

黔东南及毗邻区南华纪“大塘坡式”锰矿研究历史、主要进展及展望

周 琦¹, 杜远生², 袁良军³, 张 遂³, 余文超², 谢小峰^{2,3}, 杨炳南^{2,3}
(1. 贵州省地质矿产勘查开发局, 贵州 贵阳 550004; 2. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北 武汉 430074;
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] 锰矿是国家战略紧缺矿产。自上世纪 1958 年在黔东南松桃大塘坡地区发现“大塘坡式”锰矿以来, 经过三代地质科技工作者的不懈努力, 终于在锰矿成矿理论、找矿方法和找矿成果等方面取得重大突破, 使黔东南地区成为新的世界级锰矿资源富集区和中国锰矿资源最丰富的地区。为纪念“大塘坡式”锰矿发现 60 周年, 特撰文介绍该地区锰矿的主要研究历史、研究现状和近年来该类型锰矿主要研究进展与找矿突破性成果, 同时展望未来, 提出下步工作建议。
谨以此文向为黔东南及毗邻区南华纪“大塘坡式”锰矿找矿事业做出突出贡献的老一辈地质工作者表示崇高的敬意!
[关键词] 锰矿; 研究历史; 研究现状; 前景展望; 黔东南
[中图分类号] P618. 32; P534. 3 [文献标识码] A [文章编号] 1000-5943(2018)-04-0270-12

1 引言

著名的“大塘坡式”锰矿的发现颇具戏剧性。上世纪大炼钢铁时期, 贵州省松桃县组织农民近千人在大塘坡铁矿坪开采“铁矿”, 终因炼不出铁而停止。1958 年 7 月, 贵州省地质局 103 地质队李伯皋工程师因开展铁矿普查而踏勘检查大塘坡矿点时, 确认该“铁矿”是氧化锰矿石。1960 年 5 月和 3 月, 贵州省地质局 103 地质队孙仁贵、邹盛荣分别负责开展大塘坡铁矿坪锰矿普查。1961 年 7 月邹盛荣首先发现原生碳酸锰矿(菱锰矿), 进而确定具有工业远景。著名的“大塘坡式”锰矿就这样被发现了(吴道生等, 1996)。

经过三代地质工作者的不懈探索和艰苦努力, 终于在 2008 年以来, “大塘坡式”锰矿成矿理论、深部找矿预测关键技术并指导锰矿地质找矿取得重大突破, 黔东南地区累计查明的锰矿资源量, 超过了 2011 年全国锰矿保有资源量的总和, 成为中国最重要的锰矿床类型。2018 年是“大塘坡式”锰矿发现 60 周年, 特撰文总结黔东南及毗邻区“大塘坡式”

锰矿研究历史、研究现状与前景展望, 以纪念“大塘坡式”锰矿发现 60 周年, 并向为黔东南及毗邻区南华纪“大塘坡式”锰矿找矿事业做出突出贡献的老一辈地质工作者致以崇高的敬意!

2 “大塘坡式”锰矿主要研究历史

黔东南及毗邻区南华纪“大塘坡式”锰矿研究主要集中在上世纪 70 年代末至 90 年代初和本世纪初至今的两个阶段。

2.1 上世纪 70 年代末至 90 年代初

(1) 1978—1980 年, 贵州省地矿局 103 地质大队(以下简称“贵州 103 队”)刘崇本等人, 完成了川湘黔边境早震旦世锰矿远景区划, 提交了“川湘黔边境早震旦世锰矿远景区划说明书”(注: 按照当时全国地层划分方案, 尚无“南华纪”, 研究区锰矿划属于震旦纪下统大塘坡组, 下同)。

(2) 1981—1984 年, 贵州 103 队高兴基、朱育

[收稿日期] 2018-09-10 [修回日期] 2018-11-07
[基金项目] 中国地质调查局《贵州锰矿成因与成矿规律》专题(DD20160346-54)、《贵州省矿产资源调查成果综合集成与服务产品开发》(编号: DD20160346-28) 及贵州省锰矿资源预测评价科技创新人才团队(黔科合平台人才[2018] 5618) 联合资助。
[作者简介] 周琦(1964—), 男, 博士, 研究员, 主要从事地质找矿预测研究与勘查评价等工作。E-mail: 103zq@163.com

群、邓芳荣和周琦完成了贵州省科委下达的《松桃地区早震旦世大塘坡期锰矿成矿地质条件及找矿方向》研究专题。

(3) 1981—1984 年,贵州省地质科学研究所刘巽锋、胡肇荣、曾励训、郑光夏和汪成元完成了贵州省科委下达的《震旦纪锰矿地质及矿床成矿机理》研究专题。

(4) 1981—1984 年,贵州省地矿局区域地质调查大队王砚耕、王来兴、朱顺才等完成了贵州省科委下达的《贵州东部大塘坡组地层沉积环境和成锰作用》研究专题。

(5) 1982—1983 年,湖南省地矿局 405 地质队、湖南省地矿局实验测试中心唐世瑜、吴世芳、刘德铭、袁振富等完成了原地质矿产部和湖南省地矿局下达的《湖南省花垣县民乐锰矿地质特征和成矿规律研究报告》。

(6) 1991—1995 年,冶金工业部西南地质勘查局、天津地质研究院侯宗林、薛友智等完成了冶金工业部“八五”重点科技项目《扬子地台周边及其邻区优质锰矿成矿规律及资源评价》研究报告,其研究范围和研究内容包括了黔东南及毗邻区南华纪“大塘坡式”锰矿。

2.2 本世纪初至今

(1) 1999—2003 年,周琦、覃英、张遂、何明华等完成了中国地质调查局下达给贵州 103 队、贵州省地质调查院的《贵州铜仁—松桃地区锰矿资源富集区调查评价》报告。

(2) 2003 年,周琦完成了中国地质大学(武汉)工程硕士学位论文——《贵州松桃大塘坡地区早震旦世沉积盆地特征与优质锰矿成矿规律》。

(3) 2005 年,周琦、覃英、张遂、何明华等完成了《贵州铜仁—松桃地区南华纪锰矿成矿条件与预测》研究报告。

(4) 2008 年,周琦完成了中国地质大学(武汉)博士学位论文——《黔东南新元古代南华纪早期冷泉碳酸盐岩地质地球化学特征及其对锰矿的控制矿意义》。

(5) 2011—2013 年,周琦、袁良军、杜光映等完成了中国地质调查局成都地质调查中心下达给贵州省地矿局的《黔东南地区大塘坡期锰矿成矿地质背景综合研究》报告。

(6) 2012—2013 年,周琦、杜远生、覃英、张遂等完成了《黔东南地区南华纪锰矿成矿系统与深部找矿重大突破》专题研究报告。

(7) 2014—2015 年,周琦、杜远生、袁良军、杨炳南等完成了中国地质调查局下达给贵州省地矿局 103 地质队的《贵州铜仁松桃锰矿整装勘查区关键基础地质研究》报告。

(8) 2014—2017 年,周琦、杜远生、袁良军、杨炳南、张遂、马志鑫、凌云、余文超等完成了国土资源部下达给贵州省地矿局 103 地质大队、中国地质大学(武汉)、成都地质矿产研究所和重庆市地质调查院的国土资源公益性行业科研专项——《上扬子地块东南缘锰矿国家整装勘查区成矿系统与深部找矿关键技术研究及示范》研究报告。

(9) 2016—2018 年,袁良军、谢小峰、杨炳南、谢兴友等,先后完成自然资源部中国地质调查局下达给贵州省地矿局 103 地质大队的贵州铜仁松桃锰矿整装勘查区 1/50000《孟溪幅》、《盘信幅》和《普觉幅》找矿预测与专项填图报告。

(10) 2016—2018 年,周琦、杜远生、刘志臣、袁良军等,完成了自然资源部中国地质调查局下达给贵州省地矿局 103 地质大队的“中国矿产地质与成矿规律综合集成和服务”二级项目中的《贵州锰矿成因与成矿规律》专题研究报告。

3 锰矿研究现状

3.1 国外锰矿研究现状

(1) 20 世纪 40—50 年代,前苏联别捷赫琴院士建立了沉积锰矿相变成矿模式,即锰质主要来自于大陆风化,从海岸向盆地深处,随着物理化学条件变化,分别出现硬(软)锰矿(四价锰)、水锰矿(三价锰)和菱锰矿(二价锰)三个相带(图 1)。该模式对国内影响较广(袁见齐等,1979)。

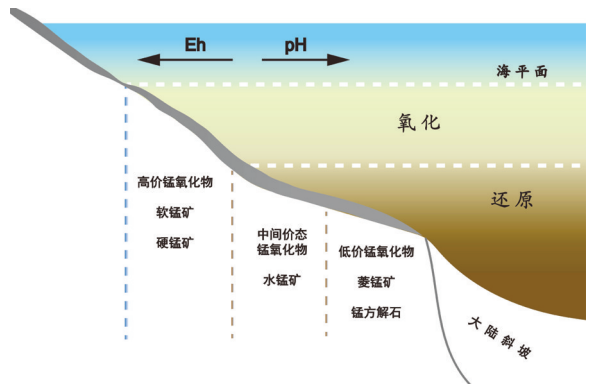


图 1 锰矿沉积相变成矿模式
(别捷赫金,前苏联)

Fig. 1 Metallogenic mode of manganese sedimentary phase change

(2) Roy (1988) 认为:“印度的锰都是浅水环境下的陆源沉积物”,“火山-沉积矿床不占主导地位”、“生物已经直接或间接地参与了锰的沉积,起到重要作用”(侯宗林、薛友智等,1997)。

同年,前苏联学者姆斯季斯拉夫斯基提出“原生锰矿床仅仅产生在地裂-断裂形成时的破裂作用期”,“有工业价值的自沉积锰矿床应归属于火山沉积型和热液沉积类型”。

(3) Maynard (2003) 认为锰元素的地球化学行为与氧化还原环境密切相关,在氧化环境中会以氧化物或氢氧化物形式沉淀,而在还原环境中则会以二价阳离子形式在溶液中呈游离态。Force and Cannon (1988) 根据以上原理,并结合现代黑海中的 Mn 元素在水体氧化还原界限上下明显的浓度差异,提出了黑色页岩盆地中锰质沉积的形成原理。即溶解在下部缺氧水体中的锰质被上升流带入上部氧化水体中,并以锰氧化物或氢氧化物形式沉淀下来,在氧化还原界面之上区域大量沉淀,而在界面之下区域,大部分锰氧化物重新溶解在缺氧水体中,部分落在盆地边缘区域的锰氧化物颗粒与沉积物中的有机质反应,形成锰碳酸盐岩。根据不同锰矿沉积中锰矿物的不同类型及岩相组合,“氧化模式”(Oxic model)及“分带模式”(Zone model)被提出以用来区分氧化锰及菱锰矿类型的锰矿床。

据此观点,盆地中的锰质沉积主要集中于盆地边缘区域氧化还原界线附近一条狭长的带上,故该模型又被称为“浴缸边模型”(Bathtub-ring Model)。在此基础之上,锰矿成矿理论有了进一步的发展;Calvert 和 Pedersen (1996) 则强调了沉积物孔隙水中锰离子含量对锰碳酸盐岩形成过程的控制作用。认为锰氧化物与氢氧化物与有机质反应的实质是在早期成岩作用阶段,埋入沉积物中的锰氧化物及氢氧化物会重新溶解造成沉积物孔隙水中锰离子浓度升高,之后与有机物分解产生的重碳酸根(HCO_3^-)反应生成碳酸锰沉积。

(4) Roy (2006) 在“浴缸边模型”基础之上提出“锰泵”模型(Manganese pump),认为海侵作用有利于盆地内锰矿沉淀。在海侵过程往往伴随着高初级生产率,因此沉积物中存在较高含量的有机质,此外,海侵将导致海平面上升,盆地边缘被海水覆盖,为锰矿聚集提供了场所(图 2-A)。Maynard (2010) 对盆地水体的氧化还原分层模式进行了细分,提出在盆地水体中间会出现“最小

氧化带”(Oxygen minimum zone, OMZ),将上层海水氧化带及下层还原带区分开,在近岸区域会出现一个“贫氧楔”(Dysoxic wedge),并可能发生海水上涌事件,锰沉积即形成于贫氧楔上部区域(图 2-B)。

(5) Huckriede 和 Meischner (1996) 通过对现代波罗地海中含锰沉积物的成因研究后认为,富氧底流对盆地底部锰矿沉积存在控制作用(图 2-C)。波罗的海存在明显海水分层,表层海水富氧但锰含量较少,底层海水缺氧含有大量溶解锰。当密度较大,富氧的海水从北海进入波罗的海海域后,会发生下沉并造成波罗的海底部出现短暂的氧化环境。氧化锰颗粒在这种氧化环境中形成并进入沉积物,造成沉积物孔隙水 Mn^{2+} 离子饱和,在与有机质反应后析出菱锰矿沉淀。这种由底流控制的成矿模式因此被称为波罗的海模式。

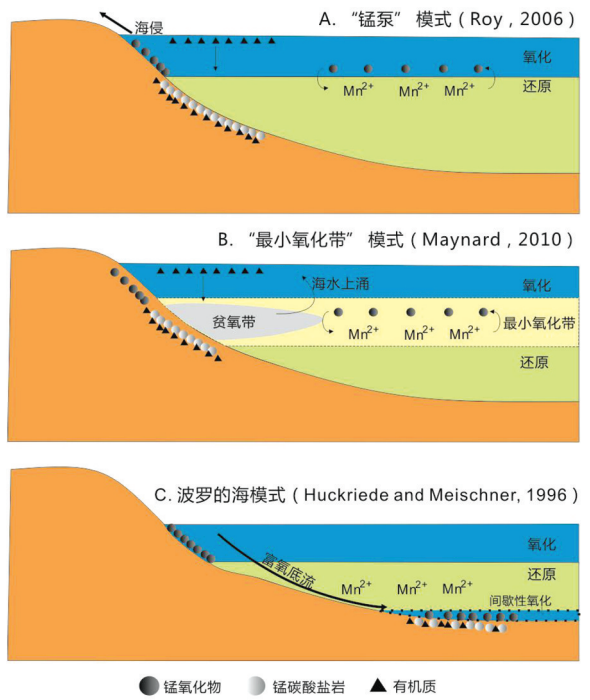


图 2 国外几种主要锰矿成矿模式图

Fig. 2 Metallogenic mode of some major manganese deposits in abroad

上述国外几种锰矿成矿模式大同小异,其核心是强调外生沉积成锰作用,没有考虑锰质主要来自壳幔深部的情况。难以解释黔东及毗邻区南华纪锰矿床是在地堑盆地中心成矿,而盆地边缘却无菱锰矿沉积等客观地质事实。

上世纪 80 年代中期以后,中外地质学家对于锰矿的成因机制,开始了新的探索,单一的陆源锰矿成矿理论开始向多源方向过渡。中外地质学家

对锰矿地质学的探索,都是围绕3个基本问题进行的,即锰质来源、锰的迁移机制、锰的赋存条件。涉及大地构造学、沉积盆地分析、沉积建造、沉积地球化学以及热水成矿等方面。

3.2 国内研究现状

(1)侯宗林、薛友智等(1997)提出锰与沉积盆地的密切关系历来为地质学家所公认。锰矿地质学家已经注意到:板块之间的背向拉张和深断裂带的转换拉张引起的离散作用,是成锰盆地形成的主要动力机制。深切地幔的基底断裂和同生断裂是控盆、控相和控矿的重要地质因素。随着盆地分析研究的进步,将更进一步揭示锰质在盆地中富集的机理及赋存的规律性。通过对含锰岩系的建造古地理编图,可以全面反映各成锰阶段构造背景的演化、成锰盆地分布及其沉积的迁移、沉积体系的建造特征,揭示锰在构造-沉积域中的位置。

(2)在锰矿形成机制方面,从 Eh-pH 关系图上看到,溶解 Mn^{2+} 具有较大的稳定场。在还原条件下,如果体系中增添碳酸盐就会形成比较稳定的含锰固态矿物。在海水中, CO_3^{2-} 略有增加, Mn^{2+} 就会生成菱锰矿。微生物对锰的沉积地球化学行为的影响,仍是一个有争议的问题(侯宗林、薛友智等,1997)。

(3)随着热水成锰的理论被更多人接受,在超常压、超常温条件下锰的地球化学行为将引起锰矿地质学家们的更大兴趣。上世纪70—80年代以来,现代大洋与热卤水有关的含金属沉积物、Fe-Mn 烟状物“射流”的发现,开阔了人们的视野。人们在研究古锰矿床的成因时,发现了越来越多的有关火山作用、深成热水参与的具有经济意义锰矿床的成矿证据。大洋中的锰,过去都认为来自陆地,但已经有学者列举了大量数据,说明陆源风化物中的锰绝大部分为悬浮物,而以溶液状态进入海域的只有占总含量的0.9%。而大洋中来自内部的溶解锰却等于河流悬浮物锰的9倍以上,经过河流进入的溶解锰不足总锰的千分之一。通过对海底结核、锰透镜体群分布的研究,表明近热水喷溢口的锰品位显著高于其背景。锰矿石包体测温也表明,许多锰矿床形成于非常温环境。这些事实和现象的发现,为锰矿成矿作用研究提供了新思路(侯宗林、薛友智等,1997)。

(4)1989年涂光炽院士提出广西下雷超大型锰矿床属“热水沉积”成因,他认为“大量的不是

陆源所能解释的海底锰堆积的发现更能使人相信,热水沉积锰矿床的重要性并不亚于陆源(冷水)沉积锰矿床”(侯宗林、薛友智等,1997)。

3.3 “大塘坡式”锰矿研究现状

3.3.1 关于锰矿成因

(1)刘巽锋等(1983,1989)认为锰矿 Si、Ba、Fe、Sr 含量较低,而 Ti、Al 含量较高,这与热水沉积特征相矛盾,认为锰矿主要分布在浅水低凹地区,与潮坪沉积(藻坪)关系密切,属于藻类生物成矿。

(2)高兴基等(1984,1989)根据黔东地区含锰岩系中存在厚薄不等的火山凝灰岩或层凝灰岩等特征,锰质来源于海底火山。杨绍祥等(2006)也认为该区的锰矿属离火山喷发中心较远的海底火山喷发-沉积锰矿床,喷发中心区分布于湘西南-湘中一带。

(3)王砚耕,王来兴等(1985)认为“大塘坡式”锰矿形成于海相深水环境,菱锰矿富集于成岩阶段,是继黄铁矿形成之后经还原而成的。并认为氧化锰转变为碳酸锰的全过程中,有机质起了相当重要的作用。

(4)周琦(1989)认为锰质主要来自海底火山喷发,并对松桃大塘坡锰矿区“锰枕”形成机理进行了探讨。认为是因火山、地震触发导致碳质页岩液化,液化物质向上“侵入”菱锰矿体(层)中而形成。

(5)赵东旭(1990)则认为“大塘坡式”锰矿的矿石由菱锰矿内碎屑和碳泥质基质组成,提出是浅水沉积环境中的锰质沉积物经破碎后沿着盆地斜坡流入深水地区与碳、黏土和粉砂沉积在一起形成内碎屑菱锰矿,并认为部分矿石有递变层理,具有浊流沉积特征。

(6)陈多福等(1992)通过锰矿石的微量元素特征与比值以及它们图解均显示成矿过程中有热水物质的参与,锰矿矿石的 $Fe-Ma-(Cu+Ni+Co) \times 10$ 的三角图解分布在热水沉积区, U、Tu 元素的对数图解也落入石化的热水沉积区,沥青反射率测定锰矿形成温度为 $170^{\circ} \sim 195^{\circ}$ 。何志威等(2013,2014)也提出该类型锰矿系热水沉积,认为产于具有高地热场的近岸盆地。

(7)侯宗林、薛友智等(1997)认为扬子地台周边及其邻区海相沉积型优质锰矿床具有明显的“内源外生”特点。认为黔湘成锰沉积盆地锰质主要源于盆地内海底扩张活动带的含锰热水循环上涌,在

冰水掺和下,于滨-浅海(为主)至次深海的半封闭、缺氧、还原环境中蕴集,经同生阶段化学沉积及早期成岩阶段微生物的生物化学作用富集成矿。

(8)杨瑞东等(2002)认为黔东地区锰矿成矿与“雪球地球”事件有关。认为南华纪大塘坡期锰矿是在 Sturtian 冰期后形成,由于大气中含有很高的 CO_2 与海洋中的 Ca^{2+} 、 Mn^{2+} 反应,造成大量 CaCO_3 和 MnCO_3 快速沉淀,形成“碳酸盐岩帽”(菱锰矿)所致。

3.3.2 关于锰矿成矿规律

贵州省地矿局 103 地质大队经过上世纪 60、70 年代至本世纪初,长达 30—40 年的探索和实践,总结出黔东及毗邻区南华纪大塘坡早期锰矿空间展布的“三大”规律(覃英等,2005)。

(1)厚度规律

锰矿体的厚度、品位与南华系下统大塘坡组第一段(即含锰岩系)的厚度呈正相关关系,太薄则无锰矿产出。认为赋存菱锰矿工业矿体的含锰岩系厚度一般应大于 15 m。

(2)方向性与等距性规律

认为锰矿床的分布受古构造控制,具有北东方向雁行式分布规律,且有串珠状出现特点,且大致具有等距性的分布规律。

(3)岩相组合规律

锰矿床受沉积盆地控制。从盆地中心至边缘可划分为三个岩性组合带,即:炭质页岩+菱锰矿带→炭质页岩+白云岩带→炭质页岩带。在平面上,菱锰矿体主要产于白云岩内圈之中。

4 “大塘坡式”锰矿研究主要进展

4.1 发现新的锰矿床类型——古天然气渗漏沉积型锰矿

古天然气渗漏沉积型锰矿床是一种新的锰矿床类型(周琦,杜远生,2012;刘雨等,2015),因长期研究黔东及毗邻区南华纪“大塘坡式”锰矿床而发现的。是指在裂解背景条件下,来自地幔锰质通过与幔源无机成因气等相互作用,在地壳浅部形成含硫富锰富烃流体藏,沿同沉积断层上升在次级裂谷、地堑盆地中心发生渗漏喷溢沉积成锰作用而形成的菱锰矿床。

南华纪“大塘坡式”锰矿床是典型的古天然

气渗漏沉积型锰矿床,已成为中国最重要的锰矿床类型,是继传统的海相沉积型、沉积变质型锰矿床类型之后,全球最重要的三大锰矿床类型之一。

通过刘志臣等(2018)、汪洋等(2018)对比研究,发现黔北遵义-水城地区的二叠纪锰矿与黔东及毗邻区南华纪锰矿的成矿特征、成矿规律十分相似,同属古天然气渗漏沉积型锰矿床。近年来,通过引进、借鉴黔东地区南华纪古天然气渗漏沉积成矿模式和找矿预测模型,遵义地区锰矿找矿已取得重大进展。

4.2 查明了南华纪锰矿大规模成矿地质背景

4.2.1 南华纪锰矿大规模成矿的构造古地理格架

周琦等(2016,2017)在 200 余条地层剖面、钻孔剖面资料的基础上,系统研究两界河组、铁丝坳组、大塘坡组和大塘坡组底部含锰岩系空间分布规律。发现 Rodinia 超大陆裂解背景下,南华裂谷盆地(I级)大致沿秀山壳幔韧性剪切带(深断裂带)、怀化(黔阳)壳幔韧性剪切带(深断裂带)、金兰寺壳幔韧性剪切带(深断裂带)再次发生裂陷,接受南华系沉积物沉积与演化。其空间分布正好分别与深部大地电磁测深发现的秀山-松桃间、黔阳-邵阳间和衡阳-茶陵间的垂向低阻带位置对应。南华裂谷盆地从北往南,分别出现:

- (1)武陵次级裂谷盆地;
- (2)天柱-会同-隆回隆起(地垒);
- (3)雪峰次级裂谷盆地。

南华裂谷盆地内部结构由以上三个Ⅱ级单元构成。锰矿形成与次级裂谷盆地中心。黔东及毗邻区锰矿受武陵次级裂谷盆地控制,而黔东南及湘西南地区锰矿受雪峰次级裂谷盆地控制。

4.2.2 厘清了武陵次级裂谷盆地内部结构,发现武陵巨型锰矿成矿带

武陵次级裂谷盆地(Ⅱ级)依据其内部同沉积断层空间展布特征以及对锰矿成矿亚带的控制特征、沉积环境与沉积相特征,武陵次级裂谷盆地(Ⅱ级)结构具体由以下Ⅲ级单元构成:

- (1)石阡-松桃-古丈地堑盆地(Ⅲ级)

进一步依据其内部同沉积断层空间展布特征以及对锰矿床的控制特征、沉积环境与沉积相特征,其内部结构由多个Ⅳ级地堑盆地和其间的地垒等单元构成:如松桃李家湾-高地-道坨地堑盆

地、松桃西溪堡(普觉)地堑盆地、松桃大塘坡地堑盆地、松桃大屋地堑盆地、松桃杨家湾地堑盆地、松桃举贤(寨英)地堑盆地、松桃凉风坳地堑盆地、松桃金盆地堑盆地、秀山笔架山地堑盆地、花垣民乐地堑盆地、古丈烂泥田地堑盆地、镇远袁家山地堑盆地、石阡石板溪地堑盆地等以及期间的地垒构成。

(2) 溪口-小茶园地堑盆地(Ⅲ级)

进一步依据其内部同沉积断层空间展布特征以及对锰矿床的控制特征、沉积环境与沉积相特征,其内部结构由多个Ⅳ级地堑盆地和其间的地垒等单元构成:如秀山小茶园地堑盆地、秀山獠牙盖地堑盆地以及期间的地垒等Ⅳ级单元构成。

(3) 玉屏-黔阳-湘潭地堑盆地(Ⅲ级)

进一步依据其内部同沉积断层空间展布特征以及对锰矿床的控制特征、沉积环境与沉积相特征,其内部结构由多个Ⅳ级地堑盆地和其间的地垒等单元构成:如万山盆架山-芷江莫家溪地堑盆地、玉屏新寨地堑盆地、黔阳-洞口地堑盆地、怀化鸭嘴岩地堑盆地、湘潭棠甘山地堑盆地等以及期间的地垒构成。

武陵次级裂谷盆地(Ⅱ级)中,在溪口-小茶园地堑盆地(Ⅲ级)、石阡-松桃-古丈地堑盆地(Ⅲ级)和玉屏-黔阳-湘潭地堑盆地(Ⅲ级)之间,分别为甘龙-秀山和施秉-铜仁-凤凰两个Ⅲ级隆起(地垒)。

通过对裂谷盆地结构与锰矿成矿的关系进行了研究。发现南华裂谷盆地(Ⅰ级)控制华南南华纪锰矿成矿区,次级裂谷盆地(Ⅱ级)控制锰矿成矿带,Ⅲ级地堑盆地控制形成锰矿成矿亚带,Ⅳ级地堑盆地控制形成锰矿床。进而发现武陵巨型锰矿成矿带。

4.2.3 基本厘清了雪峰次级裂谷盆地内部结构

雪峰次级裂谷盆地(Ⅱ级)依据其内部同沉积断层空间展布特征以及对锰矿成矿亚带的控制特征、沉积环境与沉积相特征,目前雪峰次级裂谷盆地(Ⅱ级)结构至少可以确定从江-通道-城步地堑盆地(Ⅲ级)一个Ⅲ级单元。它具体由黎平冷水塘地堑盆地、靖州新厂照洞地堑盆地、城步楠木湾-岩田地堑盆地、从江高增-八当地堑盆地、通道坪阳地堑盆地和其间的地垒构成。

雪峰次级裂谷盆地锰矿成矿作用的强度明显较武陵次级裂谷盆地锰矿成矿作用弱,目前尚未发现大型规模的锰矿床。

4.3 建立锰矿内生外成古天然气渗漏沉积成矿模式

周琦,杜远生等(2007a,2007b,2007c,2008,2012,2013,2017)在长期对松桃大塘坡以及松桃西溪堡等典型锰矿床中大量罕见地质现象研究的基础上,结合矿床学、矿床地球化学、同位素地球化学特征的研究,认为该类型锰矿是由特殊的内生外成锰矿成矿作用形成。其“内生”部分表现为锰和烃类等成矿物质主体来自上地幔,锰主要进入含硫流体迁移至地壳浅部形成含硫富烃流体藏,在流体藏中通过热化学硫酸盐反应(TSR)形成菱锰矿。而“外成”部分表现为流体藏中的菱锰矿等成矿物质沿同沉积断层上升至海底地堑盆地中心渗漏喷溢沉积成矿。建立了原创的黔东及毗邻区南华纪锰矿“内生外成”裂谷盆地古天然气渗漏沉积成矿模式(图3)。其形成机制如下:

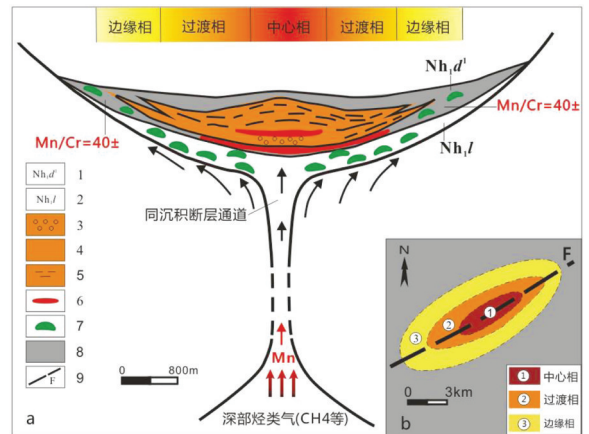


图 3 锰矿内生外成裂谷盆地古天然气渗漏沉积成矿模式

Fig. 3 Ancient natural gas seepage sedimentary metallogenetic mode of ‘generate inside and form outside’ manganese rift valley (a—剖面图;b—平面图)(周琦等,2013,2017)

1—南华系下统大塘坡组第一段(黑色含锰岩系);2—南华系下新统两界河组+铁丝坳组;3—气泡状富菱锰矿石;4—块状菱锰矿石;5—条带状菱锰矿石;6—凝灰岩或凝灰质砂岩透镜体;7—古天然气渗漏成因白云岩透镜体;8—碳质页岩;9—同沉积断层

(1)来自上地幔的锰主要是进入含硫流体进行迁移,而不是进入熔体进行迁移。

(2)来自地幔的含硫含锰和烃类流体沿壳幔韧性剪切带(岩石圈断裂)上升到地壳上部聚集,形成含硫富锰富烃流体藏。

(3)含硫富锰富烃流体藏内温度较高、压力大、富含 SO_4^{2-} 等,因热化学硫酸盐还原作用

(TSR),使流体藏内甲烷等烃类气体发生缺氧氧化,进而形成菱锰矿。

(4) 因 Rodinia 超大陆裂解,在南华裂谷盆地产生系列同沉积断层,垂向发育刺破含硫富锰富烃流体藏,在系列海底地堑盆地中心发生大规模渗漏喷溢沉积成矿。

在地堑盆地中心,沿渗漏喷溢口出现中心相(富菱锰矿)、过渡相和边缘相分带,出现被沥青充填的气泡状→块状→条带状锰矿矿石类型分布规律,锰品位从高逐渐降低。气泡状菱锰矿及部分块状菱锰矿为富菱锰矿。

4.4 建立了古天然气渗漏沉积型锰矿床找矿模型

2008 年以来,周琦等率领的贵州锰矿科技创新人才团队通过艰苦努力和探索,成功实现了锰矿成矿系统向深部隐伏矿预测勘查系统的转换。依托建立的“内生外成”锰矿裂谷盆地古天然气渗漏沉积成矿系统与成矿模式,研发出古天然气渗漏沉积型锰矿床深部找矿预测模型(周琦等,2017),具体由地质找矿模型(同沉积断层、Ⅳ级地堑盆地、两界河组、古天然气成因白云岩透镜体、古天然气渗漏喷溢中心相/过渡相/边缘相等识别标志与专项填图方法等关键技术组合)、地球化学找矿模型(Mn/Cr 比值定量预测模型、硫同位素预测模型等(王萍等,2016))和 AMT 地球物理间接找矿模型(杨炳南等,2015)等关键技术组合构成。

4.4.1 地质找矿模型

(1) 同沉积断层标志

同沉积断层属伸展构造系统,它产于裂谷、裂陷槽等拉张构造环境,是这些构造的重要组成部分和一种形成机制(翟裕生,1997)。同沉积断层是与沉积、火山、地震、流体以及锰矿成矿作用同时发生、持续进行的一种重要而特殊控矿构造类型。研究区南华纪早期同沉积断层十分发育,控制和形成了南华纪早期不同序次的次级裂谷盆地,同沉积断层的垂向发育形成了锰矿成矿通道,在地堑盆地底部出露地段是富锰气液上涌的喷口和锰矿石堆积场所。故同沉积断层是该类型锰矿床地质找矿关键标志。

主要判别标志有:(1)南华纪早期沉积岩相古地理的突变带;(2)南华系各组段地层厚度突变带:如松桃西溪堡Ⅳ级地堑盆地中,大塘坡组第一段黑色

含锰岩系(Nhd₁)厚度、大塘坡组第二段(Nhd₂)地层厚度以及南沱组(Nh_{2n})地层厚度突变带的两侧地层厚度相差一倍以上(张遂等,2015);(3)线状展布的快速堆积(两界河组)沉积相的边界线;(4)在Ⅳ级地堑盆地中古天然气渗漏喷溢中心相的连线和串珠状Ⅳ级地堑盆地的连线等。

研究区南华纪早期同沉积断层沿 NE65~70 度方向,大致平行展布,具较明显的等距性分布规律(图 2),与地表北东-北北东向燕山期主体构造线方向存在 30~40 度夹角。

(2) Ⅳ级地堑盆地标志

研究区锰矿床形成分布严格受南华纪早期裂谷盆地形成演化过程控制。即南华裂谷盆地(Ⅰ级)控制锰矿成矿区、次级裂谷盆地(Ⅱ级)控制锰矿成矿带、Ⅲ级地堑盆地控制形成锰矿成矿亚带。锰矿床则分布在Ⅳ级地堑盆地中,而在隆起区域则无锰矿体分布。因此,Ⅳ级地堑盆地是该类型锰矿床的关键地质找矿标志(图 4-B)。

(3) 两界河组标志

南华系底部的两界河组沉积是 Rodinia 超大陆裂解背景下,第二次裂陷作用开始时(~725 Ma)(Zhang et al.,2008),最早充填于武陵次级裂谷盆地中心的沉积。断线状展布的两界河组沉积是判断南华纪早期同沉积断层和地堑盆地存在的主要标志之一,如松桃大塘坡两界河和松桃西溪堡地区,两界河组厚度在 130~400 m。松桃道坨-李家湾地区,从南东侧缺失两界河组,往北西则出现两界河组沉积,并迅速增厚。因此,两界河组存在与否是该类型锰矿地质找矿预测主要标志(图 4a)。

(4) 古天然气成因的白云岩透镜体标志

指两界河组中的古天然气渗漏成因的白云岩透镜体。根据裂谷盆地古天然气渗漏锰矿成矿系统与成矿模式(周琦等,2008;2013),两界河组快速堆积的碎屑岩中的白云岩透镜体与上覆的菱锰矿体成因一样,是裂谷盆地古天然气渗漏锰矿成矿系统中不同期次渗漏的古天然气成因的碳酸盐岩。即裂解初期(两界河期)来自深源的无机成因气、热裂解气等沿同沉积断层发生小规模的上涌至两界河期地堑盆地中形成,同样具有独特的渗漏沉积构造,它与菱锰矿体构成“二位一体”的关系。因此,两界河组中古天然气成因的白云岩透镜体存在与否,是该类型锰矿床找矿预测的主要标志。

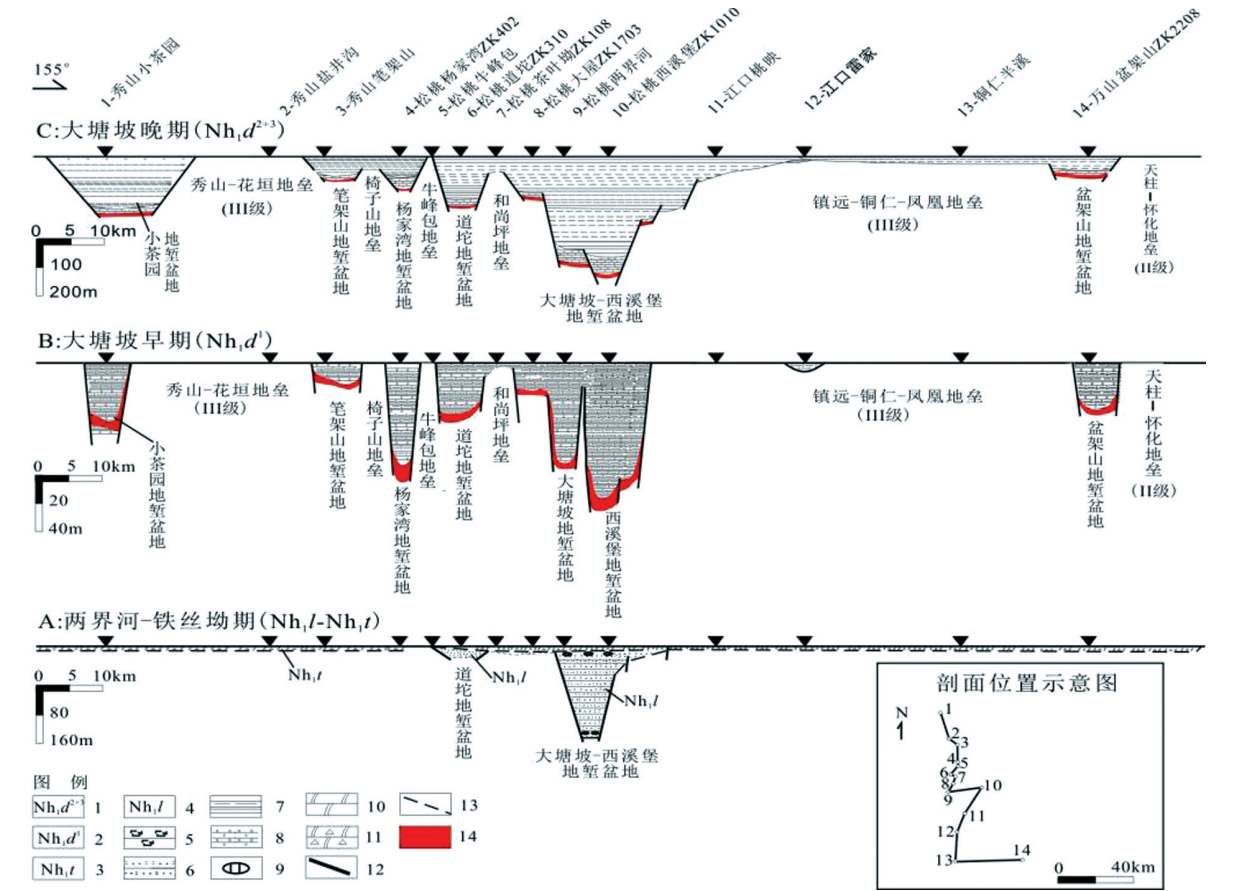


图4 黔湘渝毗邻区武陵次级裂谷盆地地复原与演化图(据周琦等,2016)

Fig. 4 Reversion and evaluation of Wuling secondary rift basin in Guizhou-Chongqing-Hunan adjacent area

1—大塘坡组第三段;2—大塘坡组第一段;3—铁丝坳组;4—两界河组;5—冰碛砾岩;6—砂岩;7—粉砂质页岩;8—碳质页岩;9—白云岩透镜体;10—白云岩;11—含砾白云岩;12—同沉积断层;13—地层对比线;14—菱锰矿体

(5) 锰矿成矿地质体与上覆层厚度标志

锰矿成矿地质体即大塘坡组第一段黑色含锰岩系,是两界河期形成的地堑盆地基础上,在大塘坡早期,沿同沉积断层继续伸展拉张、地堑沉积而成。地堑越深、则大塘坡早期锰矿成矿地质体越厚。通过同沉积断层,在Ⅳ级地堑盆地中心发生古天然气渗漏喷溢沉积成锰作用。因此,锰矿成矿地质体的厚度是锰矿找矿预测主要标志之一。厚度越大越证明裂陷作用强烈,越有利于渗漏喷溢成矿(图4b),并与菱锰矿体的厚度、品位成正比。

但需注意区分是Ⅲ级地堑盆地中的黑色页岩(大塘坡组第一段)和Ⅳ级地堑盆地中的锰矿成矿地质体(含锰岩系):Ⅲ级地堑盆地中的黑色页岩厚度薄、且无菱锰矿体产出,特别是下伏地层中无两界河组分布(因持续裂解作用,大塘坡早期的地堑盆地分布范围超过了较早的两界河期地堑盆地分布范围)、黑色页岩中Mn/Cr微量元素比值一般小于5;而Ⅳ级地堑盆地中的锰矿成矿地质体(含锰岩系)厚度较大、有菱锰矿体产出。锰

矿成矿地质体底部(即成锰期)Mn/Cr微量元素比值约为40。下伏地层中一般有两界河组分布,锰矿成矿地质体的厚度中心与下伏两界河组地层的厚度中心在空间上是重叠的(图4a,b)。

由于控制锰矿成矿的同沉积断层,在大塘坡中、晚期,乃至更晚的地层中,因继续受其影响,导致位于地堑盆地中的大塘坡组二、三段、南沱组乃至震旦—寒武纪下统等地层厚度较隆起区明显增厚,因此,上覆地层厚度异常增厚的地段,是隐伏锰矿床找矿预测的间接标志(图4c)。

(6) 渗漏喷溢相标志

根据裂谷盆地古天然气渗漏锰矿成矿系统与成矿模式(图3),富锰的气液沿同沉积断层上涌到Ⅳ级地堑盆地底部,发生渗漏喷溢沉积成锰作用。从渗漏喷溢口向外,形成中心相、过渡相和边缘相三个渗漏喷溢相带,三个相带沿同沉积断层大致呈狭长带状展布(Zhou Qi et al., 2013)。这一标志对于隐伏锰矿体的找矿预测与空间定位非常关键。

(a) 中心相标志:① 普遍发育各种渗漏沉积

构造,如底劈构造、渗漏管构造、被沥青充填的气泡状构造、系列软沉积变形纹理等;②出现透镜状菱锰矿体。且透镜状菱锰矿体为多层分布(主要为上、下两层),有时出现也 3-5 层菱锰矿体不等;③ 上下两层主要菱锰矿体之间,一般分布或断续分布厚 2~10 cm 的凝灰岩或凝灰质粉砂岩透镜体;④ 菱锰矿体以块状构造夹被沥青充填的气泡状菱锰矿石为标志,条带状菱锰矿石很少,一般仅出现在上层矿的上部或顶部;⑤菱锰矿体之间碳质页岩夹层少而薄。菱锰矿体厚度大,一般>2.5 m,最厚可达 16 m。锰品位高,一般>23%,最高可>30%;锰矿成矿地质体厚度大,一般 25~40 m 左右,最厚可>90 m。

(b) 过渡相标志: ① 一般不发育古天然气渗漏沉积构造,多为水平层理;② 菱锰矿体形态主要为似层状、层状。虽也可出现 1-3 层菱锰矿体,但因菱锰矿体之间所夹的碳质页岩厚度达不到夹石剔除厚度,往往为一层矿,矿体厚度较中心相区薄;③菱锰矿体之间未见凝灰岩或凝灰质粉砂岩透镜体分布;④菱锰矿体以块状和条带状菱锰矿石为主,未见被沥青充填的气泡状菱锰矿石;⑤菱锰矿体之间碳质页岩夹层逐渐增多、夹层厚度逐渐增大。菱锰矿体厚度中等,一般 1.5~2.0 m 左右。锰品位中等,一般 16%~22% 左右;⑥ 含锰岩系厚度中等,一般 15~25 m 左右。

(c) 边缘相标志: ① 不发育古天然气渗漏沉积构造,水平层理;② 矿体形态主要为层状、似层状,但菱锰矿体内部所夹的碳质页岩层数较多,出现矿体与碳质页岩互层产出,且越靠近地堑盆地边缘,碳质页岩厚度、层数逐渐增加,菱锰矿体厚

度、层数逐渐减少,直至尖灭;③菱锰矿体内部未见凝灰岩或凝灰质粉砂岩透镜体分布;④主要为条带状菱锰矿石,块状菱锰矿石少,无被沥青充填的气泡状菱锰矿石;⑤菱锰矿体厚度较薄,一般<1.5 m,品位较低,一般 10%~16%;⑥含锰岩系厚度较薄,一般 10~15 m。

刘雨等(2015)根据古天然气渗漏喷溢构造的空间分布特征,对松桃大塘坡锰矿床进行恢复分析,首次识别出该矿床在南华纪成锰期存在三个古天然气渗漏喷溢口,沿北东 60°~70°方向展布,与南华纪早期同沉积断层展布方向一致。

4. 4. 2 地球化学找矿模型

(1) Mn/Cr 比值定量预测模型

上世纪末,周琦等对贵州省地矿局 103 地质大队在松桃大塘坡、大屋、杨立掌、黑水溪等已知锰矿床和研究区其他实测地层剖面测试的大量岩石地球化学数据进行分析研究时,发现了 Mn/Cr 微量元素比值规律。即区内所有已知锰矿床(即Ⅳ级地堑盆地中)的含锰岩系底部(即成锰期)的碳质页岩、含锰碳质页岩中 $Mn(\times 10^{-6})$ 与 $Cr(\times 10^{-6})$ 平均含量的比值(Mn/Cr) 竟均在 40 左右(图 5)。Ⅲ级地堑盆地中黑色页岩中的 Mn/Cr 微量元素比值一般小于 5。隆起区相应层位的 Mn/Cr 微量元素比值一般大于 600。这一规律是构建该类型锰矿床定量地球化学预测模型的核心,是判定否进入Ⅳ级地堑盆地,发现隐伏锰矿体的定量预测指标。该模型对于科学圈定找矿重点靶区,具体指导发现亚洲最大、世界第四的超大型锰矿床-松桃普觉(西溪堡)锰矿床为代表的一批大型-超大型锰矿床发挥了重要作用(图 5)。

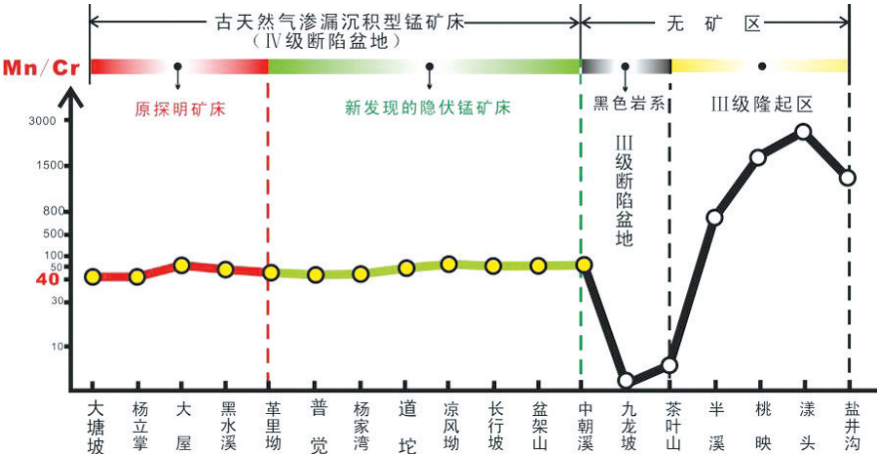


图 5 黔渝湘毗邻区古天然气渗漏沉积型锰矿床 Mn/Cr 比值找矿预测模型(周琦等,2017)

Fig. 5 Mn/Cr ratio exploration prospecting model of acient natural gas seepage sedimentary manganese deposit in Guizhou-Chongqing-Hunan adjacent area

(2) 硫同位素标志

在裂谷盆地古天然气渗漏锰矿成矿系统中, 锰矿成矿地质体中的黄铁矿具有异常高的 $\delta^{34}\text{S}$ 正值(唐世瑜, 1990; 王砚耕, 1990; 李任伟等., 1996; 周琦等, 2007c; 2012; 2013; 张飞飞等, 2013; 朱祥坤等., 2013), 周琦等(2013)、王萍等(2016)发现在不同的渗漏沉积相带, 黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 正值具有明显的分布规律, 可作为找矿预测重要的地球化学标志: (1) 中心相: $\delta^{34}\text{S}$ 值 $> 55\% \sim 60\%$, 渗漏喷溢口附近, $\delta^{34}\text{S}$ 值最高可达 67% (周琦等, 2013); (2) 过渡相: $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $45\% \sim 55\%$; (3) 边缘相: $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $35\% \sim 45\%$; (4) III级地堑盆地: $\delta^{34}\text{S}$ 值 $< 25\% \sim 35\%$, 位于IV级地堑盆地之外的III级地堑盆地中, 不具备锰矿成矿的地质条件。

因该类型锰矿床是古天然气渗漏喷溢的事件沉积成矿, 成矿时限很短。故应用黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 进行锰矿找矿预测时, 应注意限定在锰矿成矿地质体底部, 即锰矿成矿期的黄铁矿样品。因为在剖面上, 含锰岩系由下往上, 异常高的黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 正值逐渐减小。

4.4.3 AMT 地球物理间接找矿模型

大塘坡组第一段含锰岩系具有低电阻率与高极化率组合特征, 其上覆的大塘坡组第二段、南沱组含砾粉砂岩和下伏铁丝坳组、两界河组含砾砂岩同为高电阻率、低极化率组合特征。故含锰岩系与上覆、下伏地层物性差异明显, 具备音频大地电磁测量(AMT)条件, 通过分析判断隐伏含锰岩系存在与否以及分布范围, 建立 AMT 地球物理找矿模型, 间接进行锰矿找矿预测。

在对 AMT 数据进行视电阻率、阻抗相位、磁感应矢量、二维偏离度、椭率、最佳主轴方位角等特征分析后, 具体选取非线性共轭梯度(NLCG)二维反演的 TM 模式进行反演(确定 $T_{ua}=3$ 为最佳的反演参数)。视电阻率拟断面图大致可分为“高阻-中阻-低阻”三层。相位拟断面图大致可分为“低相-中相-高相-中相”四层, 相位的高值圈闭对应着电阻率由大变小的界面位置, 低值圈闭对应着电阻率由小变大的界面位置, 从而可圈定隐伏含锰岩系的展布范围, 并对后生破坏性断层空间展布特征进行预测(袁良军等 2013), 从而建立音频大地电磁(AMT)地球物理间接找矿模型(杨炳南等, 2015)。

4.5 实现我国锰矿找矿有史以来最大突破

2012 年以来, 贵州省地矿局 103 地质大队具体依托锰矿产学研协同创新成果, 通过贵州铜仁松桃锰矿国家整装勘查区找矿实践检验, 先后新发现了亚洲最大的贵州松桃普觉(西溪堡)(张遂, 2015)、亚洲第二的松桃高地、亚洲第三的松桃道坨(安正泽, 2014)和亚洲第五的松桃桃子坪等四个世界级隐伏超大型锰矿床, 其中松桃高地超大型锰矿床中的富锰矿资源量达特大型规模, 从而成为我国第一个特大型富锰矿床。黔东南地区新增 332+333 及以上的锰矿石资源量, 超过了 2011 年我国锰矿保有资源量的总和, 且资源潜力依然巨大(周琦, 2016)。黔东南地区新发现的超大型锰矿床数约占全球超大型锰矿床总数的约三分之一, 成为全球新的世界级的锰矿资源富集区, 改变了国家锰矿勘查开发格局, 实现了我国锰矿地质找矿有史以来的最大突破。

5 展望与建议

5.1 主要研究方向

(1) 在锰矿成矿理论研究方面, 应进一步研究解决“内生外成”锰矿成矿作用中“内生”部分科学问题, 即锰矿大规模成矿作用的迁移富集机制、锰矿成矿流体的性质等, 可探索在实验室条件下, 模拟锰矿成矿作用过程。

(2) 黔东南地区所在的上扬子东缘成矿带, 同时是世界级的锰矿、世界级的重晶石矿和世界级的磷矿等矿种集中分布区, 成矿时间相隔很近, 这不是偶然的, 它实际是一个成矿系列。下步可以借鉴锰矿“内生外成”研究思路, 统筹研究上扬子东缘大规模锰、重晶石和磷矿成因与成矿规律。

(3) 建议进一步建立上扬子东缘锰矿深地探测技术体系, 锰矿勘查深度达到 2 000 m。

5.2 锰矿找矿潜力

(1) 新元古代的南华裂谷盆地中的武陵次级裂谷盆地, 控制和形成了世界级武陵锰矿巨型成矿带。黔东南及毗邻区锰矿主要分布在武陵锰矿成矿带中的石阡-松桃-古丈成矿亚带、玉屏-黔阳-湘潭成矿亚带(周琦等, 2018), 区域锰矿找矿潜

力十分巨大。

(2)通过科研和专项填图,黔东南地区已发现控制锰矿形成和分布的南华纪同沉积断层 10 余条(周琦等,2015),预测和圈定了多个隐伏的南华纪 IV 级地堑盆地。正确运用“内生外成”锰矿裂谷盆地古天然气渗漏沉积成矿系统模式和深部找矿预测模型(周琦等,2017),未来还可实现锰矿找矿新的重大突破。

5.3 推广应用

(1)在黔东南建立并通过实践检验的“内生外成”锰矿裂谷盆地古天然气渗漏沉积成矿系统模式、找矿新方法,应及时推广应用到华南地区南华纪锰矿找矿预测,实现锰矿找矿突破。

(2)南华纪锰矿“内生外成”裂谷盆地古天然气渗漏沉积成矿理论、找矿新方法通过推广应用到贵州遵义二叠纪锰矿整装勘查区,改变了传统的锰矿成矿与找矿思维,成功指导二叠纪锰矿找矿取得重大进展(汪洋等,2018),证实南华纪锰矿成矿新理论与找矿预测方法,在相似成矿地质背景条件下具有普适性。因此,在与黔东南地区南华纪锰矿床进行对比研究的基础上,可推广应用到我国其他地区、其他时代锰矿找矿。

(3)加强矿山地质工作。应依托国内开采深度最深(1 120 m)、规模最大的贵州松桃李家湾锰矿山。开展深地锰矿资源绿色开采科技攻关,为黔东南地区锰矿智能化绿色开采深度突破 1 500 m 做好技术支撑,服务国家最重要的锰矿资源基地建设,维护国家资源安全。

[参考文献]

安正泽,张仁彪,陈甲才,等. 2014. 贵州省松桃县道坨超大型锰矿床的发现及成因探讨. 矿床地质,33(4):870-884.

陈多福,陈先沛. 1992. 贵州省松桃热水沉积锰矿的地质地球化学特征. 沉积学报, 12(3):169-179.

高兴基,朱育群,邓芳荣,周琦. 1984. 《松桃地区早震旦世大塘坡期锰矿成矿地质条件及找矿方向》研究报告(未刊,贵州省地矿局 103 地质大队).

侯宗林,薛友智,黄金水,林友焕,刘红军,姚敬劬,朱恺军. 扬子地台周边锰矿. 北京:冶金工业出版社,1997. 1-351.

李任伟,张淑坤,雷加锦,沈延安,陈锦石,储雪蕾. 1996. 震旦纪地层黄铁矿硫同位素组成时一空变化特征及扬子地块与晚元古超大陆关系的论证. 地质科学, 31(3):209-217.

刘雨,周琦,袁良军,等. 2015. 黔东南大塘坡锰矿区古天然气渗漏喷溢口群发现及地质意义. 贵州地质,32(4):250-255.

刘巽锋,王庆生,高兴基,等. 1989. 贵州锰矿地质. 贵阳:贵州人

民出版社.

刘巽锋,胡肇荣,曾励训,等. 1983. 贵州震旦纪锰矿沉积相特征及其成因探讨. 沉积学报,1(4):106~116+138~139.

刘志臣,周琦,朱璐艳,陈登,汪洋,颜佳新,杜远生,袁良军,张遂. 2018. 贵州二叠纪与南华纪锰矿主要矿床地质特征对比及意义. 贵州地质(待刊).

覃英,周琦,张遂. 2005. 黔东南地区南华纪锰矿基本特征. 贵州地质,22(4):246-251.

唐世瑜. 1990. 湖南花垣民乐震旦系锰矿床同位素地质研究. 沉积学报,8(4):77-84.

汪洋,刘志臣,陈登,等. 2018. 贵州遵义二叠纪锰矿气液喷口群的发现及地质意义[J]. 贵州地质, 35(2):81-87. 81-87.

王萍,周琦,杜远生,余文超,徐源,齐靓,袁良军. 2016. 黔东南松桃地区南华纪大塘坡组锰矿硫同位素特征及其地质意义. 地球科学,2016,41(12):2031-2040.

王砚耕. 1990. 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. 岩相古地理,10(1):38-45.

王砚耕,王来兴,朱顺才,等. 1985. 贵州东部大塘坡组地层沉积环境和成锰作用. 贵阳:贵州人民出版社.

吴道生,胡克昌,韦天蛟. 1996. 中国矿床发现史·贵州卷. 北京:地质出版社.

杨炳南,周琦,杜远生,胡祥云,谢小峰,沈小庆,朱大伟,王家俊. 2015. 音频大地电磁法对深部隐伏构造的识别与应用——以贵州省松桃县李家湾锰矿为例. 地质科技情报,34(6):26-32.

杨瑞东,欧阳自远,朱立军,等. 2002. 早震旦世大塘坡期锰矿成因新认识. 矿物学报, 22(4):329-334.

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. 沉积与特提斯地质,26(2):72-80.

袁见齐,朱上庆,翟裕生. 1979. 矿床学. 北京:地质出版社,280-282.

袁良军,周琦,杜光映,张平壹. 2013. 贵州松桃西溪堡大型锰矿床 F1 犁式断层特征及对锰矿体破坏与保存作用探讨. 贵州地质,30(3):170-176.

赵东旭. 1990. 震旦纪大塘坡期锰矿的内碎屑结构和重力流沉积. 地质科学,第 2 期:149-158.

张遂,周琦,张平壹. 2015. 黔东南松桃西溪堡超大型锰矿床地质特征与找矿预测. 地质科技情报,34(6):59-67.

张飞飞,朱祥坤,高兆富,程龙,彭乾云,杨德智. 2013. 黔东南西溪堡锰矿的沉淀形式与含锰层位中黄铁矿异常高 34S 值的成因. 地质论评,59(2):274-286.

翟裕生,张湖,宋鸿林,邓军,程小久. 1997. 大型构造与超大型矿床. 北京:地质出版社,1-175.

周琦. 1989. 松桃大塘坡菱铁矿床矿枕形成机理新探. 贵州地质, 6(1):1-7.

周琦,杜远生,王家生,彭加强. 2007. 黔东南地区南华系大塘坡组冷泉碳酸盐岩及其意义. 地球科学——中国地质大学学报, 32(3):339-346.

周琦,杜远生,覃英,张命桥,候兵德. 2007. 贵州省松桃县大塘坡南华纪早期古天然气渗漏构造的发现及其地质意义. 地球科学——中国地质大学学报, 32(增刊):33-40.

周琦,杜远生,颜佳新,张命桥,尹森林. 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. 地球科学——中国地质大学学报, 32(6):845–852.

周琦,杜远生. 2012. 古天然气渗漏与锰矿成矿——以黔东南地区南华纪“大塘坡式”锰矿为例 [M]. 北京:地质出版社, 1–108.

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. 矿床地质, 32(3):457–466.

周琦,杜远生,袁良军,张遂,余文超,杨胜堂,刘雨. 2016. 黔湘渝毗邻区南华纪武陵裂谷盆地结构及其对锰矿的控制作用. 地球科学, 41(2):177–188.

周琦,杜远生,袁良军,等. 2016. 贵州铜仁松桃锰矿国家整装勘查区地质找矿主要进展及潜力预测. 贵州地质, 33(4):237–244.

周琦,杜远生,袁良军,等. 2017. 古天然气渗漏沉积型锰矿床成矿模型——以黔湘渝毗邻区南华纪“大塘坡式”锰矿为例. 地质学报, 91(10):2285–2298.

周琦,杜远生,袁良军,刘志臣,张遂,等. 2018. 贵州锰矿成因与成矿规律研究报告(未刊,贵州省地矿局 103 地质大队).

朱祥坤,彭乾云,张仁彪,安正泽,张飞飞,闫斌,李津,高兆富,覃英,潘文. 2013. 贵州省松桃县道坨超大型锰矿床地质地球化学特征. 地质学报, 87(9):1335–1348.

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

Force, E. R. and Cannon W. F. 1988. Depositional model for shallow-marine manganese deposits around black shale basins [J]. Economic Geology, 83(1):93–117.

Huckriede H, Meischner D. 1996. Origin and environment of manganese-rich sediments within black-shale basins [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 60(8):1399–1413.

Maynard, J. B. 2003. 7. 11 – Manganiferous Sediments, Rocks, and Ores. Treatise on Geochemistry. D. H. Editors-in-Chief; Heinrich and K. T. Karl. Oxford, Pergamon:289–308.

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.

Roy, S. 2006. Sedimentary manganese metallogenesis in response to the evolution of the Earth system [J]. Earth-Science Reviews, 77(4):273–305.

Wenchao Yu, Thomas J. Algeoa, Yuansheng Du, Barry Maynard, Hua Guo, Qi Zhou, Touping Peng. 2016. Genesis of Cryogenian Datangpo manganese deposit: Hydrothermal influence and episodic post-glacial ventilation of Nanhua Basin, South China. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 459:321–337.

Research History, Major Progress and Outlook of ‘Datangpo Type’ Manganese Deposit in Nanhua Period of East Guizhou and Nearby Area

ZHOU Qi¹, DU Yuan-sheng², YUAN Liang-jun³, ZHANG Sui³, YU Wen-chao²,
XIE Xiao-feng^{2,3}, YANG Bin-nan^{2,3}

(1. Guizhou Bureau of Geology and Mineral ExploraTion and Development, Guiyang 550004, Guizhou, China;
2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 3. 103 Geological
Party, Guizhou Bureau of Geology and Mineral ExploraTion and Development, Tongren 554300, Guizhou, China)

[Abstract] Manganese ore is the scare and strategic mineral of our country. Since 1958, the found of ‘Datangpo type’ manganese deposit in Datangpo area in east Guizhou, by persist efforts of three-generations geologists, it has made great breakthrough in manganese metallogenic theory, prospecting method and results, so south Guizhou became the new world-level manganese concentrated area and the most abundant area of manganese in China. In honor of 60 th anniversary of ‘Datangpo type’ manganese deposit, it will introduce the major research history, present research condition of manganese deposit in this area, meanwhile the research results and breakthrough in recent years are introduced, finally, the future is prospected and the suggestion of next step are given.

This paper is offered to pay the highest tributes to older geologists who have made outstanding contribution in Permian ‘Datangpo’ type manganese exploration in east Guizhou and its adjacent area.

[Key words] Manganese deposit; Research history; Present research condition; Prospecting outlook; East Guizhou