



移动阅读

杨凯, 张启连, 谢振朝, 等, 2023. 广西湖润锰矿矿层软沉积变形特征[J]. 沉积与特提斯地质, 43(1): 101–116. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.08002](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.08002)

YANG K, ZHANG Q L, XIE Z C, et al., 2023. Soft-sediment deformation characteristics in the Hurun Manganese Mining area, Guangxi, South China[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(1): 101–116. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.08002](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.08002)

## 广西湖润锰矿矿层软沉积变形特征

杨 凯, 张启连\*, 谢振朝, 宫 研, 陈 胜, 覃瑞才, 韦松良,  
曹淑芳, 区洪威

(广西壮族自治区地质调查院, 广西 南宁 530023)

**摘要:** 锰矿作为我国大宗紧缺矿产, 其矿体特征被学者广泛研究。然而关于矿层软沉积变形特征的研究却不多, 其特征和成因有待厘清。湖润锰矿处于广西下雷超大型锰矿床的外围, 作者通过对其主矿层II+III矿层的观察研究, 发现II+III矿层以液化变形为主的软沉积变形发育, 如液化砂、液化泥(亮)晶脉、自碎屑角砾、液化底劈、微褶皱纹理、同沉积断裂等, 局部地段可见完整的变形序列, 同时矿层被上覆岩系超覆; 此类变形不仅在横向上有延伸, 在垂向上还有重复且跨度长, 从晚泥盆世至石炭纪均有发育, 符合软沉积变形地震成因的典型特征。加之稀土元素地球化学特征显示成矿期热水参与了成矿作用, 表明锰矿形成时期沉积盆地伸展作用强烈, 矿化发生于裂隙槽下斜坡带。对比国内外著名的大型超大型锰矿床, 认为软沉积变形应与成矿密切相关, 可作为重要的找矿标志。

**关键词:** 湖润锰矿; 软沉积变形; 地震成因; 伸展作用; 找矿标志

中图分类号: P618.32

文献标识码: A

## Soft-sediment deformation characteristics in the Hurun Manganese Mining area, Guangxi, South China

YANG Kai, ZHANG Qilian\*, XIE Zhenchao, GONG Yan, CHEN Sheng, QIN Ruicai,  
WEI Songliang, CAO Shufang, OU Hongwei

(Guangxi Geological Survey Institute, Nanning 530023, China)

**Abstract:** China is shortage of manganese mineral resources. Although manganese orebodies have been widely studied by scholars, characteristics and genesis of soft-sediment deformation in manganese ore layers are unclear. Hurun manganese ore is located in the periphery of the super-large Xialei manganese deposit in Guangxi. A number of liquefied deformation structures, such as liquefied sandstone, liquefied micritic (sparry) vein, autoclast breccia, liquefied diaper, micro-corrugated lamination, and syn-sedimentary microfractures, occurred as soft-sediment deformation in the II+III ore layers, and the complete deformation sequences can be seen in some areas, while the ore layers were overlapped by later strata. This kind of structure not only extends horizontally,

收稿日期: 2022-02-18; 改回日期: 2022-05-09; 责任编辑: 黄春梅; 科学编辑: 唐渊

作者简介: 杨凯(1986—), 男, 工程师, 主要从事矿产地质勘查与研究工作。E-mail: [353286290@qq.com](mailto:353286290@qq.com)

通讯作者: 张启连(1966—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事矿产地质勘查与研究工作。

E-mail: [258839931@qq.com](mailto:258839931@qq.com)

资助项目: 本文为“广西关键矿产资源深部勘查人才小高地(桂组通字[2019]85号, 2019—2023)”项目和广西找矿突破战略行动地质矿产勘查项目“广西靖西县湖润矿区朴隆矿段外围碳酸锰矿普查(桂国土资函[2016]397号、桂自然资函[2019]758号)”的成果

but also repeats vertically with a long span, developing from Late Devonian to Carboniferous, which is consistent with the typical soft-sediment deformation structures related to seismic genesis. In addition, the geochemical characteristics of REE show that the hot water participated in the mineralization during the ore-forming period, indicating a strong extension of sedimentary basin during the mineralization of manganese deposits in a lower slope zone of the aulacogen. Comparing with famous large or super-large manganese deposits at home and abroad, it is considered that the soft-sediment deformation is closely related to the mineralization of manganese deposits and it can be used as an important indicator for ore prospecting.

**Key words:** Hurun manganese deposit; soft-sediment deformation; caused by earthquake; extension; prospecting criteria

## 0 引言

软沉积变形构造是未岩化的沉积物或原生沉积构造在沉积期间或沉积期后(早期成岩过程)受到扰动变形而形成的次生沉积构造,也称同生变形构造(刘宝珺, 1980; 姜在兴, 2003)。引起软沉积物变形的诱因有多种,如地震、快速堆积、风暴、潮汐、海平面变化、冰融、水合物泄漏、水力破裂等(杜远生等, 2017; 陈吉涛, 2020)。

贵州地区的锰矿软沉积变形研究取得了诸多进展,周琦等(2007, 2013)研究贵州大塘坡式古天然气渗漏沉积型锰矿床,认为古天然气渗漏喷溢沉积构造,如被沥青充填的气泡状构造、底辟构造、渗漏管构造、泥火山构造和软沉积变形纹理等,是裂谷盆地古天然气渗漏锰矿成矿系统中心相的典型构造,属伸展构造系统的同沉积断层,是大塘坡式锰矿床的重要找矿标志(和景阳等, 2016; 周琦等, 2017)。刘志臣等(2019)亦认为遵义二叠系锰矿与同沉积断层密切相关,特别是喷溢构造附近锰含量高。相比之下,虽然已有学者对广西壮族自治区内地层中的软沉积变形构造进行了研究(广西壮族自治区地质矿产勘查开发局, 2006; 乔秀夫, 2002; 杜远生等, 2005; 黄宏伟等, 2007; 彭阳等, 2007, 2009; 李容森等, 2008; 张能等, 2016),但对于锰矿层内的软沉积变形鲜有报道,仅曾友寅(1991)、赵立群等(2016)提到下雷锰矿层中有泄水构造及包卷构造,卢安康等(2021)发现下雷锰矿有气液喷溢沉积构造;总的来看,广西对锰矿软沉积变形研究程度偏低。

软沉积变形构造的研究作为近 20 年来沉积学的热点之一(杜远生等, 2017; 陈吉涛, 2020),对成矿背景厘定具有指导意义。笔者曾于 2016 年、2019 年两次参与湖润锰矿普查,发现湖润锰矿矿层中软沉积变形发育较为典型。本文拟通过对湖润矿区不同工程揭露的软沉积变形的展示,结合元

素地球化学特征,试图探索本区锰矿层软沉积变形的成因,加深对这种特殊沉积构造的理解,为锰成矿作用研究提供新的视角。

## 1 矿区地质概况

湖润矿区位于桂西右江褶皱系下雷—灵马裂陷南端,为早泥盆世晚期发展起来的裂陷槽。据广西壮族自治区数字地质图 2006 年版说明书(1:50 万),大致在泥盆纪布拉格中期,广西运动褶皱成山不久的地壳又开始裂陷沉降,海水自南西向北东逐渐侵入,依次超覆于前泥盆纪地层之上。早泥盆世晚期,裂陷加剧,沉积相发生了明显的分异,即出现了“台、沟”沉积相间格架,在下雷—灵马一带,发育一套台沟相硅泥质岩及含锰岩系。

湖润矿区位于下雷矿区北约 5 千米处,出露地层有:中泥盆统东岗岭组( $D_2d$ )、上泥盆统榴江组( $D_3l$ )、上泥盆统五指山组( $D_3w$ )、下石炭统鹿寨组( $C_1lz$ )、下—上石炭统巴平组( $C_{1-2}b$ )、上石炭—下二叠统南丹组( $C_2P_1n$ )以及第四系。碳酸锰矿体赋存于五指山组第二段( $D_3w^2$ )和第三段( $D_3w^3$ ),自下而上为 I 矿层、硅质岩、II+III 矿层、硅质岩、顶矿层。其中 I 矿层与顶矿层品位厚度变化大,不稳定。II+III 矿层是矿区主要矿体,由 II 分层和 III 分层合成,中间夹一薄层含锰硅质岩,因其小于夹石最小剔除厚度,且与上下分层合成一矿层后仍达到工业指标要求,所以习惯上将此合层当成一个矿体(层)看待,以保持与下雷矿区相同矿层称谓的一致性。锰矿层的空间分布受区内主要褶皱湖润—把荷背斜控制,该背斜北东自乐村经湖润至茶屯,长 19 千米,宽 2~5 千米,轴向  $40^\circ\sim 60^\circ$ ,核部为中泥盆统东岗岭组、上泥盆统榴江组、上泥盆统五指山组,翼部出露下石炭统鹿寨组、下—上石炭统巴平组、上石炭—下二叠统南丹组。两翼地层倾角  $30^\circ$  左右,轴部变陡,达  $65^\circ\sim 80^\circ$ (图 1)。

II+III 碳酸锰矿层与顶底板围岩界线清晰,矿

层主要发育纹层构造,常见脉状构造。矿石类型为碳酸锰矿石,矿石矿物主要由含锰方解石、菱锰矿、石英组成,此外尚有少量绿泥石、高岭石、绢云母、蔷薇辉石、铁-锰的水化合物、黄铁矿-白铁矿、黄铜矿、闪锌矿、沥青。含锰方解石、菱锰矿呈他形微晶浸染状分布,石英呈他形脉状分布。

下雷锰矿产于裂隙槽中心及边缘斜坡(曾友寅,1991),Ⅱ+Ⅲ矿层厚 2.5~5.5 m(赵立群等,2016)。湖润锰矿处于下雷锰矿的外围,产于裂隙槽下斜坡带,钻孔揭露湖润锰矿Ⅱ+Ⅲ矿层平均厚度约 1.1 m(广西壮族自治区地质调查院,2016<sup>①</sup>,2021<sup>②</sup>),两者产出于同一层位,夹于硅质岩中。

## 2 研究资料与方法

本次研究主要针对湖润矿区钻孔、窿道及地表露头进行观测及采样分析,其中钻孔 ZK2008、ZK2010、ZK2012 位于朴隆 2 矿段外围 20 号勘探线,均为见矿钻孔;朴隆 1 矿段 395 平洞、内伏矿段 400 平洞为开采窿道。

在钻孔 ZK2010 采集Ⅱ+Ⅲ矿层及Ⅰ矿层薄片样(图 2),送至河北省地质测绘院岩矿实验测试中

心进行鉴定。为了确定菱锰矿,在薄片鉴定基础上加做能谱测试。能谱检测设备为 JEOL EPMA8230,环境温度为 22℃,相对湿度为 40%。

在钻孔 ZK2012 分别采集Ⅱ+Ⅲ矿层及其顶底板样品(图 2),其中 ZK2012-H9 至 H16 采用原普查基本分析样副样。样品送至澳实分析检测(广州)有限公司检测。样品破碎后缩分出 300 g 研磨至 75 μm(200 目)进行检测。检测方法:1. P61-XRF26s X 射线荧光光谱仪熔融法分析主次量元素,检出限为 0.01%;2. P61-rXRF26e X 射线荧光光谱仪熔融法硫碳质含量较高样品主量分析,检出限为 0.01%;3. M61-MS81 电感耦合等离子体发射光谱与质谱稀土元素分析,检出限  $0.01 \times 10^{-6} \sim 0.1 \times 10^{-6}$ ;4. rM61-MS81 电感耦合等离子体发射光谱与质谱稀土元素分析(酸消解前先高温灼烧),检出限  $0.01 \times 10^{-6} \sim 0.1 \times 10^{-6}$ 。检测环境条件:温度 25℃,相对湿度:50%。稀土元素分析相对误差 5%~10%。

## 3 湖润矿区软沉积变形特征

### 3.1 Ⅱ+Ⅲ 锰矿层软沉积变形特征

湖润锰矿区Ⅱ+Ⅲ锰矿层目前发现的软沉积变形主要为液化变形。同时在Ⅱ+Ⅲ矿层之上,见硅质岩超覆于软沉积物之上,两者接触界面呈舒缓波状,再往上被矿层顶板围岩覆盖(图 3A),说明Ⅱ+Ⅲ矿层发生软变形过程中尚未脱离水界面。

液化砂脉是沉积物液化泄水过程中充填上覆及下伏沉积物的脉状构造。液化砂脉一般宽 0.3 cm×0.6 cm~16 cm×53 cm,呈不规则状,边缘不平整,其边缘转折端呈圆滑状,在切穿岩层时纹层随之弯曲。可分为两类,一类为水平或倾斜液化脉(图 4B,图 5B、E),为最早形成的液化脉流大致沿层理流动的结果,呈断续展布,类似豆状,与乔秀夫等(1994)泥晶脉扰动灰岩的下部的 A 单元中的 a 或 b 次单元相似。另一种与层理大角度相交,属于液化高潮的产物(乔秀夫等,1994),是沉积物液化流上侵或下侵的脉状构造(图 3B,图 5B、E)。

液化泥(亮)晶脉是方解石和白云石颗粒沿液化泄水构造充填在层内不规则裂隙中,颗粒干净,成分简单,与围岩含有杂质有明显区别,是液化过程中碳酸盐矿物比其他矿物更易于改造的结果,脉体无共轭性,宽窄变化大。液化脉一般宽小于 5 cm,长约 1 cm 到 60 cm 不等,形态不一,或高角度相交,或呈不规则弯曲延伸,中间膨大,往两端变细尖灭

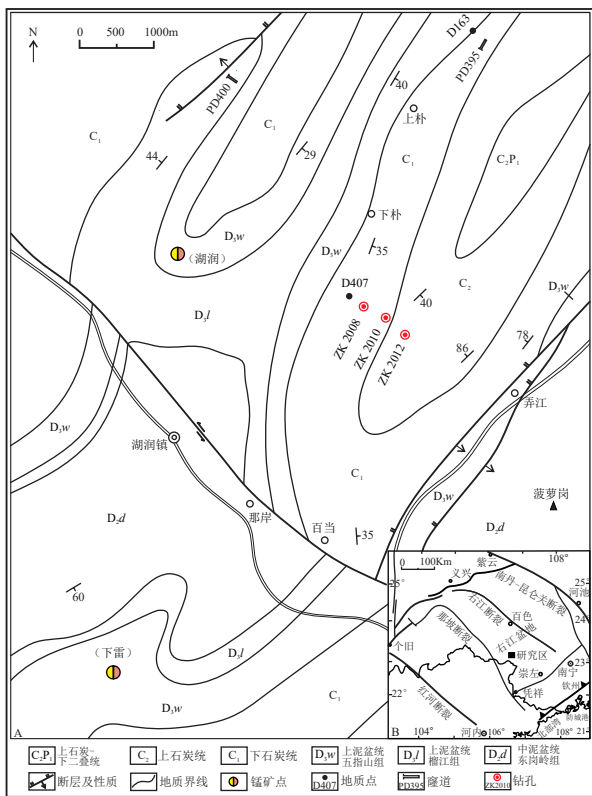


图 1 湖润矿区区域地质简图

Fig. 1 Regional geological diagram of Hurun mining area

(图 3A、C);或呈树枝状汇聚(图 5D,图 6E,图 7D);或者明显呈现下部尖细,往上逐渐膨大,到上部多条脉汇聚(图 5C,图 7A、C);或呈密集垂直纹层短脉状,往上汇聚成 1 cm×1 cm~15 cm×30 cm 不等不规则团块状(图 3C)。液化泥(亮)晶脉常见被微断层错断(图 5B、E)。

液化底劈是液化沉积物以穹形(图 6C,图 7C,图 8E)或蘑菇状(图 5B、E,图 8E)向上侵入上覆岩层中,在一个液化脉层内沿走向可观测到一个或多个,大小约 0.2~1 cm。蘑菇内部纹层与顶部弯曲面平行,或在穹形侵入的侧面,其上覆岩层纹理与穹形接触处,纹层因液化挤压而呈弧形弯曲(图 5B)。

微褶皱纹理表现为矿层内纹层发育一系列波状不规则斜卧微褶皱,褶皱轴向不定,幅度不一,多表现为毫米级别(图 4C,图 5B、D、E,图 6D、F),局部幅度较大(图 3B、C)。微褶皱的转折端局部被液化泄水或微同沉积断裂破坏(图 4C,图 5B)。

液化卷曲变形表现为矿层内纹层形成的一系列形态各异、轴面及枢纽方位不定的小型褶曲,而其上下岩层的纹理保持不变(图 5D,图 6A、E)。

自碎屑角砾是半固结或未固结的岩石因振动液化而破碎,在原地形成的角砾。角砾无分选、棱角一次磨圆状,大小约 0.1 cm×0.1 cm~5 cm×17 cm,局部可拼接(图 3D,图 4C、D,图 5A,图 6B、C、E),或角砾一端棱角呈细长尖状,与另一相邻角砾连接(图 3C)。

负载构造和球-枕构造表现为上覆较粗岩层由于液化作用而失衡,沉陷于下方软化层中,但未脱离母体,形成负载构造(图 5B),钻孔岩心中多有出现。若脱离母体,又称球-枕构造(图 6F)。

微同沉积断裂表现为矿层内微纹层或液化砂被微同正断层错动,错动距离多为毫米级别。裂面稍弯曲,微纹层、液化砂可见明显牵引褶皱,局部见阶梯状正断层(图 5E,图 6D)。

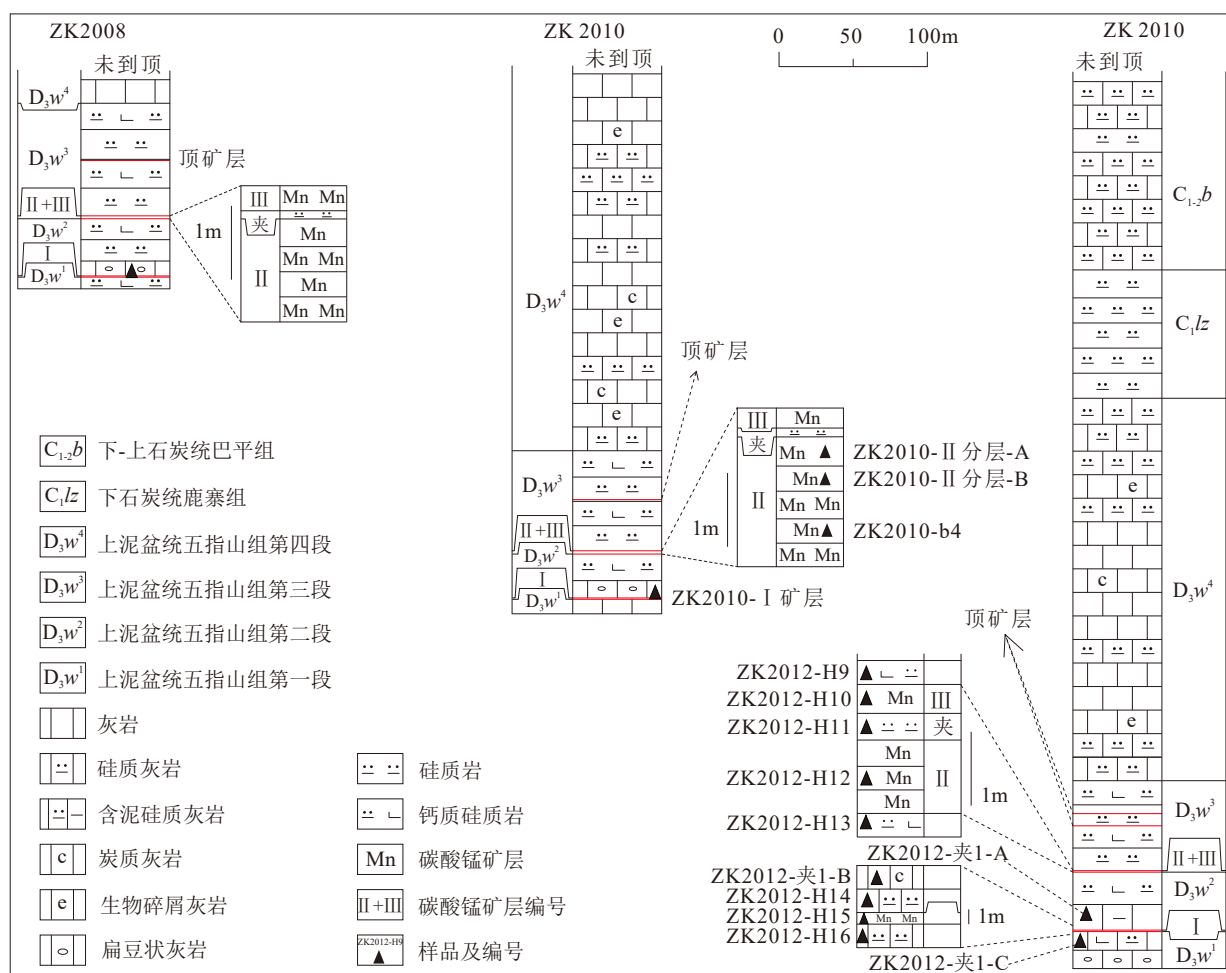


图 2 采样钻孔柱状对比图

Fig. 2 Columnar comparison diagram of the sampling borehole





A. 隧道内 II+III 矿层, 液化泥(亮)晶脉, 发育于层内, 下端尖, 上部膨大, 显示自矿层内自下往上液化泄水下, 为亮晶方解石充填, 见上覆岩层与液化层存在超覆沉积, 朴隆 1 矿段 395 平硐; B. 隧道内 II+III 矿层, 层内褶皱发育, 垂向液化砂液化脉发育, 大小及形态各异, 朴隆 1 矿段 395 平硐; C. 隧道内 II+III 矿层, 层内同生微褶皱纹理发育, 垂向液化泥(亮)晶方解石脉发育, 矿层顶部见自碎屑角砾, 角砾局部一端呈尖状与另一角砾相连, 内伏矿段 400 平硐; D. 锰矿层地表露头, 顶板岩层平直, 矿层上部见液化角砾, 朴隆 1 矿段 D163。

图 3 湖润矿区锰矿层宏观软沉积变形

Fig. 3 Macroscopic soft-sediment deformation of manganese ore bed in Hurun mining area

### 3.2 矿区其他层位软沉积变形特征

自碎屑角砾发育于  $D_3w^2/D_3w^1$  接触部位及  $D_3w^1$  上部, 表现为灰岩层总体呈顺层扁豆状角砾分布, 角砾两端稍宽, 中部略窄, 宽约 0.4~0.6 cm, 长约 0.8~4 cm, 局部微纹层仅被拉伸变形或褶皱变形(图 6G, 图 8B、C、D、E)。

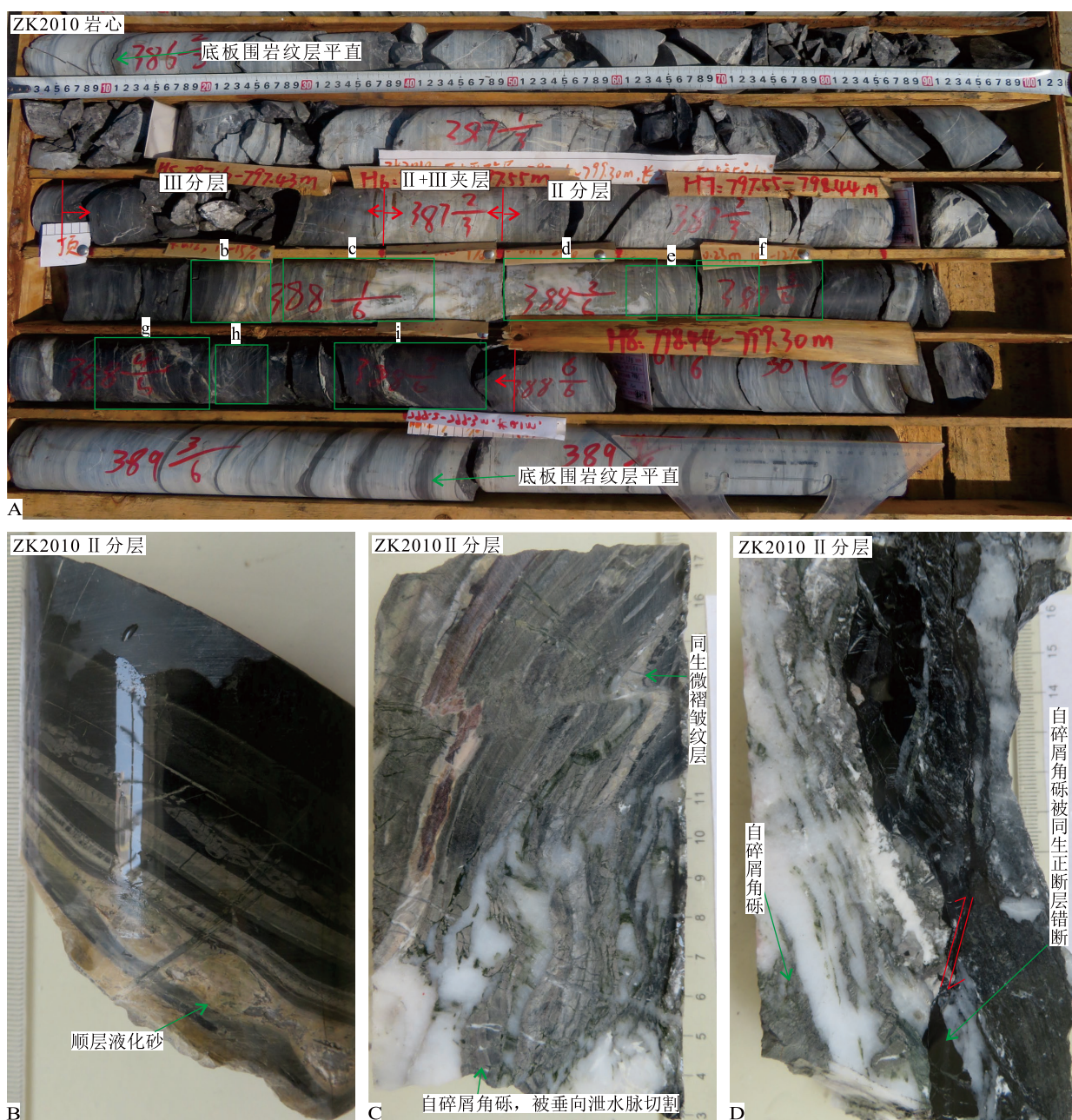
液化卷曲变形发育于  $C_{1-2}b$  灰岩(图 6G)及  $D_3w^1$  上部扁豆状灰岩(图 8A)。在地表  $C_{1-2}b$  灰岩露头见厚约 6 m 的范围内发育一系列轴向无序、规模不一的紧闭褶皱, 属液化卷曲变形。变形层上下岩层层理平直, 两者差别显著。

## 4 软沉积变形构造分布特点

虽然矿区发育有多种软沉积变形构造, 但观其

分布大体仍有一定规律可循。在图 8B、C 中, 位于下方的 I 矿层发育液化作用, 其上部硅质灰岩发育同沉积自碎屑角砾。实际上在钻孔编录过程中, II+III 矿层顶部钙质硅质岩中亦发育有同沉积自碎屑角砾岩。至于液化变形层段内的构造分布特点, 通过图 5E 的展示自下而上大体分为: 平直纹层理单元—液化初期水平或倾斜的泥晶碳酸盐脉单元—同生微褶皱纹理单元—液化砂单元—自碎屑角砾单元。此外, 在图 5E 中, 液化砂层段明显被同沉积正断层错断, 表明该段至少经历两次液化变形作用。总的来看, 矿区软沉积变形自下而上大致分为液化变形层和同沉积变形层。液化变形层多见发育于矿层内, 同沉积变形层多见发生于矿层顶板。





A. 钻孔 II+III 矿层及顶底板围岩, 顶底板围岩纹层理平直, 矿层内纹层弯曲褶皱, 顺层液化砂、垂向液化脉发育, 钻孔岩心内 III 分层、夹层、II 分层界线清晰; 图 A 中标 b、c、d 分别为本版图 B、C、D 在矿层中所处位置, 图 A 中 e、f、g、h、i 分别为图 5A、B、C、D、E 在矿层中所处位置; B. 豆状顺层液化砂, 见垂向液化脉切穿液化砂; C. 微褶皱纹理发育, 左侧蔷薇辉石在层内被错断, 形成微同沉积断裂, 多见细小液化泄水脉垂向切穿纹理, 下部顺层液化作用强烈, 局部矿层呈液化角砾岩位于后期液化石英中, 形成自碎屑角砾; D. 顺层液化发育, 形成自碎屑角砾, 右侧见被同生正断层错断的自碎屑角砾。

图 4 湖润矿区 ZK2010 II+III 矿层软沉积变形微观特征 1

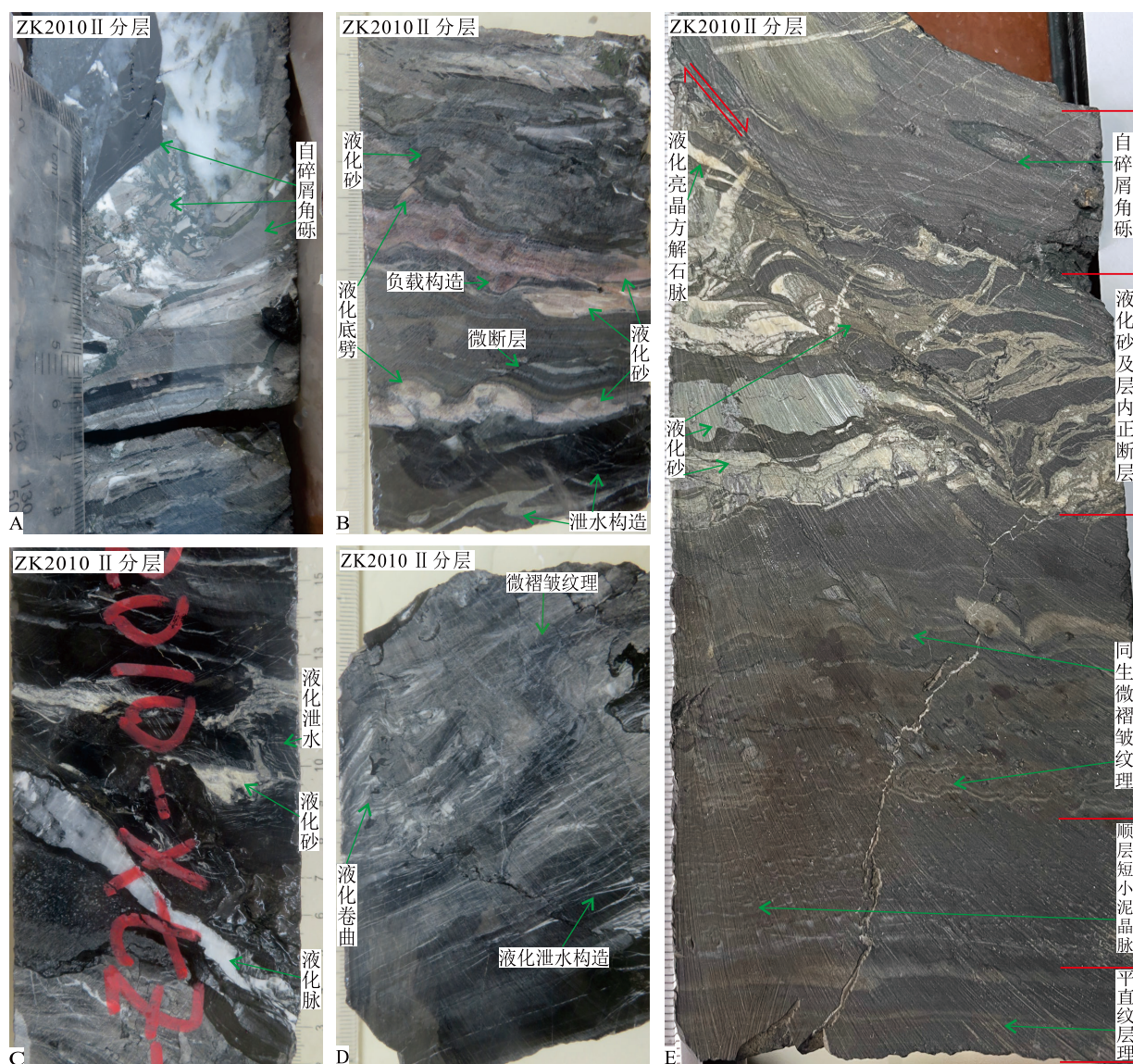
Fig. 4 Microcosmic characteristics of soft-sediment deformation of ZK2010 II+III manganese ore bed in Hurun mining area, 1

## 5 矿区地球化学特征

选择见矿钻孔 ZK2012, 对其 II+III 矿层及其顶底板不同岩性分别取样分析测试, 常量元素分析结

果见表 1、稀土元素分析结果见表 2。需要说明的是, 本区 I 矿层不稳定, ZK2012 中 I 矿层 Mn 含量仅 2.08%, 但相对围岩仍较高, 且保持矿层深色调特征, 故仍使用 I 矿层的称谓, 以达到对比的效果。





A.上部自碎屑角砾发育,下部液化砂发育;B.见发育垂向液化砂、液化底劈、负载构造、泄水构造及微断层;C.细小液化脉发育,一般一头尖,另一头膨大汇聚形成不规则树枝状聚水脉,顺层及垂向液化砂均见发育;D.钻孔 ZK2010 II 分层,顺层液化泄水脉发育,一般一侧尖细,另一侧膨大,指示往一侧泄水,岩层上部垂向泄水脉较发育,见液化卷曲及微褶皱纹理;E.钻孔 ZK2010 II 分层,见锰矿层内一个较完整振动液化序列,自下而上液化作用逐渐增强,过液化砂层后减弱。自下而上分为:平直纹层理单元—液化初期水平或倾斜的泥晶碳酸盐脉单元—同生微褶皱纹层理单元—液化砂单元—自碎屑角砾单元。其中液化砂单元内见微正断层,微纹层可见明显牵引褶皱,错断距离约几毫米。

图 5 湖润矿区 ZK2010 II+III 矿层软沉积变形微观特征 2

Fig. 5 Microcosmic characteristics of soft-sediment deformation of ZK2010 II+III manganese ore layer in Hurun mining area, 2

从表 1 中可看出,常量元素 Fe、Mn、P、S 明显在矿层中富集:矿层中  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量平均含量 8.45%,围岩中基本都小于 2%;矿层中 Mn 含量最高达 14.25%,围岩中 Mn 含量基本均小于 2%; $\text{P}_2\text{O}_5$  在矿层中含量高达 0.32%,在围岩中最高仅个别为 0.1%,其余均不大于 0.06%; $\text{SO}_3$  在矿层中局部高达 13.75%,

而围岩中均小于 1%。

矿区样品稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(图 9)总体为右倾曲线,矿石和围岩曲线形态基本一致,矿石(II 分层、III 分层)曲线位置明显位于围岩曲线上方。围岩  $\sum\text{REE}$  为  $33.68 \times 10^{-6} \sim 78.98 \times 10^{-6}$ ,含量普遍较低,矿层  $\sum\text{REE}$  为  $111.94 \times 10^{-6} \sim 229.26 \times 10^{-6}$ ,





A. ZK2012 II+III矿层发育液化卷曲变形, 发生液化卷曲的岩层被钻孔揭穿后, 沿钻线方向, 岩层内纹层表现出近直立, 或与上下岩层纹层呈高角度斜交, 如图 8-A 所示。图 A 中 b、c、d、e 分别为本版图 B、C、D、E 在矿层中所处位置; B. ZK2012 III 分层, 液化石英角砾; C. 左侧 ZK2012 III 分层液化石英角砾, 中部与 II+III 矿层夹层接触部位发育液化底劈, II+III 矿层夹层裂隙发育, 见液化砂 (暗色) 及自碎屑角砾; D. ZK2012 II 分层微褶皱纹层, 见微断层; E. ZK2012 II 分层内液化卷曲变形导致微纹层近直立, 见液化砂, 液化泥晶方解石脉形态由细到粗, 呈树枝状汇聚; F. ZK2012 I 矿层中球-枕构造, 上部见微褶皱纹层; G. ZK2012 上泥盆统五指山组第一段 ( $D_3w^1$ ) 扁豆状灰岩, 同沉积灰质角砾及微褶皱纹层发育, 下部见液化卷曲变形。

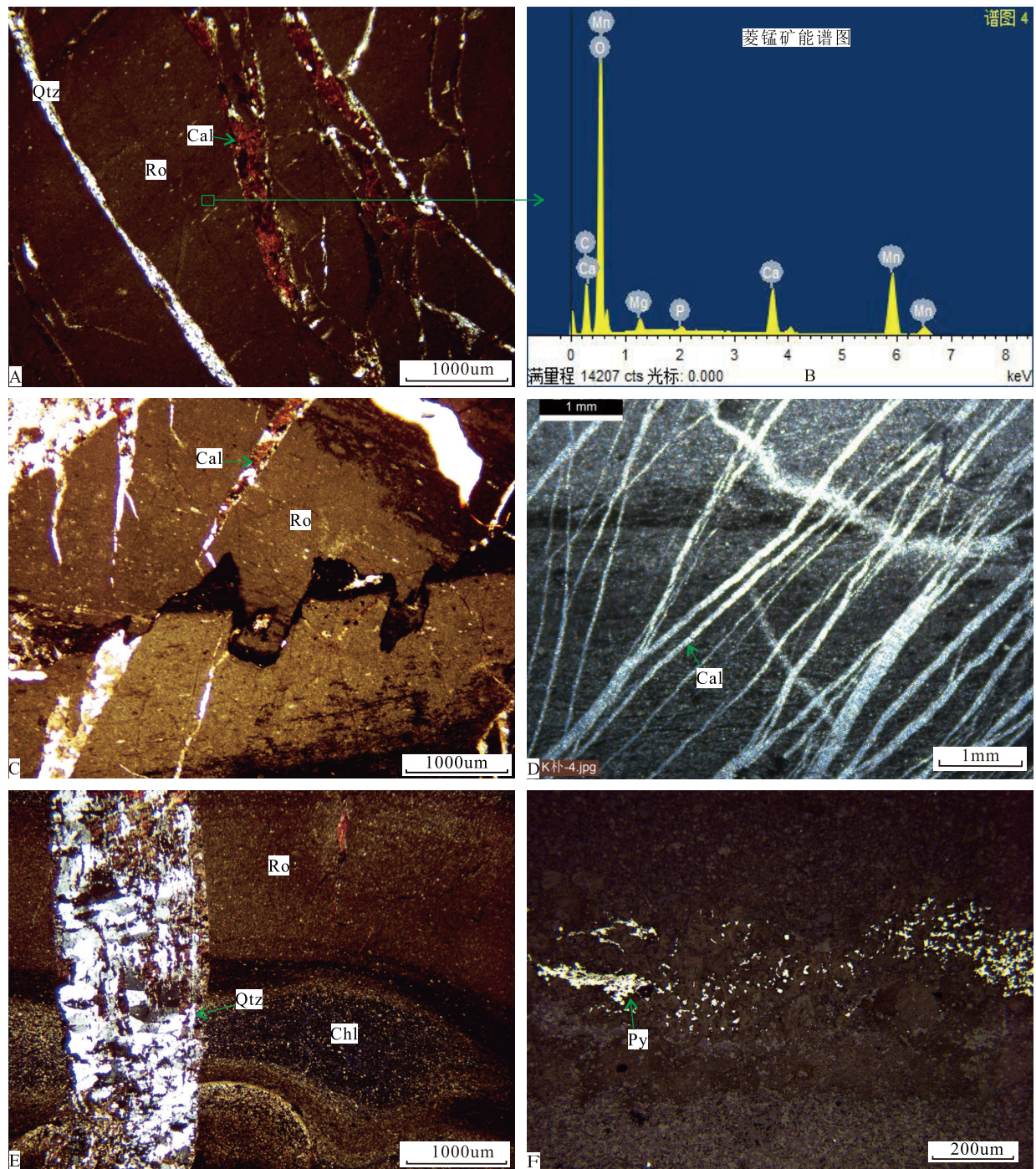
图 6 湖润矿区 ZK2012 软沉积变形特征

Fig. 6 Characteristics of ZK2012 soft-sediment deformation in Hurun mining area

含量明显比围岩高; 稀土分异程度高, 轻稀土富集,  $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$  值在 4.65~9.06 之间, 其中 II+III 矿

层稀土分异程度明显高于围岩, 其值为 8.84~9.06。本次研究所有样品稀土元素球粒陨石标准化曲线





A. 含锰方解石、菱锰矿呈他形微晶浸染状分布，网脉状泄水脉发育，多被石英和方解石充填，样号 ZK2010-II 分层-A (+)；B. 钻孔 ZK2010 II 分层，能谱显示其为菱锰矿，样号 ZK2010-II 分层-A；C. 钻孔 ZK2010 II 分层，锰矿层内缝合线构造及由石英脉反映的泄水构造（由尖往粗汇聚），样号 ZK2010-II 分层-A (-)；D. 钻孔 ZK2010 II 分层，呈树枝状的方解石脉，样号 ZK2010-b4 (+)；E. 钻孔 ZK2010 II 分层软沉积变形发育，样号 ZK2010-II 分层-B (+)；F. 钻孔 ZK2010 I 矿层，半自形-自形粒状黄铁矿纹层发生微褶皱褶曲，样号 ZK2010-I 矿层 (-)。

图 7 湖润矿区矿体显微特征

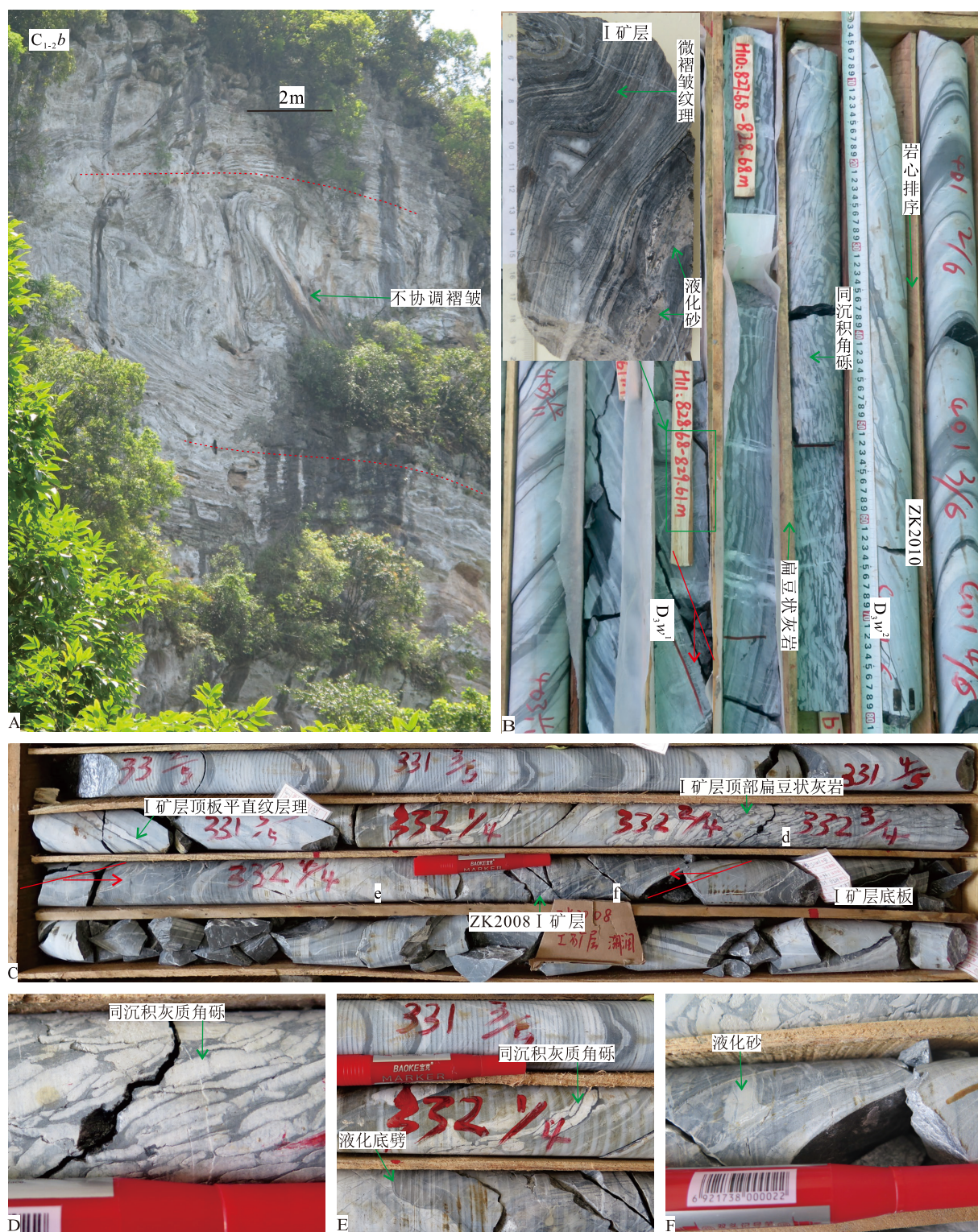
Fig. 7 Microscopic characteristics of orebody in Hurun mining area

均存在较明显  $\delta\text{Eu}$  亏损谷， $\delta\text{Eu}$  值在 0.63~0.83 之间；II+III 矿层  $\delta\text{Eu}$  值为 1.16~1.25，为正异常，围岩

$\delta\text{Ce}$  值为 0.74~0.98，为负异常，两者差别显著。

一般海水  $\delta\text{Ce}$  为负异常(刘英俊等, 1984)，杜





A. 朴隆 2 矿段外围 D407 下—上石炭统巴平组 ( $C_{1-2}b$ ) 硅质灰岩陡崖, 上下岩层平直, 中间岩层液化卷曲变形, 形成不规则褶皱, 褶皱规模及轴向各异; B. 朴隆 2 矿段外围 ZK2010 I 矿层五指山组第二段 ( $D_3w^2$ ) 与五指山组第一段 ( $D_3w^1$ ) 接触部位, 上下岩层纹理平直, 中部突然变近直立, 发育扁豆状灰岩, 属同沉积自碎屑角砾, I 矿层内发育微褶皱纹理及液化砂; C. 朴隆 2 矿段外围钻孔 ZK2008, 湖润矿区 I 矿层, 矿层顶部发育扁豆状灰岩, 矿层内见液化底劈; 图 C 中标 d、e、f 为本版图 D、E、F 在矿层中所处位置; D. I 矿层顶部同沉积自碎屑角砾构成的扁豆状灰岩; E. I 矿层顶部同沉积自碎屑角砾及 I 矿层液化底劈构造; F. I 矿层内垂向液化砂。

图 8 湖润锰矿区 II + III 上下不同层位软沉积变形

Fig. 8 Soft-sediment deformation of different layers above and below II + III in Hurun Manganese Mining area



远生等(2013)测得右江盆地普安和南丹地区晚古生代上泥盆统榴江组的  $Ce/Ce^*$  值分别为  $0.72\pm 0.08$  和  $0.78\pm 0.11$ 。本区样品围岩  $Ce/Ce^*$  平均值为 0.80, 与杜远生等(2013)值相当。矿层中  $Ce/Ce^*$  平均值为 1.22, 结合四价 Ce 与 Mn 具有相似的化学性质, 且矿石中稀土含量明显高于围岩, 推测矿层中的 Ce 正异常, 可能是热水加入了成矿系统所致。

Eu 异常因采样位置不同而有变化。本次研究 3 件矿石样品  $\delta Eu$  值为 0.63~0.83, 与围岩相差不大; 秦元奎等(2010)测得下雷矿区 13 件锰矿样品  $\delta Eu$  值为 0.47~0.66; 朱建德等(2016)测得下雷矿区锰矿及硅质岩围岩 5 件样品  $\delta Eu$  值为 2.68~3.8; 赵立群等(2016)对下雷矿区 12 件锰矿石及硅质岩围岩进行测试, 除一件锰矿样品  $\delta Eu$  为 0.99 外, 其余样品  $\delta Eu$  均大于 1, 其中矿石  $\delta Eu$  平均值 1.24, 围岩  $\delta Eu$  平均值 1.51。本区及下雷部分样品表现出 Eu 负异常, 可能其是采样位置位于曾友寅(1991)划分的热液微相区边缘或冷水微相区(裂隙槽下斜坡带), 热水参与的程度不够高所致。

6 讨论

6.1 软沉积变形成因分析

湖润矿区总体上处于水下斜坡带, 相对而言, 下雷矿区水深较大, 属于下斜坡至盆地区域(曾友寅, 1991)。产出背景为裂隙槽, 与湘西北民乐锰矿

等相似(杨绍祥等, 2006)。

在引起软沉积变形的诱因中, 地震成因的软沉积变形具有特征的识别标志。国内学者已对其进行系统归纳总结, 地裂缝、微同沉积断裂、微褶皱纹理、砂岩脉、泥(亮)晶脉、枕状层、砂火山、泥火山、自碎屑角砾及其他同沉积变形构造(负荷构造、球-枕状构造、液化卷曲、泄水构造)、由亮晶方解石脉形成的臼齿构造、板刺构造、震裂岩、震褶岩等均为震积岩的典型标志(宋天锐, 1988; 宋天锐等, 2009; 乔秀夫等, 1994, 1997, 2009; 杜远生等, 2000, 2001, 2005; 刘鹏举, 2001; 段吉业等, 2002; 梁定益等, 2002; 陈世悦等, 2003; 周志广等, 2006; 夏青松等, 2007; 苏德辰等, 2011; 张凤霄等, 2015; 何碧等, 2016)。而新的研究表明, 竹叶状灰岩亦与地震引起的软沉积变形有关(陈小明等, 2020)。同时现代地震研究证明, 微褶皱发育喻示发生过多幕地震(徐锡伟等, 2007; 钟宁等, 2021)。乔秀夫等(1994)总结了中朝地台东部震旦系碳酸盐岩振动液化地震序列, 自下而上为: 泥晶脉扰动灰岩单元、液化卷曲变形、震裂岩与震塌岩单元、地裂缝与阶梯状断层单元。

地震成因的软沉积变形具有多期, 期中有多幕的特点, 若在剖面垂向上出现多个具有震积岩特征的软沉积变形, 可以确认其为地震成因(乔秀夫等, 2009)。此外, 杜远生等(2017)认为判别软沉积变

表 1 湖润矿区朴隆矿段外围钻孔 ZK2012 II+III 矿层及其顶底板常量元素分析结果表 (%)

Table 1 Results of major element analysis of borehole ZK2012 II + III ore bed and its roof and floor in the periphery of Pulong section in Hulun mining area (%)

| 样品<br>编号                        | ZK2012-<br>H9 | ZK2012-<br>H10 | ZK2012-<br>H11 | ZK2012-<br>H12 | ZK2012-<br>H13 | ZK2012-<br>夹 1-A | ZK2012-<br>夹 1-B | ZK2012-<br>H14 | ZK2012-<br>H15 | ZK2012-<br>H16 | ZK2012-<br>夹 1-C |
|---------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|------------------|----------------|----------------|----------------|------------------|
| 岩石<br>名称                        | 钙质<br>硅质岩     | III 分层<br>碳酸锰  | 硅质岩<br>夹层      | II 分层<br>碳酸锰   | 钙质<br>硅质岩      | 含泥<br>硅质灰岩       | 碳质<br>灰岩         | 硅质<br>灰岩       | I 矿层           | 硅质<br>灰岩       | 钙质<br>硅质岩        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 2.83          | 2.86           | 0.13           | 1.86           | 3.29           | 2.89             | 0.53             | 1.15           | 1.44           | 1.19           | 4.69             |
| CaO                             | 11.95         | 14.35          | 9.57           | 10.65          | 9.41           | 42.60            | 31.90            | 38.90          | 35.90          | 46.60          | 17.15            |
| TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.78          | 8.58           | 2.56           | 8.32           | 2.27           | 1.14             | 0.62             | 0.94           | 1.53           | 0.87           | 1.95             |
| K <sub>2</sub> O                | 0.75          | 0.64           | 0.04           | 0.33           | 0.92           | 0.73             | 0.03             | 0.28           | 0.40           | 0.33           | 1.38             |
| MgO                             | 0.99          | 1.80           | 0.82           | 3.43           | 1.18           | 2.58             | 0.36             | 1.26           | 1.72           | 0.94           | 1.86             |
| Mn                              | 0.97          | 7.82           | 4.79           | 14.25          | 1.63           | 0.09             | 0.93             | 1.52           | 2.08           | 1.05           | 0.12             |
| Na <sub>2</sub> O               | 0.06          | 0.11           | 0.03           | 0.08           | 0.05           | 0.20             | <0.01            | 0.04           | <0.01          | <0.01          | 0.04             |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>   | 0.06          | 0.37           | 0.11           | 0.32           | 0.04           | 0.02             | 0.03             | 0.05           | 0.10           | 0.04           | 0.02             |
| SiO <sub>2</sub>                | 67.65         | 34.57          | 66.74          | 29.01          | 69.88          | 13.50            | 37.25            | 21.40          | 22.95          | 9.70           | 56.34            |
| TiO <sub>2</sub>                | 0.15          | 0.13           | <0.01          | 0.09           | 0.19           | 0.12             | 0.01             | 0.05           | 0.06           | 0.05           | 0.19             |
| SO <sub>3</sub>                 | 0.69          | 13.75          | 0.91           | 0.46           | 0.15           | 0.37             | 0.94             | 1.34           | 2.59           | 1.44           | 0.46             |
| 灼失量                             | 11.40         | 14.99          | 11.91          | 24.73          | 10.22          | 35.85            | 25.91            | 32.02          | 30.38          | 37.44          | 15.37            |



表 2 湖润矿区朴隆矿段外围钻孔 ZK2012 II+III 矿层及其顶底板稀土元素分析结果表 ( $10^{-6}$ )Table 2 Results of REE analysis of borehole ZK2012 II + III ore bed and its roof and floor in the periphery of Pulong section in Hulun mining area ( $10^{-6}$ )

| 样品<br>编号 | ZK2012-<br>H9 | ZK2012-<br>H10 | ZK2012-<br>H11 | ZK2012-<br>H12 | ZK2012-<br>H13 | ZK2012-<br>夹1-A | ZK2012-<br>夹1-B | ZK2012-<br>H14 | ZK2012-<br>H15 | ZK2012-<br>H16 | ZK2012-<br>夹1-C |
|----------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| 岩石<br>名称 | 钙质<br>硅质岩     | III 分层<br>碳酸锰  | 硅质岩<br>夹层      | II 分层<br>碳酸锰   | 钙质<br>硅质岩      | 含泥<br>硅质灰岩      | 碳质<br>灰岩        | 硅质<br>灰岩       | I 矿层           | 硅质<br>灰岩       | 钙质<br>硅质岩       |
| La       | 15.0          | 40.8           | 9.7            | 21.8           | 12.4           | 14.9            | 8.6             | 7.5            | 9.6            | 8.6            | 15.6            |
| Ce       | 25.40         | 109.00         | 21.20          | 54.00          | 23.90          | 23.30           | 12.60           | 11.70          | 15.95          | 12.55          | 32.60           |
| Pr       | 3.73          | 9.81           | 1.65           | 4.26           | 2.94           | 3.45            | 1.68            | 1.62           | 2.10           | 1.85           | 3.75            |
| Nd       | 14.9          | 36.6           | 6.6            | 16.8           | 11.5           | 13.9            | 6.6             | 6.5            | 8.5            | 7.4            | 14.7            |
| Sm       | 3.04          | 7.94           | 1.23           | 3.22           | 2.40           | 2.98            | 1.44            | 1.32           | 1.80           | 1.55           | 3.10            |
| Eu       | 0.64          | 1.82           | 0.31           | 0.73           | 0.50           | 0.72            | 0.41            | 0.29           | 0.39           | 0.33           | 0.60            |
| Gd       | 2.67          | 7.66           | 1.36           | 3.42           | 1.97           | 2.94            | 1.61            | 1.33           | 1.79           | 1.62           | 2.61            |
| Tb       | 0.40          | 1.16           | 0.20           | 0.51           | 0.31           | 0.45            | 0.28            | 0.21           | 0.27           | 0.24           | 0.41            |
| Dy       | 2.15          | 6.50           | 1.25           | 3.09           | 1.66           | 2.51            | 1.89            | 1.29           | 1.72           | 1.41           | 2.22            |
| Ho       | 0.43          | 1.27           | 0.26           | 0.62           | 0.35           | 0.56            | 0.41            | 0.27           | 0.35           | 0.32           | 0.48            |
| Er       | 1.06          | 3.27           | 0.73           | 1.73           | 0.91           | 1.62            | 1.19            | 0.78           | 1.00           | 0.91           | 1.34            |
| Tm       | 0.15          | 0.44           | 0.10           | 0.23           | 0.12           | 0.24            | 0.17            | 0.11           | 0.14           | 0.13           | 0.19            |
| Yb       | 0.94          | 2.62           | 0.60           | 1.34           | 0.79           | 1.43            | 1.04            | 0.66           | 0.85           | 0.79           | 1.20            |
| Lu       | 0.14          | 0.37           | 0.09           | 0.19           | 0.12           | 0.21            | 0.15            | 0.10           | 0.12           | 0.11           | 0.18            |
| ΣREE     | 70.65         | 229.26         | 45.28          | 111.94         | 59.87          | 69.21           | 38.07           | 33.68          | 44.58          | 37.81          | 78.98           |
| ΣL/ΣH    | 7.9           | 8.8            | 8.9            | 9.1            | 8.6            | 6.0             | 4.7             | 6.1            | 6.1            | 5.8            | 8.2             |
| δEu      | 0.68          | 0.71           | 0.74           | 0.67           | 0.69           | 0.74            | 0.83            | 0.67           | 0.66           | 0.64           | 0.63            |
| δCe      | 0.78          | 1.25           | 1.16           | 1.25           | 0.91           | 0.74            | 0.74            | 0.76           | 0.81           | 0.71           | 0.98            |

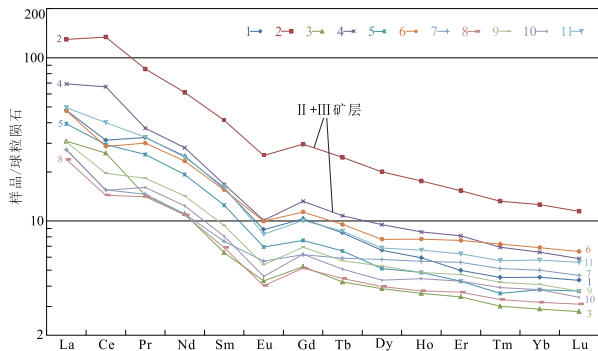
形是否属于地震成因,须结合是否有如地裂缝、同沉积断裂、同沉积褶皱、震碎角砾岩等同生软沉积变形构造。

本区 II+III 矿层软沉积变形特征明显,主要液化砂脉、液化泥(亮)晶脉、液化底劈、微褶皱纹理、液化卷曲变形、自碎屑角砾、负载构造、微同沉积断裂,具有典型震积岩特征,且与杜远生等(2017)总结的地震成因的软沉积变形构造组合特征吻合。同时在本区 ZK2010 II+III 矿层中至少可见一个与乔秀夫等(1994)相似的振动液化地震序列(图 5E)。此外, I 矿层内发育液化变形作用(图 6F, 图 8B、C),其顶部发育近同沉积角砾(图 8B、C);巴平组( $C_{1-2}b$ )灰岩中发现的液化卷曲变形(图 8A)符合震前震后沉积方式的迥异特点。在不同工程相同层位观测到的软沉积变形以及在垂向上观测到的不同时期的地震幕,说明矿层中的液化变形具有侧向连续性和垂向重复性,符合乔秀夫等(2009)地震成因软沉积变形具有侧向延伸和垂向重复性的观点,结合矿区位于伸展构造局限的裂陷槽(张能等,2016),湖润矿区 II+III 矿层软沉积变形应为地震成因。

## 6.2 软沉积变形的地质意义

地质阶段由事件和过程组成,事件是瞬时输入,是因,具有突变属性;过程是长期耗损,是果,具有渐变属性(张启连等,2020)。地震是湖润矿区软沉积变形的因,软沉积变形是果。在不同时期观测到的软沉积变形,喻示着矿区伸展作用显著,反映了多期次的地震活动。本次元素地球化学特征表明热水参与了成矿作用,亦证明了伸展作用的构造背景,频繁而强烈的地震活动可带来成矿热液,长期增加海水中  $Mn^{2+}$  的含量,为后期成矿奠定物质基础。

湖润矿区软沉积变形反映的频繁地震活动对油气储集层(或烃源岩层)的穿刺亦对成矿有积极作用。研究表明油气参与锰矿沉积在大塘坡式锰矿中体现显著(周琦等,2007,2013),当地震作用破开深部油气储集层后,储集层中的高压流体沿断裂运移释放(毛小平等,2021),微裂缝和溶孔发育的震积岩作为潜在的储层,可将高压流体稀放的油或气存储(庞军刚等,2012),使震积岩中的 Fe、Mn、P、S 等组分剧增(梁光河,2017)。本区钻孔样品的分析结果显示,矿层中明显表现出 Fe、Mn、P、S 的富



1. ZK2012-H9, II+III矿层直接顶钙质硅质岩; 2. ZK2012-H10, III分层碳酸锰矿石; 3. ZK 2012-H11, II+III矿层夹层; 4. ZK 2012-H12, II 分层碳酸锰矿石; 5. ZK 2012-H13, II+III矿层直接底板钙质硅质岩; 6. ZK 2012-夹-1-A, II+III矿层底板含泥硅质灰岩; 7. ZK 2012-夹-1-B, II+III矿层底板碳质灰岩; 8. ZK2012-H14, I 矿层直接顶板硅质灰岩; 9. ZK2012-H15, I 矿层含锰硅质灰岩; 10. ZK2012-H16, I 矿层直接底板硅质灰岩; 11. ZK 2012-夹-1-C, I 矿层底板钙质硅质岩。

图 9 湖润矿区钻孔 ZK2012 样品稀土元素球粒陨石标准化配分曲线 (标准化数据据 Boynton, 1984)

Fig. 9 Chondrite-normalized REE distribution patterns for the borehole ZK2012 samples from Hurun mining area(normalized from Boynton, 1984)

集(表 1), 暗示了地震作用对油气储集层的穿刺为成矿带来了一定的物质来源, 造成了积极的影响。

湖润矿区矿层软沉积液化变形构造发育; 下雷矿区矿层中亦发育有泄水构造、包卷构造(曾友寅, 1991; 赵立群等, 2016)及气液喷溢沉积构造(卢安康等, 2021)等软沉积变形; 贵州大塘坡式锰矿亦发育古天然气渗漏喷溢软沉积变形(周琦等, 2007, 2013)。此外, 著名的南非波斯特马斯堡锰矿带某大型锰矿层内震褶岩、震裂岩、震塌岩、微同沉积断裂、液化角砾等亦发育(广西壮族自治区地质调查院, 2021<sup>③</sup>)。软沉积变形在各大型-超大型锰矿床中的普遍发育, 表明软沉积变形发育可作为大型锰矿的重要找矿标志。

## 7 结论

(1)湖润矿区矿层软沉积变形发育, 有液化脉、液化砂、微褶皱纹理、液化卷曲、微同沉积断裂等, 属地震诱发的软沉积变形产物。

(2)湖润矿区矿层中的软沉积变形表明本区伸展作用强烈, 带来了热水及锰等成矿物质。

(3)湖润锰矿、下雷锰矿、贵州大塘坡式锰矿

及南非波斯特马斯堡锰矿矿层中普遍发育软沉积变形, 软沉积变形发育可作为大型锰矿的重要找矿标志。

## 注释:

- ① 广西壮族自治区地质调查院. 2016. 广西靖西县湖润锰矿接替资源勘查报告 [R].
- ② 广西壮族自治区地质调查院. 2021. 广西靖西县湖润矿区朴隆矿段外围碳酸锰矿普查报告 [R].
- ③ 广西壮族自治区地质调查院. 2021. 南非北开普省高硅锰矿项目勘查前期调查工作报告 [R].

## References

- Boynton W V, 1984. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies [M]. In: Henderson P. ed. Rare Earth Element Chemistry. Amsterdam: Elsevier: 63-114.
- Chen J T, 2020. Research progress of soft-sediment deformation structures [J]. *Journal of Stratigraphy*, 44 (1): 64-75 (in Chinese with English abstract).
- Chen S Y, Yuan W F, Yan J H, 2003. Discovery and significance of earthquake event deposits of Early Tertiary in the Jiyang depression [J]. *Chinese Journal of Geology*, 38 (3): 377-384+426-427 (in Chinese with English abstract).
- Chen X M, Wang D Z, Shu L S, 2020. Study of the genesis of Wormtalk limestone from the Yanwashan formation, Changshan, Zhejiang Province [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 56 (6): 847-861 (in Chinese with English abstract).
- Du Y S, Han X, 2000. Seismo-deposition and seismites [J]. *Advance in Earth Sciences*, 15 (4): 389-394 (in Chinese with English abstract).
- Du Y S, Zhang C H, Han X, et al., 2001. Earthquake events deposition and geologic significance of Kunyang Group in Mid Proterozoic in Dianxi [J]. *Science in China (Series D)*, 31 (4): 283-289 (in Chinese with English abstract).
- Du Y S, Peng B X, Han X, 2005. Syn-depositional deformation structures by earthquake related to volcanic activity of the Late Pleistocene in Weizhou Island, Beihai City, Guangxi [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23 (2): 203-209 (in Chinese with English abstract).
- Du Y S, Huang H, Yang J H, et al., 2013. The basin translation from Late Paleozoic to Triassic of the Youjiang Basin and its tectonic signification [J]. *Geological Review*, 59 (1): 1-12 (in Chinese with English abstract).
- Du Y S, Yu W C, 2017. Earthquake-caused and non-earthquake-caused soft-sediment deformations [J]. *Journal of Palaeogeography*, 19 (1): 65-72 (in Chinese with English abstract).



- Duan J Y, Liu P J, Wan C B, 2002. Mesoproterozoic and neoproterozoic seismite and its rhythm in the Yanshan area, North China Platform[J]. *Acta Geologica Sinica*, 76 (4) : 441 – 445+577-578 (in Chinese with English abstract).
- Guangxi Geological and Mineral Exploration and Development Bureau. 2006. The Guangxi Zhuang Autonomous Region Digital Geological Map of the 2006 Edition of the Manual (1 : 500 000) [M]. (in Chinese) .
- He B, Zhu L D, Yang W G, et al., 2016. Discovery and geological significance of the Holocene seismites in the Jinsha Site in Chengdu, Sichuan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 36 (1) : 62 – 69 (in Chinese with English abstract).
- He J Y, Xiao J F, 2016. The controls of the palaeogeographic environments on manganese deposits in Eastern Guizhou during the early Datangpoan (Nanhuan) [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 36 (1) : 14 – 22 (in Chinese with English abstract).
- Huang H W, Du Y S, Huang Z Q, et al., 2007. Paleozoic seismites in the Nandan-Hechi basin, Guangxi and its tectonic significance[J]. *Geological Review*, 53 (5) : 592-599+723+724. (in Chinese with English abstract) .
- Jiang Z X, 2003. Sedimentology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press. (in Chinese) .
- Li R S, Lu G, Pan Y W, et al., 2008. Characteristics of escarpmentive pseudounconformity in Devonian Tuhu Manganese Deposit, Western Guangxi[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 28 (4) : 449 – 457 (in Chinese with English abstract).
- Liang D Y, Song Z M, Zhao C H, et al., 2002. Discovery of mesoproterozoic seismites at Baishi mountain, Hebei Province and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 21 (10) : 625 – 631 (in Chinese with English abstract).
- Liang G H, 2017. Preliminary study of the relationship between cryptoexplosion and ore-forming process from Wenchuan earthquake[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33 (2) : 326 – 338 (in Chinese with English abstract).
- Liu B J, 1980. Sedimentary Petrology[M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese) .
- Liu P J, 2001. Seismite and its rhythm in the Gaoyuzhuang Formation of mesoproterozoic in Pingquan County, Hebei province[J]. *Geoscience*, 15 (3) : 266 – 268+357 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y J, Cao L M, Li Z L, et al., 1984. Element Geochemistry[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese) .
- Liu Z C, Zhou Q, Yan J X, et al., 2019. Structure of Zunyi rift basin in Guizhou Province during the Permian and its controlling on manganese deposits[J]. *Journal of Palaeogeography*, 21 (3) : 517 – 526 (in Chinese with English abstract).
- Liu A K, Zhou Q, Qin Y J, et al., 2021. Discovery and geological significance of gas-liquid spouting expulsion and effusion depositional structures at Xialei manganese deposit in Guangxi[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 40 (6) : 124 – 139 (in Chinese with English abstract).
- Mao X P, He L K, Liu J L, et al., 2021. Mechanism of the strong earthquake triggered by high pressure fluid in reservoir: A case study of the 5.12 Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Geomechanics*, 27 (4) : 628 – 642 (in Chinese with English abstract).
- Pang J G, Guo J A, Song L J, et al., 2012. The event deposits from the Yanchangian lacustrine basin in the Ordos Basin[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 32 (1) : 32 – 37 (in Chinese with English abstract).
- Peng Y, Lu G, Hu G A, et al., 2009. Genesis of the Permian limestone neptunian dykes and limestone breccia talus in the Xiajia area, Lingyun County, Guangxi, and its geological significances[J]. *Geological Review*, 55 (1) : 43 – 48 (in Chinese with English abstract).
- Peng Y, Li Y, Hu G A, et al., 2007. Limestone dykes and breccia limestone bodies in the Upper Devonian Rongxian formation in Miaotouarea, Guilin, Guangxi[J]. *Geological Review*, 53 (6) : 736 – 742+867 (in Chinese with English abstract).
- Qiao X F, Song T R, Gao L Z, et al., 1994. Seismic sequence in carbonate rocks by vibrational liquefaction[J]. *Acta Geologica Sinica*, 68 (1) : 16 – 34+101-102 (in Chinese with English abstract).
- Qiao X F, Li H B, Gao L Z, 1997. Sinian–Early Paleozoic seismic rhythms on the North China Platform[J]. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)*, 4 (3~4) : 155–160. (in Chinese with English abstract) .
- Qiao X F, Peng Y, Gao L Z, 2002. Interpretation of the seismic origin of Permian limestone dikes in Northwestern Guangxi[J]. *Geological Bulletin of China*, 21 (2) : 102 – 104 (in Chinese with English abstract).
- Qiao X F, Li H B, 2009. Effect of earthquake and ancient earthquake on sediments[J]. *Journal of Palaeogeography*, 11 (6) : 593 – 610 (in Chinese with English abstract).
- Qin Y K, Zhang H C, Yao J Q, 2010. Geochemical characteristics and geological implication of the Xialei Manganese Deposit, Daxin County, Guangxi[J]. *Geological Review*, 56 (5) : 664-671. (in Chinese with English abstract) .
- Song T R, 1988. A probable earthquake tsunami sequence in Precambrian carbonate strata of Ming Tombs District, Beijing[J]. *Chinese Science Bulletin*, 38 (8) : 609 – 611 (in Chinese with English abstract).
- Song T R, Liu Y X, 2009. Ancient earthquake records and litho-paleogeography[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27 (5) : 872 – 879 (in Chinese with English abstract).
- Su D C, Sun A P, 2011. Soft-sediment deformation and occurrence frequency of palaeoearthquake in the mesoproterozoic Wumishan formation, Yongding river valley, Beijing[J]. *Journal of Palaeogeography*, 13 (6) : 591 – 614 (in Chinese with English abstract).

- Xia Q S, Tian J C, Huang C W, 2007. Study on the recognition marks of seismites in Upper Triassic Yanchang formation, Ordos basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science+Technology Edition)*, 34 (3): 312–317 (in Chinese with English abstract).
- Xu X W, Yu G H, Chen G H, et al., 2007. Near-surface character of permanent geologic deformation across the mega-strike-slip faults in the Northern Tibetan Plateau[J]. *Seismology and Geology*, 29 (2): 201–217 (in Chinese with English abstract).
- Yang S X, Lao K T, 2006. Mineralization model for the manganese deposits in Northwestern Hunan: an example from Minle manganese deposit in Huayuan, Hunan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 26 (2): 72–80 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Y Y, 1991. Study on the sedimentology of Late Devonian manganese ore deposit in Xialei, Guangxi[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 9 (1): 73–80 (in Chinese with English abstract).
- Zhang F X, Zhou Y Q, Wang A D, et al., 2015. Load structures and Ball-and-Pillow structures on the Lingshan Island, Shandong[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 35 (3): 42–50 (in Chinese with English abstract).
- Zhang N, Huang Q M, Tan J Z, et al., 2016. Extensive structural characteristics of Youjiang Basin, western Guangxi[J]. *Geology in China*, 43 (3): 953–968 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Q L, Zhao X J, Li Y K, et al., 2020. Geochemical characteristics and sedimentary model of Permian bauxite deposit in Western Guangxi[J]. *Geological Review*, 66 (4): 1043–1059 (in Chinese with English abstract).
- Zhao L Q, Zhou S G, Yin H S, et al., 2016. Geochemical characteristics and sedimentary environment of the Xialei manganese deposit in Southwest Guangxi[J]. *Geology and Exploration*, 52 (1): 25–39 (in Chinese with English abstract).
- Zhong N, Jiang H C, Li H B, et al., 2021. The use of soft-sediment deformation structures as proxies for paleoseismic activity and shaking: A review[J]. *Geological Review*, 67 (6): 1785–1802 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Q, Du Y S, Yan J X, et al., 2007. Geological and geochemical characteristics of the cold seep carbonates in the Early Nanhua system in Datangpo, Songtao, Guizhou Province[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 32 (6): 845–852 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Q, Du Y S, Qin Y, 2013. Ancient natural gas seepage sedimentary-type manganese metallogenic system and ore-forming model: A case study of Datangpo type manganese deposits formed in rift basin of Nanhua period along Guizhou-Huanan-Chongqing border area[J]. *Mineral Deposits*, 32 (3): 457–466 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Q, Du Y S, Yuan L J, et al., 2017. Exploration models of ancient natural gas seep sedimentary-type manganese ore deposit: A case study of the Nanhua period “Datangpo” type manganese ore in the conjunction area of Guizhou, Hunan and Chongqing[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91 (10): 2285–2298 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Z G, Liang D Y, Liu W C, et al., 2006. Characters of slumping accumulation of upper cretaceous Zongzuo formation and demonstrate its caused by large break-up and earthquakes, Southern Xizang (Tibet) [J]. *Geological Review*, 52 (3): 314–320+435 (in Chinese with English abstract).
- Zhu J D, Zhu K J, Zhou S G, et al., 2016. Characteristics and genesis of the deposits in the Xialei-Dongping manganese ore belt of Guangxi Province[J]. *Geology and Exploration*, 52 (5): 846–853 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 陈吉涛, 2020. 软沉积物变形构造研究进展[J]. *地层学杂志*, 44 (1): 64–75.
- 陈世悦, 袁文芳, 鄢继华, 2003. 济阳拗陷早第三纪震积岩的发现及其意义[J]. *地质科学*, 38 (3): 377–384+426-427.
- 陈小明, 王德滋, 舒良树, 2020. 浙江常山砚瓦山组竹叶状灰岩成因探讨[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 56 (6): 847–861.
- 杜远生, 韩欣, 2000. 论震积作用和震积岩[J]. *地球科学进展*, 15 (4): 389–394.
- 杜远生, 张传恒, 韩欣, 等, 2001. 滇中元古代昆阳群的地震事件沉积及其地质意义[J]. *中国科学(D辑)*, 31 (4): 283–289.
- 杜远生, 彭冰霞, 韩欣, 2005. 广西北海涠洲岛晚更新世火山活动引起的地震同沉积变形构造[J]. *沉积学报*, 23 (2): 203–209.
- 杜远生, 黄虎, 杨江海, 等, 2013. 晚古生代-中三叠统右江盆地的格局和转换[J]. *地质论评*, 59 (1): 1–12.
- 杜远生, 余文超, 2017. 地震和非地震引发的软沉积物变形[J]. *古地理学报*, 19 (1): 65–72.
- 段吉业, 刘鹏举, 万传彪, 2002. 华北燕山中-新元古代震积岩系列及其地震节律[J]. *地质学报*, 76 (4): 441–445+577-578.
- 广西壮族自治区地质矿产勘查开发局, 2006. 广西壮族自治区数字地质图2006年版说明书(1:50万) [M].
- 何碧, 朱利东, 杨文光, 等, 2016. 成都金沙遗址区全新统震积岩的发现及其地质意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 36 (1): 62–69.
- 和景阳, 肖加飞, 2016. 贵州东部南华纪大塘坡早期古地理环境控锰作用探讨[J]. *沉积与特提斯地质*, 36 (1): 14–22.
- 黄宏伟, 杜远生, 黄志强, 等, 2007. 广西丹池盆地晚古生代震积岩及其构造意义[J]. *地质论评*, 53 (5): 592-599+724-724.
- 姜在兴, 2003. 沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 李容森, 陆刚, 潘艺文, 等, 2008. 桂西太湖锰矿区泥盆系中的陡崖式假不整合构造[J]. *桂林工学院学报*, 28 (4): 449–457.
- 梁定益, 宋志敏, 赵崇贺, 等, 2002. 河北省白石山中元古代地震遗迹的发现[J]. *地质通报*, 21 (10): 625–631.
- 梁光河, 2017. 从汶川地震探讨隐爆与成矿过程[J]. *岩石学报*, 33 (2): 326–338.



- 刘宝珺, 1980. 沉积学岩石学[M]. 北京: 地质出版社.
- 刘鹏举, 2001. 河北平泉中元古代高于庄组震积岩及地震节律[J]. *现代地质*, 15 (3): 266-268+357.
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等, 1984. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社.
- 刘志臣, 周琦, 颜佳新, 等, 2019. 二叠纪贵州遵义次级裂谷盆地结构及其对锰矿的控制作用[J]. *古地理学报*, 21 (3): 517-526.
- 卢安康, 周琦, 覃永军, 等, 2021. 广西下雷锰矿床气液喷溢沉积构造的发现及地质意义[J]. *地质科技通报*, 40 (6): 124-139.
- 毛小平, 何廉康, 刘佳林, 等, 2021. 储集层中高压流体引爆强地震的机理—以5.12汶川地震为例[J]. *地质力学学报*, 27 (4): 628-642.
- 庞军刚, 国吉安, 宋立军, 等, 2012. 鄂尔多斯盆地延长期坳陷湖盆事件沉积记录[J]. *沉积与特提斯地质*, 32 (1): 32-37.
- 彭阳, 陆刚, 胡贵昂, 等, 2009. 广西凌云下甲二叠纪沉积灰岩墙和角砾灰岩体的成因及地质意义[J]. *地质论评*, 55 (1): 43-48.
- 彭阳, 李岩, 胡贵昂, 等, 2007. 广西桂林庙头上泥盆统融县组中的灰岩脉和角砾灰岩体及其成因[J]. *地质论评*, 53 (6): 736-742+867.
- 乔秀夫, 宋天锐, 高林志, 等, 1994. 碳酸盐岩振动液化地震序列[J]. *地质学报*, 68 (1): 16-34+101-102.
- 乔秀夫, 李海兵, 高林志, 1997. 华北地台震旦纪-早古生代地震节律[J]. *地学前缘* (中国地质大学, 北京), 4 (3~4): 155-160.
- 乔秀夫, 彭阳, 高林志, 2002. 桂西北二叠纪灰岩墙(脉)的地震成因解释[J]. *地质通报*, 21 (2): 102-104.
- 乔秀夫, 李海兵, 2009. 沉积物的地震及古地震效应[J]. *古地理学报*, 11 (6): 593-610.
- 秦元奎, 张华成, 姚敬劼, 2010. 广西大新县下雷锰矿床的地球化学特征及其意义[J]. *地质论评*, 56 (5): 664-672.
- 宋天锐, 1988. 北京十三陵前寒武纪碳酸盐岩地层中的一套可能的地震-海啸序列[J]. *科学通报*, 38 (8): 609-611.
- 宋天锐, 刘燕学, 2009. 古地震记录与岩相古地理[J]. *沉积学报*, 27 (5): 872-879.
- 苏德辰, 孙爱萍, 2011. 北京永定河谷中元古界雾迷山组软沉积物变形与古地震发生频率[J]. *古地理学报*, 13 (6): 591-614.
- 夏青松, 田景春, 黄昌武, 2007. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组震积岩识别标志研究[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 34 (3): 312-317.
- 徐锡伟, 于贵华, 陈桂华, 等, 2007. 青藏高原北部大型走滑断裂带近地表地质变形带特征分布[J]. *地震地质*, 29 (2): 201-217.
- 杨绍祥, 劳可通, 2006. 湘西北锰矿床成矿模式研究-以湖南花垣民乐锰矿床为例[J]. *沉积与特提斯地质*, 26 (2): 72-80.
- 曾友寅, 1991. 广西下雷晚泥盆世锰矿床沉积学研究[J]. *沉积学报*, 9 (1): 73-80.
- 张凤霄, 周瑶琪, 王安东, 等, 2015. 山东省灵山岛负载构造和球枕构造研究[J]. *沉积与特提斯地质*, 35 (3): 42-50.
- 张能, 黄启明, 谭建政, 等, 2016. 桂西右江盆地伸展构造特征[J]. *中国地质*, 43 (3): 953-968.
- 张启连, 赵辛金, 李玉坤, 等, 2020. 桂西二叠系铝土矿地球化学特征与沉积模式[J]. *地质论评*, 66 (4): 1043-1059.
- 赵立群, 周尚国, 伊海生, 等, 2016. 桂西南下雷锰矿床地球化学特征及沉积环境分析[J]. *地质与勘探*, 52 (1): 25-39.
- 钟宁, 蒋汉朝, 李海兵, 等, 2021. 地震成因软沉积物变形记录的地震强度研究进展[J]. *地质论评*, 67 (6): 1785-1802.
- 周琦, 杜远生, 颜佳新, 等, 2007. 贵州松桃大塘坡地区南华纪早期冷泉碳酸盐岩地质地球化学特征[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 32 (6): 845-852.
- 周琦, 杜远生, 覃英, 2013. 古天然气渗漏沉积型锰矿床成矿系统与成矿模式-以黔湘渝毗邻区南华纪“大塘坡式”锰矿为例[J]. *矿床地质*, 32 (3): 457-466.
- 周琦, 杜远生, 袁良军, 等, 2017. 古天然气渗漏沉积型锰矿床找矿模型-以黔湘渝毗邻区南华纪“大塘坡式”锰矿为例[J]. *地质学报*, 91 (10): 2285-2298.
- 周志广, 梁定益, 刘文灿, 等, 2006. 藏南晚白垩世宗卓组巨型混杂堆积的特征及其地裂-地震成因论证[J]. *地质论评*, 52 (3): 314-320+435.
- 朱建德, 朱恺军, 周尚国, 等, 2016. 下雷-东平锰矿带矿床特征和成因探讨[J]. *地质与勘探*, 52 (5): 846-853.