



地质力学学报
Journal of Geomechanics
ISSN 1006-6616, CN 11-3672/P
中文核心期刊
中国科技核心期刊
CSCD 来源期刊（核心库）

《地质力学学报》预出版论文

论文题目：桂西南下雷−龙邦地区沉积型锰矿找矿模型研究与应用

作者：周尚国，龙涛，江沙，黄钦，王华青，李荣志，和平贤，席振铎

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2026087

投稿时间：2026-07-03

录用时间：2026-09-20

预出版时间：2026-09-22

预出版版权说明

预出版，是指在网络出版或纸质版印刷出版之前，文章的电子版本在网上提前公开，是正式出版的预备版本。预出版的文章是通过严格的“三审制”审查后，本刊确定录用的文章，其内容的著作权等受《著作权法》等法律法规保护。预出版的文章将在之后的印刷版上刊发，印刷版的文章可能与预出版的文章略有不同，预出版文章经录用后便以电子版本形式在网站发出，没有经过排版和编校，会存在部分文字及编排格式与正式出版有出入，但文章主体内容是完全一致的。

学者研究或引述预出版文章，应当以印刷纸质版内容为准；但如果牵涉首创权等时间问题，则应当以适当方式注明文章的预出版日期。

桂西南下雷-龙邦地区沉积型锰矿找矿模型研究与应用

周尚国¹, 龙涛², 江沙^{2,3}, 黄钦⁴, 王华青¹, 李荣志², 和平贤⁵, 席振铎⁶
ZHOU Shangguo¹, LONG Tao², JIANG Sha^{2,3}, HUANG Qin⁴, WANG Huaqing¹, LI Rongzhi², HE
Pingxian⁵, XI Zhenzhu⁶

1. 中国冶金地质总局, 北京 100025;
2. 中国冶金地质总局广西地质勘查院, 广西 南宁 530022;
3. 中国冶金地质总局矿产资源研究院, 北京 101300;
4. 广西大学珊瑚礁研究中心, 广西 南宁 530004;
5. 南方锰业集团有限责任公司大新锰矿分公司, 广西 崇左 532315;
6. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083

1. China Metallurgical Geology Bureau, Beijing 100025, China;
2. Geological Prospecting Institute of Guangxi, China Metallurgical Geology Bureau, Nanning 530022, Guangxi, China;
3. Institute of Mineral Resources Research, China Metallurgical Geology Bureau, Beijing 101300, China;
4. Coral Reef Research Center, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China;
5. Daxin Manganese Mine Branch of South Manganese Group Co., Ltd., Chongzuo 532315, Guangxi, China;
6. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China

Research and application of a prospecting model for sedimentary manganese deposits in the Xialei-Longbang area, southwestern Guangxi

Abstract:[Objective] The Xialei-Longbang area in southwestern Guangxi hosts a critical manganese ore concentration district in China. Current exploration is hindered by an incomplete understanding of the occurrence patterns of sedimentary manganese deposits and a lack of a sound basis for selecting effective exploration methods.[Methods] Based on an analysis of the metallogenic geological settings, this study compares the geological characteristics of typical deposits and the geochemical characteristics of manganese-bearing rock series, and evaluates the results of exploration tests using the multi-polarization magnetotelluric (MPMT) method in the ore concentration district. [Results] The study area can be divided into two secondary manganese-forming basins, namely the Xialei-Shangying Basin and the Longbang-Dizhou Basin. Three sedimentary microfacies types are identified in the Xialei-Shangying manganese-forming basin: calcareous siliceous rock, calcareous siliceous rock-siliceous limestone, and siliceous limestone-argillaceous banded limestone. Only the siliceous limestone-argillaceous banded limestone microfacies occurs in the Longbang-Dizhou manganese-forming basin. Among these microfacies, the calcareous siliceous rock microfacies is the most favorable for mineralization, followed by the calcareous siliceous rock-siliceous limestone microfacies, whereas the siliceous limestone-argillaceous banded limestone microfacies is the least favorable. Centers of manganese enrichment are distributed within a zone approximately 500-1000 m northwest of the Xialei-Lingma synsedimentary fault. The thickness and Mn grades of rhodochrosite ore beds vary considerably among different

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2022YFC2903404); 中国冶金地质总局地质综合研究项目 (中冶地[2023]CMGBDZYJ003 号); 全国常态化成矿远景区划项目 (DD2026021102); 广西向海经济人才培养支持专项 (2025XHR12)

This research was financially supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2022YFC2903404), The Geological Comprehensive Research Project of China Metallurgical Geology Bureau (Grant No. [2023]CMGBDZYJ003), the National Routine Mineral Prospectivity Zoning (Grant No. DD2026021102), and the Guangxi Special Support Program for Talent Cultivation for the Marine-Oriented Economy (Grant No. 2025XHR12).

第一作者: 周尚国 (1962—), 男, 正高级工程师, 主要从事黑色金属勘查与研究。Email: dzsg@vip.163.com

通信作者: 江沙 (1986—), 男, 高级工程师, 主要从事地质矿产勘查及成矿规律研究。Email: 1542595614@qq.com

mining areas (segments). Outward from the Xialei Mining Area, the manganese ore beds gradually thin and their Mn grades decrease. Moreover, the thickness and Mn grade of ore beds II+III generally show positive correlations with those of ore bed I. The ore-forming fluids were dominated by submarine hydrothermal fluids, and the sedimentary metallogenic environment was weakly oxidizing to oxidizing. Compared with the overlying and underlying wall rocks, the manganese-bearing rock series are characterized by a combination of low resistivity and high magnetic susceptibility. [Conclusions] Based on these results, a comprehensive prospecting model for Devonian rhodochrosite deposits was established and validated through exploration tests in the Xialei-Longbang area. The model captures the key ore-controlling factors and prospecting criteria of sedimentary manganese deposits in the region. [Significance] The combination of MPMT and drilling is applicable to sedimentary manganese exploration in southwestern Guangxi and provides important guidance for deep and concealed ore prospecting.

Keywords: sedimentary manganese deposits; ore-controlling factors; prospecting model; Devonian; multi-polarization magnetotelluric method (MPMT); southwestern Guangxi

摘要: 桂西南下雷-龙邦地区是中国重要的锰矿矿集区, 目前面临沉积型锰矿赋存规律重构不清、有效勘查技术方法选取缺乏等难题。文章在分析成矿地质背景的基础上, 对比研究了该矿集区典型矿床的地质特征、含锰岩系地球化学特征及多极化大地电磁测深法(MPMT法)勘探试验结果。结果表明, 研究区可划分为下雷-上映、龙邦-地州2个次级成锰盆地, 其中下雷-上映成锰盆地发育钙质硅质岩、钙质硅质岩-硅质灰岩、硅质灰岩-泥质条带灰岩3种沉积微相, 龙邦-地州成锰盆地仅发育硅质灰岩-泥质条带灰岩1种沉积微相; 对成矿有利性而言, 以钙质硅质岩型最佳, 钙质硅质岩-硅质灰岩型次之, 硅质灰岩-泥质条带灰岩型最差。锰质富集中心分布于下雷-灵马同沉积断层西北侧约500~1000 m范围内; 不同矿区(段)碳酸锰矿层厚度及Mn品位变化较大, 以下雷矿区为中心向外, 锰矿层呈现厚度减薄、Mn品位降低的特征, 且II+III矿层与I矿层的厚度品位总体具有正相关性。成矿流体主要为海底热液, 成矿沉积环境为弱氧化-氧化环境。含锰岩系相对上、下围岩表现为低电阻率-高磁化率组合特征。通过上述研究, 建立了桂西南下雷-龙邦地区泥盆系碳酸锰矿综合找矿模型, 指出MPMT法和钻探工程组合方法在桂西南地区具有良好适用性, 对沉积型锰矿的攻深找盲具有重要指导意义。

关键词: 沉积型锰矿; 控矿因素; 找矿模型; 泥盆系; 多极化大地电磁法(MPMT法); 桂西南

中图分类号: P611; P612; P631 **文献标识码:** A

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2026087

0 引言

锰是支撑钢铁冶金、新能源动力电池、高端新材料产业的战略性关键金属原料(郭馨莲等, 2026)。海相沉积型锰矿是中国锰资源最核心载体, 占全国锰矿资源总量73%(付勇等, 2014; 阴江宁和肖克炎, 2014; 丛源等, 2018)。中国沉积锰矿多形成于中元古代一早中生代裂谷型盆地, 赋存于陆内裂谷、陆间拗拉槽、大陆边缘伸展构造环境(杜远生等, 2023)。长期以来, 围绕锰矿成矿物质来源、富集机制及古海洋氧化还原环境三大核心科学问题形成多种不同观点。①在锰质物源研究方面, 多数研究证实海底热液流体是大型沉积锰矿锰质的首要供给源, 深部断裂释放富Mn热流体进入海盆后参与成矿, 陆源风化物质只提供少量锰质(Yu et al., 2016; 薛友智等, 2019; 杨瑞东等, 2022; 周皓宇等, 2024; 郭宁宁等, 2026); 仅少数小型锰矿床以陆源物质为主, 热液贡献微弱。②在锰质沉淀富集机制方面, 目前主流成矿理论分为3类基础模型, 并逐步纳入微生物作用补充完善: 氧化沉淀模型, 即富 Mn^{2+} 缺氧水体与表层富氧海水混合, 锰元素氧化形成氢氧化物沉降, 包括细分锰泵、闭塞盆地、氧化带扩张等子模型(Calvert and Pedersen, 1996; Roy, 2006;

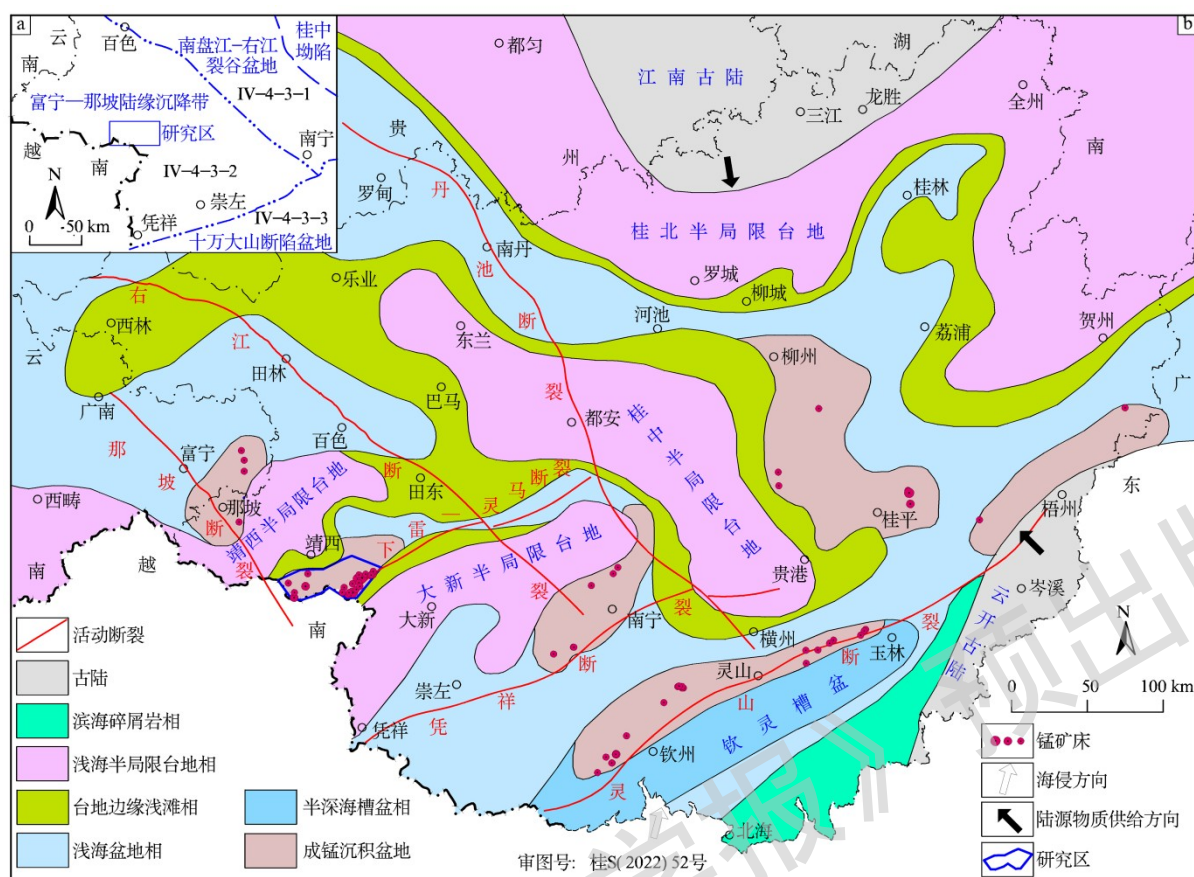
Maynard, 2010; Ma et al., 2019); 缺氧直接沉淀模型, 即闭塞深水盆地底层水体持续缺氧, Mn^{2+} 直接与碳酸盐根结合形成原生碳酸锰(周琦, 2008; Chen et al., 2022, 2023); 微生物辅助成矿模型, 即微生物催化锰的氧化—还原循环, 大幅提升锰富集效率, 可作为前 2 类模型的补充机制(Huang et al., 2022; 余文超等, 2025; 陈旭等, 2026)。③在古海洋氧化还原环境判别方面, 传统判别手段依托 Ce 异常、碳同位素以及 U、V、Mo 等氧化还原敏感元素比值, 但易受陆源碎屑混染干扰, 判别精度有限(董志国等, 2020)。近年来, Fe 组分与 Mo 同位素联合分析手段逐步普及, 为还原沉积型锰矿古水体条件提供更可靠的依据(Dong et al., 2023, 2025; He et al., 2024)。

桂西南下雷—龙邦地区是国内晚泥盆世超大型锰矿集中区, 其中下雷超大型锰矿床为华南泥盆系沉积型锰矿的典型范例。现有研究已从矿物学、地球化学、沉积环境等方面对该矿床开展了一定工作(秦元奎等, 2010a; 赵立群等, 2016; Yan et al., 2022), 但仍存在两大核心争议与研究短板。①古海洋氧化还原环境分歧显著。欧莉华(2013)、赵立群等(2016)基于 $V/(V+Ni)$ 、 U/Th 、 Ni/Co 等指标, 提出锰矿形成于弱氧化—富氧水体; Chen et al. (2023) 依托 Mo/Al 、Ce 正异常数据, 认为锰碳酸盐直接沉淀于缺氧底层水体。二者结论完全相悖, 核心原因在于相关分析多局限于下雷单一矿段的样品采集, 缺少全区多盆地、多矿段系统的数据对比支撑。②锰质富集机制未形成统一认识。目前提出的古天然气渗漏、锰泵、缺氧直接沉淀 3 类模式均只能局部解释矿区矿化特征, 无法覆盖龙邦—地州等外围中小型矿床; 然而, 现有研究多局限于下雷单一矿床的样品采集, 尚未完成研究区次级成锰盆地单元划分, 缺乏不同盆地间岩相特征、含矿层位及地球化学特征的系统性对比分析, 导致区域尺度完整成矿规律至今尚未明确。从勘查实践层面看, 桂西南锰矿勘探深度已由 500 m 以浅转入 1000 m 深部攻深找盲阶段(王华青等, 2026)。传统地表填图、浅部钻探等勘查手段对深部隐伏锰矿体识别能力有限, 缺少适配泥盆系沉积型锰矿的地质—地球物理一体化综合找矿模型, MPMT 等电磁法在该区锰矿勘查的应用适配性及岩矿石物性响应特征尚未开展系统实试验证。上述多重因素共同制约了研究区老矿山深部及外围找矿突破。

基于上述研究空白与勘查技术瓶颈, 文章选取桂西南下雷—龙邦锰矿集区为研究对象, 整合全区 285 个钻孔实测数据、70 组岩矿石物性测试、多矿区主量—微量—稀土元素地球化学分析以及 MPMT 物探剖面实测数据, 结合野外地质剖面测量、典型矿床解剖、地球化学判别及物探方法适用性试验等手段开展系统性研究, 以期为桂西南锰矿深部找矿预测提供依据。

1 成矿地质背景

研究区位于中国古特提斯构造域和环太平洋构造域的复合部位, 地处华南板块(扬子板块)西南缘, 大地构造位置属富宁—那坡陆缘沉降带(IV-4-3-2), 是右江盆地的重要组成部分, 表现为近东西向延伸的菱形构造区(右江褶皱带; 欧莉华, 2013)。加里东期, 研究区处于板块边缘构造活动带, 经历了多期俯冲与碰撞事件。晚古生代以来, 随着华南板块边缘构造活动趋于阶段性稳定, 区域上形成了较为有利的构造环境, 为右江盆地的发育奠定了基础。研究区的构造演化与右江盆地基本一致, 经历了陆内裂谷、被动大陆边缘、弧后裂谷、强烈拗陷与充填—关闭等阶段(陈洪德和曾允孚, 1990)。晚泥盆世, 受古特提斯洋扩张影响, 右江盆地处于强烈的陆内裂谷拉张环境, 盆地内部北西向与北东向断裂共同活动, 构成了复杂的棋盘式台、盆(槽)相间古地理格局。台地形成以浅海碳酸盐岩为主的沉积建造, 盆地则发育相对深水的硅—泥—灰含锰沉积建造。受北西向那坡断裂和北东向下雷—灵马断裂控制, 形成了富宁—那坡、靖西—大新 2 个成锰盆地(图 1), 盆地类型属于转换拉张裂谷, 是扬子板块周边最重要的成锰盆地类型(侯宗林等, 1997)。



a—研究区大地构造位置图；b—研究区晚泥盆世构造-岩相古地理图

图1 桂西南晚泥盆世成锰沉积盆地构造-岩相古地理图（据茹廷铨等，1992；侯宗林等，1997修改）

Fig. 1 Tectonic-lithofacies paleogeographic map of the Late Devonian manganese-forming sedimentary basin in southwestern Guangxi (modified from Ru et al., 1992; Hou et al., 1997)

(a) Tectonic location map of the study area; (b) Tectonic-lithofacies paleogeographic map of the study area

研究区出露地层以泥盆系、石炭系为主，寒武系、二叠系、三叠系零星分布。地层岩性复杂，按沉积相划分为台地内部相-边缘相和斜坡相-盆地相，前者以浅海碳酸盐岩建造为主，后者以碳酸盐岩夹硅质岩、泥岩建造为主。上泥盆统五指山组（ D_3W ）是区内最主要的含锰地层，次为上泥盆统榴江组（ D_3L ）。区内构造发育，主要控矿褶皱包括龙邦背斜、龙邦-地州向斜、茶屯-大邦向斜、湖润-把荷背斜及下雷-上映向斜；断裂分为北东向和北西向2组，主要包括北东向下雷-灵马断裂和北西向黑水河断裂，前者为同沉积断层，具有控盆、控岩、控相特征，后者为活动性断层，具左行走滑性质。区内岩浆岩出露少，出露面积最大的为加里东晚期（442~412 Ma）钦甲花岗岩体（ $\eta\gamma S_3$ ；王永磊等，2011），呈岩株产出；其余为零星散布的海西晚期（约263~258 Ma）基性岩体（ $\beta\mu C$ ， $\beta\mu P$ ；李政林等，2015；李兴鹏等，2019；吴祥珂等，2023），多呈岩脉、岩株、岩席状顺层侵入，岩性为辉绿岩、辉长辉绿岩，主要有安宁、龙邦、壬庄、茶屯岩体等。区内矿产主要为沉积型锰矿。根据地层、岩性岩相及锰矿床分布特征，靖西-大新成锰盆地可划分为下雷-上映、龙邦-地州2个次级成锰盆地（图2），前者以大、中型锰矿床为主，后者以中、小型锰矿床为主。

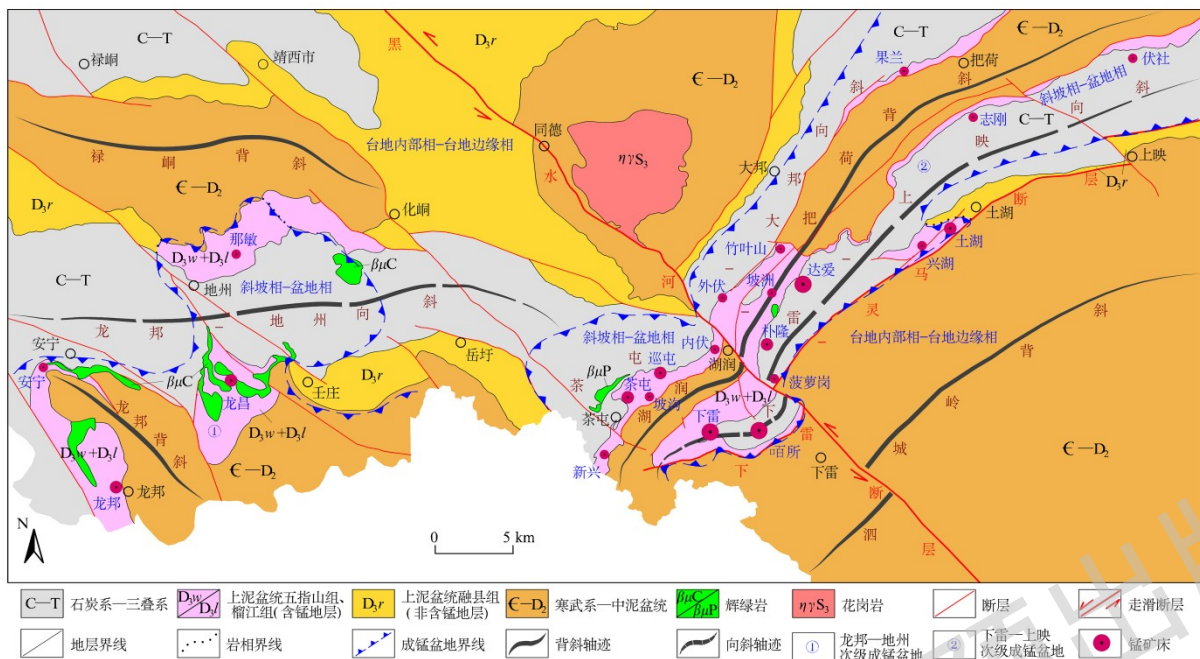


图2 桂西南下雷-龙邦地区地质矿产图

Fig. 2 Geological and mineral resources map of the Xialei-Longbang area, southwestern Guangxi

2 典型矿床特征

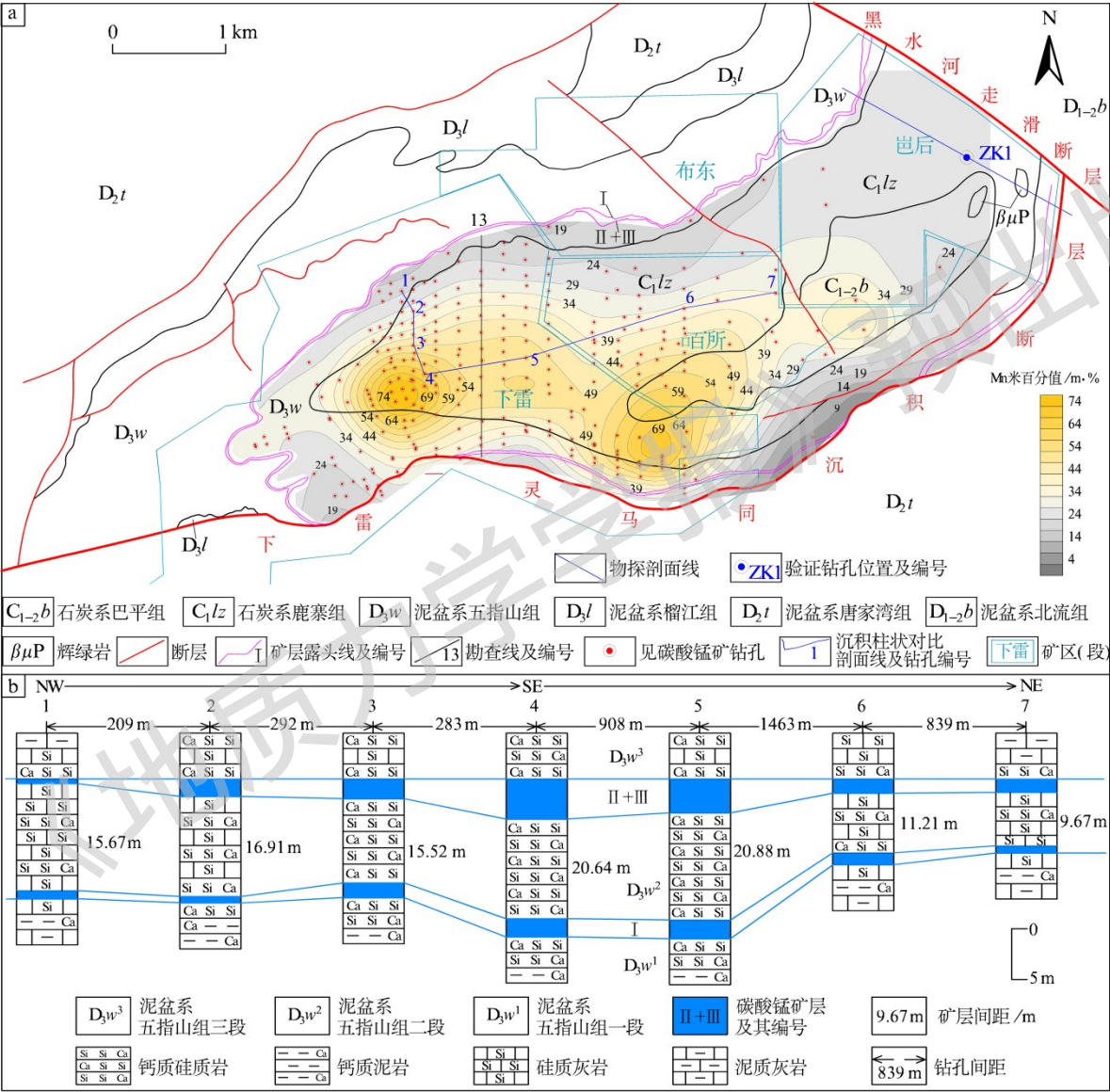
下雷-上映、龙邦-地州2个次级成锰盆地呈北东向展布，宽7~15 km，中国境内长20~40 km，往西南方向延伸至越南。区内主要出露上古生界斜坡相-盆地相地层，包括泥盆系榴江组（ D_3l ）、五指山组（ D_3w ），石炭系鹿寨组（ C_{1Lz} ）、巴平组（ C_{1-2b} ）、南丹组（ C_2Pn ），各地层均以含硅质岩或泥岩为特征（陈家浩等，2026）。下雷-上映成锰盆地处于下雷-灵马同沉积断层西北侧（图3a），主要控矿构造为下雷-上映向斜和湖润-把荷背斜，辉绿岩形成时代为二叠纪，零星出露；龙邦-地州成锰盆地主要控矿构造为龙邦背斜和龙邦-地州向斜，辉绿岩形成时代为石炭纪，分布较多且广。

2.1 含锰岩系变化及与锰质富集规律

研究区含锰地层为上泥盆统五指山组（ D_3w ），含锰岩系为五指山组第二段（ D_3w^2 ）。该段自下而上发育I、II、III 3层碳酸锰矿，其间以2层硅质岩或含锰硅质岩夹层相隔。下部I矿层厚0.56~7.34 m，以灰绿、浅肉红色为主，豆（鲕）状、条带状构造发育，矿石矿物以锰方解石、钙菱锰矿为主；中部II矿层厚0.56~9.89 m，颜色分带明显（下部灰绿色、中部棕红色、上部灰深灰色），以豆（鲕）状、薄层状构造为主；顶部III矿层厚0.56~9.89 m（局部0~3.13 m），以灰白-灰黑色为主，条带状、薄层状构造发育。II、III矿层间夹层厚度薄，绝大部分小于夹石剔除厚度，难以分开，通常将其合并为II+III矿层。

基于现场调查和以往完工钻孔资料的对比，含锰岩系空间分布具有以下规律：①下雷-上映、龙邦-地州2个次级成锰盆地的含锰岩系厚度变化显著。下雷矿区含锰岩系厚度7.60~20.88 m，下雷矿段一般12~20 m，往东北唔所、岵后矿段减薄至8~15 m，反映含锰岩系厚度沿走向变化较大，沿倾向变化相对较小（图3b）；龙邦-地州成锰盆地含锰岩系厚度小，一般0.82~1.88 m。②成锰盆地的岩性微相与锰矿米百分值密切相关。下雷矿区含锰岩系可划分为钙质硅质岩、钙质硅质岩-硅质灰岩2种微相类型，钙质硅质岩型主要分布在下雷矿段中部和东南部，与锰矿米百分值浓集中心区域大致重合（图3a），由浓集中心向外逐渐过渡为钙质硅质岩-硅质灰岩型；龙邦-地州成锰盆地含锰岩系只有硅质灰岩-泥质条带灰岩微相类型，锰矿米百分值相对较低。

根据下雷矿区各矿段以往施工 285 个钻孔数据，编制了 II+III 碳酸锰矿层锰米百分值（厚度×Mn 品位）等值线图（图 3b），下雷矿区碳酸锰矿具有以下富集规律：① II+III 碳酸锰矿层富集中心分布在下雷矿段中部和东南部，厚度一般 3~5 m，Mn 品位一般 18 %~22 %，对应锰米百分值在 54~74 m•% 之间。② 富集中心往西南、往西北至布东矿段、往北东至岫后矿段，II+III 矿层厚度和品位逐渐降低，锰米百分值也逐渐变小，厚度一般 1.5~3.0 m，Mn 品位一般 12 %~18 %，对应锰米百分值介于 19~54 m•% 之间。③ 富集中心走向与下雷-灵马同沉积断层走向大致平行，且距同沉积断层 500~1000 m。以上数据反映下雷矿区原生碳酸锰矿的富集中心位于下雷矿段中部和东南部，且在平面上呈现出明显的锰米百分值分带性。



a—下雷矿区 II+III 碳酸锰矿层锰米百分值等值线图；b—下雷矿区含锰岩系沉积柱状对比图
图 3 下雷矿区地质简图

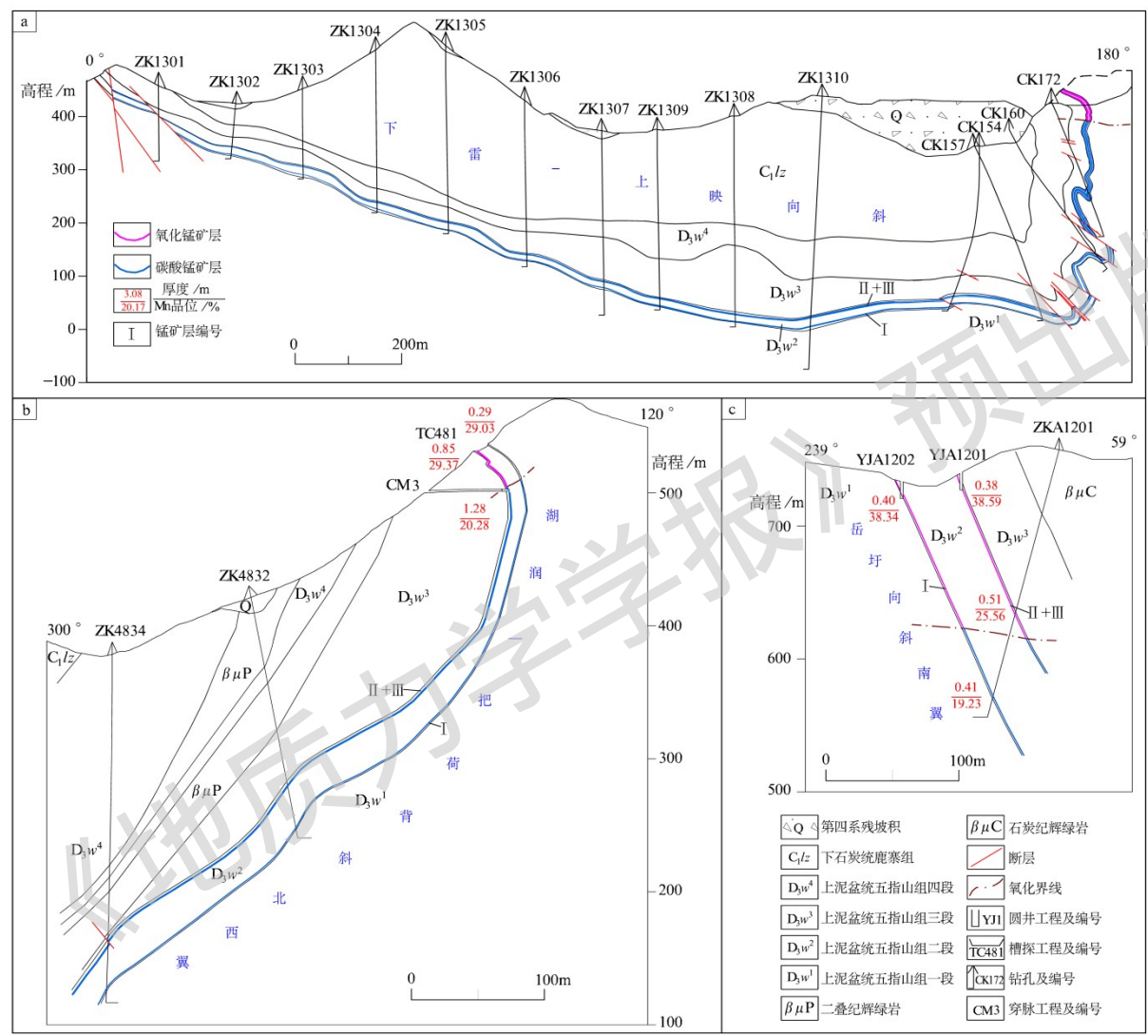
Fig. 3 Geological sketch map of the Xialei mining area

(a) Contour map of manganese percentage-meter value of the II+III manganese carbonate ore beds in the Xialei mining area; (b) Stratigraphic correlation diagram of the manganese-bearing sequence in the Xialei mining area

2.2 矿层（体）变化规律

研究区锰矿层均赋存于成锰盆地内的向斜或背斜两翼，呈层状产出，产状与褶皱形态或围岩产状一致，规

模也与褶皱一致。不同矿区矿层产状变化大，下雷矿区锰矿赋存于北东向倾伏的下雷-上映向斜中，向斜轴向长约 9 km，宽 2.5~3.9 km，锰矿层展布规模大，面积约 22 km²，倾向延深 300~2000 m，向斜南翼矿层呈陡倾斜状，倾角一般大于 70°，局部倒转；向斜北翼矿层产状较平缓，倾角一般小于 30°（图 4a）。龙邦-地州成锰盆地的锰矿层和湖润矿区的锰矿层上部常见辉绿岩大致顺层产出（图 4b、4c）。自下而上分为 I、II+III 矿层，部分矿区 I 矿层厚度小甚至缺失。由下雷往西至湖润、龙昌，I 矿层与 II+III 矿层夹层厚度逐步增大，下雷矿区为 5.65~20.88 m，湖润矿区为 6.25~41.63 m，龙昌矿区为 9.98~51.5 m，多集中在 30~40 m。



a—下雷矿区 13 号勘查线地质剖面图；b—湖润矿区内伏矿段 48 号勘查线地质剖面图；c—龙昌矿区 12 号勘查线地质剖面图
图 4 研究区锰矿层剖面形态对比图

Fig. 4 Comparison of manganese ore-bed geometries in the study area

(a) Geological cross-section along exploration line No.13, Xialei mining area; (b) Geological cross-section along exploration line No.48, Neifu ore block, Hurun mining area; (c) Geological cross-section along exploration line No.12, Longchang mining area

不同矿区（段）碳酸锰矿层厚度及 Mn 品位变化较大（图 5）。碳酸锰矿层厚度和品位最高值位于下雷矿区，I 矿层最大厚度 5.88 m，平均厚度 1.5 m，Mn 最高品位 34%，平均品位 21%；II+III 矿层最大厚度 9 m，平均厚度 3 m，Mn 最高品位 29%，平均品位 19%。整体表现为以下雷矿区为中心往外，锰矿层具有厚度呈逐步减薄，Mn 品位逐步降低，厚度品位总体呈正相关。龙邦-地州成锰盆地中的碳酸锰矿层具有厚度小的特征，矿层厚度 0.30~1.20 m，平均厚度 0.53 m，Mn 品位 15.89%~32.24%，平均 20.36%。研究区总体上具

有Ⅱ+Ⅲ矿层厚度大，Ⅰ厚度也大，Ⅱ+Ⅲ矿层品位高，Ⅰ矿层品位也高的趋势。

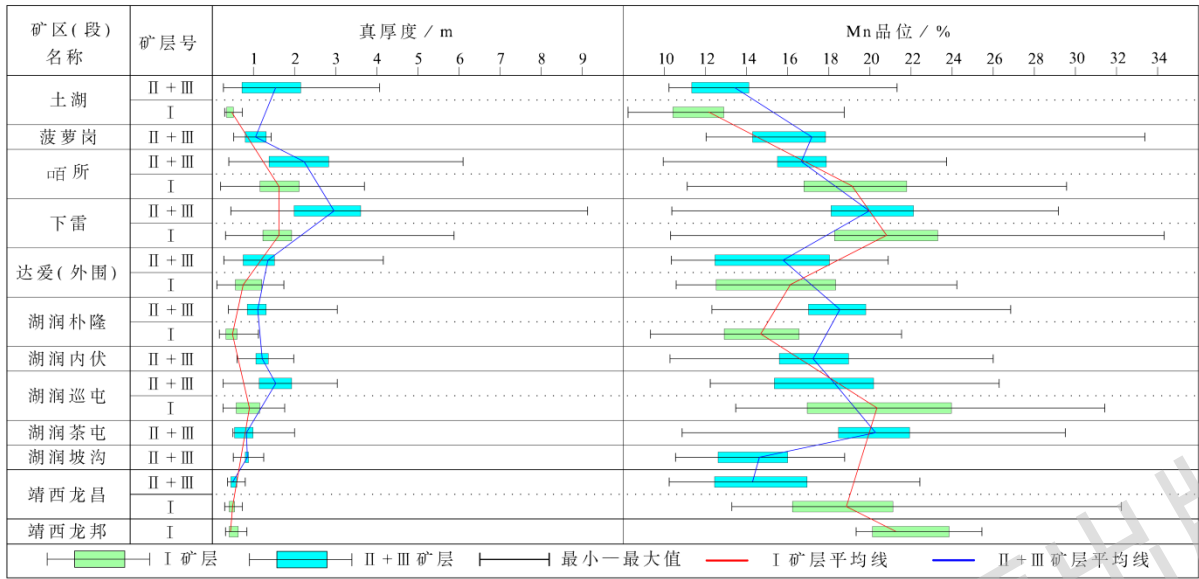
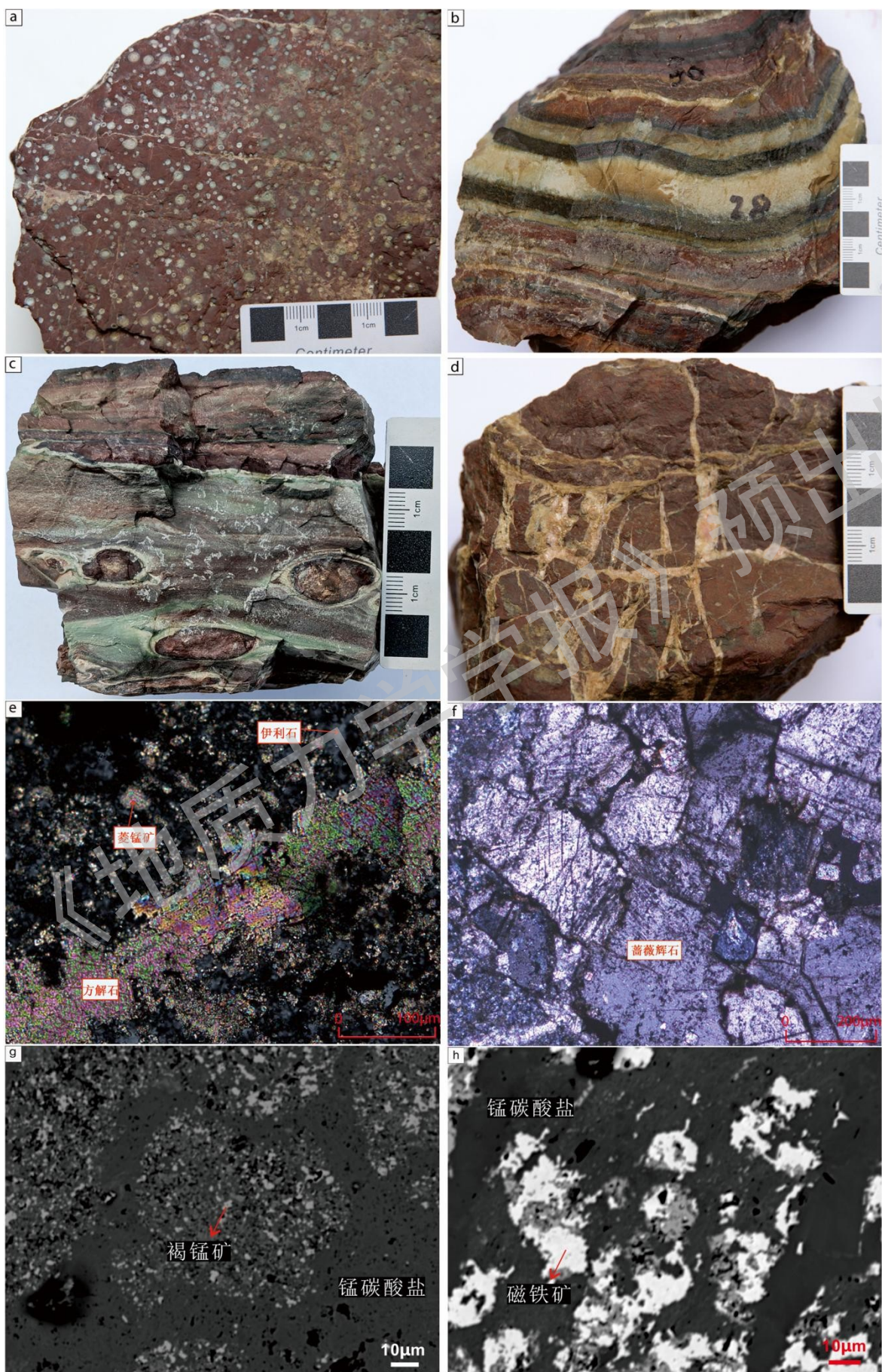


图5 研究区碳酸锰矿层厚度和品位分布统计图

Fig. 5 Thickness and grade distributions of manganese carbonate ore beds in the study area

2.3 矿石质量变化规律

研究区锰矿床分为原生沉积型碳酸锰矿床和次生锰帽型氧化锰矿床。下雷-上映成锰盆地以沉积型碳酸锰矿床为主，原生锰矿石根据矿物成分可分为碳酸锰矿和硅酸锰-碳酸锰矿。碳酸锰矿石一般呈深灰色、灰黑色或黑绿色；硅酸锰-碳酸锰矿石多呈猪肝色、砖红色、棕红色、玫瑰色及铁黑色等。碳酸锰矿石主要为微晶、细粒结构，其次为显微鳞片泥质结构、生物碎屑结构、他形粒状及柱粒状结构等；矿石构造主要为豆（鲕）状（图 6a）、条带状（图 6b）、薄（纹）层状、块状和结核状构造（图 6c），偶见网脉状（图 6d）、角砾状和斑杂状构造。碳酸锰矿石矿物主要由菱锰矿、锰方解石、钙菱锰矿等组成（图 6e）；硅酸锰-碳酸锰矿石矿物主要由菱锰矿、钙菱锰矿、锰方解石、蔷薇辉石、锰铁叶蛇纹石等组成（图 6f），含少量褐锰矿（图 6g）、黑锰矿、水锰矿及赤铁矿、磁铁矿（图 6h）等；脉石矿物主要为石英和方解石，高岭石、绢云母、绿泥石、黄铁矿次之。矿石工业类型以贫碳酸锰矿石为主。



a—豆（鲕）状碳酸锰矿石；b—条带状碳酸锰矿石；c—结核状碳酸锰矿石；d—发育蔷薇辉石网脉的块状碳酸锰矿石；e—菱锰矿呈不规则粒状与微细粒伊利石混杂共生（正交偏光）；f—蔷薇辉石呈不规则粒状（正交偏光）；g—褐锰矿（背散射 BSE 图像）；h—磁铁矿（背散射 BSE 图像）

图 6 下雷矿区锰矿石宏观特征及显微特征照片

Fig. 6 Macroscopic and microscopic characteristics of manganese ores from the Xialei mining area

(a) Oolitic (pisolitic) manganese carbonate ore; (b) Banded manganese carbonate ore; (c) Tuberculous manganese carbonate ore; (d) Massive manganese carbonate ore with a rhodonite stockwork; (e) Rhodochrosite occurs in irregular granular form, intermingled with fine-grained illite(crossed micol); (f) Rhodonite occurs in irregular granular form (crossed nicol); (g) Braundite (backscattered electron, BSE image); (h) Magnetite (backscattered electron, BSE image)

龙邦—地州成锰盆地查明的工业锰矿以锰帽型氧化锰矿床为主。氧化锰矿石呈黑色、钢灰色或褐黑色（图 7a），矿石结构主要为隐晶质胶状结构和他形粒状结构；构造以微层状或条带状（图 7b）、块状（图 7c）构造为主，次为蜂窝状构造和豆状构造（图 7d）。矿石矿物以褐锰矿、硬锰矿、软锰矿为主，次为黑锰矿、水羟锰矿和六方锰矿；脉石矿物主要为石英、方解石，次为黏土矿物。矿石工业类型以优质富氧化锰矿石为主。



a—钢灰色锰矿层与条带状硅质灰岩呈整合接触；b—条带状锰矿石；c—块状氧化锰矿石；d—豆（结核）状氧化锰矿石
图 7 龙邦矿区含锰岩系野外及锰矿石照片

Fig. 7 Field photographs of the manganese-bearing rock series and manganese ores from the Longbang mining area

(a) Steel-gray manganese ore bed in conformable contact with banded siliceous limestone; (b) Banded manganese ore; (c) Massive oxidized manganese ore; (d) Nodular (tuberculous) oxidized manganese ore

不同矿区矿石特征略有差异，硅酸锰—碳酸锰类矿石主要分布于下雷矿区，次为湖润矿区，其他矿区少或未见（表 1）。下雷矿区以薄（纹）层状、豆（鲕）状和条带状构造为主，结核状次之；湖润矿区以薄（纹）

层状构造为主，豆（鲕）状和条带状构造次之；其他矿区少或无豆（鲕）状构造。矿石矿物成分和构造特征表明，锰矿形成与热水沉积活动关系密切。

表1 研究区锰矿物统计表

Table 1 Manganese mineral statistics for the study area

分类	矿物名称	龙邦—地州成锰盆地				湖润—把荷背斜西北翼				下雷	—	上	映	向	斜	
		安宁	龙邦	龙昌	那敏	茶屯	巡屯	坡沟	内伏	下雷	晒所	菠萝岗	朴隆	达爱	兴湖	土湖
氧化物— 氢氧化物类	拉 锰 矿	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	+
	六方锰矿	+	+	+	+	++	+	—	+	++	—	+	++	—	—	—
	水 锰 矿	—	—	—	—	—	—	—	—	+	+	+	+	—	+	+
	锰钾矿	—	—	—	—	++	+	+	+	++	—	—	+	—	—	—
	锰铁矿	—	—	—	—	+	—	—	—	+	—	—	—	—	—	—
	黑 锰 矿	—	+	+	—	—	—	—	—	+	—	—	—	—	—	—
	褐 锰 矿	++	+++	++	++	++	+	+	++	++	+	+	+	—	—	+
	水羟锰矿	+	+	+	+	++	—	—	—	++	—	++	++	+	+	+
	硬 锰 矿	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	—	+++	+++	++	++	+++
	软 锰 矿	+++	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+	+++	—	+++	+++	+++
碳酸盐类	锰方解石	+++	+++	+++	+++	++	++	+++	+	++	++	++	+	+++	++	+++
	钙菱锰矿	++	++	++	++	+++	+++	+++	+	+++	—	+++	+	++	—	++
	菱 锰 矿	++	++	++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	++	—	++
硅酸盐类	蜡 硅 锰 矿	—	—	—	—	+	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	锰 铝 榴 石	—	—	—	—	+	—	—	—	+	—	—	—	—	—	—
	锰铁叶蛇纹石	—	—	—	—	—	+	+	—	+	—	—	—	—	—	—
	蔷薇辉石	—	—	—	—	++	++	++	—	+++	+	—	+	+	—	+

注：“+++”代表主要，“++”代表次要，“+”代表少量，“-”代表未见

3 关键控矿因素

3.1 同沉积断裂

桂西南地区早泥盆世晚埃姆斯期开始强烈裂陷，形成了台地—台间深水海槽间列的盆地格局（Gan et al., 2026）。在持续拉张走滑作用下，北西向那坡同沉积断裂和北东向下雷—灵马同沉积断裂共同控制着靖西—大新成锰盆地的形成、演化及空间展布形态，也控制着同沉积断裂两侧不同的沉积相带和岩性组合（图1b）。其中，下雷—灵马断裂的走滑拉张作用形成北东向狭长凹陷形态的下雷—上映次级成锰盆地，沉积了一套硅质—钙质—泥质的岩性组合。这种相对封闭的断陷盆地是深部热液锰质富集的有利场所，在一定的物化条件下使锰质在盆地内大规模沉积且沿北东向分布，而浅水台地的纯碳酸盐岩不利于锰质的沉积。因此，拉张构造背景下的同沉积断层是桂西南地区重要的控盆、控相、控矿因素。

3.2 沉积相

研究区锰矿床集中分布于靖西—大新盆地的斜坡相—盆地相中，具有明显的沉积相专属性（闫臻等，2026）。根据岩石组合可划分为3种微相：钙质硅质岩型对成矿最为有利，形成下雷、晒所、湖润巡屯、达爱等大—中型锰矿床；钙质硅质岩—硅质灰岩型次之，形成土湖、湖润朴隆、湖润茶屯等中型锰矿床；硅质灰岩—泥质条带灰岩型则形成龙邦、龙昌等中小型锰矿床。平面上，以下雷矿区为中心，往东北至土湖、上映一带，往西至龙邦、龙昌一带，硅质岩类含量逐步减少、灰岩类含量逐步增加，反映水体总体由深变浅的趋势，锰矿层则表现为数量减少、厚度变薄、连续性变差、锰含量降低的特征。在垂向上，由下至上含锰岩系经历了斜坡相→台盆相→斜坡相的演化过程（图8），锰矿床主要产于台盆相中，台盆相及其沉积微相的空间展布控制了锰矿的分布与质量。

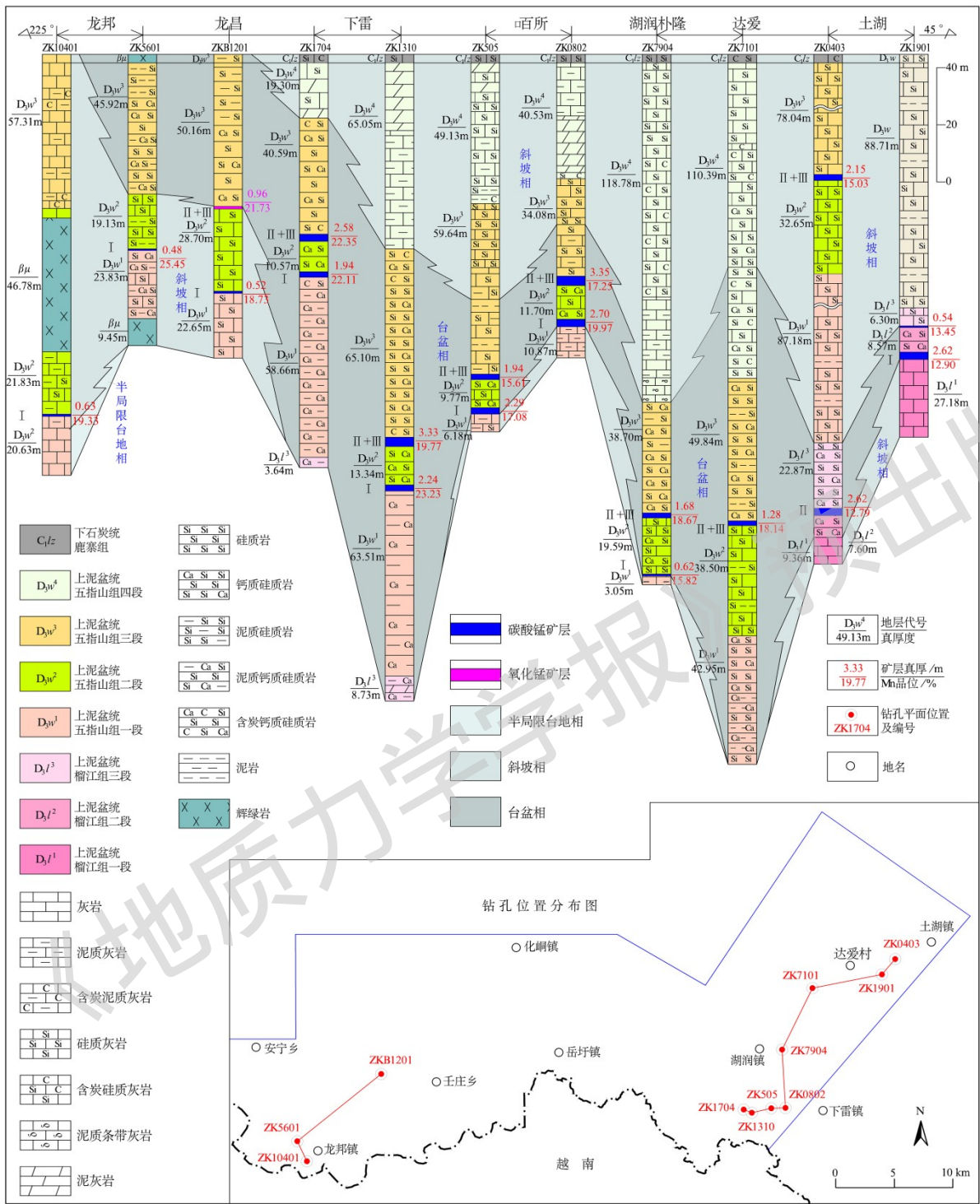


图 8 研究区含锰岩系沉积柱状对比图

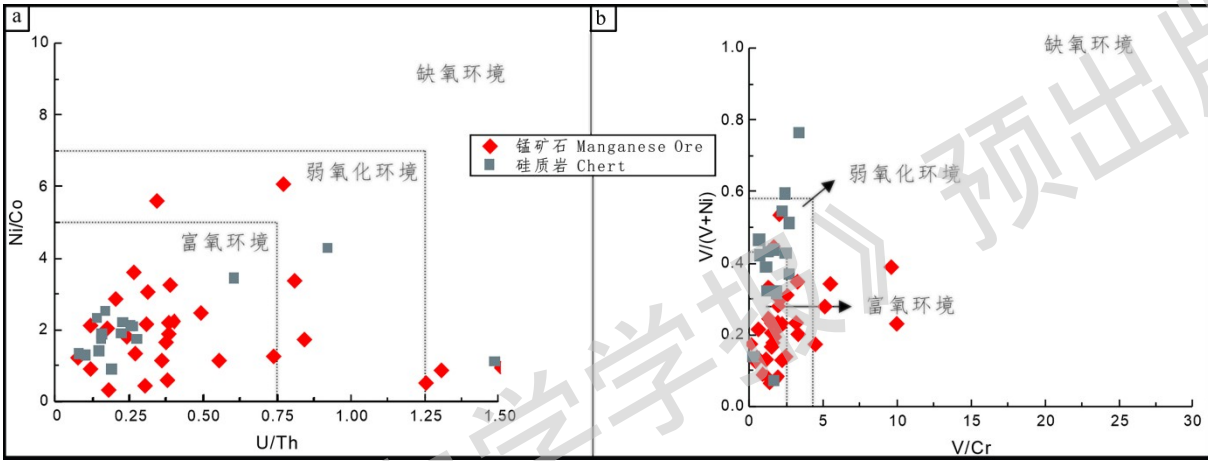
Fig. 8 Stratigraphic correlation diagram of the manganese-bearing sequence in the study area

3.3 沉积环境

U、V、Mo 等氧化还原敏感元素的含量变化是重建古海洋氧化还原状态的重要指标（常华进等，2009）。这些元素在沉积过程中对氧化还原条件极为敏感，主要以自生组分赋存于沉积物中，成岩过程中迁移性极低，可有效保留原始沉积记录（Zhou and Jiang, 2009; Zhang et al., 2011; Tribovillard et al., 2012）。在氧化一次氧化环境下，U、V、Mo 无明显富集；缺氧环境下 U、V 可发生富集；硫化环境中三者均显著富集。研究区含

锰岩系中 V (平均 38.18×10^{-6})、U (平均 1.57×10^{-6}) 和 Mo (平均 6.40×10^{-6}) 均未表现出富集特征, 硅质岩系同样如此, 均指示其形成于氧化-次氧化环境。微量元素比值 U/Th 与 Ni/Co 对沉积环境判别较为有效 (王成善等, 1999): 当 $U/Th < 0.75$ 且 $Ni/Co < 5$ 时指示富氧环境; $0.75 < U/Th < 1.25$ 且 $5 < Ni/Co < 7$ 时指示弱氧化环境; $U/Th > 1.25$ 且 $Ni/Co > 7$ 则指示缺氧环境。研究区含锰岩系 U/Th 平均 0.86、Ni/Co 平均 1.94, 围岩 U/Th 平均 0.34、Ni/Co 平均 2.01, 均指示氧化环境 (图 9a)。V/(V+Ni) 与 V/Cr 比值也常用于反映水体氧化还原状态 (Joachimski et al., 2001): $V/(V+Ni) < 0.46$ 且 $V/Cr < 2$ 为富氧环境; $0.46 < V/(V+Ni) < 0.57$ 且 $2 < V/Cr < 4.25$ 为弱氧化环境; $V/(V+Ni) > 0.57$ 且 $V/Cr > 4.25$ 为缺氧环境。含锰岩系 V/(V+Ni) 平均 0.23、V/Cr 平均 2.49, 硅质岩系 V/(V+Ni) 平均 0.41、V/Cr 平均 1.75, 综合指示弱氧化-氧化环境 (图 9b)。

以上地球化学数据反映研究区锰矿沉积介质总体处于弱氧化-氧化环境, 有利于锰的活化迁移而有利于沉淀。台沟相相对封闭的古地理地貌导致局部碱性还原条件的形成, 为锰沉淀提供了有利介质: Mn^{2+} 可与 CO_3^{2-} 结合形成碳酸锰沉淀, 或与 SiO_4^{4-} 结合形成硅酸锰矿物。氧化-还原界面的动态变化与局部还原环境, 共同控制了锰的富集成矿。



a—Ni/Co-U/Th 判别图; b—V/(V+Ni)-V/Cr 判别图

图 9 研究区碳酸锰矿石及围岩地球化学判别图

Fig. 9 Geochemical discrimination diagrams of manganese carbonate ores and wall rocks in the study area

(a) Ni/Co versus U/Th discrimination diagram; (b) V/(V+Ni) versus V/Cr discrimination diagram

3.4 地层与岩性

研究区原生沉积型锰矿赋矿层位为晚泥盆纪五指山组, 锰矿层与顶、底板围岩严格沿层位整合产出, 具明显的层控特征。其中五指山组二段为主要赋矿层位, 为一套含锰的钙质硅质岩、硅质灰岩、泥质条带灰岩的岩性组合。下雷-上映成锰盆地分为钙质硅质岩、钙质硅质岩-硅质灰岩、硅质灰岩-泥质条带灰岩 3 种岩性组合; 龙邦-地州成锰盆地只有硅质灰岩-泥质条带灰岩 1 种岩性组合。不同岩性组合对成矿的有利程度不一, 2 个成锰盆地不同岩性组合成矿特征如下。

3.4.1 下雷-上映成锰盆地

钙质硅质岩: ①碳酸锰矿层累计厚度一般为 4~16 m; ②矿石 Mn 品位一般为 10%~30%, 平均约 21%; ③矿石矿物以碳酸锰矿物为主, 次为蔷薇辉石、锰黝帘石等硅酸锰矿物, 少量褐锰矿、软锰矿等氧化锰矿物; ④矿石构造以薄-纹层状、鲕-豆状、块状、条带状为主, 次为结核状、角砾状等。

钙质硅质岩-硅质灰岩: ①碳酸锰矿层累计厚度一般为 1~4 m; ②矿石 Mn 品位一般为 10%~26%, 平均约 18%; ③矿石矿物以碳酸锰矿物为主, 少量蔷薇辉石、锰铁叶蛇纹石等硅酸锰矿物和褐锰矿等氧化锰矿物; ④矿石构造以薄-纹层状、块状为主, 次为鲕-豆状、条带状等。

硅质灰岩-泥质条带灰岩: ①碳酸锰矿层累计厚度一般为 0~1.5 m; ②矿石 Mn 品位一般为 10%~22%, 平均约 16%; ③矿石矿物以碳酸锰矿物为主, 少量褐锰矿等氧化锰矿物, 无 (极少) 硅酸锰矿物; ④矿石构

造以薄-纹层状、块状为主，少量（无）鲕-豆状等。

3.4.2 龙邦-地州成锰盆地

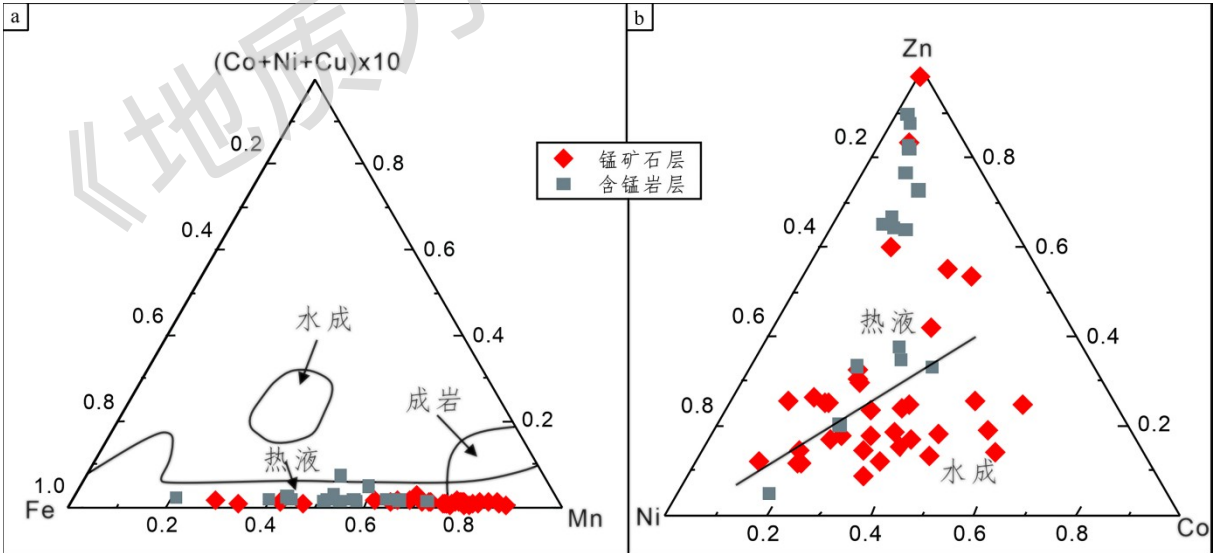
硅质灰岩-泥质条带灰岩：①碳酸锰矿层累计厚度一般为0~1 m；②矿石Mn品位一般为10%~25%，平均约20%；③矿石矿物以碳酸锰矿物为主，少量褐锰矿、软锰矿等氧化锰矿物，无（极少）硅酸锰矿物；④矿石构造以薄-纹层状、块状为主，少量（无）鲕-豆状、结核状等。

4 成矿模式

4.1 成矿物质来源

主量元素地球化学特征显示，锰矿石与围岩的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值平均值分别为18.12和16.28，均显著高于陆壳平均值3.6（Taylor and McLennan, 1985），指示沉积过程中存在热水或生物作用。锰矿石的 $\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mn})$ 比值为0.01~0.19，远低于热水沉积判别阈值0.35（Jewell and Stallard, 1991），而 $(\text{Fe}+\text{Mn})/\text{Ti}$ 比值平均值约为517.31，远超正常海水沉积物标准值（ <10 ），表明热液来源的Fe-Mn组分异常富集、铝质碎屑占比极低，成矿作用具显著热水沉积贡献，表明成矿锰质来源与热液活动具有密切关系。微量元素方面，锰矿石Co/Zn比值平均约为1.53，围岩平均值约为0.58，均明显低于水成沉积型锰矿（ >2.5 ），接近热液沉积特征（约0.15）（Toth, 1980）。含锰层相对上下围岩富集Cr、Ni、Co等元素，与海底基性-超基性岩滤出作用有关（Hein et al., 2008; Şaşmaz et al., 2014）。在Mn-Fe-(Co+Ni+Cu)×10三元图、Co-Ni-Zn三元图（图10a、10b）及logU-logTh图解（图11）中，样品大多落入热液成因区域。稀土元素特征进一步佐证了这一认识。锰矿石Y/Ho比值大于1，与典型热液锰矿床一致（Bau and Dulski, 1999）。围岩稀土总量较低（ $\sum \text{REE}$ 均值 113.59×10^{-6} ）， δEu 显著正异常（1.16）、 δCe 负异常（0.90），代表正常海相沉积；锰矿石稀土总量较高（ $\sum \text{REE}$ 均值 192.85×10^{-6} ）， δEu 显著正异常（1.12）、 δCe 正异常（1.26），与现代海洋中热液金属沉积物的稀土元素特征一致（朱启宽和周怀阳, 2021）。

以上数据反映研究区锰矿具有典型的热液沉积地球化学特征，锰的富集和成矿过程与热液活动密切相关，海底热液流体是锰质的主要来源。

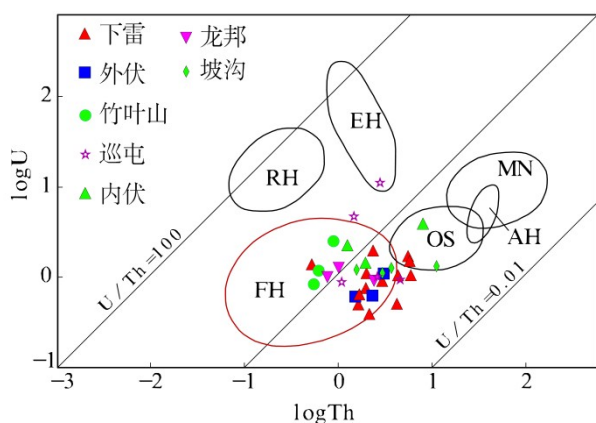


a—Mn-Fe-(Co+Ni+Cu)×10 图解（底图据 Rona, 1978）；b—Co-Ni-Zn 图解

图 10 研究区锰矿石及围岩地球化学判别图

Fig. 10 Geochemical discrimination diagrams for manganese ores and host rocks in the study area

(a) Mn-Fe-(Co+Ni+Cu)×10 diagram (base map from Rona, 1978); (b) Co-Ni-Zn diagram



RH—现代红海热卤水沉积区；EH—现代东太平洋热水沉积区；FH—古代热水铁锰沉积区；OS—远洋沉积区；MN—锰结核沉积区；AH—铝土矿区

图 11 研究区锰矿石 logU-logTh 直角图（底图据 Bostrom, 1983）

Fig. 11 logU-logTh plot of manganese ores in the study area (base map from Bostrom, 1983)

RH—modern Red Sea hot-brine sedimentary area; EH—modern East Pacific hydrothermal sedimentary area; FH—ancient hydrothermal Fe-Mn sedimentary area; OS—pelagic sedimentary area; MN—manganese nodule sedimentary area; AH—bauxite sedimentary area

4.2 成矿模式

下雷锰矿床的 I 矿层与 II+III 矿层沉积期分别与火山活动诱发的 Annulata 事件（约 363.4 Ma）及 Dasberg 事件（约 361.9 Ma）对应，这些事件以海洋生物危机、大范围海洋缺氧及海侵为特征（House, 2002; Racka et al., 2010; Becker et al., 2016; Zhang et al., 2019）。赵银强等（2026）利用天文年代学方法，构建了华南晚泥盆世下雷沉积型碳酸锰矿床的首个高精度年代学框架，指示大火成岩省爆发是驱动下雷锰矿床成矿的主导因素。大规模火山活动释放巨量 CO_2 导致全球变暖、海平面上升、大陆风化作用增强，并提高了陆源营养物质向海洋的输送量，这些过程促进了海洋生产力的提升。根据此次典型矿床和关键控矿因素的研究成果，综合现有最新认识，认为晚泥盆世五指山期华南板块持续裂陷拉张，在靖西—大新地区形成了下雷—上映和龙邦—地州 2 个凹陷，且海底火山活动强烈，带来大量富 Mn^{2+} 海底热液。这些富 Mn^{2+} 海底热液在上升流作用下，进入到上述相对封闭的由同沉积断层控制的凹陷（盆地）。古海水深度范围可能为 50~200 m，一般水深 80~150 m（秦元奎等, 2010b），以不溶于水的锰氧化物或者氢氧化物随有机质一起进入沉积物中。随着沉积埋藏，在缺氧的沉积物孔隙水中，先前形成的锰氧化物或者氢氧化物与有机质反应被还原为 Mn^{2+} ，随后与孔隙水中 HCO_3^- 结合形成锰碳酸盐，最终形成海相沉积型锰矿床（图 12）。

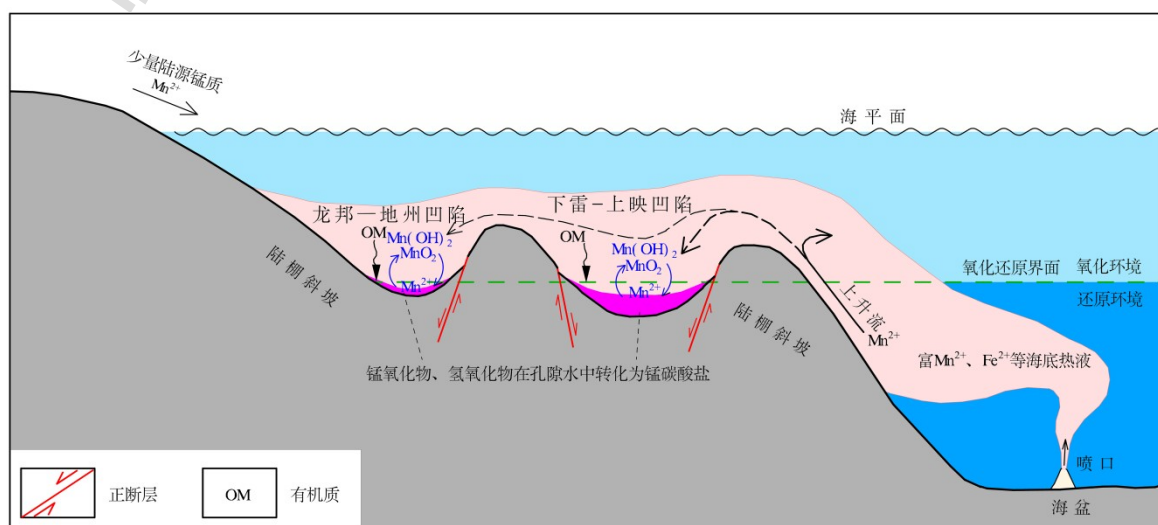


图 12 桂西南地区泥盆系锰矿成矿模式图（据赵银强等，2026 修改）

Fig. 12 Metallogenic model of Devonian manganese deposits in southwestern Guangxi (modified from Zhao et al., 2026)

5 找矿模型及勘查示范

5.1 找矿模型

找矿模型是在成矿模式的基础上，突出矿化信息，明确探测的目标及其形成的或引起的各类标志。根据区域成矿地质背景、典型矿床特征、关键控矿因素和找矿标志，构建了桂西南地区泥盆系锰矿综合找矿模型，主要内容包括 6 类：（1）地质标志：锰矿分布于龙邦-地州、下雷-上映 2 个次级成锰盆地中，受 NE 向下雷-灵马同沉积断层控制，沉积相为斜坡相-盆地相。（2）岩相标志：下雷-上映成锰盆地分为钙质硅质岩、钙质硅质岩-硅质灰岩、硅质灰岩-泥质条带灰岩 3 种沉积微相，龙邦-地州成锰盆地只有硅质灰岩-泥质条带灰岩 1 种沉积微相；不同沉积微相与锰矿层厚度、Mn 品位、矿石矿物、矿石构造密切相关，以钙质硅质岩型最佳，钙质硅质岩-硅质灰岩型次之，硅质灰岩-泥质条带灰岩型最差。（3）构造标志：自西向东锰矿层赋存于龙邦-地州向斜、茶屯-大邦向斜、湖润-把荷背斜、下雷-上映向斜中。（4）地层标志：含锰地层为上泥盆统五指山组二段（ D_3w^2 ），为一套含锰钙质硅质岩、硅质灰岩、泥质条带灰岩的岩性组合；直接顶板为上泥盆统五指山组第三段和第四段（ D_3w^{3+4} ），岩性为条带状硅质灰岩夹硅质岩；直接底板为上泥盆统五指山组第一段（ D_3w^1 ），岩性为泥质条带灰岩、钙质泥岩。（5）地球物理标志：含锰岩系（ D_3w^2 ）相对于上、下围岩表现为低电阻率-高磁化率的组合异常。（6）矿化标志：锰矿层自下而上划分为 I、II+III 矿层，钙质硅质岩型锰矿层累计厚度一般为 4~16 m，矿石 Mn 品位一般为 10%~30%，平均约 21%，矿石矿物以碳酸锰矿物为主，次为蔷薇辉石、锰黝帘石等硅酸锰矿物，矿石构造以薄-纹层状、鲕-豆状、块状、条带状为主，次为结核状、角砾状等；钙质硅质岩-硅质灰岩型锰矿层累计厚度一般为 1~4 m，矿石 Mn 品位一般为 10%~26%，平均约 18%，矿石矿物以碳酸锰矿物为主，少量蔷薇辉石、锰铁叶蛇纹石等硅酸锰矿物，矿石构造以薄-纹层状、块状为主，次为鲕-豆状、条带状等；硅质灰岩-泥质条带灰岩型锰矿层累计厚度一般为 0~1.5 m，矿石 Mn 品位一般为 10%~22%，平均约 16%，矿石矿物以碳酸锰矿物为主，无（极少）硅酸锰矿物，矿石构造以薄-纹层状、块状为主，少量（无）鲕-豆状等（图 13）。

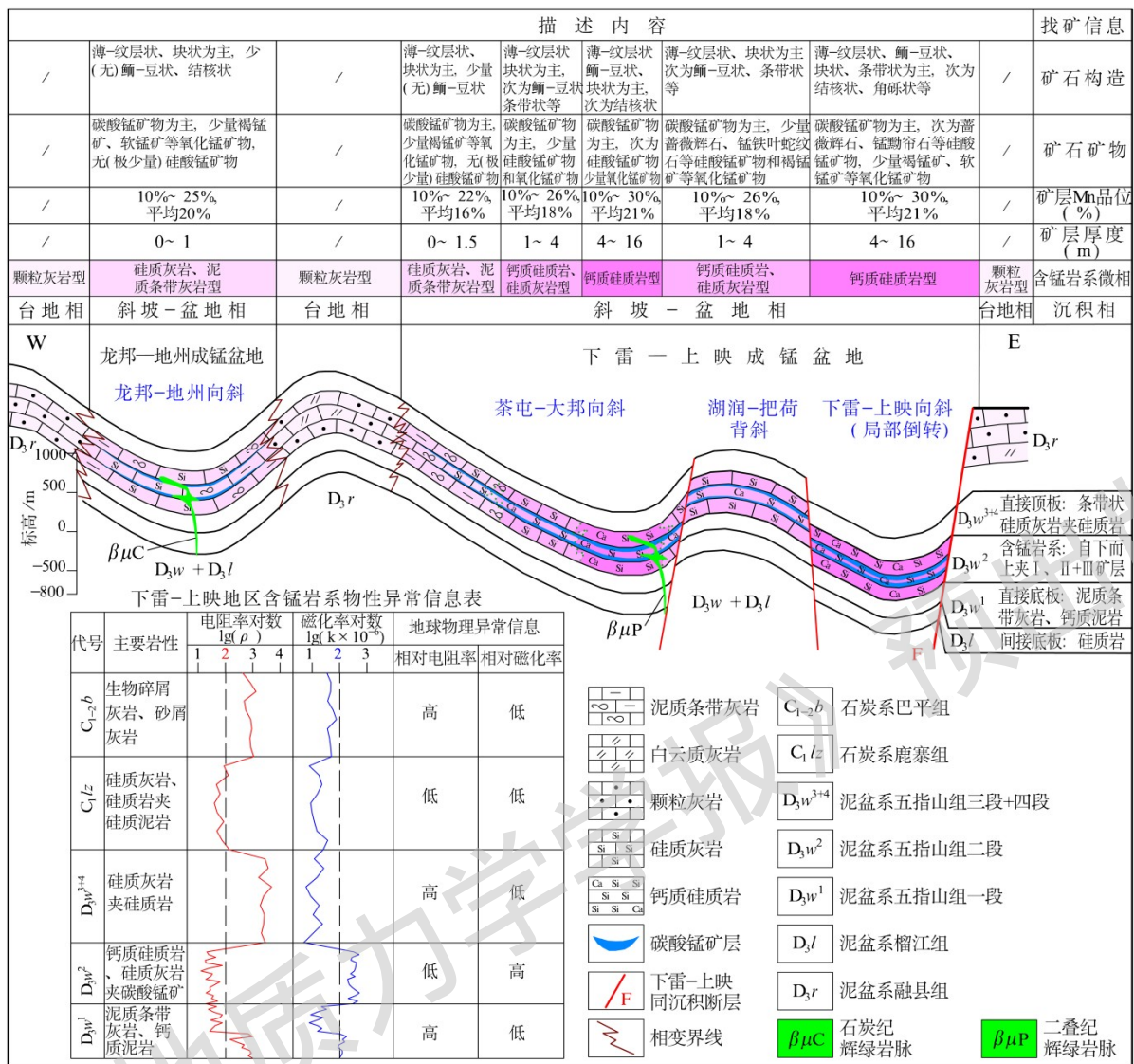


图 13 桂西南地区泥盆系碳酸锰矿综合找矿模型

Fig. 13 Comprehensive prospecting model for Devonian manganese carbonate deposits in southwestern Guangxi

5.2 勘查示范

此次在湖润矿区钻孔中测试岩矿石物性参数，共测试样品数 70 件（表 2）。含锰岩系上泥盆统五指山组二段（ D_{3w}^2 ）电阻率 ρ 为 12.8~77.3 $\Omega \cdot m$ ，平均值 32.35 $\Omega \cdot m$ ，磁化率 k 为 $198 \times 10^{-6} SI \sim 531 \times 10^{-6} SI$ ，平均 $340.25 \times 10^{-6} SI$ ；上覆地层电阻率 ρ 为 39.7~4905.3 $\Omega \cdot m$ ，平均值 1217.59 $\Omega \cdot m$ ，磁化率 k 为 $5 \times 10^{-6} SI \sim 78 \times 10^{-6} SI$ ，平均 $26.57 \times 10^{-6} SI$ ；下伏地层上泥盆统五指山组一段（ D_{3w}^1 ）电阻率 ρ 为 24.2~1068.6 $\Omega \cdot m$ ，平均值 343.02 $\Omega \cdot m$ ，磁化率 k 为 $8 \times 10^{-6} SI \sim 180 \times 10^{-6} SI$ ，平均 $70.6 \times 10^{-6} SI$ 。以上数据反映含锰岩系相对上、下围岩表现为低电阻率-高磁化率组合特征，这种电磁性差异特征为电磁法测量提供了物理依据，可作为地球物理异常的间接找矿标志。

表 2 湖润锰矿区主要地质体电阻率、磁化率参数统计表

Table 2 Resistivity and magnetic susceptibility for major geological bodies in the Hurun manganese mining area

层位	岩性	标本块数	电阻率 $\rho / (\Omega \cdot m)$		磁化率 $k / (\times 10^{-6} SI)$	
			范围	平均值	范围	平均值

上覆 地层	石炭系巴平组 (C_{1-2b})	生物碎屑灰岩、砂屑灰岩	10	428.6~1314.4	811.64	35~78	48.5
	石炭系鹿寨组 (C_{1Lz})	硅质灰岩、硅质岩夹硅质泥岩	10	39.7~140.6	77.17	8~37	17.4
	泥盆系五指山组三段+四段 (D_3w^{3+4})	硅质灰岩夹硅质岩	10	1659.4~4905.3	2763.9 5	5~27	13.8
	平均		30	39.7~4905.3	1217.5 9	5~78	26.57
含锰岩系	泥盆系五指山组二段 (D_3w^2)	钙质硅质岩夹碳酸锰矿	20	12.8~77.3	32.35	198~531	340.25
下伏地层	泥盆系五指山组一段 (D_3w^1)	泥质条带灰岩、钙质泥岩	20	24.2~1068.6	343.02	8~180	70.6

2024—2025 年，研究团队根据“基于机器学习的找矿预测软件”在下雷—上映成锰盆地圈定岫后碳酸锰矿找矿靶区（董建辉等，2025），采用多极化大地电磁测深法（MPMT 法）开展物探剖面测量，结合物探成果施工钻孔进行验证，揭露到碳酸锰矿体（图 15），验证了找矿模型的可靠性。

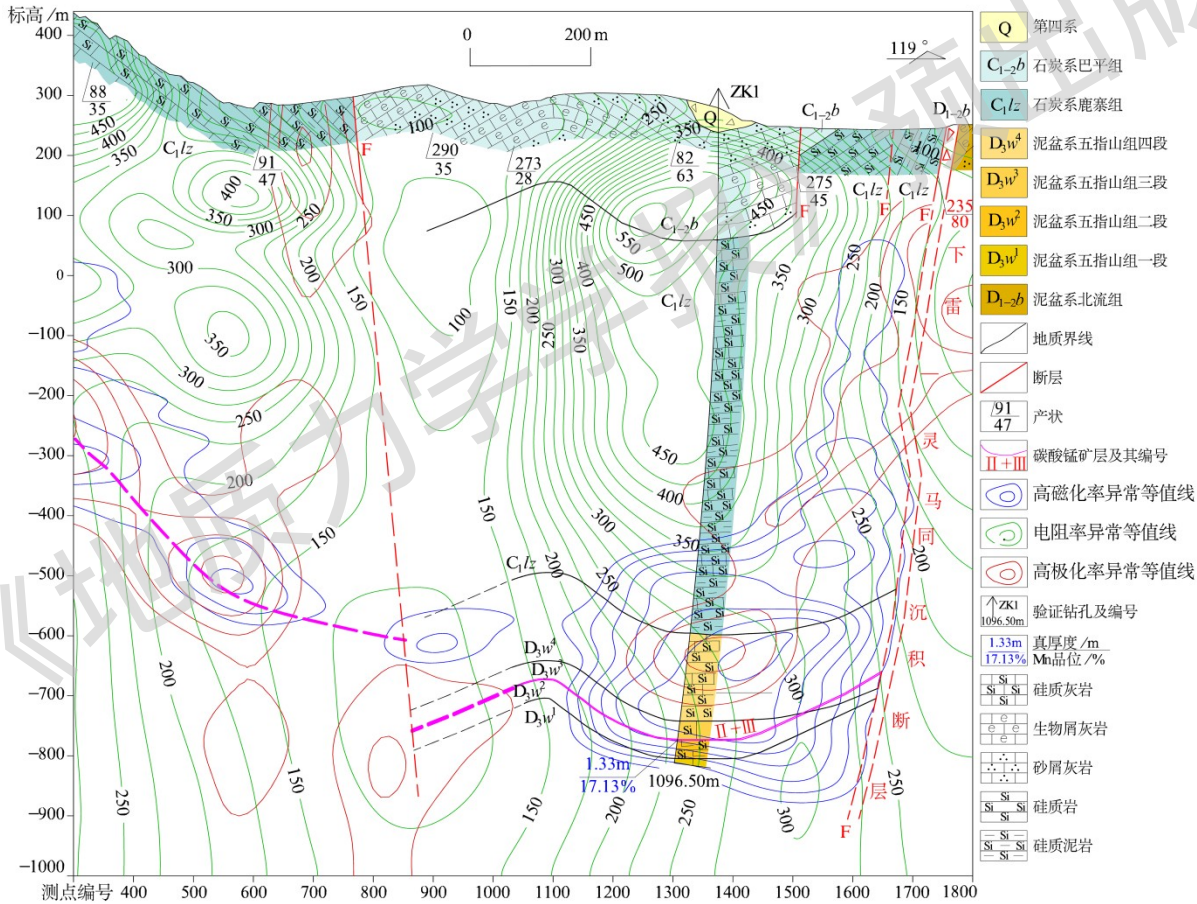


图 14 岫后锰矿区钻孔验证效果图
Fig. 14 Borehole verification results in the Bahou manganese mining area

6 结论

（1）靖西—大新成锰盆地可划分为下雷—上映、龙邦—地州 2 个次级成锰凹陷，二者沉积微相发育程度差

异显著。钙质硅质岩微相锰米百分值最高、成矿最优，钙质硅质岩-硅质灰岩次之，硅质灰岩-泥质条带灰岩成矿潜力最弱；锰质富集中心受控于下雷-灵马同沉积断裂，沿断裂 500~1000 m 范围内锰米百分值呈高值区向外梯度衰减，I 矿层和 II+III 矿层厚度、品位同步正相关，完善了桂西泥盆系锰矿岩相控矿定性规律。

(2) 区内锰矿沉积古水体为弱氧化-氧化环境，孔隙水局部还原是碳酸锰沉淀的关键；Al/(Al+Fe+Mn)、Co/Zn、稀土配分、Eu 正异常等地球化学指标共同证实锰质以海底热液为主要物源。成矿过程包括氧化预沉淀、成岩还原 2 个阶段。

(3) 含锰岩系具备低电阻率、高磁化率专属物性标识，据此构建地层-岩相-构造-地球物理一体化综合找矿模型，配套多极化大地电磁测深(MPMT)和钻探验证的深部勘查技术组合；基于机器学习圈定的深部靶区经工程揭露见工业锰矿，证实模型与物探手段对桂西南隐伏、深部锰矿具备良好预测效果，可为同类型沉积锰矿攻深找盲提供成套勘查示范方案。

(4) 桂西南泥盆系碳酸锰矿受同沉积断裂、沉积微相、热液物质供给、氧化还原界面多重因素协同控制，通过锰米百分值定性评价、古沉积环境判别、综合找矿模型与工程示范三项核心创新，形成了右江盆地泥盆系沉积型锰矿深部勘查技术方法体系。

致谢：衷心感谢特邀主编和编辑部的组织和约稿。

附加材料：附表 1—3 由作者提供，数据真实性由作者负责。

作者贡献声明：周尚国、江沙、龙涛、李荣志负责论文构思、数据分析、研究方法和论文写作；黄钦、席振铎、和平贤参与数据分析和技术手段的实践应用和绘图；王华青参与数据分析、研究方法和修改。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author's Contributions: ZHOU Shangguo, JIANG Sha, LONG Tao and LI Rongzhi conceived the study, performed data analysis, designed the research methodology, and drafted the manuscript; HUANG Qin, XI Zhenzhu and HE Pingxian participated in data analysis, practical application of technical approaches, and figure generation; WANG Huaqing was involved in data analysis, refinement of the research methodology, and manuscript revision. All authors have read and approved the submission and publication of the manuscript.

利益冲突声明：本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests : All authors declare no conflict of interests.

References

- BAU M, DULSKI P, 1999. Comparing yttrium and rare earths in hydrothermal fluids from the Mid-Atlantic Ridge: implications for Y and REE behaviour during near-vent mixing and for the Y/Ho ratio of Proterozoic seawater[J]. *Chemical Geology*, 155(1-2): 77-90.
- BECKER R T, KÖNIGSHOF P, BRETT C E, 2016. Devonian climate, sea level and evolutionary events: an introduction[J]. Geological Society, London, Special Publications, 423(1): 1-10.
- BOSTROM K, 1983. Hydrothermal processes at seafloor spreading centers: application of basalt-seawater experimental results[M]. New York: Plenum Press.

- CALVERT S E, PEDERSEN T F, 1996. Sedimentary geochemistry of manganese; implications for the environment of formation of manganiferous black shales[J]. *Economic Geology*, 91(1): 36-47.
- CHANG H J, CHU X L, FENG L J, et al., 2009. Redox sensitive trace elements as paleoenvironments proxies[J]. *Geological Review*, 55(1): 91-99. (in Chinese with English abstract)
- CHEN F G, PUFAHL P K, WANG Q F, et al., 2022. A new model for the genesis of Carboniferous Mn ores, Longtong deposit, South China block[J]. *Economic Geology*, 117(1): 107-125.
- CHEN F G, WANG Q F, PUFAHL P K, et al., 2023. Carbonate-hosted manganese deposits and ocean anoxia[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 622: 118385.
- CHEN H D, ZENG Y F, 1990. Nature and evolution of the Youjiang Basin[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*(1): 28-37. (in Chinese)
- CHEN J H, TIAN Y M, JIANG S, et al., 2026. Application of manganese metallogenic model and effective exploration methods in the prospecting process: a case study of the Xialei manganese deposit[J]. *Acta Geologica Sinica*, 100(2): 679-692. (in Chinese with English abstract)
- CHEN X, TIAN Y M, GAO B L, et al., 2026. Biochemical mineralization of manganese in the Nanhua System[J]. *Acta Geologica Sinica*, 100(2): 484-509. (in Chinese with English abstract)
- CONG Y, DONG Q J, XIAO K Y, et al., 2018. Characteristics and predicted potential of Mn resources in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(3): 118-137. (in Chinese with English abstract)
- DONG J H, LIU H, JIANG S, et al., 2025. Two-dimensional mineral exploration prediction based on random forest: a case study of sedimentary manganese deposit in Xialei-Tuhu area[J]. *Mineral Deposits*, 44(1): 143-158. (in Chinese with English abstract)
- DONG Z G, ZHANG L C, WANG C L, et al., 2020. Progress and problems in understanding sedimentary manganese carbonate metallogenesis[J]. *Mineral Deposits*, 39(2): 237-255. (in Chinese with English abstract)
- DONG Z G, PENG Z D, ROBBINS L J, et al., 2023. Episodic ventilation of euxinic bottom waters triggers the formation of black shale-hosted Mn carbonate deposits[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 341: 132-149.
- DONG Z G, ZHANG B L, ZHANG L C, et al., 2025. Unravelling the mechanisms underlying marine redox shifts during sedimentary manganese metallogenesis: insights from the Carboniferous Muhu deposit, China[J]. *Mineralium Deposita*, 60(7): 1367-1396.
- DU Y S, YU W C, ZHOU Q, et al., 2023. Discussion about the coupling relationship between the breakup of supercontinent and the large-scale manganese accumulation in China[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(6): 1211-1234. (in Chinese with English abstract)
- FU Y, XU Z G, PEI H X, et al., 2014. Study on metallogenic regularity of manganese ore deposits in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2192-2207. (in Chinese with English abstract)
- GAN L, YANG C C, WANG L, et al., 2026. Tectonic controls and redox dynamics: a comprehensive review of sedimentary manganese mineralization in the Devonian-Triassic Youjiang Basin, South China[J]. *Earth-Science Reviews*, 281: 105638.
- GUO N N, GAO Z F, JIA J L, et al., 2026. Geological and geochemical characteristics of the Xialei manganese deposit in Guangxi and their constraints on different manganese mineralization mechanisms[J]. *Acta Geologica Sinica*, 100(2): 537-552. (in Chinese with English abstract)
- GUO X L, CAI W M, LU Y G, et al., 2026. Resource attributes, geological characteristics, and utilization of manganese metal[J]. *Acta Geologica Sinica*, 100(2): 633-656. (in Chinese with English abstract)
- HE H X, XIAO J F, YANG H Y, et al., 2024. Redox conditions of Datangpo-type manganese ores constrained by statistical analysis of pyrite framboids and iron isotopes[J]. *Sedimentary Geology*, 463: 106606.

- HEIN J R, SCHULZ M S, DUNHAM R E, et al., 2008. Diffuse flow hydrothermal manganese mineralization along the active Mariana and southern Izu-Bonin arc system, Western Pacific[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B8): B08S14.
- HOU Z L, XUE Y Z, HUANG J S, et al., 1997. Manganese deposits around the Yangtze platform[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press. (in Chinese)
- HOUSE M R, 2002. Strength, timing, setting and cause of mid-Palaeozoic extinctions[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 181(1-3): 5-25.
- HUANG Q, PI D H, JIANG S Y, et al., 2022. The dual role of microbes in the formation of the Malkantu manganese carbonate deposit, NW China: petrographic, geochemical, and experimental evidence[J]. *Chemical Geology*, 606: 120992.
- JEWELL P W, STALLARD R F, 1991. Geochemistry and paleoceanographic setting of central Nevada bedded barites[J]. *The Journal of Geology*, 99(2): 151-170.
- JOACHIMSKI M M, OSTERTAG-HENNING C, PANCOST R D, et al., 2001. Water column anoxia, enhanced productivity and concomitant changes in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{34}\text{S}$ across the Frasnian–Famennian boundary (Kowala — Holy Cross Mountains/Poland)[J]. *Chemical Geology*, 2001, 175(1-2): 109-131.
- LI X P, CHEN Z B, WEI J W, et al., 2019. Petrogenesis and geological significance of mafic rock in De'e area of the western Guangxi[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 39(2): 270-281. (in Chinese with English abstract)
- LI Z L, LIU X J, XU J F, et al., 2015. Geochemical evolution characteristics and regional tectonic significance of mafic rocks from Youjiang Basin[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 35(4): 727-735. (in Chinese with English abstract)
- MA Z X, LIU X T, YU W C, et al., 2019. Redox conditions and manganese metallogenesis in the Cryogenian Nanhua Basin: Insight from the basal Datangpo Formation of South China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 529: 39-52.
- 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.
- OU L H, 2013. Research on depositional feature and mineralization mechanism of the Upper Devonian manganese deposit in Southwestern Guangxi area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese with English abstract)
- QIN Y K, ZHANG H C, YAO J Q, 2010a. Geochemical Characteristics and Geological Implication of the Xialei Manganese Deposit, Daxin County, Guangxi[J]. *Geological Review*, 56(5): 664-672. (in Chinese with English abstract)
- QIN Y K, XU B A, YAO J Q, 2010b. Depth of ancient sea related with formation of the Upper Devonian Mn-bearing rock series in Southwestern Guangxi Province[J]. *Geology and Exploration*, 46(2): 277-284. (in Chinese with English abstract)
- RACKA M, MARYNOWSKI L, FILIPIAK P, et al., 2010. Anoxic annulata events in the Late Famennian of the Holy Cross Mountains (Southern Poland): Geochemical and palaeontological record[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 297(3-4): 549-575.
- RONA P A, 1978. Criteria for recognition of hydrothermal mineral deposits in oceanic crust[J]. *Economic Geology*, 73(2): 135-160.
- ROY S, 2006. Sedimentary manganese metallogenesis in response to the evolution of the earth system[J]. *Earth-Science Reviews*, 77(4): 273-305.

- RU T Q, WEI L D, SHU G, 1992. Manganese ore geology of Guangxi[M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)
- ŞAŞMAZ A, TÜRKYILMAZ B, ÖZTÜRK N, et al., 2014. Geology and geochemistry of Middle Eocene maden complex ferromanganese deposits from the Elazığ–Malatya region, Eastern Turkey[J]. *Ore Geology Reviews*, 56: 352-372.
- TAYLOR S R, MCLENNAN S M, 1985. The continental crust: Its composition and evolution[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- TOTH J R, 1980. Deposition of submarine crusts rich in manganese and iron[J]. *GSA Bulletin*, 91(1): 44-54.
- TRIBOVILLARD N, ALGEO T J, BAUDIN F, et al., 2012. Analysis of marine environmental conditions based on molybdenum–uranium covariation—Applications to Mesozoic paleoceanography[J]. *Chemical Geology*, 324-325: 46-58.
- WANG C S, HU X M, LI X H, 1999. Dissolved oxygen in palaeo-ocean: anoxic events and high-oxic problems[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 19(3): 39-48. (in Chinese with English abstract)
- WANG H Q, JIANG S, CHEN J H, et al., 2026. Advances in manganese ore exploration in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 100(2): 598-613. (in Chinese with English abstract)
- WANG Y L, WANG D H, ZHANG C Q, et al., 2011. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Qinjia granite in Guangxi Province and its geologic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(4): 475-481. (in Chinese with English abstract)
- WU X K, LIANG G K, LI Y K, et al., 2023. Zircon U-Pb age and Hf isotopic composition of Bama basic rocks in western Guangxi: genetic relationship with Emeishan large igneous province[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 43(1): 14-29. (in Chinese with English abstract)
- XUE Y Z, YAO J Q, HUANG J S, et al., 2019. A review of the metallogenic theory of endogenous origin and exogenous mineralization of manganese ores[J]. *Geology and Exploration*, 55(4): 891-898. (in Chinese with English abstract)
- YAN H, PI D H, JIANG S Y, et al., 2022. Mineral paragenesis in Paleozoic manganese ore deposits: Depositional versus post-depositional formation processes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 325: 65-86.
- YAN Z, HE P X, FU C L, et al., 2026. Study on the manganese ore-forming environment in western Guangxi[J]. *Acta Geologica Sinica*, 100(2): 363-386. (in Chinese with English abstract)
- YANG R D, GAO J B, XU H, et al., 2022. Ore-forming source analysis of huge manganese deposits in the Neoproterozoic Datangpo stage, Guizhou Province, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(5): 1815-1826. (in Chinese with English abstract)
- YIN J N, XIAO K Y, 2014. Resources potential analysis and metallogenic prospect of Mn resources in China[J]. *Geology in China*, 41(5): 1424-1437. (in Chinese with English abstract)
- YU W C, ALGEO T J, DU Y S, et al., 2016. Genesis of Cryogenian Datangpo manganese deposit: hydrothermal influence and episodic post-glacial ventilation of Nanhua Basin, South China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 459: 321-337.
- YU W C, POLGÁRI M, ZHOU Q, et al., 2025. Geobiological perspective for the formation of manganiferous deposit: principle, evidence, and model[J]. *Earth Science*, 50(3): 1142-1161. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG T G, TRELA W, JIANG S Y, et al., 2011. Major oceanic redox condition change correlated with the rebound of marine animal diversity during the Late Ordovician[J]. *Geology*, 39(7): 675-678.

- ZHANG X S, OVER D J, MA K Y, et al., 2019. Upper Devonian conodont zonation, sea-level changes and bio-events in offshore carbonate facies Lali section, South China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 531: 109219.
- ZHAO L Q, ZHOU S G, YI H S, et al., 2016. Geochemical characteristics and sedimentary environment of the Xialei manganese deposit in Southwest Guangxi[J]. *Geology and Exploration*, 52(1): 25-39. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO Y Q, YANG C C, XU H, et al., 2026. Late Devonian Mn mineralization as a result of volcanism-and orbital-forced palaeoceanographic changes[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 56(5): 1912-1923. (in Chinese)
- ZHOU C M, JIANG S Y, 2009. Palaeoceanographic redox environments for the Lower Cambrian Hetang Formation in South China: Evidence from pyrite framboids, redox sensitive trace elements, and sponge biota occurrence[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 271(3-4): 279-286.
- ZHOU H Y, PI D H, HUANG Q, et al., 2024. Geology, geochemistry and genesis of the Dongping manganese deposit, Guangxi Province, China[J]. *Earth Science*, 49(2): 656-668. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU Q, 2008. Geological and geochemical characteristics of cold seep carbonates of Neoproterozoic Nanhua Period and their significance for manganese ore deposits in East Guizhou[D]. Wuhan: China University of Geosciences. (in Chinese with English abstract)
- ZHU Q K, ZHOU H Y, 2021. Reviews and prospects of submarine metalliferous sediments of hydrothermal origin[J]. *Marine Sciences*, 45(8): 69-80. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 常华进, 储雪蕾, 冯连君, 等, 2009. 氧化还原敏感微量元素对古海洋沉积环境的指示意义[J]. *地质论评*, 55 (1) : 91-99.
- 陈洪德, 曾允孚, 1990. 右江沉积盆地的性质及演化讨论[J]. *岩相古地理* (1) : 28-37.
- 陈家浩, 田郁溟, 江沙, 等, 2026. 锰矿成矿模型与有效勘查方法在找矿过程中的应用: 以下雷锰矿床为例[J]. *地质学报*, 100 (2) : 679-692.
- 陈旭, 田郁溟, 高宝龙, 等, 2026. 南华系锰的生物化学成矿作用[J]. *地质学报*, 100 (2) : 484-509.
- 丛源, 董庆吉, 肖克炎, 等, 2018. 中国锰矿资源特征及潜力预测[J]. *地学前缘*, 25 (3) : 118-137.
- 董建辉, 刘欢, 江沙, 等, 2025. 基于随机森林的二维找矿预测: 以下雷-土湖地区沉积型锰矿为例[J]. *矿床地质*, 44 (1) : 143-158.
- 董志国, 张连昌, 王长乐, 等, 2020. 沉积碳酸锰矿床研究进展及有待深入探讨的若干问题[J]. *矿床地质*, 39 (2) : 237-255.
- 杜远生, 余文超, 周琦, 等, 2023. 超大陆裂解与中国大规模成锰作用的耦合关系探讨[J]. *古地理学报*, 25 (6) : 1211-1234.
- 付勇, 徐志刚, 裴浩翔, 等, 2014. 中国锰矿成矿规律初探[J]. *地质学报*, 88 (12) : 2192-2207.
- 郭宁宁, 高兆富, 贾建亮, 等, 2026. 广西下雷锰矿的地质、地球化学特征及其对不同锰矿化机制的约束[J]. *地质学报*, 100 (2) : 537-552.
- 郭馨莲, 蔡为民, 卢宜冠, 等, 2026. 锰金属的资源属性、地质特征及其利用[J]. *地质学报*, 100 (2) : 633-656.
- 侯宗林, 薛友智, 黄金水, 等, 1997. 扬子地台周边锰矿[M]. 北京: 冶金工业出版社.
- 李兴鹏, 陈忠斌, 韦剑玮, 等, 2019. 桂西德峨地区基性岩的岩石成因及地质意义[J]. *桂林理工大学学报*, 39 (2) : 270-281.

- 李政林, 刘希军, 许继峰, 等, 2015. 右江盆地基性岩的地球化学演化特征及其区域构造意义[J]. 桂林理工大学学报, 35 (4): 727-735.
- 欧莉华, 2013. 桂西南地区上泥盆统锰矿沉积特征与成矿机理研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 秦元奎, 张华成, 姚敬劬, 2010a. 广西大新县下雷锰矿床的地球化学特征及其意义[J]. 地质论评, 56 (5): 664-672.
- 秦元奎, 徐柏安, 姚敬劬, 2010b. 桂西南上泥盆统含锰岩系形成古海水深度条件分析[J]. 地质与勘探, 46 (2): 277-284.
- 茹廷铨, 韦灵敦, 树皋, 1992. 广西锰矿地质[M]. 北京: 地质出版社.
- 王成善, 胡修棉, 李祥辉, 1999. 古海洋溶解氧与缺氧和富氧问题研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 19 (3): 39-48.
- 王华青, 江沙, 陈家浩, 等, 2026. 中国锰矿勘查进展[J]. 地质学报, 100 (2): 598-613.
- 王永磊, 王登红, 张长青, 等, 2011. 广西钦甲花岗岩体单颗粒锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地质学报, 85 (4): 475-481.
- 吴祥珂, 梁国科, 李玉坤, 等, 2023. 桂西巴马基性岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征: 与峨眉山大火成岩省的成因联系[J]. 桂林理工大学学报, 43 (1): 14-29.
- 薛友智, 姚敬劬, 黄金水, 等, 2019. 再论锰的“内源外生”成矿说[J]. 地质与勘探, 55 (4): 891-898.
- 闫臻, 和平贤, 付长垒, 等, 2026. 桂西锰矿成矿环境研究[J]. 地质学报, 100 (2): 363-386.
- 杨瑞东, 高军波, 徐海, 等, 2022. 贵州新元古代大塘坡期巨量锰矿成矿物质来源分析[J]. 地质学报, 96 (5): 1815-1826.
- 阴江宁, 肖克炎, 2014. 中国锰矿资源潜力分析及成矿预测[J]. 中国地质, 41 (5): 1424-1437.
- 余文超, POLGÁRI M, 周琦, 等, 2025. 地球生物学视角下的富锰沉积形成过程: 原理、证据与模式[J]. 地球科学, 50 (3): 1142-1161.
- 赵立群, 周尚国, 伊海生, 等, 2016. 桂西南下雷锰矿床地球化学特征及沉积环境分析[J]. 地质与勘探, 52 (1): 25-39.
- 赵银强, 杨晨晨, 徐海, 等, 2026. 火山活动与轨道周期协同驱动下的晚泥盆世锰成矿响应[J]. 中国科学: 地球科学, 56 (5): 1912-1923.
- 周皓宇, 皮道会, 黄钦, 等, 2024. 广西东平锰矿床地质地球化学特征及矿床成因[J]. 地球科学, 49 (2): 656-668.
- 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[D]. 武汉: 中国地质大学.
- 朱启宽, 周怀阳, 2021. 海底热液成因含金属沉积物的研究现状及展望[J]. 海洋科学, 45 (8): 69-80.

附表 1 研究区锰矿石及围岩主量元素分析结果

Table 1 Analysis results of major elements in manganese ore and surrounding rocks in the research area

矿区名称	样品编号	样品名称	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	P ₂ O ₅	TiO ₂	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	L.O.I	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ /(Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃)	Al/(Al+Fe+Mn)	Si/(Si+Al+Fe)	(Fe+Mn)/Ti
下雷	ZK1702-H2	碳酸锰矿	23.23	19.94	1.70	0.467	0.88	2.10	0.588	0.028	19.82	0.028	0.039	27.13	49.74	0.35	0.01	0.81	1048.60
	ZK1707-H2		21.25	5.52	3.09	2.31	8.28	0.19	0.491	0.113	32.78	1.33	0.881	17.11	9.20	0.22	0.04	0.58	462.46
	ZK1707-H3		49.86	5.50	1.96	3.47	8.58	0.90	0.166	0.166	14.29	1.92	0.784	12.24	14.37	0.29	0.09	0.73	178.60
	ZK1707-H6		22.37	5.60	4.90	1.19	3.32	1.57	0.130	0.066	36.07	0.171	0.063	22.30	18.80	0.26	0.02	0.71	795.67
	ZK2206-H2		18.53	3.07	4.18	1.66	9.01	0.11	0.470	0.080	42.54	0.438	0.048	15.93	11.16	0.16	0.02	0.54	820.27
	ZK2206-H3		32.21	3.62	6.76	1.10	9.02	1.13	0.498	0.066	26.14	0.662	1.16	15.98	29.28	0.11	0.02	0.66	693.41
	ZK2206-H6		14.20	20.97	3.05	2.92	0.90	4.00	0.120	0.151	19.65	0.110	0.081	29.12	4.86	0.76	0.08	0.56	209.43
	ZK2206-H7		13.88	6.81	2.81	1.66	1.72	6.27	0.317	0.082	34.59	0.110	0.051	26.18	8.36	0.49	0.03	0.48	668.66
	XL-CK2		33.59	3.63	3.62	4.33	3.62	4.73	0.199	0.211	31.14	2.50	0.124	10.84	7.76	0.54	0.07	0.65	239.77
	XL-CK5		14.07	11.15	1.51	3.74	8.90	2.28	0.243	0.182	28.80	0.964	0.064	26.22	3.76	0.30	0.06	0.40	277.76
	XL-CK6		35.73	5.04	2.52	1.45	4.36	3.38	0.118	0.082	29.73	0.550	0.593	15.94	24.64	0.25	0.03	0.72	583.94
	XL-CK8		20.09	10.03	1.57	3.38	5.97	2.59	0.202	0.185	29.81	0.170	0.166	22.38	5.94	0.36	0.06	0.54	264.01
	XL-CK11		34.01	7.30	3.02	1.31	3.42	0.77	0.273	0.099	27.16	0.621	0.280	20.95	25.96	0.28	0.03	0.81	404.86
	ZK1702-H1	钙质硅质岩	60.36	17.22	0.813	2.11	2.32	1.27	0.130	0.104	0.91	0.170	0.043	14.65	28.61	0.48	0.25	0.88	53.17
	ZK1702-H3		54.64	13.46	1.96	4.87	2.31	2.86	0.114	0.300	3.39	0.964	0.085	13.69	11.22	0.68	0.29	0.80	35.95
	ZK1707-H1		24.20	16.18	1.51	1.15	12.90	1.38	0.390	0.076	14.03	0.328	0.108	17.22	21.04	0.08	0.03	0.51	460.13
	ZK1707-H4		63.16	13.50	1.19	2.60	1.20	1.07	0.046	0.149	2.52	0.966	0.190	12.24	24.29	0.68	0.28	0.91	40.56
	ZK1707-H5		39.20	20.06	3.64	5.90	1.91	1.63	0.084	0.311	4.73	1.33	0.684	19.37	6.64	0.76	0.33	0.76	33.61
	ZK1707-H7		63.50	13.10	1.54	3.00	0.51	1.91	0.043	0.126	2.91	0.841	0.053	12.33	21.17	0.86	0.28	0.90	54.19
	ZK2206-H1		41.18	18.87	3.53	7.41	2.38	1.83	0.073	0.297	3.26	2.68	0.169	17.76	5.56	0.76	0.41	0.73	31.52
	ZK2206-H4		71.02	10.25	1.76	2.87	0.69	1.44	0.062	0.170	1.64	0.661	0.100	9.59	24.75	0.81	0.35	0.91	28.21
	ZK2206-H5		43.97	26.25	0.981	1.70	0.58	1.20	0.043	0.084	2.39	0.366	0.080	22.21	25.86	0.75	0.22	0.90	63.30

矿区名称	样品编号	样品名称	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	P ₂ O ₅	TiO ₂	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	L.O.I	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ /(Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃)	Al/(Al+Fe+Mn)	Si/(Si+Al+Fe)	(Fe+Mn)/Ti
	ZK2206-H8		46.62	10.71	4.52	9.94	1.37	2.92	0.104	0.414	4.63	3.58	0.327	13.16	4.69	0.88	0.44	0.72	27.46
外伏	WF-H1	碳酸锰矿	16.73	13.80	3.48	1.79	0.13	6.23	0.47	0.10	25.09	0.23	0.03	28.79	9.35	0.93	0.04	0.57	398.55
外伏	WF-H2	碳酸锰矿	8.41	14.33	3.49	1.07	0.52	8.28	0.61	0.10	27.88	0.07	0.04	31.51	7.90	0.67	0.02	0.35	468.97
	WF-H3		8.59	12.51	3.25	1.00	0.94	8.03	0.56	0.08	29.70	0.03	0.03	31.63	8.61	0.51	0.02	0.35	608.34
竹叶山	ZYS-H1	碳酸锰矿	11.12	20.58	3.11	0.27	0.33	4.33	1.32	0.08	23.32	0.05	0.04	30.42	40.58	0.45	0.01	0.58	469.23
	ZYS-H2		11.28	9.51	5.26	0.45	0.16	10.22	0.51	0.06	26.88	0.04	0.06	31.66	24.85	0.74	0.01	0.39	845.01
	ZYS-H3		7.95	13.30	4.58	0.37	0.17	7.81	0.33	0.07	28.21	0.06	0.06	32.85	21.26	0.68	0.01	0.37	640.78
巡屯	XT-H1	碳酸锰矿	38.11	5.66	2.33	2.86	2.88	3.18	0.17	0.16	24.02	1.33	1.05	15.77	13.33	0.50	0.06	0.75	240.75
	XT-H2		19.96	10.63	2.41	1.36	6.25	2.79	0.17	0.16	32.22	0.84	0.52	20.01	14.68	0.18	0.02	0.56	336.80
	XT-H3		52.11	6.85	1.04	0.87	1.43	5.68	0.42	0.08	15.87	0.40	0.06	12.37	59.62	0.38	0.03	0.81	364.68
	XT-H4		6.21	20.25	2.77	1.57	21.67	1.99	0.24	0.15	9.13	0.39	0.04	15.70	3.96	0.07	0.03	0.14	260.95
	XT-H5		18.82	9.10	2.42	1.02	4.23	15.81	0.34	0.08	17.90	0.10	0.03	26.38	18.45	0.19	0.02	0.36	626.66
坡沟	PG-H1	碳酸锰矿	24.66	5.04	1.34	1.02	5.68	4.25	0.51	0.04	37.05	0.18	0.20	15.54	24.18	0.15	0.01	0.60	1395.57
	PG-H2		53.86	5.00	1.04	2.30	12.02	5.47	0.14	0.10	8.51	0.22	0.03	8.78	23.42	0.16	0.06	0.64	308.80
	PG-H3		32.36	10.18	3.64	7.26	1.58	5.72	0.09	0.33	14.53	2.41	1.93	16.90	4.46	0.82	0.19	0.62	85.47
	PG-H4		24.38	15.47	2.61	1.79	0.70	3.09	0.25	0.10	21.98	0.25	0.19	26.22	13.62	0.72	0.05	0.75	349.70
内伏	NF-H1	硅质岩	71.00	11.27	0.74	1.95	0.10	1.58	0.04	0.10	1.32	0.65	0.07	10.07	36.41	0.95	0.31	0.93	37.20
	NF-H2	碳酸锰矿	20.65	9.04	3.71	1.15	3.72	8.58	0.55	0.06	22.64	0.08	0.05	26.58	17.96	0.24	0.02	0.49	745.32
	NF-H3		39.07	11.15	2.64	5.09	0.54	4.57	0.12	0.24	12.67	2.74	0.05	19.13	7.68	0.90	0.16	0.73	95.92
	NF-H4		24.24	3.96	2.09	1.02	7.19	16.66	0.29	0.07	17.55	0.17	0.02	23.82	23.76	0.12	0.02	0.38	721.51
	NF-H5	硅质岩	64.50	9.08	1.41	2.35	0.56	3.22	0.06	0.12	4.69	1.30	0.03	11.79	27.45	0.81	0.16	0.88	92.24
龙邦	LBDP1-H1	硅质灰岩	7.00	46.37	1.01	1.29	1.90	0.06	0.04	0.06	3.68	0.17	0.03	38.39	5.43	0.40	0.14	0.61	119.57
	LBDP1-H2	碳酸锰矿	4.98	46.64	1.12	1.25	1.10	0.05	0.04	0.07	4.83	0.11	0.30	38.52	3.98	0.53	0.13	0.61	103.99
	LBDP1-H3		30.95	15.96	2.33	1.44	6.16	0.06	0.13	0.09	18.39	0.19	0.44	20.41	21.49	0.19	0.04	0.74	344.80

矿区名称	样品编号	样品名称	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	P ₂ O ₅	TiO ₂	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	L.O.I	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ /(Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃)	Al/(Al+Fe+Mn)	Si/(Si+Al+Fe)	(Fe+Mn)/Ti
	LBPD1-H4		27.40	6.74	4.81	0.63	8.64	0.06	0.32	0.05	26.01	0.08	1.80	10.99	43.77	0.07	0.01	0.67	951.55
	LBPD1-H5	硅质灰岩	14.42	41.53	1.27	2.86	1.10	0.06	0.05	0.12	1.69	0.60	0.12	34.28	5.04	0.72	0.42	0.74	30.87
	LBPD2-H1	硅质灰岩	8.91	45.93	1.16	2.15	1.12	0.06	0.05	0.12	2.92	0.18	0.95	36.63	4.14	0.66	0.27	0.68	44.89
	LBPD2-H2	碳酸锰矿	8.48	13.26	0.69	0.63	9.91	0.06	0.47	0.05	30.82	0.02	0.09	13.08	13.54	0.06	0.01	0.35	1095.01
	LBPD2-H3	硅质灰岩	9.31	44.32	0.89	1.14	1.47	0.06	0.07	0.05	2.57	0.10	0.43	35.78	8.17	0.44	0.16	0.72	111.28

注：氧化物和 LOI 质量分数单位为%；各元素摩尔比值无量纲

附表 2 研究区锰矿石及围岩微量元素分析结果 ($\times 10^{-6}$)

Table 2 Analysis results of trace elements in manganese ore and surrounding rocks in the research area ($\times 10^{-6}$)

矿区名称	样品编号	样品名称	B	Ba	Co	Cu	Cr	Cs	Ga	Mo	Ni	Pb	Rb	Sc	Sr	Th	U	V	W	Zn	Zr	V/Cr	V/(V+Ni)	Ni/Co	U/Th	Co/ Zn
下雷	ZK1702-H2	碳酸锰矿	7.57	171	106	13.2	10.8	0.266	5.82	9.14	68.1	32.8	1.22	0.767	657	0.521	1.38	35.91	18.3	213	81	3.32	0.35	0.64	2.65	0.50
	ZK1707-H2		44.7	1726	81.2	25.1	13.0	14.7	11.6	5.92	175	66.2	87.8	2.35	171	2.94	0.905	43.50	11.7	12613	38	3.34	0.20	2.15	0.31	0.01
	ZK1707-H3		38.8	526	98.1	28.2	13.3	3.87	7.94	2.39	177	85.9	51.1	3.12	166	4.34	1.05	69.61	10.4	1390	55	5.24	0.28	1.80	0.24	0.07
	ZK1707-H6		121	107	78.8	7.05	6.33	8.72	9.64	4.17	32.4	25.5	12.2	1.37	94.8	1.64	0.497	13.54	9.34	129	25	2.14	0.29	0.41	0.30	0.61
	ZK2206-H2		202	644	143	7.94	7.08	8.74	12.3	12.6	242	26.2	35.4	1.59	193	2.36	1.98	70.95	26.4	119	34	10.03	0.23	1.69	0.84	1.20
	ZK2206-H3		34.4	2501	156	9.34	16.6	18.3	9.03	4.51	177	28.8	40.5	1.37	219	2.00	1.11	91.15	11.3	110	38	5.50	0.34	1.13	0.55	1.42
	ZK2206-H6		12.7	120	38.5	5.47	12.4	6.79	9.11	2.30	34.2	17.0	8.17	3.31	241	4.24	0.506	16.86	11.4	52.5	54	1.36	0.33	0.89	0.12	0.73
	ZK2206-H7		172	215	114	6.78	7.08	14.2	11.1	4.55	35.7	13.7	6.64	1.76	74.5	2.15	0.389	10.55	14.1	49.2	28	1.49	0.23	0.31	0.18	2.32
	XL-CK2		28.5	2061	119	12.2	15.6	21.8	13.3	3.04	241	36.4	187	4.01	77.6	5.95	1.05	34.97	15.7	152	46	2.25	0.13	2.02	0.18	0.78
	XL-CK5		5.11	1367	97.0	6.25	12.9	3.05	11.3	3.17	294	26.7	22.6	3.40	132	5.54	1.72	25.48	8.71	132	43	1.98	0.08	3.03	0.31	0.73
	XL-CK6		22.4	972	95.8	8.06	9.41	7.29	8.83	3.32	207	26.6	20.6	1.28	115	1.68	0.643	43.42	9.33	147	30	4.62	0.17	2.16	0.38	0.65
	XL-CK8		18.0	419	65.8	4.55	14.6	2.95	12.6	3.46	237	24.1	8.19	3.86	130	5.77	1.51	36.23	10.1	110	42	2.49	0.13	3.61	0.26	0.60
	XL-CK11		13.8	1046	50.7	14.4	6.78	2.15	8.21	2.87	94.1	231	16.7	1.24	170	1.97	0.756	63.06	9.70	217	37	9.31	0.40	1.86	0.38	0.23
	ZK1702-H1	钙质硅质岩	13.4	51.5	8.88	34.0	12.4	1.02	3.14	1.83	30.4	45.7	8.02	2.95	322	2.09	1.26	14.44	7.15	343	60	1.17	0.32	3.43	0.60	0.03

矿区名称	样品编号	样品名称	B	Ba	Co	Cu	Cr	Cs	Ga	Mo	Ni	Pb	Rb	Sc	Sr	Th	U	V	W	Zn	Zr	V/Cr	V/(V+Ni)	Ni/Co	U/Th	Co/ Zn
	ZK1702-H3		23.6	268	24.8	36.2	27.8	2.43	7.50	3.38	47.0	46.9	34.0	5.65	231	4.70	1.05	35.60	12.1	343	74	1.28	0.43	1.89	0.22	0.07
	ZK1707-H1		37.9	625	114	55.3	27.0	4.61	6.13	27.8	125	91.3	17.3	1.61	389	1.54	2.29	72.55	13.8	638	55	2.69	0.37	1.10	1.48	0.18
	ZK1707-H4		26.9	534	17.9	51.8	9.91	2.64	4.11	1.84	37.8	54.0	30.8	3.03	316	2.98	0.750	17.95	11.4	400	62	1.81	0.32	2.11	0.25	0.04
	ZK1707-H5		36.5	1064	19.4	25.7	17.9	9.89	9.02	12.0	33.7	33.8	48.5	6.75	209	7.79	2.14	40.12	8.34	174	75	2.25	0.54	1.74	0.27	0.11
	ZK1707-H7		30.4	257	13.2	21.5	10.5	2.58	4.97	0.950	22.7	40.7	29.6	3.36	172	3.58	0.549	17.69	10.2	163	50	1.68	0.44	1.73	0.15	0.08
	ZK2206-H1		48.1	1778	22.7	38.2	16.5	10.9	11.3	2.67	42.2	41.9	115	7.61	196	9.94	1.54	44.19	13.8	117	89	2.68	0.51	1.86	0.16	0.19
	ZK2206-H4		16.3	310	15.9	28.5	10.0	1.90	4.41	1.29	33.1	33.2	16.8	3.17	165	3.00	0.780	24.72	9.75	98.5	49	2.46	0.43	2.08	0.26	0.16
	ZK2206-H5		8.35	151	10.2	18.3	6.43	1.28	3.22	0.619	25.6	23.0	13.3	2.63	233	2.47	0.415	11.72	7.49	66.8	52	1.82	0.31	2.51	0.17	0.15
	ZK2206-H8		88.0	2580	29.5	57.3	25.0	14.7	15.8	2.08	41.6	33.3	156	10.1	135	14.2	2.07	60.67	6.39	127	93	2.43	0.59	1.41	0.15	0.23
外伏	WF-H1	碳酸锰矿	16.8	209	100	45.0	18.9	2.04	20.4	0.87	111	11.7	13.1	1.43	251	3.06	1.09	28.2	11.8	43.8	52	1.49	0.20	1.11	0.36	2.28
	WF-H2		12.3	102	59.1	24.5	18.4	0.49	21.0	0.88	77.1	7.51	3.97	0.95	256	2.32	0.62	24.7	6.78	31.3	47	1.34	0.24	1.30	0.27	1.89
	WF-H3		8.90	84.2	54.6	17.1	23.4	0.73	23.0	0.58	122	4.31	2.45	0.72	226	1.52	0.61	46.8	5.80	39.0	42	2.00	0.28	2.23	0.40	1.40
竹叶山	ZYS-H1	碳酸锰矿	23.6	95.0	62.4	32.4	17.3	0.29	19.6	2.27	31.2	6.15	4.31	1.20	575	0.89	2.50	35.6	5.18	15.7	60	2.06	0.53	0.50	2.80	3.97
	ZYS-H2		23.3	543	107	19.5	14.5	0.19	19.9	11.3	155	5.12	3.00	0.34	329	0.62	1.18	46.2	9.70	36.4	46	3.18	0.23	1.44	1.90	2.94
	ZYS-H3		13.6	738	123	17.7	17.9	0.21	19.2	14.1	115	5.49	3.90	0.28	493	0.55	0.83	34.6	8.67	36.5	60	1.94	0.23	0.93	1.51	3.37
巡屯	XT-H1	碳酸锰矿	38.7	518	58.8	44.4	20.9	3.57	22.2	2.14	167	6.65	60.7	2.38	127	4.57	0.93	24.5	8.20	75.9	37	1.17	0.13	2.84	0.20	0.77
	XT-H2		20.4	477	96.2	34.3	22.1	9.52	24.6	1.13	310	11.1	60.2	2.08	213	2.61	1.01	27.1	10.8	54.9	49	1.23	0.08	3.22	0.39	1.75
	XT-H3		36.6	848	54.9	47.0	17.9	26.4	13.3	1.61	185	8.15	42.8	0.0002	144	1.09	0.88	17.6	11.4	32.4	28	0.98	0.09	3.37	0.81	1.69
	XT-H4		51.4	103	117	63.2	90.8	2.01	13.6	104	193	135	19.5	2.61	227	2.79	11.2	153	8.50	29.8	38	1.69	0.44	1.65	4.01	3.93
	XT-H5		26.4	478	39.2	36.9	18.1	22.4	14.5	9.84	137	14.4	7.40	1.17	109	1.47	4.72	32.6	7.33	29.8	24	1.80	0.19	3.50	3.22	1.32
坡沟	PG-H1	碳酸锰矿	83.3	887	55.7	36.0	16.3	10.4	28.0	3.67	337	11.7	17.6	0.39	126	1.57	1.21	22.7	19.2	53.6	33	1.39	0.06	6.05	0.77	1.04
	PG-H2		24.6	190	18.6	10.2	17.7	1.61	9.63	1.58	104	8.71	5.64	1.17	96.7	3.69	1.26	46.2	15.6	42.4	39	2.61	0.31	5.59	0.34	0.44
	PG-H3		8.44	5669	75.5	12.6	34.4	116	22.3	0.60	159	15.5	197	7.30	299	11.2	1.32	68.3	5.33	104	86	1.99	0.30	2.11	0.12	0.73
	PG-H4		6.81	734	83.3	21.6	17.5	13.9	19.7	1.96	136	16.0	20.5	1.87	361	2.96	1.11	28.6	4.90	47.4	65	1.63	0.17	1.63	0.37	1.76

矿区名称	样品编号	样品名称	B	Ba	Co	Cu	Cr	Cs	Ga	Mo	Ni	Pb	Rb	Sc	Sr	Th	U	V	W	Zn	Zr	V/Cr	V/(V+Ni)	Ni/Co	U/Th	Co/ Zn
内伏	NF-H1	硅质岩	18.1	266	10.8	22.4	13.5	3.52	3.93	1.42	23.9	6.00	27.4	2.08	189	2.58	0.59	15.1	5.77	17.4	38	1.12	0.39	2.20	0.23	0.62
	NF-H2	碳酸锰矿	12.8	145	116	10.9	18.7	5.71	17.8	1.93	142	6.62	5.52	0.68	265	1.95	1.44	42.1	6.24	47.0	46	2.25	0.23	1.23	0.74	2.47
	NF-H3		27.9	1596	96.6	69.6	29.3	8.39	15.7	1.05	238	8.65	104	4.57	316	7.99	3.95	46.2	4.76	69.8	65	1.58	0.16	2.47	0.49	1.38
	NF-H4		2.45	241	58.2	134	13.2	2.20	12.4	1.53	99.2	8.78	7.77	0.57	91.6	1.25	2.26	27.9	15.1	26.8	29	2.11	0.22	1.71	1.80	2.17
	NF-H5	硅质岩	8.22	701	85.9	55.7	17.4	2.70	6.31	2.23	368	10.8	41.1	2.14	207	3.15	2.90	28.3	6.21	23.7	40	1.62	0.07	4.28	0.92	3.62
龙邦	LBDP1-H1	硅质灰岩	0.70	221	11.0	27.2	14.8	6.11	4.35	0.32	25.4	6.55	14.1	0.92	550	1.93	0.27	4.06	2.82	9.26	76	0.27	0.14	2.32	0.14	1.19
	LBDP1-H2	碳酸锰矿	1.00	208	11.9	12.6	16.1	14.6	5.21	0.21	14.4	6.59	9.23	0.55	679	2.05	0.15	2.97	2.30	8.37	91	0.18	0.17	1.22	0.07	1.42
	LBDP1-H3		37.9	754	91.9	14.6	16.6	31.1	17.1	0.28	52.0	24.7	21.1	1.03	631	2.41	0.91	7.30	17.2	49.6	69	0.44	0.12	0.57	0.38	1.85
	LBDP1-H4		51.7	1238	60.7	21.3	14.4	15.5	23.6	0.51	51.9	9.41	9.84	0.0006	263	0.77	1.00	8.11	12.2	25.3	31	0.56	0.14	0.86	1.30	2.40
	LBDP1-H5	硅质灰岩	12.6	349	12.8	79.8	16.1	22.3	6.60	0.25	16.4	6.63	39.3	2.63	385	4.52	0.46	53.3	2.44	15.7	65	3.32	0.76	1.28	0.10	0.82
	LBDP2-H1	硅质灰岩	0.88	116	8.73	20.3	15.5	9.08	4.93	0.18	11.6	4.66	15.0	2.03	1025	3.06	0.23	10.0	1.67	12.3	120	0.65	0.46	1.32	0.08	0.71
	LBDP2-H2	碳酸锰矿	85.4	424	69.1	23.6	14.6	1.50	36.6	0.48	35.7	10.3	2.43	0.15	1108	1.01	1.27	9.65	14.4	25.1	120	0.66	0.21	0.52	1.25	2.75
	LBDP2-H3	硅质灰岩	1.17	213	12.9	30.4	11.8	5.66	5.28	0.30	11.4	6.74	7.28	0.67	581	1.85	0.35	8.29	3.00	12.0	71	0.70	0.42	0.88	0.19	1.08

注：微量元素质量分数单位为 $\times 10^{-6}$ ；各元素摩尔比值无量纲

附表3 研究区锰矿石及围岩稀土元素分析结果

Table 3 Analysis results of rare earth elements in manganese ore and surrounding rocks in the research area ($\times 10^{-6}$)

矿区名称	样品编号	样品名称	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	ΣLREE	ΣHREE	ΣLREE/ΣHREE	Ce*	Eu*
下雷	ZK1702-H2	碳酸锰矿	35.6	83.4	6.69	27.0	5.10	1.23	5.72	0.950	6.32	1.30	3.80	0.513	2.71	0.385	37.1	217.90	159.10	21.70	7.33	1.23	1.05
	ZK1707-H2		32.3	71.6	5.51	21.7	4.02	1.28	4.62	0.723	4.70	0.930	2.88	0.383	2.33	0.364	30.3	183.63	136.45	16.93	8.06	1.22	1.37
	ZK1707-H3		22.9	55.5	4.65	17.9	3.51	0.833	3.71	0.599	3.97	0.800	2.30	0.328	2.08	0.302	22.8	142.18	105.30	14.09	7.47	1.23	1.07
	ZK1707-H6		13.3	36.3	2.61	10.4	2.03	0.458	2.34	0.397	2.58	0.551	1.67	0.231	1.30	0.192	16.9	91.26	65.10	9.27	7.02	1.41	0.97
	ZK2206-H2		29.4	67.4	5.44	22.2	4.15	1.01	4.66	0.756	5.07	1.03	3.04	0.400	2.25	0.336	32.3	179.43	129.55	17.55	7.38	1.22	1.06
	ZK2206-H3		36.9	93.3	6.48	26.6	4.91	1.69	5.86	0.934	6.05	1.20	3.57	0.479	2.88	0.468	36.4	227.63	169.81	21.43	7.92	1.37	1.45
	ZK2206-H6		23.3	52.4	4.69	18.4	3.62	0.705	3.85	0.665	4.29	0.892	2.57	0.367	2.21	0.314	27.4	145.72	103.13	15.16	6.80	1.15	0.87
	ZK2206-H7		19.9	58.9	4.14	16.4	3.24	0.694	3.70	0.596	3.79	0.783	2.32	0.324	1.85	0.268	23.8	140.71	103.32	13.64	7.58	1.49	0.92
	XL-CK2		30.6	74.6	6.03	23.3	4.42	1.36	4.73	0.779	5.15	1.02	3.06	0.431	2.67	0.433	29.7	188.18	140.21	18.28	7.67	1.26	1.38
	XL-CK5		39.2	99.3	7.08	27.3	5.13	1.32	5.69	0.884	5.83	1.17	3.51	0.501	2.96	0.489	33.8	234.10	179.31	21.04	8.52	1.36	1.13
	XL-CK6		19.9	47.0	3.77	15.4	3.02	0.924	3.57	0.633	4.13	0.855	2.57	0.356	2.03	0.315	29.0	133.45	89.99	14.46	6.22	1.24	1.29
	XL-CK8		37.8	88.2	6.78	26.4	5.14	1.08	5.57	0.912	5.99	1.23	3.63	0.504	3.07	0.450	35.1	221.91	165.44	21.35	7.75	1.26	0.94
	XL-CK11		24.1	64.5	4.25	16.6	3.11	0.891	3.64	0.584	3.96	0.790	2.42	0.349	2.05	0.312	23.9	151.41	113.44	14.12	8.03	1.45	1.22
	ZK1702-H1	钙质硅质岩	14.3	22.0	3.86	16.5	3.98	0.896	3.73	0.620	3.76	0.682	1.95	0.274	1.73	0.256	20.7	95.27	61.61	13.00	4.74	0.68	1.08
	ZK1702-H3		22.7	47.6	5.74	23.3	4.84	1.05	4.53	0.726	4.49	0.852	2.57	0.369	2.33	0.344	22.7	144.19	105.30	16.21	6.49	0.96	1.05
	ZK1707-H1		40.3	114	8.43	33.2	6.84	1.70	7.02	1.16	7.35	1.41	4.03	0.555	3.23	0.468	39.5	268.86	204.16	25.23	8.09	1.42	1.14
	ZK1707-H4		11.9	22.0	2.87	11.8	2.58	0.699	2.46	0.424	2.72	0.545	1.63	0.230	1.46	0.234	15.1	76.69	51.86	9.70	5.35	0.86	1.29
	ZK1707-H5		16.8	34.6	4.63	19.6	4.31	1.21	3.98	0.701	4.64	0.868	2.60	0.368	2.28	0.360	26.0	122.96	81.16	15.80	5.14	0.90	1.36
	ZK1707-H7		12.6	29.7	3.14	12.7	2.73	0.623	2.65	0.454	2.92	0.589	1.73	0.259	1.55	0.250	16.1	88.10	61.54	10.41	5.91	1.09	1.08
	ZK2206-H1		24.5	56.0	6.04	23.8	4.83	1.37	4.74	0.796	5.34	1.09	3.46	0.519	3.32	0.529	30.3	166.64	116.56	19.80	5.89	1.06	1.33
	ZK2206-H4		13.4	24.3	3.23	12.8	2.69	0.616	2.48	0.430	2.78	0.542	1.61	0.224	1.43	0.223	14.6	81.43	57.09	9.71	5.88	0.85	1.11
	ZK2206-H5		13.7	19.1	3.22	13.5	2.96	0.636	2.91	0.521	3.48	0.701	2.06	0.294	1.82	0.264	22.1	87.40	53.20	12.06	4.41	0.66	1.01
	ZK2206-H8		34.9	73.5	7.93	30.4	6.14	1.72	5.67	0.905	5.80	1.12	3.43	0.515	3.47	0.582	28.3	204.36	154.62	21.48	7.20	1.02	1.36
外伏	WF-H1	碳酸锰矿	30.6	68.3	5.54	22.5	4.12	0.92	4.61	0.87	5.37	1.09	3.06	0.41	2.35	0.38	33.0	183.07	131.95	18.14	7.27	1.19	0.98
	WF-H2	碳酸锰矿	34.3	74.6	6.01	24.1	4.48	1.06	4.98	0.93	5.86	1.24	3.41	0.44	2.52	0.42	36.7	201.04	144.56	19.80	7.30	1.18	1.03

矿区名称	样品编号	样品名称	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	ΣLREE	ΣHREE	ΣLREE/ΣHREE	Ce*	Eu*
	WF-H3		31.1	78.8	5.84	23.6	4.41	1.06	5.19	0.90	5.64	1.19	2.94	0.39	2.09	0.34	32.5	195.97	144.76	18.69	7.75	1.34	1.02
竹叶山	ZYS-H1	碳酸锰矿	63.7	161	12.5	51.6	9.88	2.46	11.3	2.19	13.6	2.80	7.37	0.99	5.44	0.85	71.1	417.01	301.33	44.59	6.76	1.31	1.07
	ZYS-H2		37.4	69.4	5.95	24.5	4.19	1.03	4.99	0.89	5.69	1.14	3.00	0.41	2.24	0.37	32.0	193.16	142.43	18.75	7.60	1.05	1.03
	ZYS-H3		23.0	55.0	4.09	16.3	3.21	0.95	3.71	0.69	4.43	0.91	2.54	0.33	1.91	0.31	25.1	142.47	102.51	14.84	6.91	1.29	1.26
巡屯	XT-H1	碳酸锰矿	27.3	62.7	5.22	19.8	3.66	0.83	3.85	0.70	4.31	0.87	2.37	0.34	1.86	0.33	24.3	158.41	119.52	14.62	8.17	1.20	1.02
	XT-H2		31.8	57.3	5.54	22.4	4.08	0.98	4.29	0.76	4.90	1.00	2.77	0.38	2.20	0.35	27.1	165.83	122.08	16.66	7.33	0.98	1.09
	XT-H3		23.7	54.8	4.02	16.2	2.95	0.68	3.19	0.59	3.83	0.79	2.12	0.28	1.61	0.26	22.3	137.24	102.29	12.67	8.07	1.27	1.03
	XT-H4		99.3	309	20.0	77.1	14.0	2.65	14.1	2.25	12.7	2.31	6.11	0.85	4.75	0.77	54.1	619.61	521.65	43.84	11.90	1.59	0.88
	XT-H5		36.7	65.0	6.21	25.3	4.43	1.03	4.98	0.91	5.58	1.10	3.05	0.41	2.27	0.36	28.9	186.24	138.72	18.64	7.44	0.98	1.01
坡沟	PG-H1	碳酸锰矿	34.2	81.3	6.27	25.5	4.52	1.09	5.17	0.95	5.83	1.14	3.15	0.41	2.26	0.35	35.1	207.28	152.89	19.26	7.94	1.27	1.04
	PG-H2		19.1	43.9	3.64	14.9	3.08	0.68	3.23	0.62	3.71	0.78	2.11	0.30	1.67	0.26	20.6	118.54	85.21	12.68	6.72	1.20	1.01
	PG-H3		37.4	75.0	7.24	27.1	4.96	1.88	4.72	0.91	5.50	1.25	3.21	0.45	2.74	0.48	29.2	201.96	153.47	19.25	7.97	1.04	1.81
	PG-H4		50.0	85.5	8.33	32.9	5.82	1.44	6.25	1.16	7.27	1.44	3.87	0.54	2.95	0.50	37.4	245.29	183.91	23.97	7.67	0.95	1.10
内伏	NF-H1	硅质岩	12.4	20.8	2.67	10.3	2.22	0.53	2.04	0.36	2.16	0.42	1.18	0.17	1.08	0.19	20.6	77.11	48.93	7.60	6.43	0.83	1.16
	NF-H2	碳酸锰矿	32.5	86.5	5.90	23.8	4.25	0.79	4.81	0.85	5.03	0.97	2.66	0.34	1.90	0.31	28.1	198.79	153.81	16.87	9.12	1.43	0.80
	NF-H3		29.6	61.0	5.66	21.6	3.97	0.98	3.95	0.74	4.67	0.92	2.60	0.39	2.44	0.38	24.1	163.10	122.87	16.09	7.64	1.08	1.15
	NF-H4		28.1	62.5	5.32	21.4	4.05	0.77	4.48	0.83	4.89	0.95	2.48	0.35	2.01	0.31	23.3	161.74	122.14	16.31	7.49	1.17	0.84
	NF-H5	硅质岩	13.2	27.2	2.76	10.8	2.14	0.47	1.97	0.42	2.54	0.53	1.48	0.23	1.38	0.23	12.5	77.94	56.63	8.78	6.45	1.03	1.07
龙邦	LBDP1-H1	硅质灰岩	12.8	17.4	2.31	9.28	1.81	0.44	1.88	0.38	2.37	0.53	1.46	0.21	1.20	0.20	16.3	68.59	44.06	8.23	5.35	0.73	1.10
	LBDP1-H2	碳酸锰矿	12.8	16.7	2.18	8.91	1.65	0.41	1.75	0.35	2.43	0.49	1.41	0.21	1.24	0.20	16.3	67.09	42.71	8.08	5.28	0.72	1.12
	LBDP1-H3		28.2	55.1	5.58	22.7	4.60	1.11	4.52	0.83	5.30	0.98	2.71	0.34	1.92	0.33	27.0	161.21	117.22	16.94	6.92	1.01	1.13
	LBDP1-H4		24.5	67.9	4.23	17.5	3.03	0.89	3.63	0.60	3.69	0.75	1.97	0.27	1.47	0.22	20.3	150.97	118.09	12.60	9.37	1.51	1.23
	LBDP1-H5	硅质灰岩	18.1	27.2	4.11	16.2	3.53	0.74	3.25	0.64	4.07	0.82	2.35	0.32	2.07	0.32	24.5	108.32	70.00	13.84	5.06	0.72	1.02
	LBDP2-H1	硅质灰岩	13.0	16.8	2.32	9.44	1.74	0.40	1.83	0.34	2.34	0.50	1.42	0.21	1.26	0.22	15.4	67.26	43.73	8.13	5.38	0.70	1.05
	LBDP2-H2	碳酸锰矿	27.9	107	5.35	22.8	4.21	1.05	4.96	0.86	5.28	1.02	2.77	0.37	1.94	0.30	30.7	216.28	168.04	17.50	9.60	2.00	1.06

《地质力学学报》预出版

矿区名称	样品编号	样品名称	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	ΣLREE	ΣHREE	ΣLREE/ΣHREE	Ce*	Eu*
	LBPD2-H3	硅质灰岩	13.7	21.5	2.91	11.7	2.25	0.54	2.41	0.47	3.07	0.62	1.71	0.25	1.51	0.25	19.5	82.36	52.56	10.30	5.10	0.78	1.07

注：稀土元素质量分数单位为 $\times 10^{-6}$ ； $\Sigma LREE/\Sigma HREE$ 、Ce*、Eu*无量纲；计算 Ce 与 Eu 异常数据为采用后太古代黑色页岩(PAAS) 标准化后数据