第 91 卷　第 10 期
2017年10月 2285～2298
地　质　学　报　ACTA GEOLOGICA SINICA
Vol. 91 No. 10 2017
Oct. 2285～2298

古天然气渗漏沉积型锰矿床找矿模型
——以黔湘渝毗邻区南华纪“大塘坡式”锰矿为例

周琦[1,3)]，杜远生[2)]，袁良军[3)]，张遂[3)]，杨炳南[2,3)]，潘文[2,3)]，余文超[2)]，
王萍[2)]，徐源[2)]，齐靓[2)]，刘雨[2)]，覃永军[1)]，谢小峰[2,3)]

1）贵州省地质矿产勘查开发局，贵阳，550003；2）生物地质与环境地质国家重点实验室，
中国地质大学，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

内容提要：产于 Rodinia 超大陆裂解背景下、武陵次级裂谷盆地中的黔湘渝地区南华纪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。通过分析总结该类型矿床地质背景、南华纪早期构造古地理与矿床地质特征，基于古天然气渗漏沉积型锰矿床的成矿模式，总结建立了该类型锰矿床找矿模型：即以南华纪早期同沉积断层、Ⅳ级断陷盆地、两界河组及其中古天然气成因的白云岩透镜体存在与否、锰矿成矿地质体与大塘坡组厚度和裂谷盆地古天然气锰矿成矿系统中渗漏喷溢中心相、过渡相、边缘相等为主要地质标志建立地质找矿模型；以Ⅳ级、Ⅲ级断陷盆地中不同的 Mn/Cr 微量元素比值指标和 $\delta^{34}S$ 值在中心相、过渡相、边缘相判别指标建立地球化学找矿模型；以锰矿成矿地质体的低电阻率、高极化率与其上覆及下伏地层高电阻率、低极化率的物性差异特征，建立 AMT 地球物理间接找矿模型。项目团队运用建立的地质、地球化学和地球物理找矿模型，在黔东地区锰矿整装勘查实践检验中，已先后新发现了亚洲最大的松桃道坨和松桃普觉（西溪堡）两个隐伏超大型锰矿床，最近又新发现松桃桃子坪、高地两个超大型锰矿床，使黔东地区成为新的世界级锰矿资源富集区。古天然气渗漏沉积型锰矿床已成为继传统的海相沉积型、沉积变质型锰矿床之后，全球最重要的三大锰矿床类型之一。

关键词：地质学；锰矿床；天然气渗漏沉积；找矿模型；南华纪；黔湘渝

锰矿是我国战略紧缺矿产。发现于上世纪 50 年代末期的黔湘渝毗邻区南华纪“大塘坡式”锰矿床，对其成因的讨论持续不断。张飞飞等（Zhang Feifei et al.，2013）借鉴 Force et al.（1988）提出的“浴缸边”模式和 Roy（2006）提出的“锰泵”模式，认为“大塘坡式”锰矿床锰质来源于大陆源风化，但该模式局限于传统的外生沉积成锰作用，仅能解释在盆地边缘形成的锰矿床，却无法解释研究区“大塘坡式”锰矿不在盆地边缘成矿，而在次级裂谷盆地中心成矿和“内成外生”的成矿规律。Liu Xunfeng et al.（1989），Yang Shaoxiang et al.（2006）考虑了锰矿体之间夹凝灰岩透镜体等因素，推测锰质来自海底火山。Wang Yangeng（1990），Chen Duofu et al.（1992），He Zhiwei et al.（2013）根据微量元素地球化学特征认为是热水沉积成因等。都是从某一方面对锰矿成因进行研究，缺乏对锰矿成矿进行系统研究，更未建立找矿预测模型以具体指导深部隐伏锰矿找矿预测工作。

Zhou Qi et al.（2007a，2007b，2007c，2012，2013）在长期探索研究过程中，发现锰矿床中分布有被沥青充填的气泡状、底劈、渗漏管、泥火山构造和软沉积变形纹理等系列罕见地质现象。通过建立在野外地质现象的事实证据基础上，结合实验室分析研究研究，发现“大塘坡式”锰矿是一种新的锰矿床类型，即裂谷盆地古天然气渗漏沉积型锰矿床，并建立了相应的成矿模式（图 3）和深部隐伏锰矿找矿模型。近年已成功指导新发现了贵州松桃道坨、普觉（西溪堡）、桃子坪和高地等四个隐伏超大型锰矿床，占全球超大型锰矿床总数的约 1/3，新增锰矿资源量超过 2011 年全国保有资源量的总和，改变了我国锰矿资源勘查开发格局。因此，研究总结该类型锰矿找矿模型，对于我国成矿背景相似的其他地区

注：本文为国土资源部公益性行业科研专项项目：“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”（编号：201411051）资助的成果。
收稿日期：2016-03-11；改回日期：2017-01-22。责任编辑：郝梓国。
作者简介：周琦，1964 年生，男，研究员。主要从事地质矿产找矿预测与研究工作。Email：103zq@163.com。

锰矿找矿提供借鉴具有重要意义。

1 研究区南华纪地质背景

Rodinia 超大陆形成于 1300～900 Ma 全球范围造山运动，从约 820 Ma 开始的全球性大陆裂谷活动，最终导致 Rodinia 超大陆裂解（Hoffman，1991；Wang Jian et al.，2009；Li Xianhua et al.，2012）。与全球新元古代构造活动相对应，我国华南的四堡造山运动发生于～820 Ma，该运动导致扬子与华夏陆块发生拼合。之后两陆块再度拉张，形成南华裂谷盆地（Wang Jian et al.，2009）。青白口纪晚期发生了雪峰造山运动（760 Ma），导致南华裂谷盆地逐渐消亡（Qin Yongjun et al.，2015）。南华纪早期（～720 Ma），南华残余盆地进一步拉张，形成了武陵与雪峰两个次级裂谷盆地形成（图 1）（Zhou Qi et al.，2016），发育以海相中粗碎屑快速沉积为主的两界河组，代表 Sturtian 冰期开启前次级裂谷盆地充填沉积。在全球性裂谷作用发育及冰期—间冰期气候交替的背景下，新元古代晚期也是全球重要的锰—铁成矿期，在巴西、纳米比亚、印度及我国华南地区，Sturtian 冰期沉积中或上覆地层均发育有 BIF 及锰矿沉积（Roy，2006；Maynard et al.，2010）。我国新元古代晚期锰矿沉积主要以菱锰矿形式赋存于大塘坡组第一段黑色页岩底部，与下伏 Sturtian 冰期铁丝坳组含砾砂岩及杂砂岩沉积区别（Qi Liang et al.，2015）。

1.1 南华纪地层特征

研究区位于黔渝湘三省毗邻区，区域内南华系自下而上依次为两界河组、铁丝坳组、大塘坡组和南沱组（Bureau of Geology and Mineral Rersources of Guizhou Provincce. 1987）（图 1 右表）。两界河组在区域上呈断续、零星分布，厚度变化大，0～388.9 m。在大塘坡两界河剖面上，两界河组下部为浅灰绿色厚层砂砾质粘土岩、含砾砂岩、岩屑砂岩夹古天然气渗漏成因的白云岩透镜体。上部为灰绿色厚层块状长石岩屑砂岩、含砾岩屑砂岩、石英砂岩。顶部夹透镜状白云岩。厚度 388.9 m，向两侧该组厚度迅速减薄，与下伏的青白口系板溪群紫红色粉砂质板岩呈不整合接触；铁丝坳组呈面状分布，下部为含砾砂岩，砾石成分复杂。中部为薄—中层含砾（“落

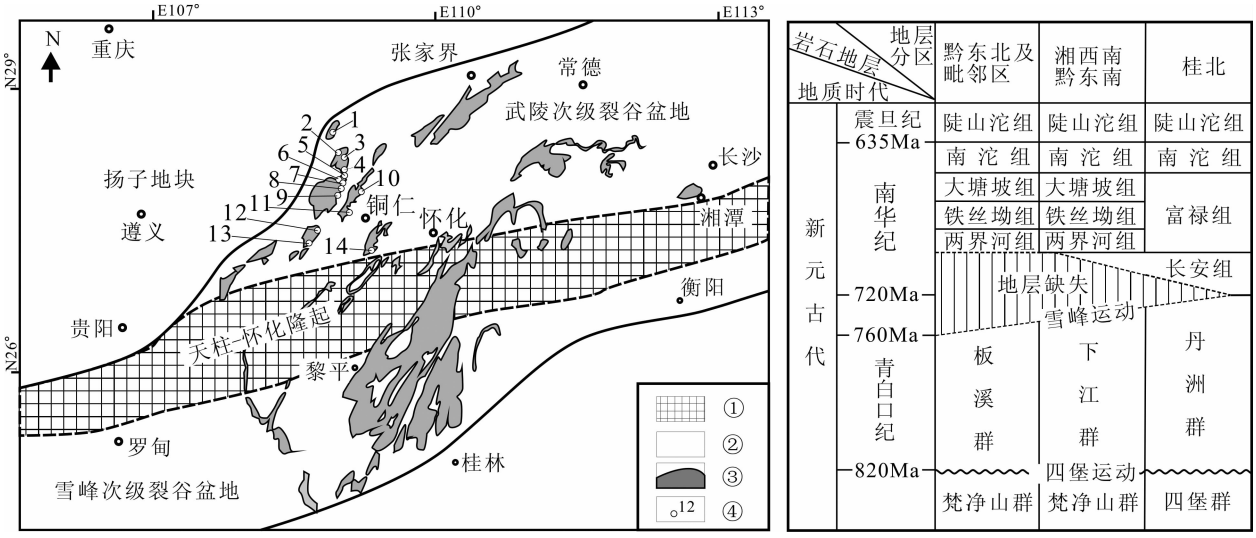

图 1 华南新元古代黔湘渝毗邻区南华纪裂谷盆地结构示意图(a)及研究区南华系地层划分方案(b)(据周琦等，2016)

Fig. 1 The geological sketch of the Early Cryogenian Nanhua rift basin in the Guizhou—Hunan—Chongqin border area, South China(a) and stratigraphic classification scheme of Nanhua Systems tratum in research area(b)(after Zhou Qi et al., 2016)

1—秀山小茶园；2—秀山盐井沟；3—秀山笔架山；4—松桃杨家湾 ZK402；5—松桃牛峰包；6—松桃道坨 ZK310；7—松桃茶叶坳 ZK108；8—松桃大屋 ZK1703；9—松桃两界河；10—松桃西溪堡 ZK1010；11—江口桃映；12—江口雷家；13—铜仁半溪；14—万山盆架山 ZK2208；①—地垒区域；②—地堑区域；③—南华—震旦系地层；④—本文图 4 中剖面编号及位置示意

1—Xiaochayuan area in Xiushan; 2—Yanjinggou area in Xiushan; 3—Bijiashan area in Xiushan; 4—drilling 402(ZK402) in Yangjiawan area, Songtao; 5—Niufengbao area in Songtao; 6—drilling310(ZK310) in Daotuo area, Songtao; 7—drilling108(ZK108) in Chayiao area, Songtao; 8—drilling1703 (ZK1703) in Dawo area, Songtao; 9—Liangjiehe area in Songtao; 10—drilling1010(ZK1010) in Xixibao area, Songtao; 11—Taoying area in Jiangkou; 12—Leijia area in Jiangkou; 13—Banxi area in Tongren; 14—drilling 2208(ZK2208) in Pengjiashan area, Wanshan; ①—Horst area; ②—Graben area; ③—Stratum of Nanhuan-Sinan System; ④—Locations and numbers of profiles of the fourth picture in this paper

石”)层纹状粘土岩、粉砂质粘土岩、长石岩屑杂砂岩、含长石石英砂岩。上部为深灰色含砾砂岩，富含星点状黄铁矿，相当于 Sturtian 冰期的冰海沉积，厚度在 2.95～23.15 m 之间变化；大塘坡组分为两段，第一段为黑色含锰岩系，主要为黑色碳质页岩，常夹黑色碳质菱锰矿透镜体，以及白云岩与凝灰岩透镜体等(Zhou Qi，1989)，构成锰矿成矿地质体。厚度 0～98.58m。该段地层区域上呈线状展布，常侧向尖灭，变化剧烈。大塘坡组第一段黑色含锰岩系底部的凝灰岩锆石 U-Pb 年龄为 663～667Ma (Zhou Chuan ming et al.，2004；Yin Chongyu et al.，2006；Yu Wenchao et al.，2016)；第二段为灰绿色层纹状粉砂质、含粉砂质粘土岩，底部为深灰色层纹层状粘土岩，局部含碳质。区域上该段地层厚度变化也较大，厚度 0 ～ 603.75m；南沱组下部为灰绿色块状含砾粉砂岩，含砾粉砂质粘土岩，局部夹白云岩透镜体。中部为灰绿色块状含砾砂岩、砂质砾岩。上部为灰绿色含砾粘土岩、含砾粉砂岩，时夹粘土岩薄层，厚度变化范围 44.91～357.39m。

1.2　南华纪早期构造古地理特征

Zhou Qi et al. (2016) 提出南华裂谷盆地(Ⅰ级)大致沿松桃—张家界—慈利深断裂带、黔阳—三江深断裂带再次发生裂陷，接受南华系沉积物沉积与演化。从北西往南东方向，进一步裂解形成了武陵次级裂谷盆地、天柱—怀化隆起和雪峰次级裂谷盆地三个Ⅱ级构造古地理单元(图 1)。

研究区主要位于武陵次级裂谷盆地(Ⅱ级)中。该次级裂谷盆地根据其中存在的若干条南华纪同沉积断层以及对沉积环境与沉积相、锰矿成矿作用的控制特征，进一步可划分为Ⅲ级、Ⅳ级断陷盆地与隆起等构造古地理单元(Zhou Qi et al.，2016)(图 2)。

2　矿床地质特征

2.1　矿体形态、产状、规模

矿体在空间上主要呈层状、似层状及透镜状产出，产状与上下围岩黑色碳质页岩基本一致。矿体分布规模总体与Ⅳ级断陷盆地的规模相当，但空间上表现为多个菱锰矿体叠合，之间为碳质页岩所分隔。一般以底部矿体规模最大。菱锰矿体组合规模的长度一般 3～5km，最长可大于 15km(如道坨、西溪堡等超大型矿床)。但宽度则局限在 3～4km，充分体现了断陷盆地控矿特征。矿体平均厚度一般 2.29～7.77m，断陷盆地中心矿体厚度可达 16m，往盆地边缘迅速变薄，而间夹的碳质页岩厚度则逐渐增加。盆地中心一般见透镜状锰矿体产出，如松桃大塘坡、秀山小茶园、花垣民乐等锰矿床。其中以松桃大塘坡锰矿床最为典型，俗称“锰枕”(Zhou Qi，1989；Qin Yin et al.，2005)，厚度一般为 0.5～4.0m，长度几米至几十米不等。透镜状菱锰矿体是裂谷盆地古天然气渗漏锰矿成矿系统中心相的主要标志之一。过渡相和边缘相则以层状、似层状锰矿体为特征(Zhou Qi et al.，2013)。

在矿床的中心区域，以一层 0.05～0.15m 厚的透镜状凝灰质粉砂岩为界，一般可将菱锰矿矿体分为上、下两层，有时可达 3～4 层。从矿床中心向外，菱锰矿矿体则逐渐变为一层，少见透镜状凝灰质粉砂岩分布。

2.2　矿物成分与化学成分

矿物组分主要由菱锰矿、钙菱锰矿、镁钙菱锰矿、硫锰矿及少量锰白云石、锰方解石、闪锌矿、火山凝灰物质等组成，含少量粘土矿物、有机碳及草莓状黄铁矿、石英、磷灰石、重晶石、绿泥石等自生矿物。从矿床中心向外，矿物具有从菱锰矿－钙菱锰矿－锰方解石－锰白云石变化的规律(Liu Xun feng et al.，1989)。

根据贵州省地矿局 103 地质大队(103 Geological Party，Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration & Development)提交的松桃道坨、西溪堡、李家湾和大塘坡等锰矿床的详查地质报告，Mn 品位一般为 15%～28%。其中：气泡状菱锰矿石最高，可达 26% ～35%。块状菱锰矿石一般为 20%～25%，条带状菱锰矿石一般为 10%～18%；具有低 Fe 高 P 的特点，Fe 含量一般 2% ～7%，P 一般 0.04% ～0.28%。SiO_2 的含量变化较大，一般为 3.34% ～17.36%。被沥青充填的气泡状矿石的 SiO_2 含量最低，条带状矿石 SiO_2 含量最高，块状矿石 SiO_2 含量介于二者之间(Zhou Qi et al.，2008，2012)。

据 Zhang Feifei et al. (2013)和 Zhu Xiang kun et al. (2013)对松桃西溪堡和道坨锰矿床的研究：锰矿石中主量元素特征为 Al_2O_3、TiO_2、Fe_2O_3 含量较低，中等程度的 P_2O_5 富集，MnO、MgO 含量相对较高，Fe/Mn 比值低。微量元素特征为 Rb、Nb 和 Pb 亏损，Co、Zn、Sr、Mo 相对富集。稀土元素总量大，REE 含量为 400×10^{-6}～ 534.33×10^{-6}，平均值为 462.43×10^{-6}，明显高于海相传统沉积型的南非古元古代卡拉哈里超大型锰矿床(18.87×10^{-6})。PAAS 标准化稀土元素配分模式呈现明显的轻、重

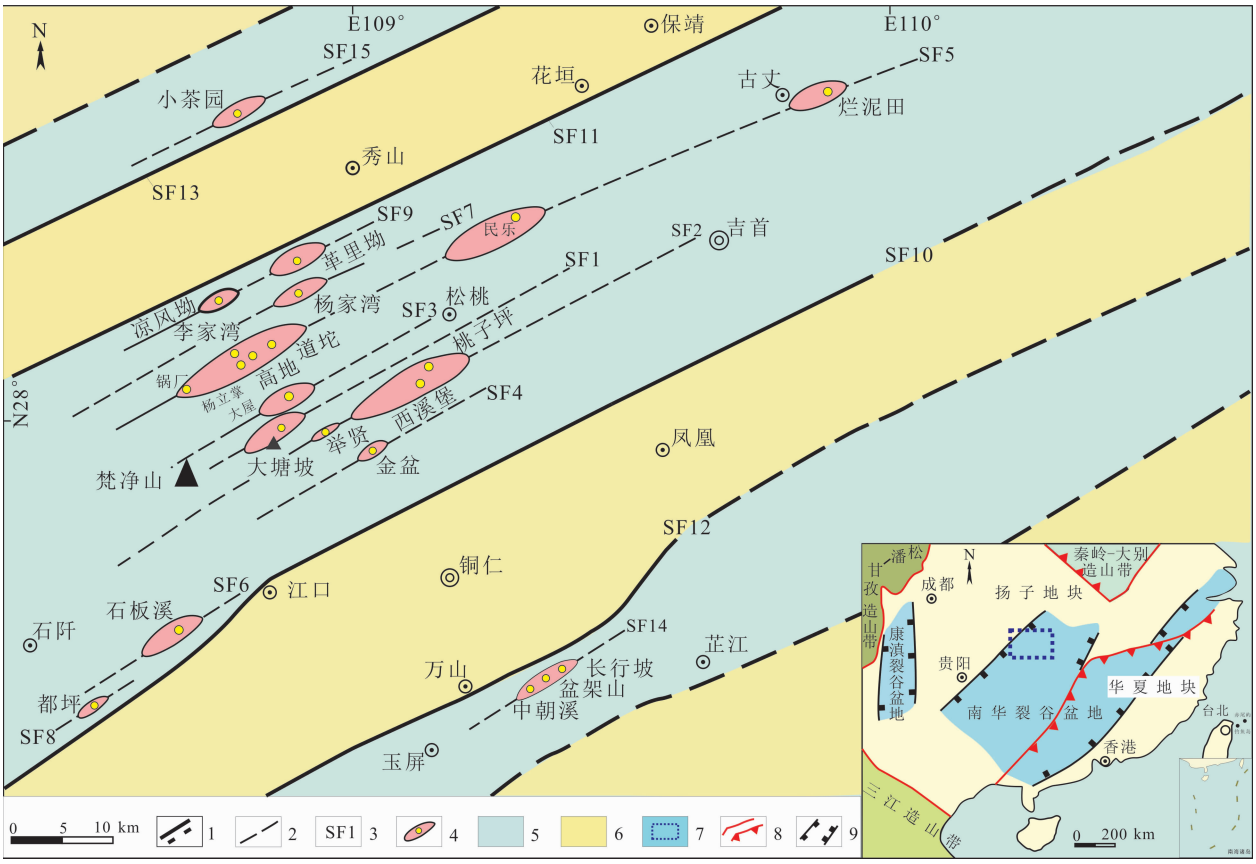

图 2 黔渝湘毗邻区南华纪早期武陵次级裂谷盆地结构与构造古地理图(据周琦等,2016)

Fig. 2 Structural and tectonic paleogeographic sketch of the Early Cryongenian Wuling Secondary Rift Basin in the Guizhou—Hunan—Chongqin Border Area, South China(after Zhou Qi et al. ,2016)

1—控制Ⅲ级断陷盆地和隆起的同沉积断层;2—控制Ⅳ级断陷盆地和隆起的同沉积断层;3—同沉积断层编号;4—Ⅳ级断陷盆地及所控制的锰矿床名称;5—Ⅲ级断陷盆地;6—Ⅲ级隆起;7—研究区大地构造位置;8—区域性断裂及地块边界;9——级裂谷盆地边界

1—III-level graben basin and ridged syn-sedimentary fault; 2—IV-level graben basin and ridged syn-sedimentary fault; 3—number of syn-sedimentary fault; 4—IV-level graben basin and its controlled manganese ore deposits; 5—III-level graben basin; 6—III-level rise; 7—tectonic position of research area; 8—Regional faults and block boundaries; 9—I-level rift basin boundaries

稀土亏损,中稀土富集,Ce 正异常和 Eu 的负异常明显。

2.3 结构与构造

矿石结构:主要为显微隐晶结构、泥晶结构,粉晶结构;矿石构造:主要有块状构造、条带状构造和被沥青充填的气泡状构造(俗称"鱼眼睛"构造)等(Zhou Qi et al. ,2007b,2013)。

古天然气渗漏喷溢沉积构造:是该类型矿床的特有构造,分布在含锰岩系底部的菱锰矿体和与之紧邻的上下碳质页岩中。如被沥青充填的气泡状构造、底辟构造、渗漏管构造、泥火山构造和软沉积变形纹理等(Zhou Qi et al. ,2007b,2013)。渗漏喷溢沉积构造是裂谷盆地古天然气渗漏锰矿成矿系统中心相的典型构造(Zhou Qi et al. ,2013)。

过去其他一些学者研究该类型锰矿的成因时,没有注意观察到断陷盆地中心区域的菱锰矿体中,出现的系列罕见渗漏喷溢沉积构造,从而认为该类型锰矿床属于普通海相沉积型锰矿的传统认识。

3 裂谷盆地古天然气渗漏锰矿成矿系统与成矿模式

Zhou Qi et al. (2007c,2013)在野外系列地质现象的事实证据的基础上,根据①菱锰矿 $\delta^{13}C$ 值集中在 −7‰～ −10‰,说明 C 来源相当稳定,具共同源区。与深部(幔源)碳同位素组成相似(−3‰～−9‰),证明锰质应来自深源;②大型—超大型锰矿床中成矿地质体下部的 Mn/Cr 微量元素比值均约为 40(详见 4.2.1),反映了 Cr、Mn 共同来自深部的信息。③Yu Wen chao et al. (2016)对菱锰矿的锶同位素分析,发现数个样品的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值低于

0.7075，也证明显示锰质与富锰流体较为强烈的深源属性。故提出裂谷盆地古天然气渗漏锰矿成矿系统与成矿模式（图 3），该成矿系统由地内子系统与表层子系统耦合构成，同沉积断层是其垂向联系的纽带，是一个“内生外成”的成矿系统。

从渗漏喷溢口向外，分别出现中心相、过渡相和边缘相环带状分带（图 3b）。渗漏沉积构造、锰品位、厚度、地球化学特征等具明显的变化规律（详见 4.1.6、4.2.2）。

4　古天然气渗漏沉积型锰矿床找矿模型

4.1　地质找矿模型

4.1.1　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因素和一种形成机制（Zhai Yusheng et al.，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，在断陷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（图 2、图 4）：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级断陷盆地中，大塘坡组第一段黑色含锰岩系（Nhd^1）厚度、大塘坡组第二段（Nh_1d^2）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（Zhang Sui，et al.，2015）；③线状展布的快速堆积（两界河组）沉积

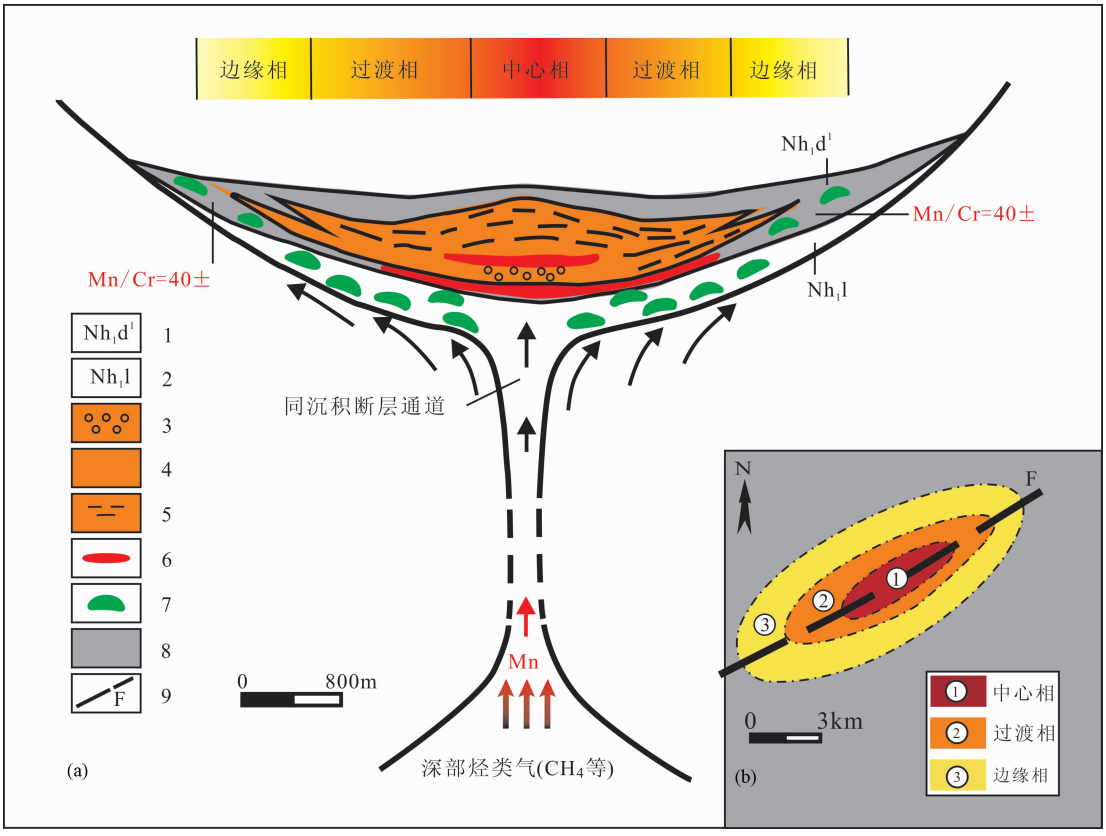

图 3　裂谷盆地古天然气渗漏锰矿成矿系统与成矿模式图（a—剖面图；b—平面图）（据周琦等，2013）

Fig. 3　Metallogenic model & ancient natural gas seep sedimentary manganese ore deposit system in rift basin (a—section figure, b—plan figure)(after Zhou Qi et al. 2013)

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

1—First part of Datangpo Group (manganese ore deposits geological body); 2—Liangjiehe Group + Tiesi'ao Group; 3—bubble shaped rhodochrosite; 4—rhodochrosite with massive structure; 5—banded rhodochrosite; 6—tuff or tuff sandstone lens; 7—ancient natural gas—genic dolomite lens; 8—carbonaceous shale; 9—syn-sedimentary fault; ①—central facies; ②—transitional facies; ③—marginal facies

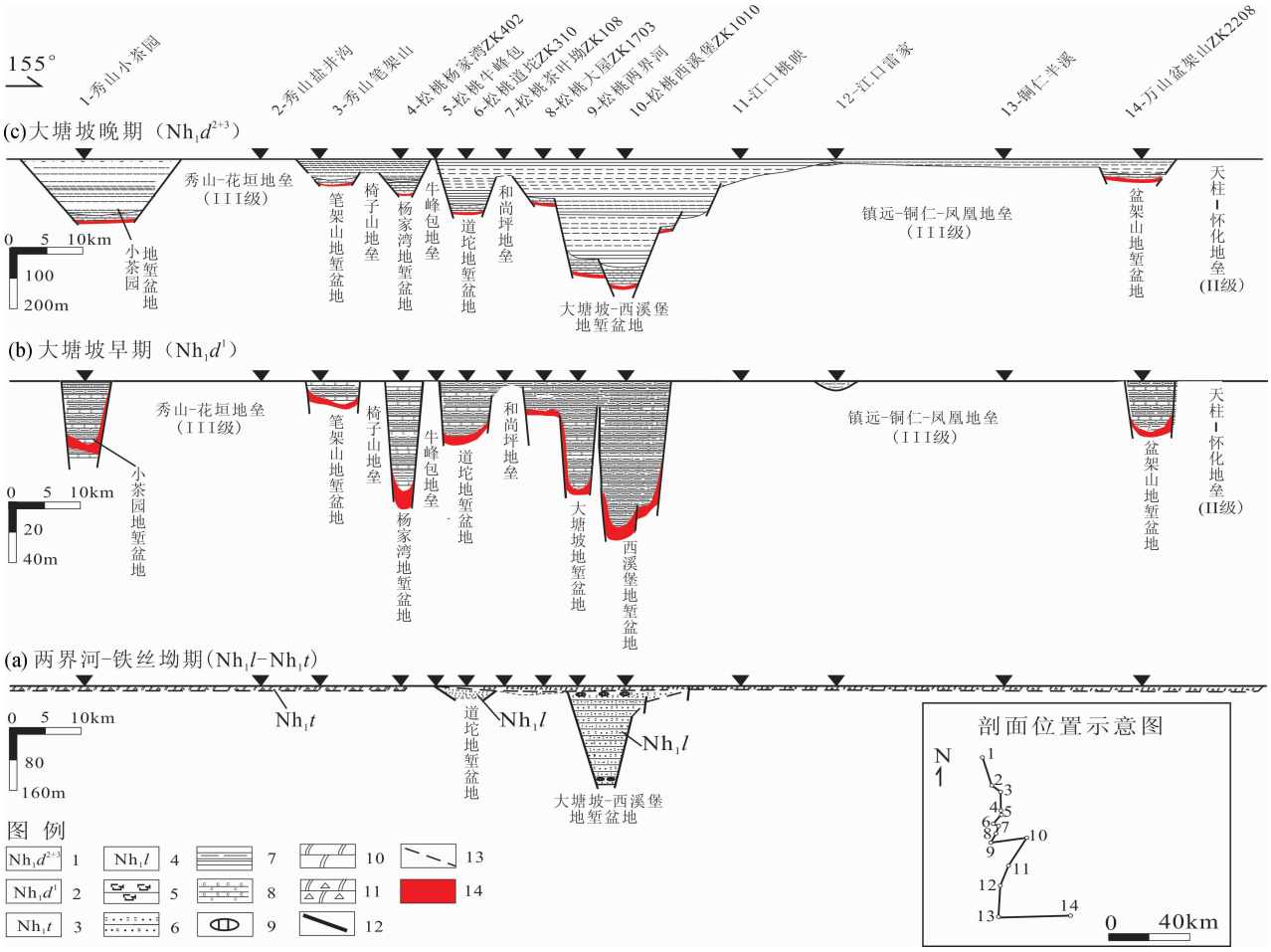

图 4 黔渝湘毗邻区武陵次级裂谷盆地盆地复原与演化图(剖面位置见图 1)(据周琦等,2016)

Fig. 4 Reconstruction of the Nanhua rift basin in the Guizhou—Hunan—Chongqin border area, South China (see locations of profiles in Fig. 1)(Zhou Qi et al. 2016)

1—大塘坡组第二三段;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

1—The second-third part of Datangpo Group; 2—first part of Datangpo Group; 3—Tiesi'ao Group; 4—Liangjiehe Group; 5—till conglomerate; 6—sandstone; 7—silty conglomerate; 8—carbonaceous shale; 9—dolomite lens; 10—dolomite; 11—gravel contained dolomite; 12—syn-sedimentary fault; 3—stratigraphic correlation line; 14—rhodochrosite

相的边界线;④在Ⅳ级断陷盆地中古天然气渗漏喷溢中心相的连线和串珠状Ⅳ级断陷盆地的连线等。

需要特别指出的是:研究区南华纪早期同沉积断层沿 NE65°～70°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°夹角。

4.1.2 Ⅳ级断陷盆地标志

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级断陷盆地控制形成锰矿成矿亚带。锰矿床则分布在Ⅳ级断陷盆地中,而在隆起区域则无锰矿体分布。因此,Ⅳ级断陷盆地是该类型锰矿床的关键地质找矿标志(图 4b)。

4.1.3 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(～720Ma)(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断陷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 130～400m。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)。

4.1.4　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(Zhou Qi et al.，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断陷盆地中形成，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(图 3)。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。

4.1.5　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，是两界河期形成的断陷盆地基础上，在大塘坡早期，沿同沉积断层继续伸展拉张、断陷沉积而成。断陷越深、则大塘坡早期锰矿成矿地质体越厚。通过同沉积断层，在Ⅳ级断陷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级断陷盆地中的黑色页岩(大塘坡组第一段)和Ⅳ级断陷盆地中的锰矿成矿地质体(含锰岩系)：Ⅲ级断陷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，大塘坡早期的断陷盆地分布范围超过了较早的两界河期断陷盆地分布范围)、黑色页岩中 Mn/Cr 微量元素比值一般小于 5；而Ⅳ级断陷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，导致位于断陷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)。

4.1.6　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级断陷盆地底部，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。

(1)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 2～10cm 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＞2.5m，最厚可达 16m。锰品位高，一般＞23%，最高＞30%；锰矿成矿地质体厚度大，一般 25～40m 左右，最厚＞90m。

(2)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 1.5～2.0m 左右。锰品位中等，一般 16%～22%左右；⑥ 含锰岩系厚度中等，一般 15～25m 左右。

(3)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，且越靠近断陷盆地边缘，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＜1.5m，品位较低，一般 10%～16%；⑥锰矿成矿地质体厚度较薄，一般 10～15m。

Liu Yu et al.(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。

4.2 地球化学找矿模型

4.2.1 Mn/Cr 比值定量预测模型

上世纪末，笔者对贵州省地矿局 103 地质大队(103 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration & Development)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大数据挖掘时，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级断陷盆地中)的成矿地质体底部(即成锰期)的碳质页岩、含锰碳质页岩中 Mn($\times10^{-6}$)与 Cr($\times10^{-6}$)平均含量的比值(Mn/Cr)均在 40 左右(图 5)。Ⅲ级断陷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级断陷盆地，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、世界第五的超大型锰矿床——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)。

4.2.2 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 δ^{34}S 正值(Tang Shi yu., 1990; Wang Yangeng., 1990; Li Ren wei. et al., 1996; Zhou Qi. et al., 2007c; 2012; 2013; Zhang Fei fei et al. 2013; Zhu Xiang kun et al. 2013)。Wang Ping et al. (2016)发现在不同的渗漏沉积相带，黄铁矿 δ^{34}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：δ^{34}S 值＞55%～60‰，渗漏喷溢口附近，δ^{34}S 值最高可达 67‰(Zhou Qi. et al., 2013)；②过渡相：δ^{34}S 值为 45%～55‰；③边缘相：δ^{34}S 值为 35%～45‰；④Ⅲ级断陷盆地：δ^{34}S 值＜25%～35‰，位于Ⅳ级断陷盆地之外的Ⅲ级断陷盆地中，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 δ^{34}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 δ^{34}S 正值逐渐减小。

4.3 AMT 地球物理间接找矿模型

研究区锰矿成矿地质体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

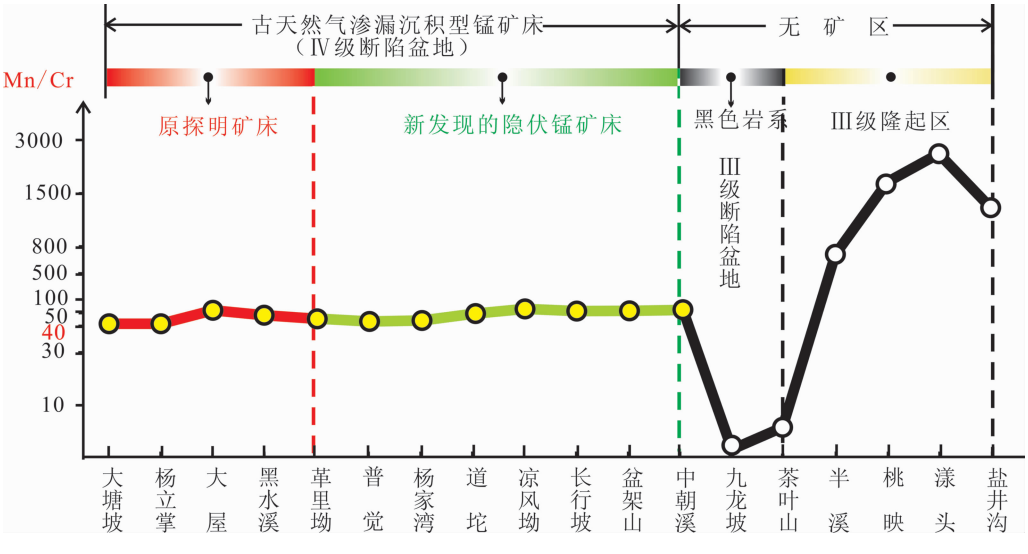

图 5 黔渝湘毗邻区古天然气渗漏沉积型锰矿床 Mn/Cr 比值找矿预测模型

Fig. 5 Ancient gas seep sedimentary manganese ore deposit exploration modal based on Mn/Cr ratio

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 Tua＝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（Yuan Liangjun et al.，2013），从而建立音频大地电磁（AMT）地球物理间接找矿模型（Yang Bingnan et al.，2015）。

5　实践检验

在建立的锰矿裂谷盆地古天然气渗漏成矿系统与成矿模式的基础上，笔者通过“实践、认识、再实践、再认识”，逐步探索总结建立了该类型锰矿床找矿模型。2010 年以来，项目团队通过贵州省地矿局 103 地质大队承担的贵州铜仁松桃锰矿国家整装勘查区进行实践检验，先后新发现了亚洲最大的贵州松桃普觉（西溪堡）、道坨两个世界级隐伏超大型锰矿床（Zhang Sui et al.，2015；An Zhengze et al.，2014）。2014 年以来，团队又新发现松桃高地、桃子坪两个隐伏世界级超大型锰矿床（Zhou Qi et al.，2016），使黔东地区新发现的超大型锰矿床达 4 个，占全球超大型锰矿床总数约三分之一（包括黔东新发现的 4 个超大型锰矿床数在内，全球仅 13 个），实现了我国锰矿找矿有史以来的最大突破，改变了我国锰矿勘查开发格局，黔东地区上升为新的世界级锰矿资源富集区和资源基地。古天然气渗漏沉积型锰矿床是中国最重要的锰矿床类型，同时是继传统的海相沉积型、沉积变质型锰矿床之后，成为全球最重要的三大锰矿床类型之一。

5.1　发现亚洲最大的松桃普觉（西溪堡）超大型锰矿床

（1）通过识别南华纪早期同沉积断层、两界河组和锰矿成矿地质体等地质找矿标志的存在与否和空间分布规律，成功预测和圈定了普觉（西溪堡）Ⅳ级断陷盆地空间分布，并经钻孔证实（Zhang Sui et al.，2015）。

一是发现普觉（西溪堡）锰矿区出现了两界河组分布，且从南东往北西不到 5km 的范围内，两界河组地层迅速增厚，如石门溪（44.05m）、西溪村（63.5m）、冷水溪（大于 90.97m，未见底），后期下院子 ZK4406 验证钻孔，两界河组厚度已达 130.00m；二是发现在同样的剖面位置上，锰矿成矿地质体（大塘坡组第一段——黑色含锰岩系）从无到有，逐渐增厚。如石门溪（0m）－西溪村（2.11m）－大雅堡（8.66m）（出现含锰白云岩透镜体）－后期下院子施工的 ZK4406 验证钻孔锰矿成矿地质体厚度已达 31.88m（出现菱锰矿体）；

（2）西溪堡剖面的 Mn/Cr 微量元素比值为 40.05，定量显示该地区存在隐伏的南华纪早期Ⅳ级含锰断陷盆地，为深部钻探验证提供了关键的地球化学依据。

（3）结合 AMT 地球物理找矿预测模型，通过 Zk1008、Zk1010 初步验证孔揭露，一是发现了菱锰矿体；二是在菱锰矿中发现了系列古天然气渗漏沉积构造，同时通过测定菱锰矿体中的 $\delta^{34}S$ 的值在＋55.53‰ ～ ＋66.76‰ 之间（Wang Ping et al.，2016），从而找到了锰矿古天然气渗漏沉积成矿系统的中心相分布区，为该预测区大规模的深部锰矿勘查工作部署提供了依据、指明了方向。

松桃普觉（西溪堡）超大型锰矿床，已备案 332＋333 类及以上锰矿石资源量逾 2 亿吨，Mn 平均品位 17.20%，系优质的湿法冶金用锰矿石。该锰矿床的发现，从本文第一作者在 1981 年底参与测制松桃西溪堡村南华系地层剖面开始，贵州省地矿局 103 地质大队经历了 35 年，最终在锰矿裂谷盆地古天然气渗漏沉积成矿系统与成矿模式、找矿预测模型的指导和实践检验过程中，隐伏在地下 1000m 之下的亚洲最大、世界第五的超大型锰矿床终于成功发现了。

5.2　发现松桃道坨、高地、桃子坪三个超大型锰矿床

在发现松桃普觉（西溪堡）超大型锰矿床的同时，项目团队在贵州铜仁松桃锰矿整装勘查区实践检验过程中，在较短的时间内，运用同样的理论和找矿预测模型，又发现了松桃道坨、高地、桃子坪三个隐伏超大型锰矿床（实践检验过程不在赘述）。

松桃道坨超大型锰矿床，备案（332＋333）类锰矿石资源量达 1.42 亿吨，Mn 平均品位 19.92%，为亚洲第二大锰矿床；松桃高地超大型锰矿床，备案锰矿石资源量为 1.17 亿吨，Mn 平均品位达 22.20%，且其中还可圈出锰品位大于 25% 和 30% 的菱锰矿富矿体，为亚洲第四大锰矿床；松桃桃子坪超大型锰矿床，备案锰矿石资源量为 1.06 亿吨，为亚洲第五大锰矿床。

松桃高地、松桃道坨超大型锰矿床位于南华纪

李家湾—高地—道坨Ⅳ级断陷盆地，松桃桃子坪超大型锰矿床与松桃普觉(西溪堡)超大型锰矿床则位于南华纪西溪堡—寨英Ⅳ级断陷盆地中。目前，这两个南华纪Ⅳ级断陷盆地已分别提交备案的锰矿石详查资源量逾3亿吨，新增总的详查资源量逾6亿吨。预测仅这两个Ⅳ级断陷盆地，其总的锰矿石资源潜力可超过10亿吨。

6 结论

(1)华南黔渝湘地区南华纪“大塘坡式”锰矿，是一种新的锰矿床类型，即古天然气渗漏沉积型锰矿床。它形成于独特的裂谷盆地古天然气渗漏沉积成矿系统，锰质与烃类气(流)体均来自深部。该成矿系统由地内子系统与表层子系统耦合构成，同沉积断层是其垂向联系的纽带，是一个“内生外成”的成矿系统。

(2)富锰的气(流)体沿同沉积断层迅速上升至由其控制形成的断陷盆地中，发生大规模的喷溢、渗漏成锰作用。沿喷溢口分别出现中心相、过渡相和边缘相三个古天然气渗漏喷溢相带，其中渗漏喷溢沉积构造、锰矿矿石类型与结构构造、锰品位、硫同位素地球化学特征和凝灰岩透镜体等具明显的空间分布变化规律。

(3)依据锰矿裂谷盆地古天然气渗漏沉积成矿系统与成矿模式，建立了古天然气渗漏沉积型锰矿床找矿预模型。即地质模型：南华纪早期同沉积断层、南华纪早期Ⅳ级断陷盆地、两界河组、古天然气渗漏成因的白云岩透镜体、锰矿成矿地质体与大塘坡组厚度、渗漏喷溢中心相/过渡相/边缘相等地质标志；地球化学模型：Mn/Cr 微量元素比值标志、硫同位素标志；AMT 地球物理间接找矿模型。

(4)建立的古天然气渗漏沉积型锰矿床找矿预模型通过了贵州铜仁松桃锰矿国家整装勘查区的实践检验，新发现了松桃普觉(西溪堡)、松桃道坨、松桃桃子坪和松桃高地四个隐伏的世界级超大型锰矿床和六个大中型锰矿床。实现了我国锰矿找矿有史以来的最大突破，改变了锰矿资源勘查开发格局。

(5)古天然气渗漏沉积型锰矿床是中国最重要的锰矿床类型，同时是继传统的海相沉积型、沉积变质型锰矿床之后，成为全球最重要的三大锰矿床类型之一。

References

An Zhengze, Zhang Renbiao, Chen Jiacai, Qin Ying, Pan Wen, Wu Guiwu, Peng Qianyun, Zheng Chao, Zhang Feifei, Zhu Xiangkun, Wang Haibin, 2014. Geological and geochemical characteristics of Daotuo superlarge manganese ore deposit in Songtao County of Guizhou Province: constraint on formation mechanism of Mn_carbonate ores. Mineral Deposits. 33 (4): 870～884(in Chinese with English abstract).

Bureau of Geology and Mineral Rersources of Guizhou Provincce (BGMRGZP). 1987. Regional geology of the Guizhou Province. In: Geological Press House, Beijing. (in Chinese).

Du Yuansheng, Zhou Qi, Yu Wenchao, Wang Ping, Yuan Liangjun, QiLiang, GuoHua, Xu Yuan. 2015. Linking the cryogenian manganese metallogenic process in the southeast margin of Yangtze Bolck to break-up of Rodinia supercontinent and Stertian Claciation. Geological Science and Technology Information, 34(6):1～7 (in Chinese with English abstract).

Chen Duo fu, chen Xian pei. 1992. Geological and geochemicai characteristices of Songtao hydrothermal sedimentary mangenes deposits, Guizhou. Acta Sedimentologica Sinica. 10 (4): 35～43.

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

He Zhiwei, Yang Ruidong, Gao Junbo, Cheng Wei, Zhang Renbiao and Zhang Pingyi. 2013. Sedimentary geochemical characteristics of manganese deposits in Xixibao, Songtao County, Guizhou Province. Geochimica, 42(6): 576～588 (in Chinese with English abstract).

Hoffman P F. 1991. Did the breakout of laurentia turn Gondwanaland inside-out?. Science, 252(5011): 1409～1412.

Li Renwei, Zhang Shuakun, Lei Jiajin, Shen Yanan, Chen Jinshi, Chu Xuelei. 1996. Temporal andspacial variation in δ^{34}S values of pyrite from Sinian strata discussion on relationship between Yangtze Block and the Late Proterozoic supercontinent. Scienta Geologica Sinica, 31(3): 209～217 (in Chinese with English abstract).

Li Xianhua, Li Wuxian He Bin. 2012. Building of the south China block and Its relevance to assembly and breakup of Rodinia supercontinent: observations, Interpretations and tests. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 31(6): 543～559. (in Chinese with English abstract).

Liu Yu, Zhou Qi, Yuan Liangjun, Zhang sui, Wang Ping. 2015. The found of the ancient natural gas leakage sparay overflow port Group and its geological significance in Datanpo mining of east Guizhou. Guizhou Geology, 32(4): 250～255(in Chinese with English abstract).

Liu Xuanfeng, Wang Qinsheng, Gao Xingji。1989. Mangananese deposit of Guizhou. Guiyang: Guizhou People's Press House(in chinese).

Maynard J B. 2010. The chemistry of manganese ores through time: a signal of increasing diversity of Earth-surface environments.

Economic Geology, 105(3): 535～552.

Qi Liang, Yu Wenchao, Du Yuansheng, Zhou Qi, Guo Hua, Wang Jiawu, Wang Ping, Xu Yuan. 2015. Ppaleoclimate evolution of the cryogenian Tiesi' ao formation Datangpo formation in eastern Guizhou province: evidence from the chemical index of aiteration. Geological Science and Technology Information, 34(6): 47～57(in Chinese with English abstract).

Qin Yongjun; Du Yuansheng; Mou Jun; Lu Dingbiao; Long Jianxi; Wang Anhua; Zhang Housong; Zeng Changxing. 2015. Geochronology of neoproterozoic Xiajiang Group in southeast Guizhou south China, and its geological implications. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 40(7): 1107～1120(in Chinese with English abstract).

Qin Ying, Zhou Qi, Zhang Sui. 2005. Elementary properties of manganese of Nh in the northeastern Guizhou. Guizhou Geology, 22(4): 246～251 (in Chinese with English abstract).

Qin Ying, An Zhengze, Wang Jiawu, Li Daiping. 2013. The discovery and geological characteristics of the super-large sized Daotuo manganese deposit in Songtao, Guizhou. Mineral Exploration, 4(4): 345～355 (in Chinese with English abstract).

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

Tang Shiyu. 1990. Isotope geological study of manganese deposit in Ainle area, Hunan province. Acta Sedimentologica Sinica. 8(4): 77～84 (in Chinese with English abstract).

Wang Jian and Pan Guitang. 2009. Neoproterozoic south China palaeocontinents: an overview. Acta Sedimentologica Sinica, 27(5): 818～825. (in Chinese with English abstract).

Wang Ping, Zhou Qi, Du Yuansheng, Yu Wenchao, Xu Yuan, QiLiang, Yuan Liangjubn. 2016. Characteristics of the sulfur isotope in pyrite from the Datangpo formination in Songtao area, east Guizhou province and its geological significance. Earth science, 41(12): 2031～2040(in Chinese with English abstract).

Wang Yangeng. 1990. Old hot brone manganese deposits in a Shallow-sea rift basin: an example from the sinian manganest deposits in the Wuling mountain area. Lithofacies and Paleogeography, 10(1): 38～45 (in Chinese with English abstract).

Yang Bingnan, Zhou Qi, Du Yuansheng, Hu Xiangyun, Xie Xiaofeng, Sheng Xiaoqing, Zhou Dawei, Wang Jiajun. 2015. Identification and application of audio magnetotellurice the deep buried structure: a case study of Lijiawan manganese deposit at Songtao County in Guizhou province. Geological Science and Technology Information, 34(6): 26～32 (in Chinese with English abstract).

Yang Shaoxiang, Lao Ketong. 2006. Mineralization model for the manganese deposits in northwestern Hunan: an example from minle manganese deposit in Huayuan, Hunan. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 26(2): 72～80 (in Chinese with English abstract).

Yin Chongyu, Wang Yangeng, Tang Feng, Wan Yusheng, Wang Ziqiang, Gao linzhi, Xian Yusheng, Liu Pengju, 2006. SHRIMP Ⅱ U-Pb Zircon date from the Nanhuan Datangpo formation in Songtao county, Guizhou province. Acta Geologica Sinica, 80(2): 273～278. (in Chinese with English abstract).

Yu Wenchao, Du Yuansheng, Zhou Qi, Peng Touping, Wang Ping, Yuan Liangjun, Xu Yuan, Pan Wen, Xie Xiaofeng, Qi Liang, Jiao Liangxuan. 2016. Provenance of the Nanhuan Datangpo Fm. Mn deposit in Songtao area, east Guizhou province: evidence from Sr isotope study. Earth cience. 41(7): 1～11 (in Chinese with English abstract).

Yu Wenchao, Du Yuansheng, Zhou Qi, Wang Ping, Yuan Liangjun, Xu Yuan, Pan Wen, Xie Xiaofeng, Qi Liang, Jiao Liangxuan。2016. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating from the Nanhuan Databfpo formation in Songtao area, east Guizhou and its geological significance. Geological Review, 62(3): 539～549 (in Chinese with English abstract).

Yuan Liangjun, Zhou Qi, Du Yuansheng, Zhang Pingyi. 2013. Characters of F_1 Plow, destruction and conservation to manganese body of Xisibao big manganese deposit of Songtao in Guizhou. Guizhou Geology, 30(3): 170～176 (in Chinese with English abstract).

Zhai Yusheng, Zhang Hu, Zhu Honglin, Deng Jun, Cheng Xiaojiu. 1997. The macrostructure and super iarge deposit. In: Geological Press House, Beijing, 1～175 (in Chinese).

Zhang Feiei, Ni Bing, Guo Yueling, Zhu Xiangkun, Zhou qi, Yang Dezhi. 2013. Precipitation form of manganese ore deposit in Gucheng, Hubei province, and its paleoenvironment implication. Acta Geologica Sinica, 87(2): 245～258. (in Chinese with English abstract).

Zhang Qiurui, Li Xianhua, Feng L J. 2008. A new age constraint on the onset of the Neoproterozoic glaciations in the Yangtze platform, South China. The Journal of Geology, 116(4): 423～429.

Zhang Sui, Zhou Qi, Zhang Pingyi, Shen Hongqian, Du Yuansheng. 2015. Geological characteristics and prospecting prediction of Xixibao Super-large manganese deposit Songtao, eastern Guizhou。Geological Science and Technology Information, 34(6): 8～16(in Chinese with English abstract).

ZhouChuanming, Tucker R, Xiao shuhai, Peng Zhanxiong, Yuan Xunlai, Chen Zhe. 2004. New constraints on the ages of Neoproterozoic glaciations in south China. Geology, 32(5): 437～440.

Zhou Qi. 1989. A perlimilary disscussion on the formation mechanism of ore pillows of Datangpo rhodochrosite deposit in Songtao country, Guizhou province. Geology of Guizhou, 6

(1): 1～7+95. (in Chinese with English abstract).

Zhou Qi, Du Yunsheng, Wang Jiasheng, Peng Jiaqiang. 2007a. Characteristics and significance of the cold seep carbonates from the Datangpo formation of the Nanhua Series in the Northeast of Guizhou. Earth Scicnce-Journal of China University of Geosciences, 32(3): 339～346 (in Chinese with English abstract).

Zhou Qi, Du Yuansheng, Qin Ying, Zhang Mianqiao, Hou Bingde. 2007b. The discovery of structures of ancient gas seep from the early Nanhua in Datangpo, Songtao county, Guizhou province and its geological significance. Earth Scicnce——Journal of China University of Geosciences, 32(suppl): 1～8(in Chinese with English abstract).

Zhou Qi, Du Yuansheng. Yan Jiaxin, Zhang Mianqiao, Yin Senglin. 2007c. Geological and geochemical characteristics of the cold seep carbonates in the early Nanhua system in Datangpo, Songtao, Guizhou province. Earth Scicnce——Journal of China University of Geosciences, 32(6): 845～852(in Chinese with English abstract).

Zhou Qi. 2008. Geologieal and geochemical characteristics of cold seek carbonates of Neoproterozoic Nanhua period and their significance for manganese ore deposits in east Guzhou. Doctor Dissertation of ChinaUniversity of Geoscienes (in Chinese with English abstract).

Zhou Qi and Du Yuansheng. 2012. Palaeo-gas seek and manganese metallogeny. Beijing: Geological Press House(in Chinese with English abstract).

Zhou Qi, Du Yuansheng, Qin Yin. 2013. Ancient natural gas seepage sedimentary-type manganese metallogenic system and ore-forming model: a case study of 'Datangpo type' manganese deposits formed in rift basin of Nanhua Period along Guizhou—Hunan—Chongqing. Mineral Deposits, 32(3): 457～466 (in Chinese with English abstract).

Zhou Qi, Du Yuansheng, Yuan Liangjun, Zhang Sui, Yu Wenchao, Yang Shengtang, Liu Yu. 2016. The Structure of the Wuling Rift Basin and its control on the manganese deposit during the Nanhuan period in Guizhou—Hunan—Chongqing border area, South China. Earth science, 41(2): 177～188(in Chinese with English abstract).

Zhou Qi, Du Yuansheng, Yuan Liangjun, Zhang Sui, An Zhengze, Pan Wen, Yang Bingnan, Xie Xiaofeng, Yu Wenchao. 2016. Dominant Improvements & Potentiality Prediction of Geological Prospecting in the National Package Exploration Area at Songtao County, the city of Tongren, Guizhou Province. Geology of Guizhou, 33(4): 237～244. (in Chinese with English abstract).

Zhou Chuanming. 2016. Neoproterozoic lithostratigraphy and correlation across the Yangtze Block, South China. JOURNAL OF STRATIGRAPHY, 40(2): 120～1358(in Chinese with English abstract).

Zhu Xiangkun, Peng Qianyun, Zhang Renbiao, An Zhengze, Zhang Feifei, Yan Bin, Li Jin, Gao Zhaofu, Qin Ying, Pan Wen. 2013. Geological and geochemical characteristics of the Daotuo Super-Large manganese ore deposit at Songtao countey in Guizhou province. Acta Geologica Sinica, 87(9): 1335～1348 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

安正泽，张仁彪，陈甲才，覃英，潘文，吴桂武，彭乾云，郑超，张飞飞，朱祥坤，王海宾. 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(1): 169～179.

杜远生，周琦，余文超，王萍，袁良军，齐靓，郭华，徐源. 2015. 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. 地质科技情报，34(6): 1～7.

贵州省地质矿产局. 1987. 贵州省区域地质志. 北京，地质出版社.

何志威，杨瑞东，高军波，程伟，张仁彪，张平壹. 2013. 贵州松桃西溪堡锰矿沉积地球化学特征. 地球化学，42(6): 576～588

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—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

李献华，李武显，何斌. 2012. 华南陆块的形成与 Rodinia 超大陆聚合—裂解——观察、解释与检验. 矿物岩石地球化学通报，31(6): 543～559.

刘巽锋，王庆生，高兴基. 1989. 贵州锰矿地质. 贵阳：贵州人民出版社.

刘雨，周琦，袁良军，张遂，王萍. 2015. 黔东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.

齐靓，余文超，杜远生，周琦，郭华，王佳武，王萍，徐源. 2015. 黔东南华纪铁丝坳组—大塘坡组古气候的演变：来自 CIA 的证据. 地质科技情报，34(6): 47～57.

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

覃英，安正泽，王佳武，李代平. 2013. 贵州松桃锰矿整装勘查区道坨隐伏超大型锰矿床发现及地质特征. 矿产勘查，4(4): 345～355.

覃永军，杜远生，牟军，卢定彪，龙建喜，王安华，张厚松，曾昌兴. 2015. 黔东南地区新元古代下江群的地层年代及其地质意义. 地球科学——中国地质大学学报，40(7): 1107～1120.

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.

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.

王剑，潘桂棠. 2009. 中国南方古大陆研究进展与问题评述. 沉积学报，27(5): 818～825.

王萍，周琦，杜远生，余文超，徐源，齐靓，袁良军. 2016. 黔东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，41(12): 2031～2040..

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.

尹崇玉，王砚耕，唐烽，万渝生，王自强，高林志，邢裕盛，刘鹏举. 2006. 贵州松桃南华系大塘坡组凝灰岩锆石 SHRIMPⅡ U-Pb 年龄. 地质学报，80(2)：273～278.

余文超，杜远生，周 琦，彭头平，王 萍，袁良军，徐 源，潘文，谢小峰，齐靓. 2016. 黔东松桃南华系大塘坡组锰矿层物源：来自 Sr 同位素的证据. 地球科学. 41(7)：1～11.

余文超，杜远生，周琦，王萍，袁良军，徐源，潘文，谢小峰，齐靓，焦良轩. 2016. 黔东松桃地区大塘坡组 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地质论评，62(3)：539～549.

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.

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.

张遂，周琦，张平壹，沈红钱，杜远生. 2015. 黔东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)：8～16.

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

周琦. 1989. 松桃大塘坡菱锰矿床矿枕形成机理初探. 贵州地质，6(1)：1～7＋95.

周琦，杜远生，王家生，彭加强. 2007a. 黔东北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. 2007b，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. 2007c. 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. 2008. 黔东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矿意义. 博士学位论文，中国地质大学.

周琦，杜远生 2012. 古天然气渗漏与锰矿成矿. 北京：地质出版社.

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，张遂，安正泽，潘文，杨炳南，谢小峰，余文超. 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，2016，33(4)：237～244.

周传明. 2016. 扬子区新元古代前震旦纪地层对比. 地层学杂志，40(2)：120～135.

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.

Exploration Models of Ancient Natural Gas Seep Sedimentary-type Manganese Ore Deposit: A Case Study of the Nanhua Period "Datangpo" Type Manganese Ore in the Conjunction Area of Guizhou, Hunan and Chongqing

ZHOU Qi[1,3], DU Yuansheng[2], YUAN Liangjun[1], ZHANG Sui[1], YANG Binnan[2,3], PAN Wen[2,3], YU Wenchao[2], WANG Ping[2], XUE Yuan[2], QI Liang[2], LIU Yu[2], QING Yongjun[1], XIE Xiaofeng[2,3]

1) *Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development*, *Guiyang* 550003, *Guizhou*, *China*;

2) *State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology*, *China University of Geosciences*, 430074, *Wuhan*, *Hubei*, *China*;

3) 103 *Geological Party*, *Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration & Development*, *Tongren* 554300, *Guizhou*, *China*

Abstract

The Nanhua "Ancient Natural Gas Seep Sedimentary Manganese Ore Deposit" is located in the sub-rifting basin of Wuling in the conjunction area of Guizhou, Hunan and Chongqing. It formed in the extension background of Rodinia super continent and has become the most important Mn ore deposit in China.

Through summarizing the geological setting of the ore deposit, and paleogeographical and geological features of structure and ore deposit in Early Nanhua period, we established the exploration models of this ore deposit based on the metallogenic model of "Ancient Natural Gas Seep Sedimentary Manganese Ore Deposit". Models include: (1) Geological exploration model based on characteristics of the Early Nanhua Period syn-sedimentary faults and secondary graben basins, the existence of ancient natural gas-hosted dolomite lens of the Liangjiehe Group, geological bodies of manganese ore deposit, the thickness of Datangpo Group strata, and central, transitional and marginal facies of seep eruption. (2) Geochemical exploration model based on distinguishable Mn/Cr ratio in samples from IV and III rift basins and distinguishable sulfur isotopic signatures in different facies (central facies, transitional facies and marginal facies). (3) AMT (Audio-frequency Magnetotellurics) geophysical exploration model based on physical property differences between Mn-bearing rocks (low electrical resistivity, high polarizability) and its overlying and underlying strata (high electrical resistivity and low polarizability). Through application of this exploration models, our research group has successively discovered two super-large concealed manganese ore deposits in Daotuo and Xixipu of Songtao, Guizhou Province, which are also two super-large concealed manganese ore deposits in Asia. Recently, another two super-large massive manganese ore deposits were discovered in Guizhou Province, which has made eastern Guizhou Province a new world-class manganese ore resource-abundant region. The Ancient Natural Gas Seep Sedimentary Manganese Ore Deposit has become one of the most significant three manganese deposits in the world, after traditional marine deposits and sedimentary metamorphism deposits.

Key words: geology; manganese deposit; natural gas seep; exploration model; Nanhua Period; conjunction area of Guizhou—Hunan—Chongqing