

地质学报
Acta Geologica Sinica
ISSN 0001-5717, CN 11-1951/P

《地质学报》网络首发论文

题目: 地球表层环境演化与石墨矿形成:以华北克拉通中元古界为例
作者: 沈卫兵, 姜福杰, 胡涛, 陈迪, 郑晓薇, 肖霄, 王孟阳
DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2025304
收稿日期: 2025-07-18
网络首发日期: 2025-09-29
引用格式: 沈卫兵, 姜福杰, 胡涛, 陈迪, 郑晓薇, 肖霄, 王孟阳. 地球表层环境演化与石墨矿形成:以华北克拉通中元古界为例[J/OL]. 地质学报.
<https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2025304>



网络首发:在编辑部工作流程中,稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定,且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件,可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定;学术研究成果具有创新性、科学性和先进性,符合编辑部对刊文的录用要求,不存在学术不端行为及其他侵权行为;稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准,正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性,录用定稿一经发布,不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容,只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认:纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约,在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版,以单篇或整期出版形式,在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z),所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

地球表层环境演化与石墨矿形成： 以华北克拉通中元古界为例

沈卫兵^{1,2)}, 姜福杰¹⁾, 胡涛¹⁾, 陈迪¹⁾, 郑晓薇¹⁾, 肖霄¹⁾, 王孟阳¹⁾

1) 中国石油大学(北京), 地球科学学院, 北京, 102249;

2) 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037

内容提要:华北克拉通中元古代石墨矿成矿过程研究较少, 制约了中元古界石墨矿找矿突破。基于前人研究成果, 从地球表层环境演化的角度, 对华北克拉通中元古界石墨矿成矿条件进行剖析, 分析石墨矿成矿主控因素, 探讨石墨矿有利分布区。结果表明: ① 华北克拉通中元古代持续拉伸裂解, 形成了贺兰、熊耳、燕辽、扎尔泰-白云鄂博裂谷系, 为石墨矿富碳质原岩的沉积提供了广阔的充填空间; ② 中元古代大气氧化/增氧事件伴生的海洋生物种属革新、生物生产力勃发, 为华北克拉通有机碳的大量埋藏与石墨矿富碳质原岩的沉积提供了充足的物质基础; ③ 中—新元古代裂谷型区域动力热流形成的区域变质作用, 提供了足够的温度、压力使得原岩中的碳质活化形成石墨晶体, 进而在多期岩浆热接触变质作用下石墨晶核逐步增大、石墨品质不断提高, 成为规模性矿床。综合研究表明, 华北克拉通中元古代富碳质原岩沉积区与构造高温、高压变质带叠合形成有利成矿区, 有利成矿区中岩浆热接触变质带为高品位品质石墨矿的有利勘探区。

关键词: 石墨矿; 中元古界; 碳质富集; 变质作用; 华北克拉通

近年来, 随着新能源汽车、石墨烯等高科技材料的出现, 世界各国对石墨资源的勘查开发进程及成矿机制研究不断深入(Singh et al., 2011; 马旭东等, 2019; 朱建江等, 2024)。石墨作为碳的一种赋存形式, 广泛分布于地球表层系统, 其形成过程包括两个阶段(李超等, 2015; 颜玲亚等, 2018): ① 碳质沉积富集阶段, 指石墨矿原岩沉积过程中, 碳质在沉积物中的富集积累; ② 碳质变质矿化阶段, 指富碳质沉积经历后期的变质改造, 发生石墨化成矿的过程。已有成果表明, 石墨矿的成矿过程与地球环境演变密切相关(翟明国等, 2013a; Shen Weibing et al., 2025): ① 大陆裂解与冰期结束后海平面上升耦合期基本上都伴生富有机碳岩系的巨厚沉积(Nance et al., 1988; 赵文智等, 2019); ② 富有机碳岩系的沉积时代多与氧化/增氧事件的发生时间契合(陈衍景, 1990; Karhu and Holland, 1996; 朱建江等, 2021); ③ 富有机碳沉积形成时期多出现生物种属

的革新及生物生产力的勃发(Brocks et al., 1999; 张水昌等, 2022); ④ 富有机碳沉积地层变质形成石墨矿与区域构造演化过程中的板块汇聚、升降耦合(Tam et al., 2012; 刘剑, 2017)。

华北克拉通是我国石墨的重要生产基地, 石墨储量在全国占比超过 70%(李超等, 2015; 朱建江等, 2021)。前寒武系作为华北克拉通石墨矿的主要产出层位, 石墨储量占比超过 90%(颜玲亚等, 2018; 朱建江等, 2024)。华北克拉通前寒武系石墨矿记录了地球早期环境演化的系列重大地质事件, 包括超大陆聚合与裂解、生物凋零与繁盛、水圈/大气圈氧化等(Luo Genming et al., 2015; 赵文智等, 2019; 张水昌等, 2022), 表明石墨矿的形成与地球表层环境演化密切相关。比如, 古元古代巨量石墨矿床原岩的沉积时代与大氧化事件(GOE)发生的时间相近, 富碳质原岩的变质成矿期对应华北第二次克拉通化时期(李凯月等, 2018; 朱建江等, 2021)。

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号 U2344211)和中国石油大学(北京)科研基金项目(编号 2462025QNXZ002)联合资助的成果。

收稿日期: 2025-07-18; 改回日期: 2025-07-30; 责任编辑: 潘静。

作者简介: 沈卫兵, 男, 1987 年生。副研究员, 主要从事深时环境演化及深地油气勘探研究。E-mail: swb560316@126.com。

引用本文: 沈卫兵, 姜福杰, 胡涛, 陈迪, 郑晓薇, 肖霄, 王孟阳. 2025. 地球表层环境演化与石墨矿形成: 以华北克拉通中元古界为例. 地质学报, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2025304.

Shen Weibing, Jiang Fujie, Hu Tao, Chen Di, Zheng Xiaowei, Xiao Xiao, Wang Mengyang. 2025. Relationship between graphite deposit formation and Earth surface environment evolution: A case from the Mesoproterozoic strata in the North China Craton. Acta Geologica Sinica.

虽然,华北克拉通前寒武系石墨矿与地球表层环境演化的相关性已逐渐被认可(朱建江等,2024;张连昌等,2025;Shen Weibing et al.,2025),但目前发现的石墨矿及有关石墨成因机制的研究主要集中于太古宙—古元古代,针对中元古代石墨矿成矿过程及其对地球表层环境演化的响应机制缺乏深入研究,制约了中元古界石墨矿找矿突破。

本文在调研华北克拉通中元古界石墨矿研究成果的基础上,从地球表层环境演化的角度出发,对中元古界石墨矿成矿条件进行分析,研究石墨矿成因机制,包括裂谷—气候演化、生物生产力演变、氧化还原状态变化、构造—岩浆变质作用等对石墨矿形成的控制作用,探讨石墨矿有利分布区,以期石墨矿成矿理论研究提供科学支撑,也为我国石墨矿找矿突破提供一定的帮助。

1 华北克拉通中元古界典型石墨矿

华北克拉通发育三大石墨成矿带(图 1;王家昌等,2013;李超等,2015;肖克炎等,2016;颜玲亚等,2018a):北部成矿带、东部成矿带、南部成矿带。相较于太古宙—古元古代广泛分布的石墨矿,中元古

代石墨矿较少,目前发现的典型矿床包括北部成矿带的内蒙古大乌淀石墨矿、东部成矿带的辽宁杜屯石墨矿及南部成矿带的陕西丹凤回头山石墨矿。

大乌淀石墨矿大地构造属于扎尔泰—白云鄂博裂谷系,位于阴山山脉西段,地处内蒙古乌拉特中旗新忽热苏木(图 1)。受扎尔泰—白云鄂博裂谷系构造演化的控制,矿区所在区域经历了“拉张—断陷—挤压—褶皱”的脉动式多旋回构造—变质演化过程,岩浆活动频繁,以海西中、晚期岩浆活动最为强烈,发育花岗岩、花岗闪长岩(彭润民等,2007;翟明国等,2014)。矿区主要出露白云鄂博群尖山组一段与二段,矿体主要赋存于一段含石墨片岩中,矿石矿物主要为石墨、石英、红柱石等。石墨成钢灰色小鳞片状产出,片径为 0.01~0.05 mm。石墨矿固定碳含量间于 3.3%~7.2%(张艳飞和梁帅,2018), $\delta^{13}\text{C}$ 值为-29.4‰~-28.6‰(均值-29.1‰),为有机成因碳质来源(表 1)。扎尔泰—白云鄂博裂谷系发育初期,矿区微生物繁盛,大量的有机质在缺氧还原的滨浅海环境快速沉积且有效保存,形成富碳质原岩;在中元古代晚期低温、低压绿片岩相变质作用的控制下(0.2~0.5 GPa,350~550℃;刘正宏等,2000),

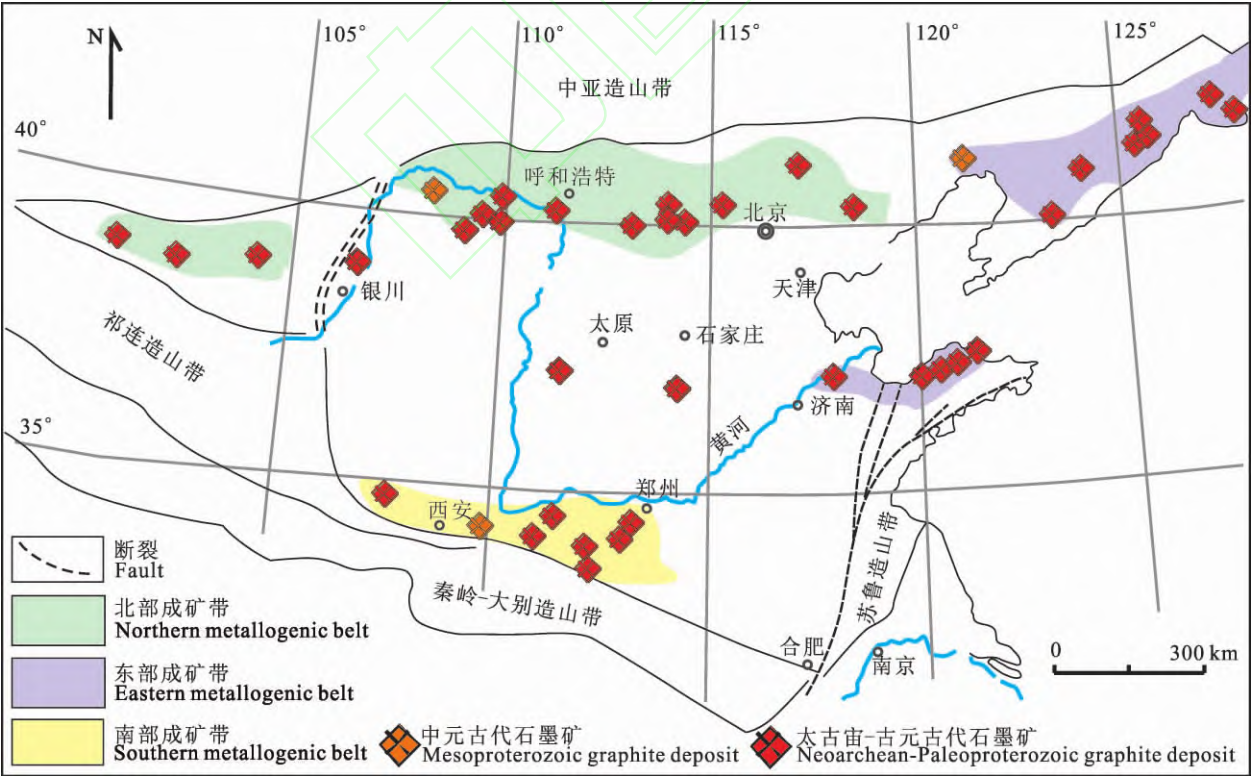


图 1 华北克拉通前寒武系石墨矿分布图(区域地质背景图据王宏宇等,2024 修改;成矿带展布据肖克炎等,2016;颜玲亚等,2018a 修改)

Fig 1 The distribution of Precambrian graphite deposits in the North China Craton (the tectonic setting is from Wang Hongyu et al., 2024; the distribution of graphite metallogenic belts is modified from Xiao Keyan et al., 2016; Yan Lingya et al., 2018a)

富有机质原岩发生矿化形成石墨晶体,而后经历海西期中酸性岩浆的侵入,发生热接触变质,石墨重结晶晶片增大(姜高珍等,2017;张艳飞和梁帅,2018)

辽宁北镇杜屯石墨矿地处燕山构造带东段,间山背斜东翼(图 1)。受医巫间山韧性剪切带影响,矿区发育 NW 向张扭性断层、NNE 向逆掩断层,分别伴生燕山期、喜山期岩浆活动,分布玄武岩、闪长岩等(郝增元等,2016)。矿区出露的地层主要为中元古界长城系高于庄组。高于庄组下段发育长英岩、长英质碎斑岩,中段发育黑云母石墨片岩、红柱石二云母石墨片岩,上段发育千枚岩、千糜岩。赋矿

岩石为高于庄组中段石墨绢云绿泥石英片岩、石墨绢云绿泥石英片岩。石墨晶体呈钢灰色、金属光泽的微细鳞片状,一般为 0.02~0.08 mm。石墨矿固定碳含量为 3.5%~39.7%, $\delta^{13}\text{C}$ 值为-26.0‰~-19.2‰,显示碳质来源主要为沉积岩中的有机质(表 1)。长城系高于庄组石墨矿原岩沉积期,矿区为缺氧还原环境,有机质得以有效保存。在晚前寒武纪低级区域变质作用下,原岩中有机质矿化结晶,进而在加里东运动及后期岩浆作用下,石墨微晶增大,形成区域变质叠加热接触变质的品质石墨矿床(刘敬党等,2017;杨培奇等,2020)。

表 1 华北克拉通中元古界典型石墨矿床的地质、地球化学特征

成矿带	北部成矿带	东部成矿带	南部成矿带
矿床名称	大乌淀石墨矿	杜屯石墨矿	回头山石墨矿
地理位置	内蒙古乌拉特中旗	辽宁锦州	陕西丹凤
矿床类型	区域变质叠加热接触变质型	区域变质叠加热接触变质型	区域变质叠加热接触变质型
矿床规模	特大型	小型	小型
赋矿层位	白云鄂博群尖山组	长城系高于庄组	峡河岩群寨根岩组
含矿岩性	石墨片岩	石墨绢云绿泥石英片岩	石墨片麻岩;石墨大理岩
晶片大小 (mm)	小鳞片(0.01~0.05)	小鳞片(0.02~0.08)	大鳞片(0.2~1.5)
矿石品味(%)	3.3~7.2	3.5~39.7	5.9
碳同位素(‰)	-29.4~-28.6	-26.0~-19.2	/
碳质来源	有机	有机	有机
沉积环境	缺氧还原的滨浅海	缺氧还原浅海-滨海环境	还原浅水环境
原岩沉积年代	中元古代	中元古代	中元古代
变质时代	中—新元古代;海西期	中—新元古代;加里东期	中—新元古代;海西期
变质相	浅变质(绿片岩相)	浅变质(绿片岩相)	浅变质
变质温压条件	350~550℃;0.2~0.5 GPa	/	/
资料来源	姜高珍等,2017;张艳飞和梁帅,2018	刘敬党等,2017;杨培奇等,2020	魏小昭等,2017;柳坤峰等,2023

陕西丹凤回头山石墨矿地处北秦岭复合岛弧杂岩带东部(图 1),南邻商丹大断裂,属秦祁昆地层区祁连-北秦岭地层分区的太白山地层小区。矿区发育早泥盆世岩体(时毓等,2014),出露的前寒武系为古元古界雁岭沟岩组、中元古界寨根岩组,两者均为赋矿地层。中元古界寨根岩组分为 a、b 两个岩性段,其中 b 岩性段发育石墨大理岩及石墨片麻岩,是区内的主要含矿层段。矿石主要为大理岩型、片麻岩型,固定碳含量为 5.9%。石墨呈钢灰色半金属光泽的鳞片产出于方解石、长石颗粒中,一般为 0.2~1.5 mm(表 1)。寨根岩组形成于浅水区域,碳质泥岩、灰岩、白云岩与酸性火山岩共沉积后,经历区域变质作用形成石墨矿,进而在海西期岩浆作用下,矿体局部发生热接触变质作用石墨晶体增大,成为勘探优质大片晶石墨矿的有利部位(魏小昭等,2017;柳坤峰等,2023)。

2 华北克拉通中元古界石墨矿成矿机制

2.1 石墨矿碳质来源

碳质来源是石墨矿成因机制研究的核心问题,目前存在有机成因、无机成因和混合成因三种观点:①有机成因指石墨碳质来源于沉积岩中的有机物;②无机成因指石墨碳质来源于沉积碳酸盐岩或深部岩浆带来的无机含碳成分(以 CO₂ 和 CH₄ 为主);③混合成因指石墨碳质来源为有机成因碳与碳酸盐岩变质过程去气作用或者幔源无机成因碳的混合(Santosh and Wada, 1993;陈衍景,2000)。碳稳定同位素($\delta^{13}\text{C}$)是目前界定石墨中碳质来源最重要、最有效的手段:有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值集中分布于-28‰~-26‰(Schidlowski, 1987),碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围为-2‰~+2‰,地幔岩浆成因碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值约-7‰(Schidlowski, 1987),后两者相较于有机碳

明显富集重碳同位素。

世界上已发现的石墨矿碳质来源以有机成因占主导,华北克拉通目前探明的中元古界石墨矿原岩碳质主要为有机碳源。一方面,中元古界赋矿层多为变碎屑沉积岩,包括白云鄂博群尖山组石墨片岩、高于庄组黑云母石墨片岩、峡河岩群寨根岩组石墨片麻岩等(表 1)。在变质作用下,碎屑原岩中有机质遭受一系列的分解反应结晶形成石墨,在进变质过程中,石墨结晶度逐渐增加,最后形成结晶度较好的石墨矿。另一方面,中元古界石墨矿具有与石油、煤等有机物相近的碳同位素组成($-28\text{‰} \sim -26\text{‰}$;Schidlowski, 1987)。比如,内蒙古大乌淀石墨矿碳同位素组成为 $-29.4\text{‰} \sim -28.6\text{‰}$,辽宁北镇杜屯石墨矿碳同位素组成为 $-26.0\text{‰} \sim -19.2\text{‰}$ (表 1),与华北克拉通、华

南板块、佳木斯地块及世界上其他古老陆块前寒武系石墨矿相似,碳同位素分布区间远离海相碳酸盐岩沉积($-2\text{‰} \sim +2\text{‰}$),具有典型的有机碳源成因特征(图 2)。

2.2 石墨矿富碳质原岩沉积环境

2.2.1 裂谷演化与碳质富集

大陆周期性的拉伸裂解会形成大量的裂谷盆地(Nance et al., 2014),华北克拉通元古宙大陆裂解作用明显。在经历了古元古代中期发生的基底残留洋盆与陆内的拉伸-裂谷事件后,华北克拉通整体在中元古代进入长期的拉伸裂解阶段,依次形成贺兰-熊耳、燕辽、扎尔泰-白云鄂博裂谷盆地与相应的岩浆活动(图 3;翟明国等, 2013;耿元生等, 2020)。贺兰-熊耳裂谷(1.8 Ga)位于华北南缘,产出熊耳群、汝阳群、

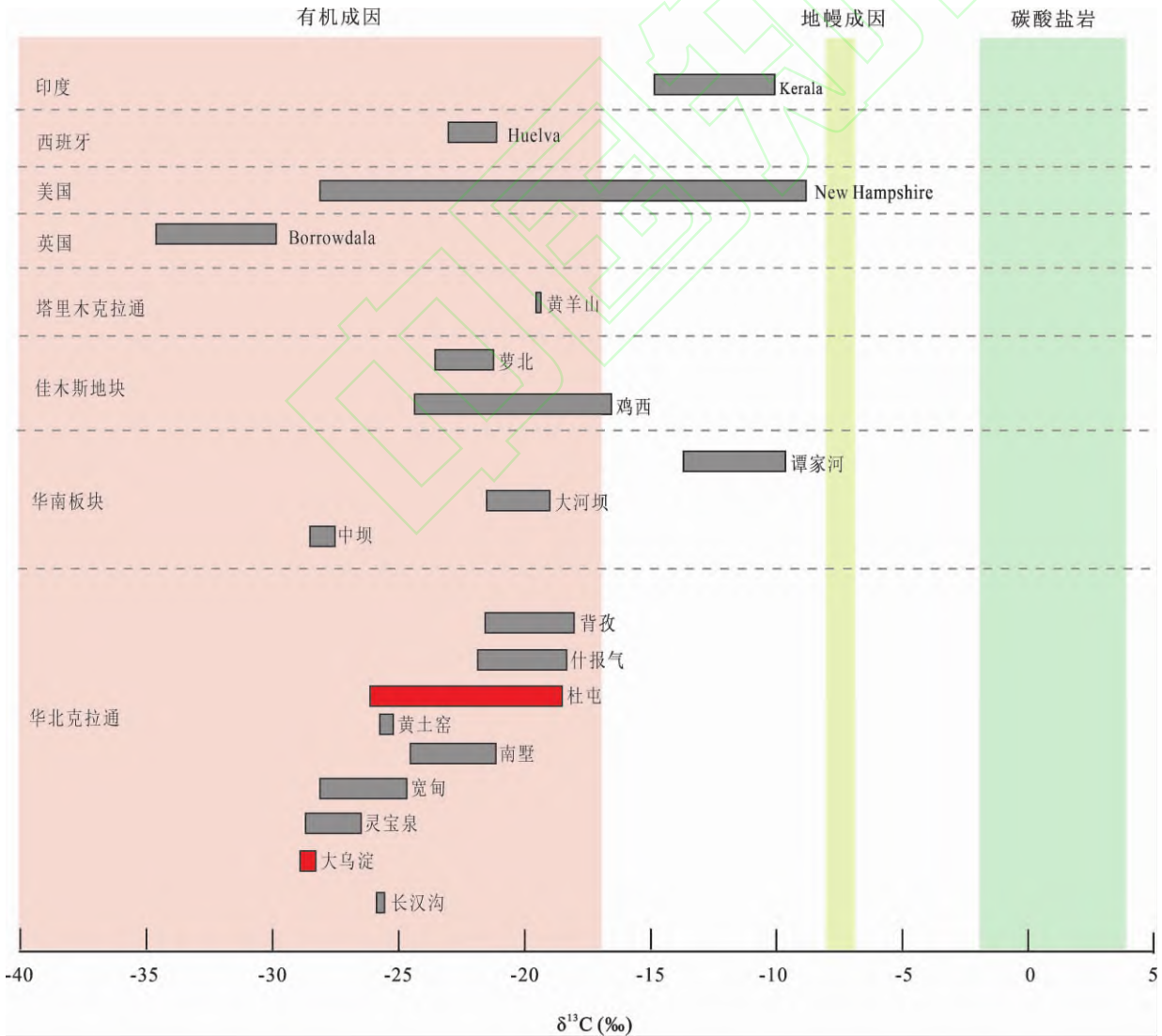


图 2 华北克拉通与其他板块典型石墨矿碳同位素组成(据 Shen Weibing et al., 2025 修改)

Fig. 2 Carbon isotope composition of typical graphite deposits in the North China Craton and other plates (modified from Shen Weibing et al., 2025)

洛峪群及吕梁山地区的小两岭组、汉高山组等,岩浆作用以熊耳群双峰式火山岩为代表(1.8~1.78 Ga);燕辽裂谷(1.67 Ga)分布在燕山—太行山区,发育长城系、蓟县系、青白口系,岩浆岩以广泛发育的基性岩床和二长花岗岩、花岗岩为代表;扎尔泰-白云鄂博裂谷(1.35 Ga)位于华北大缘中部,西段形成狼山群、白云鄂博群和渣尔泰群,东段形成白乃庙群。

华北克拉通裂谷的形成及其伴生的岩浆活动具有全球性意义,是 Columbia 超大陆裂解的响应(翟明国等,2013)。全球性的裂谷演化与岩浆活动控制了前寒武系石墨矿富碳质原岩的形成:① 大陆裂解形成大量的裂谷盆地,为石墨矿原岩沉积提供了广阔的充填空间(图 3);② 岩浆活动伴生的热液施肥作用,促进海洋生物的勃发与石墨矿原岩有机碳的富集(图 4)。比如,燕辽盆地记录的万米地层序列中,发育四套关键的富有机碳层系,包括 1.64 Ga 的串岭沟组砂质泥页岩、1.56 Ga 的高于庄组灰质泥岩、1.45 Ga 的洪水庄组云质-硅质页岩以及 1.40 Ga 的下马岭组硅质泥页岩(图 4;孙枢和王铁冠,2016)。同时,华北克拉通南缘发育了崔庄组黑色页岩(1.64 Ga),其沉积时代与燕辽裂谷带的串岭沟组相当,这套富有机质岩系很可能在鄂尔多斯盆地西缘和南缘的晋陕、

定边及贺兰等裂陷槽内均有分布。此外,华北克拉通贺兰-熊耳裂谷系的崔庄组页岩、扎尔泰-白云鄂博裂谷系的尖山组泥岩、燕辽裂谷系的串岭沟组砂质泥页岩与北澳大利亚麦克阿瑟盆地 Barney Creek 组 HYC 页岩可对比;高于庄组灰质泥岩、洪水庄组云质和硅质页岩、下马岭组硅质泥页岩与澳大利亚 Roper 群黑色页岩的形成时代相近,表明中元古代裂谷作用在世界范围内形成了广泛分布的富有机碳沉积体系(赵文智等,2019)。华北克拉通裂谷系沉积的部分中元古界富碳质地层,经变质作用形成石墨矿,如内蒙古大乌淀石墨矿、辽宁北镇杜屯石墨矿、陕西丹凤回头山石墨矿等(图 1,表 1)。

2.2.2 生物演化与碳质富集

地球最早的生命可追溯到 3.8 Ga 前(Washington, 2000)。中元古代作为地球生命演化的重要阶段,生物演化呈现出显著的两极分化现象——原核微生物空前繁盛的同时,真核生物开始崭露头角。中元古代真核生物以华北克拉通长城系高于庄组(约 1.56 Ga)记录的最早宏体化石为特征(Zhu Shixing et al., 2016),硫细菌和蓝细菌的爆发式增长与疑源类及宏观藻类的兴起共同构成了这一时期的生物特征。根据藻类化石记录显示:北美 Hunting 组保存了最古

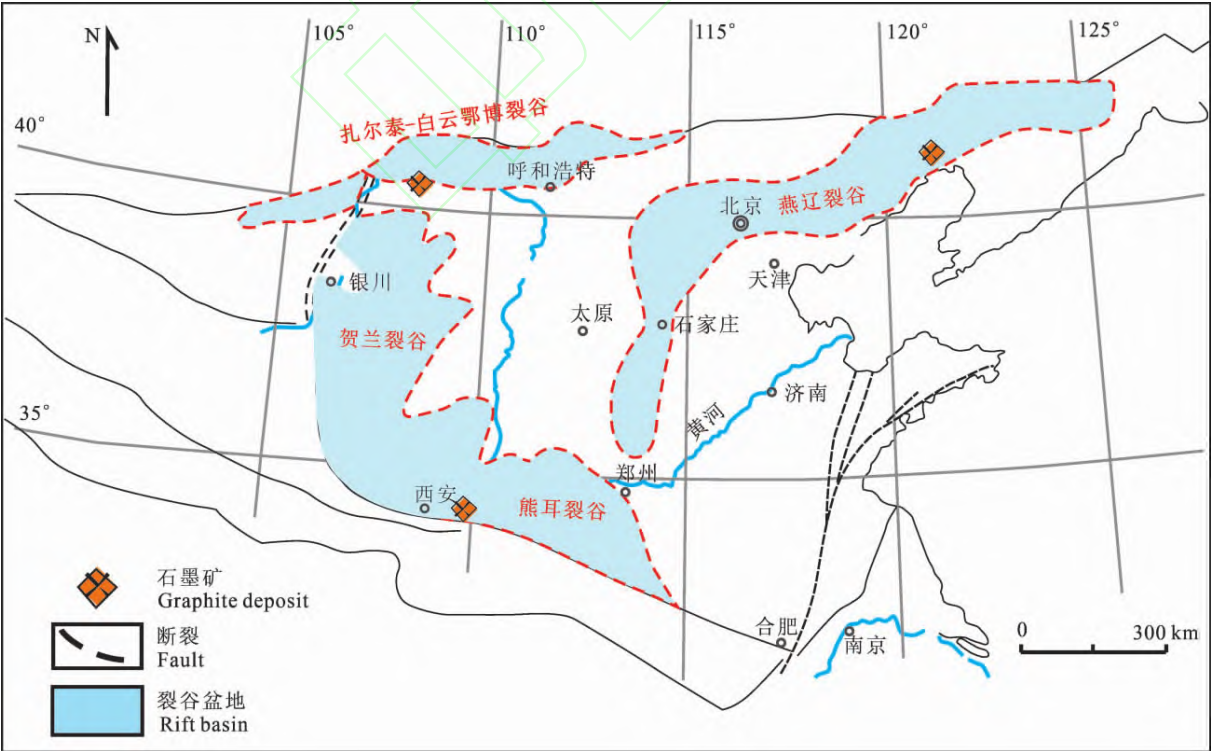


图 3 华北克拉通中元古代裂谷盆地展布与石墨矿分布图(裂谷盆地展布据管树巍等,2017;Deng Yan et al.,2021 修改)
Fig. 3 The graphite deposits in the Mesoproterozoic rift basins of the North China Craton (the rift basin distribution is modified from Guan Shuwei et al.,2017; Deng Yan et al.,2021)

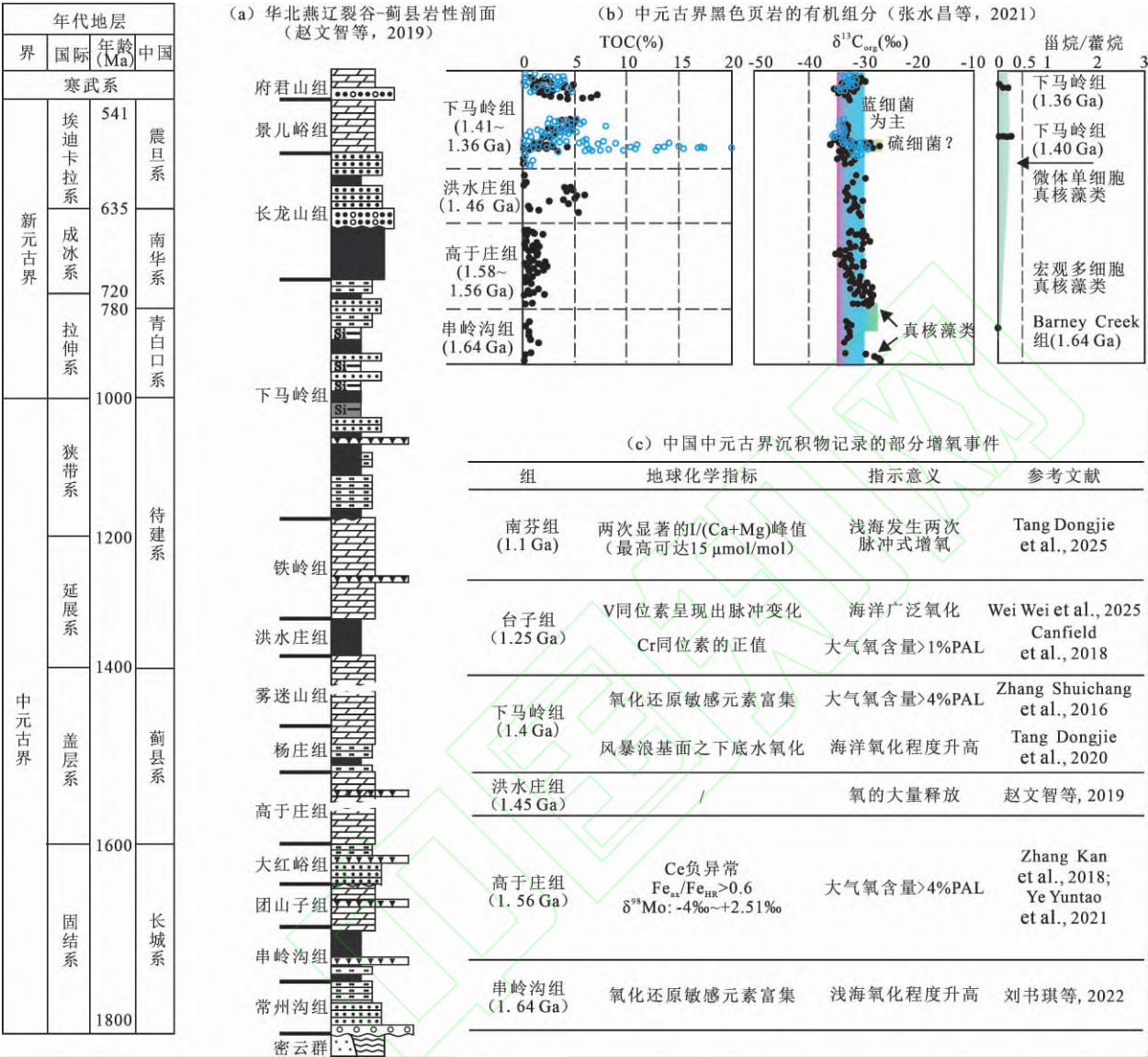


图 4 中国中元古代裂谷盆地典型富碳质黑色页岩及其记录的生物演化及氧化/增氧事件
(a,据赵文智等,2019 修改;b,据张水昌等, 2021 修改)

Fig. 4 Typical carbonaceous black shales in the Mesoproterozoic rift basin in China and their recorded biological evolution and oxygenation events (a is modified from Zhao Wenzhi et al. ,2019, and b is modified from Zhang Shuichang et al. ,2021)

老的红藻实体化石,而同期的 Beck Spring 组白云岩则记录了绿藻和褐藻最早出现的证据(Cloud et al. , 1969)。华北下马岭组粉砂质页岩中发现的三芳甲藻甾烷(张水昌等,2015),为沟鞭藻的存在提供了分子化石证据(图 4)。然而,从澳大利亚 Roper 群到华北下马岭组,从西非 Tourist 组到北美 Nonesuch 组,甾烷类化合物的含量始终维持在极低水平(Melenevskii,2012),表明中元古代海洋生态系统中真核藻类虽已完成初步分化,但原核微生物和疑源类仍是主要的有机质生产者。上述中元古代生物演化变革与种属勃发提高了海洋的生物生产力与有机质制造能力,生物死亡后形成大量的有机质,为华北克

拉通在内的全球中元古界石墨矿富碳质原岩的形成提供了物质基础(图 4)。富碳质原岩经后期变质作用形成众多世界级石墨矿床,如我国华北克拉通内蒙古大乌淀石墨矿及西伯利亚板块里菲期科组霍夫(Konyukhovskoe)、库季坎(Kutikanskoe)石墨矿(陈廷愚,2010)。

2.2.3 氧化还原状态与碳质富集

前寒武纪地球经历了元古宙早期大氧化事件(GOE,2.43~2.22 Ga)和晚期氧化事件(NOE,0.8~0.56 Ga)(Lyons et al. ,2014)。GOE 和 NOE 将大气氧的演化分为三个阶段:GOE 之前的无氧状态,GOE 和 NOE 之间的相对低氧状态,NOE 之后的高

氧状态。在 GOE 和 NOE 取得广泛认识的基础上,中元古代大气氧含量的认识存在低氧与高氧的不同观点。支持低氧假说的学者主要基于以下证据:Planavsky et al. (2014) 和 Cole et al. (2016) 根据富铁沉积和页岩中的 Cr 同位素($\delta^{53}\text{Cr}$) 缺乏显著分馏现象,推测当时大气氧浓度约为现代水平的 0.1%~1%;Liu Xiaoming et al. (2021) 则根据浅海碳酸盐岩中微弱的 Ce 的负异常,认为大气氧含量长期维持在 1% PAL 左右。高氧论的支持者提出了不同证据:Gilleaudeau et al. (2016) 和 Canfield et al. (2018) 在华南神农架群黑色页岩(1.25 Ga) 及全球不同区域碳酸盐岩层位(1.1 Ga) 中发现了明显的 $\delta^{53}\text{Cr}$ 分馏,推断当时大气氧浓度超过 1% PAL。Zhang Shuichang et al. (2016) 在华北下马岭组识别出高生产力环境下的最小氧化带,推测大气氧浓度达到 4% PAL 以上(图 4)。Canfield et al. (2021) 则基于元古宙中期黑色页岩中再循环有机碳的稀缺性,将氧含量范围修正为 2%~24% PAL。近年来,多个地质时期的研究也发现中元古代相对高氧环境的存在:1.64 Ga(Wei Beilei et al., 2021)、1.56 Ga(Zhang Kan et al., 2018; Shang Mohan et al., 2019)、1.4 Ga(Zhang Shuichang et al., 2016)、1.25 Ga(Canfield et al., 2018) 以及 1.1 Ga(Gilleaudeau et al., 2016; Tang Dongjie et al., 2025) 等(图 4)。这些高氧证据对传统的“元古宙中期长期低氧”假说提出了挑战,张水昌等(2021) 也提出了“中元古代增氧事件”(MOE) 的新认识。

由于现有研究载体的时空覆盖范围有限,中元古代低氧背景下发生的增氧事件是否具有全球性意义还有待证实,但该时期大气氧浓度变化在华北克拉通中元古界黑色岩系留下了众多的地质记录,包括中元古界串岭沟组 $\text{I}/(\text{I}+\text{Ca})$ 的异常(1.64 Ga; Tang Dongjie et al., 2025)、高于庄组 Ce^* 指数变化(1.57 Ga; Zhang Kan, 2018)、下马岭组同位素组成的变化(1.40 Ga; Zhang Shuichang et al., 2016) 等(图 4),表明地球表层氧化还原状态演化与富有机质黑色岩系的形成密切相关。研究表明,地质历史时期大气成氧过程及净氧的积累往往因有机质等还原性物质的规模性埋藏所致(Berner, 2003; Wortmann and Paytan, 2012)。基于长时间尺度的碳同位素组成记录,整个地质历史时期有机质的埋藏分数没有发生明显的变化(Krissansen-Totton et al., 2015),但短时间尺度的高有机质埋藏事件是有可能的,以富有机质黑色岩系的形成为标志。如中元古代“脉冲式”增氧

时期,华北克拉通燕辽盆地和扎尔泰-白云鄂博盆地分别沉积了串岭沟组、高于庄组、洪水庄组、下马岭组黑色岩系及白云鄂博尖山组黑色岩系(杨培奇等, 2022),其中部分层位经历变质作用形成了石墨矿,如辽宁北镇杜屯高于庄组石墨矿、内蒙古大乌淀尖山组石墨矿等。

2.3 石墨矿原岩变质矿化过程

2.3.1 区域变质作用与碳质矿化

与周期性拉张裂陷对应,华北克拉通经历了多期构造挤压,形成了相关的区域变质事件。新太古代末期,华北发生了微陆块拼合和初始克拉通化,经历大规模区域变质作用,以区域性分布的花岗岩和浅变质火山-沉积盖层为标志(翟明国, 2011)。古元古代华北发生了第二次克拉通化(1.95~1.8 Ga),形成了丰镇造山带、晋豫造山带和胶-辽-吉造山带,伴生了第二次区域性变质事件(翟明国和彭澎, 2007)。与新太古代、古元古代明显的区域构造-变质事件不同,中一新元古代华北克拉通进入地台演化阶段,保持了长达 10 多亿年的稳定,缺少规模性变质事件(白瑾, 1993; 翟明国等, 2008)。值得强调的是,中一新元古代持续裂解期间,华北大块可能分裂出一系列微地块,尤其以北部中-西段较为显著(沈保丰等, 2004)。比如,华北大块中段产出白乃庙群和温都尔庙群,分别为古岛弧残片、洋壳残块,于蓟县系晚期($1124 \pm 57 \text{ Ma}$; 聂凤军等, 1993)、青白口纪($807 \pm 49 \text{ Ma}$; 聂凤军等, 1993) 拼贴到古大陆北缘,形成浅变质的绿片岩,表征华北克拉通中一新元古代也存在一定范围的区域变质作用(图 5)。

华北克拉通构造挤压-变质事件具有全球性意义(Shen Weibing et al., 2025)。大陆演化过程中周期性的地壳挤压闭合形成规模性的变形、变质,使得原岩有机质矿化形成石墨晶体,表现为: $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$, $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{C} + 2\text{H}_2\text{O}$ (Salotti et al., 1971; Frost et al., 1979)。太古宙变质作用主导了华北克拉通第一个石墨成矿期,形成北部中段内蒙长汉沟上太古界下乌拉山岩群石墨矿、河北邢台谈话式区域变质型石墨矿床等;古元古代克拉通化变质作用对应 Columbia 超大陆聚合,为华北第二个石墨成矿期,形成大量的孔兹岩系内深变质显晶质石墨矿(图 1; 陆松年等, 2016)。与太古宙、古元古代相比,中一新元古代华北克拉通构造-变质作用较弱,体现在区域分布上的局限性与变质程度上的差异性,仅在阿拉善地块与北缘中段发育(图 5),控制了内蒙古大乌淀石墨矿在内的世界级区域变质石墨矿的形成(图 1)。

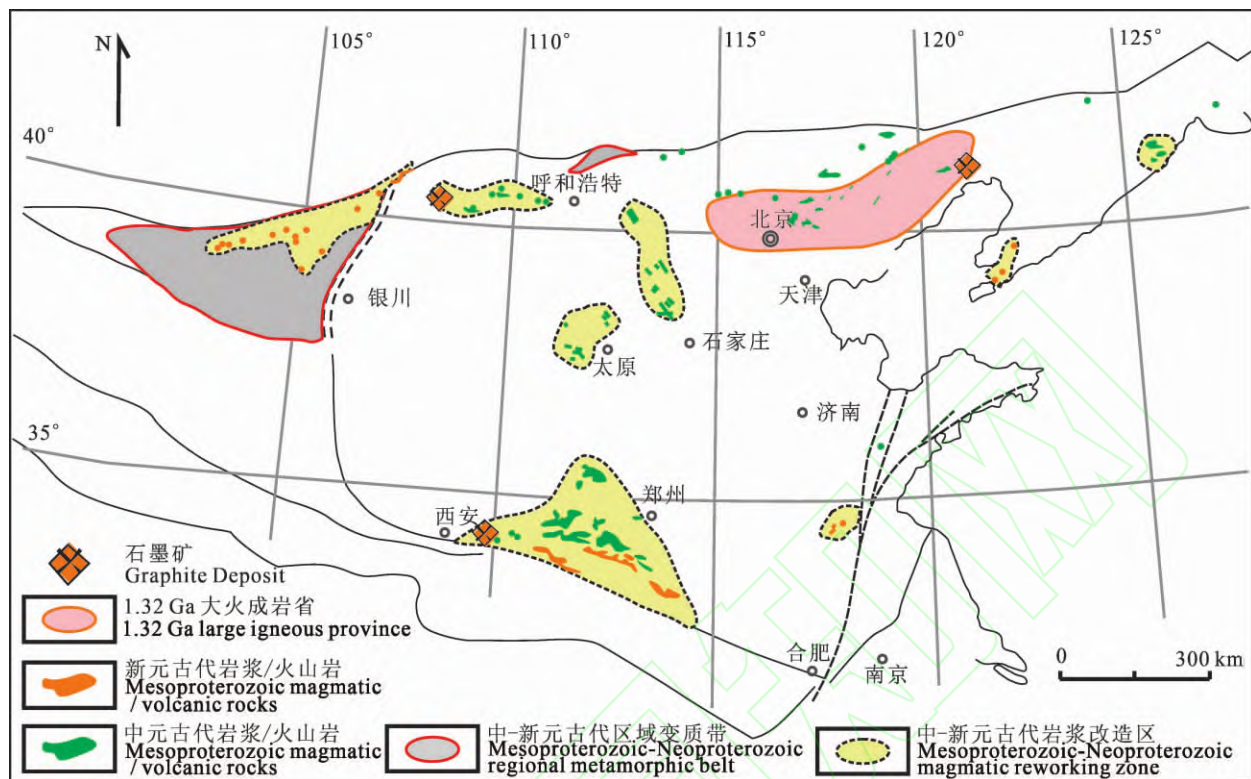


图 5 华北克拉通中—新元古代区域变质带展布与岩浆分布图(区域变质带展布与岩浆分布区

据耿元生等,2016,2020;张栓红等,2024 修改)

Fig 5 The distribution of the Meso-Neoproterozoic metamorphic zone and magma in the North China Craton

(the distribution of metamorphic zone and magma is modified from Geng Yuansheng et al., 2016,

2020; Zhang Shuanhong et al., 2024)

2.3.2 岩浆活动与碳质矿化

华北克拉通前寒武纪多期大陆裂解、拼合过程,以规模性的岩浆活动为特征(耿元生等,2020)。比如,太古宙晚期、古元古代晚期华北发生的两次克拉通化,前者伴生了花岗质岩石的侵入与岩墙群,后者伴随壳熔花岗岩的形成(翟明国,2011)。相较而言,华北克拉通中—新元古代岩浆活动规模、分布范围小,多以岩体、岩墙的形式产出(图 5)。中元古代发育三期岩浆事件序列(耿元生等,2020):① 1.78 Ga、1.70 Ga 发生在华北克拉通南缘与北缘的岩浆活动,前者以贺兰-熊耳群火山岩和太行-五台地区出露的基性岩墙群为代表,后者以河北 AGRS 组合(Anorthosite+Gabbro+Rapakivi granite+Syenite)为主(Hou Guiting et al., 2008);② 1.63 Ga、1.32 Ga 发生在燕辽裂谷的岩浆活动,前者形成大火成岩省,后者以冀北出露的二长花岗岩、花岗岩为代表(Lu Songnian et al., 2008);③ 1.23 Ga 与地幔柱有关的岩浆事件,以吉林通化、河北建平、山东临沂等地岩墙为代表,构成大火成岩省(Wang Wei et al., 2015)。新元古代发育两期岩浆事件序列:① 0.93

Ga 华北克拉通东部辽东、西部阿拉善、南部徐淮地区的岩浆活动,以基性岩床、辉绿岩墙、花岗岩为特征(Zhang Shuanhong et al., 2016);② 849~830 Ma、817~805 Ma 发生于华北南缘与西北缘的岩浆活动,以栾川辉长岩、狼山基性岩墙为代表(彭澎等,2018)。

岩浆活动往往会形成热接触变质作用(李超等,2015),叠加改造区域变质型石墨矿,宏观上增大石墨矿储量、品位,微观上促进石墨再结晶生长,鳞片变大。华北克拉通中元古界发育的石墨矿均为区域变质叠加接触变质综合型石墨矿(表 1)。太古宇、古元古界原岩有机碳在新太古代晚期、古元古代晚期区域变质作用下矿化成石墨晶体,进而在后期岩浆活动热接触变质作用下,石墨晶体逐渐增大形成品质石墨矿,如内蒙长汉沟上太古界下乌拉山岩群石墨矿、内蒙古扎木敖包古元古界上乌拉山群石墨矿(Shen Weibing et al., 2025)。中—新元古代,华北克拉通缺乏规模性构造作用与区域变质事件,石墨矿受后期岩浆热接触变质作用影响更为明显(图 5)。比如,针对内蒙古大乌淀石墨矿,姜高珍等(2017)根据矿床地质与矿物组合特征研究发现,远离二叠系侵入岩体,

石墨矿品味、晶体粒径逐渐减小,提出热接触变质石墨矿的观点;张艳飞和梁帅(2018)研究认为,该石墨矿在中元古代经历裂谷热演化低绿片岩相区域变质作用成矿后,在海西期受中酸性岩浆侵入影响,尖山组含石墨岩系中石墨隐晶重结晶,晶体增大。虽然对于华北克拉通中元古界部分石墨矿的变质成矿机制存在争议,但现有的研究均揭示出岩浆作用对石墨矿形成的重要性。

3 华北克拉通中元古界石墨矿成矿有利区分布

前寒武纪晚期地球表层岩石圈、大气圈、水圈、生物圈发生系列变革,控制了华北克拉通中元古界石墨矿的形成。中元古代 Columbia 超大陆裂解期间,地球表层发生多个“脉冲式”增氧事件,伴生了藻类、疑源类生物崛起。伴随表层环境的变革,华北克拉通依次形成贺兰-熊耳、燕辽、扎尔泰-白云鄂博裂谷系等,沉积了一套碎屑岩、厚层碳酸盐、碳质黑色页岩/泥岩夹层为主的岩系(翟明国,2022),如长城系-蓟县系串岭沟组/崔庄组、洪水庄组、高于庄组与白云鄂博群尖山组等。虽然中-新元古代华北克拉通未经历规模性区域变质事件,但存在北缘、南缘、东缘的构造碰撞及多期岩浆活动(耿元生等,2020),尤其是燕辽盆地

1. 23 Ga 的大火成岩省及其伴生的基性岩墙、火成碳酸岩、花岗岩,反映华北存在显著裂谷型区域动力热流(核部)事件,造成了裂谷沉积区部分富碳质地层变质,形成石墨晶核。经漫长的地质演化,尤其是在克拉通再造过程中强烈的岩浆作用,石墨进一步活化富集成矿,形成了以内蒙古大乌淀、辽宁北镇、陕西回头山石墨矿等为代表的中元古界石墨矿床(图 6)。

华北克拉通中元古界石墨矿成矿过程是地球形成早期岩石圈、生物圈、水圈、大气圈环境剧变的综合响应:① 中元古代华北克拉通持续拉伸裂解形成贺兰-熊耳、燕辽、扎尔泰-白云鄂博裂谷系,为石墨矿富碳质原岩的沉积提供了广阔的充填空间;② 中元古代大气氧化/增氧事件伴生的海洋生物种属革新、生物生产力勃发,为华北克拉通有机碳的大量埋藏与石墨矿富碳质原岩的沉积提供了充足的物质基础;③ 中-新元古代裂谷型区域动力热流(核部)形成的区域变质作用,提供了足够的温度、压力使得石墨矿原岩中的碳质矿化形成石墨晶体,进而在多期次岩浆热接触变质作用下石墨晶核逐步增大成为规模性矿床。根据上述石墨矿成矿过程与主控因素分析,华北克拉通中元古代富碳质沉积与碳质变质矿化的时空耦合关系控制了石墨矿的分布,富碳质原岩沉积的裂谷区与构造高温高压变质带的叠合区为有利成矿区,且岩

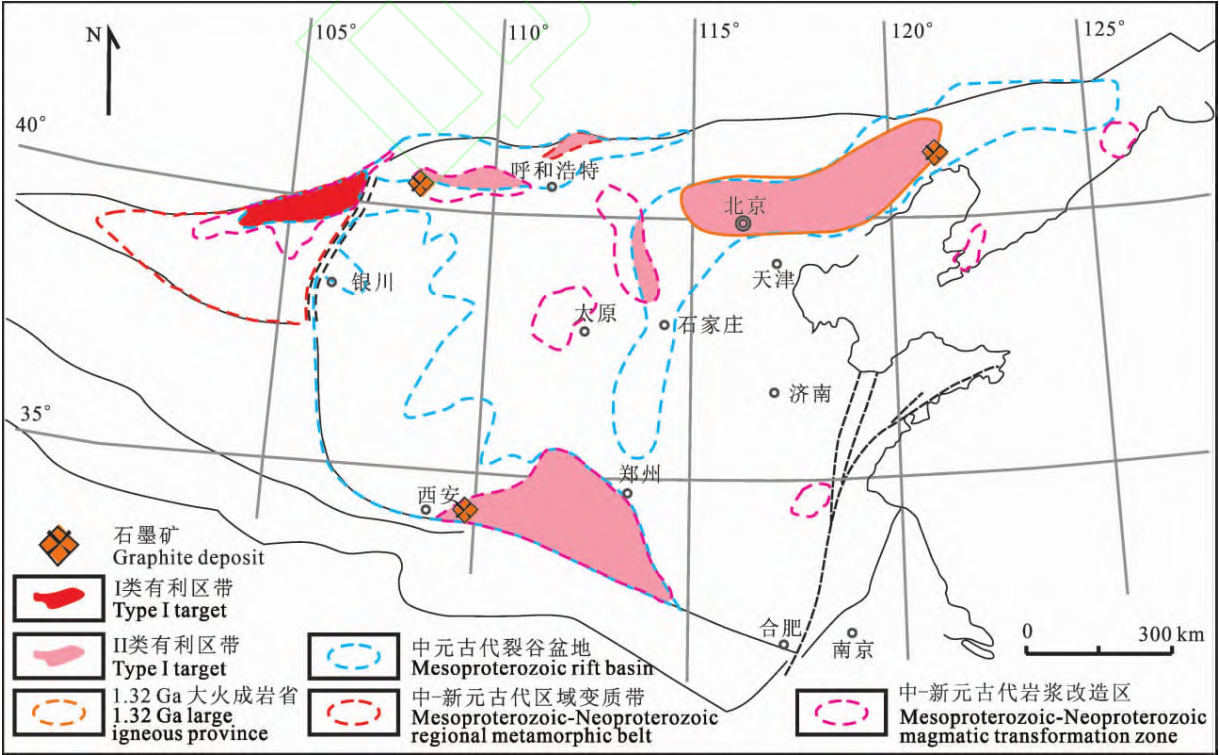


图 6 华北克拉通中元古界石墨矿成矿有利区分布图

Fig 6 The exploration target distribution of the Mesoproterozoic graphite deposits in the North China Craton

浆热接触变质区为高品位品质石墨矿的有利勘探区(图6):① 克拉通北部扎尔泰-白云鄂博裂谷系沉积的黑色岩系,经历中—新元古代区域动力热流及裂解微陆块拼合作用发生区域变质作用,进而在多期岩浆叠加改造作用下,形成了 I 类成矿有利区,发育内蒙古大乌淀世界级石墨矿为代表的北部石墨矿带;② 克拉通中部燕辽盆地沉积的黑色岩系,经历裂谷型区域动力热流及 1.23 Ga 大火成岩省等主导的变质作用,形成了 II 类成矿有利区,发育辽宁北镇杜屯石墨矿为代表的东部石墨成矿带;③ 克拉通南部的贺兰-熊耳裂谷系沉积的黑色岩系,主要经历中—新元古代裂谷型区域动力热流变质,形成了 II 类成矿有利区,发育以陕西丹凤石墨矿为代表的南部石墨成矿带。

4 结论

(1) 华北克拉通中元古界石墨矿主要分布于北部、中部、南部成矿带,以区域变质-热接触变质综合型矿床为主,集中产于白云鄂博群尖山组、长城系高于庄组、峡河岩群寨根岩组等,原岩碳质来源以有机成因占主导。

(2) 华北克拉通中元古界石墨矿成矿过程是地球形成早期岩石圈、生物圈、水圈、大气圈环境剧变的综合响应:中元古代大陆裂解形成了裂谷盆地,为富碳质原岩的沉积提供了广阔的充填空间;大气氧化/增氧事件伴生的海洋生物种属革新、生物生产力勃发,为有机碳的大量埋藏与富碳质原岩的沉积提供了物质基础;中—新元古代裂谷型区域动力热流形成的区域变质作用,提供了足够的温度、压力使得原岩中的碳质活化形成石墨晶体,进而在多期岩浆热接触变质作用下石墨晶核逐步增大,成为规模性矿床。

(3) 华北克拉通中元古代富有机质原岩沉积的裂谷区与构造高温高压变质带叠合形成有利成矿区,有利成矿区中岩浆热接触变质带为高品位品质石墨矿的有利勘探区,其中扎尔泰-白云鄂博裂谷系黑色岩系沉积区与碰撞-岩浆变质带叠合区为潜在勘探目标。

References

- Bai Jin, Huang Xueguang, Dai Fengyan. 1993. Crustal Evolution of China in the Early Precambrian. Beijing: Geological Publishing House, 36~38 (in Chinese with English abstract).
- Berner R A. 2003. The long-term carbon cycle, fossil fuels and atmospheric composition. *Nature*, 426: 323~326.
- Brocks J J, Logan G A, Buick R, Summons R E. 1999. Archean molecular fossils and the early rise of eukaryotes. *Science*, 285: 1033~1036.
- Canfield D E, van Zuilen M A, Nabhan S, Wang Xiaomei. 2021. Petrographic carbon in ancient sediments constrains Proterozoic Era atmospheric oxygen levels. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118 (23): e2101544118.
- Canfield D E, Zhang Shuichang, Frank A B, Wang Xiaomei, Wang Huajian, Su Jin, Ye Yuntao, Frei R. 2018. Highly fractionated chromium isotopes in Mesoproterozoic-aged shales and atmospheric oxygen. *Nature Communications*, 9: 1~11.
- Chen Tingyu. 2010. Evolutionary trends of ore-forming elements in Central Asia and its adjacent regions. *Geology in China*, 37(4): 1162~1174 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yanjing. 1990. Evidence of abrupt geological environment changes over 230 million years and discussion on several issues. *Journal of Stratigraphy*, (3): 178~186 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yanjing, Liu Congqiang, Chen Huayong, Zhang Zengjie, Li Chao. 2000. Carbon isotope characteristics of graphite deposits and host rocks in northern China and related issues. *Acta Petrologica Sinica*, 16(2): 233~244 (in Chinese with English abstract).
- Cloud P E, Licari G R, Wright L A, Troxel B W. 1969. Proterozoic eucaryotes from eastern California. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 62: 623~630.
- Cole D B, Reinhard C T, Wang Xiangli, Gueguen B, Halverson G P, Gibson T, Hodgskiss M S, Ryan McKenzie W N, Lyons T W, Planavsky N J. 2016. A shale-hosted Cr isotope record of low atmospheric oxygen during the Proterozoic. *Geology*, 44: 555~558.
- Deng Yan, Ye Yuntao, Wang Huajian, Lyu Yitong, Lyu Dan, Zhang Fenglian, Wang Xiaomei, Guan Ping, Gao Zhiyong, Ren Rong, Zhang Shuichang. 2021. Evolution of the 1.8-1.6 Ga Yanliao and Xiong'er basins, North China Craton. *Precambrian Research*, 365: 106383.
- Frost B R. 1979. Mineral equilibria involving mixed-volatiles in a C-O-H fluid phase: The stabilities of graphite and siderite. *American Journal of Science*, 279: 1033~1059.
- Geng Yuansheng, Kuang Hongwei, Du Liling, Liu Yongqing. 2020. Characteristics of Mesoproterozoic magmatic rocks in the three continental blocks of North China, South China and Tarim basin and their geological significance for comparison. *Chinese Journal of Geology*, 36(8): 2276~2312 (in Chinese with English abstract).
- Geng Yuansheng, Shen Qihan, Du Liling, Song Huixia. 2016. Regional metamorphism and continental growth and assembly in China. *Acta Petrologica Sinica*, 32(9): 2579~2608.
- Gilleaudeau G J, Frei R, Kaufman A J, Kah L C, Azmy K, Bartley J K, Chernyavskiy P, Knoll A H. 2016. Oxygenation of the mid-Proterozoic atmosphere: Clues from chromium isotopes in carbonates. *Geochemical Perspectives Letters*, 2: 178~187.
- Hao Zengyuan, Niu Yongfeng, Chen Mengchao. 2016. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of biotite granodiorite in Shihai River area, Inner Mongolia and their geological significance. *Chinese Journal of Geology*, 43(1): 72~80 (in Chinese with English abstract).
- Hou Guiting, Santosh M, Qian Xianglin, Lister G S, Li Jianghai. 2008. Configuration of the Late Paleoproterozoic supercontinent Columbia: Insights from radiating mafic dyke swarms. *Gondwana Research*, 14(3): 395~409.
- Jiang Gaozhen, Li Yike, Wang Anjian, Yang Xuan, Yang Biao, Ma Li. 2017. Analysis of the genesis characteristics of the Dawudian graphite mine in Wulatan middle banner, Inner Mongolia. *Earth Science Frontiers*, 24(5): 306~316 (in Chinese with English abstract).
- Karhu J A, Holland H D. 1996. Carbon isotopes and the rise of atmospheric oxygen. *Geology*, 24: 867~870.
- Krissansen-Totton J, Buick R, Catling D C. 2015. A statistical analysis of the carbon isotope record from the Archean to Phanerozoic and implications for the rise of oxygen. *American Journal of Science*, 315: 275~316.

- Li Chao, Wang Denghong, Zhao Hong, Pei Haixiang, Li Xinyu, Zhou Limin, Du Andao, Qu Wenjun. 2015. Summary of metallogenic patterns of China's graphite deposits. *Mining Geology*, 34 (6): 1223 ~ 1236 (in Chinese with English abstract).
- Li Kaiyue, Chen Yanjing, She Zhenbing, Tang Haoshu, Chen Weiyu. 2018. Carbon isotope characteristics and geological significance of Zhangshe graphite mine in Jingshan Group, Jiaobei area. *Geology Perspectives*, 25 (5): 19 ~ 33 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jian. 2017. The formation, crystal chemical characteristics of natural graphite and its constraints on the industrialization of graphene. Doctoral dissertation of China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Liu Jingdang, Xiao Rongge, Zhang Yanfei, Liang Shuai, Zhao Qing, Bai Fengjun, Zhang Yongxing, Wang Jichun, Yang Peiqi, Liu Jian. 2017. North China Anorthoclase Graphite Deposits. Beijing: Science Press, 1~45 (in Chinese with English abstract).
- Liu Kunfeng, Qi Xiaopeng, Hu Xihou, Peng Yan, Xie Jin, Wang Lu. 2023. The discovery and geological significance of the Jingzhi shale deposit in Houwushan, Danfeng County, Shaanxi Province. *Minerals and Geology*, 37(1): 62~71.
- Liu Shuqi, Zhu Xiyan, Su Wenbo, Zhao Taiping, Qiu Yifan, He Yuting, Zhang Huafeng. 2022. Black shales of the Chuanlinggou Formation in the northern North China Craton and its constraints on redox state of seawater during the Early Mesoproterozoic. *Acta Petrologica Sinica*, 38(6): 1667~1684.
- Liu Xiaoming, Kah L C, Knoll A H, Cui Huan, Wang Chao, Bekker A, Hazen R M. 2021. A persistently low level of atmospheric oxygen in Earth's middle age. *Nature Communications*, 12: 1 ~ 7.
- Liu Zhenghong, Liu Yaqin, Feng Benzhi. 2000. The establishment and tectonic evolution of the Mesoproterozoic orogenic belt on the northern margin of the North China Craton. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 30(2): 110~114 (in Chinese with English abstract).
- Lu Songnian, Zhao Guochun, Wang Huichu, Hao Guojie. 2008. Precambrian metamorphic basement and sedimentary cover of the North China Craton: A review. *Precambrian Research*, 160(1~2): 77~93.
- Lu Songnian, Hao Guojie, Xiang Zhenqun. 2016. Major geological events in the Precambrian. *Frontiers of Geology*, 23(6): 140~15 (in Chinese with English abstract).
- Luo Genming, Hallmann C, Xie Shucheng, Ruan Xiaoyan, Summons R E. 2015. Comparative microbial diversity and redox environments of black shale and stromatolite facies in the Mesoproterozoic Xiamaling Formation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 151: 150~167.
- Lyons T W, Reinhard C T, Planavsky N J. 2014. The rise of oxygen in Earth's early ocean and atmosphere. *Nature*, 506: 307~315.
- Ma Xudong, Zhong Yan, Chen Yali, Qu Xiaoming. 2019. The control of the sedimentary process of the Konz granite series within the Konz granite belt of the North China Craton on the mineralization of graphite deposits. *Tectonics and Mineralization*, 43(6): 1155~1168 (in Chinese with English abstract).
- Marshall A O, Corsetti F A, Sessions A L, Marshall C P. 2009. Raman spectroscopy and biomarker analysis reveal multiple carbon inputs to a Precambrian glacial sediment. *Organic Geochemistry*, 40: 1115~1123.
- Melenevskii V N. 2012. Modeling of catagenetic transformation of organic matter from a Riphean mudstone in hydrous pyrolysis experiments: Biomarker data. *Geochemistry International*, 50: 425~436.
- Nance R D, Murphy J B, Santosh M. 2014. The supercontinent cycle: A retrospective essay. *Gondwana Research*, 25: 4~29.
- Nance R D, Worsley T R, Moody J B. 1988. The supercontinent cycle. *Scientific American*, 259: 72~79.
- Nie Fengjun, Pei Rongfu, Wu Liangshi. 1993. Volcanic Activity and Metal Mineralization in Bai Naimiao Area, Inner Mongolia. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1 ~ 239 (in Chinese with English abstract).
- Paton K R, Varrla E, Backes C, Smith R J, Khan U, O'Neill A O, Boland C, Lotya M, Istrate O M, King P, Higgins T, Barwich S, May P, Puczkarski P, Ahmed I, Moebius M, Pettersson H, Long E, Coelho J, O'Brien S E, McGrice E K, Sanchez B M, Duesberg G S, McEvoy N, Pennycook T J, Downing C, Crossley A, Nicolosi V, Coleman J N. 2014. Scalable production of large quantities of defect-free few-layer graphene by shear exfoliation in liquids. *Nature Materials*, 13(6): 624~630.
- Peng Peng, Wang Xinping, Zhou Xiaotong, Wang Chong, Sun Feifu, Su Xiangdong, Chen Liang, Guo Jinghui, Zhai Mingguo. 2018. The determination of the 810 million-year-long Qianshan basic rock wall group and its implications for the geological evolution of the western part of the North China Craton. *Chinese Journal of Geology*, 34 (4): 1191 ~ 1203 (in Chinese with English abstract).
- Peng Runmin, Zhai Yusheng, Han Xuefeng. 2007. Tectonic evolution and metallogenic response of the Langshan orogenic belt in Inner Mongolia. *Chinese Journal of Geology*, 23(3): 679~688 (in Chinese with English abstract).
- Planavsky N J, Reinhard C T, Wang Xinqiang. 2014. Low Mid-Proterozoic atmospheric oxygen levels and the delayed rise of animals. *Science*, 346: 635~638.
- Salotti C A, Heinrich E W, Giardini A A. 1971. Abiotic carbon and the formation of graphite deposits. *Economic Geology*, 66: 929 ~ 932.
- Santosh M, Wada H. 1993a. A carbon isotope study of graphites from the Kerala khondalite belt, southern India: Evidence for CO₂ infiltration in granulites. *The Journal of Geology*, 101(5): 643~650.
- Santosh M, Wada H. 1993b. Microscale isotopic zonation in graphite crystals: Evidence for channelled CO₂ influx in granulites. *Earth and Planetary Science Letters*, 119(1~2): 19~26.
- Schidlowski M. 1987. Application of stable carbon isotopes to early biochemical evolution Earth. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 15: 47~72.
- Shang Mohan, Tang Dongjie, Shi Xiaoying, Zhou Limin, Zhou Xiqiang, Song Huyue, Jiang Ganqing. 2019. A pulse of oxygen increase in the early Mesoproterozoic ocean at ca. 1.57-1.56 Ga. *Earth and Planetary Science Letters*, 527: 115797.
- Shen Baofeng, Yang Chunliang, Zhai Anmin, Hu Xiaotie. 2004. Crustal evolution and mineralization in Pre-Cambrian China. *Mining Geology*, 23 (S1): 78 ~ 89 (in Chinese with English abstract).
- Shen Weibing, Shen Weibin, Li Feng, Xiao Xiao, Wang Yangyang. 2025. Metallogenic process of the Precambrian graphite ores in the North China Craton and its response to the evolution of the Earth surface environment. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 668: 112926.
- Shi Yu, Yu Jinhai, Pei Xiaoli. 2014. Early Paleozoic mantle-derived magmatic activities of the Qinling mixed rocks in the Qinling orogenic belt. *Journal of Guilin University of Technology*, 34 (2): 207~217 (in Chinese with English abstract).
- Singh A P, Mishra M, Chandra A, Dhawan S K. 2011. Graphene oxide/ferrofluid/cement composites for electromagnetic interference shielding application. *Naotechnology*, 22(46): 465 ~ 701.
- Sun Shu, Wang Tieguan. 2016. *Geology and Oil Resources of the Middle to New Archean Period in Eastern China*. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstract).
- Tam P Y, Zhao Guochun, Sun Min, Li Sanzhong, Iizuka Y, Ma G S K, Yin Changchun, He Yanhong, Wu Meiling. 2012. Metamorphic P-T path and tectonic implications of medium-pressure pelitic granulites from the Jiaobei massif in the Jiao-Liao-Ji belt, North China Craton. *Precambrian Research*, 220~221: 177~191.
- Tang Dongjie, Ma Jianbai, Shi Xiaoyin, Lechte M, Zhou Xinqiang. 2020. The formation of marine red beds and iron cycling on the

- Mesoproterozoic North China Platform. *American Mineralogist*, 105: 1412~1423.
- Tang Dongyi, Zhou Hongyi, Jiang Ganqing, Shi Xiaoying, Li Xinlei, Wang Lele, Xu Lei, Sun Longfei, Xie Baozeng, Zhou Limin, Song Huyue, Zhou Xinqiang, Wang Xinqian, Zhao Hanqing, Zhang Shihong, Poulton S W. 2025. Terminal Mesoproterozoic (1.1-1.0 Ga) shallow ocean oxygenation and the rise of crown-group eukaryotes. *Geological Society of America Bulletin*, 137(7~8): 3452~3462.
- Wang Hongyu, Zhang Shuanhong, Wang Sen, Kong Linghao, Zhao Yue, Zhang Qiqi, Gao Sen, Hu Guohui. 2024. Identification of carbonates with high positive carbon isotope excursion from the Liaohe Group in the northeastern North China Craton and implications for the Lomagundi-Jatuli Event. *Science China Earth Sciences*, 67, <https://doi.org/10.1007/s11430-023-1318-3>.
- Wang Jiachang, Zhang Jiaying, Zhu Yan. 2013. Characteristics of graphite mineralization in China and prospecting indicators. *China Non-metallic Mineral Industry Journal*, (3): 49~51 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wei, Liu Shuwen, Santosh M, Zhang Lifei, Bai Xiang, Zhao Yue, Zhang Shuanhong, Guo Rongrong. 2015. 1.23 Ga mafic dykes in the North China Craton and their implications for the reconstruction of the Columbia supercontinent. *Gondwana Research*, 27(4): 1407~1418.
- Washington J. 2000. The possible role of volcanic aquifers in prebiologic genesis of organic compounds and RNA. *Origins Life Evol Biosphere*, 30(1): 53~79.
- Wei Beilei, Tang Dongjie, Shi Xiaoying, Lechte M, Zhou Limin, Zhou Xiqiang, Song Huyue. 2021. A pulsed oxygenation in terminal Paleoproterozoic ocean: Evidence from the transition between the Chuanlinggou and Tuanshanzi formations, North China. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22: e2020GC009612.
- Wei Wei, Wang Huajian, Zhang Shuichang, Dong Linhui, Li Da, Huang Fang. 2025. Dynamic redox evolution in the middle-late Mesoproterozoic oceans. *Chemical Geology*, 679: 122685.
- Wei Xiaozhao, Cao Guangjie, Huo Tianyun. 2017. Analysis of geological characteristics and prospecting potential of Jiaojiahe crystalline graphite mine in Yunjiahe, Danfeng County, northern Qinling Mountains. *China Molybdenum Industry*, 41(3): 10~16.
- Wortmann U G, Paytan A. 2012. Rapid variability of seawater chemistry over the past 130 million years. *Science*, 337: 334~336.
- Xiao Keyan, Sun Li, Li Siyuan, Huang An. Geological characteristics and mineralization potential of graphite resource in China. *Acta Geoscientia Sinica*, 37(5): 607~614.
- Yan Lingya, Gao Shuxue, Chen Zhengguo, Jiao Lixiang, Sun Li, Liu Yanfei, Zhou Wen. 2018a. Metallogenic characteristics and division of metallogenic belts of graphite deposits in China. *Chinese Journal of Geology*, 45(3): 421~440 (in Chinese with English abstract).
- Yan Lingya, Gao Shuxue, Sun Li, Chen Zhengguo, Jiao Lixiang, Zhou Wen, Liu Yanfei, Sun Jiushou. 2018b. Metallogenic characteristics and metallogenic elements of regional metamorphic graphite deposits in China. *China Nonferrous Mineral Industry Journal*, (3): 21~24 (in Chinese with English abstract).
- Yang Peiqi, Liu Jingdang, Liu Shumei, Yang Fei, Yang Xiaowei. 2022. Geochemical characteristics and SHRIMP zircon U-Pb dating of quartz schist in the Da Wudian graphite deposit in Wulatanzhong banner, Inner Mongolia. *Modern Geology*, 36(2): 672~681 (in Chinese with English abstract).
- Yang Peiqi, Liu Jingdang, Zhang Yanfei. 2020. Geochemistry of ore-bearing rocks and SHRIMP zircon U-Pb dating of graphite deposits in Beizhen, Liaoning Province. *Modern Geology*, 34(2): 233~243 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo. 2008. The lithospheric mantle and lower crust in the Mesozoic pre-deformation stage of the North China Craton. *Chinese Journal of Geology*, 24: 2185~2204 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo. 2011. The formation of Kaltonghua and the North China block. *Science in China (Series Earth Sciences)*, 41(8): 1037~1046 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo. 2013a. Formation of major ancient continents and associated continents in China—Review and prospects. *Science China: Earth Sciences*, 43(10): 1583~1606 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo. 2013b. The relationship between the Pre-Cambrian mineralization system in North China and major geological events. *Chinese Journal of Geology*, 29(5): 1759~1773 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo. 2022. On Kozlovite-records of special geological processes on Earth. *Acta Geologica Sinica*, 96(9): 2967~2997 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo, Peng Peng. 2007. Paleoproterozoic tectonic events in the North China Craton. *Chinese Journal of Geology*, 23(11): 2665~2682 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo, Hu Bo, Peng Peng. 2014. Magmatic activity and multiple rift events during the Middle-Neoproterozoic Period in North China. *Geology Frontiers*, 21(1): 100~119 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Limin, Wang Yuejun, Li Shubo, Zhang Yuzhi. 2017. Geochemical and geochronological characteristics of granitic gneisses in the Baoban Group, Gong'ai (Hainan) and its tectonic implications. *Geotectonica et Metallogenia*, 41(2): 396~411 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Lianchang, Tong Xiaoxue, Zhang Xin, Dong Zhiguo, Wang Changle, Zhu Mingtian, Gao Bingyu, Li Wenjun. 2025. Relationship between sedimentary deposits and Earth evolution of North China Craton. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 27(2): 271~285 (in Chinese with English abstract).
- ZhangShuanhong, Zhao Yue, Ye Hao, Hu Guohui. 2016. Early Neoproterozoic emplacement of the diabase sill swarms in the Liaodong Peninsula and pre-magmatic uplift of the southeastern North China Craton. *Precambrian Research*, 272: 203~225.
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Pei Junling, Yang Zhenyu, Hu Guohui, Zhang Qiqi. 2024. From the Yanliao sill swarms in the North China Craton to the large-scale continental rift system in the Columbia supercontinent: A review and new perspectives on 20 years of research on the Yanliao large-scale igneous province. *Acta Geologica Sinica*, 98(3): 783~798 (in Chinese with English abstract).
- ZhangShuichang, Wang Xiaomei, Wang Huajian, Bjerrum C J, Hammarlund E U, Costa M M, Connolly J N, Zhang Baomin, Su Jin, Canfield D E. 2016. Sufficient oxygen for animal respiration 1400 million years ago. *Proc Natl Acad Sci USA*, 113: 1731~1736.
- Zhang Shuichang, Wang Huajian, Wang Xiaomei, Ye Yuntao. 2021. The Mesoproterozoic Oxygenation Event. *Science China Earth Sciences*, 64(12): 2043~2068 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuichang, Wang Huajian, Wang Xiaomei, Ye Yuntao. 2022. The marine biologic carbon pump in the middle Paleozoic: Organic matter sources, degradation and enrichment. *Chinese Science Bulletin*, 67(15): 1624~1643 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yanfei, Liang Shuai. 2018. Discussion on the geological characteristics and genesis of dawudian graphite mine in Inner Mongolia. *Geological Prospecting Review Series*, 33(2): 205~213 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Kan, Zhu Xiangkun, Wood R A. 2018. Oxygenation of the Mesoproterozoic ocean and the evolution of complex eukaryotes. *Nature Geosciences*, 11: 345~35.
- Zhao Wenzhi, Wang Xiaomei, Hu Suyun, Zhang Shuichang, Wang Huajian, Guan Shuwei, Ye Yuntao, Ren Rong, Wang Tongshan. 2019. Hydrocarbon generation characteristics and exploration prospects of Proterozoic source rocks in China. *Science China: Earth Sciences*, 49(6): 939~964 (in Chinese

- with English abstract).
- Zhu Jianjiang, Liu Fuli, Liu Fuxing, Shi Chuang, Wang Fang, Xu Wentao. 2021. Carbon isotope characteristics and genesis analysis of graphite deposits in the Liaohé Group of the Jia-Liao-Ji orogenic belt. *Chinese Journal of Geology*, 37(2): 599~618 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Jianjiang, Zhang Lu, Yang Yanhai, Liu Zhenyu. 2024. Research progress and issues on the genesis of Paleoproterozoic graphite deposits in the North China Craton. *Chinese Journal of Geology*, 40(10): 3257~3280 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Shixing, Zhu Maoyan, Knoll A H, Yin Zongjun, Zhao Fangchen, Sun Shufen, Qu Yuangao, Shi Min, Liu Huan. 2016. Decimetre-scale multicellular eukaryotes from the 1.56-billion-year-old Gaoyuzhuang Formation in North China. *Nature Communications*, 7: 11500.
- ## 参 考 文 献
- 白瑾, 黄学光, 戴凤岩. 1993. 中国早前寒武纪地壳演化. 北京: 地质出版社, 36~38.
- 陈廷恩. 2010. 亚洲中部及邻区成矿元素的演化趋势. *中国地质*, 37(4): 1162~1174.
- 陈衍景. 1990. 23 亿年地质环境突变的证据及若干问题的讨论. *地层学杂志*, (3): 178~186.
- 陈衍景, 刘丛强, 陈华勇, 张增杰, 李超. 2000. 中国北方石墨矿床及赋矿孔达岩系碳同位素特征及有关问题讨论. *岩石学报*, 16(2): 233~244.
- 耿元生, 旷红伟, 杜利林, 柳永清. 2020. 华北、华南、塔里木三大陆块中-新元古代岩浆岩的特征及其地质对比意义. *岩石学报*, 36(8): 2276~2312.
- 耿元生, 沈其韩, 杜利林, 宋会侠. 2016. 区域变质作用与中国大陆地壳的形成与演化. *岩石学报*, 32(9): 2579~2608.
- 郝增元, 牛永峰, 陈萌超, 高勇, 陈海东, 牛雪妮. 2016. 内蒙古石哈河地区黑云母二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *中国地质*, 43(1): 72~80.
- 姜高珍, 李以科, 王安建, 杨轩, 杨彪, 马莉. 2017. 内蒙古乌拉特中旗大乌淀石墨矿成因特征分析. *地学前缘*, 24(5): 306~316.
- 李超, 王登红, 赵鸿, 裴浩翔, 李欣尉, 周利敏, 杜安道, 屈文俊. 2015. 中国石墨矿床成矿规律概要. *矿床地质*, 34(6): 1223~1236.
- 李凯月, 陈衍景, 余振兵, 汤好书, 陈威宇. 2018. 胶北荆山群张舍石墨矿碳同位素特征及其地质意义. *地学前缘*, 25(5): 19~33.
- 刘剑. 2017. 天然石墨的成因、晶体化学特征及对石墨烯产业化的约束. 中国地质大学(北京)博士学位论文.
- 刘敬党, 肖荣阁, 张艳飞, 梁帅, 赵青, 白凤军, 张永兴, 王继春, 杨培奇, 刘剑. 2017. 华北显晶质石墨矿床. 北京: 科学出版社, 1~45.
- 柳坤峰, 祁晓鹏, 胡希有, 彭岩, 谢晋, 王璐. 2023. 陕西丹凤县回头山晶质石墨矿的发现及地质意义. *矿产与地质*, 37(1): 62~71.
- 刘书琪, 祝禧艳, 苏文博, 赵太平, 仇一凡, 何雨婷, 张华锋. 2022. 华北燕辽地区串岭沟组黑色页岩对中元古代早期海水氧化还原环境的制约. *岩石学报*, 38(6): 1667~1684.
- 刘正宏, 刘雅琴, 冯本智. 2000. 华北克拉通北缘中元古代造山带的确立及其构造演化. *长春科技大学学报*, 30(2): 110~114.
- 陆松年, 郝国杰, 相振群. 2016. 前寒武纪重大地质事件. *地学前缘*, 23(6): 140~155.
- 马旭东, 钟焱, 陈雅丽, 曲晓明. 2019. 华北克拉通孔兹岩带内孔兹岩系沉积过程对石墨矿床成矿的控制. *大地构造与成矿学*, 43(6): 1155~1168.
- 聂凤军, 裴荣富, 吴良士, 等. 1993. 内蒙古白乃庙地区岩浆活动与金属成矿作用. 北京: 北京科学技术出版社, 1~239.
- 彭澎, 王欣平, 周小童, 王冲, 孙风波, 苏向东, 陈亮, 郭敬辉, 翟明国. 2018. 8.1 亿年千里山基性岩墙群的厘定及其对华北克拉通西部地质演化的启示. *岩石学报*, 34(4): 1191~1203.
- 彭润民, 翟裕生, 韩雪峰, 王志刚, 王建平, 沈存利, 陈喜峰. 2007. 内蒙古狼山造山带构造演化与成矿响应. *岩石学报*, 23(3): 679~688.
- 沈保丰, 杨春亮, 翟安民, 胡小蝶. 2004. 中国前寒武纪地壳演化与成矿. *矿床地质*, 23(S1): 78~89.
- 时毓, 于津海, 裴小利, 刘希军, 朱桦. 秦岭造山带中秦岭杂岩的早古生代幔源岩浆作用. *桂林理工大学学报*, 34(2): 207~217.
- 孙枢, 王铁冠. 2016. 中国东部中-新元古界地质学与油气资源. 北京: 科学出版社.
- 王宏宇, 张拴宏, 王森, 孔令昊, 赵越, 张琪琪, 高森, 胡国辉. 2024. 辽河群高碳同位素正异常碳酸盐岩的发现及其对洛马贡迪-贾图利事件的指示意义. *中国科学: 地球科学*, 54, <https://doi.org/10.1360/SSTe-2023-0267>.
- 王家昌, 张家英, 朱艳. 2013. 我国石墨成矿特征及找矿标志. *中国非金属矿工业导刊*, (3): 49~51.
- 魏小昭, 曹广杰, 霍天云, 刘凯, 张望. 2017. 北秦岭丹凤县庾家河晶质石墨矿地质特征及找矿远景浅析. *中国钼业*, 41(3): 10~16.
- 肖克炎, 孙莉, 李思远, 黄安. 2016. 我国石墨矿产地质特征及资源潜力分析. *地球学报*, 37(5): 607~614.
- 颜玲亚, 高树学, 陈正国, 焦丽香, 孙莉, 刘艳飞, 周雯. 2018a. 中国石墨矿成矿特征及成矿区带划分. *中国地质*, 45(3): 421~440.
- 颜玲亚, 高树学, 孙莉, 陈正国, 焦丽香, 周雯, 刘艳飞, 孙即秀. 2018b. 我国区域变质型石墨矿成矿特征及成矿要素. *中国非金属矿工业导刊*, (3): 21~24.
- 杨培奇, 刘敬党, 张艳飞, 梁帅, 刘淑梅. 2020. 辽宁北镇石墨矿含矿岩石地球化学及 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究. *现代地质*, 34(2): 233~243.
- 杨培奇, 刘敬党, 刘淑梅, 杨飞, 杨孝伟. 2022. 内蒙古乌拉特中旗大乌淀石墨矿床石英片岩地球化学特征与 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学. *现代地质*, 36(2): 672~681.
- 翟明国. 2008. 华北克拉通中生代破坏前的岩石圈地幔与下地壳. *岩石学报*, 24: 2185~2204.
- 翟明国. 2011. 克拉通化与华北陆块的形成. *中国科学(地球科学)*, 41(8): 1037~1046.
- 翟明国. 2013a. 中国主要古陆与联合大陆的形成-综述与展望. *中国科学: 地球科学*, 43(10): 1583~1606.
- 翟明国. 2013b. 华北前寒武纪成矿系统与重大地质事件的联系. *岩石学报*, 29(5): 1759~1773.
- 翟明国. 2022. 论孔兹岩-地球上特殊地质过程的记录. *地质学报*, 96(9): 2967~2997.
- 翟明国, 彭澎. 2007. 华北克拉通古元古代构造事件. *岩石学报*, 23(11): 2665~2682.
- 翟明国, 胡波, 彭澎, 赵太平. 2014. 华北中-新元古代的岩浆作用与多期裂谷事件. *地学前缘*, 21(1): 100~119.
- 张拴宏, 赵越, 裴军令, 杨振宇, 胡国辉, 张琪琪. 2024. 从华北燕辽岩床群到哥伦比亚超大陆巨型裂谷系—燕辽大火成岩省近 20 年研究回顾与展望. *地质学报*, 98(3): 783~798.
- 张水昌, 王华建, 王晓梅, 叶云涛. 2021. 中元古代增氧事件. *中国科学: 地球科学*, 64(12): 2043~2068.
- 张水昌, 王华建, 王晓梅, 叶云涛. 2022. 中元古代海洋生物碳泵: 有机质来源、降解与富集. *科学通报*, 67(15): 1624~1643.
- 张艳飞, 梁帅. 2018. 内蒙古大乌淀石墨矿地质特征与成因探讨. *地质找矿论丛*, 33(2): 205~213.
- 张连昌, 佟小雪, 张新, 董志国, 王长乐, 朱明田, 高炳宇, 李文君. 2025. 华北克拉通沉积矿产与地球环境演变的关系. *古地理学报*, 27(2): 271~285.
- 赵文智, 王晓梅, 胡素云, 张水昌, 王华建, 管树巍, 叶云涛, 任荣, 王铜山. 2019. 中国元古宇炆源岩成烃特征及勘探前景. *中国科学: 地球科学*, 49(6): 939~964.
- 朱建江, 刘福来, 刘福兴, 石闯, 王舫, 徐文涛. 2021. 胶-辽-吉造山带辽河群石墨矿碳同位素特征及成因分析. *岩石学报*, 37(2): 599~618.
- 朱建江, 张璐, 杨焰海, 刘振宇. 2024. 华北克拉通古元古代石墨矿成因研究进展与问题. *岩石学报*, 40(10): 3257~3280.

Relationship between graphite deposit formation and Earth surface environment evolution: A case from the Mesoproterozoic strata in the North China Craton

SHEN Weibing^{*1,2)}, JIANG Fujie¹⁾, HU Tao¹⁾, CHEN Di¹⁾, ZHENG Xiaowei¹⁾,
XIAO Xiao¹⁾, WANG Mengyang¹⁾

1) *College of Earth Sciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;*

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

** Corresponding author: swb560316@126.com*

Abstract

Research on the metallogenic process of Mesoproterozoic graphite deposits in the North China Craton is relatively limited, which has constrained breakthroughs in graphite exploration within the Mesoproterozoic strata. Based on previous research, this study, from the perspective of Earth's surface environmental evolution, analyzes the metallogenic conditions of graphite deposits in the Mesoproterozoic strata of the North China Craton, identifies the main controlling factors of graphite mineralization, and discusses target areas for graphite deposits. The results indicate: ① During the Mesoproterozoic, the North China Craton experienced continuous extension and rifting, forming the Helan-Xiong'er, Yanliao, and Zhaertai-baiyunebo rift systems, which provided extensive depositional space for carbon-rich protoliths of graphite deposits. ② The Mesoproterozoic atmosphere oxygenation event was accompanied by innovations in marine species and a surge in biological productivity, supplying the substantial material for the burial of organic carbon and the formation of carbon-rich protoliths in the North China Craton. ③ Regional dynamic thermal flow in the Meso-Neoproterozoic rift zones generated regional metamorphism, providing sufficient temperature and pressure to activate carbonaceous material in the protoliths, forming graphite crystals. Through multiple stages of magmatic thermal contact metamorphism, graphite crystal nuclei gradually enlarged, and their quality continuously improved, developing into large-scale deposits. Comprehensive research suggests that favorable metallogenic zones are formed where Mesoproterozoic organic-rich protolith deposition areas overlap with high-temperature and high-pressure metamorphism belts in the North China Craton. Within these zones, magmatic thermal contact metamorphism belts represent promising exploration targets for high-quality crystalline graphite deposits.

Key words: graphite deposit; Mesoproterozoic; carbon enrichment; metamorphism; North China Craton