引用格式：张拴宏，2025. 中国境内大氧化事件的地质记录：进展、问题及展望[J]. 地质力学学报，31（5）：1063−1082. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025135

Citation: ZHANG S H，2025. Geological records of the Great Oxidation Event (GOE) in China: Progress, challenge, and opportunity[J]. Journal of Geomechanics，31（5）：1063−1082. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025135

中国境内大氧化事件的地质记录：进展、问题及展望

张拴宏[1,2,3]

ZHANG Shuanhong[1,2,3]

1. 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081；
2. 深地探测与矿产勘查全国重点实验室，北京 100081；
3. 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室，北京 100081

1. *Institute of Geomechanics*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100081, *China*;
2. *State Key Laboratory of Deep Earth and Mineral Exploration*, *Beijing* 100081, *China*;
3. *Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction*, *Ministry of Natural Resources*, *Beijing* 100081, *China*

Geological records of the Great Oxidation Event (GOE) in China: Progress, challenge, and opportunity

Abstract: ［**Objective**］The Great Oxidation Event (GOE) during the early Paleoproterozoic represents one of the most significant geological events in Earth’s history and has profound impacts on Earth’s surface environment, biological evolution, and the formation of mineral resources and energy reserves. Chinese scholars innovatively proposed the hypothesis of a dramatic shift in Earth's surface environment at around 2.3 Ga in the late 1980’s, mainly based on sedimentary records from the North China Craton and global correlations. However, due to the pervasive deformation, the high-grade metamorphism, and the poor continuity of the Paleoproterozoic sedimentary sequences in China, most critical achievements in the GOE research obtained over the past two decades have predominantly relied on the well-preserved overseas geological records from South Africa, Western Australia, North America, and Northern Europe. ［**Methods**］Geological and geochemical research over the last decade in China has identified some relatively complete sedimentary records of the GOE from the North China and Yangtze cratons, such as the "North Liaohe Group" in the Anshan area of northeastern Liaoning Province, the lower Fanhe Group (Sanchazi Group) in the Fanhe Basin of Tieling, the Hutuo Group in the central part of the North China Craton, and the Yimen Group in central Yunnan Province on the southwestern margin of the Yangtze Craton. Evidence related to the GOE has also been documented from the late Paleoproterozoic crustal-derived carbonatites on the southeastern margin of the Tarim Craton. These discoveries provide crucial opportunities for studying the GOE and the Lomagundi-Jatuli Event (LJE) in China. ［**Results**］Compared with the Paleoproterozoic sections used for GOE studies overseas, most of the Paleoproterozoic sequences in China were deposited after 2.2 Ga, and generally lack geological records from the early stage of the GOE (2.43～2.2 Ga). Notably, the Paleoproterozoic successions in northeastern North China Craton and the southwestern Yangtze Craton are characterized by great thickness and low metamorphic grade, offering invaluable opportunities for investigating the middle- to late-stage evolutionary processes of the GOE (2.2～2.06 Ga) in China. ［**Conclusion**］Future research on the GOE and LJE records in China should focus on: (1) the depositional environment and genesis of Paleoproterozoic black shales and their relationship with the positive carbon isotopic excursions in marine carbonates; (2) the mechanisms for termination of the Lomagundi-Jatuli marine

基金项目：国家自然科学基金项目（U2244213，41920104004，41725011）；中国地质科学院基本科研业务费项目（JKYZD202320）

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U2244213, 41920104004 and 41725011), and the Fundamental Research Fund of Chinese Academy of Geological Sciences (Grant No. JKYZD202320).

第一作者：张拴宏（1974—），男，研究员，主要从事大地构造学及前寒武纪地质学研究。Email：tozhangshuanhong@163.com

收稿日期：2025−09−15；**修回日期**：2025−09−26；**录用日期**：2025−10−23；**网络出版日期**：2025−10−28；**责任编辑**：范二平

carbonate positive carbon isotopic excursion; (3) integrated chemostratigraphy based on marine carbonate carbon-oxygen isotopes and geochronological studies for regional stratigraphic correlation; (4) the effects of metamorphism on the carbon-oxygen isotope composition of marine carbonates; (5) the behavior of carbon and oxygen isotopes during the anatexis of marine carbonates to form crust-derived carbonatites; and (6) the use of multidisciplinary integrated methods and new geological-geochemical proxies for studying the GOE and LJE. [**Significance**] Such studies based on geological records in China will provide a more comprehensive understanding of the mechanism, timing, and resource-environmental effects of the GOE and LJE during the early Paleoproterozoic.

Keywords: Great Oxidation Event (GOE); Lomagundi–Jatuli Event (LJE); Earth's habitability; Paleoproterozoic sedimentary record; atmosphere–ocean environment

摘　要：发生在古元古代早期的大氧化事件（Great Oxidation Event，GOE）是地球演化历史上里程碑式的重大地质事件，对表生环境、生物演化及矿产资源和能源矿产的形成均具有深远的影响。虽然中国学者基于华北克拉通古元古代沉积记录及全球对比，在20世纪80年代后期较早地提出了古元古代早期（～2.3 Ga）地球表生环境突变的创新性观点，但由于中国境内古元古代沉积地层普遍遭受后期变形变质作用改造且连续性差，近20多年来大氧化事件的重要成果均是基于南非、西澳、北美及北欧等境外地质记录的研究。近10多年来，中国境内的华北克拉通及扬子克拉通等地陆续发现了一些较为完整的大氧化事件的沉积记录，如华北克拉通北东部辽宁鞍山地区“北辽河群”和铁岭凡河盆地凡河群下部（三岔子群）、华北克拉通中部的滹沱群及扬子克拉通西南缘滇中地区的易门群；在塔里木克拉通东南缘古元古代晚期壳源火成碳酸岩内也发现了一些大氧化事件记录的信息。这些发现为在中国境内开展大氧化事件研究提供了重要机遇。相对国外古元古代地层剖面，中国境内普遍缺失大氧化事件早期（2.43～2.2 Ga）的地质记录，大部分地层均沉积于2.2 Ga之后，特别是华北克拉通北东部及扬子克拉通西南缘的古元古代地层厚度大，变质程度较低，具有开展大氧化事件从中期至结束（2.2～2.06 Ga）演化过程研究的地域优势。未来需要在古元古代黑色页岩沉积环境、成因及其与海相碳酸盐岩碳同位素组成正漂移的关系，洛马贡迪–贾图利事件末期碳同位素组成正漂移结束的原因，碳–氧同位素化学地层与年代学相结合开展区域地层对比，变质作用对海相碳酸盐岩碳–氧同位素组成的影响，海相碳酸盐岩经历深熔作用形成壳源火成碳酸岩过程中碳–氧同位素变化行为，以及大氧化事件及洛马贡迪–贾图利事件的多学科综合研究及新地质–地球化学指标等方面开展深入研究，以便为更全面认识大氧化事件的成因机制、起始时限及资源环境效应提供依据。

关键词：大氧化事件；洛马贡迪–贾图利事件；地球宜居性；古元古代沉积记录；大气–海洋环境

中图分类号：P597.2; P535; P56　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2025)05−1063−20

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025135

0　引言

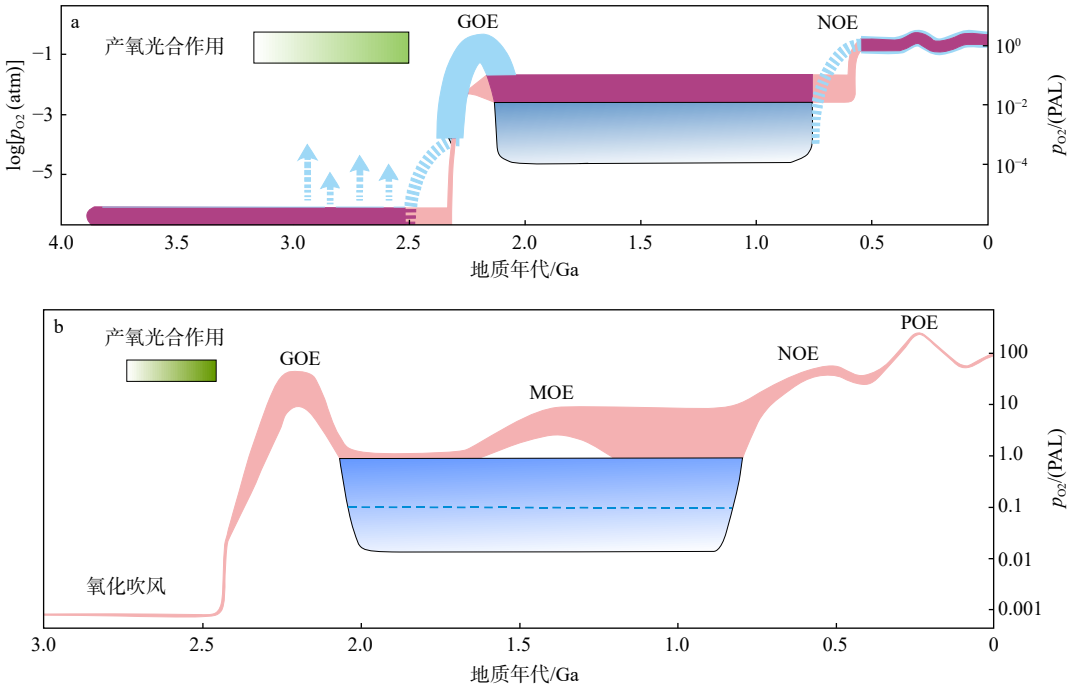
地球表层环境的含氧量是影响地球宜居性及生物演化的重要因素之一(黄建平等, 2021)。在地球演化历史上,氧气的出现对表生环境及生物演化均有深远的影响,深入认识地质历史时期地球表层氧气含量及其变化对理解宜居地球的形成及演化具有重要意义(罗根明等, 2022)。早期地球的大气圈是无氧或者贫氧的,而现代地球的大气圈是富氧的,因此地球的大气圈何时、如何由无氧或贫氧转变为富氧状态一直是国内外关注的热点和前沿科学问题之一(Kasting, 1993; Holland, 1999, 2006; Bekker et al., 2004; Kump, 2008; Lyons et al., 2014)。

发生在古元古代早期的大氧化事件(Great Oxidation Event, GOE)是地球演化历史上里程碑式的重大地质事件,对表生环境、生物演化及矿产资源和能源矿产的形成均具有深远的影响。大氧化事件期间,大气氧含量显著上升,表生环境发生重大变化,这些变化被广泛记录在古元古代沉积地层中,是研究大氧化事件的主要地质记录。因此,通过全球不同地区古元古代沉积地层的地质–地球化学指标研究,可以为认识大氧化事件的形成及演化提供重要依据。

1　大氧化事件概况

大氧化事件代表了地球演化历史上第一次大

气氧含量显著上升的重大地质事件(图 1)，导致了地球环境发生了一系列重大变化，如沉积记录中还原性碎屑矿物(如碎屑黄铁矿、沥青铀矿)的消失、红层等氧化相沉积的出现、富有机质黑色页岩的沉积及石墨矿床的出现、第一次大冰期的出现、硫同位素非质量分馏信号的消失及海相碳酸盐岩碳同位素组成($\delta^{13}C_{carb}$)正漂移事件等(图 2)。其中，该时期的 $\delta^{13}C_{carb}$ 正漂移事件是地球演化历史上幅度最大、持续时间最长的事件，被称为洛马贡迪–贾图利事件(Lomagundi-Jatuli Event, LJE)。该事件被认为是大氧化事件峰值时期的典型代表(罗根明等，2022)。



p_{O_2}—大气氧分压；atm—标准大气压；PAL—现代大气氧含量水平；GOE—大氧化事件；MOE—中元古代氧化事件；NOE—新元古代氧化事件；POE—古生代氧化事件

a—传统的二阶段大气增氧模式曲线(据 Lyons et al., 2014 修改)；b—修正的多阶段大气增氧模式曲线(据张水昌等，2022 修改)

图 1　地球演化历史上大气增氧曲线

Fig. 1　Curves showing the evolution of Earth's atmospheric oxygen content through time

(a) The classical, two-step atmospheric O_2 evolution curve (after Lyons et al., 2014); (b) The revised multi-step atmospheric O_2 evolution curve (after Zhang S C et al., 2022)

PO_2—atmospheric partial pressure of O_2; atm—standard atmospheric pressure; PAL—present atmospheric level; GOE—Great Oxidation Event; MOE—Mesoproterozoic Oxidation Event; NOE—Neoproterozoic Oxidation Event; POE—Paleozoic Oxidation Event

由于大氧化事件是一个影响深远的全球性突变事件，其地质记录广泛分布在南非、西澳、北美及北欧等地，发育了较为完整的大氧化事件期间的沉积剖面，其中南非卡普瓦尔(Kaapvaal)克拉通东部的 Transvaal 盆地研究最为详细，发表了一系列有重要影响力的成果，为确定大氧化事件的成因、起止时限及其与其他重大地质事件的关系提供了重要依据(Bekker et al., 2004; Guo et al., 2009; Luo et al., 2016, 2018; Gumsley et al., 2017; Poulton et al., 2021; Alcott et al., 2022; Izon et al., 2022; Ostrander et al., 2024)。相关学者将大氧化事件的启动时间限定在 2.43 Ga(Gumsley et al., 2017)或 2.33～2.32 Ga(Bekker et al., 2004; Luo et al., 2016; Poulton et al., 2021)，而其结束时限则被限定在 2.06 Ga(Melezhik et al., 2007)。洛马贡迪–贾图利事件发生时限的最大范围被约束在 2.33～2.06 Ga，而最短持续时间为 2.22～2.10 Ga(Martin et al., 2013a, 2013b)。

虽然诸多国外学者从 20 世纪 60 年代开始就注意到了古元古代早期地球增氧事件(Holland, 1962; Cloud, 1968; Roscoe, 1973; Walker et al., 1977; Kasting, 1987)，但大氧化事件这一术语最早由 Holland (1999) 正式提出。中国学者基于华北克拉通的地质记录

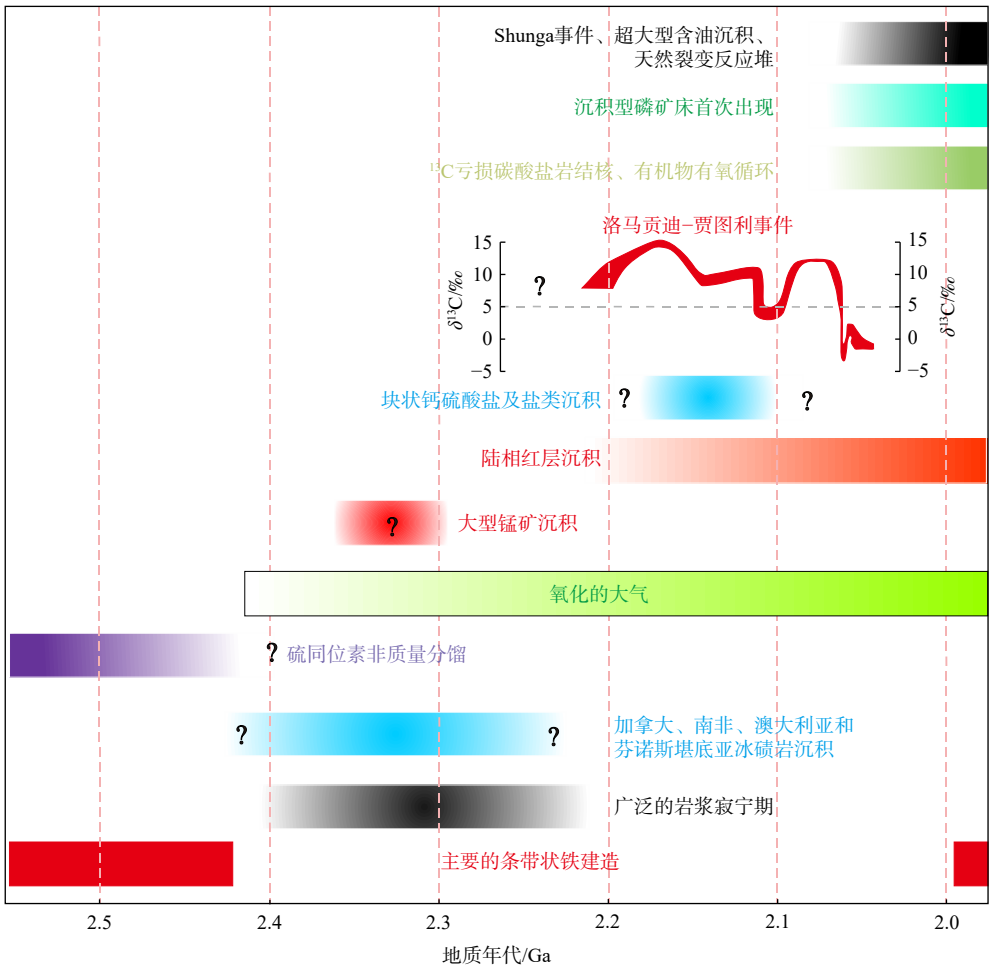


图2 古元古代早期全球重大古环境及构造事件示意图（Melezhik et al.，2013）

Fig. 2 Major global paleoenvironmental and tectonic events during the early Paleoproterozoic (after Melezhik et al., 2013)

及全球对比，在20世纪80年代后期较早地提出了2.3 Ga前后地质环境突变或灾变的创新性观点（陈衍景，1987，1990；陈衍景等，1991），但由于中国境内古元古代沉积记录主要位于造山带内，受后期变质变形影响较大，地层连续性不佳，极大地制约了中国境内大氧化事件的研究。另外，由于中国境内早期发现的古元古代海相碳酸盐岩（如辽河群大石桥组、凡河群关门山组、荆山群野头组、滹沱群中下部等）的$\delta^{13}C_{carb}$正异常较弱（$\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$一般都在5‰左右，大多数剖面测得的$\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$正漂移幅度仅为0‰～3‰）（汤好书等，2008；Tang et al., 2011；Chen and Tang, 2016；Chen et al., 2023），仅略高于正常海相碳酸盐岩碳同位素值（$\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$=0.4‰±2.7‰，Schidlowski et al., 1975；$\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$=0.5‰±2.5‰，李凯月等，2020），与全球其他地区洛马贡迪–贾图利事件期间大量出现的8‰以上典型的$\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$正漂移记录明显不同，难以明确是全球洛马贡迪–贾图利事件可靠的地质记录（Melezhik et al., 2013；Martin et al., 2013b）。近年来，中国境内的华北克拉通及扬子克拉通等地相继发现了一些较为完整的大氧化事件的沉积记录，在塔里木克拉通东南缘也发现了一些大氧化事件记录的信息，为在中国境内开展大氧化事件研究及全球对比提供了重要机遇。文章将对中国境内大氧化事件的地质记录及研究进展进行总结评述，并对未来的研究方向进行展望。

2 华北克拉通大氧化事件的地质记录

华北克拉通是中国境内大氧化事件地质记录最为齐全、研究程度最高的地区。其古元古代沉积记录主要分布在胶–辽–吉带、孔兹岩带、华北中部造山带等古元古代造山带内，在龙岗地块的凡河盆地也有古元古代沉积地层出露（图3）。由于这些古元古代的沉积地层普遍遭受了变形及变质作用改造，其地层层序、沉积时代及区域对比一般都存在

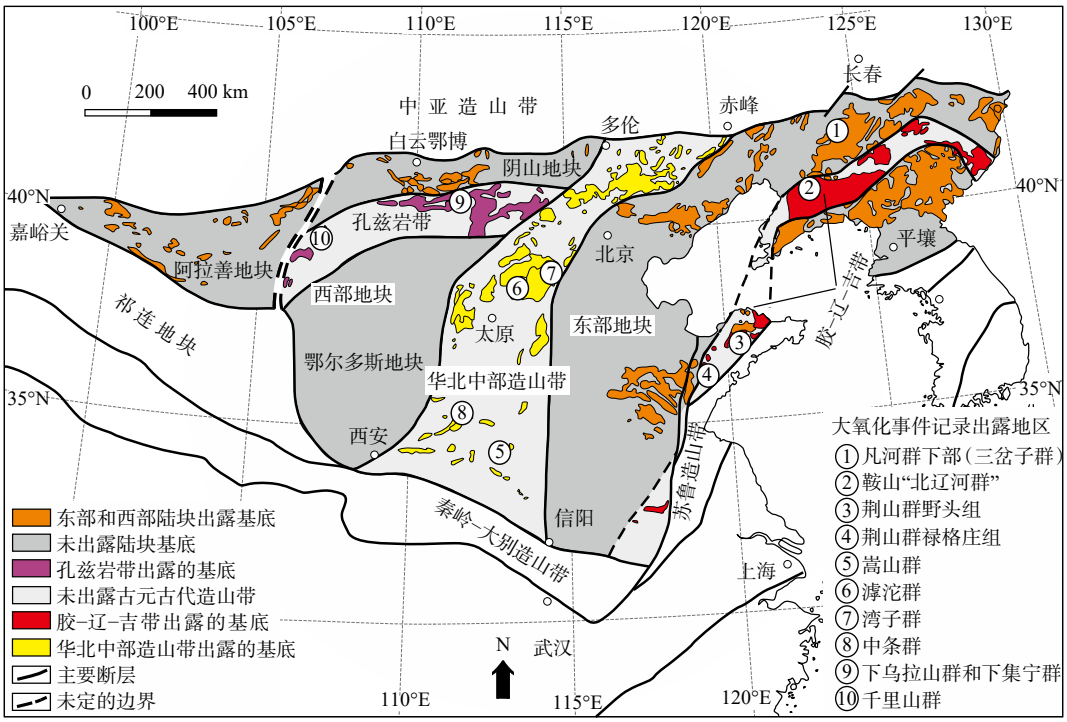


图 3　华北克拉通前寒武纪构造单元划分及古元古代大氧化事件沉积记录分布地区示意图（据王宏宇等，2024 修改；底图据 Zhao et al.，2012）

Fig. 3　Tectonic sketch map of the NCC showing the main Precambrian tectonic units and geological records of the GOE (modified from Wang et al., 2024; based map after Zhao et al., 2012)

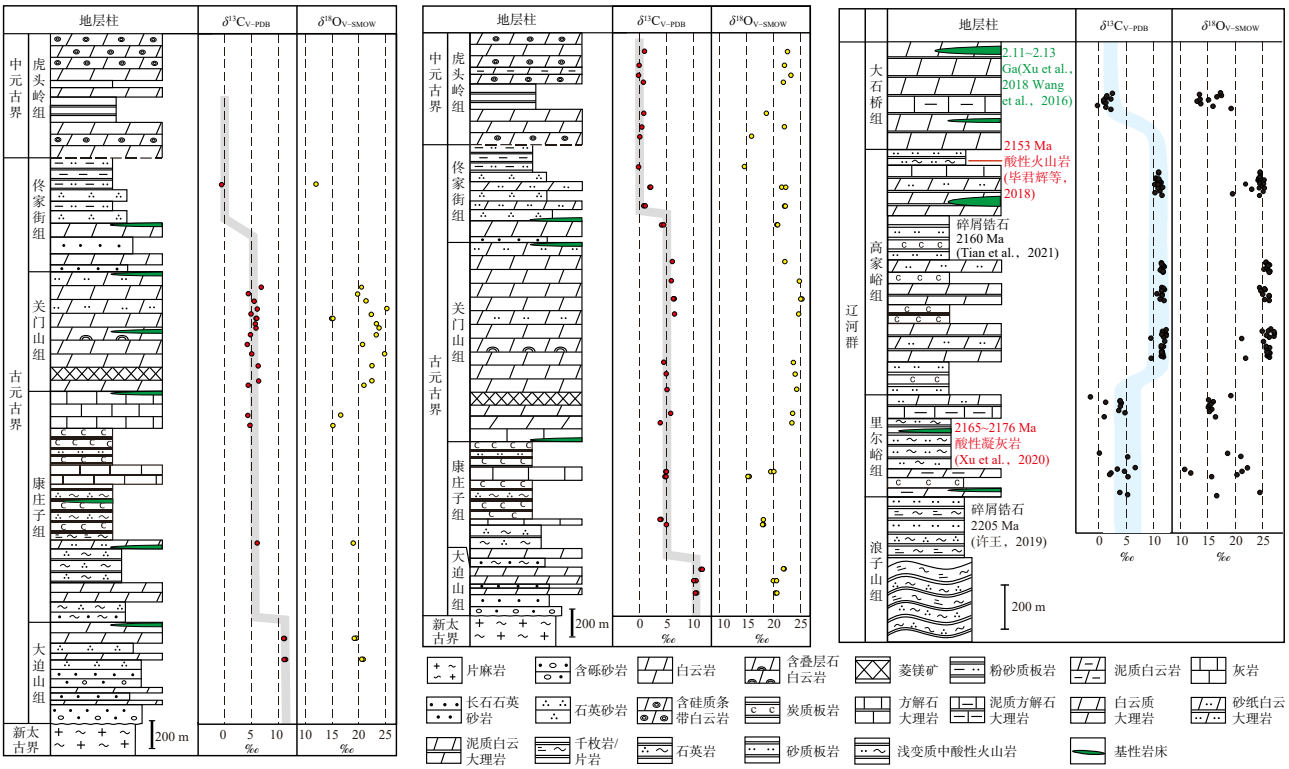
较大争议。

2.1　辽北凡河盆地

位于辽北铁岭以东的凡河盆地沉积了近 9000 m 厚、由碎屑岩和碳酸盐岩及少量基性火山岩组成的浅变质元古宙地层，其下部的关门山组还赋存有菱镁矿和铅锌矿，并被大量的基性岩床侵入（辽宁省地质矿产勘查开发局，1997；陈树旺等，2006）。这套地层序列呈角度不整合覆盖在新太古代英云闪长质–奥长花岗质–花岗闪长质（TTG）片麻岩或表壳岩之上，顶部被殷屯组砂砾岩及板岩不整合覆盖（辽宁省地质矿产勘查开发局，1997；陈树旺等，2006）。凡河盆地元古宙地层早期被称为凡河群（或汎河群），后被自下而上划分为三岔子群、树芽屯群和会试屯群。其中，三岔子群包括大迫山组、康庄子组和关门山组，树芽屯群包括佟家街组、虎头岭组、二道沟组、石门组、宋家沟组和杨士屯组，会试屯群包括于北沟组和腰末台冲组（辽宁省地质矿产勘查开发局，1997；陈树旺等，2006）。三岔子群、树芽屯群和会试屯群的沉积时代长期被认为是中—新元古代，并分别划分到长城系、蓟县系和青白口系（辽宁省地质矿产勘查开发局，1997；陈树旺等，2006），但部分学者依据关门山组白云岩 5‰左右的弱 $\delta^{13}C_{carb}$ 正异常，认为这套地层可能沉积于古元古代大氧化事件期间（汤好书等，2008；Tang et al., 2011）。近年来对侵入到关门山组顶部白云岩中辉绿岩床的锆石 U-Pb 定年结果表明，该岩床侵位时代为 2.06 Ga，说明凡河群下部地层（三岔子群）沉积于 2.06 Ga 之前，即古元古代；结合沉积地层内碎屑岩夹层锆石 U-Pb 定年，将大迫山组、康庄子组、关门山组和佟家街组下部的沉积时代限定在 2.20～2.06 Ga，证实了这些地层沉积于古元古代大氧化事件期间（Cai et al., 2022）。将凡河群下部地层（三岔子群）的沉积时代限定在古元古代大氧化事件期间的推断也与关门山组下部赋存有菱镁矿的事实相吻合（辽宁省地质矿产勘查开发局，1997；陈树旺等，2006）。

碳–氧同位素分析结果显示，辽北凡河盆地不同部位的大迫山组白云岩及砂质白云岩普遍具有 $\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$>10‰的高正异常，最高达 11.7‰，在华北克拉通属首次发现；康庄子组灰岩、关门山组白云岩及佟家街组下部白云岩及砂质白云岩的 $\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ 约为 5‰（图 4a、4b）；而佟家街组上部及不整合覆盖在其上部的虎头岭组、石门组碳酸盐岩则无碳同位素组成正异常，其 $\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ 约为 0‰（Zhang et al.,

2024a)。这些碳同位素组成及其变化与地层层位及沉积时代密切相关，不受沉积相及岩石中碎屑矿物含量的影响，反映了其沉积期原始的碳–氧同位素组成(Zhang et al., 2024a)。这些具有碳同位素组成正异常的碳酸盐岩的沉积时代与芬诺斯堪底亚(Fennoscandia)、怀俄明(Wyoming)、苏必利尔(Superior)、卡普瓦尔(Kaapvaal)、拉普拉塔(Rio de la Plata)、圣弗朗西斯科(São Francisco)、刚果(Congo)和皮尔巴拉(Pilbara)等克拉通发现的具碳同位素组成正异常的海相碳酸盐岩相一致，也证明了洛马贡迪–贾图利事件的发生具有全球准同时性(Zhang et al., 2024a)。凡河群下部具有 $\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ 正异常的地层厚度超过3000 m，变质程度低，层序较为完整，是华北克拉通保存最好的古元古代大氧化事件及洛马贡迪–贾图利事件的地质记录，为在中国境内开展大氧化事件研究提供了重要的沉积记录依据(Zhang et al., 2024a)。



a—凡河盆地北东部(据 Zhang et al., 2024a 修改)；b—凡河盆地南西部(据 Zhang et al., 2024a 修改)；c—鞍山地区“北辽河群”(据王宏宇等，2024 修改)

图4 凡河盆地凡河群下部及鞍山地区“北辽河群”碳–氧同位素沿剖面变化曲线

Fig. 4 Lithostratigraphic column and C–O isotopes of lower Fanhe Group in Fanhe Basin and the “North Liaohe Group” in the Anshan area

(a) Northeastern Fanhe Basin (modified after Zhang et al., 2024a); (b) Southwestern Fanhe Basin (modified after Zhang et al.,2024a); (c) The “North Liaohe Group” in the Anshan area (modified after Wang et al., 2024)

2.2 胶–辽–吉带

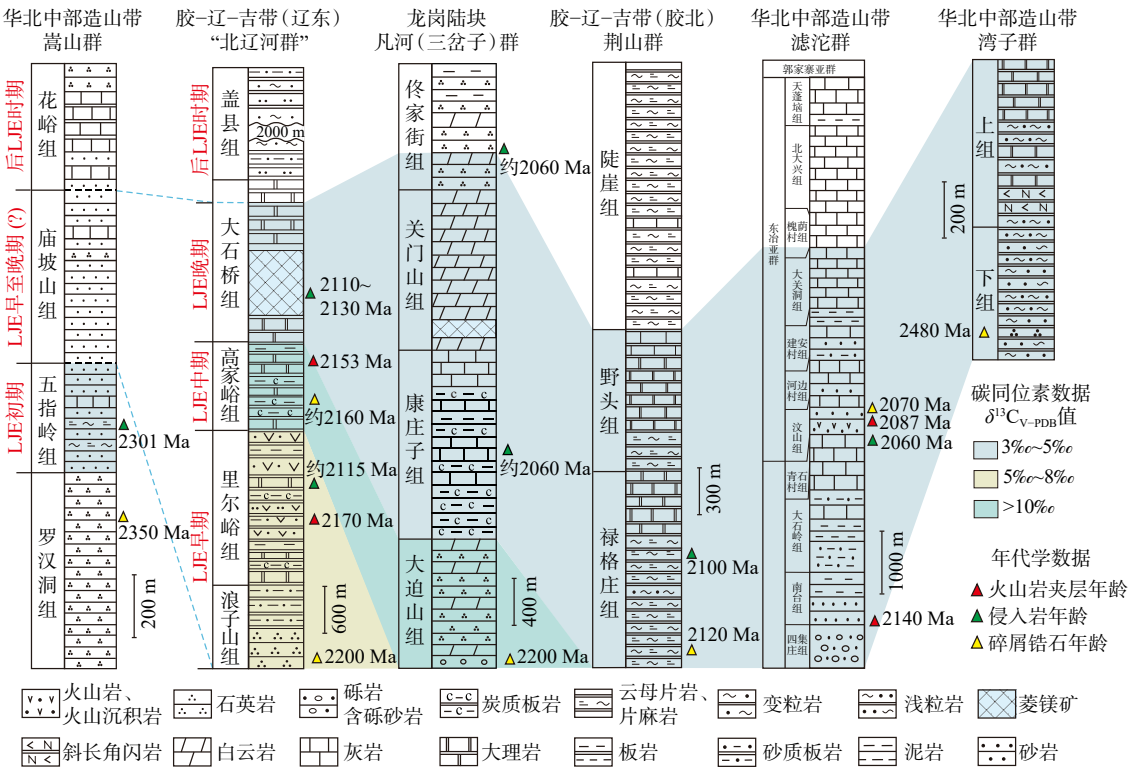
胶–辽–吉带包括北部的辽–吉带和南部的胶北地区(图1)。辽–吉带古元古代沉积地层包括辽宁东部的辽河群以及吉林南部的集安群和老岭群。辽河群自下而上被划分为浪子山组、里尔峪组、高家峪组、大石桥组和盖县组，其中里尔峪组、高家峪组、大石桥组内均有多层较大规模的基性岩床侵位，其斜锆石 U-Pb 年龄为 2115 Ma(Wang et al., 2016)。海城及大石桥地区大石桥组第3段赋存有世界最大规模的菱镁矿(蒋少涌等，2004；胡古月等，2015)。依据变质、变形程度的不同，辽河群大致以盖县–析木–塔子岭–磙阳一带为界，分为“北辽河群”和“南辽河群”(辽宁省地质矿产局，1989)。“北辽河群”主要位于辽–吉带的北西边缘，地层累计厚度较大，整体变质、变形较弱，多为绿片岩相–低角闪岩相，局部变质程度更低(王惠初等，2015；刘福来等，2015)。

“南辽河群”变质程度普遍较高，部分区域甚至可达麻粒岩相（刘平华等，2017; Liu et al., 2019），且不发育浪子山组，地层累计厚度相对较小。集安群自下而上包括蚂蚁河岩组、荒岔沟岩组和大东岔岩组，在层序上被认为可与南辽河群进行对比（贺高品和叶慧文，1998; 杨崇辉等，2018）。老岭群自下而上包括达台山组/林家沟岩组、珍珠门组、花山组、临江组和大粟子组，在层序上被认为可与北辽河群进行对比（贺高品和叶慧文，1998; 杨崇辉等，2018）。由于普遍经受了变质变形改造，关于集安群和老岭群的地层划分、接触关系和区域对比均存在很大争议（吉林省地质矿产局，1988; 吉林省地质矿产局，1997; 贺高品和叶慧文，1998; 杨崇辉等，2018）

相关学者曾对辽东地区“北辽河群”大石桥组大理岩及其内赋存的菱镁矿开展过碳−氧同位素研究，发现少量大理岩样品具有 $\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ 约为 5‰的弱正异常，其余样品 $\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ 正异常不明显（陈从喜等，2003; 蒋少涌等，2004; 汤好书等，2009a, 2009b; 宋会侠等，2011; 胡古月等，2015）。部分学者认为大石桥组可能沉积于洛马贡迪−贾图利事件期间，为大氧化事件及洛马贡迪−贾图利事件在华北克拉通的地质记录，并提出部分大理岩样品的 $\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ 正异常不明显可能与后期变质及蚀变作用有关（汤好书等，2009a, 2009b）。笔者及团队 2021 年最先发现辽东鞍山地区下达河至河栏镇公路边、汤河水库以南的高家峪组地层内 3 件大理岩样品具有 $\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ 为 10.4‰～10.8‰高碳同位素组成正异常，此后详细的横穿里尔峪组、高家峪组和大石桥组的剖面采样及碳−氧同位素分析揭示了鞍山地区下达河至河栏镇“北辽河群”碳酸盐岩具有明显的碳同位素正异常及其变化规律（王宏宇等，2024）。其中高家峪组具有高碳同位素组成正异常，其 $\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ 为 8.6‰～12.4‰，$\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$ 为 17.9‰～27.4‰（$\delta^{18}O_{V\text{-}PDB}$ 为 −12.6‰～−3.4‰）；里尔峪组大理岩样品的 $\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ 变化于 −1.5‰～6.6‰，$\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$ 变化于 9.0‰～24.8‰（$\delta^{18}O_{V\text{-}PDB}$ 为 −21.2‰～−5.9‰）；大石桥组大理岩样品的 $\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ 变化于 −0.6‰～3.4‰，$\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$ 变化于 13.1‰～19.4‰（$\delta^{18}O_{V\text{-}PDB}$ 为 −17.3‰～−11.2‰; 王宏宇等，2024）。

碳−氧同位素对比结果显示，高家峪组碳酸盐岩除少量靠近 2.1 Ga 基性岩床的样品外，大部分样品具有与早前寒武纪海相碳酸盐岩一致的氧同位素组成（$\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$=20‰～25‰）（Melezhik et al., 1999），受后期改造弱，较好地保留了原始沉积时期碳−氧同位素组成信息；而里尔峪组、大石桥组样品 $\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$ 变化范围较大（9.0‰～24.8‰），表明部分样品普遍遭受了后期改造作用的影响，其 $\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ 值相对未受改造样品有 1‰～3‰的降低（王宏宇等，2024）。扣除区域变质及接触变质等后期地质作用的影响，辽河群里尔峪组沉积时其碳酸盐岩碳同位素组成正漂移幅度为 5‰～6‰; 高家峪组沉积时达到最高，为 11‰左右；大石桥组下部沉积时具有 3‰～5‰的弱正异常，而其上部沉积时碳同位素组成正漂移则不明显（图 4c）。碳−氧同位素与主微量元素组成及沉积相分析结果对比表明，辽河群碳酸盐岩原始碳同位素组成漂移幅度受沉积相及岩性变化影响很弱，主要受其层位及沉积时代控制（王宏宇等，2024）。结合已有年代学结果（王宏宇等，2024），碳同位素化学地层特征表明鞍山地区里尔峪组、高家峪组和大石桥组下部沉积于大氧化事件期间，而大石桥组上部及盖县组则沉积于大氧化事件之后（图 5）。辽河群最底部的浪子山组主要由较粗的浅变质陆源碎屑沉积岩组成，缺少碳酸盐岩夹层，但已有碎屑锆石 U-Pb 定年（Luo et al., 2004; 许王，2019）显示其沉积时代晚于 2.2 Ga，也是大氧化事件在华北克拉通的记录之一。鞍山地区位于胶−辽−吉带北西侧边缘，浪子山组、里尔峪组、高家峪组、大石桥组地层厚度超过 4000 m，地层层序相对完整，变质程度相比胶−辽−吉带中部及南部明显偏低，是华北克拉通上出露的又一处较为完整的大氧化事件及洛马贡迪−贾图利事件的地质记录。此外，碳−氧同位素分析结果显示，辽−吉带中部青城子金−多金属矿集区不含矿、并被 2.1 Ga 左右变质基性岩床广泛侵入的厚层状大理岩具有 $\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ 约为 5‰的正异常，显示其沉积于洛马贡迪−贾图利事件期间；而其上部含金−多金属矿、无基性岩床侵入的中薄层大理岩则无明显碳同位素组成正异常，其原岩沉积于洛马贡迪−贾图利事件之后（高森等，2024）。

华北克拉通东部的胶北地区位于胶−辽−吉带南部，古元古代地层包括荆山群和粉子山群，一般认为集安群可与荆山群对比，老岭群可与粉子山群对比（杨崇辉等，2018）。荆山群自下而上可分为禄格庄组、野头组和陡崖组，大多经历了高角闪岩相−麻粒岩相变质作用，局部可见高压麻粒岩（周喜文等，2007）；粉子山群自下而上被划分为小宋组、祝



LJE—洛马贡迪-贾图利事件

图5 基于碳-氧同位素化学地层及年代学的华北克拉通古元古代沉积地层对比（据王宏宇等，2024修改）

Fig. 5 Paleoproterozoic stratigraphic correlation for the North China Craton based on carbon isotopic and geochronological data (modified after Wang et al., 2024)

家介组、张格庄组、巨屯组和岗嵛组，变质作用为绿片岩相-角闪岩相，其变质程度明显低于荆山群（刘平华等，2011），其主体沉积时代可能为2.1～1.9 Ga（陶鹏等，2023）。荆山群和粉子山群均不整合覆盖于太古宙岩系之上，但接触带被后期近顺层的韧性剪切带所改造，二者被认为是同时异地异相关系，但没有发现直接接触关系（王沛成，1995）。相关学者对不同地区荆山群内大理岩夹层开展了碳-氧同位素研究（陈衍景等，2000；李凯月等，2020；Chen et al., 2024），结果显示，荆山群下部经历了高角闪岩相-麻粒岩相变质的禄格庄组大理岩夹层其$\delta^{13}C_{V-PDB}$为−0.8‰～9.6‰，$\delta^{18}O_{V-SMOW}$为8.2‰～22.7‰，部分样品氧同位素显示遭受了明显的后期改造，受改造较弱的样品（$\delta^{18}O_{V-SMOW}$>18‰）普遍具有$\delta^{13}C_{V-PDB}$为4‰～9.6‰的正异常（李凯月等，2020；Chen et al., 2024）；野头组大理岩$\delta^{13}C_{V-PDB}$为−3.7‰～5.4‰，$\delta^{18}O_{V-SMOW}$为4.5‰～18.7‰，氧同位素受后期改造明显（Chen et al., 2023）。荆山群下部禄格庄组和野头组中受后期改造较弱（$\delta^{18}O_{V-SMOW}$>18‰）大理岩均具有$\delta^{13}C_{V-PDB}$为4‰～9.6‰的碳同位素组成正异常，表明这些岩石可能沉积于洛马贡迪-贾图利事件晚期的2.1～2.06 Ga，是大氧化事件在胶-辽-吉带南部的地质记录。粉子山群小宋组、祝家介组中大理岩夹层较少，张格庄组中虽然有大理岩夹层，但未见已发表的碳-氧同位素数据，目前尚不能确定粉子山群是否是大氧化事件的记录，还需要进一步开展工作。

2.3 华北中部造山带

华北中部造山带内古元古代沉积地层主要包括五台地区的滹沱群，阜平-赞皇地区的湾子群和甘陶河群，吕梁地区的界河口岩群、吕梁群、岚河群及野鸡山群，中条山地区的中条群和绛县群及华北南缘的嵩山群等，均经历了不同程度的变质变形作用的改造（杨崇辉等，2018）。年代学及碳-氧同位素分析结果显示，滹沱群、湾子群、中条群及嵩山群中可能保留了大氧化事件的地质记录。

滹沱群自下而上包括豆村、东冶和郭家寨3个亚群，被认为是华北克拉通最为典型的古元古代地层，相关学者对其开展了大量的年代学及碳-氧同位素研究工作（钟华等，1993；钟华和马永生，1995；杜利林等，2010，2011；孔凡凡等，2011；She et al.,

2016; Peng et al., 2017, 2023; 陈威宇和陈衍景, 2018; 陈威宇等, 2018; Chen et al., 2019; Ouyang et al., 2020)。豆村亚群自下而上被依次划分为四集庄组、南台组、大石岭组和青石村组; 东冶亚群自下而上包括纹山组、河边村组、建安村组、大关洞组、槐荫村组、北大兴组和天蓬垴组; 郭家寨亚群自下而上包括西河里组、黑山背组和雕王山组。滹沱群底部的四集庄组玄武安山岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄显示滹沱群沉积开始于 2.14 Ga 左右(杜利林等, 2010, 2011)。四集庄组为一套以下伏的五台群和五台地区花岗岩为主要砾石成分的变质砾岩, 被认为是沉积于冰水过渡带环境的冰碛岩, 是目前发现的休伦冰期在华北克拉通唯一的记录(陈威宇等, 2018; Chen et al., 2019)。碳−氧同位素研究显示, 滹沱群中下部层位大石岭组、青石村组、纹山组、河边村组、建安村组和大关洞组碳酸盐岩的 $\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ 范围为−3.6‰～3.5‰, 且大多数样品氧同位素改造较弱($\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$ 为 18.2‰～27.6‰), 下部的大石岭组和青石村组碳酸盐岩普遍具有 $\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ 为 0.3‰～3.5‰的弱碳同位素正异常(孔凡凡等, 2011; She et al., 2016; 陈威宇和陈衍景, 2018), 可能沉积于大氧化事件及洛马贡迪−贾图利事件晚期(图 5); 而上部层位槐荫村组开始出现明显负漂移, $\delta^{13}C_{carb}$ 为 −3.7‰～0‰, 可能沉积于大氧化事件之后, 代表了 Shunga 碳同位素负漂移事件的开始(She et al., 2016; Ouyang et al., 2020)。因此, 滹沱群中下部的四集庄组、南台组、大石岭组、青石村组、纹山组、河边村组、建安村组和大关洞组为大氧化事件在华北克拉通中部的地质记录, 其沉积时代为 2.14～2.06 Ga。

湾子群主要岩性为浅粒岩、变粒岩、斜长角闪岩、钙硅酸盐岩及大理岩, 普遍遭受深熔作用的影响, 依据岩性和沉积旋回特征可分为下组和上组 2 个组(杨崇辉等, 2018), 其沉积时代有 2.1～2.0 Ga(吴昌华等, 2000; Zhao et al., 2002)和 2.2～2.1 Ga (Ren et al., 2013; 杨崇辉等, 2018)等不同的认识。湾子群上组大理岩发育, 在宋家口、长峪等地由于褶皱加厚, 厚度可达 600 m 左右(杨崇辉等, 2018)。碳−氧同位素分析结果显示, 湾子群上组大理岩的 $\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ 为 1.0‰～3.8‰, $\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$ 为 21.9‰～25.0‰, 具有弱的碳同位素组成正异常(宋会侠等, 2011)。前述的碳−氧同位素和年代学结果显示, 湾子群可能沉积于大氧化事件及洛马贡迪−贾图利事件晚期阶段(图 5), 也是大氧化事件在华北克拉通中部的地质记录之一。

中条群广泛分布在中条山地区的闻喜—喜曲一带, 自下而上被划分为界牌梁组、龙峪组、余元下组、篦子沟组、余家山组、温峪组(唐回组)、吴家坪组和陈家山组(山西省地质矿产局, 1989), 其中龙峪组、余元下组、篦子沟组和温峪组内见有基性岩床侵入。中条群余家山组大理岩 $\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ 范围为−0.2‰～0.8‰, $\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$ 为 22.8‰～24.6‰, 未发现明显的碳同位素组成正异常(宋会侠等, 2011)。篦子沟组酸性火山岩的喷发年龄为 2139±10 Ma, 可以限定中条群底部年龄大致始于 2.14 Ga(杨崇辉等, 2018); 侵入到余元下组和篦子沟组接触部位基性岩床的锆石 U-Pb 不一致线上交点年龄为 2086±68 Ma, 大致限定了中条群沉积上限年龄在 2.09 Ga(刘玄等, 2015)。因此, 中条群可能沉积于大氧化事件的晚期阶段, 也是大氧化事件在华北克拉通的地质记录, 但其大理岩缺乏碳同位素组成正异常的原因尚不清楚。

位于中部造山带南部的嵩山群广泛分布在豫西嵩山—箕山地区, 自下而上被划分为罗汉洞组、五指岭组、庙坡山组和花峪组(河南省地质矿产局, 1989)。嵩山群下部与太古宙登封群和花岗质岩石为不整合或断层接触, 其上为中新元古代的五佛山群不整合覆盖。由于缺乏可测年的火山岩夹层, 对嵩山群的时代一直有较大争议。早期利用罗汉洞组和五指岭组最年轻碎屑锆石年龄将嵩山群下部沉积年龄限制在 2.35～1.95 Ga(Liu et al., 2012), 但近年来研究发现的侵入五指岭组基性岩床的侵位时代为 2.3 Ga 左右(Wang et al., 2022), 表明嵩山群下部沉积时代可能为 2.35～2.3 Ga。嵩山群五指岭组和花峪组白云岩碳−氧同位素分析结果显示, 五指岭组 $\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ 范围为−1.0‰～4.2‰, $\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$ 为 10.8‰～23.6‰; 花峪组 $\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ 范围为 −4.2‰～0.8‰, $\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$ 为 21.7‰～25.0‰(Lai et al., 2012)。因此, 嵩山群中下部五指岭组白云岩均有碳同位素组成正异常, 其原始 $\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ 正漂移幅度应不小于 4.2‰, 可能代表了洛马贡迪−贾图利事件最初期阶段(2.33～2.3 Ga)的沉积, 是华北克拉通最早的大氧化事件的地质记录; 而嵩山群上部花峪组无 $\delta^{13}C_{carb}$ 正漂移, 应该是大氧化事件之后的沉积记录(图 5)。

2.4　孔兹岩带

华北克拉通孔兹岩带被认为是阴山地块与鄂

尔多斯地块在1.95～1.90 Ga碰撞形成的造山带（Zhao et al., 2005），其古元古代沉积主要包括上集宁群、上乌拉山群、千里山群、二道凹群及马家店群等，岩石组合主要为富铝片麻岩和含石墨大理岩，均经历了不同程度的变质变形作用的改造（杨崇辉等，2018）。上集宁群、上乌拉山群和千里山群普遍经历了麻粒岩相变质，局部保存有高压麻粒岩和超高温麻粒岩；而二道凹群及马家店群变质程度相对较低，为低角闪岩相和低绿片岩相（沈其韩和张荫芳，1990），变质时代一般在1.95～1.90 Ga（Zhao et al., 2005, 2010; Dong et al., 2007; Yin et al., 2009; 周喜文和耿元生，2009; Wang et al., 2018）。华北克拉通孔兹岩带可能对于理解可能的休伦裂谷事件和相伴随的大氧化事件具有举足轻重的意义（翟明国，2022）。但由于受变质变形改造、层序及接触关系不清等因素的影响，对孔兹岩带内变质沉积岩系的沉积时代的厘定及区域对比有很大不确定性。近20年来大量的年代学数据显示，孔兹岩带原岩沉积时代主要在2.1～1.95 Ga，怀安地区的孔兹岩带可能形成于2.0～1.98 Ga（杨崇辉等，2018）；二道凹群的沉积时代可能为2.0～1.88 Ga（Wan et al., 2018）；马家店群的沉积时代可能晚于2.0 Ga（Peng et al., 2011）；孔兹岩带中部大青山地区原划归为新太古代的下乌拉山群可能沉积于古元古代早期的2.46～2.38 Ga（Dong et al., 2022）。因此，孔兹岩带内的下乌拉山群中可能保留了大氧化事件最早期的一些地质记录，而上集宁群、上乌拉山群和千里山群中则可能保留了少量大氧化事件最晚期的记录；二道凹群及马家店群则是大氧化事件之后的沉积产物。目前未见孔兹岩带内大理岩的碳-氧数据，但由于该带内仅有大氧化事件最早期和最晚期的记录，推测可能存在少量碳同位素组成弱正异常的大理岩，还需开展研究工作予以验证。

如前所述，海相碳酸盐岩碳-氧同位素组成及年代学数据显示，龙岗陆块凡河群下部（三岔子群）、胶-辽-吉带辽河群和荆山群、华北中部造山带的滹沱群、湾子群和嵩山群中均保留了大氧化事件的地质记录（图5）。嵩山群五指岭组可能保存了洛马贡迪-贾图利事件初期的沉积记录（2.35～2.3 Ga）；胶-辽-吉带北西侧鞍山地区“北辽河群”浪子山组、里尔峪组、高家峪组和大石桥组事件中下部保留了洛马贡迪-贾图利事件早期至晚期阶段的沉积记录（2.2～2.06 Ga）；龙岗陆块凡河盆地凡河群下部（三岔子群）大迫山组、康庄子组、关门山组和佟家街组下部则保留了洛马贡迪-贾图利事件中—晚期的沉积记录；胶-辽-吉带南部荆山群、华北中部造山带的滹沱群和湾子群中则保留了洛马贡迪-贾图利事件晚期的沉积记录（图5）。其中，鞍山地区“北辽河群”、铁岭凡河盆地凡河群下部（三岔子群）和五台地区的滹沱群地层厚度大、层序完整且变质程度相对较低，是目前华北克拉通保留最好的大氧化事件和洛马贡迪-贾图利事件的沉积记录。

3 扬子克拉通大氧化事件的地质记录

扬子克拉通早前寒武纪岩石主要分布在其北缘及西南缘，古元古代沉积岩出露面积很小，目前仅有位于扬子克拉通北缘的崆岭杂岩及位于其西南缘滇中地区的易门群内（图6）可能保留了少量大氧化事件的地质记录。

3.1 崆岭杂岩

崆岭杂岩位于扬子克拉通北缘的黄陵穹隆核部，出露面积约330 km^2，代表了扬子克拉通已知的最古老结晶基底（邱啸飞等，2022）。崆岭杂岩的主体形成于古太古代至新太古代，其下部层位经历了强烈变形及角闪岩相到麻粒岩相变质（邱啸飞等，2022）。崆岭杂岩上部为古元古代变质表壳岩，主要岩性包括石榴矽线石石英岩、石墨片岩、变粒岩、长英质片麻岩、大理岩等，具孔兹岩系特征，也经历了角闪岩相到麻粒岩相变质（邱啸飞等，2022; Li et al., 2022; 魏君奇等，2025）。崆岭杂岩上部古元古代变质表壳岩（109°55′E—110°23′E，31°08′N—31°20′N）中大理岩碳-氧同位素分析结果显示，其$\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$范围为0.4‰～11.6‰，$\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$为15.1～23.1‰。其中氧同位素受后期改造弱（$\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$>18‰）的样品普遍具有$\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$为5‰～11.6‰碳同位素组成正异常，因此可能是大氧化事件和洛马贡迪-贾图利事件在扬子克拉通北缘的地质记录（万传辉等，2020; Li et al., 2022）。崆岭杂岩古元古代大理岩中变质锆石的U-Pb年龄为2001±10 Ma（Li et al., 2022），显示大理岩原岩沉积于2.0 Ga之前，但其沉积的下限年龄还缺乏有效限定。

3.2 滇中易门群

位于扬子克拉通西南缘滇中元江、易门、东川地区的易门群（102°00′E—102°10′E，24°40′N—24°45′N）是2016年以来区调工作新建立的地层单元，自下而

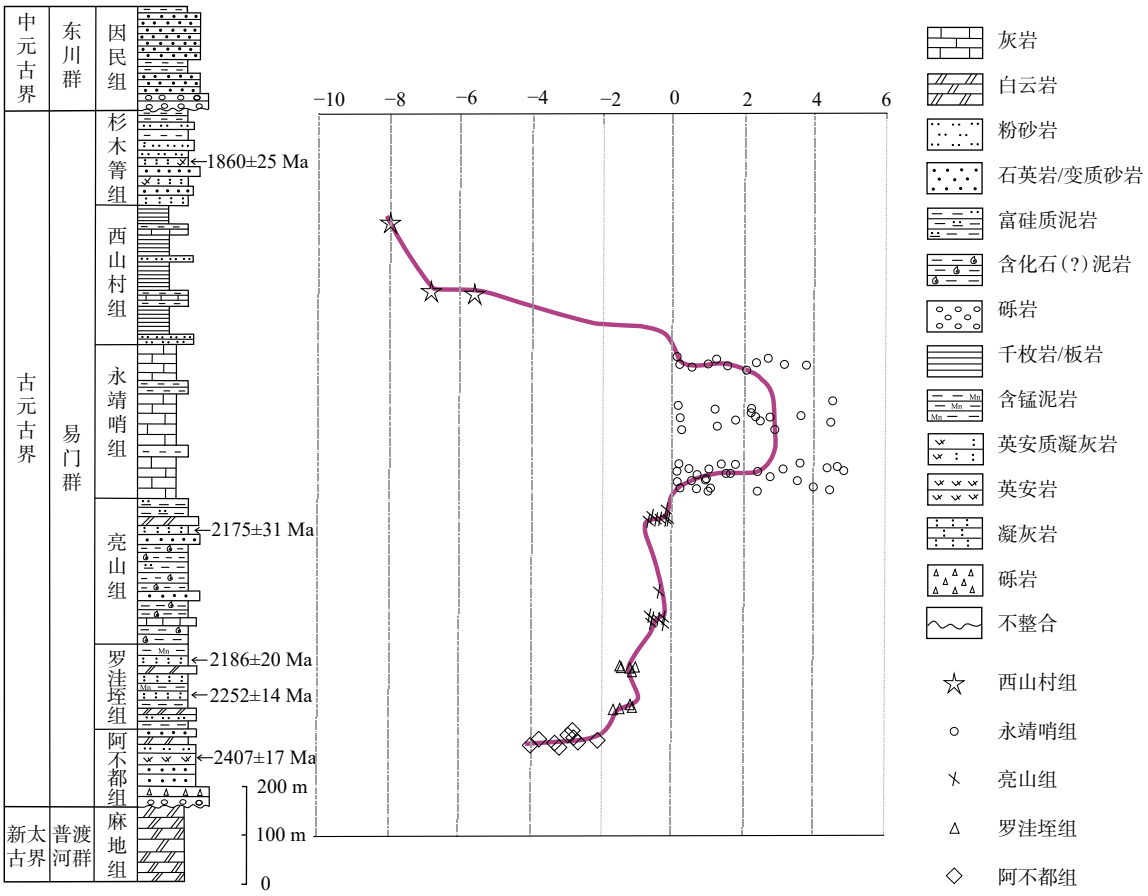


图 6　扬子克拉通西南缘滇中地区易门群地层柱及大理岩碳同位素曲线（据 Liu et al.，2023 修改）

Fig. 6　Lithostratigraphic column and C isotope curve of the Yimen Group, central Yunnan Province on the southwestern margin of the Yangtze Craton (modified after Liu et al., 2023)

上划分为阿不都组、罗洼垭组、亮山组、永靖哨组、西山村组和杉木箐组，岩性主要为杂砾岩、泥质板岩、硅质白云岩、泥质白云岩、砂质灰岩、泥灰岩、粉砂质板岩、中酸性凝灰岩、凝灰质板岩及沉凝灰岩等（图 6），其中阿不都组杂砾岩被认为具有冰碛岩特征（李静等，2018a）。易门群各组之间均为整合接触，变质程度低，但由于多期构造−热事件的改造，剖面连续性不佳（李静等，2018a，2018b；刘军平等，2018，2019，2021）。凝灰岩夹层锆石 U-Pb 定年结果显示，罗洼垭组的沉积时代为 2.25～2.24 Ga（刘军平等，2021）；亮山组的沉积时代为 2.18～2.05 Ga（李静等，2018b）；杉木箐组的沉积时代为 1.86～1.84 Ga（刘军平等，2018）。年代学结果表明，罗洼垭组、亮山组和永靖哨组应该沉积于大氧化事件期间。碳−氧同位素分析结果显示，永靖哨组白云岩及灰岩的 $\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ 范围为 0.05‰～4.95‰，$\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$ 为 15.1‰～25.4‰（图 6），碳同位素组成具有弱正异常，是洛马贡迪−贾图利事件在扬子克拉通西南缘的地质记录（Liu et al., 2023）。西山村组 3 件碳酸盐岩样品 $\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ 范围为−7.9‰～−5.7‰（图 6），具有明显的负异常（Liu et al., 2023），可能沉积于大氧化事件之后，代表了 Shunga 碳同位素负漂移事件的开始。易门群阿不都组、罗洼垭组和亮山组虽被认为沉积于大氧化事件和洛马贡迪−贾图利事件期间，但其碳酸盐岩碳同位素组成正异常不明显（$\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ 范围为−4.0‰～0‰，Liu et al., 2023），需要进一步开展研究。因此，扬子克拉通西南缘的易门群下部可能保存了较为完整的大氧化事件的记录，但需要对其层序、沉积时代及区域对比开展深入的研究工作。

4　塔里木克拉通大氧化事件的地质记录

塔里木克拉通由于沙漠覆盖，前寒武纪基底岩系主要出露于其周缘的库鲁克塔格、阿克苏、阿尔金及敦煌地区（张传林等，2012，2022）。其中古元古

代变质岩系主要包括位于库鲁克塔格的为兴地格群和阿尔金地区阿尔金山群，岩性主要包括（角闪）黑云（二云）斜长片麻岩、石榴黑云（二云）斜长片麻岩、石英片岩、大理岩、石榴矽线斜长石英片（麻）岩等，普遍经历了角闪岩相或麻粒岩相变质及构造变形改造，变质时代在1.8 Ga左右（张传林等，2012，2022）。张传林等（2022）获得了兴地塔格群中变质火山岩锆石U-Pb年龄为1965±13 Ma，结合其1.8 Ga左右的变质年龄，认为兴地格群的沉积时代为2.0～1.8 Ga。目前未见有兴地格群中大理岩的碳-氧同位素数据，尚不能确定在兴地格群存在大氧化事件的地质记录。

位于塔里木东南缘阿尔金山东段北缘的阿克塔什塔格地区出露有新太古代米兰岩群、新太古代花岗闪长质及英云闪长质片麻岩、古元古代片麻状闪长岩及古元古代火成碳酸岩等（辛后田等，2012）。其中古元古代火成碳酸岩（92°10′E—92°48′E，39°09′N—39°15′ N）主要由方解石、透辉石、石英、长石等组成，呈似层状或不规则岩枝状和网脉状侵入到新太古代米兰岩群和花岗闪长质及英云闪长质片麻岩之中（辛后田等，2012；杨俊泉等，2012）。阿克塔什塔格火成碳酸岩具有壳源碳酸岩特征，早期锆石U-Pb定年将其侵位年龄限定为1.93 Ga，并认为是米兰岩群中不纯大理岩在高级变质作用下深熔的产物（辛后田等，2012；杨俊泉等，2012）。近年来锆石U-Pb定年结果显示，阿克塔什塔格火成碳酸岩侵位于2个不同时期，分别是1.94～1.92 Ga和1.87～1.83 Ga（Wu et al., 2022; Pan et al., 2025）。碳-氧同位素分析结果显示，阿克塔什塔格火成碳酸岩具有较高的碳同位素组成正异常，其$\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$范围为4.2‰～15.7‰，$\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$为11.9‰～19.7‰（Wu et al., 2022; Pan et al., 2025）。阿克塔什塔格火成碳酸岩中保留的高碳同位素组成正异常可能记录了其原岩碳酸盐岩的碳同位素组成，表明在塔里木东南缘阿尔金山地区可能存在洛马贡迪-贾图利事件中期沉积的碳酸盐岩，即大氧化事件的地质记录。

5 讨论与展望

与南非、西澳、北美及北欧等境外地区相比，虽然中国境内古元古代沉积地层普遍经受了变质变形作用的改造，在地层连续性、完整性等方面存在一定的不足，但近20多年来的研究成果显示，在华北克拉通凡河盆地（凡河群下部或三岔子群）、胶-辽-吉带（“北辽河群”和荆山群）和中部造山带（滹沱群、湾子群和嵩山群），扬子克拉通北缘崆岭杂岩和西南缘易门群中均保留有大氧化事件及洛马贡迪-贾图利事件的地质记录，在塔里木克拉通南缘阿克塔什塔格火成碳酸岩中保存有大氧化事件的重要信息，为在中国境内开展大氧化事件研究提供了重要机遇。特别是华北克拉通北东部鞍山地区“北辽河群”和凡河盆地凡河群下部（三岔子群）、华北克拉通中部的滹沱群及扬子克拉通西南缘滇中地区的易门群，由于地层厚度大、层序完整且变质程度相对较低，是未来在中国境内开展大氧化事件研究的主要对象。对中国境内大氧化事件地质记录的特点及未来工作展望总结如下。

（1）碳-氧同位素及年代学研究结果显示，中国境内大部分古元古代地层均沉积于2.2 Ga之后，普遍缺少大氧化事件早期（2.43～2.2 Ga）的地质记录。因此中国境内的地质记录具有开展大氧化事件从中期至结束演化过程研究的地域优势。华北克拉通南缘嵩山群五指岭组可能保存了洛马贡迪-贾图利事件初期（2.35～2.3 Ga）的沉积记录，孔兹岩带下乌拉山群中可能保存有古元古代早期（2.46～2.38 Ga）的沉积记录（Dong et al., 2022），但研究程度很低，需要进一步开展工作。被认为具有冰碛岩特征的华北克拉通滹沱群底部四集庄组砾岩（陈威宇等，2018; Chen et al., 2019）的沉积时代（～2.14 Ga，杜利林等，2010）比全球其他地区，如北美休伦（Huronian）超群3期冰碛岩（Ramsay Lake组、Bruce组和Gowganda组）的形成时间（2.43～2.30 Ga; Rasmussen et al., 2013）、南非卡普瓦尔（Kaapvaal）克拉通西部的西格利夸兰（Griqualand West）盆地冰碛岩（Makganyene组）的沉积时间（2.43 Ga; Gumsley et al., 2017）、卡普瓦尔克拉通东部东德兰士瓦（Eastern Transvaal）盆地3期冰碛岩（Duitschland组的底部、Rooihoogte组的底部和Timeball Hill组上部的Rietfontein段）的形成时间（小于2.43～2.20 Ga; Rasmussen et al., 2013）及俄罗斯科拉半岛Polisarka组冰碛岩的沉积时代（2.43 Ga; Brasier et al., 2013）明显年轻。因此，需要对滹沱群四集庄组砾岩的成因、时代及该时期的古气候开展进一步研究。

（2）一般认为，大氧化事件期间碳同位素组成正漂移的形成与有机碳的埋藏有关（Baker and

Fallick, 1989a; Eguchi et al., 2020)。华北及扬子克拉通目前发现的变质程度相对较低的大氧化事件记录中均存在黑色页岩或炭质板岩沉积，如辽河群高家峪组及凡河群康庄子组等；华北克拉通孔兹岩系及胶−辽−吉带变质程度较高地区发育有黑色页岩或含炭质碳酸盐岩变质成因的石墨矿(陈衍景等，2000)。未来需要对这些大氧化事件期间沉积的黑色页岩或炭质板岩开展深入研究，以确定其沉积环境、成因及与海相碳酸盐岩碳同位素组成正漂移的联系。

(3)洛马贡迪−贾图利事件代表了地球演化历史上碳同位素组成正漂移幅度最大、持续时间最长的事件，但碳同位素正漂移结束的原因一直没有得到解决。大氧化事件发生最主要阶段的 2.3～2.06 Ga 被称为层侵纪，其主要特征是层状侵入体、岩床及裂谷沉积发育，缺少大规模造山作用(Van Kranendonk et al., 2012)。曾有学者基于地球化学模型，用俯冲到核幔边界有机碳通过洋岛火山作用的释放来解释古元古代碳同位素组成正异常的消失(Eguchi et al., 2020)，但此模型缺乏地质证据的支持。考虑到大氧化事件期间有大量富有机碳地层沉积并被大量基性岩床或层状侵入体侵入(Van Kranendonk et al., 2012)，而大规模岩床侵入到黑色页岩或煤层中接触变质释放的 CO_2 会导致碳同位素组成负异常(Svensen et al., 2007, 2018; Heimdal et al., 2018)，洛马贡迪−贾图利事件末期碳同位素组成正漂移的消失可能与层侵纪大量基性岩床侵位到黑色页岩中接触变质脱气作用密切相关(Zhang et al., 2022)。这一推测也得到了洛马贡迪−贾图利事件结束时间(2.06 Ga)与全球规模最大的层状侵入体——南非布什维尔德(Bushveld)基性—超基性杂岩体侵位年龄相一致(Zeh et al., 2015; Scoates and Wall, 2015; Mungall et al., 2016)的支持。

(4)由于后期变形变质作用的影响或缺乏有效的定年对象(如火山岩或沉凝灰岩夹层等)，中国境内很多剖面古元古代地层的沉积时限还缺乏精确限定，影响了与其他克拉通的对比研究。部分被锆石 U-Pb 年代学限定在洛马贡迪−贾图利事件沉积的碳酸盐岩中未发现碳同位素组成正异常，需要进一步开展研究分析其原因。如华北克拉通中条群的底界年龄被限定在 2.14 Ga(杨崇辉等，2018)，顶界年龄被限定在 2.09 Ga(刘玄等，2015)，但在中条群大理岩却未发现碳同位素组成正异常。华北克拉通孔兹岩带内部分大理岩可能也沉积于大氧化事件期间(杨崇辉等，2018)，也未发现碳同位素组成正异常。在区域地层对比方面，通过碳−氧同位素化学地层与年代学相结合可以为开展华北克拉通及其与其他克拉通古元古代沉积地层对比提供重要依据(王宏宇等，2024)。

(5)变质作用导致碳酸盐岩碳同位素值降低一直被认为是华北克拉通长期未发现与其他克拉通类似高碳同位素组成正异常($\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$>10‰)的最主要原因之一(汤好书等，2008; 汤好书等，2009a, 2009b; Tang et al., 2011; 陈威宇和陈衍景，2018; 李凯月等，2020)。对胶−辽−吉带鞍山地区“北辽河群”大理岩碳−氧同位素研究结果显示，区域变质作用和热变质作用对碳酸盐岩碳−氧同位素组成确实有影响，$\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ 和 $\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$ 均有不同程度降低，但 $\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ 降幅一般小于 3‰～5‰，$\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$ 的降幅则可达到 6‰～10‰，在碳同位素组成正异常较明显的地区，变质作用并不会完全抹去碳酸盐岩沉积时期的碳同位素组成正异常(王宏宇等，2024)。如在波罗地克拉通北部挪威罗弗敦−维斯托拉伦(Lofoten-Vesteralen)群岛经历麻粒岩相变质的部分大理岩之中仍然保存了 $\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ 高达 10‰的碳同位素组成正异常 (Baker and Fallick, 1988, 1989a, 1989b)。区域变质作用对原岩碳−氧同位素的改造具有不均一性，在高级变质区内依然存在改造较弱的地区，可以识别出碳同位素组成正异常。因此，在中国境内古元古代造山带之中，经历了高级变质改造的大理岩之中仍有可能存在大氧化事件期间沉积的碳同位素组成正异常样品。

(6)深熔作用对海相碳酸盐岩碳−氧同位素的影响值得开展深入研究。塔里木克拉通 1.94～1.92 Ga 和 1.87～1.83 Ga 阿克塔什塔格壳源火成碳酸岩碳−氧同位素分析结果显示(Wu et al., 2022; Pan et al., 2025)，海相碳酸盐岩经历深熔作用形成壳源火成碳酸岩之后，在壳源火成碳酸岩之中仍可保留其沉积时期的碳−氧同位素组成信息。未来可以通过高温高压模拟实验来研究海相碳酸盐岩深熔作用中碳−氧同位素组成的变化行为。

(7)开展大氧化事件及洛马贡迪−贾图利事件的多学科综合研究。目前对大氧化事件研究常用的指标大都来自那些直接与大气发生相互作用且能较好保存的地质/地球化学记录，包括海相碳酸盐岩碳−氧同位素及微量元素、碎屑成因的氧气敏感

矿物、风化过程中铁的化学性质、金属元素的同位素分馏以及硫同位素的非质量分馏、海水硫酸盐浓度、氧化还原敏感元素等(罗根明等, 2022)。对大氧化事件的形成机制还有很大争议(Kump and Barley, 2007; Campbell and Allen, 2008; Konhauser et al., 2009; Gaillard et al., 2011; Kasting et al., 2013; Lee et al., 2016; Ciborowski and Kerr, 2016; Smit and Mezger, 2017; Kadoya et al., 2020; Alcott et al., 2022; 罗根明等, 2022; 张拴宏等, 2022; Zhang et al., 2024b; Zhou et al., 2025)。一般认为古元古代高$\delta^{13}C_{carb}$时期大气是富氧的,通常把洛马贡迪–贾图利事件碳酸盐岩碳同位素组成($\delta^{13}C_{carb}$)的正异常的终止作为大氧化事件结束的标志,但目前对大氧化事件期间大气氧的含量还有很大争议(罗根明等, 2022)。未来需要引入更多的其他地质–地球化学指标及数值模拟等多学科方法,以综合揭示该时期的地表氧化过程、成因机制、大气氧含量及其演变规律。

致谢: 王宏宇、蔡瑜杭、裴军令、赵越、王森、孔令昊、张琪琪、胡国辉、高森等参加了本项目的部分野外调查及室内研究工作，在此表示衷心的感谢。

References

ALCOTT L J, MILLS B J W, BEKKER A, et al., 2022. Earth's Great Oxidation Event facilitated by the rise of sedimentary phosphorus recycling[J]. Nature Geoscience, 15(3): 210-215.

BAKER A J, FALLICK A E, 1988. Evidence for CO_2 infiltration in granulite facies marbles from Lofoten-Vesteralen, Norway[J]. Earth and Planetary Science Letters, 91(1-2): 132-140.

BAKER A J, FALLICK A E, 1989a. Evidence from Lewisian limestones for isotopically heavy carbon in two-thousand-million-year-old sea water[J]. Nature, 337(6205): 352-354.

BAKER A J, FALLICK A E, 1989b. Heavy carbon in two-billion-year-old marbles from Lofoten-Vesterålen, Norway: implications for the Precambrian carbon cycle[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 53(5): 1111-1115.

BEKKER A, HOLLAND H D, WANG P L, et al., 2004. Dating the rise of atmospheric oxygen[J]. Nature, 427(6970): 117-120.

BI J H, XING D H, GE W C, et al., 2018. Age and tectonic setting of meta-acid volcanic rocks from the North Liaohe Group in the Liaodong area: paleoproterozoic intracontinental rift or active continental margin?[J]. Earth Science Frontiers, 25(3): 295-308. (in Chinese with English abstract)

BRASIER A T, MARTIN A P, MELEZHIK V A, et al., 2013. Earth's earliest global glaciation? Carbonate geochemistry and geochronology of the Polisarka Sedimentary Formation, Kola Peninsula, Russia[J]. Precambrian Research, 235: 278-294.

Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Liaoning Province, 1997. Stratigraphy (lithostratic) of Liaoning Province[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press: 1-247. (in Chinese)

Bureau of Geology and Mineral Exploration of Henan Province, 1989. Regional geology of Henan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, : 1-772. (in Chinese with English Summary)

Bureau of Geology and Mineral Exploration of Jilin Province, 1988. Regional geology of Jilin Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, : 1-698. (in Chinese with English summary)

Bureau of Geology and Mineral Exploration of Jilin Province, 1997. Stratigraphy (lithostratic) of Jilin Province[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press: 1-324. (in Chinese)

Bureau of Geology and Mineral Exploration of Liaoning, 1989. Regional geology of Liaoning province[M]. Beijing: Geological Publishing House, : 1-865. (in Chinesewith English summary)

Bureau of Geology and Mineral Exploration of Shanxi Province, 1989. Regional geology of Shanxi province[M]. Beijing: Geological Publishing House, : 1-780. (in Chinese with English summary)

CAI Y H, ZHANG S H, ZHAO Y, et al., 2022. Ages of the Proterozoic strata in Fanhe Basin revisited: implications for geological records of the Great Oxidation Event in the North China Craton[J]. Precambrian Research, 368: 106466.

CAMPBELL I H, ALLEN C M, 2008. Formation of supercontinents linked to increases in atmospheric oxygen[J]. Nature Geoscience, 1(8): 554-558.

CHEN C X, JIANG S Y, CAI K Q, et al., 2003. Metallogenic conditions of magnesite and talc deposits in Early Proterozoic Mg-rich carbonate formations, eastern Liaoning province[J]. Mineral Deposits, 22(2): 166-176. (in Chinese with English abstract)

CHEN S W, XING D H, DING Q H, et al. , 2006. 1: 250, 000 geological map and explanatory note of Tieling, K51C002003[R]. Beijing: National Geological Archives of China. DOI: 10.35080/n01.c.123080. (in Chinese)

CHEN W Y, CHEN Y J, 2018. Records of the great oxidation event in the Hutuo Group, Shanxi, China: a reassessment of the $\delta^{13}C_{carb}$ data[J]. Acta Petrologica Sinica, 34(12): 3709-3720. (in Chinese with English abstract)

CHEN W Y, CHEN Y J, LI Q G, et al., 2018. Detrital zircon U-Pb ages of the Sijizhuang glacial diamictites of the Hutuo Group in Wutai Shan, Shanxi Province and implication for the great oxidation event[J]. Earth Science Frontiers, 25(5): 1-18. (in Chinese with English abstract)

CHEN Y J, 1987. Discussion on the geological environment changes at 2.3 Ga[J]. Young Geologist of Nanjing University, 1: 119-125. (in Chinese)

CHEN Y J, 1990. Evidences for the catastrophe in geologic environment at about 2300 Ma and the discussions on several problems[J]. Journal of Stratigraphy, 14(3): 178-186. (in Chinese with English abstract)

CHEN Y J, JI H Z, FU S G, et al., 1991. The challenge of traditional geological theories from 2.3 Ga catastrophe: new opinions to some major geological problems[J]. Advances in Earth Science, 6(2): 63-68. (in Chinese)

CHEN Y J, LIU C Q, CHEN H Y, et al., 2000. Carbon isotope geochemistry of graphite deposits and ore-bearing khondalite series in North China: implications for several geoscientific problems[J]. Acta Petrologica Sinica, 16(2): 233-244. (in Chinese with English abstract)

CHEN Y J, TANG H S, 2016. The Great Oxidation Event and its records in North China Craton[M]//ZHAI M G, ZHAO Y, ZHAO T P. Main tecton-

ic events and metallogeny of the North China Craton. Singapore: Springer: 281-303.

CHEN Y J, CHEN W Y, LI Q G, et al., 2019. Discovery of the Huronian Glaciation Event in China: evidence from glacigenic diamictites in the Hutuo Group in Wutai Shan[J]. Precambrian Research, 320: 1-12.

CHEN Y L, LI H, GU S Y, et al., 2023. Marble trace element and C-O isotope geochemistry of the Paleoproterozoic Jingshan Group, North China: insights into BIF formation during the Lomagundi-Jatuli Event[J]. Precambrian Research, 395: 107152.

CHEN Y L, LI H, GU S Y, et al., 2024. Timing and origin of the Lomagundi-Jatuli Event: insights from U–Pb geochronology, C-O-Fe isotopes and REE compositions from the Jingshan Group, North China Craton[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 656: 112574.

CIBOROWSKI T J R, KERR A C, 2016. Did mantle plume magmatism help trigger the Great Oxidation Event?[J]. Lithos, 246-247: 128-133.

CLOUD P E, 1968. Atmospheric and hydrospheric evolution on the primitive earth[J]. Science, 160(3829): 729-736.

DONG C Y, LIU D Y, LI J J, et al., 2007. Palaeoproterozoic Khondalite Belt in the western North China Craton: new evidence from SHRIMP dating and Hf isotope composition of zircons from metamorphic rocks in the Bayan Ul-Helan Mountains area[J]. Chinese Science Bulletin, 52(21): 2984-2994.

DONG C Y, MA M Z, WILDE S A, et al., 2022. The first identification of early Paleoproterozoic (2.46-2.38Ga) supracrustal rocks in the Daqingshan area, northwestern North China Craton: geology, geochemistry and SHRIMP U-Pb dating[J]. Precambrian Research, 377: 106727

DU L L, YANG C H, GUO J H, et al., 2010. The age of the base of the Paleoproterozoic Hutuo Group in the Wutai Mountains area, North China Craton: SHRIMP zircon U-Pb dating of basaltic andesite[J]. Chinese Science Bulletin, 55(14): 1782-1789.

DU L L, YANG C H, WANG W, et al., 2011. The re-examination of the age and stratigraphic subdivision of the Hutuo Group in the Wutai Mountains area, North China Craton: evidences from geology and zircon U-Pb geochronology[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(4): 1037-1055. (in Chinese with English abstract)

EGUCHI J, SEALES J, DASGUPTA R, 2020. Great Oxidation and Lomagundi events linked by deep cycling and enhanced degassing of carbon[J]. Nature Geoscience, 13(1): 71-76.

GAILLARD F, SCAILLET B, ARNDT N T, 2011. Atmospheric oxygenation caused by a change in volcanic degassing pressure[J]. Nature, 478(7368): 229-232.

GAO S, ZHANG S H, WANG H Y, et al., 2024. Carbon-oxygen isotopes of marbles from the Qingchengzi ore concentration area, eastern Liaoning Province: implications for ore-hosted stratigraphic correlation and deep metallogenic prediction[J]. Geological Review, 70(6): 2127-2141. (in Chinese with English abstract)

GUMSLEY A P, CHAMBERLAIN K R, BLEEKER W, et al., 2017. Timing and tempo of the Great Oxidation Event[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 114(8): 1811-1816.

GUO Q J, STRAUSS H, KAUFMAN A J, et al., 2009. Reconstructing Earth's surface oxidation across the Archean-Proterozoic transition[J]. Geology, 37(5): 399-402.

HE G P, YE H W, 1998. Two types of Early Proterozoic metamorphism and its tectonic significance in eastern Liaoning and southern Jilin areas[J]. Acta Petrologica Sinica, 14(2): 152-162. (in Chinese with English abstract)

HEIMDAL T H, SVENSEN H H, RAMEZANI J, et al., 2018. Large-scale sill emplacement in Brazil as a trigger for the end-Triassic crisis[J]. Scientific Reports, 8(1): 141,

HOLLAND H D, 1962. Model for the evolution of the Earth's atmosphere[M]//ENGEL A E J, JAMES H L, LEONARD B F. Petrologic studies. New York: Geological Society of America: 447-477.

HOLLAND H D, 1999. When did the Earth's atmosphere become oxic? A reply[J]. The Geochemical News, 100: 20-22.

HOLLAND H D, 2006. The oxygenation of the atmosphere and oceans[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B, 361: 903-915.

HU G Y, LI Y H, FAN C F, et al. , 2015. Paleoproterozoic magnesite and borate deposits from eastern Liaoning Province: with a discussion about synchrono-heteropic facies of sedimentary mineralization[J]. Mineral Deposits, 34(3): 547-564. (in English with Chinese abstract)

Huang J P, Liu X Y, He Y S, et al., 2021. The oxygen cycle and a habitable Earth[J]. Science China Earth Sciences, 64(4): 511-528.

IZON G, LUO G M, UVEGES B T, et al., 2022. Bulk and grain-scale minor sulfur isotope data reveal complexities in the dynamics of Earth's oxygenation[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 119(13): e2025606119.

JIANG S Y, CHEN C X, CHEN Y Q, et al. , 2004. Geochemistry and genetic model for the giant magnesite deposits in the eastern Liaoning province, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 20(4): 765-772. (in English with Chinese abstract)

KADOYA S, CATLING D C, NICKLAS R W, et al., 2020. Mantle data imply a decline of oxidizable volcanic gases could have triggered the Great Oxidation[J]. Nature Communications, 11(1): 2774.

KASTING J F, 1987. Theoretical constraints on oxygen and carbon dioxide concentrations in the Precambrian atmosphere[J]. Precambrian Research, 34(3-4): 205-229.

KASTING J F, 1993. Earth's early atmosphere[J]. Science, 259: 920-926.

KASTING J F, 2013. What caused the rise of atmospheric O_2?[J]. Chemical Geology, 362: 13-25.

KONG F F, YUAN X L, ZHOU C M, 2011. Paleoproterozoic glaciation: evidence from carbon isotope record of the Hutuo Group, Wutai Mountain area of Shanxi Province, China[J]. Chinese Science Bulletin, 56(27): 2922-2930.

KONHAUSER K O, PECOITS E, LALONDE S V, et al., 2009. Oceanic nickel depletion and a methanogen famine before the Great Oxidation Event[J]. Nature, 458(7239): 750-753.

KUMP L R, BARLEY M E, 2007. Increased subaerial volcanism and the rise of atmospheric oxygen 2.5 billion years ago[J]. Nature, 448(7157): 1033-1036.

KUMP L R, 2008. The rise of atmospheric oxygen[J]. Nature, 451: 277-278.

LAI Y, CHEN C, TANG H S, 2012. Paleoproterozoic positive $\delta^{13}C$ excursion in Henan, China[J]. Geomicrobiology Journal, 29(3): 287-298.

LEE C T A, YEUNG L Y, MCKENZIE N R, et al., 2016. Two-step rise of at-

mospheric oxygen linked to the growth of continents[J]. Nature Geoscience, 9(6): 417-424.

LI J, LIU G C, LIU J P, et al., 2018a. New progress in the study of early Pre-Cambrian geology of central Yunnan Province[J]. Geological Bulletin of China, 37(11): 1957-1969. (in Chinese with English abstract)

LI J, LIU J P, SUN B D, et al., 2018b. Chronological constraints on multi-cellular organism fossil from Liangshan Formation of Paleoproterozoic Yimen Group in Central Yunnan Province[J]. Geological Bulletin of China, 37(11): 2087-2098. (in Chinese with English abstract)

LI K Y, TANG H S, CHEN Y J, et al., 2020. Carbon and oxygen isotope geochemistry of marbles in the Jingshan Group, Jiaobei Terrane and its indication to the Lomagundi-Jatuli Event[J]. Acta Petrologica Sinica, 36(4): 1059-1075. (in Chinese with English abstract)

LI Y H, SATISH-KUMAR M, KIRAN S, et al., 2022. 2.0 Ga orogenic graphite deposits and associated ^{13}C-enriched meta-carbonate rocks from South China Craton: implications for global Lomagundi event[J]. Geoscience Frontiers, 13(4): 101409.

LIU C H, ZHAO G C, SUN M, et al. , 2012. Detrital zircon U-Pb dating, Hf isotopes and whole-rock geochemistry from the Songshan Group in the Dengfeng Complex: constraints on the tectonic evolution of the Trans-North China Orogen[J]. Precambrian Research, 192-195: 1-15.

LIU F L, LIU P H, WANG F, et al., 2015. Progresses and overviews of voluminous meta-sedimentary series within the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji orogenic/mobile belt, North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 31(10): 2816-2846. (in Chinese with English abstract)

LIU J P, ZENG W T, XU Y F, et al., 2018. The definition and geological significance of tuffs about 1.85 Ga in Yimen area, central Yunnan Province[J]. Geological Bulletin of China, 37(11): 2055-2062. (in Chinese with English abstract)

LIU J P, LI J, WANG W, et al. , 2019. The discovery and significance of the fossils from the Early Precambrian strata in the Yimen region, central Yunnan[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 39(4): 57-64, 70. (in Chinese with English abstract)

LIU J P, WAN S, LI J, et al., 2021. Zircon U-Pb age and tectonic thermal event of the volcanic rocks from the Paleoproterozoic Yimen Group Luowadie Formation in Yimen area, Central Yunnan[J]. Geological Bulletin of China, 40(7): 1024-1032. (in Chinese with English abstract)

LIU J P, YIN W, YANG S P, et al., 2023. Response to the Lomagundi-Jatuli Event in the southwestern margin of the Yangtze Plate: evidence from the carbon and oxygen isotopes of the Paleoproterozoic Yongjingshao Formation[J]. China Geology, 6(1): 50-60.

LIU P H, LIU F L, WANG F, et al., 2011. U-Pb dating of zircons from Al-rich paragneisses of Jingshan Group in Shandong Peninsula and its geological significance[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 30(5): 829-843. (in Chinese with English abstract)

LIU P H, CAI J, ZOU L, 2017. Metamorphic *P-T-t* path and its geological implication of the Sanjiazi garnet amphibolites from the northern Liaodong Peninsula, Jiao-Liao-Ji belt: constraints on phase equilibria and Zircon U-Pb dating[J]. Acta Petrologica Sinica, 33(9): 2649-2674. (in Chinese with English abstract)

LIU P H, LIU F L, TIAN Z H, et al., 2019. Petrological and geochronological evidence for Paleoproterozoic granulite-facies metamorphism of the South Liaohe Group in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton[J]. Precambrian Research, 327: 121-143.

LIU X, FAN H R, QIU Z J, et al., 2015. Formation ages of the Jiangxian and Zhongtiao groups in the Zhongtiao Mountain region, North China Craton: insights from SIMS U-Pb dating on zircons of intercalated plagioclase amphibolites[J]. Acta Petrologica Sinica, 31(6): 1564-1572. (in Chinese with English abstract)

LUO G M, ONO S, BEUKES N J, et al., 2016. Rapid oxygenation of Earth's atmosphere 2.33 billion years ago[J]. Science Advances, 2(5): e1600134.

LUO G M, JUNIUM C K, IZON G, et al., 2018. Nitrogen fixation sustained productivity in the wake of the Palaeoproterozoic Great Oxygenation Event[J]. Nature Communications, 9(1): 978.

LUO G M, ZHU X K, WANG S J, et al., 2022. Mechanisms and climatic-ecological effects of the Great Oxidation Event in the early Proterozoic[J]. Science China Earth Sciences, 65(9): 1646-1672.

LUO Y, SUN M, ZHAO G C, et al., 2004. LA-ICP-MS U-Pb zircon ages of the Liaohe Group in the Eastern Block of the North China Craton: constraints on the evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt[J]. Precambrian Research, 134(3-4): 349-371.

LYONS T W, REINHARD C T, PLANAVSKY N J, 2014. The rise of oxygen in Earth's early ocean and atmosphere[J]. Nature, 506(7488): 307-315.

MARTIN A P, CONDON D J, PRAVE A R, et al., 2013a. Dating the termination of the Palaeoproterozoic Lomagundi-Jatuli carbon isotopic event in the North Transfennoscandian Greenstone Belt[J]. Precambrian Research, 224: 160-168.

MARTIN A P, CONDON D J, PRAVE A R, et al., 2013b. A review of temporal constraints for the Palaeoproterozoic large, positive carbonate carbon isotope excursion (the Lomagundi-Jatuli Event)[J]. Earth-Science Reviews, 127: 242-261.

MELEZHIK V A, FALLICK A E, MEDVEDEV P V, et al., 1999. Extreme $^{13}C_{carb}$ enrichment in ca. 2.0 Ga magnesite-stromatolite-dolomite-'red beds' association in a global context: a case for the world-wide signal enhanced by a local environment[J]. Earth-Science Reviews, 48(1-2): 71-120.

MELEZHIK V A, HUHMA H, CONDON D J, et al., 2007. Temporal constraints on the Paleoproterozoic Lomagundi-Jatuli carbon isotopic event[J]. Geology, 35(7): 655-658.

MELEZHIK V A, KUMP L R, HANSKI E J, et al. , 2013. 1.1 tectonic evolution and major global Earth-surface palaeoenvironmental events in the Palaeoproterozoic[M]//MELEZHIK V A, PRAVE A R, FALLICK A E, et al. Reading the archive of earth's oxygenation. Volume 1: the Palaeoproterozoic of Fennoscandia as context for the Fennoscandian arctic Russia - drilling early earth project. Heidelberg: Springer: 3-21.

MUNGALL J E, KAMO S L, MCQUADE S, 2016. U-Pb geochronology documents out-of-sequence emplacement of ultramafic layers in the Bushveld Igneous Complex of South Africa[J]. Nature Communications, 7(1): 13385.

OSTRANDER C M, HEARD A W, SHU Y C, et al., 2024. Onset of coupled atmosphere–ocean oxygenation 2.3 billion years ago[J]. Nature, 631(8020): 335-339.

OUYANG G, SHE Z B, PAPINEAU D, et al., 2020. Dynamic carbon and

sulfur cycling in the aftermath of the Lomagundi-Jatuli Event: evidence from the Paleoproterozoic Hutuo Supergroup, North China Craton[J]. Precambrian Research, 337: 105549.

PAN Z, CAI K D, SUN M, et al., 2025. Recycling of subducted carbonates generated the Tarim carbonatites in Paleoproterozoic orogenic processes[J]. Journal of Petrology, 66(6): egaf045.

PENG P, GUO J H, WINDLEY B F, et al., 2011. Halaqin volcano-sedimentary succession in the central-northern margin of the North China Craton: products of Late Paleoproterozoic ridge subduction[J]. Precambrian Research, 187(1-2): 165-180.

PENG P, FENG L J, SUN F B, et al., 2017. Dating the Gaofan and Hutuo Groups-targets to investigate the Paleoproterozoic Great Oxidation Event in North China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 138: 535-547.

PENG P, LIU X, FENG L J, et al., 2023. Rhyacian intermittent large igneous provinces sustained Great Oxidation Event: evidence from North China craton[J]. Earth-Science Reviews, 238: 104352.

POULTON S W, BEKKER A, CUMMING V M, et al., 2021. A 200-million-year delay in permanent atmospheric oxygenation[J]. Nature, 592(7853): 232-236.

QIU X F, CHEN W X, XU D L, et al., 2022. Crustal evolution in Archean for the Kongling complex in the Yangtze Craton nucleus[J]. South China Geology, 38(1): 56-66. (in Chinese with English abstract)

RASMUSSEN B, BEKKER A, FLETCHER I R, 2013. Correlation of Paleoproterozoic glaciations based on U-Pb zircon ages for tuff beds in the Transvaal and Huronian Supergroups[J]. Earth and Planetary Science Letters, 382: 173-180.

REN L D, GENG Y S, DU L L, et al., 2013. SHRIMP data on zircons from the Wanzi series: constraints on the rock formation time and implications of migmatization at 2.1-2.0 Ga in the Fuping Complex, North China Craton[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 72: 203-215.

ROSCOE S M, 1973. The Huronian Supergroup, a Paleoaphebian succession showing evidence of atmospheric evolution[M]//YOUNG G M. Huronian stratigraphy and sedimentation. St. John's: Geological Association of Canada: 31-47.

SCHIDLOWSKI M, EICHMANN R, JUNGE C E, 1975. Precambrian sedimentary carbonates: carbon and oxygen isotope geochemistry and implications for the terrestrial oxygen budget[J]. Precambrian Research, 2(1): 1-69.

SCOATES J S, WALL C J, 2015. Geochronology of layered intrusions[M]//CHARLIER B, NAMUR O, LATYPOV R, et al. Layered intrusions. Dordrecht: Springer: 3-74.

SHE Z B, YANG F Y, LIU W, et al., 2016. The termination and aftermath of the Lomagundi-Jatuli carbon isotope excursions in the Paleoproterozoic Hutuo Group, North China[J]. Journal of Earth Science, 27(2): 297-316.

SHEN Q H, ZHANG Y F, 1990. The characteristics of the Early Precambrian metamorphic protolith formation, their metamorphism and evolution in central southern Inner Mongolia, China[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 20: 41-43. (in Chinese)

SMIT M A, MEZGER K, 2017. Earth's early O_2 cycle suppressed by primitive continents[J]. Nature Geoscience, 10(10): 788-792.

SONG H X, YANG C H, DU L L, et al., 2011. Carbon and oxygen isotopic characteristics of several Paleoproterozoic carbonate strata in North China Craton[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 30(5): 865-872. (in Chinese with English abstract)

SVENSEN H, PLANKE S, CHEVALLIER L, et al., 2007. Hydrothermal venting of greenhouse gases triggering Early Jurassic global warming[J]. Earth and Planetary Science Letters, 256(3-4): 554-566.

SVENSEN H H, FROLOV S, AKHMANOV G G, et al., 2018. Sills and gas generation in the Siberian Traps[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 376(2130): 20170080.

TANG H S, CHEN Y J, WU G, et al., 2008. The C-O isotope composition of the Liaohe Group, northern Liaoning Province and its geologic implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(1): 129-138. (in Chinese with English abstract)

TANG H S, WU G, LAI Y, 2009a. The C-O isotope geochemistry and genesis of the Dashiqiao magnesite deposit, Liaoning Province, NE China[J]. Acta Petrologica Sinica, 25(2): 455-467. (in Chinese with English abstract)

TANG H S, CHEN Y J, WU G, et al., 2009b. Rare earth element geochemistry of carbonates of Dashiqiao Formation, Liaohe Group, eastern Liaoning Province: implications for Lomagundi Event[J]. Acta Petrologica Sinica, 25(11): 3075-3093. (in Chinese with English abstract)

TANG H S, CHEN Y J, WU G, et al., 2011. Paleoproterozoic positive $\delta^{13}C_{carb}$ excursion in the northeastern Sino-Korean craton: evidence of the Lomagundi Event[J]. Gondwana Research, 19(2): 471-481.

TAO P, XIE S W, WANG F, et al., 2023. Detrital zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes of the Fenzishan Group, Jiaobei Terrane: implications for the Paleoproterozoic tectonic evolution of the Jiao-Liao-Ji belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 39(9): 2619-2635. (in Chinese with English abstract)

TIAN Z H, LIU F L, YAN Z, et al., 2021. Palaeoproterozoic turbidite deposition in the Liaodong Peninsula, northeastern North China craton -Constraints from the Gaojiayu formation of the Liaohe Group[J]. Precambrian Research, 352: 106008.

VAN KRANENDONK M J, ALTERMANN W, BEARD B L, et al. , 2012. A chronostratigraphic division of the Precambrian: possibilities and challenges[M]// GRADSTEIN F M, OGG J G, SCHMITZ M, et al. The geologic time scale 2012. Amsterdam: Elsevier: 313-406.

WALKER R N, MUIR M D, DIVER W L, et al., 1977. Evidence of major sulphate evaporite deposits in the Proterozoic McArthur Group, Northern Territory, Australia[J]. Nature, 265(5594): 526-529.

WAN C H, ZHANG Y, WANG S S, et al., 2020. Geochemical constraints on the source of ore-forming materials of graphite deposits in the northern part of Huangling basement dome[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 39(5): 569-582. (in Chinese with English abstract)

WAN Y S, PENG P, LIU S J, et al., 2018. Late Paleoproterozoic tectonothermal event in the northwestern North China Craton: evidence from U-Pb dating and O-Hf isotopic compositions of zircons from metasedimentary rocks north of Hohhot City, Inner Mongolia, northern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 167: 152-164.

WANG H C, REN Y W, LU S N, et al., 2015. Stratigraphic units and tectonic setting of the Paleoproterozoic Liao-Ji Orogen[J]. Acta Geoscientica Sinica, 36(5): 583-598. (in Chinese with English abstract)

WANG H Y, ZHANG S H, WANG S, et al., 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[J]. Science China Earth Sciences, 67(9): 2824-2844.

WANG J Y, LONG X P, LAN C Y, et al., 2022. Geochronology and geochemistry of 2.3 Ga mafic intrusions in the Dengfeng area: evidence for early Paleoproterozoic subduction in the southern North China Craton[J]. Precambrian Research, 375: 106668.

WANG P C, 1995. Relationships between the Jingshan Group and the Fenzishan Group in the Jiaobei area[J]. Regional Geology of China(1): 15-20. (in Chinese with English abstract)

WANG X, LI X P, HAN Z Z, 2018. Zircon ages and geochemistry of amphibolitic rocks from the Paleoproterozoic Erdaowa Group in the Khondalite Belt, North China Craton and their tectonic implications[J]. Precambrian Research, 317: 253-267.

WANG X P, PENG P, WANG C, et al., 2016. Petrogenesis of the 2115 Ma Haicheng mafic sills from the Eastern North China Craton: implications for an intra-continental rifting[J]. Gondwana Research, 39: 347-364.

WEI J Q, WANG J X, WANG X D, et al., 2025. The formation and evolution of the Huangling basement in the Yangtze Craton, South China[J]. South China Geology, 41(1): 1-14. (in Chinese with English abstract)

WU C H, LI H M, ZHONG C T, et al., 2000. TIMS U-Pb single zircon ages for the orthogneiss and the paragneiss of Fuping complex: implications for existence of the Palaeoproterozoic supracrustal rocks in the central basement of North China Craton[J]. Progress in Precambrian Research, 23(3): 129-139. (in Chinese with English abstract)

WU H L, ZHU W B, GE R F, 2022. Evidence for carbonatite derived from the earth's crust: the late Paleoproterozoic carbonate-rich magmatic rocks in the southeast Tarim Craton, northwest China[J]. Precambrian Research, 369: 106425.

XIN H T, LUO Z H, LIU Y S, et al., 2012. Geological features and significance of Palaeoproterozoic carbonatite of crustal origin in Aqtashtagh Area of Southeast Tarim Basin, China[J]. Earth Science Frontiers, 19(6): 167-178. (in Chinese with English abstract)

XU W, LIU F L, SANTOSH M, et al., 2018. Constraints of mafic rocks on a Paleoproterozoic back-arc in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 166: 195-209.

XU W, 2019. Geochemical and geochronological insights into the tectonic evolution of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji Belt, Sino-Korean Craton[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences: 1-247. (in Chinese with English abstract)

XU W, LIU F L, WANG F, et al., 2020. Palaeoproterozoic tectonic evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton: geochemical and isotopic evidence from ca. 2.17 Ga felsic tuff[J]. Geological Journal, 55(1): 409-424.

YANG C H, DU L L, SONG H X, et al., 2018. Stratigraphic division and correlation of the Pleoproterozoic strata in the North China Craton: a review[J]. Acta Petrologica Sinica, 34(4): 1019-1057. (in Chinese with English abstract)

YANG J Q, WAN Y S, LIU Y S, et al., 2012. Discovery of Paleoproterozoic crustally derived carbonatite in the Northern Altyn Tagh[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 37(5): 929-936. (in Chinese with English abstract)

YIN C Q, ZHAO G C, SUN M, et al., 2009. LA-ICP-MS U-Pb zircon ages of the Qianlishan Complex: constrains on the evolution of the Khondalite Belt in the Western Block of the North China Craton[J]. Precambrian Research, 174(1-2): 78-94.

ZEH A, OVTCHAROVA M, WILSON A H, et al., 2015. The Bushveld Complex was emplaced and cooled in less than one million years – results of zirconology, and geotectonic implications[J]. Earth and Planetary Science Letters, 418: 103-114.

ZHAI M G, 2022. Khondalite revisited-record of special geological processes on Earth[J]. Acta Geologica Sinica, 96(9): 2967-2997. (in Chinese with English abstract)

ZHANG C L, LI H K, WANG H Y, 2012. A review on Precambrian tectonic evolution of Tarim Block: possibility of interaction between Neoproterozoic plate subduction and mantle plume[J]. Geological Review, 58(5): 923-936. (in Chinese with English abstract)

ZHANG C L, MA H D, LI H K, et al., 2022. Paleoproterozoic in Quruqtagh terrane in Northern Tarim[J]. East China Geology, 43(2): 133-140. (in Chinese with English abstract)

ZHANG S C, WANG H J, WANG X M, et al., 2021. The Mesoproterozoic oxygenation event[J]. Science China Earth Sciences, 64(12): 2043-2068.

ZHANG S H, ERNST R E, PEI J L, et al. , 2022. Termination of the Great Oxidation and Lomagundi-Jatuli events by degassing during emplacement of layered intrusions and sills[C]//Goldschmidt 2022 abstract. Honolulu, doi: 10.46427/gold2022.9865.

ZHANG S H, ZHAO Y, PEI J L, 2022. Earth's surface processes at the Neoarchean to early Paleoproterozoic and discussions on their relations to subduction initiation and deep processes[C]//Pre-plate tectonics and origin of continents, abstract volume of the 321th Shuangqing forum. Beijing: The National Natural Science Foundation of China, : 29. (in Chinese)

ZHANG S H, WANG H Y, TANG H S, et al., 2024a. High positive carbonate carbon isotope excursion identified in the North China Craton: implications for the Lomagundi-Jatuli Event[J]. Terra Nova, 36(1): 25-36.

ZHANG S H, ZHAO Y, PEI J L, 2024b. GDT 15: Banded iron formation drives subduction initiation and onset of global plate tectonics at ca. 2.45 Ga[C]//International Association for Gondwana Research 2024 Convention and 21st International Conference on Gondwana to Asia. Waterfront Hotel: 46-47.

ZHAO G C, WILDE S A, CAWOOD P A, et al., 2002. SHRIMP U-Pb zircon ages of the Fuping Complex: implications for Late Archean to Paleoproterozoic accretion and assembly of the North China Craton[J]. American Journal of Science, 302(3): 191-226.

ZHAO G C, SUN M, WILDE S A, et al., 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: key issues revisited[J]. Precambrian Research, 136(2): 177-202.

ZHAO G C, WILDE S A, GUO J H, et al., 2010. Single zircon grains record two Paleoproterozoic collisional events in the North China Craton[J]. Precambrian Research, 177(3-4): 266-276.

ZHAO G C, CAWOOD P A, LI S Z, et al. , 2012. Amalgamation of the North China Craton: key issues and discussion[J]. Precambrian Research, 222-223: 55-76.

ZHONG H, MA Y S, HUO W G, et al., 1993. Carbon isotope evolution of the Early Proterozoic dolomites in the Wutaishan mountain area, North China[J]. Science in China (Series B), 23(10): 1009-1014. (in Chinese)

ZHONG H, MA Y S, 1995. Carbon isotope and Early Proterozoic strata correlation[J]. Journal of Stratigraphy, 19(1): 30-35. (in Chinese with English abstract)

ZHOU L G, LIU J P, LI J, et al., 2025. Great Oxidation Event was caused by Neoarchean global cratonization: opportunity and challenge from rock and sedimentary records in China[J]. Science Bulletin, 70(11): 1736-1739.

ZHOU X W, WEI C J, GENG Y S, 2007. Phase equilibria and *p*-T path of high- and low-pressure politic granulites from the Jiaobei massif[J]. Earth Science Frontiers, 14(1): 135-143. (in Chinese with English abstract)

ZHOU X W, GENG Y S, 2009. Metamorphic age of the khondalite series in the Helanshan region: constraints on the evolution of the western block in the North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 25(8): 1843-1852. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

毕君辉，邢德和，葛文春，等，2018. 辽东地区北辽河群变酸性火山岩形成的时代及构造背景：古元古代陆内裂谷，还是活动大陆边缘?[J]. 地学前缘，25(3)：295-308.

陈从喜，蒋少涌，蔡克勤，等，2003. 辽东早元古代富镁质碳酸盐岩建造菱镁矿和滑石矿床成矿条件[J]. 矿床地质，22(2)：166-176.

陈树旺，邢德和，丁秋红，等，2006. 铁岭市幅(K51C002003)1/25万地质图及区域地质调查报告[R]. 沈阳地质矿产研究所，全国地质资料馆. DOI：10.35080/n01.c.123080

陈威宇，陈衍景，2018. 大氧化事件在山西滹沱群中的记录：碳酸盐岩碳同位素资料分析[J]. 岩石学报，34(12)：3709-3720.

陈威宇，陈衍景，李秋根，等，2018. 山西五台山滹沱群四集庄冰碛岩碎屑锆石年龄及其对大氧化事件研究意义[J]. 地学前缘，25(5)：1-18.

陈衍景，1987. 论23亿年前地质环境的突变[J]. 南大青年地质学家，1：119-125.

陈衍景，1990. 23亿年地质环境突变的证据及若干问题的讨论[J]. 地层学杂志，14(3)：178-186.

陈衍景，季海章，富士谷，等，1991. 23亿年灾变事件的揭示对传统地质理论的挑战：关于某些重大地质问题的新认识[J]. 地球科学进展，6(2)：63-68.

陈衍景，刘丛强，陈华勇，等，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[J]. 岩石学报，16(2)：233-244.

杜利林，杨崇辉，郭敬辉，等，2010. 五台地区滹沱群底界时代：玄武安山岩SHRIMP锆石U-Pb定年[J]. 科学通报，55(3)：246-254.

杜利林，杨崇辉，王伟，等，2011. 五台地区滹沱群时代与地层划分新认识：地质学与锆石年代学证据[J]. 岩石学报，27(4)：1037-1055.

高森，张拴宏，王宏宇，等，2024. 辽东青城子矿集区大理岩碳-同位素组成及其对含矿层位对比及深部找矿的指示[J]. 地质论评，70(6)：2127-2141.

河南省地质矿产局，1989. 河南省区域地质志[M]. 北京：地质出版社：1-772.

贺高品，叶慧文，1998. 辽东-吉南地区早元古代两种类型变质作用及其构造意义[J]. 岩石学报，14(2)：152-162.

胡古月，李延河，范昌福，等，2015. 辽东古元古代菱镁矿矿床与硼酸盐矿床：同期异相沉积成矿探讨[J]. 矿床地质，34(3)：547-564.

黄建平，刘晓岳，何永胜，等，2021. 氧循环与宜居地球[J]. 中国科学：地球科学，51(4)：487-506.

吉林省地质矿产局，1988. 吉林省区域地质志[M]. 北京：地质出版社：1-698.

吉林省地质矿产局，1997. 吉林省岩石地层[M]. 武汉：中国地质大学出版社：1-324.

蒋少涌，陈从喜，陈永权，等，2004. 中国辽东地区超大型菱镁矿矿床的地球化学特征和成因模式[J]. 岩石学报，20(4)：765-772.

孔凡凡，袁训来，周传明，2011. 古元古代冰期事件：山西五台地区滹沱群的碳同位素证据[J]. 科学通报，56(32)：2699-2707.

李静，刘桂春，刘军平，等，2018a. 滇中地区早前寒武纪地质研究新进展[J]. 地质通报，37(11)：1957-1969.

李静，刘军平，孙柏东，等，2018b. 滇中易门地区古元古界易门群亮山组多细胞生物的年代学约束[J]. 地质通报，37(11)：2087-2098.

李凯月，汤好书，陈衍景，等，2020. 胶北地体荆山群大理岩碳氧同位素地球化学特征及其对Lomagundi-Jatuli事件的指示[J]. 岩石学报，36(4)：1059-1075.

辽宁省地质矿产局，1989. 辽宁省区域地质志[M]. 北京：地质出版社：1-865.

辽宁省地质矿产勘查开发局，1997. 辽宁省岩石地层[M]. 武汉：中国地质大学出版社：1-247.

刘福来，刘平华，王舫，等，2015. 胶-辽-吉古元古代造山/活动带巨量变沉积岩系的研究进展[J]. 岩石学报，31(10)：2816-2846.

刘军平，曾文涛，徐云飞，等，2018. 滇中易门地区约1.85Ga凝灰岩的厘定及其地质意义[J]. 地质通报，37(11)：2055-2062.

刘军平，李静，王伟，等，2019. 滇中易门地区早前寒武纪地层化石的发现及其意义[J]. 沉积与特提斯地质，39(4)：57-64, 70.

刘军平，宛胜，李静，等，2021. 滇中易门地区古元古界易门群罗洼垭组火山岩锆石U-Pb年龄及其构造热事件[J]. 地质通报，40(7)：1024-1032.

刘平华，刘福来，王舫，等，2011. 山东半岛荆山群富铝片麻岩锆石U-Pb定年及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志，30(5)：829-843.

刘平华，蔡佳，邹雷，2017. 辽东半岛北部三家子石榴斜长角闪岩变质演化*P-T-t*轨迹及其地质意义：来自相平衡模拟与锆石U-Pb定年的约束[J]. 岩石学报，33(9)：2649-2674.

刘玄，范宏瑞，邱正杰，等，2015. 中条山地区绛县群和中条群沉积时限：夹层斜长角闪岩SIMS锆石U-Pb年代学证据[J]. 岩石学报，31(6)：1564-1572.

罗根明，朱祥坤，王水炯，等，2022. 元古宙早期大氧化事件的成因机制与气候生态效应[J]. 中国科学：地球科学，52(9)：1665-1693.

邱啸飞，陈伟雄，徐大良，等，2022. 扬子陆核崆岭杂岩太古宙地壳演化[J]. 华南地质，38(1)：56-66.

山西省地质矿产局，1989. 山西省区域地质志[M]. 北京：地质出版社：1-780.

沈其韩，张荫芳，1990. 内蒙古中南部早前寒武系变质岩原岩建造和变质作用特征[J]. 中国地质科学院院报，20：41-43.

宋会侠，杨崇辉，杜利林，等，2011. 华北克拉通几个地区古元古代碳酸盐岩地层C-O同位素特征[J]. 岩石矿物学杂志，30(5)：865-872.

汤好书，陈衍景，武广，等，2008. 辽北辽河群碳酸盐岩碳-氧同位素特征及其地质意义[J]. 岩石学报，24(1)：129-138.

汤好书，武广，赖勇，2009a. 辽宁大石桥菱镁矿床的碳氧同位素组成和成因[J]. 岩石学报，25(2)：455-467.

汤好书，陈衍景，武广，等，2009b. 辽东辽河群大石桥组碳酸盐岩稀土元素地球化学及其对Lomagundi事件的指示[J]. 岩石学报，25(11)：3075-3093.

陶鹏，谢士稳，王舫，等，2023. 胶北地区粉子山群碎屑锆石U-Pb年龄、Hf同位素及其对胶-辽-吉带构造演化的制约[J]. 岩石学报，39(9)：2619-2635.

万传辉，张瑜，王莎莎，等，2020. 黄陵基底穹隆北部石墨矿床成矿物质来源的地球化学约束[J]. 岩石矿物学杂志，39(5)：569-582.

王宏宇，张拴宏，王森，等，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[J]. 中国科学：地球科学，54(9)：2878-2897.

王惠初，任云伟，陆松年，等，2015. 辽吉古元古代造山带的地层单元划分与构造属性[J]. 地球学报，36(5)：583-598.

王沛成，1995. 论胶北地区荆山群与粉子山群之关系[J]. 中国区域地质(1)：15-20.

魏君奇，王建雄，王晓地，等，2025. 扬子克拉通黄陵基底的形成及演化[J]. 华南地质，41(1)：1-14.

吴昌华，李惠民，钟长汀，等，2000. 阜平片麻岩和湾子片麻岩的单颗粒锆石U-Pb年龄：阜平杂岩并非一统太古宙基底的年代学证据[J]. 前寒武纪研究进展，23(3)：129-139.

辛后田，罗照华，刘永顺，等，2012. 塔里木东南缘阿克塔什塔格地区古元古代壳源碳酸岩的特征及其地质意义[J]. 地学前缘，19(6)：167-178.

许王，2019. 中朝克拉通古元古代胶-辽-吉带的构造演化：来自岩浆岩地球化学和年代学的约束[D]. 北京：中国地质科学院：1-247.

杨崇辉，杜利林，宋会侠，等，2018. 华北克拉通古元古代地层划分与对比[J]. 岩石学报，34(4)：1019-1057.

杨俊泉，万渝生，刘永顺，等，2012. 阿尔金北缘古元古代壳源火成碳酸岩的发现[J]. 地球科学——中国地质大学学报，37(5)：929-936.

翟明国，2022. 论孔兹岩：地球上特殊地质过程的记录[J]. 地质学报，96(9)：2967-2997.

张传林，李怀坤，王洪燕，2012. 塔里木地块前寒武纪地质研究进展评述[J]. 地质论评，58(5)：923-936.

张传林，马华东，李怀坤，等，2022. 塔里木北缘库鲁克塔格地区古元古界：祝贺芮行健先生90华诞[J]. 华东地质，43(2)：133-140.

张拴宏，赵越，裴军令，2022. 新太古代-古元古代早期表生过程与板块俯冲起始及深部过程耦合关系的探讨[C]//前板块构造与大陆起源，第321期“双清论坛”报告摘要集. 北京：国家自然科学基金委员会地球科学部、交叉科学部、计划与政策局：29.

张水昌，王华建，王晓梅，等，2022. 中元古代增氧事件[J]. 中国科学：地球科学，52(1)：26-52.

钟华，马永生，霍卫国，等，1993. 山西五台山地区早元古代白云岩碳同位素演化及意义[J]. 中国科学(B辑)，23(10)：1009-1014.

钟华，马永生，1995. 碳同位素与早元古代地层对比[J]. 地层学杂志，19(1)：30-35.

周喜文，魏春景，耿元生，2007. 胶北地块高压与低压泥质麻粒岩的相平衡关系与*p*-T演化轨迹[J]. 地学前缘，14(1)：135-143.

周喜文，耿元生，2009. 贺兰山孔兹岩系的变质时代及其对华北克拉通西部陆块演化的制约[J]. 岩石学报，25(8)：1843-1852.

第一作者简介：



张拴宏，中国地质科学院地质力学研究所研究员，博士生导师，主要从事大地构造学及前寒武纪地质学研究。曾获中国地质学会青年地质科技奖（金锤奖）和黄汲清青年地质科学技术奖。2017年获国家自然科学基金青年科学基金项目（A类）（原国家杰出青年科学基金项目）资助。曾入选自然资源部高层次创新型科技人才培养工程（土地资源、地质矿产、地质环境领域）领军人才、科技部中青年科技创新领军人才和人社部百千万人才工程国家级人选。近5年主持国家自然科学基金国际合作重点项目，地质联合基金重点项目、科技部重点研发计划课题及深地重大专项课题各1项。在*Geology*、*Earth Planet. Sci. Lett.*、*Geophys. Res. Lett.*、*Earth-Sci. Rev.*、*Geol. Soc. Am. Bull.*、*Precambrian Res.*、*Lithos*、*Fundamental Res.*、《科学通报》《中国科学》等发表论文100余篇，其中第一兼通讯作者SCI论文60余篇，SCI引用>5800次。2020年至2024年连续5年入选爱思唯尔中国高被引学者。目前担任国际SCI刊物Precambrian Research副主编、国内刊物《地质力学学报》执行主编。