

新疆阿克陶地区肖尔布拉克锰矿床矿物学、地球化学特征及地质意义

孙晓亮^{1,2}, 刘晓^{1*}, 华磊², 张霞², 厉浩然², 邹占春², 邢洪连², 唐名鹰², 吴洪彬², 郑成龙², 贾茹³

1. 山东理工大学资源与环境工程学院, 山东 淄博 255000;

2. 山东省地质矿产勘查开发局第八地质大队, 山东省地矿局有色金属矿找矿与资源评价重点实验室, 山东 日照 276800;

3. 山东省黄海地质工程有限公司, 山东 日照 276800



摘要:新疆阿克陶地区肖尔布拉克锰矿床是我国西部地区新发现的锰矿床, 形成于以恰尔隆为代表的陆缘裂谷盆地边缘, 赋存于下石炭统他龙群层状灰黑色锰矿化含黄铁矿泥质灰岩内, 主要发育菱锰矿、锰方解石和钙菱锰矿3种富锰矿物。岩石地球化学研究表明, 锰矿石相对围岩亏损Ti元素, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值偏低, 为高铁中磷贫锰矿石; 微量元素相对亏损Rb、Ta和Hf元素, 富集Th、Sm和Y元素; 轻稀土元素相对亏损, 重稀土元素相对富集, 呈现Ce弱负异常、Eu正异常和Y正异常, 反映出海底热液喷流为锰矿的形成提供了物质来源。环境判别表明, 锰矿石形成于咸水和高咸水, 且相对氧化的环境中。晚古生代富含Fe和Mn等多金属元素的海底喷流热液与海水混合后, 在相对缺氧、还原性和温和碱性条件下, Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 以(Mn, Fe)—(氢)氧化物的形式富集于氧化还原界面上, 与 CO_3^{2-} 结合后形成以菱锰矿为主的含锰碳酸盐岩, 运移至对成矿有利的沉积凹陷处, 与碳酸盐岩共同沉积, 形成肖尔布拉克锰矿。

关键词:地球化学; 矿物学; 他龙群; 菱锰矿; 肖尔布拉克锰矿; 阿克陶地区; 新疆

中图分类号: P618.23 文献标志码: A 文章编号: 1005-2518(2025)05-0936-14 DOI: 10.11872/j.issn.1005-2518.2025.05.035

引用格式: 孙晓亮, 刘晓, 华磊, 等. 新疆阿克陶地区肖尔布拉克锰矿床矿物学、地球化学特征及地质意义[J]. 黄金科学技术, 2025, 33(5): 936-949. SUN Xiaoliang, LIU Xiao, HUA Lei, et al. Mineralogy, Geochemical Characteristics and Geological Significance of the Xiaerbulake Manganese Deposit in Aketao Area, Xinjiang[J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(5): 936-949.

在现代工业中, 锰及锰的化合物在国民经济各个领域发挥着重要的作用(付勇等, 2014)。近年来, 随着新能源电池和石墨烯等新兴战略性新兴产业的不断发展(覃双苗等, 2022; 叶敏华等, 2023), 我国对锰矿石的需求量不断增加。当前关于锰矿床的研究集中在我国华南地区(Xu et al, 2021; Chen et al, 2022; Yan et al, 2022), 矿床类型以沉积型锰

矿床为主, 矿床形成时代集中在中元古代至新元古代、晚古生代和中生代早期。南华纪“大塘坡式”沉积型锰矿床是华南地区锰矿床的典型代表(Wu et al, 2016)。前人研究认为, 华南地区锰矿的富集与地球演化密切相关, 受构造运动、火山或热液活动以及气候等因素的影响(Frakes et al, 1984; Liu et al, 2006; Roy, 2006; Maynard, 2010; Haas, 2012; Polgári

收稿日期: 2024-12-31; 修订日期: 2025-03-01

基金项目: 山东省地质矿产勘查开发局第八地质大队项目“新疆阿克陶县J43E012016幅矿产地质调查”所属南疆大型资源基地调查工程的二级项目“西昆仑铁铅锌资源基地调查与勘查示范”(编号: DD20160004-11)资助

作者简介: 孙晓亮(1985-), 男, 山东日照人, 高级工程师, 从事矿床勘查及找矿研究工作。E-mail: 604668438@qq.com

*通信作者: 刘晓(1981-), 男, 山东淄博人, 副教授, 从事三维地质建模及深部成矿预测研究工作。E-mail: 254908591@qq.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

et al, 2019; Yu et al, 2021; Cheng et al, 2025)。地球化学研究表明,氧化还原反应是控制不同时代沉积物中锰矿形成的主要因素(Maynard, 2014; Johnson et al, 2016; Otero et al, 2024)。

近年来,随着我国西部矿产地质调查及勘查工作的不断深入,在新疆西昆仑造山段北段玛尔坎苏和主乌鲁克等地区,优质锰矿找矿工作取得了重大突破(毛红伟, 2019; 张连昌等, 2020),在石炭纪沉积岩系中新发现奥尔托喀纳什、穆呼锰矿和玛尔坎土锰矿等中大型海相沉积型碳酸锰矿床(查斌等, 2018; 张帮禄等, 2018; 柳国良等, 2022),其远景资源量可达亿吨级。新疆肖尔布拉克锰矿是我国西部地区近年来新发现的锰矿,目前已发现地表矿(化)体9个,均赋存于下石炭统他龙群含碳质粉砂岩、泥岩夹锰矿化含黄铁矿泥质灰岩中,初步估算资源量已达到中型规模。该矿床与西昆仑北段石炭系沉积地层中新发现的锰矿处于同一层位,前期仅对该矿床的地质特征、矿石特征和找矿前景进行了初步研究(孙晓亮, 2020),缺少关于锰的成矿物质来源、沉积环境和成矿机理等方面的研究,制约了该地区沉积盆地中锰矿成矿作用的认识以及找矿工作的推进。

鉴于此,本研究通过详细的野外地质调查,对肖尔布拉克含锰岩系及其围岩开展了系统的采样工作,研究了该锰矿岩相学、矿物学和岩石地球化学特征,探讨了该矿床的锰矿物质来源和形成环境,初步总结了该矿床成矿模式,对该地区找矿实践具有重要的指导意义。

1 区域地质背景

研究区位于新疆西昆仑西部地区,地处塔里木陆块与羌塘弧盆系之间,为秦祁昆造山系西昆仑弧盆系的重要组成部分,西部以柯岗断裂为界与塔里木中央陆块(Ⅱ-1-4)和铁克里克陆源地块(Ⅱ-1-5)相邻,东部以喀喇昆仑断裂为界,与塔什库尔干—甜水海地块(Ⅳ-2-1)和羌北地块(Ⅳ-2-2)相接,二级构造单元包括昆盖山晚古生代岛弧(Ⅲ-2-1)、莫什塔拉岛弧(Ⅲ-2-2)和康西瓦—苏巴什蛇绿混杂岩带(Ⅲ-2-5)[图1(a)](冯京等, 2022)。

区内结晶基底由古元古代赫罗斯坦岩群和布

伦库勒岩群以及中元古代长城系赛图拉岩群和蓟县系桑株塔格组变质岩系组成,发育奥陶系、泥盆系、石炭系、二叠系、侏罗系和第四系,其中奥陶系为浅变质的海相碎屑岩—碳酸盐岩建造,泥盆系为海相碎屑岩建造,上石炭—下二叠统为碎屑岩夹火山岩建造,侏罗系为红色碎屑岩建造,第四系以河流和湖泊相为主,含少量冰碛冰水堆积物[图1(b)]。

该区内断裂和褶皱较为发育。断裂主要呈NNW向展布,自西向东依次发育空贝利—木扎令、克斯麻克大阪、其里拱拜孜—牙给恰克大板和艾捷克达坂—阿尔买尔太等主要断裂[图1(b)],以发育糜棱岩、碎裂岩、构造片岩和透镜体为特征。褶皱主要发育有恰尔隆复背斜和苏盖特—七里滚白子向斜,其中恰尔隆复背斜位于研究区中东部恰尔隆—艾捷克达坂一带,四周均为断层所限,轴线呈NW-NWW向,波状弯曲,次级褶皱发育。

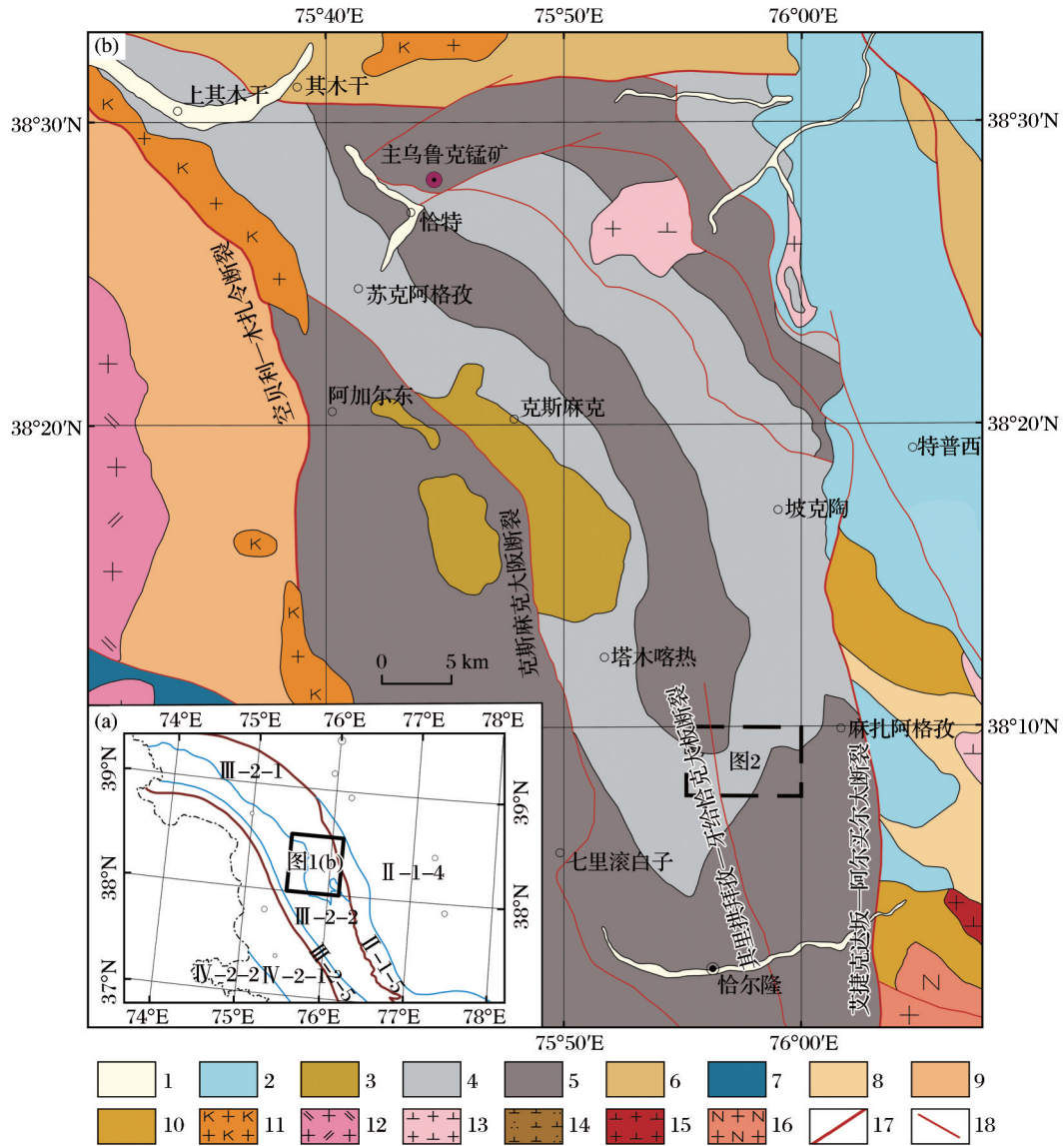
岩浆岩主要发育中酸性侵入岩,包括蓟县纪阿克乔克岩体斜长花岗岩、寒武纪巴格岩体花岗闪长岩、二叠纪库里巴克吉勒嘎岩体石英闪长岩和阿克达拉岩体花岗闪长岩以及三叠纪二长花岗岩,同时沿空贝利—木扎令断裂发育一系列正长花岗岩岩脉及岩株,成岩时代为晚侏罗世[图1(b)]。

区域锰矿资源分布广泛,除发育有阿克陶肖尔布拉克锰矿之外,在北部恰特地区还发育有主乌鲁克锰矿,为深海—半深海陆缘裂谷环境下形成的与黑色碳质页岩有关的沉积型锰矿床,成矿时代为早石炭世,成矿层位为下石炭统他龙群(毛红伟, 2019; Li et al, 2022)。

2 矿床地质特征

2.1 矿区地质

阿克陶肖尔布拉克锰矿床位于区域东南部[图1(b)],区内岩浆岩不发育,出露地层由老至新有下石炭统他龙群(C_1T)和上石炭统特给乃奇克达坂组(C_2fg)(图2)。下石炭统他龙群在矿区内发育第二和第三岩性段。其中,下石炭统他龙群第二岩性段(C_1T^2)为一套砂砾岩—砂岩—泥岩—泥质灰岩浊流沉积组合,中部b层以含炭粉砂质泥岩为主夹薄层细砂岩,上部c层为一套薄层状含炭质粉砂质泥岩夹深灰—灰黑色中薄层状锰矿化含黄铁矿



II-塔里木陆块区: II-1-塔里木陆块: II-1-4-塔里木中央陆块; II-1-5-铁克里克陆源地块; III-秦祁昆造山系: III-2-西昆仑弧盆系; III-2-1-昆盖山晚古生代岛弧; III-2-2-莫什塔拉岛弧; III-2-5-康西瓦—苏巴什蛇绿混杂岩带; IV-西藏—三江造山系: IV-2-羌塘弧盆系: IV-2-1-塔什库干—甜水海地块; IV-2-2-羌北地块; 1. 第四系; 2. 侏罗系; 3. 二叠系; 4. 下二叠统一上石炭统; 5. 石炭系; 6. 泥盆系; 7. 奥陶系; 8. 蓟县系; 9. 长城系; 10. 古元古界; 11. 正长花岗岩; 12. 三叠纪二长花岗岩; 13. 二叠纪花岗闪长岩; 14. 二叠纪石英闪长岩; 15. 寒武纪花岗闪长岩; 16. 蓟县纪斜长花岗岩; 17. 区域性大断裂; 18. 实测断层

图1 新疆阿克陶地区大地构造位置(a)及区域地质图(b)

Fig. 1 Geotectonic location(a) and regional geological map(b) of Aketao area, Xinjiang

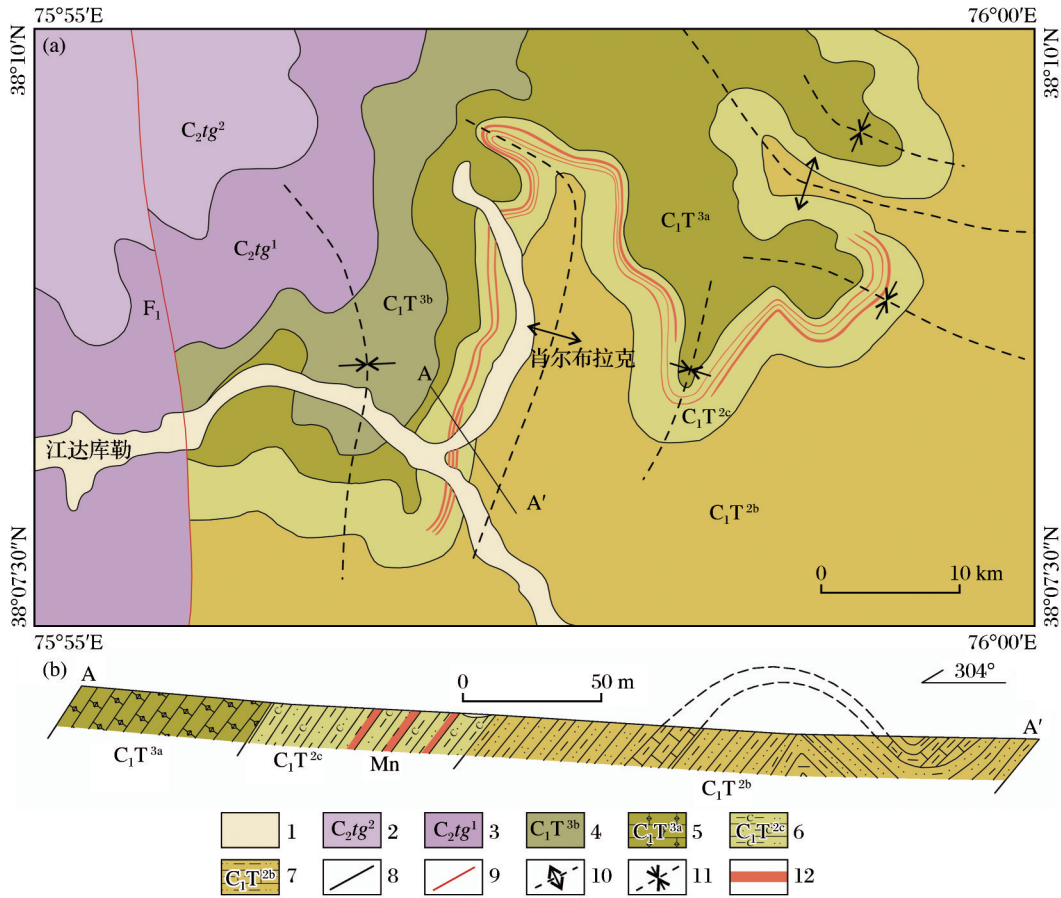
泥质灰岩、锰矿化含黄铁矿(钙质)粉砂岩组合,为含锰岩系主要发育层位;下石炭统他龙群第三岩性段(C₁T³)为一套灰—深灰色薄—中厚层状泥晶—微晶灰岩、生物碎屑灰岩、砾屑灰岩、钙质泥岩、钙质粉砂岩及砂岩岩组组合,与下伏他龙群第二岩性段顶部泥岩夹泥质灰岩呈现为连续过渡。上石炭

统特给乃奇克达坂组下部为灰—深灰色薄层砂砾岩—厚层块状中—细粒岩屑石英砂岩—灰黑色粉砂岩的多韵律互层。该组在矿区北部与他龙群为连续沉积,在矿区西南部,他龙群逆冲推覆于特给乃奇克达坂组之上,二者呈断层接触。

区内主要发育其里拱拜孜—牙给恰克大板断

裂(F_1)(图2),表现为自东向西的逆冲推覆韧性断裂特征。褶皱主要分布在肖尔布拉克一带,西侧褶皱北段轴部走向整体表现为NNW向,南段逐渐

向SSW向延伸,而东北侧褶皱均表现为NWW向延伸,区内褶皱均呈现宽缓构造,整体上控制了区内地层的展布。



1. 第四系冲洪积;2. 给乃奇克达坂组上部粉砂质泥岩;3. 给乃奇克达坂组下部砂砾岩与中—细粒砂岩;4. 他龙群第三岩性段泥质灰岩夹细砂岩;5. 他龙群第三岩性段微晶灰岩夹砾屑灰岩;6. 他龙群第二岩性段含炭质粉砂岩和泥岩;7. 他龙群第二岩性段粉砂岩夹石英砂岩和泥质灰岩;8. 地质界线;9. 断层;10. 背斜;11. 向斜;12. 锰矿体

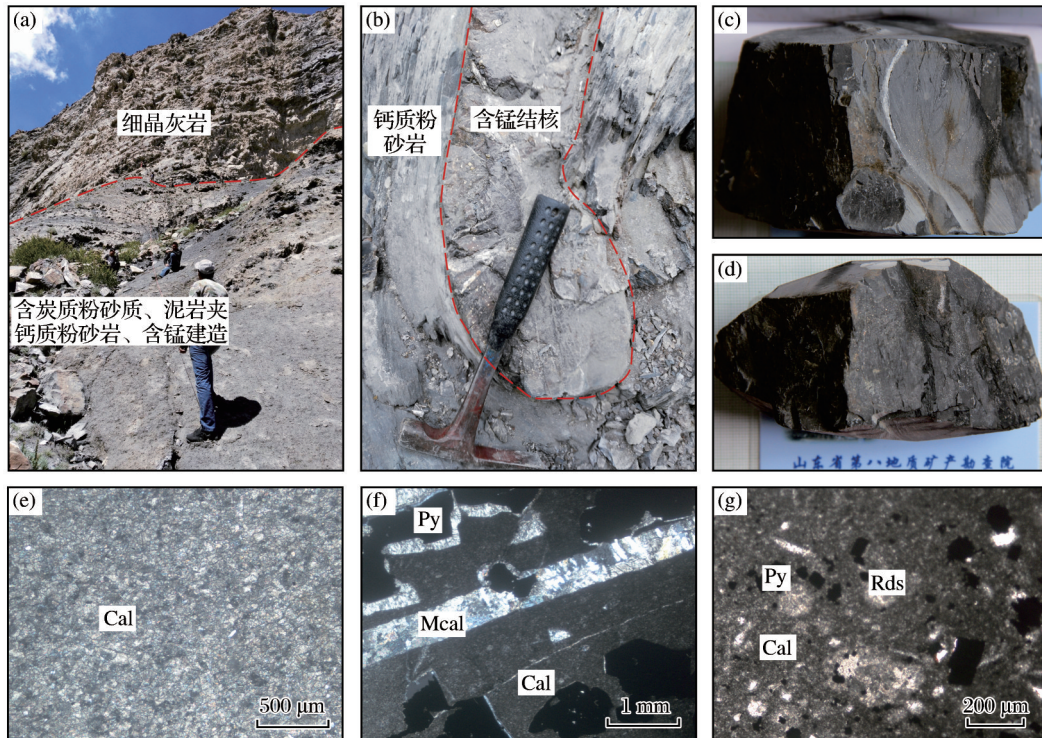
图2 新疆阿克陶肖尔布拉克锰矿区地质图(a)与典型地质剖面图(b)

Fig. 2 Geological map (a) and typical geological section map (b) of the Xiaerbulake manganese deposit in Aketao area, Xinjiang

2.2 含锰岩系及矿体特征

肖尔布拉克锰矿赋矿层位为下石炭统他龙群第二岩性段上部c层,整体上表现为一套黑色含炭粉砂质泥岩夹灰黑色锰矿化含黄铁矿泥质灰岩建造。上覆岩性为他龙群第三岩性段灰—深灰色薄—中厚层状泥晶—细晶灰岩[图3(a)]。其中,黑色含炭粉砂质泥岩呈深灰—黑色,含炭粉砂质结构,薄层状构造,主要矿物成分为石英、长石、炭质和黏土矿物,为含锰岩系主要围岩。

灰黑色锰矿化含黄铁矿泥质灰岩为锰矿主要赋矿层位,目前共圈定3条锰矿体,局部发育锰结核[图3(b)],与围岩界限清晰。该含锰岩石风化面为紫褐—灰褐色,新鲜面呈灰黑色[图3(c)、3(d)],层状发育,厚度不等(0.5~2.5 m),岩石致密,硬度较大,岩石中多见黄铁矿,局部已氧化为褐铁矿,主要由陆源碎屑和方解石组成。方解石主要为微晶方解石,含量为85%~92%[图3(e)]。岩石中见少量黄铁矿和金属矿物,黄铁矿呈粒状[图3(f)],粒径为



(a)他龙群灰—深灰色薄—中厚层状细晶灰岩与黑色含炭粉砂质、泥岩夹钙质粉砂岩、含锰建造野外接触关系;(b)钙质粉砂岩中含锰结核;(c)、(d)黄铁矿化锰矿石;(e)锰矿化泥质灰岩镜下特征;(f)锰矿化含黄铁矿泥质灰岩中发育锰方解石细脉;(g)锰矿化含黄铁矿泥质灰岩中菱锰矿发育特征;Cal—方解石;Mcal—锰方解石;Py—黄铁矿;Rds—菱锰矿

图3 新疆阿克陶肖尔布拉克锰矿床矿石野外、手标本及典型镜下照片

Fig. 3 Ore field, hand specimens and typical microscopic photos of the Xiaerbulake manganese deposit in Aketao area, Xinjiang

0.03~1.30 mm。岩石中不规则状微裂隙发育,内充填锰方解石细脉[图3(f)],宽度为0.05~0.30 mm。

2.3 矿石及矿物组合特征

肖尔布拉克锰矿床矿石类型以碳酸锰矿石为主,具泥—微晶结构,块状构造[图3(c)~3(e)]。镜下鉴定和扫描电镜分析显示,除呈自形立方体的黄铁矿之外,菱锰矿、锰方解石和钙菱锰矿为最常见的富锰矿物[图3(f)、3(g),图4(a)~4(f)]。其中,扫描电镜中(钙)菱锰矿多混合有Fe亚相[图4(b)、4(c)],可能与硫酸盐的含量和氧逸度相关。

菱锰矿镜下为黑褐色,玻璃光泽,在细—微粒泥晶方解石中呈浸染状分布,多为不规则—近椭圆状他形集合体,与锰方解石和钙菱锰矿密切共生,集合体粒径多小于0.1 mm。扫描电镜显示,菱锰矿集合体多呈球粒状和具孔洞细片状集合体,多分布于片状和层状方解石颗粒间[图4(d)、4(f)]。

3 地球化学特征

3.1 样品采集及测试方法

本研究采集的主微量和稀土元素分析样品均位于地表槽探,选取新鲜无风化锰矿石和围岩样品,采样时自锰矿层底板至顶板依次采集。共采集样品9件,其中,顶底板围岩采集泥质粉砂岩和含锰泥质灰岩样品5件,锰矿层采集矿石样品4件。

样品分析测试工作在山东省第八地质矿产勘查院实验测试中心完成,所有样品经恒温烘干后在玛瑙研钵中研磨至200目(74 μm),用于全岩主量、微量及稀土元素分析。全岩主量元素分析采用熔片分析,使用X射线荧光光谱仪测试,分析误差优于5%;微量和稀土元素分析采用酸溶法制备样品,使用电感耦合等离子质谱仪测定,测试结果相对标准偏差小于10%。

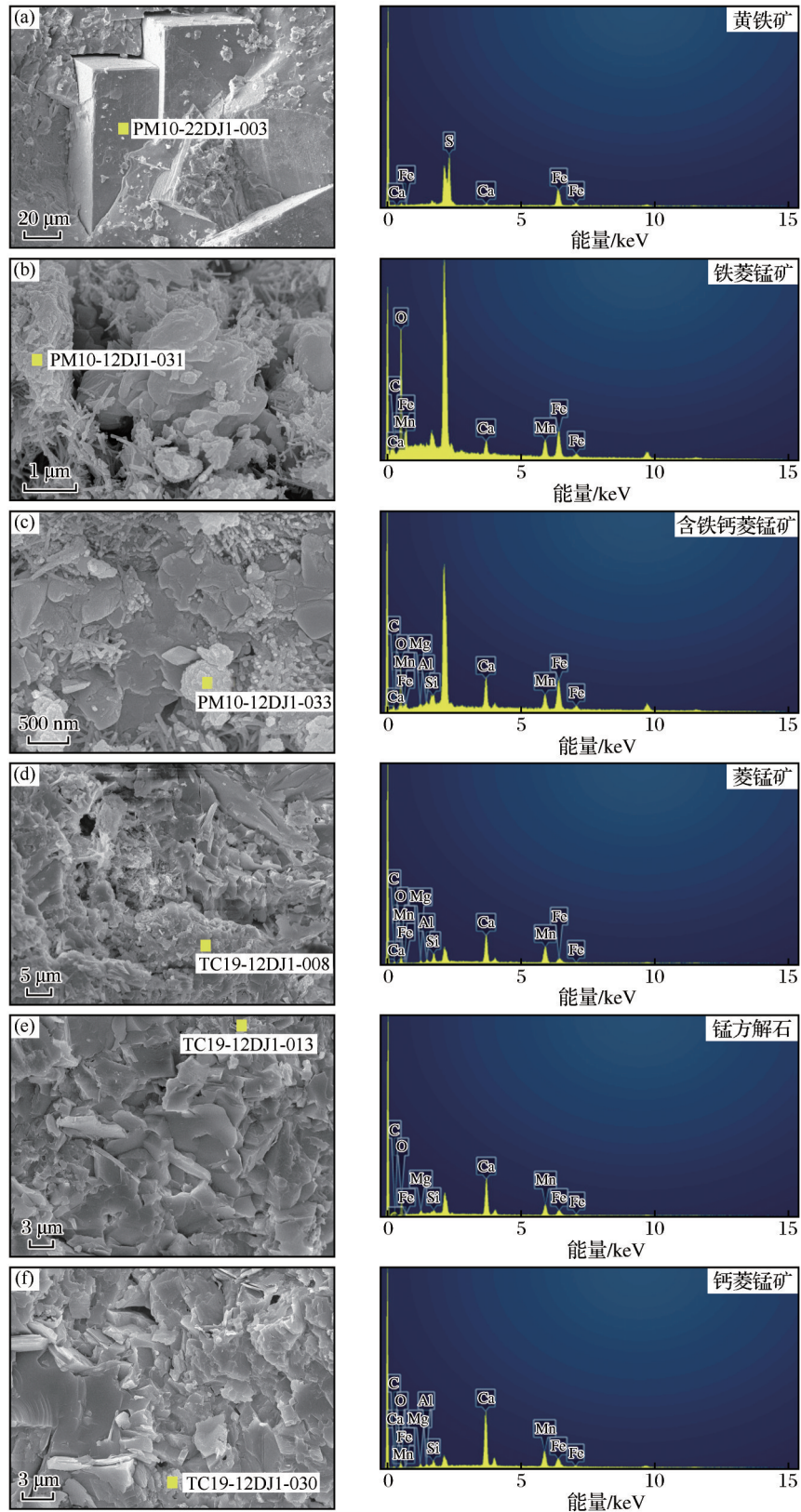


图4 新疆阿克陶肖尔布拉克锰矿床主要矿物扫描电镜特征

Fig. 4 SEM characteristics of main minerals of the Xiaerbulake manganese deposit in Aketao area, Xinjiang

3.2 主量元素地球化学特征

肖尔布拉克锰矿石及顶底板围岩主量元素分析结果见表1。锰矿石主量元素测试结果显示, MnO 含量为 10.9%~13.3%, 平均含量为 11.9%; SiO₂ 含量为 11.3%~25.4%, 平均含量为 18.8%; P₂O₅ 含量为 0.15%~3.57%, 平均含量为 1.12%; Fe₂O₃ 含量为 17.9%~26.6%, 平均含量为 20.9%; CaO 含量为 15.0%~28.2%, 平均含量为 18.7%。

顶底板围岩主量元素测试结果显示: MnO 含量为 0.18%~4.65%, 平均含量为 2.46%; SiO₂ 含量为 11.7%~30.5%, 平均含量为 23.9%; P₂O₅ 含量为 0.15%~1.18%, 平均含量为 0.52%; Fe₂O₃ 含量为 8.33%~39.70%, 平均含量为 23.30%; CaO 含量为 3.75%~29.00%, 平均含量为 15.90%。

整体来看, 锰矿石中 MnO、P₂O₅ 和 CaO 含量比顶底板围岩高; SiO₂ 含量比顶底板围岩低, 可能与锰矿石主要为含锰碳酸岩, 而围岩中部分为泥质粉砂岩有关。锰矿石中 P/Mn 比值为 0.0078~0.1652, 平均比值为 0.0518, Mn/Fe 比值为 0.45~0.78, 平均比值为 0.65, 表明区内锰矿石为高铁中磷贫锰矿石。

3.3 微量和稀土元素地球化学特征

肖尔布拉克锰矿石及顶底板围岩微量和稀土元素分析结果见表1。微量元素中锰矿石 Sr、Yb、Sm 和 Y 元素含量相比围岩偏高, Rb、Ba、Nb 和 Zr 等元素含量相比围岩偏低, 其余元素含量基本接近。

稀土元素分析结果显示, 锰矿石稀土总量 Σ REE 为 88.4×10^{-6} ~ 100.9×10^{-6} , 平均值为 94.0×10^{-6} ; 轻稀土总量 Σ LREE 为 67.3×10^{-6} ~ 83.4×10^{-6} , 重稀土总量 Σ HREE 为 17.4×10^{-6} ~ 21.9×10^{-6} , 轻重稀土比值为 3.08~4.78, 平均比值为 3.70; δ Eu 值为 1.06~1.37, 平均值为 1.24, 具明显的正 Eu 异常; δ Ce 值为 0.75~1.00, 平均值为 0.90, 具弱的负 Ce 异常。相对于锰矿石而言, 围岩稀土总量偏低, Σ REE 为 47.7×10^{-6} ~ 127.0×10^{-6} , 平均值为 88.8×10^{-6} ; 轻稀土总量相当, 而重稀土含量明显偏低, 轻重稀土比值为 4.29~9.20, 平均比值为 5.59; δ Eu 值为 0.58~1.39, 平均比值为 1.08, 具弱的正 Eu 异常; δ Ce 值为 0.53~1.13, 平均值为 0.87, 具弱的负 Ce 异常。

4 讨论

4.1 成矿物质来源

前人研究表明, 以主乌鲁克为代表的阿克陶周边锰矿产于晚古生代陆缘裂谷盆地中, 为相对局限的盆地 (Zhang et al, 2021; Li et al, 2022)。本次研究的肖尔布拉克锰矿床所在的恰尔隆盆地无岩浆活动, 且盆地相对稳定。虽然受区域构造活动的影响, 但是岩(矿)石内部裂隙中发育的少量锰方解石细脉对岩石地球化学特征并不能产生大的影响, 主量和稀土微量元素在成岩和构造活动中变化小, 其含量主要受沉积物源区性质的影响。因此, 元素含量及其相应元素比值能够共同约束物质来源。

主量元素分析结果显示, 肖尔布拉克锰矿石 TiO₂ 含量较低, 为 0.02%~0.04% (平均值为 0.03%), 围岩中 TiO₂ 含量相对较高, 为 0.02%~0.06% (平均值为 0.04%); 锰矿石中 Al₂O₃ 含量为 2.45%~4.01% (平均值为 3.60%), 围岩中 Al₂O₃ 含量与矿石相当, 为 2.40%~4.00% (平均值为 3.23%), 表明锰矿石和围岩为同一来源。锰矿石 SiO₂/Al₂O₃ 比值范围为 3.93~6.44, 平均值为 5.18, 围岩 SiO₂/Al₂O₃ 比值范围为 4.87~8.59, 平均值为 7.26, 均高于陆源碎屑 SiO₂/Al₂O₃ 比值 (约为 3.6), 且 SiO₂-Al₂O₃ 投影图 [图 5(a)] 显示, 二者均落入水成区, 表明肖尔布拉克锰矿石的形成不只有陆缘碎屑, 还有热水活动的参与 (纪冬平等, 2022)。

肖尔布拉克锰矿石 Al/(Al+Fe+Mn) 比值为 0.05~0.09 (平均值为 0.07), 围岩 Al/(Al+Fe+Mn) 比值为 0.04~0.24 (平均值为 0.12); 锰矿石 Fe/Ti 比值为 619.12~1 174.85 (平均值为 907.21), 围岩 Fe/Ti 比值为 152.67~2 283.92 (平均值为 885.85); 锰矿石 (Fe+Mn)/Ti 比值为 1 033.49~1 999.56 (平均值为 1495.00), 围岩 Fe/Ti 比值为 174.06~2 579.74 (平均值为 998.08)。上述比值均满足典型热水沉积物的 Al/(Al+Fe+Mn) 比值 (<0.35)、Fe/Ti 比值 (>20) 和 (Fe+Mn)/Ti 比值 (>20 \pm 5) (Boström et al, 1973; Adachi et al, 1986; Yamamoto, 1987)。在 Fe/Ti-Al/(Al+Fe+Mn) 投影图 [图 5(b)] 上, 这些比值均落入热水沉积物范围内, 并与陆缘物质端元演化趋势线基本一致, 进一步表明肖尔布拉克锰矿的形成受到热水沉积作用的影响。

表1 肖尔布拉克锰矿石、岩石地球化学分析结果
Table 1 Geochemical analysis results of ore and rock of the Xiaerbulake manganese deposit

岩性(样品编号)	MnO	FeO	P ₂ O ₅	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃ ^T	Na ₂ O	K ₂ O	LOI	H ₂ O ⁺	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	Al /(Al+Fe+Mn)	Fe/Ti (Fe+Mn)/Ti	
泥质粉砂岩(AX1H1)	3.85	12.10	0.43	21.60	14.10	3.40	3.23	0.03	30.50	0.20	0.04	13.10	7.47	6.69	0.07	1 197 1 365	
泥晶灰岩(AX2H1)	4.65	9.48	0.28	11.70	3.75	4.31	2.40	0.02	39.70	0.36	0.07	24.40	1.56	4.87	0.04	2 284 2 580	
锰矿石(AX1H2)	10.90	2.02	0.15	15.70	15.90	2.15	4.01	0.03	26.60	0.40	0.11	16.70	9.29	3.93	0.07	967 1 405	
锰矿石(AX2H2)	13.30	2.00	0.39	22.80	15.00	2.82	3.99	0.03	18.90	0.50	0.12	24.80	10.10	5.71	0.08	868 1 542	
锰矿石(AX2H3)	12.20	2.45	3.57	11.30	28.20	2.74	2.45	0.04	20.20	0.45	0.11	29.20	7.42	4.63	0.05	619 1 033	
锰矿石(AX2H4)	11.40	4.28	0.36	25.40	15.80	2.65	3.94	0.02	17.90	0.63	0.17	22.00	9.34	6.44	0.09	1 175 2 000	
泥质粉砂岩(AX1H3)	0.18	13.10	0.56	26.90	11.20	1.43	3.14	0.06	24.40	1.20	0.34	12.80	7.91	8.56	0.09	457 461	
泥晶灰岩(AX2H5)	2.59	2.79	1.18	29.00	21.40	2.04	3.38	0.05	13.40	2.43	0.29	20.90	2.30	8.59	0.14	339 412	
泥晶灰岩(AX2H6)	1.05	4.96	0.15	30.50	29.00	2.03	4.00	0.06	8.33	0.14	0.08	24.10	2.48	7.61	0.24	153 174	
岩性(样品编号)	Sr	Sc	Rb	Ba	Th	Ta	Ce	Nb	Cr	Zr	Hf	Yb	Sm	Y	La	Pr	Nd
泥质粉砂岩(AX1H1)	299	5.93	2.85	15.60	4.18	0.30	30.20	3.26	27.70	27.30	0.50	2.78	3.64	26.50	14.50	2.92	10.90
泥晶灰岩(AX2H1)	64.80	3.15	3.57	23.80	1.96	0.19	18.50	1.90	18.50	23.30	0.40	1.70	2.56	17.30	8.15	1.74	6.80
锰矿石(AX1H2)	481	4.97	3.71	53.80	3.00	0.25	29.00	2.37	36.20	24.90	0.50	4.02	4.38	32.90	15.60	3.30	13.30
锰矿石(AX2H2)	561	6.33	12.80	41.70	3.31	0.34	34.20	3.44	47.20	22.80	0.60	4.12	5.22	34.70	16.80	3.76	14.80
锰矿石(AX2H3)	792	5.28	5.40	69.20	2.97	0.27	38.10	2.57	38.50	38.30	1.80	3.87	3.65	38.40	20.30	4.32	15.30
锰矿石(AX2H4)	432	7.04	2.90	31.90	3.24	0.19	26.50	2.66	42.40	19.50	0.50	2.94	3.01	30.80	17.30	3.87	14.80
泥质粉砂岩(AX1H3)	210	9.62	70.40	117	11.47	1.00	56.40	11.22	108	182	5.40	2.13	5.21	21.00	26.00	5.86	20.40
泥晶灰岩(AX2H5)	767	4.94	12.90	110	3.44	0.31	30.60	2.89	32.70	33.30	1.30	2.96	4.77	33.40	27.00	4.95	20.20
泥晶灰岩(AX2H6)	951	5.10	4.68	64.60	3.44	0.31	22.00	3.33	49.30	25.30	0.40	1.78	3.46	21.00	21.10	4.34	16.50
岩性(样品编号)	Eu	Tb	Gd	Dy	Ho	Er	Tm	Lu	La/Yb	Y/Ho	Ce/La	ΣREE	ΣLREE	ΣHREE	LREE/HREE	δEu	δCe
泥质粉砂岩(AX1H1)	1.67	0.58	3.60	3.23	0.64	1.90	0.31	0.33	5.22	41.50	2.08	77.30	63.90	13.40	4.78	1.39	1.06
泥晶灰岩(AX2H1)	0.93	0.38	2.43	2.24	0.46	1.37	0.21	0.22	4.79	37.70	2.27	47.70	38.70	9.00	4.29	1.12	1.13
锰矿石(AX1H2)	1.88	0.94	5.72	5.50	1.16	3.35	0.59	0.60	3.89	28.40	1.85	89.30	67.50	21.90	3.08	1.15	0.93
锰矿石(AX2H2)	1.75	1.12	4.65	5.28	1.29	3.11	0.48	0.52	4.07	27.00	2.04	97.20	76.60	20.60	3.72	1.06	1.00
锰矿石(AX2H3)	1.65	0.83	3.65	4.11	1.56	2.87	0.29	0.26	5.26	24.60	1.88	101	83.40	17.40	4.78	1.37	0.93
锰矿石(AX2H4)	1.82	1.01	5.34	5.98	1.16	3.46	0.63	0.58	5.89	26.60	1.53	88.40	67.30	21.10	3.19	1.37	0.75
泥质粉砂岩(AX1H3)	0.88	0.61	3.78	3.22	0.60	1.67	0.25	0.23	12.20	35.20	2.17	127	115	12.50	9.20	0.58	1.06
泥晶灰岩(AX2H5)	2.37	0.97	6.06	5.60	1.10	3.03	0.50	0.51	9.12	30.40	1.13	111	89.90	20.70	4.34	1.35	0.59
泥晶灰岩(AX2H6)	1.13	0.63	3.78	3.47	0.68	1.88	0.31	0.29	11.80	30.70	1.04	81.20	68.40	12.80	5.33	0.95	0.53

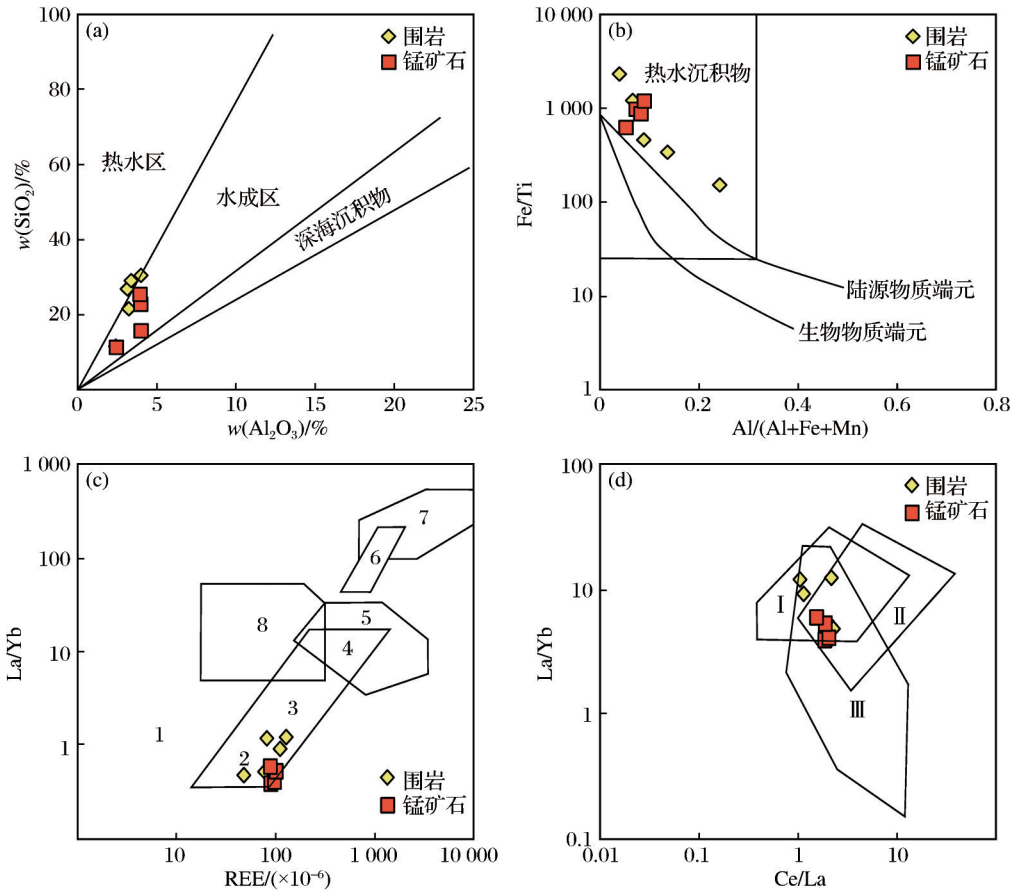
注:主量元素单位为%;稀土和微量元素单位为×10⁻⁶;表中大于100的数值保留整数,其余各数值均保留至小数点后两位

微量稀土元素分析结果显示,在La/Yb-REE稀土元素判别图解[图5(c)]中,围岩和矿石样品均落入玄武岩区,且更接近大洋拉斑玄武岩,进一步显示锰矿沉积物物质来源有大洋基性岩浆成因的热水物质的加入。在La/Yb-Ce/La图解[图5(d)]中,围岩和矿石样品均落入深海沉积物、大洋玄武岩以及相对应岩石范围内,与上述分析结果一致。

在微量元素配分(显生宙灰岩)和稀土元素的PAAS(澳大利亚后太古代平均页岩)图解(图6)(McLennan, 1989)中,锰矿石和围岩样品均为左倾,

表现出相似的微量和稀土元素配分模式。微量元素相对亏损Rb、Ta和Hf等元素,富集Th、Sm、Y和Sc等元素,表明样品物质来源为大洋玄武岩。稀土元素配分模式均为Ce弱负异常、Eu正异常和Y正异常,具有轻稀土元素相对亏损,重稀土元素相对富集的特征,与韦赛尔斯型锰矿床分布特征曲线基本一致,指示该矿床为热液成因。

综上所述,肖尔布拉克锰矿及其围岩在主量、微量和稀土元素地球化学特征方面具有高度的一致性,表明海底热液喷流作用是影响矿区含锰岩系



(a) Al_2O_3 - SiO_2 图解(底图据 Taylor et al, 1985); (b) $Al/(Al+Fe+Mn)$ - Fe/Ti 图解(底图据 Boström et al, 1973); (c) La/Yb -REE 图解(底图据 Allègre et al, 1978); (d) La/Yb - Ce/La 图解(底图据 Kunzendorf, 1988); 1-球粒陨石; 2-大洋拉斑玄武岩; 3-大陆拉斑玄武岩; 4-碱性玄武岩; 5-花岗岩; 6-金伯利岩; 7-碳酸盐岩; 8-沉积岩; I-深海沉积物; II-铁锰结核及铁镁岩; III-洋底玄武岩及相应的岩石

图5 肖尔布拉克锰矿石及围岩的元素关系图解

Fig. 5 Elements relationship diagram of ore and surrounding rock of the Xiaerbulake manganese deposit

发生沉积作用的一个重要因素,热水活动对锰矿的富集和成矿起到积极作用。

4.2 成矿环境

肖尔布拉克锰矿石的 Y/Ho 比值为 24.59~

28.39, 平均值为 26.63, 接近 PAAS(澳大利亚后太古代平均页岩)的比值(27.25) (McLennan, 1989); 围岩的 Y/Ho 比值为 30.37~41.47, 平均值为 35.07, 位于火山和碎屑岩沉积物与海水 Y/Ho 比值之间

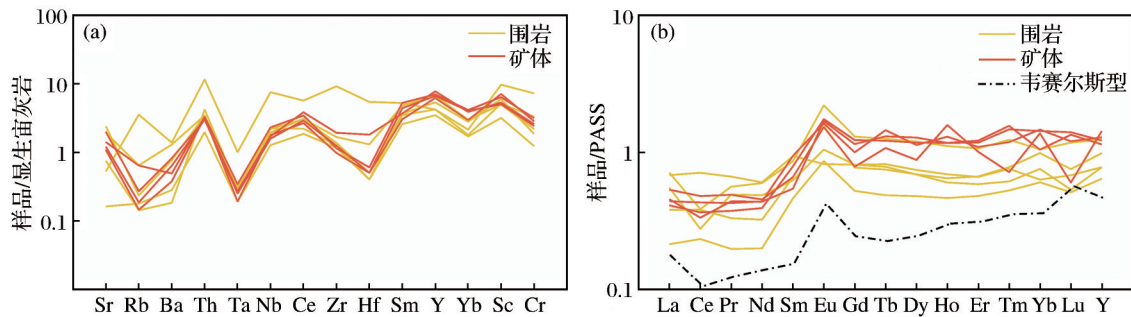


图6 肖尔布拉克锰矿微量(a)和稀土元素(b)标准化配分模式图

Fig. 6 Standardized distribution pattern of trace elements (a) and rare earth elements (b) in the Xiaerbulake manganese deposit

[图7(a)],这可能与海水沉积后围岩吸附Fe-Mn氧化物有关。肖尔布拉克锰矿石 δCe 值为0.75~1.00,平均值为0.90,围岩中 δCe 值为0.53~1.13,平均值为0.87,均具弱的负Ce异常,并未出现明显的负异常,表明锰矿的形成处于相对氧化的环境(侯东壮等,2015)。同时,具弱负Ce异常的锰矿石具有明显的Y正异常(图6),这可能是因为(Fe,Mn)一氢氧化物颗粒表面吸收的REE+Y与溶解在环境海水

中的REE+Y不处于交换平衡状态,从而导致Mn的(氧氢)氧化物从水体中快速沉积(Bau et al, 1996)。在微量元素Sr-Ba图解[图7(b)]中,锰矿石和围岩样品均落入咸水和高咸水区域。此外,前人研究认为阿克陶周边锰矿产于晚古生代陆缘裂谷盆地中,为相对局限的盆地,与本文研究结果一致,进一步表明肖尔布拉克锰矿沉积于相对氧化的高咸水环境中,为快速沉积的结果。

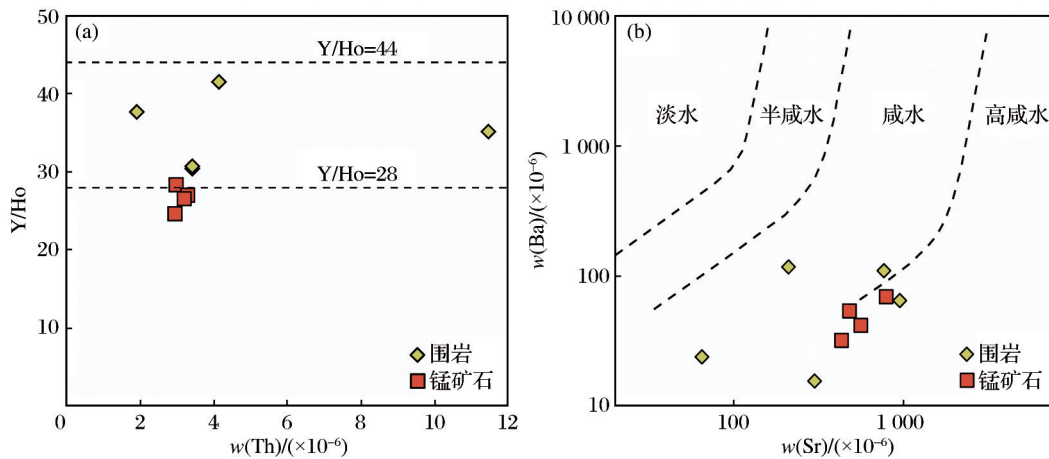


图7 肖尔布拉克锰矿Th-Y/Ho投影图(a)和Sr-Ba投影图(b)(底图据Jones et al, 1994; 范德廉, 1994)
 Fig. 7 Th-Y/Ho projection(a) and Sr-Ba projection(b) of the Xiaerbulake manganese deposit
 (base map according to Jones et al, 1994; Fan, 1994)

4.3 对成矿的指示

一般来说,在缺氧、还原性以及温和碱性条件下,Mn主要以 Mn^{2+} 形式存在于锰矿物中(Maynard, 2014)。但是,有机物的氧化和(Mn, Fe)(氧氢)氧化物的还原可能会增加孔隙水中 Mn^{2+} 的浓度(Calvert et al, 1996)。当与分子氧共存时, Mn^{2+} 被氧化成不可溶的 Mn^{3+} 或 Mn^{4+} (氧氢)氧化物,在氧化还原界面上,频繁的氧化还原反应使得 Mn^{2+} 明显富集(Calvert et al, 1996)。虽然前文分析结果表明肖尔布拉克锰矿沉积于相对氧化的环境中,但是野外观察发现,矿石中低的有机碳含量反映出碳酸锰通过 Mn^{3+} 或 Mn^{4+} 氧化物还原,并与有机物氧化形成的 CO_3^{2-} 相结合后,运移至缺氧环境下沉积形成锰矿。

在成矿过程中,Mn与Fe的分离可能在矿化过程中发挥了重要作用(徐林刚, 2020; Xu et al, 2021)。首先,还原的海水逐渐被氧化, Fe^{2+} 先被氧化析出,然后 Mn^{2+} 随残余的富Mn、贫Fe海水流入相

对局限的盆地。其次,在成岩作用初期,有机物被氧化,锰的(氢)氧化物被还原生成碳酸锰。同时,在矿石中发育有大量的自形黄铁矿,表明硫酸盐供应相对充足,阻止了 Fe^{2+} 的运输,导致含锰碳酸盐岩中Fe含量较高。

综上所述,肖尔布拉克锰矿成矿过程和成矿机制(图8)如下:晚古生代在以恰尔隆为代表的陆缘裂谷盆地边缘,海底喷流热液衍生的 Mn^{2+} 在限制盆地的还原条件下富集。随后,海水中氧化还原界面周期性的下降和上升,使得 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 以(Mn, Fe)一(氢)氧化物的形式富集于氧化还原界面之上以及相对氧水浓度较低的海水之间,与有机氧化物形成的 CO_3^{2-} 结合后,运移至相对缺乏有机物的缺氧带下,并在成矿有利的盆地凹陷处与碳酸盐共同沉积形成肖尔布拉克锰矿。同时,在锰矿形成过程中,相对充足的硫酸盐和快速的氧化条件造成锰矿石中铁和锰的不完全分离,导致锰矿中铁含量较高。

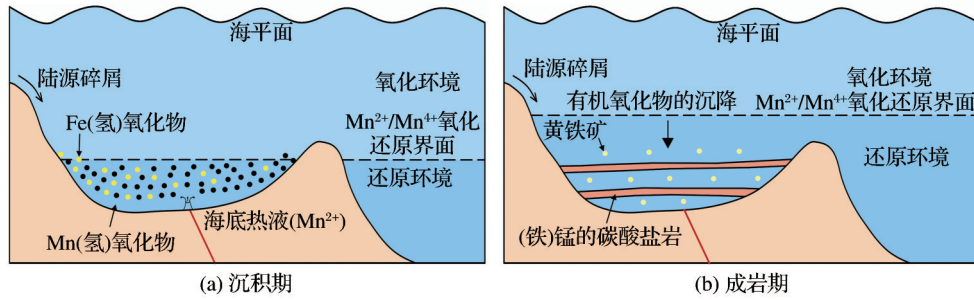


图8 肖尔布拉克锰矿床成矿模式图(修改自 Roy, 2006; Li et al, 2022)

Fig. 8 Metallogenic model diagram of the Xiaerbulake manganese deposit (modified after Roy, 2006; Li et al, 2022)

5 结论

(1) 肖尔布拉克锰矿形成于以恰尔隆为代表的陆缘裂谷盆地边缘, 赋存于下石炭统他龙群层状灰黑色锰矿化含黄铁矿泥质灰岩内, 富锰矿物主要为菱锰矿、锰方解石和钙菱锰矿。

(2) 岩石地球化学特征表明, 肖尔布拉克锰矿相对亏损 Ti 元素, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值偏低, 为高铁中磷贫锰矿石, 位于热水沉积区范围; 微量元素相对亏损 Rb、Ta 和 Hf 元素, 富集 Th、Sm 和 Y 元素; 稀土元素配分模式曲线具有轻稀土元素相对亏损、重稀土元素相对富集的特征, 显示出 Ce 弱负异常、Eu 正异常和 Y 正异常, 样品投点均落入深海沉积物和大洋玄武岩区域。上述分析结果显示, 海底热液为矿区含锰岩系的沉积提供了物质来源。

(3) 肖尔布拉克锰矿 Y/Ho 比值与显生宙灰岩基本一致, Sr-Ba 图解显示岩(矿)石形成于咸水和高咸水中, 弱负 Ce 异常和 Y 正异常表明锰矿的形成处于相对氧化的环境。

(4) 肖尔布拉克锰矿成矿过程和成矿机制如下: 晚古生代富含 Fe 和 Mn 等多金属的海底喷流热液与海水混合后, 在相对缺氧、还原性和温和碱性条件下, Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 以 (Mn, Fe)-(氢)氧化物的形式富集于氧化还原界面上下, 与 CO_3^{2-} 结合后形成以菱锰矿为主的锰的碳酸盐, 当运移至对成矿有利的沉积凹陷处时, 与碳酸盐岩共同沉积, 形成肖尔布拉克锰矿。

参考文献 (References):

Adachi M, Yamamoto K, Sugisaki R, 1986. Hydrothermal chert and associated siliceous rocks from the northern Pacific

their geological significance as indication of ocean ridge activity [J]. *Sedimentary Geology*, 47(1/2): 125-148.

Allègre C J, Minster J F, 1978. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 38(1): 1-25.

Bau M, Dulski P, 1996. Distribution of yttrium and rare-earth elements in the Penge and Kuruman iron-formations, Transvaal Supergroup, South Africa [J]. *Precambrian Research*, 79(1/2): 37-55.

Boström K, Kraemer T, Gartner S, 1973. Provenance and accumulation rates of opaline silica, Al, Ti, Fe, Mn, Cu, Ni and Co in Pacific pelagic sediments [J]. *Chemical Geology*, 11(2): 123-148.

Calvert S E, Pedersen T F, 1996. Sedimentary geochemistry of manganese: implications for the environment of formation of manganese black shales [J]. *Economic Geology*, 91(1): 36-47.

Chen F G, Pufahl P K, Wang Q F, et al, 2022. A new model for the genesis of Carboniferous Mn ores, Longtuo deposit, South China Block [J]. *Economic Geology*, 117(1): 107-125.

Cheng M, Zhang Z H, Hu J, et al, 2025. Reconciling redox proxy contradiction with active Fe-Mn shuttle in the Cryogenian Nanhua Basin of South China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 667: 112899.

Frakes L A, Bolton B R, 1984. Origin of manganese giants: sea-level change and anoxic-oxic history [J]. *Geology*, 12(2): 83-86.

Haas J, 2012. Influence of global, regional, and local factors on the genesis of the Jurassic manganese ore formation in the Transdanubian Range, Hungary [J]. *Ore Geology Reviews*, 47: 77-86.

Johnson J E, Webb S M, Ma C, et al, 2016. Manganese mineralogy and diagenesis in the sedimentary rock record [J]. *Geo-*

- chimica et Cosmochimica Acta, 173: 210-231.
- Jones B, Manning D A C, 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of Palaeoredox conditions in ancient mudstones [J]. *Chemical Geology*, 111 (1/2/3/4): 111-129.
- Kunzendorf H, Stoffers P, Gwozdz R, 1988. Regional variations of REE patterns in sediments from active plate boundaries [J]. *Marine Geology*, 84(3/4): 191-199.
- Li X Y, Wang E J, Wu C Q, et al, 2022. The redox-conditions controlled manganese carbonate mineralization in the Late Paleozoic Qiaerlong deep basin, Western Kunlun Mountains, China [J]. *Ore Geology Reviews*, 147: 104993.
- Liu T B, Maynard J B, Alten J, 2006. Superheavy S isotopes from glacier-associated sediments of the Neoproterozoic of South China: oceanic anoxia or sulfate limitation [M]// *Evolution of early earth's atmosphere, hydrosphere, and biosphere—constraints from ore deposits*. New York: Geological Society of America.
- Maynard J B, 2010. The chemistry of manganese ores through time: a signal of increasing diversity of earth-surface environments [J]. *Economic Geology*, 105(3): 535-552.
- Maynard J B, 2014. Manganiferous sediments, rocks, and ores [C]//Holland H D, Turekian, K K. *Treatise of Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier.
- McLennan S M, 1989. Chapter 7. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes [J]. *Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements*, 21(1): 169-200.
- Otero X L, Ramírez-Pérez A M, Abernathy M, et al, 2024. Manganese diagenesis in different geochemical environments of the ria de Vigo (Galicia, NW Iberian Peninsula) [J]. *Marine Geology*, 470: 107250.
- Polgári M, Gyollai I, Fintor K, et al, 2019. Microbially mediated ore-forming processes and cell mineralization [J]. *Frontiers in Microbiology*, 10: 2731.
- Roy S, 2006. Sedimentary manganese metallogenesis in response to the evolution of the earth system [J]. *Earth-Science Reviews*, 77(4): 273-305.
- Taylor S R, McLennan S M, 1985. The continental crust: its composition and evolution: an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks [M]. Oxford: Blackwell Science, Ltd.
- Wu C Q, Zhang Z W, Xiao J F, et al, 2016. Nanhuan manganese deposits within restricted basins of the southeastern Yangtze Platform, China: constraints from geological and geochemical evidence [J]. *Ore Geology Reviews*, 75: 76-99.
- Xu L G, Mao J W, 2021. Trace element and C-S-Fe geochemistry of Early Cambrian black shales and associated polymetallic Ni-Mo sulfide and vanadium mineralization, South China: implications for paleoceanic redox variation [J]. *Ore Geology Reviews*, 135: 104210.
- Yamamoto K, 1987. Geochemical characteristics and depositional environments of cherts and associated rocks in the Franciscan and Shimanto Terranes [J]. *Sedimentary Geology*, 52(1/2): 65-108.
- Yan H, Pi D H, Jiang S Y, et al, 2022. Mineral paragenesis in Paleozoic manganese ore deposits: depositional versus post-depositional formation processes [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 325: 65-86.
- Yu W C, Polgári M, Gyollai I, et al, 2021. Microbial metallogenesis of early Carboniferous manganese deposit in central Guangxi, South China [J]. *Ore Geology Reviews*, 136: 104251.
- Zhang Z W, Yang X Y, Zhang L C, et al, 2021. Sedimentation and mineralization of the Late Paleozoic extensional basin in the western Kunlun Mountains, China [J]. *Solid Earth Sciences*, 6(2): 142-177.
- 范德廉, 1994. 锰矿床地质地球化学研究 [M]. 北京: 气象出版社. Fan Delian, 1994. *Research on geology and geochemistry of manganese deposits* [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- 冯京, 朱志新, 赵同阳, 等, 2022. 新疆大地构造单元划分及成矿作用 [J]. *中国地质*, 49(4): 1154-1178. Feng Jing, Zhu Zhixin, Zhao Tongyang, et al, 2022. Subdivision of tectonic units and its metallogenesis in Xinjiang [J]. *Geology in China*, 49(4): 1154-1178.
- 付勇, 徐志刚, 裴浩翔, 等, 2014. 中国锰矿成矿规律初探 [J]. *地质学报*, 88(12): 2192-2207. Fu Yong, Xu Zhigang, Pei Haoxiang, et al, 2014. Study on metallogenic regularity of manganese ore deposits in China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2192-2207.
- 侯东壮, 吴湘滨, 李贞, 等, 2015. 贵州省天柱大河边重晶石矿床成矿物质来源 [J]. *中国有色金属学报*, 25(4): 1039-1048. Hou Dongzhuang, Wu Xiangbin, Li Zhen, et al, 2015. Ore-forming material sources of Dahebian barite deposit in Tianzhu County, Guizhou Province, China [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 25(4): 1039-1048.
- 纪冬平, 王朋, 高政伟, 等, 2022. 陕西宁强县中坝锰矿床地球化学特征及成矿模式 [J]. *矿床地质*, 41(3): 469-488.

- Ji Dongping, Wang Peng, Gao Zhengwei, et al, 2022. Geochemical characteristics and metallogenic model of Zhongba manganese deposit in Ningqiang County, Shaanxi, China[J]. *Mineral Deposits*, 41(3): 469-488.
- 柳国良, 王明, 吴启慧, 等, 2022. 西昆仑玛尔坎土锰矿地质特征及矿床成因研究[J]. *中国锰业*, 40(1): 19-26.
- Liu Guoliang, Wang Ming, Wu Qihui, et al, 2022. A study on geological characteristics and genesis of Malkantu manganese deposit, west Kunlun[J]. *China Manganese Industry*, 40(1): 19-26.
- 毛红伟, 2019. 西昆仑北缘主鸟鲁克锰矿床地质特征及成因探讨[J]. *地质找矿论丛*, 34(1): 72-77.
- Mao Hongwei, 2019. The geological characteristics of Zhuwuluke manganese ore deposit in west margin of Kunlun Mountains, Xinjiang[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 34(1): 72-77.
- 孙晓亮, 2020. 新疆阿克陶县肖尔布拉克一带新发现锰矿产地特征[J]. *中国金属通报*, (14): 33-34.
- Sun Xiaoliang, 2020. Origin characteristics of newly discovered manganese ore in Xiaerbulake area, Akto County, Xinjiang[J]. *China Metal Bulletin*, (14): 33-34.
- 覃双苗, 梁声贵, 赵思思, 等, 2022. 电池用硫酸锰产品检测研究进展[J]. *化工管理*, (29): 28-30.
- Qin Shuangmiao, Liang Shenggui, Zhao Sisi, et al, 2022. Research progress in detection of manganese sulfate products for batteries[J]. *Chemical Management*, (29): 28-30.
- 徐林刚, 2020. 沉积型锰矿床的形成及其与古海洋环境的协同演化[J]. *矿床地质*, 39(6): 959-973.
- Xu Lingang, 2020. Sedimentary manganese formation and its link with paleo-oceanic environment[J]. *Mineral Deposits*, 39(6): 959-973.
- 叶敏华, 徐国鹏, 2023. 新一代超高性能非碱性锌—二氧化锰电池的研制[J]. *电池工业*, 27(3): 139-141, 155.
- Ye Minhua, Xu Guopeng, 2023. Development of a new generation ultra-high performance R6P battery[J]. *Chinese Battery Industry*, 27(3): 139-141, 155.
- 查斌, 谢志敏, 2018. 新疆奥尔托喀纳什—穆呼富锰成矿带的发现及意义[J]. *新疆地质*, 36(1): 102-105.
- Zha Bin, Xie Zhimin, 2018. Discovery and significance of Aoertokanashi-Muhu rich-manganese ore belt in Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 36(1): 102-105.
- 张帮禄, 张连昌, 冯京, 等, 2018. 西昆仑玛尔坎苏地区奥尔托喀纳什大型碳酸锰矿床地质特征及成因探讨[J]. *地质论评*, 64(2): 361-377.
- Zhang Banglu, Zhang Lianchang, Feng Jing, et al, 2018. Genesis of the large-scale Orto Karnash manganese carbonate deposit in the Malkansu district, western Kunlun: evidence from geological features[J]. *Geological Review*, 64(2): 361-377.
- 张连昌, 张帮禄, 董志国, 等, 2020. 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)*, 50(5): 1340-1357.
- Zhang Lianchang, Zhang Banglu, Dong Zhiguo, et al, 2020. Tectonic setting and metallogenic conditions of Carboniferous Malkansu giant manganese belt in West Kunlun Orogen[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 50(5): 1340-1357.

Mineralogy, Geochemical Characteristics and Geological Significance of the Xiaerbulake Manganese Deposit in Aketao Area, Xinjiang

SUN Xiaoliang^{1,2}, LIU Xiao¹, HUA Lei², ZHANG Xia², LI Haoran², ZOU Zhanchun², XING Honglian², TANG Mingying², WU Hongbin², ZHENG Chenglong², JIA Ru³

1. School of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, Shandong, China;

2.No.8 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Key Laboratory of Non-ferrous Metal Ore Exploration and Resource Evaluation of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Rizhao 276800, Shandong, China;

3.Shandong Huanghai Geological Engineering Ltd., Co., Rizhao 276800, Shandong, China

Abstract: The manganese deposits in China are predominantly of sedimentary type, having formed from the Middle Proterozoic to the Neoproterozoic, the Late Paleozoic, and the early Mesozoic eras. These deposits are

chiefly located in South China, with the “Datangpo-type” manganese deposit serving as the most representative example. In recent years, notable advancements have been achieved in the study of marine sedimentary carbonate-type manganese deposits within the Carboniferous sedimentary rock series in western China. Several medium to large manganese deposits, including the Aoertuokanashi, Muhu, and Maerkantu deposits, have been discovered in succession. The Xiaerbulake manganese deposit, which is the focus of this study, is a newly identified deposit, situated in the Aketao area of Xinjiang Province. This deposit formed at the margin of a continental rift basin, exemplified by Qiaerlong, and is found within the stratified gray-black manganese-mineralized, pyrite-bearing argillaceous limestone of the Lower Carboniferous Talong Group. The deposit is primarily characterized by the presence of three manganese-rich minerals: rhodochrosite, manganocalcite, and kutnohorite. To comprehensively examine the sources of ore-forming materials and the formation environment of the Xiaerbulake manganese deposit, a series of petrographic, mineralogical, and lithochemical analyses were undertaken. The lithochemical data reveal that in comparison to the surrounding rocks, the manganese ore is characterized by titanium depletion and low $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios, indicative of high-iron, medium-phosphorus, low-grade manganese ore. Trace elements such as Rb, Ta, and Hf are relatively deficient, whereas Th, Sm, and Y are enriched. The distribution of rare earth elements (REE) shows a pattern of light REE depletion and high REE enrichment, marked by a weakly negative Ce anomaly, a positive Eu anomaly, and a positive Y anomaly, suggesting that the manganese deposit originated from submarine hydrothermal venting. Environmental discrimination analysis indicates that the Y/Ho ratio of the manganese ore aligns with values typical of Phanerozoic limestone; additionally, the Sr-Ba ratio, the weakly negative Ce anomaly, and the positive Y anomaly imply that manganese mineralization occurred in a brackish to hypersaline, relatively oxidized depositional environment. The mechanism of mineralization can be described as follows: during the late Paleozoic era, Fe-Mn-enriched polymetallic submarine hydrothermal fluids interacted with seawater. This interaction led to the preferential accumulation of Mn^{2+} and Fe^{2+} ions as mixed (Mn, Fe) - (oxy) hydroxide complexes within redox transition zones characterized by relatively oxygen-deficient, reducing, and mildly alkaline to acidic conditions. These complexes subsequently underwent diagenetic transformation through reactions with carbonate ions, resulting in the formation of manganese carbonate assemblages predominantly composed of rhodochrosite. These assemblages were then transported to favorable sedimentary depressions, where they co-precipitated with carbonate sediments, ultimately leading to the formation of the Xiaerbulake manganese deposit.

Key words: geochemistry; mineralogy; Talong Group; rhodochrosite; Xiaerbulake manganese deposit; Aketao area; Xinjiang