One is encapsulated and developed around the edges of clean sandstone particles, with individual mineral particles ranging in length from 500~1000 nm and width below 50 nm; The other type of filling development occurs in the cleavage fractures of clay minerals and mica particles, often arranged in a directional manner along the cleavage. Due to the spatial constraints of the cleavage fractures, individual mineral particles are smaller,

with lengths generally less than 500 nm and widths below 30 nm. The occurrence and occurrence state of hematite in red bed sandstone indicate that it was formed by the early dehydration of limonite, followed by the development of two phases of calcite cementation. Therefore, hematite cementation should mainly occur during the sedimentation and shallow burial periods, rather than during the uplift period after sedimentation. The formation process of hematite cement in sandstone indicates an environment characterized by high atmospheric water oxygen content under a dry inland sedimentary background, which is also a glacial state during the geological history. This suggests that the red sandstone of the Lower Cretaceous Zhidan Group in the Ordos basin also has important implications for studying the global glacial state during this period.

Key words: hematite; cement; red sandstone; Zhidan Group; Ordos basin