

DOI: 10.12474/cdlgzrxx.2026042501



喷溢沉积型锰矿床成矿模式、 勘查方法与找矿进展

周 琦^{1, 2, 3}, 刘 雨^{1, 2, 3}

1. 贵州省智能找矿勘查实验室, 贵阳 550081;

2. 贵州省地质调查院自然资源部基岩区矿产资源勘查工程技术创新中心, 贵阳 550081;

3. 贵州省战略矿产智慧勘查全省重点实验室, 贵阳 550081

[摘要] 喷溢沉积型锰矿床是中国最重要的一种锰矿床类型,是在“裂谷盆地-传输通道-含锰流体”三元共控机制下,深部含锰流体短时大规模喷溢沉积成矿的产物,主要分布在贵州、湖南、重庆及毗邻地区。该类型锰矿是在 Rodinia 超大陆裂解背景下,南华裂谷武陵次级裂谷中心发生大规模喷溢沉积成矿作用而形成,基于此锰矿喷溢沉积成矿系统新模式得以创立。在该成矿模式的指导下,近年来在黔东南地区发现并提交了 4 个世界级隐伏超大型锰矿床和一批大-中型锰矿床,成为国际矿床学界为数不多的先建立原创理论,后指导找到世界级隐伏大矿的成功范例之一。本文在介绍喷溢沉积型锰矿成矿模式的基础上,对该类型锰矿喷溢沉积成矿过程,包括裂谷演化与喷溢-沉积成矿旋回、流体底辟-喷溢构造系统和富菱锰矿体中气泡状构造等方面研究的最新进展进行了介绍。依托喷溢沉积型锰矿成矿新模式,研发了喷溢沉积型锰矿找矿勘查技术体系,包括沉积盆地分析、多尺度三维建模、地球物理探测、地球化学探测、喷溢沉积矿石相判别、智能找矿预测、数字勘查等,对通过转化应用,实现中国锰矿找矿历史性突破进行了介绍,并对其他地区具有相似锰矿成矿地质背景的推广应用进行了展望。

[关键词] 锰矿; 喷溢沉积型; 成矿模式; 勘查技术方法; 找矿进展

[分类号] P618.32

[文献标志码] A

Metallogenic model, exploration methods, and prospecting progress of exhalative sedimentary manganese deposits

ZHOU Qi^{1, 2, 3}, LIU Yu^{1, 2, 3}

1. Guizhou Provincial Laboratory of Intelligent Prospecting and Exploration, Guiyang 550081, China;

2. Engineering Technology Innovation Center for Mineral Resources Exploration in Bedrock Zones, Ministry of Natural Resources, Guiyang 550081, China;

3. Guizhou Key Laboratory for Strategic Mineral Intelligent Exploration, Guiyang 550081, China

Abstract: Exhalative sedimentary manganese deposits represent one of the most important manganese deposit types

收稿日期: 2026-04-25; **改回日期:** 2026-06-10。 **责任编辑:** 魏 巍。 **期刊主页:** <https://xbzrxx.cdut.edu.cn/>

基金项目: 贵州省重大科技专项(黔科合重大[2025]016); 贵州省科技计划项目(黔科补平台 SSYS[2026]002; 黔科合平台人才 ZDSYS[2023]005); 贵州省科技创新人才团队建设项目(黔科合人才 CXTD[2025]026)。

第一作者: 周琦(1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向: 矿产资源勘查与研究, E-mail: 103zq@163.com。

引用格式: 周琦, 刘雨, 2026. 喷溢沉积型锰矿床成矿模式、勘查方法与找矿进展 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 53(4): 725—740.

Zhou Q, Liu Y, 2026. Metallogenic model, exploration methods, and prospecting progress of exhalative sedimentary manganese deposits[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 53(4): 725—740.

in China. They are interpreted as the products of rapid and large-scale exhalative sedimentation of deep Mn-bearing fluids. Their formation was controlled by a coupled “rift basin–transport conduit–Mn-bearing fluid” system. These deposits are mainly distributed in Guizhou, Hunan, Chongqing, and adjacent regions. This type of manganese deposit formed during the breakup of the Rodinia supercontinent. Large-scale exhalative sedimentary manganese mineralization occurred in the central part of the Wuling secondary rift within the Nanhua rift. Based on these studies, a new metallogenic model for exhalative sedimentary manganese systems has been established. Guided by this theoretical framework, four world-class concealed extra-large manganese deposits and a series of large- to medium-sized manganese deposits have recently been discovered in eastern Guizhou. This represents one of the few successful international examples in which an original metallogenic theory directly guided the discovery of concealed world-class giant ore deposits. Based on the metallogenic model of exhalative sedimentary manganese deposits, this paper presents recent advances in research on the metallogenic processes of these deposits, including rift evolution and exhalative sedimentary metallogenic cycles, fluid diapiric exhalative structural systems, and bubble-like structures in rhodochrosite-rich orebodies. Based on the new metallogenic model, a technical system for manganese deposit exploration and prospecting has been developed, including sedimentary basin analysis, multi-scale three-dimensional geological modeling, geophysical and geochemical exploration, discrimination of exhalative sedimentary ore facies, intelligent mineral prospectivity prediction, and digital exploration techniques. Historic exploration breakthroughs related to this deposit type are also reviewed. Finally, the potential application of this metallogenic model and exploration framework to other regions with comparable manganese metallogenic settings is discussed.

Key words: manganese deposit; exhalative sedimentary type; metallogenic model; exploration technique; exploration progress

长期以来,以别捷赫琴(1957)、Roy(1988)、Maynard(2010)等为代表的锰矿地质学家普遍认为,沉积型锰矿床是锰矿最重要的矿床类型。菱锰矿大规模成矿主要是外生沉积成矿作用的产物,锰质主要来自大陆风化以及海底热液等。代表性的锰矿成因模式有“沉积锰矿相变成矿”模式(别捷赫琴, 1957)、“浴缸边”模式(Force and Cannon, 1988)、“波罗的海”模式(Huckriede and Meischner, 1996)、“锰泵”模式(Roy, 1988, 1992, 2006)和“最小氧化带”模式(Maynard, 2003, 2010, 2014)等,锰矿地质学家对沉积型锰矿床的矿物学与地球化学特征(Johnson et al., 2016; Garnit et al., 2020)、微生物成矿作用(Shiraishi et al., 2019; Yu et al., 2019; 余文超等, 2020)、氧化还原条件(Ossa et al., 2018; Wittkop et al., 2020)进行过不同程度的研究。

喷溢沉积型锰矿床是在中国华南地区新发现的一种锰矿床类型,初期曾称“古天然气渗漏沉积型锰矿床”(周琦等, 2013, 2016, 2017, 2018),主要分布在贵州、湖南、重庆及毗邻地区,即著名的中国“大塘坡式”锰矿床。该类型锰矿床长期被认为是外生沉积型锰矿床(刘巽锋等, 1983; 何明华, 2001; Xiao et al., 2017; Peng et al., 2019)。周琦(1989)曾提出该锰矿成矿物质来源于海底

火山喷发,并对菱锰矿和“锰矿枕”的形成机理进行了探讨。近年来研究认为:中国南华纪“大塘坡式”锰矿床形成于Rodinia超大陆裂解背景下,是南华裂谷中含锰流体喷溢沉积成矿作用的产物。南华裂谷西段由武陵、雪峰次级裂谷和天柱—怀化地垒等3个Ⅱ级构造单元组成,锰矿大规模喷溢沉积成矿作用主要发生在武陵次级裂谷中(周琦等, 2016; Zhou et al., 2022)(图1)。

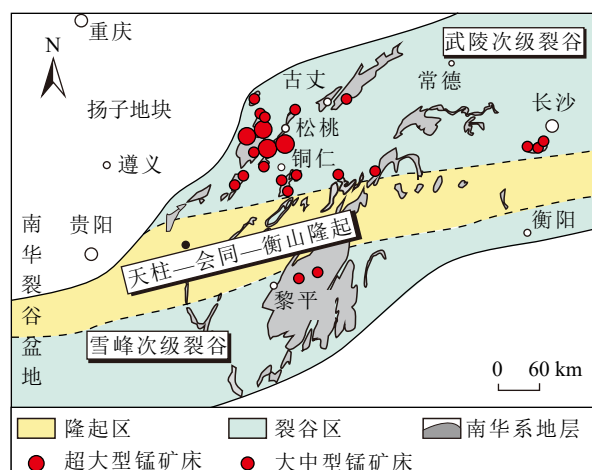


图1 中国“大塘坡式”锰矿分布与成矿地质背景 (周琦等, 2016)

Fig. 1 Distribution and geological setting of Datangpo-type manganese deposits in China

中国南华纪“大塘坡式”锰矿,即喷溢沉积型锰矿床的锰质来自岩石圈深部,通过“裂谷盆地-传输通道-含锰流体”三元共控的成矿机制形成的菱锰矿床。在剖面上,该类型矿床自下而上出现基于底辟-喷溢构造系统的积木式矿石相垂向分带。平面上则出现中心相富菱锰矿→过渡相中品位菱锰矿→边缘相低品位菱锰矿的同心椭圆状矿石相分带。中心相出现“气泡状”富菱锰矿石,“气泡”呈游离状或充填在白色顺层细脉中,外壳为硅质、钙菱锰矿、锰方解石,内核为沥青质、黄铁矿等,据此建立了锰矿喷溢沉积成矿系统新模式(周琦等, 2013, 2016; Zhou et al., 2022)(图2)。基于该原创理论,指导中国锰矿找矿实现了历史性突破,成为国际矿床学界为数不多的先建立原创理论,后指导找到世界级隐伏大矿的成功范例之一。

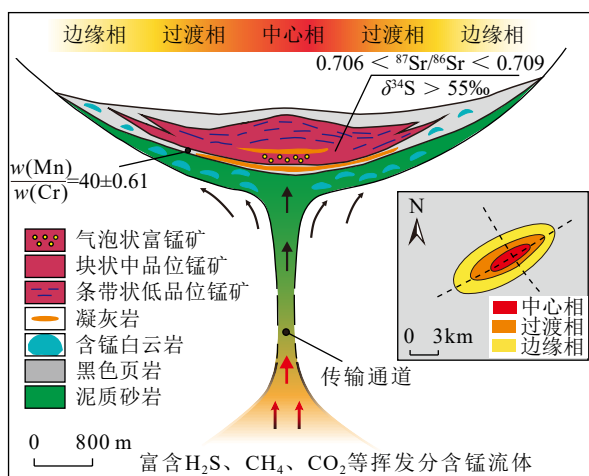


图2 中国南华纪“大塘坡式”锰矿喷溢沉积成矿模式 (Zhou et al., 2022)

Fig. 2 Datangpo-type manganese ore exhalative sedimentary mineralization model for the Nanhua period of China

刘志臣等(2018)通过引进南华纪“大塘坡式”锰矿喷溢沉积成矿理论和研究方法,对贵州二叠纪“遵义式”锰矿进行了深入的研究和对比,发现二叠纪“遵义式”锰矿也具有喷溢沉积型锰矿床典型特征,建立了与“大塘坡式”锰矿相似的喷溢沉积成矿系统模式(Liu et al., 2023, 2025),并指导贵州二叠纪“遵义式”隐伏锰矿找矿取得重大突破。卢安康等(2021)在广西下雷锰矿床中也发现了与黔东“大塘坡式”锰矿相似的喷溢沉积构造并进行了对比研究,认为广西下雷锰矿床应属于喷溢沉积型锰矿床。

喷溢沉积型锰矿床目前是中国最主要的锰矿床类型,其资源储量超过了全国锰矿床总量的50%。本文聚焦该类型锰矿床,较系统介绍喷溢沉积型锰矿床成矿模式、勘查方法与找矿进展,以期推动喷溢沉积型锰矿床成矿理论与找矿勘查技术深入发展,指导中国隐伏锰矿等战略矿产找矿实现新突破。

1 锰矿喷溢沉积成矿过程

1.1 南华裂谷演化与锰矿喷溢沉积成矿旋回

Rodinia 超大陆裂解导致南华裂谷形成演化和锰矿大规模喷溢沉积成矿作用。南华裂谷由武陵和雪峰2个次级裂谷(Ⅱ级)组成,武陵次级裂谷由石阡—松桃—古丈、玉屏—芷江和溪口—小茶园等Ⅲ级地堑及其间的地垒组成,锰矿大规模喷溢沉积成矿作用主要发生在武陵次级裂谷中的石阡—松桃—古丈Ⅲ级地堑中(周琦等, 2016)。Wu et al. (2025)对武陵次级裂谷中的石阡—松桃—古丈Ⅲ级地堑沉积演化与“大塘坡式”锰矿喷溢沉积成矿旋回进行了深入分析研究后认为(图3):

(1)武陵次级裂谷石阡—松桃—古丈Ⅲ级地堑的地层格架,可分为5个成因地层单元,反映其古地理环境演化经过5个阶段,即冲积—滨海平原(低位)、碎屑滨岸—滨外浅海(海进)、滨外浅海(高位)、浅海—碎屑滨岸带过渡(海退)、滨海平原(低位)。

(2)与构造演化相对应,石阡—松桃—古丈Ⅲ级地堑的古构造演化,同样经历了5个阶段,即初始裂陷(填平补齐)、加速裂陷(海水入侵)、最大裂陷(最大海泛)、减速裂陷(海水后退)、终止裂陷(准平原化),显示完整的陆缘裂谷演化生命周期。

(3)由于石阡—松桃—古丈Ⅲ级地堑中所有Ⅳ级地堑的菱锰矿床均赋存于大塘坡组一段(Nh_2d^1)的底部,表明含锰流体的喷溢沉积成矿作用,发生于南华裂谷基底拆离作用和海水入侵趋向最强烈的时候,即最大裂陷(最大海泛)阶段的初期。

(4)以石阡—松桃—古丈Ⅲ级地堑中的高地一道坨Ⅳ级地堑为例,在石阡—松桃—古丈Ⅲ级地堑中,最大裂陷(最大海泛)阶段初期的大规模含锰流体喷溢沉积成矿作用可划分为5个亚阶段,形成5个喷溢沉积成矿旋回,反映了裂谷成矿作

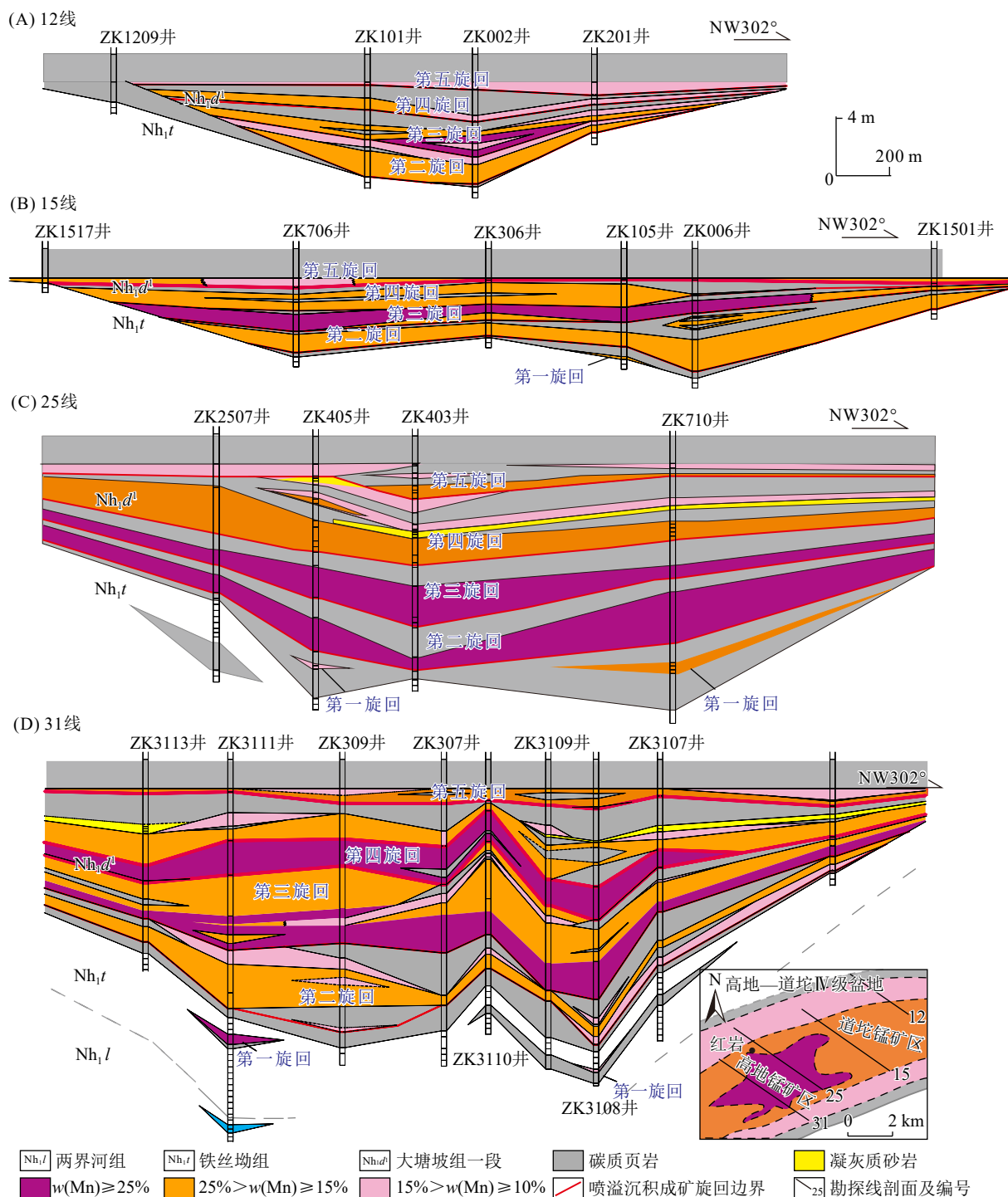


图 3 贵州松桃高地隐伏超大型锰矿床多期次喷溢沉积成矿旋回 (Wu et al., 2025)

Fig. 3 Multi-stage exhalative sedimentary mineralization cycles of concealed extra-large manganese deposits in Gaodi, Songtao, Guizhou

用由弱到强又由强到弱的变化。

1.2 锰矿流体底辟-喷溢构造系统

Yuan et al. (2025) 在松桃大塘坡锰矿区长期野外观察研究发现, 剖面上自下而上发育了龟背状凸起、泥质底辟柱、树枝状喷流管和扇状涌流线理等 4 种构造。这 4 种底辟构造相互承接, 构

成一个完整的锰矿浅层次底辟-喷溢构造系统, 被认为是揭示“大塘坡式”锰矿喷溢沉积成矿机制的关键。

(1) 在黔东南地区南华系大塘坡组一段和铁丝坳组露头 and 岩心中, 发育有含锰流体底辟构造和喷溢构造, 其中流体底辟构造包括: 泥质底辟

柱、龟背状凸起、树枝状喷流管和扇状涌流线理,流体喷溢构造包括管涌状构造、喷泉状构造和烟雾状构造。

(2)含锰流体底辟构造、喷溢构造,自下而上有机地组合成为一种结构完整的含锰流体底辟-喷溢构造系统。在锰矿喷溢中心相区,自下而上出现反映含锰流体底辟上涌的含锰白云岩透镜体→

含网状锰矿脉角砾岩→树枝状富锰矿脉→气泡状富菱锰矿体→块状、似层状、条带状锰矿体→龟背构造含锰碳质泥岩的积木式矿石相分带(图4)。其形态、组成和运动学、动力学等特征充分证明,“大塘坡式”锰矿的成矿物质源自深部的含锰流体,而非来自陆表风化、剥蚀、搬运和沉积。

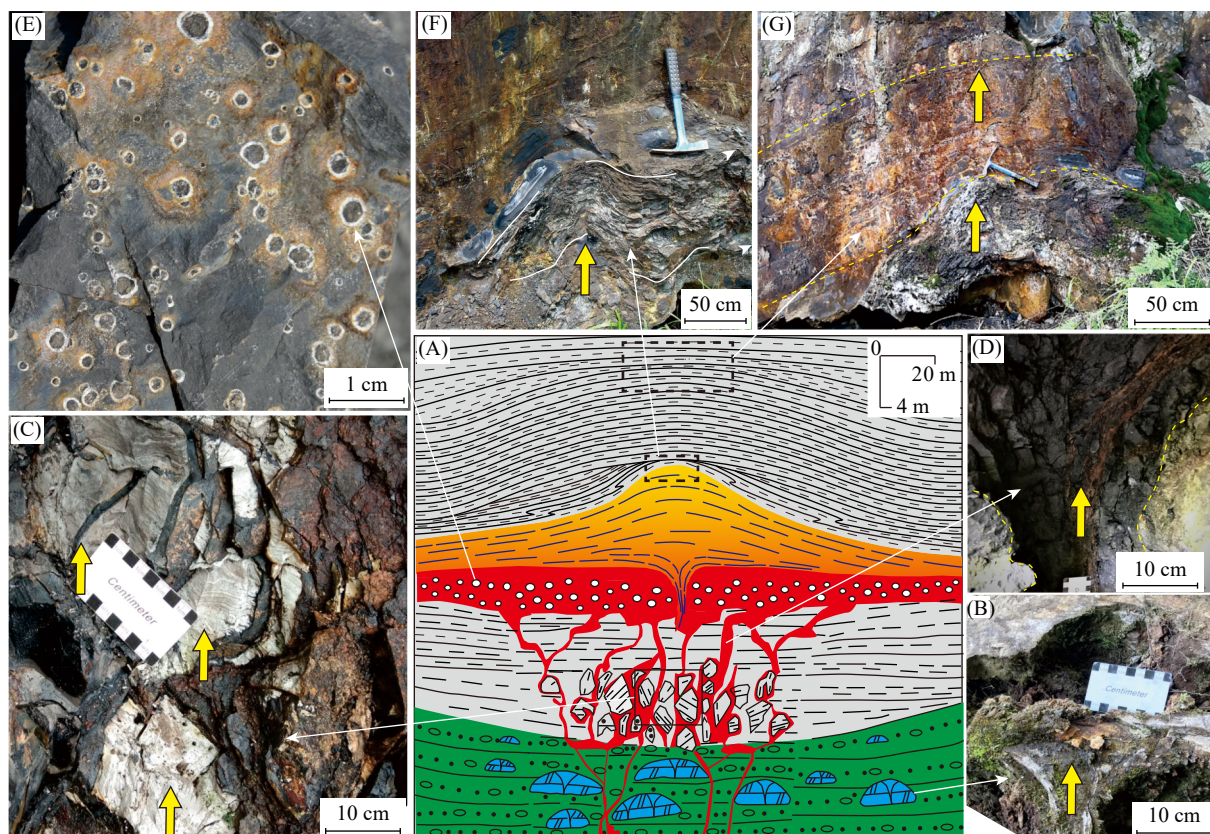


图4 贵州松桃大塘坡地区含锰流体底辟-喷溢构造系统与矿石相垂向分带(Zhou et al., 2022)

Fig. 4 Manganese-bearing fluid diapir-eruption tectonic system and vertical zoning of ore facies in the Datanpo area, Songtao, Guizhou (A)根据野外特征总结的不同构造组合关系图;(B)含锰白云岩透镜体;(C)含网状锰矿脉角砾岩;(D)树枝状富锰矿脉;(E)气泡状富菱锰矿体;(F)块状、似层状、条带状锰矿体;(G)龟背构造含锰碳质泥岩(黄色箭头代表流体运移方向)

(3)含锰流体底辟-喷溢系统,均发育于南华系两界河组以上地层中,处于反射地震剖面所揭示的深部含锰流体底辟构造的顶部,相对而言应当属于浅层次的含锰流体底辟-喷溢构造系统。

(4)含锰流体的底辟和喷溢是多期次的,根据南华系下部铁丝坳组到大塘坡组一段下部发育有5个锰矿喷溢沉积成矿旋回(Wu et al., 2025),推测应形成相应的5套底辟-喷溢构造系统。它们可以分别出现在多个不同层位上,也可以在同

一个层位上互相叠加和改造。

(5)不同期次的含锰流体底辟-喷溢构造系统之间,是一种前进式叠加关系,即系统中发育部位低的构造叠加在发育部位高的构造上并将其改造。

1.3 富菱锰矿体中气泡状构造

华南南华纪“大塘坡式”喷溢沉积型锰矿床中,从喷溢中心向外先后出现同心椭圆状分布的富菱锰矿体、中品位菱锰矿体和低品位菱锰矿体。富菱锰矿体中普遍出现气泡状构造。

Zhang et al. (2025)通过采集贵州松桃高地超大型锰矿床岩矿心样品 234 件,进行构造应力场分析后认为:富菱锰矿体中顺层发育的张裂隙,可能是含锰流体底辟上涌至早期沉积的半固结菱锰矿层时,所形成的孔隙流体垂向膨胀应力场的产物。通过矿物学研究表明:游离的气泡状构造、张裂隙中的白色硅质细脉和富菱锰矿体密切相关,富菱锰矿体中的气泡状构造和顺层白色硅质细脉属于准同沉积期产物,形成于半固结状态沉积层中。游离气泡状构造是从顺层白色硅质细脉中释放出来的。另外由于含锰流体的多期次底辟上涌形成大量白色硅质细脉,硅质细脉中发育的大量串珠状和网状微细气泡群

释放出来并逐步渗滤、充注到菱锰矿体中形成气泡状构造,并使菱锰矿体不断叠加富集形成富菱锰矿体。

2 喷溢沉积型锰矿床找矿勘查技术

近些年来,Zhou et al. (2025)以创立的锰矿喷溢沉积成矿理论为支撑,研发了从沉积盆地分析→多尺度三维地质建模→地球物理探测→地球化学探测→矿石相判别→智能预测→数字勘查全流程的隐伏喷溢沉积型锰矿床找矿勘查技术体系(图 5),成为查明该类型锰矿成矿规律、圈定可供勘查的找矿靶区、实现锰矿找矿重大突破的主要技术支撑。

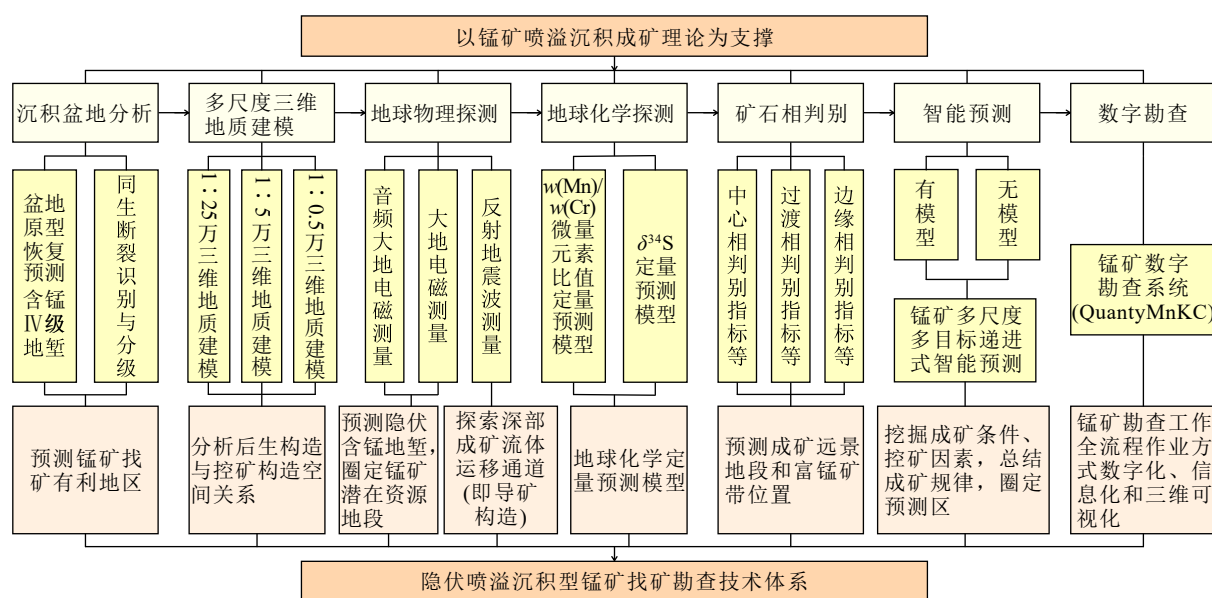


图 5 隐伏喷溢沉积型锰矿床找矿勘查技术方法体系

Fig. 5 Technical method for prospecting and exploring concealed exhalative sedimentary manganese deposits

2.1 沉积盆地分析

黔东及毗邻地区南华纪“大塘坡式”锰矿大规模成矿作用主要发生在武陵次级裂谷中心,不是传统锰矿外生沉积成矿理论认为的在盆地边缘成矿。近年来新发现的系列大型-超大型锰矿床集中分布在北西向铜仁古裂谷与近东西向的武陵次级裂谷交汇区域(周琦等, 2023)(图 6)。

通过沉积盆地分析,查明了含锰残留盆地原型及其形成、演化、叠加和改造历程,包括盆地原型形成演化的大地构造背景、原生含锰盆地的性质及其构造-地层格架和控矿同生断裂的空间结构和分布特征等,预测锰矿找矿有利地段。

恢复了在 Rodinia 超大陆裂解背景下,贵州、湖南、重庆地区北东东向展布的新元古代南华裂谷中的Ⅲ级地堑及Ⅳ级堑-垒结构,发现喷溢沉积型锰矿均位于Ⅳ级地堑中心、含锰流体底辟喷溢构造系统的顶部。锰矿控矿构造方向实际是北东东向,纠正了前人多年来以表层北北东向燕山期构造线方向为锰矿体延伸方向进行找矿预测的误区(周琦等, 2016),二者空间展布方向相差 40°左右。这一发现解决了该地区隐伏锰矿找矿预测的“瓶颈式”难题。

以南华裂谷武陵次级裂谷中石阡—松桃—古丈Ⅲ级盆地原型恢复为例:通过盆地原型恢复,

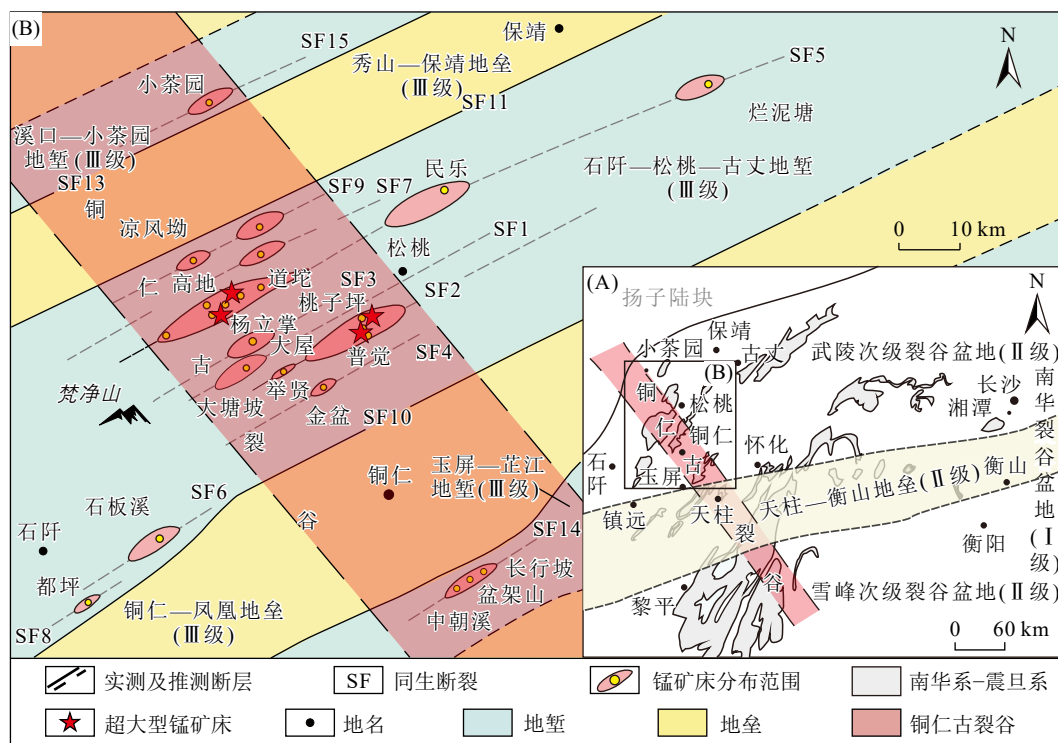


图6 中国南华纪大塘坡期裂谷盆地与锰矿分布空间关系

Fig. 6 Spatial relationship between the Nanhua Datangpo rift basin and the distribution of manganese deposits in China

(A) 中国南华纪大塘坡期武陵次级裂谷盆地原型; (B) 超大型锰矿床空间分布图(周琦等, 2023)

发现了隐伏地下1 000~2 000 m的李家湾—高地—道坨Ⅳ级残留含锰地堑,即锰矿容矿构造。该含锰地堑沿北东东方向展布,延长大于35 km,宽2~5 km,呈向北西突出的“弓”形(图7-A),目前控制的该残留含锰地堑面积63 km²。表层为北北东-北东向后生燕山期构造(图7-A),构成了双层“立交桥式”构造(图7-B)。如考虑早期北西向铜仁古裂谷和在高地锰矿床深部通过反射地震探测发现的成矿流体通道(即导矿构造),则构成了3层“立交桥式”构造。松桃李家湾—高地—道坨Ⅳ级含锰地堑控制形成了松桃李家湾—高地—道坨巨型锰矿床,该矿床中的巨型锰矿体长度>30 km,宽度2~4 km,锰矿体厚度大、品位高,目前已提交的锰矿资源储量约5×10⁸ t,其中富锰矿>1×10⁸ t,是一个罕见的世界级隐伏巨型锰矿床。这1个隐伏巨型锰矿床的资源储量,几乎就相当于2011年中国锰矿保有资源储量的总和。

2.2 多尺度三维地质建模

黔东地区大型-超大型喷溢沉积型锰矿床绝大多数深埋于地下,不同程度地存在着结构信息不全、参数信息不全、关系信息不全和演化信息

不全的情况。开展多源数据融合,实施多尺度、多层次、多要素三维可视化建模,可以使地质科技人员在不同勘查阶段的三维虚拟地质环境中,基于不同数据详度,直观地感知和理解复杂的矿床地质结构,深入地进行矿床地质分析和成矿系统分析,分析隐伏后生构造与原生控矿构造的空间关系,从而能在新的高度和维度上认识锰矿成矿机理和过程,构建不同尺度的找矿预测模型,奠定了开展锰矿等战略矿产三维智能找矿预测的基础。

通过对南华裂谷武陵次级裂谷、锰矿集区和锰矿床进行1:25万、1:5万、1:2.5万和1:5 000比例尺的三维地质建模,具体采用基于数据仓库的地下-地上、地质-地理、结构-属性一体化建模方式进行(吴冲龙等, 2020; 张夏林等, 2020)。其中,结构建模采用基于地质知识驱动和系列剖面拓扑推理相结合的建模法(He et al., 2008),属性建模则采用多点克里格随机模拟法(陈麒玉, 2018)。通过多尺度三维地质建模,清楚地显示出研究区在不同勘查阶段、不同资料详度下的不同级别构造单元,以及其相对应的矿集区和矿床的构造-地层格架、后期大规模滑脱构造的空

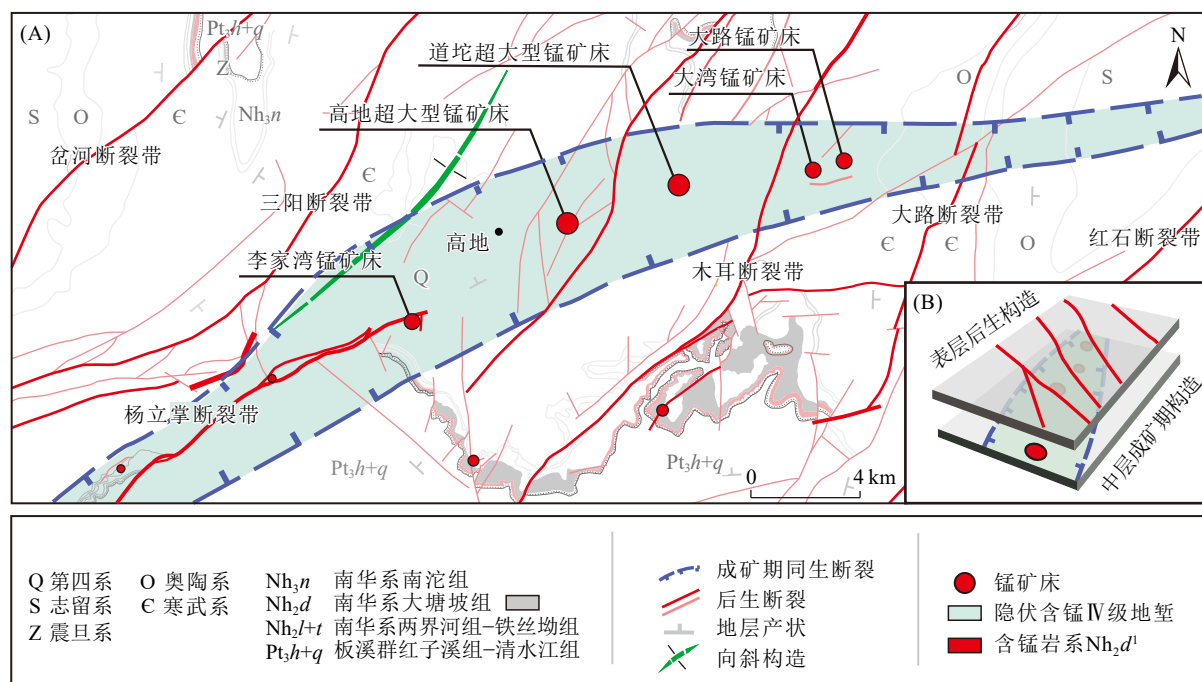


图 7 贵州松桃李家湾—高地—道坨隐伏巨型锰矿床双层“立交桥式”构造

Fig. 7 Double-layer structure of the concealed giant manganese deposit in Lijiawan-Gaodi-Daotuo, Songtao, Guizhou

(A) 平面地质简图; (B) 构造空间关系示意图

间结构、各矿床和矿体的空间形态和喷溢沉积旋回结构。发现了隐伏于南华裂谷基底的中—新元古代北西向铜仁古裂谷,并揭示了在该古裂谷与北东东向的松桃—古丈Ⅲ级地堑交叉处,控制形成的深部含锰流体的底辟喷溢通道(Zhou et al., 2022)。通过大规模锰矿喷溢沉积成矿作用,导致一批世界级的大型—超大型锰矿床集中分布在中国黔东地区(张夏林等, 2018; Zhou et al., 2022)(图 8)。

2.3 地球物理探测

运用音频大地电磁探测(AMT)、大地电磁探测(MT)技术,揭示了黔东及毗邻地区南华纪喷溢沉积型锰矿深部Ⅳ级含锰地堑电性结构为“高阻—低阻—中阻”3层电阻率模型,Ⅳ级地堑电性结构为“低阻—高阻”2层电阻率模型,同生断裂则为“高阻—低阻”梯度变换带。该技术为隐伏喷溢沉积型锰矿找矿预测提供了地球物理预测模型(杨炳南等, 2018),可以用于预测隐伏含锰地堑,圈定锰矿潜在资源地段。

采用二维和三维反演技术,进一步应用大地电磁、音频大地电磁法等地球物理探测方法,对南华裂谷(Ⅰ级)、武陵次级裂谷(Ⅱ级)中的松桃—古丈地堑(Ⅲ级)和其中的多个Ⅳ级地堑的

深部电性结构特征进行探测,发现在黔东地区控制形成松桃凉风坳、高地—道坨、石塘、大塘坡、举贤等锰矿床的Ⅳ级地堑的中心及深部均存在流体底辟通道(图 9),这为锰矿流体喷溢沉积成矿和隐伏锰矿找矿预测提供了地球物理证据(Yang et al., 2025)。

另外,通过对大塘坡Ⅳ级含锰地堑和铜仁古裂谷进行深反射地震剖面探测,发现深部存在的流体底辟通道直达上地幔顶部,这为锰矿成矿物质来源、大规模底辟上涌和喷溢沉积成矿提供了直接证据(图 10)。该流体底辟通道深达 43 km,位于北西向新元古代铜仁古裂谷和近东西向南华裂谷的交叉处。该流体底辟通道被认为是导致该地区锰矿发生大规模喷溢沉积成矿作用的导矿构造(Zhou et al., 2022)。

2.4 地球化学探测

通过建立喷溢沉积型锰矿床地球化学定量预测模型,可以辅助判别含锰地堑及其富锰矿体、中锰矿体和贫锰矿体空间分布位置。包括:(1) $w(\text{Mn})/w(\text{Cr})$ 比值定量预测模型:含锰矿Ⅳ级地堑的 $w(\text{Mn})/w(\text{Cr})$ 比值为 $40 \pm$,如松桃大塘坡、杨立掌、大屋、黑水溪、普觉、杨家湾和秀山革里坳等Ⅳ级含锰地堑中,大塘坡组一段

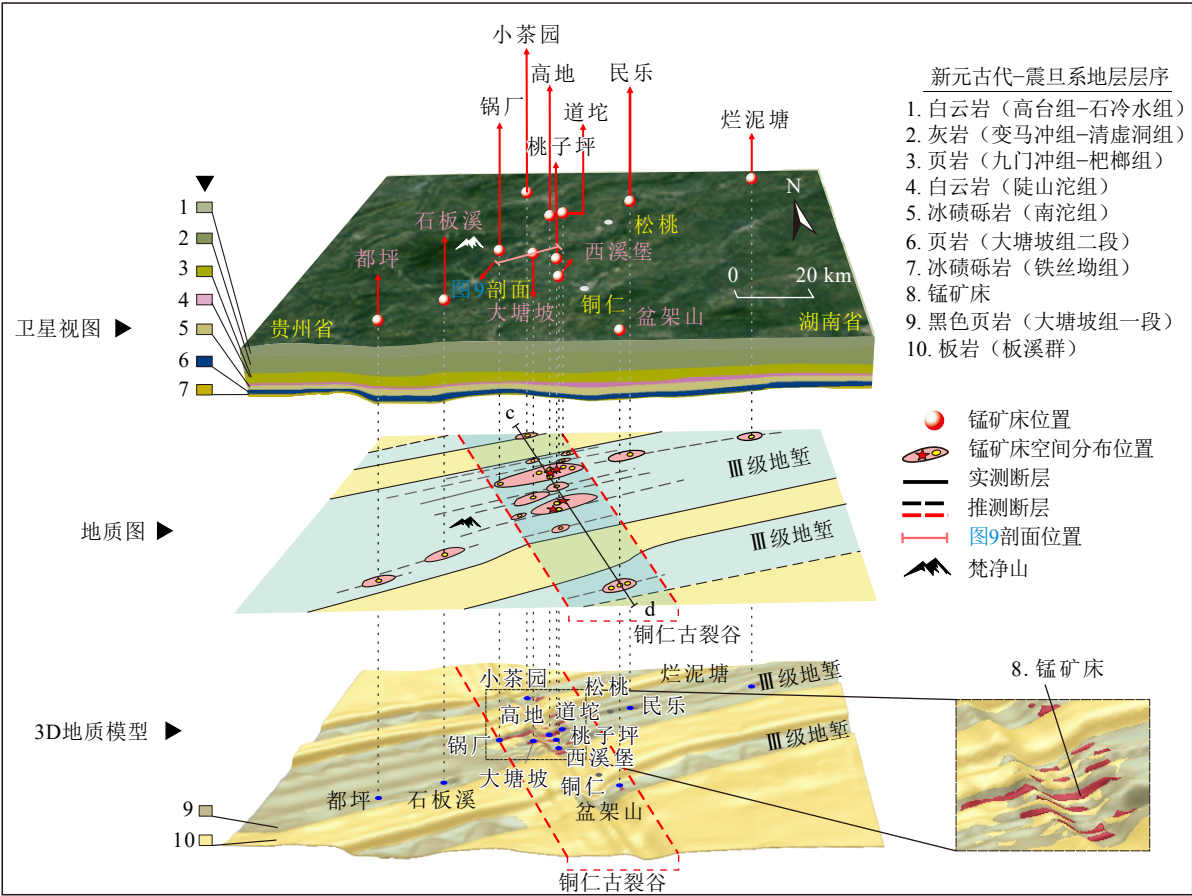


图 8 多尺度三维地质建模揭示的黔东南及毗邻区地质结构 (Zhou et al., 2022)

Fig. 8 Geological structure of eastern Guizhou and adjacent areas revealed by multi-scale three-dimensional geological modeling

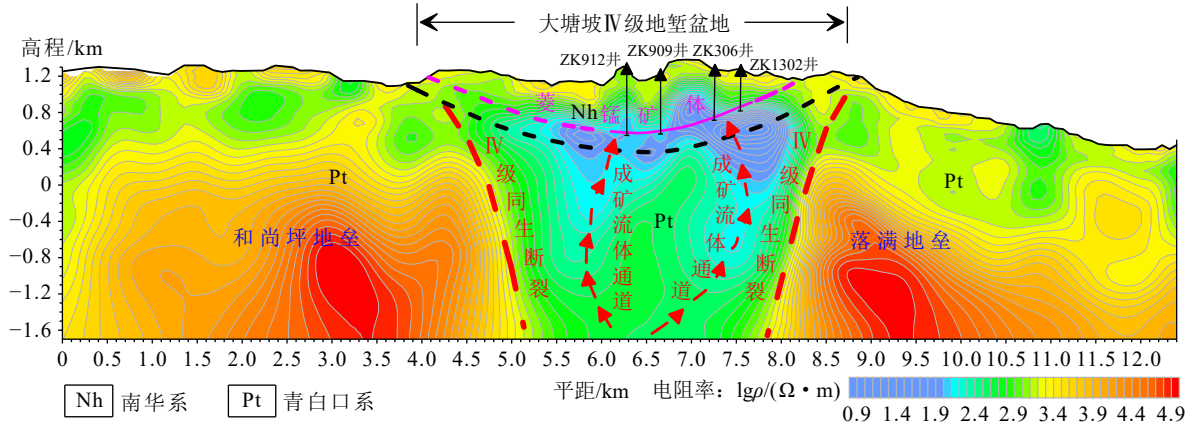


图 9 音频大地电磁探测剖面 (AMT) 揭示的黔东南大塘坡 IV 级含锰地堑与深部流体通道 (Yang et al., 2025)

Fig. 9 Grade IV manganese-bearing graben and deep fluid channels revealed by the audio magnetotelluric sounding (AMT) profile in Datangpo, eastern Guizhou

(Nh_2d^1) 黑色页岩中的 $w(\text{Mn})/w(\text{Cr})$ 比值约为 40。不含锰矿 IV 级地堑和 III 级地堑中, 如位于 III 级地堑中的松桃九龙坡、茶叶山等剖面, 大塘坡组一段(Nh_2d^1)黑色页岩中的 $w(\text{Mn})/w(\text{Cr})$ 比值为 3~5。而在地堑上, 如碧江半溪、漾头、江口桃映、盐井沟等剖面, 大塘坡组一段(Nh_2d^1)地层的 $w(\text{Mn})/w(\text{Cr})$ 比值均大于 800。(2) $\delta^{34}\text{S}$ 同位素定量预测模型: 在锰矿喷溢沉积中心相区, 即富菱锰矿体分布区, $\delta^{34}\text{S}$ 一般 $>58\%$, 最高可达 72% ; 在锰矿喷溢沉积过渡相区, 即中等品位菱锰矿体分布区, $\delta^{34}\text{S}$ 一般为 $50\%\sim58\%$; 在锰矿喷溢沉积边缘相区, 即贫菱锰矿体分布区, $\delta^{34}\text{S}$ 一般 $<50\%$ 。

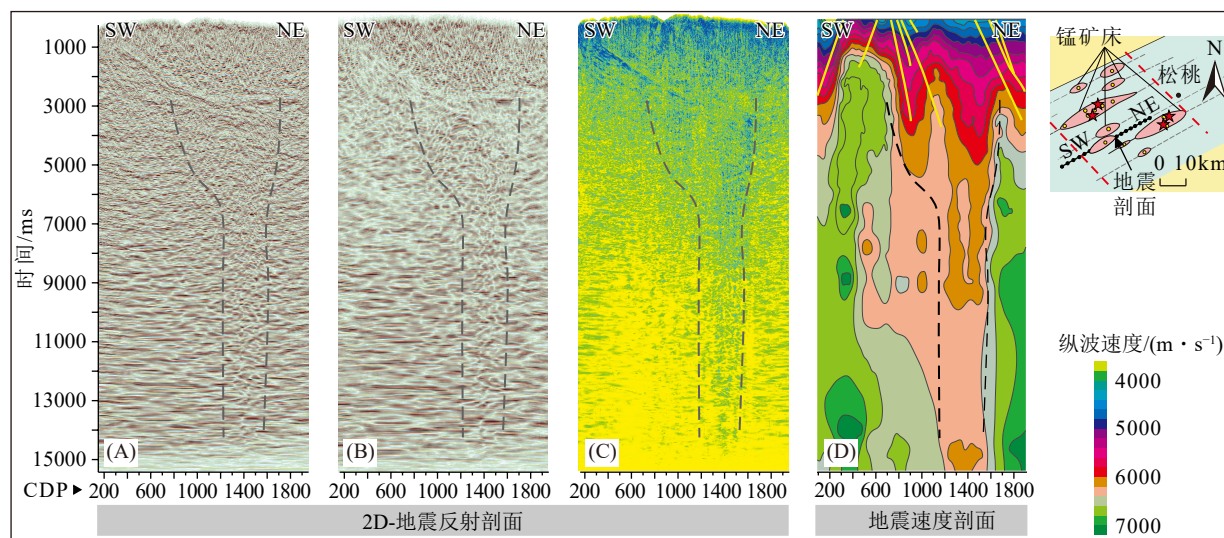


图 10 从叠前时间偏移处理后的大塘坡 DZ001 反射地震剖面上提取的漏斗状异常体 (Zhou et al., 2022)

Fig. 10 Funnel-shaped seismically abnormal structure extracted from the pre-stacked, time-migration-processed DZ001 reflection seismic profile of Datangpo

(A) 叠前偏移剖面; (B) 叠前偏移+带通滤波剖面; (C) 叠前偏移+边缘检测属性剖面; (D) 叠加速度剖面

(CDP: 共深度点道集)

2.5 喷溢沉积矿石相判别

(1) 喷溢沉积中心相: 为富锰带分布区, 锰矿体平均品位 25%~33%。主要为气泡状构造+块状构造。菱锰矿呈现圆球状、卵粒状, 80%~90% 的菱锰矿颗粒粒度 < 0.004 mm, 10%~20% 的菱锰矿颗粒粒度 ≥ 0.02 mm; 富菱锰矿体中发育 1~18 mm 长的椭圆形气泡状构造, 且与含锰白色硅质细脉密切共生。在含锰白色硅质细脉中, 见长为 10~20 μm 的微细气泡状构造。1~18 mm 的大气泡状构造和 10~20 μm 微细气泡状构造的结构和成分相同, 其外侧为白色硅质薄壳, 含锰方解石、锰白云石或钙菱锰矿, 内部为黑色碳质和黄铁矿泥晶, 含锰白色硅质细脉的成分与气泡状构造外壳相同。

(2) 喷溢沉积过渡相: 为中锰带分布区, 锰矿体平均品位 18%~25%。主要为块状构造+条带状构造。块状构造中的 70%~85% 菱锰矿颗粒结晶。毗邻中心相区域的块状菱锰矿矿石, 见长为 10~20 μm 的微细气泡状构造。

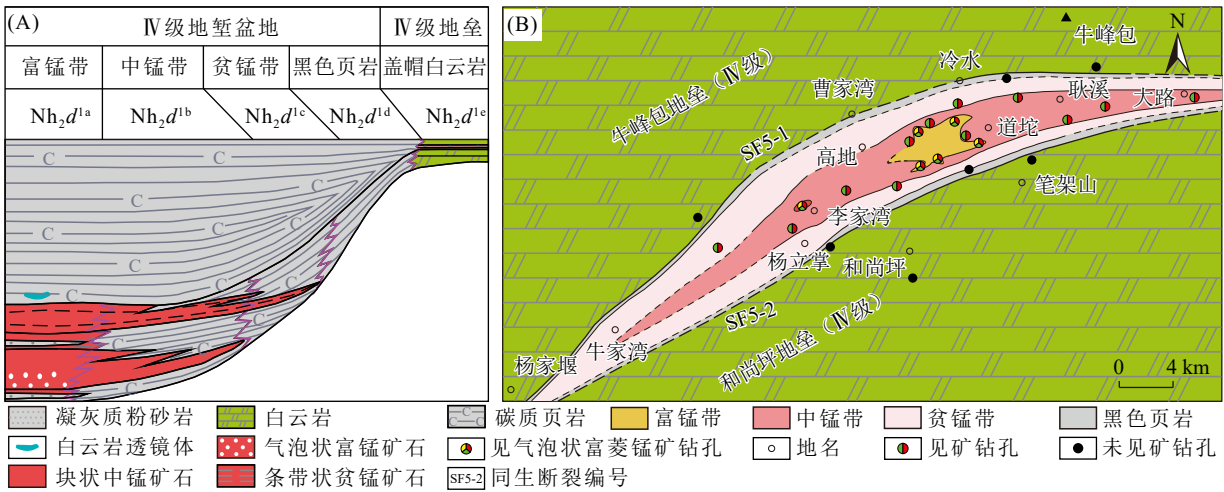
(3) 喷溢沉积边缘相: 为贫锰带分布区, 锰矿体平均品位 10%~18%。主要为条带状构造。仅有 5%~10% 的菱锰矿颗粒结晶, 水平纹理状粉砂与粉砂-细砂级团块状泥晶菱锰矿互层、滑塌层理、递变粒序层理或块状层理粉砂-细砂岩与碳质菱锰矿质泥岩互层, 具有含锰流体喷溢沉积

作用和下水重力流干扰的陆源细碎屑沉积作用的双重特征。每一个粉砂-细砂级团块状泥晶菱锰矿纹层中, 都可再分为下部较厚的贫碳细砂级团块状含碳菱锰矿泥晶纹层, 以及上部较薄的富碳粉砂级团块状碳质泥晶纹层, 构成一个含锰流体喷溢沉积的微小旋回。

通过总结喷溢沉积型锰矿床中心相/过渡相/边缘相矿石的宏观-微观特征和空间分布, 结合 IV 级地堑中的黑色页岩相、IV 级地垒上的盖帽白云岩相特征, 可以建立喷溢沉积型锰矿找矿预测地质模型 (图 11-A), 进行专项地质填图和找矿预测, 预测隐伏富锰矿带、中锰矿带和贫锰矿带空间分布位置, 为深部钻探工程验证提供可靠依据。贵州松桃李家湾—高地—道坨 IV 级地堑控制的高地—道坨隐伏巨型锰矿床矿石相空间分布见图 11-B。

2.6 智能找矿预测

智能找矿预测是在地质大数据和第四范式支配下, 基于数据和知识模型联合驱动, 通过广泛聚联和深入挖掘, 揭示喷溢沉积型锰矿床成矿条件和控矿要素, 感知并发现矿床, 进而探寻矿床成因, 归纳成矿模式和找矿模型 (Gray, 2009; Mayer-Schönberger and Cukier, 2013; 吴冲龙等, 2020; 徐凯等, 2020)。在此基础上, 建立了基于模型-数据联合驱动的锰矿大数据多目标递



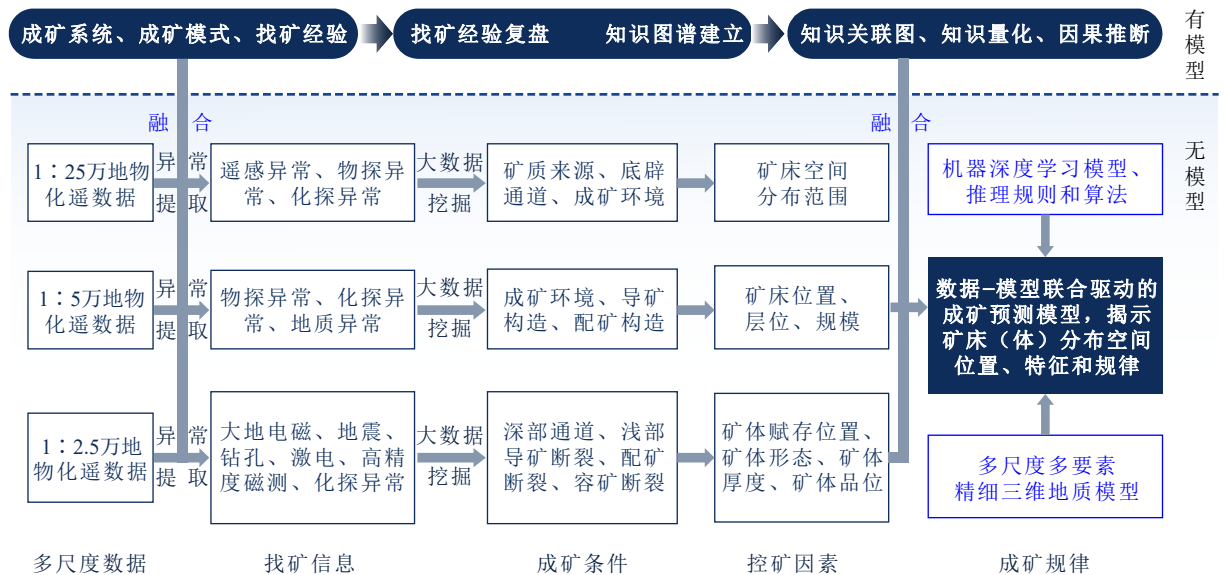
进式智能预测工作流程与工作模式(图 12)。

通过锰矿找矿典型案例复盘,构建找矿知识图谱,进而构建以重新归纳各类找矿标志的相关关系(不是成因关系)为目标,以空间异常规则和空间关联规则为内容的模型-数据联合驱动的实验流程(吴冲龙等, 2022),它是一种基于地质大数据资源体系建设、工作方式数字化转型、数据密集型计算(第四范式)和多尺度结构-属性一体化三维建模的找矿预测技术。包括:(1)建立锰矿认知、感知和分析模型,进而建立基于智能计

算、数据挖掘和机器学习的多尺度、多目标预测-决策模型;(2)构建有模型与无模型结合的不同探测数据聚联、融合和挖掘算法体系,挖掘隐伏构造及其与锰矿体的关联关系和空间关系;(3)分析揭示锰矿的导矿-配矿-容矿构造体系,按目标递进式地开展深部和外围矿体的多目标预测等。

2.7 数字勘查技术

由于行业的特殊性和历史原因,固体矿产勘查行业一直没有实现数字化转型。锰矿数字勘查的目标,是在地质信息科学理论框架下(吴冲



龙, 2014), 运用集成化的地质信息技术, 建立完善的数据资源体系, 使数据流转顺畅、充分共享, 实现全流程作业方式的数字化、信息化和三维可视化, 进而打通勘查、设计、开采、选冶和管理、决策等各个环节, 为实现探采一体化和智能化奠定基础(吴冲龙等, 2020, 2022)。

以中国南华纪“大塘坡式”锰矿为典型案例, 完成了具有自主知识产权的锰矿数字勘查系统(QuantyMnKC)研发, 实现了从野外调查、数据采集、入库管理, 到资料综合整理、图件编绘、三维地质建模, 再到储量三维可视化动态估算、

资源评价和勘查报告编写的全流程数字化(图 13), 并通过了国家行业主管部门委托的第三方评审。该系统支撑了锰矿等固体矿产勘查实现了全流程作业方式的数字化、信息化和三维可视化, 解决了锰矿等矿种快速高效找矿勘查的难题, 奠定了锰矿智能找矿预测数据基础。具体由数据采集、数据管理、图件编绘、三维建模、储量估算、综合评价和成矿预测等 7 个功能子系统和若干个功能模块组合而成, 是一个庞大的地矿信息系统技术平台, 为锰矿等固体矿产勘查行业实现数字化转型奠定了基础。

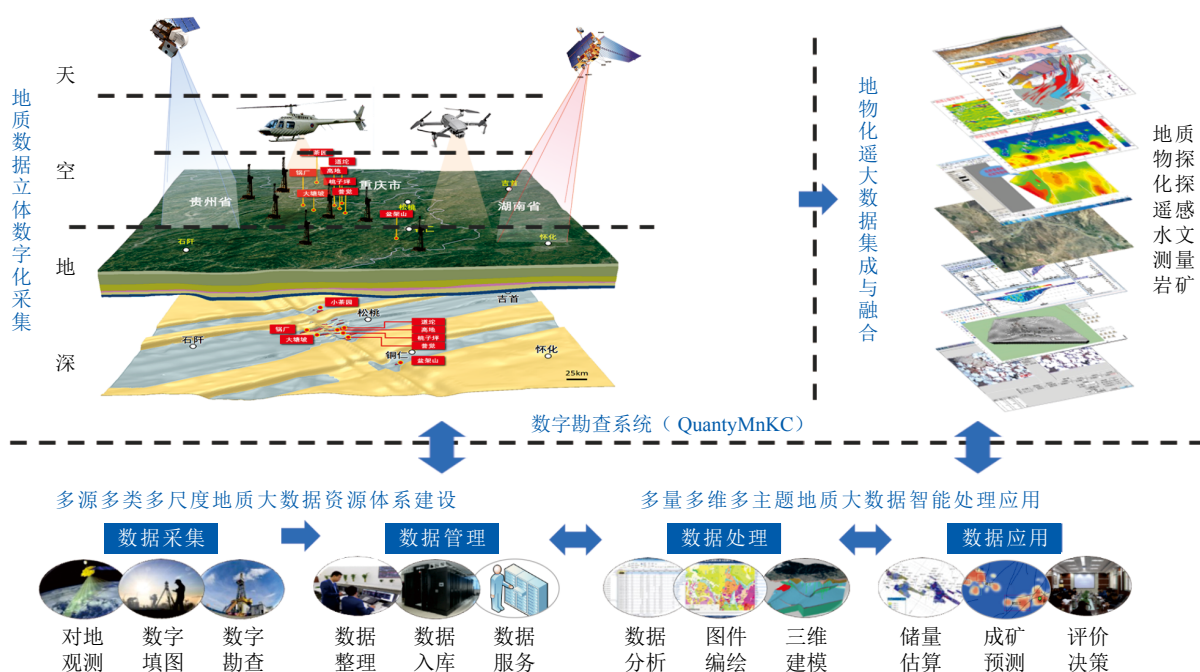


图 13 喷溢沉积型锰矿数字勘查与递进式智能找矿预测流程图(吴冲龙等, 2022)

Fig. 13 Digital exploration and progressive intelligent prospecting prediction process for exhalative sedimentary manganese deposits

2.8 分析测试技术

超高分辨率场发射扫描电镜(SEM)、能谱仪(EDS)、自动矿物分析系统(MLA)等技术的蓬勃发展, 使得能够在纳米尺度观测喷溢沉积型锰矿显微构造特征、元素分布特征、矿物相赋存及其共生组合, 为揭示典型喷溢沉积显微构造、矿物生成序列与锰矿超常富集机制提供了重要信息(Wu et al., 2025; Zhang et al., 2025; Yuan et al., 2025); Mn、Cr 等微量元素以及 C、S、Sr 等同位素测试技术的不断完善, 显著推动了喷溢沉积型锰矿深部成矿物质来源示踪和成矿过程的研究进程(余文超等, 2016; 周琦等, 2016, 2018; Cui et al., 2018)。

3 找矿进展

2012 年以来, 贵州省地质矿产勘查开发局一〇三地质大队通过隐伏喷溢沉积型锰矿找矿勘查理论技术体系的转化应用, 实现了中国锰矿找矿历史性突破, 打破了中国锰矿找矿数十年久攻不克的困局。2012 年以来, 先后在黔东地区新发现提交了贵州道坨、普觉、桃子坪、高地 4 个世界级隐伏超大型锰矿床和一批大中型锰矿床, 提交的锰矿资源储量大幅超过了此前中国锰矿保有资源储量总和, 改变了全球超大型锰矿床主要分布在南半球的格局。2025 年以来, 该队继续在黔东松桃地区先后发现提交新民、杨家寨、耿

溪和平江4个隐伏大型锰矿床。

与此同时,通过隐伏喷溢沉积型锰矿找矿勘查理论技术体系的转化应用,贵州遵义地区二叠纪隐伏喷溢沉积型锰矿找矿取得重大突破。贵州省地质矿产勘查开发局一〇二地质大队在先后发现提交遵义深溪、小金沟等大型锰矿床的基础上,2025年以来,继续在遵义红花岗区何家台、播州区谢家坝等地区发现2个隐伏大型锰矿床,喷溢沉积型锰矿找矿持续取得新突破。

4 展望

喷溢沉积型锰矿床作为锰质来自岩石圈深部,通过“裂谷盆地-传输通道-含锰流体”三元共控的成矿机制形成的一种新类型菱锰矿矿床,率先发现于中国黔东大塘坡地区。在Rodinia超大陆裂解背景下形成的南华裂谷盆地中,发生超大规模的喷溢沉积成锰作用,形成了一批世界级超大型锰矿床,重塑了中国乃至亚洲的锰矿资源格局。同时,推广应用到Gondwana大陆裂解背景下古特提斯域,扬子碳酸盐岩台地西部的黔北裂谷中的二叠纪“遵义式”锰矿找矿也取得了重大突破(刘志臣等,2019)。未来中国原创的隐伏喷溢沉积型锰矿找矿勘查理论技术体系推广应用到相同或不同成矿时代但锰矿成矿地质背景相似的地区,可望指导中国锰矿找矿取得进一步突破。

(1)Rodinia超大陆裂解背景下形成的南华裂谷中段的湘中地区以及西段的湘西北、渝东南地区,与黔东地区一样,均位于南华裂谷武陵次级裂谷,即南华纪武陵巨型锰矿成矿带,具有相同的锰矿成矿条件和成矿背景,锰矿找矿潜力巨大。

(2)南华裂谷西段的湘西南、黔东南地区,位于南华裂谷雪峰次级裂谷,锰矿成矿地质背景与武陵次级裂谷十分相似,前人已发现了一批中小型南华纪“大塘坡式”锰矿床,通过转化应用喷溢沉积型锰矿找矿勘查理论技术体系,可望取得找矿突破。

(3)Gondwana大陆裂解背景下,扬子碳酸盐岩台地南东缘右江盆地和湘桂盆地晚古生代—三叠纪菱锰矿也具有相似的成矿地质背景。自早泥盆世晚埃姆斯期开始强烈裂陷,形成了台地—台间深水裂陷槽间列的盆地格局,这种格局是由北西西向和北东向的主导性同生断裂控制的。

右江盆地的裂陷槽既有北西向的裂陷槽,也有北东向的下雷裂陷槽,湘桂盆地主要为北东向裂陷槽,分为贺州裂陷槽和柳州裂陷槽(杜远生等,2013)。锰矿成矿背景、控矿构造与南华裂谷十分相似,锰矿找矿潜力巨大,特别是卢安康等(2021)在下雷锰矿床中也发现了与黔东“大塘坡式”锰矿相似的喷溢沉积构造。通过开展与华南南华纪“大塘坡式”喷溢沉积型锰矿床对比研究,借鉴或应用南华纪隐伏喷溢沉积型锰矿找矿勘查理论技术体系,尽快实现该地区隐伏锰矿找矿取得重大突破。

(4)Columbia超大陆裂解是古—中元古代全球规模的重大地质事件之一,并在华北北部形成了燕辽裂谷。燕辽裂谷是华北沉积型菱锰矿集中分布区,锰矿主要形成于断陷盆地,锰矿找矿潜力大,但锰品位偏低,可能存在含锰流体喷溢沉积作用和下水重力流干扰的陆源细碎屑沉积作用的双重特征(喷溢沉积边缘相)。该裂谷锰矿成矿背景与Rodinia超大陆裂解背景下形成的南华裂谷盆地相似,通过开展与华南南华纪“大塘坡式”喷溢沉积型锰矿床对比研究,可望指导该地区锰矿尽快实现找矿突破。

5 结论

(1)喷溢沉积型锰矿床是一种全新的锰矿床类型,该类型锰矿床规模巨大、分布集中,是中国最重要的锰矿床类型。

(2)依托黔东松桃大塘坡锰矿区“天然实验室”长期探索研究,从“实践—理论—再实践—再理论”创立的锰矿大规模喷溢沉积成矿新模式,研发的隐伏喷溢沉积型锰矿床找矿勘查技术体系,指导发现提交4个世界级隐伏超大型锰矿床和一批大—中型锰矿床,实现锰矿找矿历史性突破,成为国际矿床学界为数不多的先建立原创理论,后指导找到世界级隐伏大矿的成功范例之一。

(3)初步实践表明:喷溢沉积型锰矿成矿模式、找矿勘查技术体系推广应用到相同或不同成矿时代但锰矿成矿地质背景相似的地区,可望指导锰矿找矿取得突破。

利益冲突声明: 本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

作者贡献声明: 周琦主要负责论文构思、数

据分析、研究方法和论文写作;刘雨主要负责数据分析、绘图和修改。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

致谢: 2 位评审专家提出的宝贵建议和意见,对于提升本文有很大帮助,特此感谢。

[参 考 文 献]

- 别捷赫琴, 1957. 矿产专辑. 第 2 辑, 矿相学[M]. 徐国风, 译. 北京: 地质出版社.
- 陈麒玉, 2018. 基于多点地质统计学的三维地质体随机建模方法研究——以闽江口地区第四纪沉积体系建模为例[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉).
- Chen Q Y, 2018. Three-dimensional stochastic modeling method of geological entities based on multiple-point geostatistics[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan). (in Chinese)
- 杜远生, 周琦, 金中国, 等, 2013. 黔北务正道地区铝土矿基础地质与成矿作用研究进展[J]. 地质科技情报, 32(1): 1—6.
- Du Y S, Zhou Q, Jin Z G, et al., 2013. Advances in basic geology and metallogenic regularity study of bauxite in Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, northern Guizhou Province[J]. Geological Science and Technology Information, 32(1): 1—6. (in Chinese)
- 何明华, 2001. 黔东南及邻区早震旦世成锰期岩相古地理及菱锰矿矿床[J]. 沉积与特提斯地质, 21(3): 39—47.
- He M H, 2001. Sedimentary facies and palaeogeography during the Early Sinian and potential of the rhodochrosite deposits in northeastern Guizhou and its adjacent areas[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 21(3): 39—47. (in Chinese)
- 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[J]. 沉积学报, 1(4): 106—116.
- Liu X F, Hu Z R, Zeng L X, et al., 1983. Origin and characteristics of sedimentary facies of Sinian manganese deposits in Guizhou[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1(4): 106—116. (in Chinese)
- 刘志臣, 周琦, 颜佳新, 等, 2019. 二叠纪贵州遵义次级裂谷盆地结构及其对锰矿的控制作用[J]. 古地理学报, 21(3): 517—526.
- Liu Z C, Zhou Q, Yan J X, et al., 2019. Structure of Zunyi rift basin in Guizhou Province during the Permian and its controlling on manganese deposits[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 21(3): 517—526. (in Chinese)
- 刘志臣, 周琦, 朱璐艳, 等, 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[J]. 贵州地质, 35(4): 363—368.
- Liu Z C, Zhou Q, Zhu L Y, et al., 2018. Geological characteristics comparison and its significance of main deposits in Permian and Nanhua manganese deposits of Guizhou[J]. Guizhou Geology, 35(4): 363—368. (in Chinese)
- 卢安康, 周琦, 覃永军, 等, 2021. 广西下雷锰矿床气液喷溢沉积构造的发现及地质意义[J]. 地质科技通报, 40(6): 124—139.
- Lu A K, Zhou Q, Qin Y J, et al., 2021. Discovery and geological significance of gas-liquid spouting expulsion and effusion depositional structures at Xialei manganese deposit in Guangxi[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 40(6): 124—139. (in Chinese)
- 吴冲龙, 2014. 地质信息科学与技术概论[M]. 北京: 科学出版社.
- Wu C L, 2014. Geological information science and technology introduction[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- 吴冲龙, 刘刚, 周琦, 等, 2020. 地质科学大数据综合应用的基本问题[J]. 地质科技通报, 39(4): 1—11.
- Wu C L, Liu G, Zhou Q, et al., 2020. Fundamental problems of integrated application of big data in geoscience[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 39(4): 1—11. (in Chinese)
- 吴冲龙, 周琦, 徐凯, 等, 2022. 用于大数据预测的大塘坡式锰矿找矿过程复盘研究[J]. 贵州地质, 39(3): 189—204.
- Wu C L, Zhou Q, Xu K, et al., 2022. A review study of the prospecting process of Datangpo manganese ore used for big data prediction[J]. Guizhou Geology, 39(3): 189—204. (in Chinese)
- 徐凯, 袁良军, 杨炳南, 等, 2020. 黔东南伴生-次生矿物遥感数据组合式挖掘与隐伏锰矿信息提取[J]. 地质科技通报, 39(4): 37—43.
- Xu K, Yuan L J, Yang B N, et al., 2020. Extraction of hidden manganese ore information with combined mining of associated and secondary mineral of remote sensing data in northeast Guizhou[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 39(4): 37—43. (in Chinese)
- 杨炳南, 胡祥云, 周琦, 等, 2018. 华南南华纪古天然气渗漏沉积型锰矿 AMT 勘查技术方法研究[J]. 贵州地质, 35(4): 369—375.
- Yang B N, Hu X Y, Zhou Q, et al., 2018. An audio-frequency magnetotellurics method study on the exploration technology of ancient natural gas seepage sedimentary-type manganese deposit of Nanhua Period in South China[J]. Guizhou Geology, 35(4): 369—375. (in Chinese)
- 余文超, 杜远生, 周琦, 等, 2016. 黔东南松桃南华系大塘坡组锰矿层物源: 来自 Sr 同位素的证据[J]. 地球科学, 41(7): 1110—1120.
- Yu W C, Du Y S, Zhou Q, et al., 2016. Provenance of Nanhua Datangpo Formation manganese Mn deposit in Songtao area, East Guizhou Province: evidence from Sr isotope[J]. Earth Science, 41(7): 1110—1120. (in Chinese)

- 余文超,杜远生,周琦,等,2020. 华南成冰纪“大塘坡式”锰矿沉积成矿作用与重大地质事件的耦合关系[J]. 古地理学报, 22(5): 855—871.
- Yu W C, Du Y S, Zhou Q, et al., 2020. Coupling between metallogenesis of the Cryogenian Datangpo-type manganese deposit in South China and major geological events[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 22(5): 855—871. (in Chinese)
- 张夏林,吴冲龙,周琦,等,2018. 贵州省道坨超大型锰矿床精细全息三维地质建模研究[J]. 贵州地质, 35(4): 291—296.
- Zhang X L, Wu C L, Zhou Q, et al., 2018. Study of fine holographic 3D geological modeling of Daotuo super-large manganese ore in Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, 35(4): 291—296. (in Chinese)
- 张夏林,吴冲龙,周琦,等,2020. 基于勘查大数据和数据集市的锰矿床三维地质建模[J]. 地质科技通报, 39(4): 12—20.
- Zhang X L, Wu C L, Zhou Q, et al., 2020. Three-dimensional geological modeling of manganese deposits based on exploration big data and data market[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 39(4): 12—20. (in Chinese)
- 周琦,1989. 松桃大塘坡菱锰矿床矿枕形成机理初探[J]. 贵州地质, 6(1): 1—7.
- Zhou Q, 1989. A preliminary discussion on the formation mechanism of ore pillows of Datangpo rhodochrosite deposit in Songtao County, Guizhou Province[J]. *Guizhou Geology*, 6(1): 1—7. (in Chinese)
- 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[J]. 矿床地质, 32(3): 457—466.
- Zhou Q, Du Y S, Qin Y, 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 border area[J]. *Mineral Deposits*, 32(3): 457—466. (in Chinese)
- 周琦,杜远生,袁良军,等,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[J]. 地球科学, 41(2): 177—188.
- Zhou Q, Du Y S, Yuan L J, et al., 2016. The structure of the Wuling Rift Basin and its control on the manganese deposit during the Nanhua period in Guizhou-Hunan-Chongqing border area, South China[J]. *Earth Science*, 41(2): 177—188. (in Chinese)
- 周琦,杜远生,袁良军,等,2017. 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[J]. 地质学报, 91(10): 2285—2298.
- Zhou Q, Du Y S, Yuan L J, et al., 2017. 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[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(10): 2285—2298. (in Chinese)
- 周琦,杜远生,袁良军,等,2018. 黔东及毗邻区南华纪“大塘坡式”锰矿研究历史、主要进展及展望[J]. 贵州地质, 35(4): 270—281.
- Zhou Q, Du Y S, Yuan L J, et al., 2018. Research history, major progress and outlook of ‘Datangpo Type’ manganese deposit in Nanhua period of East Guizhou and nearby area[J]. *Guizhou Geology*, 35(4): 270—281. (in Chinese)
- 周琦,袁良军,吴冲龙,等,2023. 贵州新元古代锰、重晶石等矿床成矿系列及找矿突破[J]. 地球学报, 44(5): 943—954.
- Zhou Q, Yuan L J, Wu C L, et al., 2023. Metallogenic models and exploration breakthrough of Neoproterozoic manganese and barite-dominated deposits in Guizhou[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 44(5): 943—954. (in Chinese)
- Cui H, Kitajima K, Spicuzza M J, et al., 2018. Questioning the biogenicity of Neoproterozoic superheavy pyrite by SIMS[J]. *American Mineralogist*, 103(9): 1362—1400.
- Force E R, Cannon W F, 1988. Depositional model for shallow-marine manganese deposits around black shale basins[J]. *Economic Geology*, 83(1): 93—117.
- Garnit H, Kraemer D, Bouhlef S, et al., 2020. Manganese ores in Tunisia: genetic constraints from trace element geochemistry and mineralogy[J]. *Ore Geology Review*, 120: 103451.
- Gray J, 2009. eScience: a transformed scientific method[M]// Hey T, Tansley S, Tolle K. The fourth paradigm: data-intensive scientific discovery. Redmond: Microsoft Research.
- He Z W, Wu C L, Tian Y P, et al., 2008. Three-dimensional reconstruction of geological solids based on section topology reasoning[J]. *Geo-Spatial Information Science*, 11(3): 201—208.
- 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.
- Johnson J E, Webb S M, Ma C, et al., 2016. Manganese mineralogy and diagenesis in the sedimentary rock record[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 173: 210—231.
- Liu Z C, Liu Y, Zhang S, et al., 2025. A new exhalative sedimentary metallogenetic model for Permian manganese deposits in China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 292: 106740.
- Liu Z C, Zhou Q, Liu K, et al., 2023. Sedimentary features and paleogeographic evolution of the Middle Permian trough basin in Zunyi, Guizhou, South China[J]. *Journal of Earth Science*, 34(6): 1803—1815.
- Mayer-Schönberger V, Cukier K, 2013. Big data: a revolution that will transform how we live, work and think[M]. London:

- John Murray.
- Maynard J B, 2003. 7.11—manganiferous sediments, rocks, and ores[J]. *Treatise on Geochemistry*, 7: 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.
- Maynard J B, 2014. Manganiferous sediments, rocks, and ores[M]//Holland H D, Turekian K K. *Treatise on geochemistry*. 2nd ed. Oxford: Elsevier: 327—349.
- Ossa F O, Hofmann A, Wille M, et al., 2018. Aerobic iron and manganese cycling in a redox-stratified Mesoproterozoic epicontinental sea[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 500: 28—40.
- Peng X, Zhu X K, Shi F Q, et al., 2019. A deep marine organic carbon reservoir in the non-glacial Cryogenian ocean (Nanhua Basin, South China) revealed by organic carbon isotopes[J]. *Precambrian Research*, 321: 212—220.
- Roy S, 1988. Manganese metallogenesis: a review[J]. *Ore Geology Reviews*, 4(1/2): 155—170.
- Roy S, 1992. Environments and processes of manganese deposition[J]. *Economic Geology*, 87(5): 1218—1236.
- Roy S, 2006. Sedimentary manganese metallogenesis in response to the evolution of the Earth system[J]. *Earth-Science Reviews*, 77(4): 273—305.
- Shiraishi F, Matsumura Y, Chihara R, et al., 2019. Depositional processes of microbially colonized manganese crusts, Sambe hot spring, Japan[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 258: 1—18.
- Wittkop C, Swanner E D, Grengs A, et al., 2020. Evaluating a primary carbonate pathway for manganese enrichments in reducing environments[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 538: 116201.
- Wu C L, Zhang S, Xu K, et al., 2025. Sedimentary evolution for the Wuling secondary rift of the western Nanhua Rift and exhalative-sedimentary mineralization cycles of “Datangpo-type” manganese ore deposits in South China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 287: 106566.
- Xiao J F, He J Y, Yang H Y, et al., 2017. Comparison between Datangpo-type manganese ores and modern marine ferromanganese oxyhydroxide precipitates based on rare earth elements[J]. *Ore Geology Reviews*, 89: 290—308.
- Yang B N, Hu X Y, Gao L F, et al., 2025. Discharge and deposition metallogenic model of “Datangpo-type” manganese deposits in China: geophysical evidence from deep electrical structure of manganese-bearing grabens[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 292: 106732.
- Yu W C, Polgári M, Gyollai I, et al., 2019. Microbial metallogenesis of Cryogenian manganese ore deposits in South China[J]. *Precambrian Research*, 322: 122—135.
- Yuan L J, Yang B N, Zhang S, et al., 2025. A study on the manganese-bearing fluid diapir-discharge structural system of the Datangpo-type manganese deposits in China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 292: 106723.
- Zhang S, Yuan L J, Long J X, et al., 2025. Genesis and role of bubble-like structures in rhodochrosite-rich orebodies of “Datangpo-type” sedimentary exhalative manganese deposits in China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 292: 106741.
- Zhou Q, Wu C L, Hu X Y, et al., 2022. A new metallogenic model for the giant manganese deposits in northeastern Guizhou, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 149: 105070.
- Zhou Q, Yuan L J, Yang B N, et al., 2025. Development and application of a technological system for exploration of “Datangpo-type” concealed manganese deposits in China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 292: 106727.