

Rodinia 超大陆裂解、Sturtian 冰期事件和扬子地块东南缘大规模锰成矿作用

杜远生¹, 周琦², 余文超¹, 王萍¹, 袁良军³, 齐靓¹, 郭华¹, 徐源¹

(1. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 武汉 430074; 2. 贵州省地质矿产勘查开发局, 贵阳 550003;
3. 贵州省地质矿产勘查开发局 103 地质大队, 贵州 铜仁 554300)

摘要: 扬子地块东南缘是我国南华纪“大塘坡式”沉积型锰矿的重要富集区, 南华纪大规模锰矿成矿作用与 Rodinia 超大陆裂解形成的裂谷盆地、Sturtian 冰期一间冰期的气候事件具有密切关系。南华纪裂谷盆地呈北东东向展布, 可分为地垒、地堑和次级地垒、地堑, 锰矿主要形成于裂谷盆地的地堑区的次级地堑中。Sturtian 冰期之后, 冰后期经历了小冰期和小间冰期的气候波动, 锰矿受这种气候波动影响, 推测小冰期的富氧的寒冷海水受温度—密度环流影响进入海底, 促使原生氧化锰矿的形成, 之后准同生交代形成菱锰矿。冰期(或小冰期)海底的天然水合物在冰后期(小间冰期)的泄漏促使了菱锰矿的形成。因此华南扬子地块东南缘大规模锰矿成矿作用受原型裂谷盆地和冰期—冰后期气候波动的双重影响。

关键词: 扬子陆块; 南华纪; 锰矿; 裂谷盆地; Rodinia 超大陆; Sturtian 冰期

中图分类号: P618.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-7849(2015)06-0001-07

华南扬子陆块东南缘是我国南华纪锰矿的重要富集区, 包括湘西地区古城锰矿、湘中地区湘潭锰矿、湘西地区花垣民乐锰矿、渝南地区秀山(小茶园、笔架山)锰矿、黔东松桃(李家湾一道坨、西溪堡等)锰矿、黔东南(黎平一带)锰矿等, 其中贵州松桃、重庆秀山为国家级锰矿整装勘查区, 目前发现超大型锰矿床 1 个和大型锰矿床多个, 取得了找矿战略突破行动以来最大的找矿突破。

对南华纪“大塘坡式”锰矿研究由来已久, 但对许多与成矿有关的科学问题仍然存在不同认识乃至争论。虽然绝大部分学者都认为锰矿形成于南华裂谷背景, 但对裂谷盆地的展布、内部结构(地垒、地堑)及其对锰矿控制的细节研究欠缺。关于锰质来源也有陆源风化说^[1-2]、火山说^[3-4]、热液说^[5-7]等不同认识。对锰矿的成矿作用存在化学沉积成因^[3]、生物成因^[3,8]、火山—沉积成因^[4]、热液沉积成因^[6,8]、古天然气泄漏成矿^[9-13]、盖帽碳酸盐成因^[7]等不同认识, 对冰期一间冰期气候变化过程及其与成矿的关系研究更少。

扬子陆块东南缘南华纪大规模锰矿成矿作用、Rodinia 超大陆裂解、Sturtian 冰期一间冰期转换是新元古代 3 个重大的地质事件, 这三大事件是巧合还是耦合, 是认识南华纪锰矿的关键科学问题, 本文

试图对 Rodinia 超大陆裂解、Sturtian 冰期一间冰期转换对南华纪大规模锰矿成矿的控制作用进行探讨。

1 Rodinia 超大陆裂解及华南原型裂谷盆地对锰矿的控制作用

虽然对华南在 Rodinia 超大陆中的位置^[14-15]和裂陷作用性质及其与 Rodinia 超大陆裂解的关系^[16-18]存在不同认识, 但多数学者都认为中新元古代时期华南位于 Rodinia 超大陆北缘, 大致于 820 Ma 之后发生显著的裂陷作用, 并形成新元古代—古生代的华南裂谷系^[17,19-20]。越来越多的研究表明华南南华纪大型超大型锰矿的产出与裂陷构造背景紧密相关, 大型超大型锰矿常沿裂谷盆地或深大断裂呈长条状分布^[21-22]。因此恢复扬子地块东南缘裂谷盆地结构对认识南华纪锰矿的时空展布十分必要。

在 820 Ma 左右, 扬子陆块与华夏陆块沿江南造山带碰撞拼合形成华南板块^[23-25]。之后, 在上扬子陆块东南缘又发生了多次幕式裂陷过程, 并呈裂谷盆地向东南逐渐扩展、迁移的趋势。在江南构造带西段(湘西、黔东、桂北)第一次裂陷发生于青白口纪(800 Ma 左右), 这次裂陷大致沿江南构造带展

收稿日期: 2015-03-11

编辑: 杨勇

基金项目: 中国地质调查局项目(12120114016701); 国土资源部公益性行业科研专项(201411051)

作者简介: 杜远生(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事沉积地质学研究工作。E-mail: duyuanheng126@126.com

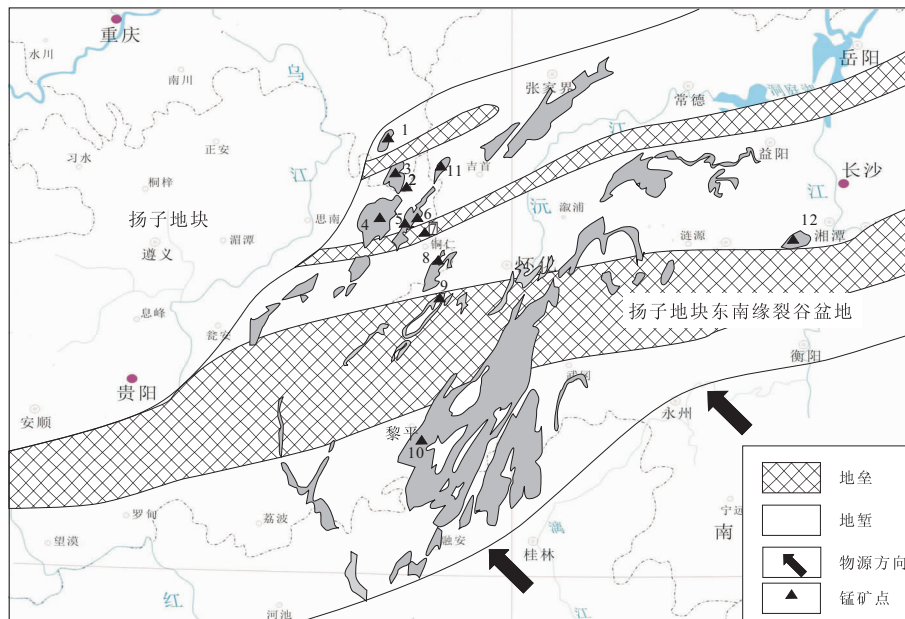
布,并形成板溪群(湘西)、下江群(黔东)、丹洲群(桂北)一系列深水沉积组合和火山岩及凝灰岩沉积。第二次裂陷发生于南华纪(725 Ma 左右)^[26],裂陷大致沿湘黔边界一带分布,形成以大塘坡组暗色泥质岩为特色的深水沉积。受裂陷作用控制,扬子地块东南陆缘西段的湘黔桂地区形成北东东向平行排列的堑—垒构造并控制锰矿的展布。第三次裂陷发生于震旦纪(635 Ma 左右),裂陷大致沿江南构造带东侧分布,形成震旦纪—奥陶纪的深水硅质泥质岩。扬子地块东南缘自青白口纪开始的裂陷一直持续到早古生代。寒武纪末随着右江南北向挤压和郁南运动,中上扬子南缘开始进入汇聚隆升阶段,之后又经历了奥陶纪末的都匀运动和志留纪的广西运动,最终经区域变形和整体抬升,形成华南大规模的陆内造山。上扬子南缘的多期裂解事件不仅控制了成锰盆地的构造背景和沉积场所,同时也为成锰盆地提供了大型锰矿伴生的热液流体^[27],形成了占我国锰矿储量 28% 的“大塘坡式”锰矿。

南华纪“大塘坡式”锰矿分布于渝南秀山、黔东松桃—黔东南、湘西花垣一带,为南华纪裂谷盆地沉积。在南华纪裂谷盆地中,可以分为秀山地堑、松桃地堑、黔东南地堑,地堑之间为地垒(图 1,2)。其中在松桃地堑盆地中,由于次级断裂发育,形成了一系列的次级地堑和地垒。地堑区是锰矿床富集的主要地区,而每一个次级地堑就是一个成锰小盆地。

虽然现在地表南华系展布方向是北东向,但南

华裂谷的展布方向为北东东向。北东向的构造线是燕山运动的构造线。华南南华系一下古生界的构造线总体呈近东西向展布,这在桂西、桂东南、湘南、湘中地区都有明显显示^[28]，“黔中古陆”也是呈近东西向的^[29],反映华南的加里东运动(郁南运动、都匀运动、广西运动等)^[28]总体为南北向挤压,也暗示加里东期(南华纪—志留纪)的沉积盆地显示为近东西向。这种北东向裂谷盆地的展布在黔东松桃地区锰矿整装勘查中得到证明。需要讨论的是,图 1 中的北东东向裂谷盆地与“江南隆起”的展布方向并不一致。首先现在地表出露的新元古代基底地层不一定是新元古代形成的“江南造山带”的全部,“江南造山带”延伸方向与基底地层出露的方向并不一致。同时,燕山期一系列的北北东方向的走滑断裂(郯庐断裂带在江南的分支状延伸)破坏了“江南造山带”的原始展布。再者“江南造山带”向两侧的逆冲推覆使基底地层的出露向外延伸(如“江南隆起”西段南端)。当然也有可能是原始裂谷盆地的方向与造山带方向本身不一致,正如吴根耀等^[16,30]认为是碰撞造山带地区因岩石圈的拆沉作用而发育的与造山带高角度相交的裂谷盆地,称为坍塌裂谷(collapse rift)或碰撞谷(impactogen)。

对研究区由北向南横跨盆地的 10 个典型剖面的地层对比分析及盆地复原结果表明(图 2),扬子地块东南缘裂谷盆地可划分出秀山—甘龙地垒、铜仁—镇远地垒与凯里—天柱地垒 3 个次级地垒,分



1. 重庆秀山小茶园锰矿; 2. 重庆秀山盐井沟剖面; 3. 重庆秀山笔架山锰矿; 4. 贵州松桃道坨锰矿; 5. 贵州松桃两界河锰矿; 6. 贵州松桃西溪堡锰矿; 7. 贵州江口桃映剖面; 8. 贵州铜仁万山石竹溪锰矿床; 9. 贵州新晃板桥剖面; 10. 贵州从江八当锰矿点; 11. 湖南花垣民乐锰矿; 12. 湖南湘潭锰矿床

图 1 扬子地块东南缘裂谷盆地及主要锰矿(剖面)分布图

Fig. 1 Distribution of rift basin and main Mn deposit in the southeast margin of Yangtze Block

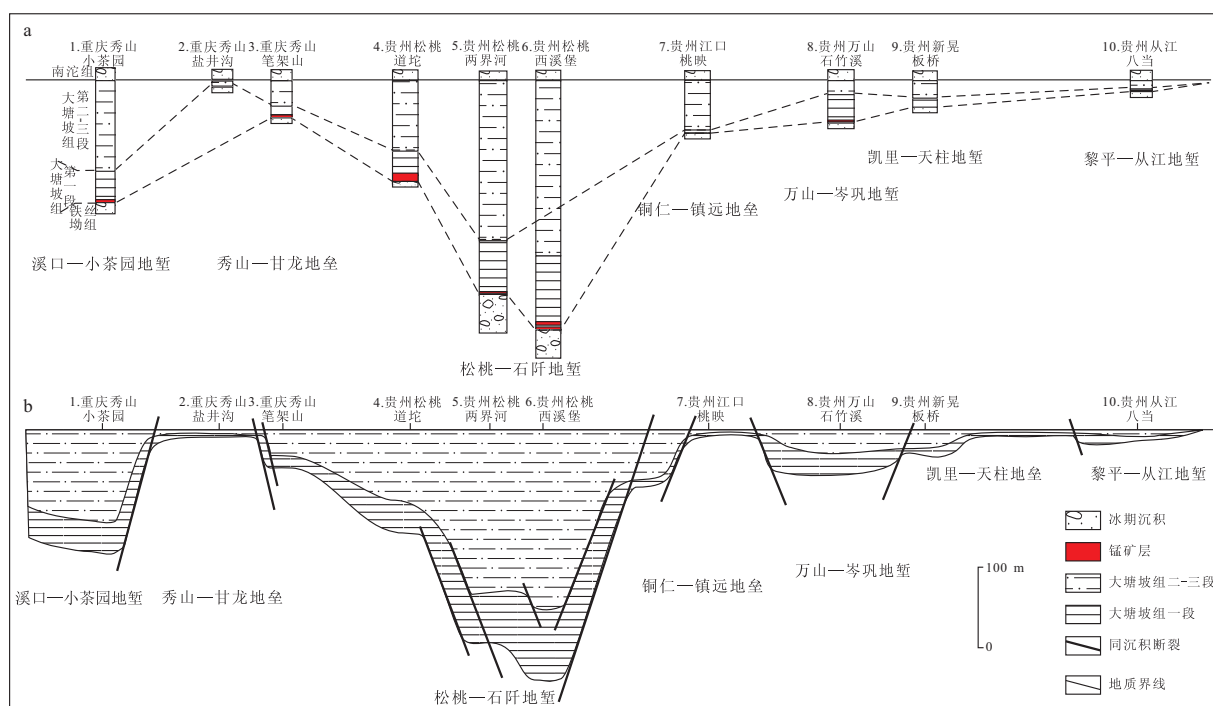


图2 扬子地块东南缘裂谷盆地大塘坡组柱状对比图(a)和盆地复原图(b)(横向未按比例尺;剖面位置见图1)

Fig. 2 Stratigraphic correlation columns of the Datangpo Formation (a) and the restored cross section of the basin (b)

别以重庆秀山盐井沟剖面、贵州江口桃映剖面及贵州新晃板桥剖面为代表。这些剖面的大塘坡组地层存在类似特征,大塘坡组总厚度一般在50~150 m间变化,大塘坡组一段黑色页岩普遍缺失或仅数十厘米,其中基本不含锰矿沉积。地堑区与地堑区呈间隔分布,主要有溪口—小茶园次级地堑盆地、松桃—石阡次级地堑盆地、万山—岑巩次级地堑盆地及黎平—从江次级地堑盆地。在地堑盆地区域内,由盆地边缘向盆地中心,大塘坡组厚度逐渐增加。以松桃—石阡次级地堑盆地为例,在位于盆地北缘的重庆笔架山剖面中,大塘坡组总厚度为102 m,其中大塘坡组一段厚度为16.7 m并赋存厚约3 m的锰矿沉积,而在位于盆地中心区域的贵州松桃西溪堡剖面,大塘坡组总厚度增至663 m,第一段厚度也增至约100 m,在底部发育2层锰矿沉积。当继续向南,大塘坡组厚度持续减少,最后进入到铜仁—镇远地堑区后,大塘坡组总厚度减小至约152 m,第一段及锰矿沉积完全消失。由此可见,在扬子地块东南缘裂谷盆地中次级地堑与次级地堑盆地中存在显著的沉积分异现象。此外,地堑、地堑相区的剖面具有突变特征,意味着控制裂谷盆地结构的同沉积断裂存在。

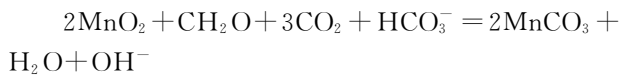
2 Sturtian 冰期气候事件和大锰库形成

新元古代晚期全球范围内至少发生了2次大规

模的“冰川事件”(glaciation),这2次全球性的冰川事件分别发生在约720 Ma(Sturtian冰期)和约600 Ma(Marinoan冰期)^[31-32]。大规模的冰川事件致使地球成为一个被冰冻雪封的星球,一些学者将其称之为“雪球地球”(snowball Earth)^[33-36]。前人^[37-38]通过气候和冰川模型对新元古代“雪球”的数值模拟认为在冰期时期地球表层平均温度在-40℃左右,最低可至-110℃,这一时期冰层的平均厚度为1 000 m,最厚处可以达到5 000 m。由于巨大的冰盖封闭海水,海洋呈现不分层特征,既海水处于强还原环境,锰离子长期聚集在还原的海水中形成巨大锰库和大量的天然气水合物^[39-40]。冰期之后,天然气水合物泄漏释放,形成超高的CO₂浓度,液态水的低反射率的反馈作用导致温室效应,全球范围内从“雪球”气候过渡为温室状态。冰期封闭、不分层的还原海水变成富氧—贫氧—缺氧的海水分层,在弱氧化—弱还原的氧化还原条件下锰矿开始沉积。“雪球地球”前后的极端气候环境变化,不仅促进了新元古代末期真核生物的进化与辐射,并最终引发了后生动物在海洋中的发展与繁衍^[41-42]。发生在新元古代晚期的全球性的冷暖交替、地球层圈的物质交换、海洋生物圈的兴衰演替、古海洋化学条件的变化,特别是大气CO₂循环的改变,对大规模的锰矿成矿作用具有明显的制约作用。

3 Sturtian 冰后期的气候变化和大规模锰成矿作用

锰的化学性质决定其在氧化环境中以氧化物的形式沉淀,而在还原环境中则以+2价离子形式溶解于水体中。因此盆地内水体的氧化还原条件是控制锰矿沉积过程的最重要因素。一般认为,水体分层的海相盆地有利于锰质成矿,锰质在盆地下部的缺氧水体中溶解储存,而在盆地氧化还原界面位置沉淀。大部分在表层氧化水体中沉淀的锰氧化物颗粒由于重新进入到还原水体中而被溶解,只有处于氧化还原界面之上的海床才能沉积氧化锰矿物^[43-49]。当锰的氧化物进入沉积物后,在早期成岩作用阶段可以与沉积物中的重碳酸根或有机质(包括天然气水合物)发生反应而形成锰碳酸盐,反应中的CO₂来源于硫酸根还原过程,锰氧化物的还原过程或甲烷的氧化过程的化学反应过程可示意性地表示为:



长期以来,扬子地块东南缘南华纪大塘坡组及其赋存的“大塘坡式”锰矿都被认为是Sturtian冰期和Marinoan冰期之间的间冰期沉积,具有明显的温暖气候标志。大塘坡组第一段以黑色炭质页岩和含锰碳酸盐岩为特征,在部分剖面可见含锰岩系底部夹有2层单层厚度为20 cm的砾岩层,与下伏大塘坡组炭质页岩及上覆菱锰矿均为整合接触,这套砾岩可能为陆上冰川溶解后形成的冰碛物碎屑流沉积。而最近针对该组地层,特别是含锰层位的CIA值分析表明,在大塘坡组底部含锰岩系中的炭质页岩及含锰炭质页岩出现明显的CIA值的波动。这些证据表明,在Sturtian结束时,由冰期向间冰期的气候转换是渐变而不是突变的,即转换期(大塘坡组底部层位)存在小冰期—小间冰期旋回^[50]。这种在冰期向间冰期转化的持续升温过程中出现短暂寒冷事件的现象并非孤例,在更新世末次冰川结束时所发生的新仙女木事件(the Younger Dryas)即是该类型事件的典型代表^[51-52]。虽然目前对于导致新仙女木事件发生的初始诱发因素存在争议,但大部分研究者均将大洋温盐环流的改变视为该事件的重要诱因——陆上冰川的溶解使大量冰冷的淡水涌入海洋,导致海水温度与密度下降,由此引发一系列大气

圈与水圈的连锁反应,最终导致气候在短时间内变冷^[53-55]。由此可见,温盐环流系统与全球气候条件存在关联,与此同时,温盐环流系统对于改变海底水体氧含量具有重要意义。当表面洋流在高纬度地区被冷却重新下沉到海底后,这些高密度的富氧水体接着流入洋盆并导致洋盆底部形成氧化环境。这种周期性的海底氧化事件会形成大洋红层这种特殊的沉积物^[56-57],也会控制水体中锰元素的地球化学行为,如现代大洋中铁锰结核的形成即与之密切相关^[58]。在那些局限的洋盆中,水体氧化还原条件的变化为成规模的锰矿沉积的形成提供了条件。例如,现代波罗地海Gotland盆地在正常情况下处于表层氧化、中部缺氧、底层硫化的海水分层状态,盆地内底层海水中溶解大量Mn²⁺。但在氧化还原界面之下的盆地中心,深海沉积物中仍存在大量菱锰矿沉积。这与富氧冰冷的北海海水季节性注入波罗地海,由此造成的底层海水氧化事件有关。当氧化的外来海水注入盆地后,由于其温度低、密度大,会迅速下沉到盆地底部,将Mn²⁺氧化并形成MnO₂沉淀,当底层海水中的溶解氧消耗殆尽后,沉积物中的MnO₂逐渐被成岩作用改造为锰碳酸盐^[59-60]。

最近针对大塘坡组的铁组分研究表明,大塘坡组第一段黑色页岩段总体呈现贫氧—缺氧的氧化还原条件,向上至二、三段氧化程度逐渐增强^[61]。但是,大塘坡组一段的氧化还原条件并非一成不变,而是经历过至少3次氧化事件^[62]。此外,位于大塘坡组底部的锰矿石样品的氧化还原敏感元素及铁同位素证据也显示锰矿沉淀于弱氧化环境^[1-2]。结合前文所述CIA值所反映的古气候变化,我们推测这种盆地水体氧化还原条件的变化很可能与古气候变化所带来的温盐环流改变有关:在冰封期,陆地被大陆冰川覆盖,海面为冰层覆盖,盆地水体与陆地之间的物质交换被切断,缺氧水体中溶解大量锰离子及天然气水合物(图3-A)。当主冰期结束之后,海面冰层及陆上冰川融化,冰川溶解形成大量富氧低温的高密度淡水及碎屑密度流进入盆地并下沉至盆地底部,而之后的寒冷事件也可能导致表面富氧的海水温度降低因而下沉。上述过程均可能导致盆地下部水体发生暂时性氧化事件,大量溶解态的Mn²⁺离子因此被氧化为氧化锰而进入沉积物中,与沉积物中的有机质反应形成锰碳酸盐矿物,并最终形成菱锰矿沉积(图3-B)。

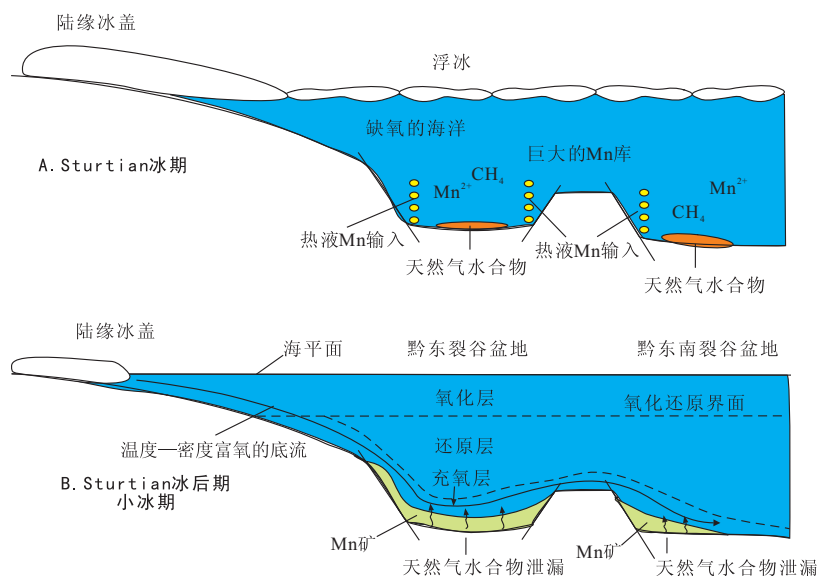


图3 扬子地块东南缘南华纪锰矿形成模式图

Fig. 3 Model of Mn deposit forming process in southeast margin of Yangtze Block

4 结 论

(1) 扬子地块东南缘裂谷盆地结构对控制南华纪锰矿的时空展布具有重要意义。原型裂谷盆地的展布方向为北北东向,其西段的湘黔桂地区在南华纪形成一系列平行排列的地垒—地堑,并控制锰矿的展布。地堑区内可进一步划分出次级地垒与次级地堑构造,锰矿沉积主要形成于裂谷盆地地堑区的次级地堑中。

(2) 在 Sturtian 冰期时期,由于海面冰层存在,大陆与海洋之间的物质交换被切断,南华裂谷盆地中水体呈现还原性特征,沉积物中形成天然气水合物,海水中溶解大量 Mn^{2+} ,形成巨大的锰库。在 Sturtian 冰期结束向间冰期转换过程中,可能尚存在短暂的寒冷事件,由此形成的富氧寒冷海水受温盐环流影响进入海底,引发海底氧化事件,促使原生氧化锰矿形成,这些锰的氧化物及氢氧化物进入沉积物后与有机质反应而生成菱锰矿。

参考文献:

- [1] 张飞飞,彭乾云,朱祥坤,等. 湖北古城锰矿 Fe 同位素特征及其古环境意义[J]. 地质学报, 2013, 87(9): 1411-1418.
- [2] 张飞飞,闫斌,郭跃玲,等. 湖北古城锰矿的沉淀形式及其古环境意义[J]. 地质学报, 2013, 87(2): 245-258.
- [3] 刘巽锋,胡肇荣,曾励训,等. 贵州震旦纪锰矿沉积相特征及其成因探讨[J]. 沉积学报, 1983, 1(4): 106-116, 138-139.
- [4] 杨绍祥,劳可通. 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, 2006, 26(2): 72-80.
- [5] 王砚耕. 一个浅海裂谷盆地的古老热水沉积锰矿:以武陵山震旦纪锰矿为例[J]. 岩相古地理, 1990, 10(1): 38-45.

- [6] 陈多福,陈先沛. 贵州省松桃热水沉积锰矿的地质地球化学特征[J]. 沉积学报, 1992, 10(4): 35-43.
- [7] 杨瑞东,欧阳自远,朱立军,等. 早震旦世大塘坡期锰矿成因新认识[J]. 矿物学报, 2002, 22(4): 329-334.
- [8] 刘巽锋,王庆生,高兴基. 贵州锰矿地质[M]. 贵阳:贵州人民出版社, 1989: 12-56.
- [9] 周琦,陈建华,张命桥,等. 冷泉碳酸盐岩研究进展及成矿意义[J]. 贵州科学, 2007, 25(增刊 1): 103-110.
- [10] 周琦,杜远生,王家生,等. 黔东北地区南华系大塘坡组冷泉碳酸盐岩及其意义[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 2007, 32(3): 339-346.
- [11] 周琦,杜远生,颜佳新,等. 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, 2007, 32(6): 845-852.
- [12] 周琦,杜远生. 古天然气渗漏与锰矿成矿[M]. 北京:地质出版社, 2012: 1-90.
- [13] 周琦,杜远生,覃英. 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, 2013, 32(3): 457-466.
- [14] 陆松年. 初论“泛华夏造山作用”与加里东和泛非造山作用的对比[J]. 地质通报, 2004, 23(9): 952-958.
- [15] 郑永飞. 新元古代岩浆活动与全球变化[J]. 科学通报, 2004, 48(16): 1705-1720.
- [16] 吴根耀. 华南的格林威尔造山带及其坍塌:在罗迪尼亚超大陆演化中的意义[J]. 大地构造与成矿学, 2000, 24(2): 112-123.
- [17] 李献华,王选策,李武显,等. 华南新元古代玄武质岩石成因与构造意义:从造山运动到陆内裂谷[J]. 地球化学, 2008, 37(4): 382-398.
- [18] 周金城,王孝磊,邱检生. 江南造山带是否格林威尔期造山带?: 关于华南前寒武纪地质的几个问题[J]. 高校地质学报, 2008, 14(1): 64-72.
- [19] 王剑,潘桂棠. 华南新元古代裂谷盆地演化:Rodinia 超大陆解体的前奏[J]. 矿物岩石, 2001, 21(3): 135-145.
- [20] 王孝磊,周金城,邱检生,等. 湘东北新元古代强过铝花岗岩的

- 成因:年代学和地球化学证据[J].地质论评,2004,50(1):65-76.
- [21] 黄世坤,林琦.锰成矿作用的新认识:兼论中国锰矿[J].地质与勘探,1992,28(4):4-10,29.
- [22] 杨瑞东,魏怀瑞,许利群,等.贵州从江高增新元古代大塘坡组锰矿沉积地球化学特征[J].地质学报,2010,29(增刊6):395-396.
- [23] 徐备.华南元古代地质研究进展述评[J].地质科技情报,1989,8(1):1-8.
- [24] Charvet J, Shu L S, Shi Y S, et al. The building of South China: Collision of Yangzi and Cathaysia blocks, problems and tentative answers[J]. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 1996, 13(3): 223-235.
- [25] Wang X L, Zhou J C, Qiu J S, et al. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of the Neoproterozoic igneous rocks from Northern Guangxi, South China: Implications for tectonic evolution[J]. Precambrian Research, 2006, 145(1/2): 111-130.
- [26] Zhang Q R, Li X H, Feng L J, et al. A new age constraint on the onset of the Neoproterozoic glaciations in the Yangtze Platform, South China[J]. The Journal of Geology, 2008, 116(4): 423-429.
- [27] 王砚耕,梵净山区格林威尔期造山带与 Rodinia 超大陆[J].贵州地质,2001,18(4):211-216.
- [28] 杜远生,徐亚军.华南加里东运动初探[J].地质科技情报,2012,31(5):43-49.
- [29] 何熙琦,肖加飞,王尚彦,等.黔中隆起研究[J].贵州地质,2005,22(2):83-89.
- [30] 吴根耀,符鹤琴,汤加富.赣东北地区晚元古代登山群火山岩的特点及其形成的大地构造背景[J].岩石学报,1998,14(2):240-250.
- [31] Evans D A D. Stratigraphic, geochronological, and paleomagnetic constraints upon the Neoproterozoic climatic paradox[J]. American Journal of Science, 2000, 300(5): 347-433.
- [32] Lund K, Aleinikoff J N, Evans K V, et al. SHRIMP U-Pb geochronology of Neoproterozoic Windermere Supergroup, central Idaho: Implications for rifting of western Laurentia and synchronicity of Sturtian glacial deposits[J]. Geological Society of America Bulletin, 2003, 115(3): 349-372.
- [33] Hoffman P F, Kaufman A J, Halverson G P, et al. A Neoproterozoic snowball earth[J]. Science, 1998, 281: 1342-1346.
- [34] Kilner B, Niocaill C M, Brasier M. Low-latitude glaciation in the Neoproterozoic of Oman[J]. Geology, 2005, 33(5): 413-416.
- [35] 胡永云,闻新宇.冰雪地球的研究进展综述[J].地球科学进展,2005,20(11):1226-1233.
- [36] Harland W B. Origins and assessment of snowball Earth hypotheses[J]. Geological Magazine, 2007, 144(4): 633-642.
- [37] Hyde W T, Crowley T J, Baum S K, et al. Neoproterozoic "snowball Earth" simulations with a coupled climate/ice-sheet model[J]. Nature, 2000, 405: 425-429.
- [38] Poulsen C J, Pierrehumbert R T, Jacob R L. Impact of ocean dynamics on the simulation of the Neoproterozoic "snowball Earth"[J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(8): 1575-1578.
- [39] Hurtgen M T, Arthur M A, Suits N S, et al. The sulfur isotopic composition of Neoproterozoic seawater sulfate: Implications for a snowball Earth? [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 203(1): 413-429.
- [40] 蒋干清,史晓颖,张世红.甲烷渗漏构造,水合物分解释放与新元古代冰后期盖帽碳酸盐岩[J].科学通报,2006,51(10):1121-1138.
- [41] 张同钢,储雪蕾,陈孟莪,等.新元古代全球冰川事件对早期生物演化的影响[J].地学前缘,2002,9(3):49-56.
- [42] 储雪蕾.新元古代的“雪球地球”[J].矿物岩石地球化学通报,2004,23(3):233-238.
- [43] Force E R, Cannon W F. Depositional model for shallow-marine manganese deposits around black shale basins[J]. Economic Geology, 1988, 83(1): 93-117.
- [44] Nicholson K. Contrasting mineralogical-geochemical signatures of manganese oxides: guides to metallogenesis[J]. Economic Geology, 1992, 87(5): 1253-1264.
- [45] Roy S. Environments and processes of manganese deposition [J]. Economic Geology, 1992, 87(5): 1218-1236.
- [46] Calvert S E, Pedersen T F. Sedimentary geochemistry of manganese: implications for the environment of formation of manganese-rich black shales[J]. Economic Geology, 1996, 91(1): 36-47.
- [47] Huckriede H, Meischner D. Origin and environment of manganese-rich sediments within black-shale basins[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60(8): 1399-1413.
- [48] Maynard J B. Manganiferous sediments, rocks, and ores[J]. Treatise on Geochemistry, 2003, 7: 289-308.
- [49] Roy S. Sedimentary manganese metallogenesis in response to the evolution of the Earth system[J]. Earth-Science Reviews, 2006, 77(4): 273-305.
- [50] 齐靓,余文超,杜远生,等.黔东南华纪铁丝垌组一大塘坡组古气候的演变:来自 CIA 的证据[J].地质科技情报,2015,34(6):47-57.
- [51] Taylor K C, Lamorey G W, Doyle G A, et al. The "flickering switch" of late Pleistocene climate change[J]. Nature, 1993, 361: 432-436.
- [52] Carlson A E. What caused the Younger Dryas cold event? [J]. Geology, 2010, 38(4): 383-384.
- [53] Tarasov L, Peltier W R. Arctic freshwater forcing of the Younger Dryas cold reversal[J]. Nature, 2005, 435: 662-665.
- [54] Broecker W S. Was the Younger Dryas triggered by a flood? [J]. Science, 2006, 312: 1146-1148.
- [55] Condron A, Winsor P. Meltwater routing and the Younger Dryas[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012, 109(49): 19928-19933.
- [56] 胡修梯,王成善.白垩纪大洋红层:特征、分布与成因[J].高校地质学报,2007,13(1):1-13.
- [57] 胡修梯.显生宙海相红层的分布、类型与成因机制[J].矿物岩石地球化学通报,2013,32(3):335-342.
- [58] Glasby G. Manganese: Predominant role of nodules and crusts [C]//Schulz H, Zabel M. Marine geochemistry. Berlin: Springer, 2006: 371-427.
- [59] Burke I T, Kemp A E S. Microfabric analysis of Mn-carbonate laminae deposition and Mn-sulfide formation in the Gotland Deep, Baltic Sea[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2002, 66(9): 1589-1600.
- [60] 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.

[61] Li C, Love G D, Lyons T W, et al. A stratified redox model for the Ediacaran ocean[J]. Science, 2010, 328: 80-83.

[62] Feng L J, Chu X L, Huang J, et al. Reconstruction of paleo-red-

ox conditions and early sulfur cycling during deposition of the Cryogenian Datangpo Formation in South China[J]. Gondwana Research, 2010, 18(4): 632-637.

Linking the Cryogenian Manganese Metallogenic Process in the Southeast Margin of Yangtze Block to Break-up of Rodinia Supercontinent and Sturtian Glaciation

Du Yuansheng¹, Zhou Qi², Yu Wenchao¹, Wang Ping¹,
Yuan Liangjun³, Qi Liang¹, Guo Hua¹, Xu Yuan¹

(1. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Guiyang 550003, China; 3. No. 103 Geological Team, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Tongren Guizhou 554300, China)

Abstract: The metallogenic process of Cryogenian Datangpo-type manganese deposit in the southeast margin of Yangtze Block is closely related to the development of Nanhua Rift Basin and Sturtian glaciations interglaciation. Accompanying with the break-up of Rodinia supercontinent, the Nanhua Rift Basin distributed in NEE trend, it can be divided into graben and horst and each graben can be further divided into subgraben and subhorst. The manganese deposit formed in the subgrabens within the graben area. After the Sturtian glaciation, cold events disturbed the warming process and both cold and oxidized freshwater came from the melted glacier. Cold and oxidized seawater generated from cold events could lead to the oxidation of the bottom water in the basin. Dissolved Mn^{2+} in the bottom water was then oxidized to Mn oxides and hydroxides and precipitated into the sediments. In early diagenesis stage, the organic materials reacted with Mn oxides and hydroxides and formed rhodochrosite. We suggest that methane leaking in post-glaciation accelerated this metallogenic process. The Mn metallogenic process in the Southeast margin of Yangtze Block is controlled by the original rift basin structure and paleoclimatic fluctuations in Sturtian glaciation and post-glaciation.

Key words: Yangtze Block; Cryogenian; manganese deposit; rift basin; Rodinia supercontinent; Sturtian glaciation