

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.02.001

# 西昆仑玛尔坎苏地区穆呼锰矿含锰岩系沉积环境 ——来自蠕类化石及碳酸盐岩碳、氧、锶同位素证据

陈登辉<sup>1,2,3</sup>, 隋清霖<sup>4</sup>, 郭周平<sup>1,2,3</sup>, 赵晓健<sup>1,2,3</sup>, 滕家欣<sup>1,2,3</sup>, 高永宝<sup>1,2,3</sup>

- (1. 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质调查局造山带地质研究中心, 陕西 西安 710054; 3. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054;  
4. 南华大学资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001)

**摘 要:**穆呼锰矿是玛尔坎苏锰矿带东部重要的典型锰矿床, 锰矿体主要产于一套碎屑岩-碳酸盐岩之中。含锰岩系顶部产出的蠕类化石主要为似纺锤蠕 *Quasifusulina* 属, 其中包括最揉似纺锤蠕 *Quasifusulina tennissima* (Schellwien)、大豆形似纺锤蠕 *Quasifusulina phaselus* (Lee) 和拟紧卷似纺锤蠕 *Quasifusulina paracompacta* (Chang) 3 个种和 2 个未定种, 指示含锰岩系为晚石炭世地层。锰矿体顶底板围岩  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  值为  $-2.06\text{‰} \sim 3.99\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$  值为  $-13.35\text{‰} \sim -7.49\text{‰}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值为  $0.707\ 70 \sim 0.707\ 97$ 。菱锰矿  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  值为  $-16.60\text{‰} \sim -1.95\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$  值为  $-11.51\text{‰} \sim -4.48\text{‰}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值为  $0.707\ 64 \sim 0.707\ 90$ 。综合分析, 认为穆呼锰矿含锰岩系为温暖、盐度正常、水动力相对较强的浅海陆棚沉积; 水体清澈, 但相对于碳酸盐岩台地沉积水体要浑浊。碳酸盐岩和锰矿层在沉积过程中受到了陆表水的影响, 菱锰矿的形成与有机质还原作用有关。  
**关键词:**上石炭统; 碎屑岩-碳酸盐岩; 沉积环境; 蠕类; 碳、氧、锶同位素; 穆呼锰矿; 西昆仑  
**中图分类号:** P618.32      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1009-6248(2022)02-0001-13

## Sedimentary Environment of Mn-bearing Carbonate from the Muhu Manganese Deposit in Malkansu, West Kunlun: Evidences from Fusulinids and C-O-Sr Isotopes

CHEN Denghui<sup>1,2,3</sup>, SUI Qinglin<sup>4</sup>, GUO Zhouping<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Xiaojian<sup>1,2,3</sup>,  
TEN Jiaxin<sup>1,2,3</sup>, GAO Yongbao<sup>1,2,3</sup>

- (1. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MNR, Xi'an 710054, Shaanxi, China;  
2. Research Center for Orogenic Geology, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. School of Resource & Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang 421001, Hunan, China)

**Abstract:** Muhu Manganese Deposit is an important typical manganese deposit in the eastern part of the Malkansu Manganese Belt. Manganese ore bodies are mainly hosted in a set of clastic-car-

收稿日期: 2021-06-24; 修回日期: 2021-12-08; 网络发表日期: 2022-05-10; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究“西昆仑-祁漫塔格地区锰铁铅锌铜等大宗金属矿产科考”(2021QZKK0303); 国家自然科学基金“西昆仑塔什库干地区赞坎铁矿床流体包裹体研究及对膏盐层参与铁矿成矿的启示”(41503046)、陕西省自然科学基金“西昆仑奥尔托喀纳什锰矿优质富锰矿成因”“西昆仑奥尔托卡纳什锰矿上石炭统含锰碳酸盐岩沉积环境研究”(2019JQ-935, 2017JM4024)和中国地质调查局“西昆仑大红柳滩-甜水海地区大型矿产资源基地综合调查”(DD20190143)。

作者简介: 陈登辉(1980-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事矿产地质调查和沉积学研究。E-mail: 47134454@qq.com。

bonate rocks. Fossils from the top of manganese-bearing rock series are mainly *Quasifusulina*, include *Quasifusulina tennissima* (Schellwien), *Quasifusulina phaselus* (Lee), *Quasifusulina paracompecta* (Chang), and two unidentified species, indicating that the geological age of the manganese-bearing strata should be the Late Carboniferous. The  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  values of surrounding rock range from  $-2.06\text{‰}$  to  $3.99\text{‰}$ ;  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$  values range from  $-13.35\text{‰}$  to  $-7.49\text{‰}$ ; and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  values range from 0.707 70 to 0.707 97. In contrast, the  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  values of rhodochrosite range from  $-16.60\text{‰}$  to  $-1.95\text{‰}$ ;  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$  values range from  $-11.51\text{‰}$  to  $-4.48\text{‰}$ ; and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  values range from 0.707 64 to 0.707 90. Comprehensive analysis reveals that the Mn-bearing rock series in Muhuhu Manganese Deposit developed in a shallow shelf with warm, normal salinity, and relatively strong hydrodynamic force. The water column is clear, but comparatively turbid compared to carbonate platform sedimentary environment. The deposition of carbonate rocks and manganese deposits was affected by surface water, and the formation of rhodochrosite is associated with the reduction of organic matter.

**Keywords:** Late Carboniferous; terrigenous clastics-carbonate; sedimentary environment; fusulinids; C, O, Sr isotopes; Muhu manganese deposit; West Kunlun

新疆西昆仑玛尔坎苏锰矿带位于新疆西昆仑西段,以菱锰矿为主,矿石平均品位大于 30%,是中国北方地区重要优质富锰矿资源基地,含锰岩系主要为一套晚石炭世碎屑岩-碳酸盐岩沉积建造。近几年,西昆仑地区锰矿勘查取得了重大的找矿突破,截至 2021 年底,在玛尔坎苏锰矿带穆呼以西的 30 km 范围以内,发现锰矿床(点)和锰矿化点共计 10 余处,包括奥尔托卡纳什锰矿、穆呼锰矿、玛尔坎土锰矿等一批大中型锰矿床,累计探获锰矿资源量超过 5 000 万 t,远景资源量 1 亿 t,具有较大的锰矿找矿潜力(高永宝等,2018;陈登辉等,2019,2019a;董志国等,2020;Zhang et al., 2020)。

西昆仑造山带西段石炭系的形成时代、沉积特征、沉积环境等相关研究工作较少。前人仅通过对中巴友谊公路(314 国道)沿线和波斯铁列克一带地层剖面研究,依据蜓类古生物和岩石组合特征,认为西昆仑西段昆盖山北坡石炭系为一套与岛弧有关的弧后盆地火山岩-沉积岩建造(Pan, 1996;刘训, 2001;高鹏等,2009);根据沉积岩岩性特征初步分析,认为西昆仑造山带西段北侧石炭系沉积地层为一套滨浅海相沉积岩和风暴沉积地层(潘裕生等, 2000)。2019 年,笔者对玛尔坎苏锰矿带含锰碎屑岩-碳酸盐岩建造岩性组合、沉积相、沉积环境进行初步分析,认为其主要是一套滨浅海相沉积地层,长石石英砂岩和灰岩混积岩发育(陈登辉等,2019a)。玛尔坎苏一带锰矿体严格受地层控制,锰矿体的分

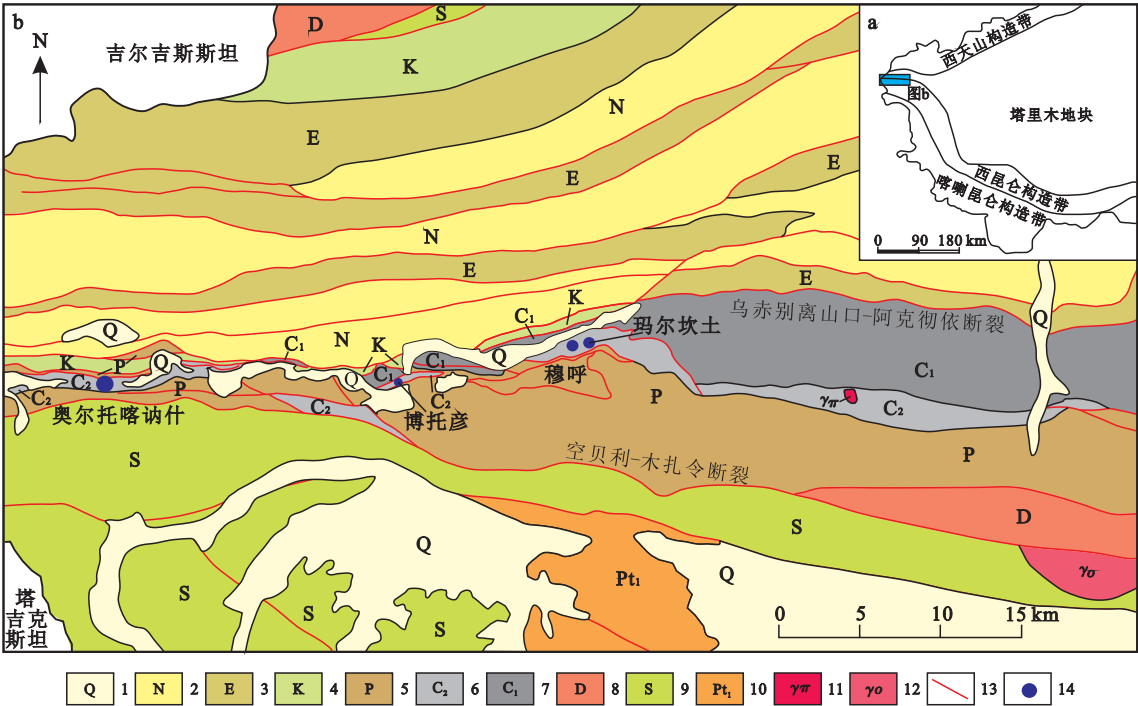
布与区域碎屑岩-碳酸盐岩沉积环境有着密切的联系。深入开展含锰岩系沉积环境研究对于区域锰矿形成机制、资源潜力和找矿预测均有积极意义。此外,西昆仑地区石炭纪一二叠纪是昆仑古特提斯演化的重要阶段,是洋-陆转换的重要时期(肖文交等, 2000;刘训,2001;方爱民等,2009;张连昌等,2020),玛尔坎苏晚石炭世含锰岩系是记录昆仑古特提斯构造环境演化的重要层位。

笔者通过对玛尔坎苏锰矿穆呼锰矿区典型含锰岩系进行系统剖面测量,对该地区石炭系中发现的蜓化石进行详细鉴定,并结合地层剖面、碳酸盐岩碳、氧同位素、锶同位素特征等,对玛尔坎苏锰矿带穆呼锰矿区含锰碎屑岩-碳酸盐岩形成时代、沉积环境等进行了系统分析,为下一步在玛尔坎苏一带含锰岩系及其延伸带进行锰矿层精确定位,分析西昆仑-塔西南一带晚古生代构造演化、环境变迁均具有重要的实际意义和理论意义。

## 1 地质背景

玛尔坎苏锰矿带位于新疆克孜勒苏柯尔克孜自治州阿克陶县木吉乡北 80 km 处,大地构造位置处于西昆仑造山带西北部(图 1a),受由南向北逆冲推覆构造的影响,锰矿带地层构造变形强烈,地层产状复杂。含锰岩系主要分布在昆盖山-库尔良晚古生代裂谷之中(祝新友等,1999;计文化,2005),地层走

向近东西向沿玛尔坎苏河谷断续出露,大部分含锰岩系被第四系覆盖。目前,发现的大中型矿床主要有奥尔托卡纳什锰矿、穆呼锰矿、玛尔坎苏锰矿(图1b)。



1. 第四系;2. 新近系;3. 古近系;4. 白垩系;5. 二叠系;6. 上石炭统;7. 下石炭统;8. 泥盆系;9. 志留系;10. 古元古界;11. 花岗岩;12. 斜花岗岩;13. 断裂;14. 锰矿床(点)

图1 西昆仑玛尔坎苏一带区域地质简图(高永宝等,2017)

Fig.1 Regional geological map of Maerkansu, West Kunlun

区域上出露的地层包括塔里木地层分区和西昆仑地层分区的部分地层。塔里木地层分区地层分布在乌赤别离山口-阿克彻依断裂北侧,主要为中新生的红色砂砾岩层;乌赤别离山口-阿克彻依断裂南侧为西昆仑地层分区,主要有古元古界、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系及第四系。区域上的含锰岩系主要是一套上石炭统碎屑岩-碳酸盐岩建造,局部夹有少量薄层凝灰岩(图1b)。玛尔坎苏一带石炭纪一二叠纪地层自早古生代晚期经历了多期构造活动影响(Matte Pet al.,1996;丁道桂等,1996),形成了由南西向东北逆冲推覆的构造格局,受塔里木地体的挤压影响,石炭系一二叠系褶皱、断裂构造发育,岩石破碎。

2 穆呼锰矿区上石炭统含锰岩系特征

穆呼锰矿区位于玛尔坎苏锰矿带东段玛尔坎苏河北岸,与玛尔坎土锰矿矿体相连,属于不同矿权区。含锰岩系为矿区中部北东-南西走向的晚石炭

世喀拉阿特河组(C<sub>2</sub>k),主要为一套碎屑岩-碳酸盐岩建造,与其上覆地层早二叠世玛尔坎雀库塞山组(P<sub>1</sub>m)为断层接触(图2)。矿区内喀拉阿特河组(C<sub>2</sub>k)可以识别出2个岩性段:上部为泥灰岩、钙质粉砂岩、砂屑砾屑灰岩,中部砂屑灰岩中含鲕类化石;下部为钙质粉砂岩、微晶-粉晶灰岩等,是矿区内主要的含锰层位。含锰岩系南倾,受逆冲推覆构造影响,矿区东部含锰岩系和矿体发生强烈褶皱变形,形成一系列断层,将矿体错断(图2)。

穆呼锰矿区含锰岩系实测剖面S-S'位置见图2,含锰岩系岩性组成见图3,具体描述如下。

- 上覆地层:早二叠世玛尔坎雀库塞山组(P<sub>1</sub>m);
- 23. 灰绿色中薄层状晶屑岩屑凝灰岩(未见顶);
- 断层 -----;
- 晚石炭世喀拉阿特河组(C<sub>2</sub>k);
- 22. 深灰色薄层状灰泥岩 40.2 m;
- 21. 灰色中薄层状颗粒灰岩 15.6 m;
- 20. 灰黑色锰矿层 1.2 m;

- [illegible]

Fig. 2 Geological map of Maerkantu-Muhu manganese deposit, West Kunlun

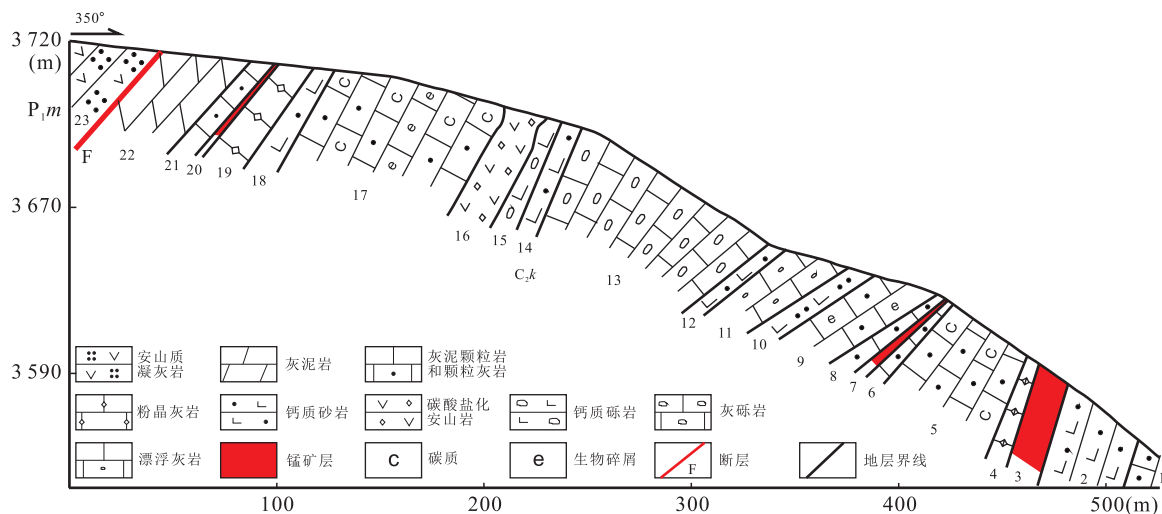
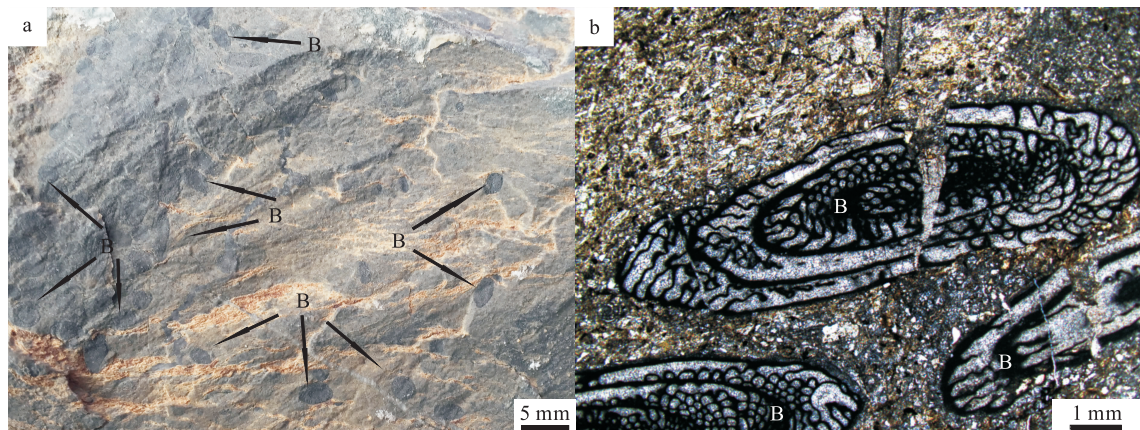


Fig. 3 Section diagram of Mn-bearing carbonate in Muhuhu manganese deposit



蛭类化石主要产于剖面中上部一套钙质砾岩顶部的颗粒灰岩(图4a)中。该层颗粒灰岩层较厚,含蛭类生物化石的颗粒灰岩层位于该层中部,厚度约为

3 m,且沿走向产出稳定。蛭类化石一般小于10 mm(图4b),从化石组合和种属来看,比较单一,但是具有代表性,能够为区域地层时代的界定提供依据。



a. 含蛭类化石颗粒灰岩;b. 颗粒灰岩中蛭类化石(B. 蛭类化石)

图4 含蛭类化石颗粒灰岩图

Fig. 4 Grainstone containing fusulinids

### 3 含锰岩系蛭类化石特征

本次在穆呼锰矿区含锰岩系中采集蛭类生物样品5件,主要对S-S'剖面上部含生物化石层中的蛭类化石进行鉴定。穆呼锰矿区含锰岩系中蛭类化石主要为似纺锤蛭属(*Quasifusulina*)(Chen, 1934),其主要特征为壳中等大,一般呈圆柱形,中部平或微凹,两极圆钝,4~6圈,展开均匀;旋壁很薄,由致密层和极细的蜂巢层2层组成,致密层常不连续;隔壁只有下半部褶皱,很不规则;无旋脊,初房大,形状不一,有球形、矩形、肾形等。

最揉似纺锤蛭 *Quasifusulina tennissima* (Schellwien),壳大,长纺锤形,中部微凹,两极圆钝略尖,5.5~7圈,包卷紧密,壳长6.6~8.9 mm,宽1.9~2.8 mm;旋壁薄,由致密层和极细蜂巢层组成;隔壁全面规则褶皱;初房两侧内几圈有轴积,呈扇形,初房圆大或状不规则状(图5a、图5b)。

拟紧卷似纺锤蛭 *Quasifusulina paracompacta* (Chang),壳大,长圆柱形,中部平或微凹,两极钝尖,4.5~6圈,包卷紧密,壳长6.6~7.7 mm,宽1.3~1.7 mm;旋壁薄,2层,由致密层和细蜂巢层组成;隔壁仅下半部褶皱,具轴积,旋脊仅见于初房,初房大,外形不规则(图5c、图5d、图5e)。

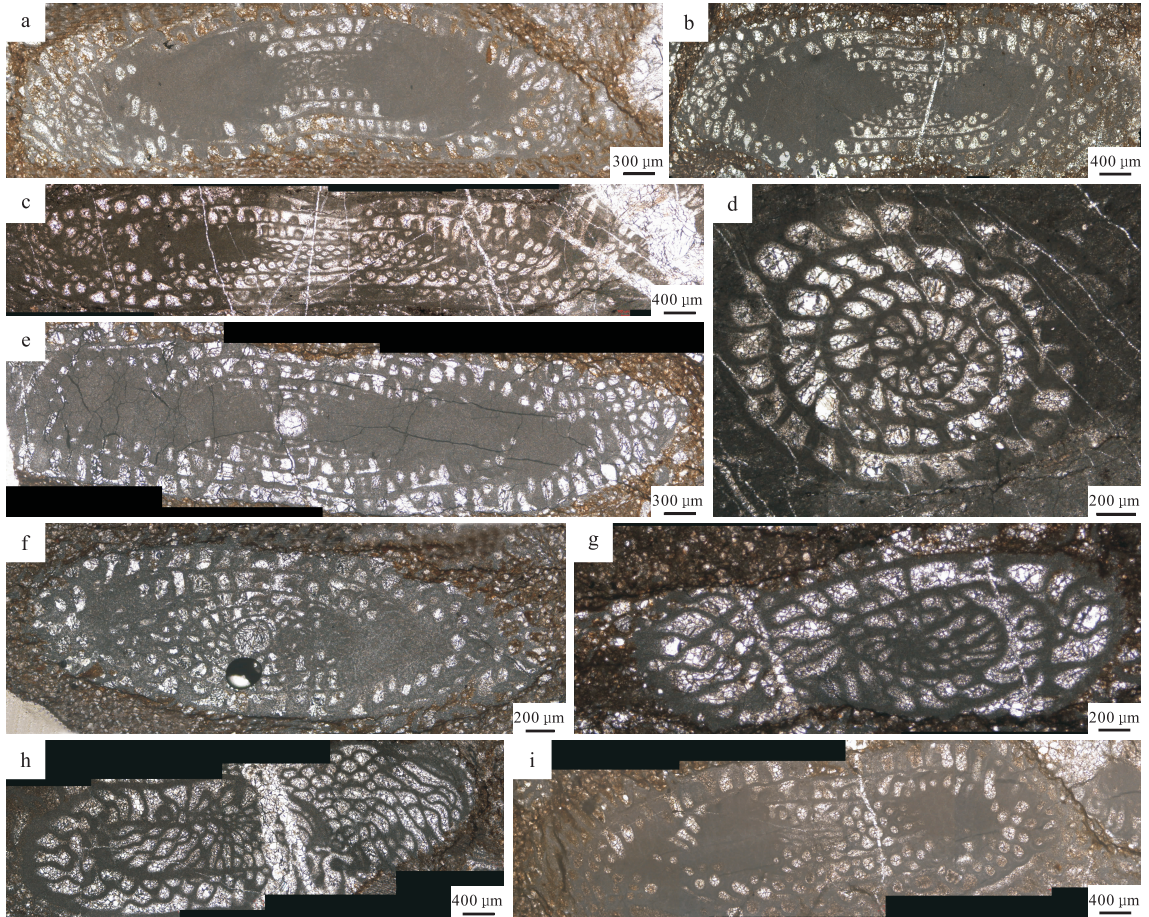
大豆形似纺锤蛭 *Quasifusulina phaselus* (Lee),

该种和拟紧卷似纺锤蛭 *Quasifusulina paracompacta* (Chang)比较接近,不同的是该种每个壳室的高度较大,壳室较短而宽,中部一边外凸,一边内凹,外观如腰子状大豆,是这一种的最大特点(图5f)。

本批样品8个薄片中生理由蛭类为主,另见有少量非蛭有孔虫,蛭类属种单一,主要为似纺锤蛭 *Quasifusulina* 属,包括最揉似纺锤蛭 *Quasifusulina tennissima* (Schellwien)、大豆形似纺锤蛭 *Quasifusulina phaselus* (Lee)和拟紧卷似纺锤蛭 *Quasifusulina paracompacta* (Lee)3个种和2个未定种(图5g、图5h、图5i)。

似纺锤蛭 *Quasifusulina* 属时代均为晚石炭世晚期,具有重要的时代意义,是区域地层划分和对比的标准化石之一(张遵信,1963;贺广田等,1987;蔡如华,1994);在中国广泛产于华南晚石炭世晚期地层马平组和船山组(周建平,1991;李建成等,2003,2004)、华北上石炭统太原组及西北地区时代相当的地层中(张志存,1990;蔡如华,1994;梁湘沅,1994;朱玉英等,2005)。而最揉似纺锤蛭 *Quasifusulina tennissima* (Schellwien)和拟紧卷似纺锤蛭 *Quasifusulina paracompacta* (Chang)2个种产于新疆柯坪地区、木兹杜克地区和柴达木盆地北缘晚石炭世晚期地层中(张遵信,1963;贺广田等,1987;魏永峰,2009;王玥等,2011)。因此,似纺锤蛭 *Quasifusulina* 属的时代为晚石炭世晚期,具有重要的区域地层划分和对比意义。





a. 最揉似纺锤蜓轴切面; b. 最揉似纺锤蜓轴切面; c. 拟紧卷似纺锤蜓轴切面; d. 拟紧卷似纺锤蜓轴切面; e. 拟紧卷似纺锤蜓中切面; f. 大豆形似纺锤蜓轴切面; g. 未定种似纺锤蜓近轴切面; h. 未定种似纺锤蜓近中轴面

图 5 穆呼锰矿含锰岩系中蜓类生物图

Fig. 5 Fusulinids in Mulu manganese deposit

#### 4 锰矿石及其顶底板碳酸盐岩碳、氧、锶同位素特征

碳、氧同位素测试是在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源成矿作用与资源评价重点实验室完成。采用的是 GasBench II 连续流法, 质谱仪为 MAT253。称量约 100 微克样品加入到 12 毫升反应瓶中, 每次最多测量样品数为 88 个, 其中 18 个为标准样品。使用高纯氦气(99.999%, 流速 100 ml/min)进行 600 s 的排空处理; 排空后加入 5 滴 100% 无水磷酸后置于 72 °C 加热盘中反应并平衡; 样品与磷酸反应且平衡后的 CO<sub>2</sub> 气体经过 70 °C 的熔硅毛细管柱(规格为 Poraplot Q, 25 mm×0.32 mm)而

与其他杂质气体分离, 进入到 MAT253 质谱仪进行测定。一般 18 个标样测试结果的 δ<sup>18</sup>O 和 δ<sup>13</sup>C 测试精度均高于 0.1‰。Sr 同位素样品采用碱熔消解分离-扇形磁场等离子质谱(HR-ICP-SFMS)进行 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 分析。

本次研究在穆呼锰矿区含锰岩系中采集锰矿层及其顶底板碳酸盐岩样品 30 件。主要对穆呼锰矿区 S-S' 剖面中锰矿层及其顶底板碳酸盐岩碳、氧、锶同位素进行了系统分析, 分析结果见表 1。

##### 4.1 碳、氧同位素特征

矿体顶底板围岩砂质砂屑灰岩和少量的钙质砂岩及矿体中夹层钙质粉砂岩的碳、氧同位素分析结果见表 1。其中, 顶底板围岩的碳同位素值分布较宽, 分布范围为 -2.06‰~3.99‰, 平均为

0.59‰;氧同位素值分布范围为-13.35‰~-7.49‰,平均为-10.84‰。矿体中夹层的碳同位素分布范围为-4.48‰~-3.42‰,平均为-4.16‰;氧同位素分布范围为-13.79~-12.09‰,平均为-13.1‰。菱锰矿的碳同位素分布范围为-16.60‰~-1.95‰,平均为-11.602‰;氧同位素分布范围为-11.51‰~

-4.48‰,平均为-8.271‰。

为了更直观的表现样品碳、氧同位素分布特征,绘制了菱锰矿、顶底板围岩和夹层碳同位素值与氧同位素值分布图(图6)。从图6可以看出菱锰矿、围岩及夹层的碳、氧同位素整体相关性较差,但是菱锰矿的碳、氧同位素和围岩、矿体中夹层的碳、氧同位素分别具有一定的相关性。

表 1 穆呼锰矿含锰岩系碳酸盐岩碳、氧、锶同位素含量分析数据表  
Tab. 1 Carbon oxygen and strontium isotopes in the carbonates of Muhu manganese deposit

| 样品编号     | 岩性     | δ <sup>13</sup> C(‰) | δ <sup>18</sup> O(‰) | <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr | 盐度指数(Z) |
|----------|--------|----------------------|----------------------|------------------------------------|---------|
| P2-16    | 砂质砂屑灰岩 | 2.06                 | -10.83               | 0.707 94                           | 126.12  |
| P2-17/1  | 砂质砂屑灰岩 | 2.04                 | -11.03               | 0.707 89                           | 125.99  |
| P2-17/4  | 砂质砂屑灰岩 | -1.99                | -11.85               | 0.707 92                           | 117.32  |
| P 2-20   | 砂质砂屑灰岩 | 3.99                 | -7.49                | 0.707 79                           | 131.74  |
| P 2-20/2 | 砂质砂屑灰岩 | 1.15                 | -9.91                | 0.707 79                           | 124.72  |
| P 2-21   | 砂质砂屑灰岩 | 1.37                 | -10.49               | 0.707 72                           | 124.88  |
| P 2-21/2 | 砂质砂屑灰岩 | 1.21                 | -11.66               | 0.707 74                           | 123.97  |
| P2-21/4  | 砂质砂屑灰岩 | 0.21                 | -10.83               | 0.707 70                           | 122.34  |
| P2-23    | 钙质砂岩   | -2.06                | -11.51               | 0.707 93                           | 117.35  |
| P2-23/1  | 砂质砂屑灰岩 | -1.97                | -13.35               | 0.707 97                           | 116.61  |
| P2-23/2  | 砂质砂屑灰岩 | 0.52                 | -10.30               | 0.707 90                           | 123.24  |
| P2-22/5  | 钙质粉砂岩  | -4.37                | -13.65               | 0.707 80                           | 111.55  |
| P2-22/7  | 钙质粉砂岩  | -3.42                | -13.79               | 0.708 00                           | 113.43  |
| P2-22/11 | 钙质粉砂岩  | -4.48                | -12.09               | 0.707 85                           | 112.10  |
| P2-22/14 | 钙质粉砂岩  | -4.37                | -12.87               | 0.707 85                           | 111.94  |
| P2-18    | 菱锰矿    | -1.95                | -5.25                | 0.707 86                           | 120.69  |
| P2-18/1  | 菱锰矿    | -11.85               | -8.07                | 0.707 80                           | 99.01   |
| P2-18/2  | 菱锰矿    | -3.10                | -11.51               | 0.707 79                           | 115.22  |
| P2-22    | 菱锰矿    | -14.20               | -8.46                | 0.707 78                           | 94.01   |
| P2-22/1  | 菱锰矿    | -16.60               | -6.61                | 0.707 90                           | 90.01   |
| P2-22/2  | 菱锰矿    | -15.45               | -10.10               | 0.707 89                           | 90.63   |
| P2-22/4  | 菱锰矿    | -9.43                | -9.23                | 0.708 64                           | 103.39  |
| P2-22/6  | 菱锰矿    | -4.85                | -4.48                | 0.708 11                           | 115.14  |
| P2-22/9  | 菱锰矿    | -11.20               | -7.78                | 0.707 75                           | 100.49  |
| P2-22/10 | 菱锰矿    | -14.60               | -8.55                | 0.707 83                           | 93.14   |
| P2-22/12 | 菱锰矿    | -14.00               | -9.33                | 0.707 79                           | 93.98   |
| P2-22/13 | 菱锰矿    | -15.95               | -8.55                | 0.707 89                           | 90.38   |
| P2-22/15 | 菱锰矿    | -15.20               | -8.65                | 0.707 64                           | 91.86   |
| P2-22/16 | 菱锰矿    | -14.35               | -8.75                | 0.707 82                           | 93.56   |
| P2-22/17 | 菱锰矿    | -11.30               | -8.75                | 0.707 81                           | 99.80   |

注: <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 值引自陈登辉等,2019。



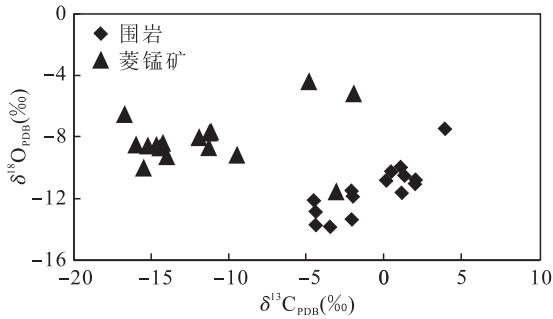


图6 研究区含锰碳酸盐岩  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$  值交汇图

Fig. 6 The cross plot of  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$  of Mn-carbonate from the study area

玛尔坎苏锰矿带石炭系与上覆地层呈断层接触,后期逆冲推覆构造使地层发生强烈变形,样品是否保留原始稳定同位素组成需要判断,一般有3种判别方法(王坤等,2011)。

①用 Mn/Sr 值判别法,碳酸盐岩沉积期后,受大气水循环的影响,易发生 Sr、Na 的损失和 Fe、Mn 的加入 (Brand et al., 1980; Brand et al., 1981; Veizer et al., 1983; Bruckschen et al., 1995)。因此, Mn/Sr 值是判断海相碳酸盐岩成岩作用和蚀变程度的一个灵敏指标。但是玛尔坎苏含锰岩系中锰矿层及部分围岩中 Mn 元素含量均高于正常的海相碳酸盐岩,所以不能用此方法来判断含锰岩系是否保留原始稳定同位素。

②氧同位素判别法,碳酸盐岩的  $\delta^{18}\text{O}$  对蚀变作用灵敏,成岩后的表生作用会使其明显降低;一般情况下,当碳酸盐岩  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}} < -5\text{‰}$  时已受蚀变作用影响,当  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}} < -10\text{‰}$  时已发生强烈蚀变 (Derry et al., 1992; 张同钢等, 2003); 但是 Kaufman 等则把  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}} < -11\text{‰}$  作为判断界限 (Kaufman et al., 1993)。

③ $\delta^{13}\text{C}$  与  $\delta^{18}\text{O}$  相关性判别法,通常认为,如果  $\delta^{13}\text{C}$  与  $\delta^{18}\text{O}$  值不具有明显的相关性则反映海相碳酸盐岩基本保存了原始的碳、氧同位素组成 (郭福生等, 2003; Qing et al., 1994; 王大锐等, 2002; 严兆彬等, 2005); 受成岩作用影响本文碳酸盐岩样品  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$  值普遍较低,围岩和矿体中夹层  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$  值平均为  $-11.44\text{‰}$ ,菱锰矿  $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$  值平均为  $-8.27\text{‰}$ ;含锰岩系整体的  $\delta^{13}\text{C}$  与  $\delta^{18}\text{O}$  值不具明显相关性,但矿体围岩及矿体中夹层和菱锰矿矿石的  $\delta^{13}\text{C}$  与  $\delta^{18}\text{O}$  分别具有一定的相关性,表明玛尔坎苏锰矿带含锰岩系受到成岩作用影响。

上述分析可以看出玛尔坎苏锰矿带含锰岩系沉

积后虽然经受了一定程度的蚀变作用改造,但是其碳、氧同位素对含锰岩系沉积环境和锰矿成因仍然有一定的参考价值。

#### 4.2 锶同位素特征

穆呼锰矿含锰岩系及菱锰矿  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  同位素测试结果见表1。剖面碳酸盐岩  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值为  $0.707\,70 \sim 0.708\,64$ , 平均为  $0.707\,87$ 。其中,顶底板围岩  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值相对较高,介于  $0.707\,70 \sim 0.707\,97$ , 平均为  $0.707\,845$ ;菱锰矿  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值相对较低,介于  $0.707\,64 \sim 0.707\,90$ , 平均为  $0.707\,81$ 。

### 5 含锰岩系沉积环境讨论

#### 5.1 蠕类生物化石对沉积环境的指示

虽然蠕类生物已经灭绝,但是通过对蠕类化石产出的沉积岩特征、蠕类壳体构造和蠕类组合特征、保存状态及共生生物群等方面的研究,仍然可以对其生活的环境因素进行恢复 (Ross, 1969; 王立亭等, 1982; 张志存, 1990; 蔡如华, 1994)。

玛尔坎苏含锰岩系为一套碎屑岩-碳酸盐岩组合,以灰岩为主,蠕类化石出于颗粒灰岩中,局部发育棘皮动物海百合,群体珊瑚稀少,未发现珊瑚礁。现代海洋碳酸盐岩均分布在暖温带正常浅海区域。因此,依据蠕类生物特征和灰岩特征,判断当时应为温暖、盐度正常的海洋环境。Ross 发现蠕类主要富集在浅海陆棚灰岩地层中,在陆棚边缘到深水碳酸盐岩之间蠕类极少出现 (Ross, 1969)。这是由于潜水区含氧丰富,光照充足,大量繁殖的藻类和浮游生物可以为底栖生物提供更多的食物。因此,通常认为蠕类在浅海区最繁盛,而且海水相对清澈 (何心一等, 1987; 蔡如华, 1994)。但玛尔坎苏锰矿带含锰岩系中常有数量不定的陆源碎屑,如砂质、碳质、泥质成分和钙质砂岩夹层 (陈登辉等, 2019),这说明海水不是十分清澈,比碳酸盐台地相区的海水清澈度要差一些 (蔡如华, 1994)。依据纺锤形蠕类壳体、复杂的内部构造特征,结合碳酸盐岩中常见的波状、透镜状潮汐层理,判断其为水动力相对较强的中等能量环境的产物 (王立亭等, 1982; 张志存, 1990; 陈登辉等, 2019a)。

#### 5.2 碳、氧同位素特征对古环境的指示

碳酸盐岩的碳、氧同位素可以有效记录古海洋沉积环境的变化,同时对古地理变迁、成岩成矿作

用、生物效应等关系都有一定指示(Kaufman et al., 1995; Jacobsen et al., 1999; Nyame et al., 2006; Ader et al., 2014; Zhao et al., 2014)。现代海相灰岩  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $0\text{‰} \pm 2\text{‰}$ , 有机体及陆地植物的  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-25\text{‰} \pm 5\text{‰}$ , 古老海相灰岩的  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-4\text{‰} \sim -10\text{‰}$ , 平均约  $0\text{‰}$  (裴浩翔等, 2020)。玛尔坎苏锰矿带穆呼锰矿区围岩中碳酸盐岩  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-2.06\text{‰} \sim -3.99\text{‰}$ , 平均为  $0.59\text{‰}$ , 与古老的海相沉积灰岩的  $\delta^{13}\text{C}$  值接近, 为正常的海相沉积物。但是菱锰矿的  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-16.60\text{‰} \sim -1.95\text{‰}$ , 平均为  $-11.602\text{‰}$ , 明显偏负。Neumann 等在对波罗的海现代自生菱锰矿成因研究时, 发现沉积物中自生菱锰矿  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-10.54\text{‰} \sim -7.32\text{‰}$ , 而其沉积物中的有机质  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-29\text{‰} \sim -22\text{‰}$  (Sohlenius et al., 1996; Struck et al., 2000; Neumann et al., 2002); 通过简单的质量平衡推算出在没有其他碳质来源的情况下, 碳酸盐岩中大约有 70% 的碳是来自有机质的还原 (Neumann et al., 2002)。这表明锰以含锰氧化物(或氢氧化物)沉淀以后, 在成岩期, 有机质的还原对于菱锰矿的形成有非常重要的作用 (Okita et al., 1988; Maynard, 2003, 2010; Kuleshov, 2012; Kuleshov, 2018)。

一般认为碳酸盐岩同位素  $\delta^{18}\text{O}$  值与温度和成岩作用等相关 (Polgari et al., 1991; Jacobsen et al., 1999; Neumann et al., 2002; Nyame et al., 2006)。但是淡水对于  $\delta^{18}\text{O}$  成为高负值的影响更大 (方念乔等, 1994; 方念乔, 2000), 淡水在沉积物沉积过程中或在沉积期后的参与, 将富集  $^{16}\text{O}$  的大陆降水带入浅海沉积盆地, 从而导致含锰岩系沉积物碳酸盐岩矿样品  $\delta^{18}\text{O}$  值整体上呈现较低的负值 (瞿永泽等, 2018)。玛尔坎苏锰矿带含锰岩系中存在数量不定的陆源碎屑, 砂质砂屑灰岩中存在少量的石英颗粒、岩屑等陆源碎屑 (陈登辉等, 2019a), 这也说明含锰岩系在沉积过程中受到了陆表水的影响。

Keith 和 Weber (1964) 提出了利用碳氧同位素区分海相和淡水碳酸盐岩的经验公式:

$$Z = 2.048(\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} + 50) + 0.498(\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}} + 50)$$

$Z$  值大于 120 时为海相 (Keith and Weber, 1964)。本文含锰岩系碳酸盐岩和菱锰矿的  $Z$  值为  $90.01 \sim 131.74$ , 平均为  $109.82$  (表 1)。其中, 矿体围岩的  $Z$  值为  $116.61 \sim 131.74$ , 平均为  $123.12$ , 说明围岩基本为正常海相沉积物。但是菱锰矿的沉积

可能受到淡水的影响, 这与碳、氧同位素的分析结果基本一致。

### 5.3 锶同位素对古环境的指示

锶同位素组成同样受到海水、补给水流经岩石以及成岩流体的影响。海平面下降时, 陆地露出水面的面积相对增加, 由大陆风化带入海洋的陆源 Sr 增加, 使得海水中的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值相对增加。当海平面上升时, 一方面是由于陆源进入海洋的陆源 Sr 减少, 另一方面, 如果存在海底热液活动, 由此进入海水的幔源 Sr 增加, 使得海水的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值相对较小 (李荣西等, 2000; 蓝先洪, 2001; 王坤等, 2011)。玛尔坎苏地区穆呼锰矿含锰岩系主要为一套碎屑岩-碳酸盐岩组合, 碳酸盐岩中不同程度产出薄层状、纹层状钙质砂岩层 (陈登辉等, 2019), 说明在碳酸盐岩沉积期, 沉积区距离海岸较近, 陆源补给较多。锰矿体呈层状, 主要为致密块状构造, 以菱锰矿为主, 脉石矿物较少 (陈登辉等, 2019a), 反映出其受陆源物质影响较小, 距离海岸相对较远, 为水体相对较深的沉积环境, 这与穆呼锰矿区锶同位素反映的沉积环境特征基本一致。

## 6 结论

(1) 玛尔坎苏锰矿带穆呼矿区含锰岩系中发现的鲕类化石主要为似纺锤鲕属 (*Quasifusulina* Chen 1934), 鉴定出了最揉似纺锤鲕 *Quasifusulina tenuissima* (Schellwien)、拟紧卷似纺锤鲕 *Quasifusulina paracompacta* (Chang)、大豆形似纺锤鲕 *Quasifusulina phaselus* (Lee) 等多个种和几个未定种, 是区域地层划分和对比的标准化石之一, 具有重要的时代意义。依据穆呼矿区含锰岩系中产出的鲕类化石特征, 判断含锰岩系为晚石炭世沉积地层, 这对于区域地层对比、玛尔坎苏地区构造演化和区域构造演化均有重要的意义。

(2) 玛尔坎苏锰矿带穆呼锰矿含锰岩系鲕类化石沉积环境为水体清澈、盐度正常的浅海沉积环境。此外, 穆呼锰矿含锰岩系中鲕类化石壳体中等大小, 一般圆柱形, 中部平或微凹, 两极圆钝, 反映出其沉积的水动力相对较强, 为中等水动力条件。含锰岩系中产出的砂质、碳质、泥质等陆源碎屑成分说明其沉积的水体比碳酸盐岩台地要差一些, 水体相对浑浊, 这也是穆呼锰矿含锰岩系中鲕类生物相对较少



的原因之一。

(3)穆呼锰矿区锰矿围岩碳酸盐岩  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-2.06\text{‰} \sim 3.99\text{‰}$ , 平均为  $0.59\text{‰}$ , 与古老海相沉积灰岩的  $\delta^{13}\text{C}$  值接近, 属于正常海相沉积物; 而菱锰矿的  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-16.60\text{‰} \sim -1.95\text{‰}$ , 平均为  $-11.602\text{‰}$ , 明显偏负, 表明锰以含锰氧化物(或氢氧化物)沉淀以后, 有机质的还原对于菱锰矿的形成有非常重要的作用; 穆呼锰矿围岩和矿体的碳酸盐岩  $\delta^{18}\text{O}$  值普遍偏负, 结合含锰岩系中存在的陆源碎屑, 判断含锰岩系在沉积过程中受到了陆表水的影响。

致谢: 在野外地质工作过程中得到新疆有色集团、新疆百源丰矿业有限公司、新疆地矿局第二地质大队的大力支持; 样品采集过程中得到新疆地矿局第二地质大队冯昌荣总工、谢月桥高级工程师和何立东高级工程师的大力支持; 审稿专家及编辑部对本文的完善提出了宝贵意见, 在此一并表示感谢!

## 参考文献(References):

蔡如华. 两淮煤田太原组蠕类生态环境的初步研究[J]. 微生物古生物学报, 1994, 11(3): 333-341.

CAI Ruhua. The Upper-Carboniferous Taiyuan Formation of Guqiao (Fengtai County, Anhui) and its fusulinid faunas[J]. Journal of Huainan Mining Institute, 1994, 11(3): 333-341.

陈登辉, 贺永康, 赵晓健, 等. 西昆仑玛尔坎苏锰矿带博托彦南发现二叠纪锰矿[J]. 中国地质, 2019, 46(3): 666-667.

CHEN Denghui, HE Yongkang, ZHAO Xiaojian, et al. The first discovery of the Botuoyannan Permian manganese deposit along Maerkansu manganese ore belt in West Kunlun Mountains[J]. Geology in China, 2019, 46(3): 666-667.

陈登辉, 隋清霖, 赵晓健, 等. 西昆仑穆呼锰矿晚石炭世含锰碳酸盐岩地质地球化学特征及其沉积环境[J]. 沉积学报, 2019a, 37(3): 477-490.

CHEN Denghui, SUI Qinglin, ZHAO Xiaojian, et al. Geology, geochemical characteristics, and sedimentary environment of Mn-bearing carbonate from the Late Carboniferous Muhu manganese deposit in West Kunlun[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019a, 37(3): 477-490.

丁道桂, 王道轩, 刘伟新, 等. 西昆仑造山带与盆地[M]. 北

京: 地质出版社, 1996.

DING Daogui, WANG Daoxuan, LIU Weixin, et al. The western Kunlun orogenic belt and basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996.

董志国, 张连昌, 董飞羽, 等. 西昆仑穆呼锰矿床地质特征、控矿因素及成矿模式[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(5): 1358-1372.

DONG Zhiguo, ZHANG Lianchang, DONG Feiyu, et al. Geological characteristics, ore-controlling factors and metallogenic model of Muhu manganese deposit in West Kunlun, China[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(5): 1358-1372.

高鹏, 肖忠, 卢兰英, 等. 昆盖山北坡苏古鲁克一带晚石炭世塔哈奇组生物地层特征新疆地质[J]. 新疆地质, 2009, 27(增刊): 76-79.

GAO Peng, XIAO Zhong, LU Lanying, et al. Biostratigraphic features of Taheqi Formation of Late Carboniferous in Suguluke area, north slope of Kungaishan[J]. Xinjiang Geology, 2009, 27(Sup.): 76-79.

方爱民, 马建英, 王世刚, 等. 西昆仑-塔西南坳陷晚古生代以来的沉积构造演化[J]. 岩石学报, 2009, 25(12): 3396-3406.

FANG Aimin, MA Jianying, WANG Shigang, et al. Sedimentary tectonic evolution of the southwestern Tarim Basin and west Kunlun orogen since Late Paleozoic[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(12): 3396-3406.

高永宝, 滕家欣, 陈登辉, 等. 新疆西昆仑玛尔坎苏锰矿带成矿地质特征及找矿方向[J]. 西北地质, 2017, 50(1): 261-269.

GAO Yongbao, TENG Jiaxin, CHEN Denghui, et al. Metallogenic geological characteristics and prospecting direction of Maerkansu manganese ore belt in West Kunlun, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2017, 50(1): 261-269.

高永宝, 滕家欣, 李文渊, 等. 新疆西昆仑奥尔托喀纳什锰矿地质、地球化学及成因[J]. 岩石学报, 2018, 34(8): 2341-2358.

GAO Yongbao, TENG Jiaxin, LI Wenyuan, et al. Geology, geochemistry and ore genesis of the Aoertukanashi manganese deposit, western Kunlun, Xinjiang, Northwest China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(8): 2341-2358.

郭福生, 彭花明, 潘家永, 等. 浙江江山寒武系碳酸盐岩碳氧

- 同位素特征及其古环境意义探讨[J]. 地层学杂志, 2003, 27(4): 289-297.
- GUO Fusheng, PENG Huaming, PAN Jiayong, et al. A probe into the carbon and oxygen isotopic characteristics of the Cambrian carbonate rocks in Jiangshan, Zhejiang and its paleo-environment significance [J]. Journal of Stratigraphy, 2003, 27(4): 289-297.
- 贺广田, 王增吉, 詹立培, 等. 柴达木盆地北缘晚石炭世地层[J]. 中国地质科学院院报, 1987, 17: 141-158.
- HE Guangtian, WANG Zengji, ZHAN Lipei, et al. The Late Carboniferous strata from north margin of Qaidam basin[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 1987, 17: 141-158.
- 计文化. 西昆仑—喀喇崑仑晚古生代—早中生代构造格局[D]. 北京: 中国地质大学, 2005: 1-89.
- JI Wenhua. The late Paleozoic-early Mesozoic tectonic frame in the western Kunlun-Karakorum area [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2005: 1-89.
- 瞿永泽, 徐林刚, 毛景文, 等. 贵州铜仁地区南华系大塘坡组黑色页岩型菱锰矿碳、氧同位素特征及锰矿成矿作用[J]. 矿床地质, 2018, 37(1): 50-66.
- JU Yongze, XU Lingang, MAO Jingwen, et al. Carbon and oxygen isotope characteristics and mineralization of black shale-hosted manganese carbonate of Datangpo Formation in Tongren, Guizhou Province [J]. Mineral Deposits, 2018, 37(1): 50-66.
- 蓝先洪. 海洋锶同位素研究进展[J]. 海洋地质动态, 2001, 17(10): 1-3.
- LAN Xianhong. Progress in Marine Strontium Isotope Research [J]. Marine Geology Letters, 2001, 17(10): 1-3.
- 梁湘沅. 河南南阳—巩县地区太原组鲕类[J]. 地层学杂志, 1994, 18(3): 189-195.
- LING Xiangyuan. Fusulinid zones of the Taiyuan Formation in Yingyang-Gongxian area, Henan [J]. Journal of Stratigraphy, 1994, 18(3): 189-195.
- 李建成, 洪祖寅. 福建沙县船山组鲕类生物地层—兼论石炭系—二叠系界线[J]. 地层学杂志, 2003, 27(3): 185-192.
- LI Jiancheng, HONG Zuyin. Biostratigraphy of the Chuanshan Formation of Shaxian in Fujian with comments on the Carboniferous-Permian boundary [J]. Journal of Stratigraphy, 2003, 27(3): 185-192.
- 李建成, 洪祖寅. 福建沙县船山组的鲕类[J]. 微体古生物学报, 2004, 21(2): 148-173.
- LI Jiancheng, HONG Zuyin. Fusulinids of the Chuanshan Formation from Shaxian, Fujian [J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2004, 21(2): 148-173.
- 李荣西, 魏家庸, 杨卫东, 等. 用 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 研究海平面变化与全球对比问题[J]. 地球科学进展, 2000, 15(6): 729-733.
- LI Rongxi, WEI Jiayong, YANG Weidong, et al. Variations of ratio of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  in seawater with time: Implications for sea level changes and global correlation [J]. Advances in Earth Science, 2000, 15(6): 729-733.
- 刘训. 天山—西昆仑地区沉积—构造演化史: 新疆地学断面走廊域及邻区不同地体的沉积—构造演化[J]. 古地理学报, 2001, 3(3): 22-31.
- LIU Xun. Sedimentary-tectonic evolutionary history of the Tianshan to West Kunlun area in west China-The sedimentary-tectonic evolution of the terranes in the corridor of the Xinjiang geotranssect and its adjacent areas [J]. Journal of Palaeogeography, 2001, 3(3): 22-31.
- 王大锐, 白志强. 广西中—上泥盆统界线附近的化学地层学特征[J]. 地层学杂志, 2002, 26(1): 50-54.
- WANG Darui, BAI Zhiqiang. Chemostratigraphic characters of the Middle-Upper Devonian boundary in Guangxi, South China [J]. Journal of Stratigraphy, 2002, 26(1): 50-54.
- 王坤, 李伟, 陆进, 等. 川东地区石炭系碳酸盐岩碳、氧、锶同位素特征及其成因分析[J]. 地球化学, 2011, 40(4): 351-362.
- WANG Kun, LI Wei, LU Jin, et al. Carbon, oxygen, strontium isotope characteristics and cause analysis of Carboniferous carbonate rocks in the eastern Sichuan Basin [J]. Geochimica, 2011, 40(4): 351-362.
- 王立亭, 董文兰, 叶念曾, 等. 试论鲕的古生态与古水动力的关系—以贵州早二叠世栖霞晚期为例[J]. 石油与天然气地质, 1982, 3(3): 231-239.
- WANG Liting, DONG Wenlan, YE Nianzeng, et al. A discussion of the relationship between fusulinid ecology and hydrodynamic environment [J]. Oil and Gas Geology, 1982, 3(3): 231-239.
- 王玥, 王伟洁, 张以春, 等. 新疆柯坪乌尊布拉克地区晚石炭世—早二叠世鲕类生物地层[J]. 古生物学报, 2011, 50(4): 409-419.
- WANG Yue, WANG Weijie, ZHANG Yicun, et al. Late

- Carboniferous to Early Permian fusuline assemblages from the Wuzunbulake section, Keping area, Xinjiang [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2011, 50 (4): 409-419.
- 魏永峰. 新疆天山南缘老虎台一带上石炭统地层划分与沉积特征[J]. *四川地质学报*, 2009, 29(增刊): 51-55.
- WEI Yongfeng. Stratigraphic Division and Depositional Characteristics of the Upper Carboniferous in the Laohutai Zone, Southern Tianshan, Xinjiang [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2009, 29(Sup.): 51-55.
- 肖文交, 侯泉林, 李继亮, 等. 西昆仑大地构造相解剖及其多岛增生过程[J]. *中国科学(D辑)*, 2000, 30(S1): 22-28.
- XIAO Wenjiao, HOU Quanlin, LI Jiliang, et al. Tectonic facies and the archipelago-accretion process of the West Kunlun, China[J]. *Science in China (Series D)*, 2000, 30(S1): 22-28.
- 严兆彬, 郭福生, 潘家永, 等. 碳酸盐岩 C、O、Sr 同位素组成在古气候、古海洋环境研究中的应用[J]. *地质找矿论丛*, 2005, 20(1): 53-56+65.
- YAN Zhaobin, GUO Fusheng, PAN Jiayong, et al. Application of C, O and Sr isotope composition of carbonates in the research of paleoclimate and paleoceanic environment [J]. *Contributions To Geology and Mineral Resources Research*, 2005, 20(1): 53-56+65.
- 张连昌, 张帮禄, 董志国, 等. 西昆仑玛尔坎苏石炭纪大型锰矿带构造背景与成矿条件[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2020, 50(5): 1340-1357.
- ZHANG Lianchang, ZHANG Banglu, DONG Zhiguo, et al. Tectonic setting and metallogenetic conditions of Carboniferous Malkansu giant manganese belt in West Kunlun orogen[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2020, 50(3): 1340-1357.
- 张遵信. 新疆柯坪及其邻近地区晚石炭世的蜓类(I)[J]. *古生物学报*, 1963, 11(1): 36-70.
- ZHANG Linxin. Late Carboniferous fusulinaceans from Keping and its adjacent areas of Xinjiang Province [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 1963, 11(1): 36-70.
- 张同钢, 储雪蕾, 张启锐, 等. 陡山沱期古海水的硫和碳同位素变化[J]. *科学通报*, 2003, 48(8): 850-855.
- ZHANG Tonggang, CHU Xuelei, ZHANG Qirui, et al. Variations of sulfur and carbon isotopes in seawater during the Doushantuo stage in late Neoproterozoic [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(8): 850-855.
- 张志存. 太原西山晚石炭世蜓类的再研究[J]. *微体古生物学报*, 1990, 7(2): 95-122.
- ZHANG Zhicun. A restudy of Late Carboniferous fusulinaceans from the Western hills of Taiyuan[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 1990, 7(2): 95-122.
- 周建平. 广西隆林常么马平组蜓类化石带—兼论石炭—二叠系分界[J]. *古生物学报*, 1991, 30(3): 396-405.
- ZHOU Jianping. Fusulinid zones from Mapping Formation of Changmo, Longlin, Guangxi on Carboniferous-Permian boundary[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 1991, 30(3): 396-405.
- 祝新友, 汪东波, 王书来. 西昆仑海相火山岩及其有关大型铜矿成矿前景的初步分析[J]. *地质论评*, 1999, 45(7): 995-1001.
- ZHU Xinyou, WANG Dongbo, WANG Shulai. The characteristics of marine volcanic rocks and the prospect of the exploring for copper deposits in Western Kunlun, Xinjiang[J]. *Geological Review*, 1999, 45(7): 995-1001.
- 朱玉英, 张继胜, 贾强, 等. 山东兖州煤田太原组蜓类动物群及石炭—二叠系界线探讨[J]. *微体古生物学报*, 2005, 22(4): 400-411.
- ZHU Yuying, ZHANG Jisheng, JIA Qiang, et al. Study on the fusulinid fauna and the Carboniferous-Permian boundary in the Taiyuan Formation from the Yanzhou coalfield, Shandong Province[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2005, 22(4): 400-411.
- Ader M, Sansjofre P, Halverson G P, et al. Ocean redox structure across the Late Neoproterozoic Oxygenation Event: A nitrogen isotope perspective[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 396: 1-13.
- Brand U, Veizer J. Chemical diagenesis of a multicomponent carbonate system: 1, Trace elements [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1980, 50(4): 1219-1236.
- Brand U, Veizer J. Chemical diagenesis of a multicomponent carbonate system: 2, Stable isotopes [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1981, 51(3): 987-997.
- Bruckschen P, Bruhn F, Meijer J, et al. Diagenetic alteration of calcitic fossil shells: Proton microprobe (PIXE) as a trace element tool [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 1995, 104 (1-4): 427-431.
- Derry L A, Kaufman A J, Jacobsen S B. Sedimentary cycling and environmental change in the Late Proterozoic;



- Evidence from stable and radiogenic isotopes [J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 1992, 56 (3): 1317-1329.
- Jacobson S B and Kaufman A J. The Sr, C and O isotopic evolution of Neoproterozoic seawater[J]. *Chemical Geology*, 1999, 16: 37-57.
- Kaufman A J and Knoll A H. Neoproterozoic variations in the C-isotopic composition of seawater: Stratigraphic and biogeochemical implications [J]. *Precambrian Research*, 1995, 73: 27-49.
- Keith M L, Weber J N. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1964, 28(10/11): 1787-1816.
- Kuleshov, V. N. New data on formation conditions and origin of manganese carbonate ores in the Ulutelyak deposit (Bashkortostan) [J]. *Lithology and Mineral Resources*, 2012, 47: 305-318.
- Kuleshov V N. Isotope Compositions ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) of Manganese Carbonates of the Porozhinsk Deposit (Yenisei Ridge, Krasnoyarsk Region) [J]. *Lithology and Mineral Resources*, 2018, 53: 525-532.
- Maynard J B. Manganiferous sediments, rocks, and ores [J]. *Treatise on Geochemistry*, 2003, 7: 289-308.
- Maynard J B. The chemistry of manganese ores through time: A signal of increasing diversity of Earth-surface environment [J]. *Economic Geology*, 2010, 105: 535-552.
- Matte P, Tapponnier P, Arnaud N, et al. Tectonics of western Tibet, between the Tarim and the Indus [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 142 (3/4): 311-330.
- Neumann T, Heiser U, Leosson M A, et al. Early diagenetic processes during Mn-carbonate formation: evidence from the isotopic composition of authigenic Ca-rhodochrosites of the Baltic Sea [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(5): 867-879.
- Nyame F K and Beukes N J. The genetic significance of carbon and oxygen isotopic variations in Mn-bearing carbonates from the Palaeoproterozoic ( $\sim 2.2\text{Ga}$ ) Nsuta deposit in the Birima of Ghana [J]. *Carbonates and Evaporites*, 2006, 21: 21-32.
- Okita P M, Maynard J B, Spiker E C et al. Isotopic evidence for organic matter oxidation by manganese reduction in the formation of stratiform manganese carbonate ore [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1988, 52: 2679-2685.
- Pan Yusheng. Geological evolution of the Karakorum and Kunlun Mountains [M]. Beijing: Seismological Press, 1999, 1-288.
- Qing Hairuo, Veizer J. Oxygen and carbon isotopic composition of Ordovician brachiopods: Implications for coeval seawater [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(20): 4429-4442.
- Ross C A. Paleocology of *Triticites* and *Dunbarinella* in Upper Pennsylvanian strata of Texas [J]. *Journal of Paleontology*, 1969, 43(2): 298-311.
- Sohlenius G, Sternbeck J, Andren E, et al. Holocene history of the Baltic Sea as recorded in a sediment core from the Gotland Deep [J]. *Marine Geology*, 1996, 134 (3-4): 183-201.
- Struck U, Emeis K C, Christiansen C C, et al. Records of Baltic Sea eutrophication in  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  of sedimentary organic matter [J]. *Marine Geology*, 2000, 164 (3): 157-171.
- Veizer J. Trace elements and isotopes in sedimentary carbonates [J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 1983, 11(1): 265-299.
- Williams D F, Lerche I, Full W E. Isotope Chronostratigraphy: Theory and Methods [M]. California: Academic Press, 1988: 39-68.
- Zhang Banglu, Wang Changle, Leslie J Robbins, et al. Petrography and geochemistry of the Carboniferous Ortokarnash manganese deposit in the western Kunlun Mountains, Xinjiang Province, China: implications for the depositional environment and the origin of mineralization [J]. *Economic Geology*, 2020, 115(7): 1559-1588.
- Zhao Mingyu, Zheng Yongfei. Marine carbonate records of terrigenous input into Paleotethyan seawater: Geochemical constraints from carboniferous limestones [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 141: 508-531.