



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：昆仑-阿尔金-天山-准噶尔地区沉积热液型锰矿成矿的地球动力学分析

作者：王华青，李朋武，吴继兵，熊运平，陈家浩，江沙，陈贺起

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2026091

投稿时间：2026-07-09

录用时间：2026-10-27

预出版时间：2026-10-28

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。

昆仑-阿尔金-天山-准噶尔地区沉积热液型锰矿成矿的地球动力学分析

王华青¹, 李朋武², 吴继兵³, 熊运平⁴, 陈家浩¹, 江 沙⁵, 陈贺起¹

WANG Huaqing¹, LI Pengwu², WUJibing³, XIONG Yunping⁴, CHEN Jiahao¹, JIANG Sha⁵, CHEN heqi¹

1. 中国冶金地质总局, 北京 100025;

2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

3. 中国冶金地质总局中南局, 湖北武汉, 430081

4. 中国冶金地质总局中南地质调查院, 湖北武汉 430081

5. 中国冶金地质总局广西地质勘查院, 广西南宁 530022

1. *China Metallurgical Geology Bureau, Beijing 100025, China;*

2. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*

3. *Central South Bureau of China Metallurgical Geology Bureau, Wuhan 430081, Hubei, China;*

4. *China Metallurgical Geology Bureau Central South Geological Survey Institute, Wuhan 430081, Hubei, China;*

5. *Guangxi Geological Exploration Institute, China Metallurgical Geology Bureau, Nanning 530022, Guangxi, China*

Geodynamic Analysis of Sedimentary-Hydrothermal Manganese Mineralization in the Kunlun-Altyn Tagh-Tianshan-Junggar Region

Abstract: [Objective] To reveal the intrinsic link between manganese mineralization in the Kunlun-Altyn Tagh-Tianshan-Junggar region surrounding the Tarim Basin and the coupling mechanism among the crust, mantle, and inner core within the Earth's rotational system, and to elucidate the deep geodynamic mechanism responsible for manganese ore formation in this region. [Methods] The metallogenic ages and ore-forming material sources of the major manganese belts surrounding the Tarim Basin were compiled, and the paleogeographic positions of the Kunlun-Altyn Tagh-Tianshan orogenic belt during each metallogenic epoch were reconstructed based on paleomagnetic and paleogeographic data. The principles of rotational Earth dynamics were then applied to analyze angular momentum redistribution among the solid inner core, mantle, and crust during poleward or equatorward crustal migration, and its effects on mantle convection, magmatic activity, and geomagnetic field reversal. [Results] Manganese mineralization in the study area predominantly occurred during the Early-Middle Ordovician, Early Devonian, Early-Late Carboniferous, and Early Permian, with ore-forming materials primarily derived from manganese-bearing magmatic hydrothermal fluids or hot liquids. All identified

基金项目: 国家重点研发计划课题(2022YFC2903404); 全国常态化成矿远景区划项目(DD2026021102); 中国冶金地质总局科研项目(中冶地[2023]CMGBDZYJ003号)

This research was financially supported by the National Key R&D Program Project (Grant No.2022YFC2903404), the National Routine Metallogenic Prospectivity Zoning Project (Grant No.DD2026021102), and the Scientific Research Project of China Metallurgical Geology Bureau (Grant No.Zhongyedi [2023] CMGBDZYJ003).

第一作者: 王华青(1987—), 女, 高级工程师, 主要从事地质勘查与成矿规律研究。Email: huaqing522@163.com, 15901537468

通讯作者: 李朋武(1965—), 男, 研究员, 主要从事古地磁学和大地构造学研究工作。Email: 13651041826@139.com, 13651041826

metallogenic events coincided with periods of geomagnetic field reversal. During the Early-Middle Ordovician, Early Devonian, and Early-Late Carboniferous–Early Permian, the paleogeographic positions of the Kunlun–Altyn Tagh–Tianshan orogenic belt were situated near the equator, between 20°N and 20°S. According to the principles of rotational Earth dynamics, when the crust migrates poleward, angular momentum of the crust decreases while that of the mantle and solid inner core increases; the mantle, due to its rheological characteristics, undergoes extensional upwelling near the equator, facilitating the upward migration of magmatic hydrothermal fluids and intensifying magmatic activity. The positively charged solid inner core undergoes super-rotation, and when the velocity difference between the positively charged inner core and the negatively charged liquid outer core exceeds a critical threshold—at which point the observed surface geomagnetic field intensity drops to zero—a geomagnetic reversal is triggered. Conversely, when the crust migrates equatorward, angular momentum of the crust increases while that of the mantle and solid inner core decreases; the positively charged solid inner core decelerates, and the geomagnetic field recovers to its normal state, during which extensional upwelling in the mantle occurs at mid-to-high latitudes. [Conclusions] The formation of manganese deposits in the East-West Kunlun, East-West Tianshan, and Altyn Tagh regions is closely related to mantle extensional upwelling near the equator during geomagnetic reversal periods. This mineralization is the product of crust-mantle-inner core coupling within the Earth's rotational system, rather than a result of isolated shallow geological processes. [Significance] This study establishes, for the first time, a linkage between regional manganese mineralization and the crust-mantle-inner core angular momentum exchange mechanism within the framework of rotational Earth dynamics, providing a novel geodynamic perspective for understanding deep-time metallogenic events. It reveals the genetic association between geomagnetic reversal periods and mantle-derived mineralization, offering a theoretical basis for predicting concealed manganese deposits using paleomagnetic and paleogeographic data, and provides a representative case for the scientific proposition that deep Earth processes control shallow crustal mineralization, contributing significantly to the refinement of the global manganese metallogenic theory.

Keywords: Manganese deposit; Metallogenesis; Rotational Geodynamics; Sedimentary-hydrothermal manganese deposit; Geomagnetic polarity reversal

摘要: 塔里木盆地周边昆仑-阿尔金-天山-准噶尔地区是我国锰矿重要产地。锰矿成矿主要发生在早—中奥陶世、早泥盆世、早—晚石炭世和早二叠世,成矿物质主要来源于含锰岩浆热液或热水。锰矿成矿作用均出现在地球磁场负极性期,昆仑-阿尔金-天山早—中奥陶世、早泥盆世和石炭纪—早二叠世古地理位置位于赤道附近的低纬度地区。按照旋转地球动力学原理,在地球旋转体制下,固体内地核、地幔、地壳三者角动量守恒,相对较重的地壳向两极运动时,地壳的总角动量减小,地幔和固体内地核角动量增加,地幔因具有流变特征而在赤道附近发生引张上涌,岩浆热液易向上运移,岩浆活动强,带正电荷的固体内地核超速旋转,当带正电荷的内地核与带负电荷的液体外地核速度差超过临界值(地表观测磁场强度为零)时,地磁场反转。地壳向赤道运动时角动量增大,地幔和固体内地核角动量减少,带正电荷的固体内地核减速旋转,地磁场恢复正常,地磁场正常期中高纬度地幔存在引张上涌作用。研究区古生代锰矿成矿事件在时空上与地磁场反转期赤道附近地幔引张上涌存在耦合关系,可能受地球旋转体制下壳-幔-核耦合过程影响。

关键词: 锰矿; 成矿作用; 旋转地球动力学; 沉积热液锰矿; 地磁极性反转

0 引言

中国锰矿床主要分布于泛扬子古陆、昆仑、天山、阿尔金、准噶尔和祁连山等地区,成矿时代集中在中元古代晚期、新元古代、晚古生代和早中生代。古生代是西昆仑、天山、阿尔金、准噶尔主要成矿期,为伸展构

造环境下海相沉积型锰矿，物质来源于深部含锰岩浆热液或热水，是热液与海水发生氧化-还原作用的结果。

围绕上述地区锰矿的物源来源、成矿环境和沉淀机制，前人已经开展了较多研究，并取得了重要进展。在成矿动力学方面，已有研究多将中亚造山带及相邻地区古生代锰矿的形成与弧后裂谷、地幔柱活动、裂谷盆地演化等构造背景相联系，认为区域伸展作用、深部岩浆—热液活动及盆地沉降—充填过程共同控制了锰质富集和矿层就位。这些认识为理解古生代锰矿的构造—沉积背景提供了重要基础。然而，现有研究主要侧重于区域构造背景、沉积相和物源示踪等方面，对成矿过程与地球动力学状态之间定量或机制性联系的系统分析仍相对不足，尤其是从古地磁演化、地磁场反转、低纬度地表位置变化及地幔引张上涌等角度探讨锰矿成矿动力学的研究尚不多见。

本文在总结西昆仑、天山、阿尔金、准噶尔等地区古生代锰矿地质特征和前人研究基础上，尝试从旋转地球动力学角度对锰矿成矿作用的动力学过程进行分析。分析结果表明，上述地区古生代锰矿沉积主要发生在地磁场反转期，古地理位置位于赤道附近低纬度地区。按照旋转地球动力学原理(Li Pengwu, 2025; 李朋武, 2025)，在地磁场反转期间，赤道附近低纬度地区地幔发生引张上涌，有利于形成引张型或断陷型盆地，并驱动深部岩浆热液向上运移，从而为锰质释放、搬运和沉淀提供有利条件。该认识旨在从地球动力学状态变化角度补充现有弧后裂谷、地幔柱和裂谷盆地等模式，为进一步探讨中亚造山带及相邻地区古生代锰矿成矿机制提供新的分析视角。

1 锰矿成矿地质环境

昆仑-天山-阿尔金-准噶尔锰矿床,成矿时代集中在古生代(张帮禄 等, 2018; 张帮禄 等, 2023; Gao et al., 2024; 谷忠品 等, 2026; 刘晓燕, 李咸阳, 2023; 全孝勤 等, 2024; 王鹏飞 等, 2024; 银花, 包亮亮, 2024; 董志国 等, 2021; 张振福 等, 2026),以海相沉积型为主。以下搜集整理了已经发表的有关构造背景、物质来源、矿床产出地层层位和地质时代等研究资料，以作为用于地球动力学分析的必要数据资料。

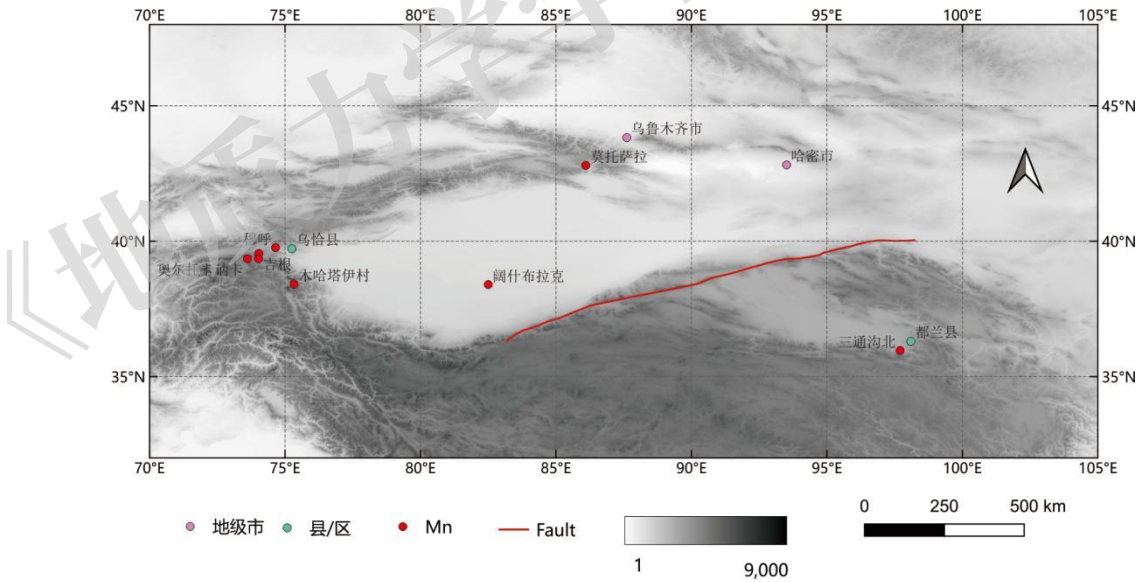


图 1 新疆地区锰矿分布图

Fig.1 Distribution Map of Manganese Mines in Xinjiang

从成矿建造看，锰矿多赋存于海相碎屑岩—碳酸盐岩—硅质岩组合中，常见含碳泥质灰岩、细晶灰岩、砂质灰岩、硅质岩、粉砂岩及火山碎屑岩等。西昆仑奥尔特阔勒什、玛尔坎苏、托吾恰克等锰矿产于上石炭统喀拉阿特河组及下二叠统玛尔坎雀库塞山组等海相地层中，矿体呈似层状、层状或透镜状，与台地相—浅海陆棚相沉积关系密切(张帮禄 等, 2018; 刘晓燕、李咸阳, 2023; 谷忠品 等, 2026)。喀拉阿特河组含锰岩系第一岩性段含火山角砾灰岩和第二岩性段砂质灰岩中火山岩岩屑获得锆石 U-Pb 谐和年龄为 (322.9 ± 1.8) Ma，第三岩性段凝灰岩夹层获得锆石 U-Pb 谐和年龄为 (322.0 ± 5.3) Ma。碳酸锰矿石 Re-Os 等时线年龄(约 320.3

$\pm 6.6 \text{ Ma}$), 可将该套含锰岩系的沉积时代限定为晚石炭世。喀拉阿特河组含锰岩系地层可能代表晚古生代古特提斯洋北向俯冲背景之下的弧后盆地沉积序列(张帮禄 等, 2023; Gao et al., 2024)。新鲜锰矿石有机质的 Re-Os 定年显示其成矿时代为 $302 \pm 9 \text{ Ma}$, 锰矿成矿时代与塔里木地幔柱启动金伯利岩年龄 $300.5 \pm 4.4 \text{ Ma}$ 时间相近, 推测西昆仑菱锰矿矿床与塔里木地幔柱的活动有关(Zhang et al., 2013; Gao et al., 2024), 认为在伸展构造背景下, 存在地幔柱的影响, 热水活动强烈(Gao et al., 2024), 或是同时期岩浆活动的产物。

西昆仑北缘下二叠统玛尔坎雀库塞山组形成于早二叠世弧后盆地构造环境, 是锰矿带的重要地层单元(谷忠品 等, 2026), 由中基性-酸性火山岩、火山碎屑岩及灰岩组成。灰岩中产有早二叠世 *Pseudofusulinablochini*; 砂岩中的碎屑锆石 U-Pb 测年结果显示主峰值为 289 Ma , 最年轻的锆石 U-Pb 加权平均年龄为 $274.2 \pm 2.4 \text{ Ma}$ ($n=6$; $\text{MSWD}=0.87$)

东昆仑三通沟北锰矿产于奥陶纪—志留纪裂谷盆地海相沉积建造中, 通过对与锰矿关系密切的粉砂岩碎屑锆石 U-Pb 年代学研究, 以及矿区硅质岩放射虫化石种属鉴定, 结果表明最年轻碎屑锆石 U-Pb 优势年龄 478 Ma (刘永乐 等, 2023)。

西准噶尔木哈塔依锰矿、西南天山吉根含锰层位、西天山莫托萨拉铁锰矿及阿尔金阔什布拉克锰矿也多与硅质岩、碳酸盐岩及火山碎屑岩有关, 部分矿床后期受到热液叠加改造, 均形成于早泥盆世(全孝勤 等, 2024; 李康 等, 2018; 王鹏飞 等, 2024; 银花、包亮亮, 2024; 董志国 等, 2021; 张振福 等, 2026)。总体上, 该区锰矿成矿建造以海相沉积为主, 局部叠加热液改造特征。在新疆西南天山乌恰县吉根一带的下泥盆统萨瓦亚尔顿组第二岩性段硅质岩为含锰沉积层位, 其赋矿层位主要为一套深海-半深海沉积建造特征, 锰质可能源自海底火山或洋岛喷发, 矿床成因类型为海相沉积型锰矿(李康 等, 2018), 与深部富含锰的热卤水热液活动有关(王鹏飞 等, 2024; 银花、包亮亮, 2024)。莫托萨拉铁锰矿床位于新疆西天山阿吾拉勒成矿带东端(董志国 等, 2021), 在矿区发现了热液长石岩, 其主要由钠长石、钾长石以及少量重晶石、霓石、锌铁黄长石等矿物组成。

阔什布拉克沉积锰矿床位于阿尔金造山带北缘红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带的西段, 锰矿体赋存于红柳沟群硅质岩中(张振福 等, 2026)。关于红柳沟基性-超基性岩带的形成时代, 杨经绥等(2008)曾获得北阿尔金红柳沟蛇绿岩中辉长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $479 \pm 8 \text{ Ma}$ 。

从构造背景看, 古生代锰矿主要形成于伸展构造环境下的弧后盆地、裂谷盆地及海相陆棚盆地。西昆仑地区晚石炭世—早二叠世锰矿多与古特提斯洋北向俯冲背景下的弧后盆地、陆间裂谷盆地及塔里木地幔柱活动有关(覃英 等, 2014; 高永宝 等, 2018; 张帮禄 等, 2023; Gao et al., 2024; 谷忠品 等, 2026)。东昆仑三通沟北锰矿被认为形成于奥陶纪—志留纪裂谷盆地环境(刘永乐 等, 2023)。西准噶尔木哈塔依锰矿与准噶尔洋俯冲形成的弧后盆地及蛇绿混杂岩带演化相关(田亚洲 等, 2015; 全孝勤 等, 2024)。西南天山、西天山及阿尔金地区锰矿亦多与俯冲—伸展背景下的海相盆地、海底火山活动及裂谷—弧后盆地环境相联系(李康 等, 2018; 王鹏飞 等, 2024; 银花、包亮亮, 2024; 董志国 等, 2021; 张振福 等, 2026)。因此, 区域伸展作用、盆地裂陷及同期岩浆—火山活动是控制锰矿就位的重要构造因素。

从物质来源看, 锰质主要来源于深部含锰岩浆热液、海底热水及火山喷发物质, 并在海相盆地中经氧化—还原作用发生沉淀富集。西昆仑锰矿石具有较低 Y/Ho 、 Co/Ni 、 $\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mn})$ 比值, 含较多火山岩岩屑, 指示成矿物质与海底热水活动密切相关(高永宝 等, 2018)。玛尔坎苏地区锰质以深源物质为主, 与火山活动和热水活动关系密切(查斌 等, 2019)。西准噶尔木哈塔依锰矿受俯冲带附近热液活动控制, 矿体多赋存于构造热液细脉中(全孝勤 等, 2024)。西南天山、西天山及阿尔金地区锰质也普遍被认为来自深部富锰热卤水或海底火山喷发物质, 并在沉积过程中受到后期热液和氧化作用改造(李康 等, 2018; 王鹏飞 等, 2024; 银花、包亮亮, 2024; 董志国 等, 2021; 张振福 等, 2026)。

综上, 昆仑—天山—阿尔金—准噶尔地区古生代锰矿总体表现为: 成矿建造以海相碎屑岩—碳酸盐岩—硅质岩组合为主; 构造背景以弧后裂谷、裂谷盆地及海相陆棚盆地等伸展环境为主; 物质来源以深部岩浆热液、海底热水和火山喷发物质为主。这些共性特征为利用旋转地球动力学原理分析该区锰矿成矿作用提供了地质依据。

2 岩浆热液上升动力

2.1 旋转地球动力学原理

根据板块运动的古地磁数据、地磁场磁极性超时和岩浆作用同位素地质年龄数据对应性分析，依据角动量守恒原理，建立了地磁场双磁场源模型，分析了地磁场形成和反转的物理机制，合理解释了地表观测到的地磁场长期变化，证实了地磁场形成和反转的动力来源于地球旋转体制下固体内地核、地幔和地壳旋转运动的耦合相互作用（李朋武，2025；Li Pengwu, 2025）。论著里分析表明从石炭纪晚期到二叠纪早期，澳大利亚板块向南移动，而西伯利亚板块同时向北移动，导致 Kiaman 反磁极性超时（KRS，约 262 Ma 到 318 Ma）。在大约 130 Ma 开始时，喜马拉雅和澳大利亚板块从南纬高纬度地区迅速向赤道移动，导致白垩纪正磁极性超时（CNS，约 84 Ma 到 125 Ma）（李朋武，2025；Li Pengwu, 2025，及其引用参考文献）。KRS 和 CNS 与地质持续时间长的板块运动在时代上存在对应性，有动力学关联。同时发现在 KRS 和 CNS 持续期间，岩浆作用强烈，且分别发生在赤道附近低纬度和两极附近中高纬度地区。基于定轴旋转地球角动量守恒原理，地壳、地幔和内地核之间存在角动量交换的耦合相互作用，带负电荷的外地核和带正电荷的刚性内地核都参与了磁场的形成，构成双磁场源。内、外地核旋转速度的相对变化是地磁场倒转的主要原因。当内地核与外地核旋转速度差超过临界值的阈值时，地磁场反转。当相对较重的地壳向两极运动时，地壳总角动量减小，地幔和固体内地核角动量增加，具有流变性质的地幔在赤道附近地区引张上涌，固体内地核旋转增速，地磁场反转，低纬度地区岩浆或岩浆热液活动强烈。当地壳向赤道运动角动量增大，地幔和固体内地核角动量减小，具有流变性质的地幔在中高纬度地区引张上涌，固体内地核旋转减速，地磁场表现为正向，中高纬度地区岩浆或岩浆热液活动强烈。地磁场形成与反转、岩浆作用和板块运动的能量来源于地球旋转的动能和储存在地球内部的热，是地球自旋转系统下地壳、地幔和固体内地核耦合作用的结果（李朋武，2025；Li Pengwu, 2025）。可以肯定地磁场磁极性变化、岩浆作用和板块运动在地质时代上存在对应性，因此，可以利用地磁极性变化特征、同位素地质年代数据、古纬度数据来推断不同纬度地理区地幔行为引起的岩浆和岩浆热液活动的强烈程度。

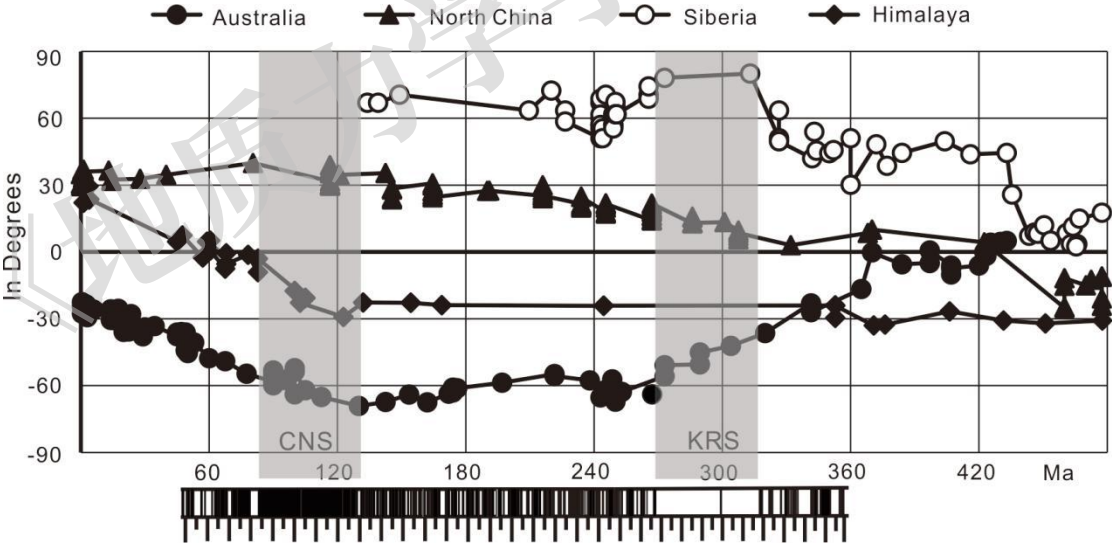


图2 澳大利亚、西伯利亚、喜马拉雅和华北板块古纬度演化曲线（引自：李朋武，2025）。矩形阴影显示KRS和CNS的持续时间。Ma表示百万年。地磁极性数据来自地质年代表 2012（Gradstein and Ogg, 2012）。澳大利亚、华北、西伯利亚和喜马拉雅板块的古纬度值分别统一到了参考点（130°E，25°S）、（110°E，35°N）、（88°E，69°N）和（90°E，29°N）。澳大利亚、华北、西伯利亚和喜马拉雅板块古地磁数据分别参见附件表1，表2，表3和表4

Fig.2 Paleolatitude evolution curves of the Australian, Siberian, Himalayan, and North China blocks (adapted from Li Pengwu, 2025). The rectangular shaded areas indicate the durations of the KRS and CNS. Ma denotes million years. Geomagnetic polarity data are sourced from the Geological Time Scale 2012 (Gradstein and Ogg, 2012). The paleolatitude values of the Australian, North China, Siberian, and Himalayan blocks were uniformly referenced to (130°E,

25°S), (110°E, 35°N), (88°E, 69°N), and (90°E, 29°N), respectively. Paleomagnetic data for the Australian, North China, Siberian, and Himalayan blocks can be found in Supplementary Tables 1, 2, 3, and 4, respectively.

李朋武 (2025) 以西伯利亚板块、澳大利亚板块、喜马拉雅和华北地块的运动特征为例, 证实 KRS 和 CNS 超地磁极性时与板块运动具有同步性, 即晚石炭世-早二叠世 KRS 期间板块向两极运动, 白垩纪中期 CNS 期间板块向赤道方向运动。澳大利亚的古地磁数据是从 McElhinny 和 Lock (1996) 编辑的数据库中提取的, 采用了 Van der Voo (Van der Voo, 1990a) 开发的古地磁数据可靠性标准对这些数据进行了筛选, 将澳大利亚板块的数据统一到参考点 (130°E, 25°S), 列于表 4 中, 包括了一些新发表的数据 (Belica et al., 2017; Gurevitch et al., 1995; Kravchinsky, 2002; Lind et al., 1994; Rodionov, 2003; Westphal et al., 1998) (表 1)。西伯利亚古地磁数据转引自李朋武 等 (2006) (表 3)。华北和喜马拉雅古地磁数列在见表 2 和表 4。

澳大利亚板块和喜马拉雅板块从约 130 Ma 开始朝向赤道漂移, 几乎完全与 CNS 发生的时间一致, 漂移运动持续了至少 70 Ma。KRS 和 CNS 的发生与主要板块的漂移同时性不应该是巧合, 而可能存在关联。板块从低纬向中高纬的漂移会导致地壳总角动量减小, 板块从高纬度向低纬度的漂移会地壳总角动量的增加。按照旋转体制下角动量守恒原理, 地壳总角动量减小, 地幔角动量增加, 由于地幔具有流变特性, 低纬度地区地幔会发生膨胀, 造成地幔引张上涌; 地壳总角动量的增加, 地幔角动量减小, 由于重力作用低纬度地区地幔收缩, 中高纬度地区地幔会发生膨胀, 从而引张上涌。

2.2 岩浆热液上升驱动力

岩浆或岩浆热液通常存在于下地壳、软流圈或地幔内。岩浆或岩浆热液上升是受压力驱动的, 其总压力等于其过剩压力(Excess pressure)加上岩石静应力(Lithostatic stress)(或称上覆岩层压力)(Gudmundsson, 2012; Lahiri et al., 2019)。

$$P_t = P_l + P_e$$

其中: P_t 是总压力, P_l 是岩石静应力, P_e 是过剩压力。

超压(overpressure)亦称驱动压力, 是驱动压裂(流体驱动的扩张裂缝)扩展的压力(Gudmundsson, 2012), 也是驱动流体上升的力。包括过剩应力、浮力和差应力 (σ_d)。

$$P_0 = P_e + (\rho_r - \rho_m)gh + \sigma_d$$

地球旋转体制下, 由于地壳、地幔和内地核的耦合作用, 当地幔角动量增加时, 会产生地幔引张(或上涌)作用, 会产生驱动岩浆或岩浆热液上升的附加力, 称之为地幔引张力(mantle extensional force, P_m)。因此超压应包含地幔引张应力。

$$P_0 = P_e + (\rho_r - \rho_m)gh + \sigma_d + P_m$$

考虑一个二维贯穿裂缝的岩脉模型。若其长度(迹长) L 小于垂直尺寸或岩脉高度, 则该岩脉的最大厚度(孔径)与其走向尺寸的关系可通过以下方程表示(Lahiri et al., 2019; Geshi et al., 2020; Baamar et al., 2025):

$$b_m = \frac{2P_0(1 - \nu^2)L}{E}$$

$$P_0 = (b_mE)/2L(1 - \nu^2)$$

其中, 其中 L 为岩脉长度, b_m 为岩脉中心处的最大张开宽度。 E 为围岩的弹性模量, ν 为围岩的泊松比。通过分析若干岩脉的长宽比, 可以计算出岩脉形成所需的岩浆超压。

有了地幔引张力的加持, 岩浆、岩浆热液或热水活动较非引张区更加强烈, 产生的岩浆岩或岩浆热液量更大, 同时地幔引张会增加地区热流值, 热液、热水活动活跃。地幔引张是地壳破裂、岩石圈伸展、岩浆上升、地热流增加、岩浆热液或热水活动的主要动力源。

由于全球范围内地壳的角动量变化还不能定量估算, 地幔的角动量变化也就不能给出定量估算, 从而地幔引张力 P_m 无法估算, 因为地幔的上涌行为, 相当于膨胀作用, 所以该力应是存在的。但该力目前只能定性表述。

3 讨论

古生代地磁场特征表现为负极性期占优势，即存在两个负极性超时：石炭-二叠纪负极性超时(KRS: Kiaman Reversal Superchron, 262-323 Ma)（图 2）和莫耶罗负极性超时(Moyero Reversed Polarity Superchron, 482-460 Ma)（图 3）(Grappone et al., 2017; Gradstein et al., 2004; Gradstein et al., 2012)。Opdyke 和 Channell（1996）建议 KRS 的年龄为 262-323 Ma，KRS 的底界被限制在 318 Ma（Opdyke 等，2000）（图 2）。地质年代表 2012（Geologic Time Scale 2012）显示早石炭世（359-323 Ma）地磁场以负极性期为主（Gradstein et al., 2012）（图 2），宾夕法尼亚亚纪巴什基尔（Bashkirian）早期为负极性期。早泥盆世（393-419 Ma）存在近 24 Ma 时长的负极性期（393-417 Ma，图 2）（Gradstein et al., 2012）。在负极性期期间赤道及赤道附近低纬度地区会发生地幔上涌，地壳伸展形成沉积盆地。

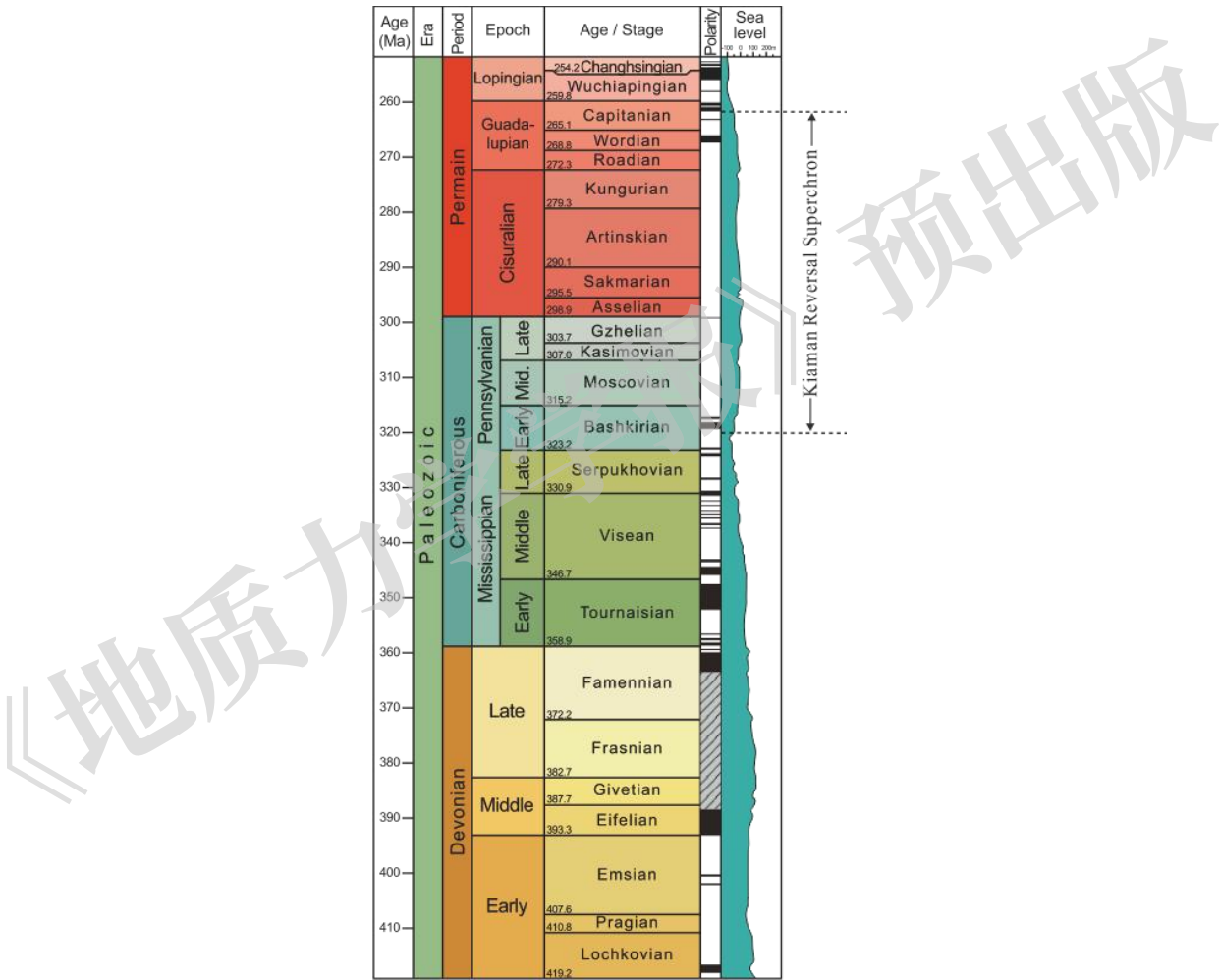


图 3 晚古生代地质时代年表（源自 Geological Time Scale 2012。图中右侧负极性期柱状图，白色为地磁负极性期，黑色为地磁正极性期，灰色带条纹表示无数据。早泥盆世负极性期锰矿成矿作用，石炭纪-早二叠世负极性期（KRS）发生锰矿成矿作用）

Fig. 2 Late Paleozoic Geological Time Scale (Derived from Geological Time Scale 2012. The right side of the figure shows the geomagnetic polarity bar chart, where white represents reversed polarity, black represents normal polarity, and the gray with diagonal stripes indicate missing data. Manganese mineralization occurred during Carboniferous-Early Permian and during Early Devoian reversed geomagnetic polarity period)

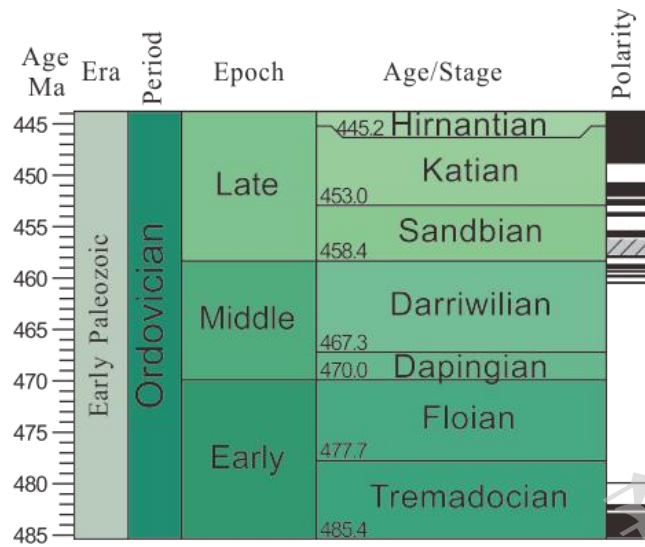


图 4 奥陶纪地质时代年表（源自 Geological Time Scale 2012. 图中右侧地磁极性期柱状图，白色代表负极性期，黑色代表正极性期，灰色带条纹表示无数据。早-中奥陶世负极性期（MRPS）发生锰矿成矿作用）

Fig. 3 Devonian Geological Time Scale (Derived from Geological Time Scale 2012. The right side of the figure shows the geomagnetic polarity bar chart, where white represents reversed polarity, black represents normal polarity, and the gray with diagonal stripes indicate missing data. Manganese mineralization occurred during Early-middle Ordovician reversed geomagnetic polarity period (Moyero Reversed Polarity Superchron))

晚石炭世-早二叠世，中亚造山带、塔里木、东西昆仑具有强烈的岩浆活动，亚东-格尔木地学断面古地磁研究获得昆仑地块（参考点：纳赤台 94.6°E, 35.9°N）早二叠世古纬度为 11.7°S（董学斌 等，1990）。黄继春等（1999）在东昆仑取得早二叠世古纬度约为 14°S。塔里木地块古董山区早二叠世玄武岩的古地磁研究，确定其古纬度约为 21.0°N (Xu et al., 2013)。羌塘晚石炭世古地磁原生剩磁方向(D=214.3, I=27.4, K=25.4, $\alpha_{95}=15.5$)为反向磁化，古纬度约 14.5°S（程鑫 等，2011），羌塘早中二叠世古地磁原生剩磁方向(D=207.5, I=28.8, K=45.9, $\alpha_{95}=11.4$)为反向磁化，古纬度约 15°S（程鑫 等，2011）。羌北地块晚石炭-早二叠世扎日根组与诺日巴尕日保组灰岩地层(约 299-323 Ma)的原生剩磁分量的平均方向为 $D_s=30.2$, $I_s=-40.9$, $K_s=269.0$, $\alpha_{95}=2.3$ ，相应的古纬度为 23.7°S（杨兴峰 等，2016；卫弼天 等，2025）。北羌塘地块晚石炭世瓦龙山组灰岩(约 317.0±11.6 Ma)古地磁研究得到古纬度 19.5±5.2°S (Zhang et al., 2026)。在北羌塘诺日巴尕日保组火山岩获得早二叠世（约 296.9 Ma）古纬度 21.3°S (Song et al., 2017；卫弼天 等，2025)。在西昆仑山地区，正如古纬度或纬度运移量曲线的收敛所指示，古特提斯洋的闭合，即羌塘地块与塔里木地块的最终碰撞发生在晚三叠世（李朋武等，2009），处于羌塘和塔里木间的西昆仑晚石炭世-早二叠世在 21.0°N-14.5°S 之间的低纬度，西昆仑地区晚石炭世-早二叠世处于伸展环境。方大钧 等（1996）在塔里木柯坪地区获得早奥陶世古地磁原生剩磁方向(D=101.0, I=-34.0, K=38.0, $\alpha_{95}=13.0$)，古纬度 18.6°S，志留纪依木干他乌组古地磁原生剩磁方向(D=87.9, I=-30.4, K=74.6, $\alpha_{95}=8.1$)，古纬度 16.3°N，早泥盆世克菲尔塔格组原生剩磁方向(D=92.9, I=33.9, K=127.2, $\alpha_{95}=5.6$)，古纬度 18.6°N（方大钧 等，1996）。中-晚奥陶世（约 467-453 Ma）原生剩磁方向(D=115.1, I=-51.4, K=31.3, $\alpha_{95}=8.3$)，古纬度约 32°S，中志留世（约 439-427 Ma）原生剩磁方向(D=86.1, I=22.9, K=13.4, $\alpha_{95}=10.1$)，古纬度约 12°S（Huang et al., 2019），说明中晚奥陶纪至中志留世期间，塔里木发生快速向赤道方向运移。阿尔金造

山带北缘红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带北邻敦煌地块、北山地块，东临柴达木地块。敦煌地块早二叠世原生剩磁方向($D=1.7, I=43.1, K=403.0, \alpha_{95}=1.5$)，古纬度约 $25.1^{\circ}\text{N}\pm 1.2^{\circ}$ (Xu et al., 2019)，北山南部地块早石炭世古纬度为 13.1°N ；晚石炭世古纬度为 $11.7^{\circ}\text{N}\pm 3.1^{\circ}$ (许伟 等, 2019)。北山地块洗肠井地区中奥陶世原生剩磁方向($D=269.2, I=13.5, K=3072.8, \alpha_{95}=1.1$)，古纬度约 6.8°N ，小南山地区早奥陶世原生剩磁方向($D=265.5, I=23.5, K=5745.6, \alpha_{95}=0.5$)，古纬度约 12.3°N (左国朝 等, 1993)，北山红柳园地区中奥陶世花牛山组原生剩磁方向($D=326.8, I=-8.1, \alpha_{95}=3.1$)，古纬度约 $5.4^{\circ}\text{N}\pm 3.1^{\circ}$ (黄宝春 等, 2002)，方大钧 等 (1996) 获得的塔里木早奥陶世($D=101, I=-34, K=38, \alpha_{95}=13$)，古纬度 18.6°S 。董学斌 等 (1995) 在北山地块呼鲁赤古特地区获得中奥陶世原生剩磁方向($D=144.1, I=-25.5, K=9.5, \alpha_{95}=8.9$)，古纬度约 13.4°S ，麻黄沟早寒武世($D=152.3, I=-31.2, K=23.8, \alpha_{95}=7.7$)，古纬度约 16.8°S (董学斌 等, 1995)，柴达木地块早奥陶世原生剩磁方向($D=345.3, I=-14.5, K=54.8, \alpha_{95}=7.5$)，古纬度约 7.4°N ，也均在赤道附近 (曹勇 等, 2021)。来自北山、敦煌、柴达木地块的古地磁数据限定了阿尔金造山带北缘含锰矿的红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带在早-中奥陶世位于赤道附近低纬度地区，且成矿时代应对应莫耶罗反地磁极性超时(Moyero Reversed Polarity Superchron, 482-460 Ma) (图 3、图 4、图 5)。

伊犁地块下石炭统阿克沙克组锰矿赋矿地层，获得原生剩磁方向($D=180.2, I=-40.9, K=469, \alpha_{95}=13.6$)，古纬度约为北纬 20°N (Wang et al., 2007)，处于低纬度，且为负极性。准噶尔盆地晚古生代佳木河组和风城组沉积时间为晚石炭系，风城组一段锆石年代学分析，获得了 $305.4\pm 1.5\text{ Ma}$ 和 $307.1\pm 1.7\text{ Ma}$ 两个加权平均年龄。古地磁结果限定准噶尔地块在风城组时期的古纬度为 $23.4^{\circ}\pm 4^{\circ}\text{N}$ ，佳木河组时期古纬度为 $25.4^{\circ}\pm 2.5^{\circ}\text{N}$ (陈璐, 2023)。程国良 等 (1993) 在准噶尔二台地区获得早中泥盆世古地磁结果显示原生剩磁分量的平均方向为 $D_s=224.0, I_s=-38.9, K_s=108.3, \alpha_{95}=5.0$ ，相应的古纬度为 $21.9^{\circ}\pm 3.5^{\circ}\text{N}$ (程国良 等, 1993)。

阔什布拉克沉积锰矿床含锰岩系属于南华系-下奥陶统红柳沟群蛇绿混杂岩上部钙泥质板岩、硅化白云岩和硅质岩 (张振富 等, 2026)。早-中奥陶世地质年代跨度从 458 Ma 至 485 Ma，其中 482 Ma 至 460 Ma 为长地磁场磁极性时，反向地磁场持续约 22 Ma。北阿尔金红柳沟蛇绿岩中辉长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $479\pm 8\text{ Ma}$ (杨经绥 等, 2008)，含矿位于蛇绿混杂岩上部，其成矿地质时代对应 479 Ma 至 460 Ma，在反地磁极性期范围内。晚石炭世-早二叠世 320 Ma 至 262 Ma 为地磁场反地磁极性超时，持续了约 61 Ma，343 Ma 至 320 Ma 也以反向地磁极性为主。西昆仑托吾恰克锰矿、奥尔托喀纳什大型锰矿床、穆呼和玛尔坎土中型锰矿床，成矿时代均是晚石炭世-早二叠世，奥尔托喀纳什锰矿上石炭统喀拉阿特河组含锰岩系碳酸锰矿石 Re-Os 等时线年龄 (约 $320.3\pm 6.6\text{ Ma}$) (Li et al., 2022; Gao et al., 2024)，富含有机质锰矿石的 Re-Os 定年显示其成矿时代为 $302\pm 9\text{ Ma}$ (Gao et al., 2024)。同一矿床不同测年给出的年龄 ($302\pm 9\text{ Ma}$) 与 ($320.3\pm 6.6\text{ Ma}$) 在误差范围内并不完全一致，这可能与有机质成熟度、初始 Os 同位素组成、或 Re 和 Os 含量差异有关。锰碳酸盐矿石初始 $187\text{Os}/188\text{Os}$ 值 (0.7959 ± 0.0029)，并明显高于上、下盘泥灰岩所记录的同时期全球海水的 Os 初始值 (约 0.6)，由于河流输入是放射性成因 Os 的主要来源，故认为与河流输入有关 (Li et al., 2022)，锰碳酸盐矿石初始 $187\text{Os}/188\text{Os}$ 值的增高会使测定的碳酸锰矿石 Re-Os 等时线年龄 (约 $320.3\pm 6.6\text{ Ma}$) 偏大。Re-Os 测年要求 Re 和 Os 含量要高，才能保证测量精度，Li et al. (2022) 所用锰矿石样品的铼和钕含量较低 (分别为 1.380 和 0.376 ppb)，而 Gao et al. (2024) 用于 Re-Os 测年的样品平均 Re 和 Os 含量分别为 8.701 和 0.592 ppb，显著比前者高，而且样品的 Re/Os 质量比为 1.7-59.9，远宽于前者的 0.18-13.3 (Gao et al., 2024)。奥尔托科纳什锰矿含锰层之上的早二叠世玛尔坎库克萨依山组流纹质凝灰岩锆石 U-Pb 加权平均年龄为 $292\pm 3\text{ Ma}$ (Gao et al., 2024)，位于锰矿床之下的乌鲁台组玄武岩的年龄约为 $313.6\pm 1.6\text{ Ma}$ (计文化 等, 2018)，因此，奥尔托科纳什锰矿的锰矿化作用时间被限定在 313 至 292 Ma 之间，铼-钕加权平均年龄给出的奥尔托喀纳什锰矿床矿化作用的年龄 $302\pm 9\text{ Ma}$ 是更合理的。下二叠统玛尔坎雀库塞山组是锰矿带的重要地层单元 (谷忠品 等, 2026)，灰岩中产有早二叠世生物化石，砂岩中的碎屑锆石 U-Pb 测年结果显示主峰值为 289 Ma。这些年龄值均落在晚石炭世-早二叠世 320 Ma 至 262 Ma 地磁场反地磁极性超时范围内，即使同位素测试年龄存在几个百万年的误差，这一特征依然不受影响。西准噶尔地区木哈塔依锰矿和新疆西南天山乌恰县吉根一带发现的含锰沉积层位，均赋存于下泥盆统地层中 (全孝勤 等, 2024; 李康 等, 2018)。早泥盆世年

龄跨度从 419 Ma 至 393 Ma，其中，417 Ma 至 393 Ma 为地磁场长地磁极性期，持续约 24 Ma。早泥盆世沉积型锰矿床均发生在地磁场反磁极性期间。锰矿成矿时代、古纬度范围、地磁场磁极性对比总结在表 1 中。

表 1 锰矿成矿时代、古纬度、地磁场磁极性对照表
Table 1 Comparison of Manganese ore formation geochronology, Paleolatitude, and geomagnetic Polarity

矿床名称	成矿时代	地磁场磁极性	古纬度范围	成矿构造背景
西昆仑奥尔托喀纳什、玛尔坎苏和托吾恰克锰矿	晚石炭统世-早二叠世。成矿时代在 274 Ma - 322 Ma 期间。	KRS 反磁极性超时 (260 Ma - 320 Ma)	21° N - 19.5° S	海相地层。与塔里木地幔柱有关，或弧后盆地
东昆仑三通沟北锰矿、阿尔金阔什布拉克沉积锰矿	早-中奥陶世 (458 Ma - 485 Ma)	Maya 反磁极性超时 (460 Ma - 482 Ma)	12.3° N - 13.4° S	海相沉积。裂谷盆地
西准噶尔木哈塔依锰矿、西南天山吉根锰矿、西天山莫托萨拉铁锰矿	早泥盆世 (393 Ma-419 Ma)	长地磁反磁极性期 (393 Ma - 417 Ma)	约北纬 22° N	海相沉积。海底火山或洋岛喷发，引张裂陷构造环境。

寻找锰矿有利层位的关键在于恢复其沉积构造环境。长期处于构造伸展背景形成的断陷盆地、海相裂谷盆地和陆内凹陷盆地，是沉积热液型锰矿的有利富集场所；伸展背景下断裂发育，岩浆活动与热液活动强烈，有利于锰质运移、富集和沉淀。本文尝试在地球旋转体制下，利用物理学中经典的角动量守恒原理对这一过程进行初步动力学解释：在地球系统中，地壳、地幔和地核的总角动量保持守恒；当板块运动引起地壳角动量发生变化时，地幔角动量必然随之发生相应调整，从而可能诱发地幔物质上涌、岩石圈伸展和盆地形成。沉积地质时代、地磁场磁极性、沉积古地理位置及板块纬度迁移，可作为判定沉积构造环境的重要约束数据。

但必须指出，本文目前主要建立了锰矿成矿时代、地磁负极性超时、低纬度位置与伸展盆地之间的时空统计耦合关系，尚缺少中间过程的直接证据，因而不能将上述耦合简单解释为单一因果链。首先，现有资料并不能证明“板块纬度迁移”是造成 Kiaman、Moyero 地磁极性超时的诱因。主流地磁学认为，地磁倒转和极性超时主要起源于外地核流体动力学过程，板块运动引起的角动量再分配与地磁极性变化之间是否存在直接因果关系，目前仍未得到充分证实。其次，本文也难以区分锰矿形成究竟是地磁负极性期地幔上涌的直接结果，还是区域构造演化（如古特提斯洋/古亚洲洋伸展、弧后裂谷、地幔柱活动、洋壳伸展等）独立控制地幔上涌和成矿，只是恰好在时间上与地磁负极性期重合。例如，西昆仑晚石炭世高品位碳酸盐型锰矿被认为形成于古特提斯洋弧后盆地环境，并可能与塔里木地幔柱活动及海底热液作用有关（Gao et al., 2024；李文渊 等，2022）；华南南华纪“大塘坡式”锰矿则主要受裂谷盆地、海底热液、氧化—还原界面变化及成岩转化共同控制（陈方戈，2025；周琦 等，2016）。这些传统构造—热液成矿模式对本区锰矿仍具有合理解释力，不能完全排除。

因此，本文提出的地球旋转体制下角动量守恒解释，目前更宜视为一种补充性动力学假说，而非唯一成因机制。后续研究需要进一步获取锰矿层及围岩的高精度年代学、古地磁、地球化学、热液活动标志和深部结构证据，以区分地磁极性变化、板块运动、地幔上涌、弧后伸展、地幔柱活动等不同因素对成矿的相对贡献，并检验该动力学框架是否具有可检验的物理过程和区域普适性。

4 结论

昆仑—天山—阿尔金—准噶尔地区锰矿沉积时代主要包括早—中奥陶世、早泥盆世、早石炭世、晚石炭世和早二叠世。基于现有古地磁资料初步分析，上述成矿期次对应的古地理位置可能位于赤道附近低纬度地区，且多处于地磁场负极性期或地磁场极性转换阶段。按照旋转地球动力学原理，地磁场反转期间赤道附近低纬度

地区地幔引张上涌可能较为显著，有利于形成伸展型或断陷型盆地，并促进岩浆作用及含锰热液活动，从而为

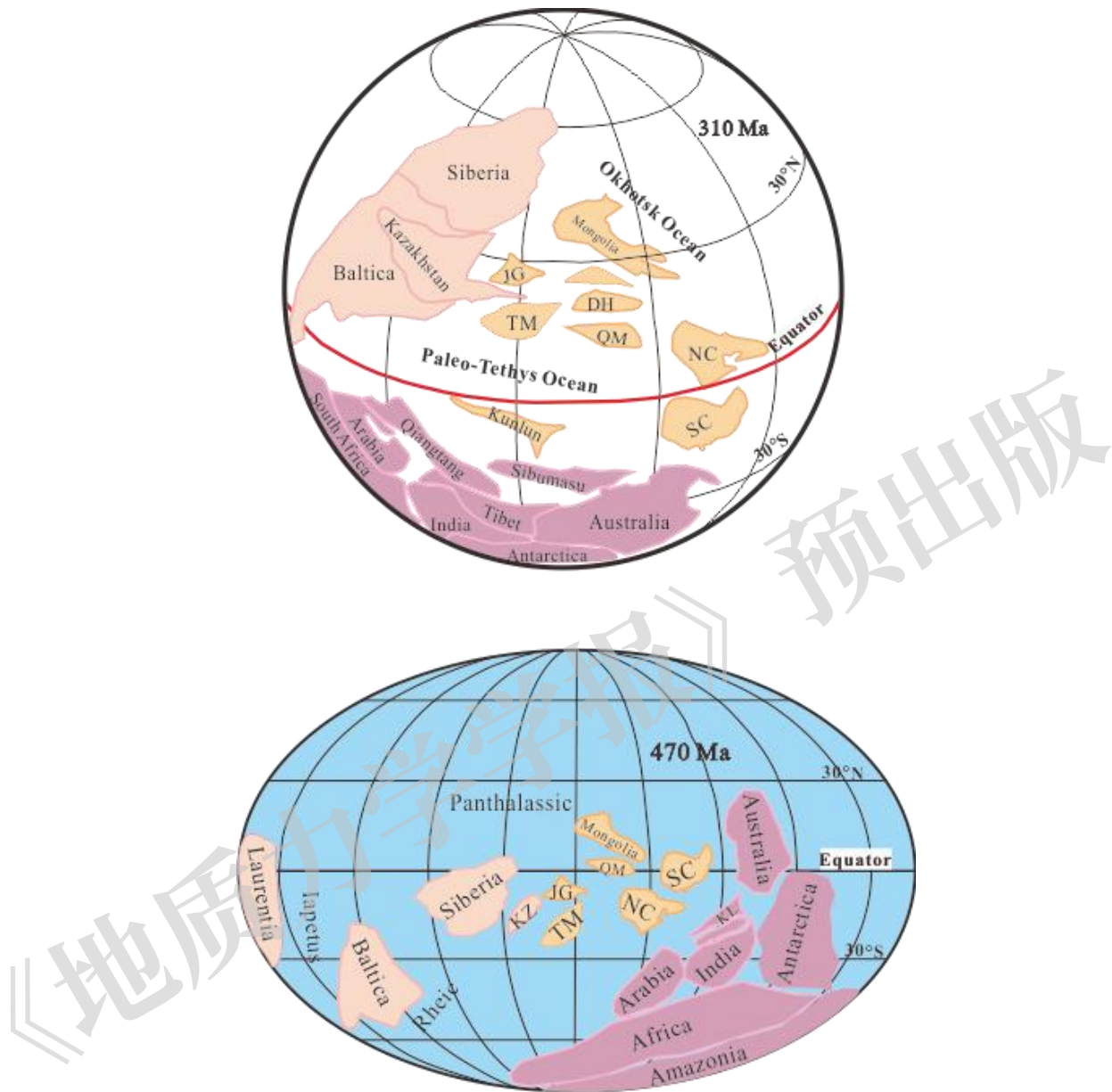


图 5 3.1 亿年前和 4.7 亿年前新疆地区各大地块及邻区的古地理重建图（塔里木（TM）、华北（NC）和华南（SC）以及昆仑（KL）、准噶尔（JG）、柴达木（QM）、敦煌（DH）、卡萨克斯坦（KZ）等地块相对于冈瓦纳在约 4.7 亿年前和 3.1 亿年前的古地理重建，所有重建均以当前地理坐标表示。古纬度位置基于文中的古地磁数据，以及依据孙丽莎，黄宝春（2009），李永安等(1999)，黄宝春等(2000)，李燕平等(1987)，Bazhenov et al. (2012)，Wang et al. (2023)，Huang et al. (2019)，Xu et al. (2019)，Torsvik et al. (2012) 的研究）

Fig. 4 Map of the positions of major geological blocks in Xinjiang during the Early Paleozoic Era (Paleogeographic reconstructions relative to Gondwana at approximately 470 million years ago and 310 million years ago for the Tarim (TM), North China (NC), South China (SC), Kunlun (KL), Junggar (JG), Qaidam (QM), Kazakhstan(KZ) and Dunhuang(DH) blocks, with all reconstructions presented in current geographic coordinates. The paleolatitude positions are based on paleomagnetic data from the text, as well as studies by Sun Lisha and Huang Baocun (2009), Li Yong'an et al. (1999), Huang Baocun et al. (2000), Li Yanping et al. (1987), Bazhenov et al. (2012), Wang et al. (2023), Huang et al. (2019), Xu et al. (2019), and Torsvik et al. (2012)

海相沉积型锰矿的形成提供有利条件。

因此, 本文认为昆仑—阿尔金—天山—准噶尔地区古生代锰矿成矿作用可能与地磁场反转期赤道附近地幔引张上涌过程存在一定关联, 其成矿过程可置于地球旋转体制下地壳、地幔和内地核耦合作用的框架中加以讨论。但需要指出的是, 该认识目前仍属于初步动力学解释, 其成立前提依赖于古地磁极位置、地层时代约束、地磁场极性划分及旋转地球动力学模型参数的可靠性。受区域古地磁数据覆盖程度、测年精度、地磁场极性记录连续性以及部分矿床构造背景解释差异等因素影响, 相关结论仍具有一定不确定性。今后需结合更多高精度古地磁、年代学、沉积学和地球化学资料, 并在其他类似锰矿带中开展对比检验, 以进一步验证和完善该动力学假说。

致谢: 衷心感谢审稿人的意见建议和编辑部的组织。

附加材料: 附表 1-4 由作者提供, 数据真实性由作者负责。

作者贡献声明: 王华青、李朋武负责论文构思、数据分析、研究方法和论文写作; 吴继兵、熊运平、陈家浩参与数据分析和技术手段的实践应用和绘图; 江沙和陈贺起参与数据分析、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。

References

- BAAMAR Ahmed, Ezzoura Errami, Brahim Karaoui, Zakarya Yajoui, John Browning, 2025. Structural parameters of the late Ediacaran dyke swarm in the Saghro Massif (Eastern Anti-Atlas, Morocco): Implications for the depth of magma origin, paleostress reconstruction and emplacement models[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 468: 108470.
- BAZHENOV M. L., Levashova N. M., Degtyarev K. E., Van der Voo R., Abrajievitch A. V., McCausland P. J. A., 2012. Unraveling the early-middle Paleozoic paleogeography of Kazakhstan on the basis of Ordovician and Devonian paleomagnetic results[J]. *Gondwana Research*, 22(3-4), 974-991.
- CAO Yong, Sun Zhiming, Pei Junling, Li Haibing, Xu Wei, Zhang Lei, 2021. Paleomagnetic constraints on the Early Ordovician paleogeographical position of the Qaidam block[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(5): 1448-1458. (in Chinese with English abstract)
- CHA Bin, Zhang Lianchang, Zhang Banglu, Dong Zhiguo, Wang Bin, Xie Zhimin, 2019. Geology Characteristic and Metallogenic Conditions of the Manganese Ore Belt in Maerkansu, Aketao, Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 37(1): 75-84. (in Chinese with English abstract)
- CHEN Denghui, Sui Qinglin, Zhao Xiaojian, Jing Delong, Teng Jiaxin, Gao Yongbao, 2019. Geology, Geochemical Characteristics, and Sedimentary Environment of Mn-bearing Carbonate from the Late Carboniferous Muhu Manganese Deposit in West Kunlun[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 37(3): 477-490. (in Chinese with English abstract)
- CHEN Lu, 2023. Chronology and Tectonic paleomagnetic Study of the Late Paleozoic Jiamuhe and Fengcheng Formation in the Junggar Basin. China University of Geosciences (Beijing), A Dissertation Submitted to China University of Geosciences for Master of Professional Degree[D]. (in Chinese with English abstract)
- CHENG Guoliang, Li Yong'an, Li Suling, Li Qiang, Zhang Hui, 1993. Late Paleozoic paleomagnetism and tectonic implication for Northeast Junggar block, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China[J]. *Seismology and Geology*, (1): 32-44. (in Chinese with English abstract)
- CHENG Xin, Wu Hanning, Guo Qiang, Hou Baoning, Wang Haijun, Diao Zongbao, Huo Feifei, Ji Wenhua, Li Rongshe, Chen Shoujian, Zhao Zhenming, Liu Xiaojie, 2011. Preliminary results from Late Paleozoic Paleomagnetic Studies of the North Qiangtang Block, Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Science in China (Earth Science)*, 41(8):1100-1108. (in Chinese)
- DONG Xuebin, Wang Zhongmin, Tan Chengze, Yang Huixin, Cheng Liren, Zhou Yaoxiu, 1990. New paleomagnetic results from Yadong-Golmud transect and a preliminary study on the model of terranes evolution in Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, No.21: 139-148. (in Chinese with English abstract)
- DONG Xuebin, Wang Zhongmin, Tan Chengze, Yang Huixin, Cheng Liren, Zhou Yaoxiu, 1991. New results of paleomagnetic studies of the Qinghai-Tibet plateau[J]. *Geological Review*, 37(2): 160-164. (in Chinese with English abstract)
- DONG Xuebin, Yang Huixin, Li Pengwu, 1995. The paleomagnetic study of terrane tectonics in geoscience transection from Golmud to Ejinaqi[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 38(Suppl.II): 71-85. (in Chinese with English abstract)
- DONG Zhiguo, Zhang Banglu, Shi Fangping, Zhang Lianchang, Gao Bingyu, Zhang Xin, Peng Zidong and Wang Changle. 2021. Mineralogical and geochemical

characteristics of Motuosala exhalative sedimentary Fe-Mn deposit in the West Tianshan, Xinjiang, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(4): 1099-1121. (in Chinese with English abstract)

FANG Dajun, Jin Guohai, Jiang Liping, Wang Pengyan, Wang Zhaoliang, 1996. Paleozoic paleomagnetic results and the tectonic significance of Tarim plate[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 39(4): 522-532. (in Chinese with English abstract)

GAO Yongbao, Leon Bagas, Yuegao Liu, Wenyan Li, Keiko Hattori, Dominic Papineau, Delong Jing, Denghui Chen, Jiaxin Teng, Yongkang He, Min Zhao, Long Zhang, Zhe Zhao, 2024. Discovery of Late Carboniferous high-grade carbonate-hosted manganese mineralization in the Maerkansu area of the Western Kunlun Orogen, Northwest China[J]. *Gondwana Research*, 133: 129-147.

GAO Yongbao, Teng Jiaxin, Li Wenyan, Chen Denghui, Sui Qinglin, Jing Delong, He Yongkang, Bai Jianke, 2018. Eology, geochemistry and ore genesis of the Aertuokanashi manganese deposit, western Kunlun, Xinjiang, Northwest China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(8): 2341-2358. (in Chinese with English abstract)

GESHI N., Browning J. and Kusumoto S., 2020. Magmatic overpressures, volatile exsolution and potential explosivity of fissure eruptions inferred via dike aspect ratios [J]. *Scientific Report*: 109406.

GRADSTEIN F. M., 2026. Introduction: The geologic time scale[M]. In: Felix M. Gradstein, Jan Zalasiewicz, Mark Williams, Anna Wałkowska (Editors), *Fossils and Earth Time*. Elsevier, xxiii-xxxii.

GRADSTEIN F. M., J. G. Ogg, M. Schmitz and G. Ogg, 2012. *The Geologic Time Scale 2012*[DB]. Elsevier, 2012.

GRADSTEIN F. M., Ogg J. G. and Smith A. G., 2004. *A Geologic Time Scale 2004*[M]. Cambridge, UK, Cambridge University Press, pp.589.

GRAPPONE J. Michael, Thom Chaffee, Yukio Isozaki, Heikki Bauert, Joseph L. Kirschvink, 2017. Investigating the duration and termination of the Early Paleozoic Moyero Reversed Polarity Superchron: Middle Ordovician paleomagnetism from Estonia[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 485: 673-686.

GU Zhongpin, Yan Zhen, Fu Changlei, Huang Hao, Chen Hui, Wu Hong, Deng Qiuping, 2026. Formation age and sedimentary environment of the Maerkanque Kusaishan Formation in the Orto Karneshi manganese mining area, West Kunlun orogenic belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 100(1): 59-71. (in Chinese with English abstract)

GUDEMUNDSSON Agust, 2012. Magma chambers: Formation, local stresses, excess pressures, and compartments[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 237-238: 19-41.

GUREVITCH E., Westphal M., Daragan-Suchov J., et al. 1995. Paleomagnetism and magnetostratigraphy of the traps from western Taimyr (northern Siberia) and the Permo-Triassic crisis[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 136(3-4), 461-473.

HUANG Baochun, John D.A. Piper, Lisha Sun, Qian Zhao, 2019. New paleomagnetic results for Ordovician and Silurian rocks of the Tarim Block, Northwest China and their paleogeographic implications[J]. *Tectonophysics*, 755: 91-108.

HUANG Baochun, Wang Yongcheng, Zhu Rixiang, Zhang Fuqin, 2002. Paleomagnetic Study of Early Paleozoic Volcanic Rocks in the Beishan Area of Gansu: Preliminary Study on the Paleozoic Kinematic Processes of the Beishan Terrane[J]. *Science Bulletin*, 47(16):1265-1270. (in Chinese)

HUANG Baochun, Zhurixiang, Y. Otofui, Yang Zhenyu, 2000. A Discussion on the paleogeographic position of major Chinese blocks including North China in the Early Paleozoic[J]. *Bulletin of Science*, 45(4): 337-345. (in Chinese)

HUANG Jichun, Zhang Kexin, Zhu Yanming, Bai Yongshan, 1999. Paleomagnetic evidence for Hercynian-Indosinian tectonopaleogeographical evolution in eastern Kunlun orogenic zone[J]. *Earth Science - Journal of China University of Geosciences*, 24(2):47-52. (in Chinese with English abstract)

JI Wenhua, Chen Shoujian, Li Rongshe, He Shiping, Zhao Zhenming, Pan Xiaoping, 2018. The origin of Carboniferous-Permian magmatic rocks in Oytage area, West Kunlun: Back-arc basin?[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34, 2393-2409. (in Chinese with English abstract)

KRAVCHINSKY V. A., Konstantinov K. M., Courtillot V., et al., 2002. Palaeomagnetism of east Siberian traps and kimberlites: two new poles and palaeogeographic reconstructions at about 360 and 250 Ma[J]. *Geophysical Journal International*, 148, 133.

LAHIRI Sivaji, Sandeep Bhatt, Manish A. Mamtani, 2019. The relation between differential stress, driving pressure ratio, tensile strength and reservoir failure in a magmatic system-Towards eruption forecasting[J]. *Journal of Structural Geology*, 124: 23-34.

LI Kang, Xie Yueqiao, Wu Haicai, He Fubao, Deng Qiuping, 2018. Geological characteristics and genesis of manganese deposits in the Jigen area of Wuqia County, Xinjiang[J]. *West-China Exploration Engineering*, (11):153-155. (in Chinese)

LI Pengwu, 2025. The physical mechanism of the formation and reversal of the geomagnetic field: The rotational geodynamics [M]. Beijing, Geological Publishing House, pp.262.

LI Pengwu, Gao Rui, Guan Ye, Li Qiusheng, 2006. Paleomagnetic constraints on the final closure time of Solonker-Linxi suture[J]. *Journal of Jilin University (Earth*

Science Edition), 36(5), 744-758. (in Chinese with English abstract)

LI Pengwu, Gao Rui, Guan Ye, Li Qiusheng, 2009. Paleomagnetic Constraints on the Closure Time of Paleo-Tethys: Implications for the Tectonic Setting of Formation of Triassic Songpan-Ganzi Flysch Complex[J]. Acta Geoscientica Sinica, 30(1): 39-50. (in Chinese with English abstract)

LI Wenjun, Peng Zidong, Dong Zhiguo, Zhang Banglu, Gao Bingyu, Zhang Lianchang, Zhu Mingtian, Leslie J. Robbins, Kurt O. Konhauser, 2022. Direct Re-Os dating of manganese carbonate ores and implications for the formation of the Ortokarnash manganese deposit, Northwest China[J]. Economic Geology, 117(1), 237-252. (in Chinese with English abstract)

LI Yanping, M. McWilliams, Tan Chengze, 1987. The preliminary paleomagnetic result of the lower Ordovician from the North Qilian Mts. Terrance[J]. Seismology and Geology, 9(2): 26. (in Chinese with English abstract)

LI Yong'an, Sun Dongjiang, Zheng Jie, 1999. Paleomagnetic study and tectonic evolution of Xinjiang and its neighboring regions[J]. Xinjiang Geology, 17(3): 2-44 (in Chinese with English abstract)

LIND E.N., Kropotov S.V., Czamanske G. K., et al., 1994. Paleomagnetism of the Siberian flood basalts of the Noril'sk area: a constraints on eruption duration[J]. International Geology Review, 36, 1139-1150.

LIU Xiaoyan, Li Xianyang, 2023. Exploration indicators and ore-forming model of Tuowuqieke manganese deposit in Akto County, Xinjiang[J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 46(2): 70-71. (in Chinese)

LIU Yongle, Zhao Jingchun, Li Wen, Zhang Aikui, Xia Youhe, Sun Feifei, Zhang Jianping, Zhang Lianchang, 2022. Geological characteristics and discussion on formation age of Santonggoubai sedimentary manganese deposit in eastern Kunlun of Qinghai[J]. Chinese Journal of Geology, 58(2): 474-488. (in Chinese with English abstract)

OPDYKE N. D. and Channell J. E. T., 1996. Magnetic stratigraphy[M]. International Geophysical Series, 64, pp.1-346. Academic Press, New York.

OPDYKE N. D., Roberts J., Claoue-Long J., Irving E., Jones, P.J., 2000. Base of the Kiaman: its definition and global stratigraphic significance[J]. Geological Society of America Bulletin, 112: 1315-1341.

QIN Ying, Wen Guanguo, Li Daiping, 2014. Discovery and Significance of High Quality and Rich Manganese Ore in Akto Area, West Kunlun Mountains, Xinjiang[J]. West-China Exploration Engineering, 26(8): 112-115. (in Chinese)

QUAN Xiaoqin, Zhang Wenjing, Chang Hao, et al., 2024. Discovery, Geological Characteristics and Genesis of Sedimentary Metamorphic Manganese Carbonate Deposit in Muhatayi, Western Junggar, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 57(4): 170-181. (in Chinese with English abstract)

RODIONOV V. P., Dekkers M. J., Khramov A. N., et al. 2003. Paleomagnetism and cyclostratigraphy of the middle Ordovician krivolutsky suite, krivayaluka section, Southern Siberian platform: record of nonsynchronous NRM-components or a nonaxial geomagnetic field? [J]. Studia Geophysica et Geodaetica, 47, 255-274.

SONG Peiping, Lin Ding, Zhenyu Li, Peter C. Lippert, Yahui Yue, 2017. An early bird from Gondwana: Paleomagnetism of Lower Permian lavas from northern Qiangtang (Tibet) and the geography of the Paleo-Tethys[J]. Earth and Planetary Science Letters, 475: 119-133.

SUN Lisha, Huang Baochun, 2009. Nw paleomagnetic result for Ordovician rocks from the Tarim Block, northwest China and its tectonic implications[J]. Chinese Journal of Geophysics, 52(7): 1836-1848. (in Chinese with English abstract)

TIAN Yazhou, Yang Jingsui, Wang Yunpeng, et al, 2015. Geochronological and geochemical study of the Muhatayi ophiolitic mélange in West Junggar, Xinjiang, and its tectonic implication[J]. Geology in China, 42(2): 379-395. (in Chinese with English abstract)

TORSVIK T. H., R. Van der Voo, U. Preeden, C. Mac Niocaill, B. Steinberger, P.V. Doubrovine, D.J.J. van Hinsbergen, M. Domeier, C. Gaina, E. Tohver, J.G. Meert, P.J.A. McCausland, L.R.M. Cocks, 2012. Phanerozoic polar wander, paleogeography and dynamics[J]. Earth Science Review, 114: 325-368.

WANG Bo, Yan Chen, Sheng Zhan, Liangshu Shu, Michel Faure, Dominique Cluzel, Jacques Charvet, Sébastien Laurent-Charvet, 2007. Primary Carboniferous and Permian paleomagnetic results from the Yili Block (NW China) and their implications on the geodynamic evolution of Chinese Tianshan Belt[J]. Earth and Planetary Science Letters, 263(3-4): 288-308.

WANG Kai, Liu Bingcai, Wang Yi, Xu Honghe, 2023. A palynoflora of southern Xinjiang, China, and the proximity of the Tarim Plate to western Gondwana during the Llandovery (Silurian)[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 255: 105769.

WANG Pengfei, Liu Yanqun, Yang Hang, Liu Hu, Shu Min, 2024. A research on geological characteristics and metallogenic laws of manganese mines in Jigen area, Wujia County, Xinjiang [J]. China Manganese Industry, 42(1): 11-14. (in Chinese with English abstract)

WEI Bitian, Cheng Xin, Jiang Nan, Zhang Dongmeng, Xing Longyun, Zhou Yanan, Li Shihu, Deng Chenglong, Wu Hanning, 2025. Progress in paleomagnetism of the Qiangtang block since Permian to Triassic and its constraints on the evolution of the Tethyan Ocean[J]. Advances in Earth Science, 40(9): 925-944. (in Chinese with

English abstract)

WESTPHAL M., Gurevitch E., Samsonov B. V., et al., 1998. Magnetostratigraphy of the lower Triassic volcanics from deep drill SG6 in western Siberia: evidence for long-lasting Permo-Triassic volcanic activity[J]. *Geophysical Journal International*, 134(1), 254-266.

XU Wei, Sun Zhiming, G.R. Shi, Jincai Lu, Long Yu, Yazhuo Niu, Yue Zhao, Xiaofeng Han, Baowen Wang, Bo Song, Yong Cao, 2019. First report of coupled Early Permian paleomagnetic and geochronologic data from the Dunhuang block (NW China), and implications for the tectonic evolution of the Paleo-Asian Ocean[J]. *Gondwana Research*, 67: 46-63.

XU Wei, Sun Zhiming, Li Haibing, Pei Junling, Pan Jiawei, Si Jialiang, Zhao Yue, Ren Xiaojuan. 2013. New Permian paleomagnetic data from the Gudong Mountain area in the Tarim Block and their tectonic implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 32(10): 1566-1574. (in Chinese)

YANG Jingsui, Shi Rendeng, Wu Cailai, Su Dechen, Chen Songyong, Wang Xibin, Wooden Joseph, 2008. Petrology and SHRIMP age of the Hongliugou ophiolite at Milan, North Altyn, at the northern margin of the Tibetan plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1567-1584. (in Chinese with English abstract)

YANG Xingfeng, Cheng Xin, Zhou Yanan, Ma Lun, Zhang Xiaodong, Yan Zhaosheng, Peng Ximing, Su Hailun, Wu Hanning, 2016. Paleomagnetic results from Late Carboniferous to Early Permian rocks in the northern Qiangtang terrane, Tibet, China, and their tectonic implications[J]. *Science China Earth Sciences*, 46(10): 1381-1391. (in Chinese with English abstract)

YANG Zijiang, 2012. Early Paleozoic tectonic evolution in Hongliugou, Altyn, Xinjiang[D]. Chinese Academy of Geological Sciences, 1-105. (in Chinese with English abstract)

YIN Hua, Bao Liangliang, 2024. An exploration of geological and geochemical characteristics and source indications of Jigen manganese deposit in southwest Tianshan, Xinjiang[J]. *China Manganese Industry*, 42(1): 25-30. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Banglu, Lv Zhicheng, Yu Xiaofei, Li Yongsheng, Zhen Shimin, 2023. Age determination and geological significance of manganese-bearing rock series in the Markansu metallogenic zone, West Kunlun mountains[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 53(1): 120-139. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Banglu, Zhang Lianchang, Feng Jing, Xu Shiqi, Feng Changrong, Hao Yanhai, Zheng Mengtian, Peng Zidong, Dong Zhiguo, 2018. Genesis of The Large-scale Orto Karnash Manganese Carbonate Deposit in the Malkansu District, Western Kunlun: Evidence from Geological Features[J]. *Geological Review*, 64(2): 361-377. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Chenming, Yu Miao, Dai Wei, Yang Mu, Liao Fangzhou, Zhang Binwu, 2023. Constraints of metallogenic ages of Santonggou manganese deposit in east Kunlun, China: Detrital zircon U-Pb and black shale Re-Os chronology[J]. *Journal of Earth Science and Environment*, 45(3), 622-642. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Dongyang, Zhaochong Zhang, M. Santosh, Zhiguo Cheng, Huang He, Jianli Kang, 2013. Perovskite and baddeleyite from kimberlitic intrusions in the Tarim large igneous province signal the onset of an end-Carboniferous mantle plume[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 361: 238-248.

ZHANG Jiahui, Xin Cheng, Zhongshan Shen, Daniel Pastor-Galán, Bitian Wei, Longyun Xing, Dongmeng Zhang, Nan Jiang, Mengting Zhong, Shuqi Lan, Muhammad Rizwan, Chenglong Deng and Hanning Wu, 2026. Late Carboniferous Paleomagnetism From North Qiangtang Block Reveals a Multibranched Paleo-Tethys Ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 53: e2026GL123015.

ZHANG Zhenfu, Chao Wendi, Zhang Lianchang, Li Wen, Dong Zhiguo, Li Wenjun, Niu Sida, Yang Yufan. 2026. The geological characteristics of marine sedimentary manganese deposits associated with ophiolitic mélange: A case study of the Kuoshibulake manganese deposit in the Altun orogenic belt[J]. *Chinese Journal of Geology*, 61(2): 500-510. (in Chinese with English abstract)

ZUO Guochao, Feng Yongzhong, Liu Chunyan, Chen Yangyan, Zhang Dehua, 1993. Paleomagnetism feature Cambrian-Ordovician period in Beishan area of Neimongol[J]. *Mineral Resources and Geology*, 7(5), 373-378. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

曹勇, 孙知明, 裴军令, 李海兵, 许伟, 张蕾, 2021. 柴达木地块早奥陶世古地理位置的古地磁学约束[J]. *地质学报*, 95(5): 1448-1458. (缺英文文献)

查斌, 张连昌, 张帮禄, 董志国, 王斌, 谢志敏, 2019. 新疆阿克陶玛尔坎苏锰成矿带地质特征及成矿条件分析[J]. *新疆地质*, 37(1): 75-84. (缺英文文献)

陈登辉, 隋清霖, 赵晓健, 荆德龙, 滕家欣, 高永宝, 2019. 西昆仑穆呼锰矿晚石炭世含锰碳酸盐岩地质地球化学特征及其沉积环境[J]. *沉积学报*, 37(3): 477-490. (缺英文文献)

陈璐, 2023. 准噶尔盆地晚古生代佳木河组与风城组年代学与构造古地磁学研究[D]. 中国地质大学(北京), 硕士论文.

程国良, 李永安, 李素玲, 李强, 张慧, 1993. 新疆准噶尔地块东北部晚古生代古地磁研究及构造含义[J]. *地震地质*, (1): 32-44.

程鑫,吴汉宁,郭强,侯宝宁,夏玲燕,王海军,刁宗宝,霍斐斐,计文化,李荣社,陈守建,赵振明,刘晓吉,2011. 青藏高原羌北地块晚古生代古地磁研究的初步结果[J]. 中国科学:地球科学,41(8): 1100-1108. (缺英文文献)

董学斌,王忠民,谭承泽,杨惠心,程立人,周姚秀,1991. 青藏高原古地磁研究新结果[J]. 地质论评,37(2): 160-164.

董学斌,王忠民,谭承泽,杨惠心,程立人,周姚秀,1990. 亚东-格尔木地质断面古地磁新数据与青藏高原地体演化模式的初步研究[J]. 中国地质科学院院报,第21号,139-148.

董学斌,杨惠心,李鹏武,1995. 格尔木-额济纳旗地质断面地体构造的古地磁学研究[J]. 地球物理学报,1995,38(S2): 71-85. (缺英文文献)

董志国,张帮禄,石方平,张连昌,高炳宇,张新,彭自栋,王长乐,2021. 新疆西天山莫托萨拉热水沉积型铁锰矿床矿物学与地球化学特征[J]. 岩石学报,37(4): 1099-1121.

方大钧,金国海,姜莉萍,王朋岩,王兆梁,1996. 塔里木盆地古生代古地磁结果及其构造地质意义[J]. 地球物理学报,39(4): 522-532.

高永宝,滕家欣,李文渊,陈登辉,隋清霖,荆德龙,贺永康,白建科,2018. 新疆西昆仑奥尔托喀纳什锰矿地质、地球化学及成因[J]. 岩石学报,34(8): 2341-2358.

谷忠品,闫臻,付长垒,黄浩,陈慧,伍洪,邓秋平,2026. 西昆仑奥尔托喀纳什锰矿区玛尔坎雀库塞山组形成时代与构造环境[J]. 地质学报,100(1): 59-71.

黄宝春,王永成,朱日祥,张福勤,2002. 甘肃北山地区早古生代火山岩的古地磁学研究:北山地体早古生代运动学过程初探[J]. 科学通报,47(16): 1265-1270.

黄宝春,朱日祥, Y. Otofuj, 杨振宇,2000. 华北等中国主要地块早古生代早期古地理位置探讨[J]. 科学通报,45(4): 337-345.

黄继春,张克信,朱艳明,拜永山,1999. 东昆仑造山带海西-印支期构造古地理演化的古地磁证据[J]. 地球科学,(2): 47-52.

计文化,陈守建,李荣社,何世平,赵振明,潘小萍,2018. 西昆仑奥依塔格石炭-二叠纪岩浆岩:弧后盆地的产物?[J]. 岩石学报,34(8), 2393-2409.

李康,谢月桥,吴海才,何福保,邓秋平,2018. 新疆乌恰县吉根一带锰矿地质特征及成因探讨[J]. 西部探矿工程,(11): 153-155.

李朋武,高锐,管焯,李秋生,2006. 内蒙古中部索伦林西缝合带封闭时代的古地磁分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版),36(5), 744-758.

李朋武,2025. 地磁场形成和反转的物理机制:地球旋转动力学[M]. 北京,地质出版社, pp. 62.

李朋武,高锐,管焯,李秋生,2009. 古特提斯洋的闭合时代的古地磁分析:松潘复理石杂岩形成的构造背景[J]. 地球学报,30(1): 39-50.

李燕平, M. 麦克威廉斯,谭承泽,1987. 北祁连山地壳早奥陶世古地磁初步结果[J]. 地震地质,9(2): 26.

李永安,孙东江,郑洁,1999. 新疆及周边古地磁研究与构造演化. 新疆地质[J], 17(3): 2-44.

刘晓燕,李成阳,2023. 新疆阿克陶县托吾恰克锰矿找矿标志及成矿模式探讨[J]. 新疆有色金属,46(2): 70-71.

刘永乐,赵静纯,李文,等,2023. 青海东昆仑三沟北沉积锰矿地质特征及形成时代探讨[J]. 地质科学,58(2): 474-488.

全孝勤,张文璟,常昊,仇喜超,李尚启,寇昭娟,雒鹏鹏,彭如盼,2024. 新疆西准噶尔木哈塔依沉积变质型碳酸锰矿的发现、地质特征和成因研究[J]. 西北地质,57(4): 170-181.

孙丽莎,黄宝春,2009. 塔里木地块奥陶纪古地磁新结果及其构造意义[J]. 地球物理学报,52(7): 1836-1848.

覃英,温官国,李代平,2014. 新疆西昆仑阿克陶地区优质富锰矿的发现及意义[J]. 西部探矿工程,26(8): 112-115.

田亚洲,杨经绥,王云鹏,等,2015. 新疆西准噶尔木哈塔依蛇绿混杂岩年代学和地球化学研究及构造意义[J]. 中国地质,42(2): 379-395.

王鹏飞,刘燕群,杨航,刘虎,舒敏,2024. 新疆乌恰县吉根一带锰矿地质特征及成矿规律研究[J]. 中国锰业,42(1): 11-14.

卫弼天,程鑫,姜南,张冬孟,幸龙云,周亚楠,李仕虎,邓成龙,吴汉宁,2025. 羌塘地块二叠纪-三叠纪古地磁学研究进展及其对特提斯洋演化的约束[J]. 地球科学进展,40(9): 925-944.

许伟,2019. 北山南部晚古生代构造格局与演化:来自古地磁与岩浆作用的制约[D]. 西安,长安大学,博士学位论文, pp. 333.

杨经绥,史仁灯,吴才来,苏德辰,陈松永,王希斌,Wooden Joseph,2008. 北阿尔金地区米兰红柳沟蛇绿岩的岩石学特征和 SHRIMP 定年[J]. 岩石学报,24(7): 1567-1584.

杨兴峰,程鑫,周亚楠,马轮,张晓东,闫昭圣,彭喜明,苏海伦,吴汉宁,2016. 羌北地块晚石炭-早二叠世古地磁结果及构造意义[J]. 中国科学,地球科学,46(10): 1381-1391.

杨子江,2012. 新疆阿尔金红柳沟一带早古生代地质构造演化研究[D]. 博士学位论文,中国地质科学院,1-105.

银花,包亮亮,2024. 新疆西南天山吉根锰矿床地质、地球化学特征及物源指示的探讨[J]. 中国锰业,42(1): 25-30.

张帮禄,吕志成,于晓飞,李永胜,甄世民,2023. 西昆仑玛尔坎苏锰矿带含锰岩系时代厘定及地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版),53(1), 120-139.

张帮禄,张连昌,冯京,徐仕琪,冯昌荣,郝延海,郑梦天,彭自栋,董志国,2018. 西昆仑玛尔坎苏地区奥尔托喀纳什大型碳酸锰矿床地质特征及成因探讨[J].

地质论评, 64(2): 361-377.

张琛明, 于淼, 代威, 杨牧, 廖方周, 张斌武, 2023. 东昆仑三通沟锰矿成矿年代约束: 碎屑锆石 U-Pb 和黑色页岩 Re-Os 年代学[J]. 地球科学与环境学报, 45(3), 622-642.

张振福, 晁文迪, 张连昌, 李文, 董志国, 李文君, 牛斯达, 杨鱼帆, 2026. 产于蛇绿混杂岩带中的海相沉积型锰矿地质特征: 以阿尔金造山带阔什布拉克锰矿为例[J]. 地质科学, 61(2), 500-510.

左国朝, 冯永忠, 刘春燕, 陈养炎, 张德华, 1993. 内蒙古北山地区寒武-奥陶纪古地磁特征[J]. 矿产与地质, (5): 373-378.

《地质力学学报》预出版