

地球最早冰川记录： 南非太古宙冰川沉积特征辨析及其启示*

旷红伟¹ 陈骁帅^{2,1} 柳永清¹ 王玉冲¹ 范正秀¹

1 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

2 国家地质实验测试中心, 北京 100037

摘 要 地球演化过程中共经历了 6 次主要的大型冰期或冰川事件, 其中最早的冰川事件被认为是发生在 2.9 Ga 前的南非 Pongola 冰川, 但目前对其知之甚少。为了厘清太古宙究竟有无冰川作用以及如何识别此次冰川作用, 笔者通过辨析南非 Kaapvaal 克拉通 Pongola 超群 Mozaan 群 (2.9 Ga) 中杂砾岩的特征, 总结了冰川沉积的识别标志, 并讨论了太古宙 Pongola 超群的杂砾岩是否为冰碛岩。中太古界 Pongola 超群主要分布于南非 Kaapvaal 克拉通东南部, 可进一步分为 Nsuze 群和 Mozaan 群。对 Mozaan 群杂砾岩进行岩石学和沉积学研究以及主量和微量元素地球化学分析, 结果支持对 Mozaan 群杂砾岩的冰川成因解释。Mozaan 群杂砾岩总体特征为: (1) 厚度较小 (<50 m); (2) 块状混杂堆积; (3) 砾石分选、磨圆差; (4) 不同粒径、不同成分的砾石漂浮在细粒基质中; (5) 具有多组方向擦痕和光面的砾石; (6) 薄片, 石英颗粒有拉长或变形特征, 细小的粉砂级颗粒环绕砂级颗粒分布 (星云构造); (7) 纹泥中发育坠石。元素地球化学研究表明, Mozaan 群杂砾岩的投点在 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 图上分布局限, 明显不同于经历了显著风化和分选的现代和古代沉积物的典型线性负相关关系; $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 图上的分布范围也很局限, 主量元素组成类似, 并且杂砾岩基质中富含 Fe_2O_3 (T), 且明显亏损 Ca 和 Na。依据杂砾岩和下伏页岩的三氧同位素 ($\Delta^{17}\text{O}$) 反演得出风化水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与现代极地大气水同位素特征一致, 指示寒冷气候。另外, CIA 等指标表明 Mozaan 群杂砾岩几乎没有遭受成岩蚀变或化学风化, 可代表物源区特征。依据上述结果构建出的冰川沉积模式为: 在低海平面时, 冰川沿山谷向大陆架区域推进, 携带的冰碛物中除了底碛、侧碛和冰川刨蚀基底产生的岩粉外, 还包含了从陆架砂中混入的圆形石英颗粒以及一些来自铁质泥的细粒风化物质。有些冰碛岩来自冰缘地带冰川沉积物的直接卸载以及后期的改造, 表现为冰碛岩与其基底截然接触, 且在部分冰碛岩层下方存在变形层, 而另一部分由厚层冰碛岩上部的坠石指示, 属于被冰筏搬运到距海岸较远的环境沉积形成。

关键词 Pongola 冰川 冰川识别标志 太古宙 Mozaan 群 南非

第一作者简介 旷红伟, 女, 1969 年生, 博士 (后), 教授, 主要从事沉积学、前寒武纪地层学与事件沉积、能源地质研究。E-mail: kuanghw@126.com。

中图分类号: P578.6⁺1 文献标志码: A

The earliest glacial record on Earth: sedimentary characteristics and implications of the Archean glaciation in South Africa

* 国家重点研发计划项目 (编号: 2022YFF0800302), 国家自然科学基金项目 (编号: 42472150, 42072135, 42302123), 北京市科技计划课题—国际创新资源合作项目 (编号: Z201100008320007) 联合资助。[Co-funded by National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFF0800302), National Natural Science Foundation of China (Nos. 42472150, 42072135, 42302123), Peking International Innovation and Resource Cooperation Program (No. Z201100008320007)]

收稿日期: 2025-11-06 改回日期: 2025-11-20

KUANG Hongwei¹ CHEN Xiaoshuai^{2,1} LIU Yongqing¹ WANG Yuchong¹ FAN Zhengxiu¹

¹ *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*

² *National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China*

Abstract The Earth's evolutionary history has witnessed six major glaciations or glacial events, among which the earliest is believed to be the Pongola glaciation in South Africa, occurring approximately 2.9 billion years ago. A number of papers have been published on the last five major glaciations, yet understanding of the Pongola glacier remains limited. This raises key questions: did glaciation exist in the Archean, and how to identify it? By analyzing the characteristics of diamictites in the Mozaan Group (2.9 Ga) of the Pongola Supergroup in the Kaapvaal Craton, South Africa, this study summarizes the diagnostic markers of glacial deposits, and discusses whether the diamictites of the Archean Pongola Supergroup are glacial origin. Meanwhile, it aims to draw more attention from peers to the establishment and development of glacial sedimentology: a subdiscipline of event sedimentology in China. The Mesoarchean Pongola Supergroup is primarily distributed in the southeastern part of the Kaapvaal Craton and can be further divided into two groups: the Nsuze Group and the Mozaan Group. Petrological, sedimentological, and major/trace element geochemical analyses of the Mozaan Group diamictites support the interpretation of glacial origin. The Mozaan Group diamictites generally exhibit the following characteristics: (1) relatively thin thickness (<50 m); (2) massive mixed accumulation; (3) poor sorting and roundness of gravels; (4) gravels of varying particle sizes and compositions "floating" in a fine-grained matrix; (5) gravels with multiple sets of striations and polished surfaces; (6) quartz grains show elongation or deformation with silt-sized grains distributed around sandy grains in thin sections (referred to as a "nebular structure"); (7) dropstones developed in varves. Geochemical studies of elements reveal the following: the data points of Mozaan Group diamictites show a restricted distribution in the $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ diagram, which is significantly different from the typical linear negative correlation observed in modern and ancient sediments that have undergone significant weathering and sorting; The distribution range of $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ is also narrow, and the major element compositions are similar; The matrix of the diamictites is rich in total iron (Fe_2O_3 (T)) and shows a marked depletion of calcium (Ca) and sodium (Na). The mathematical inversion of measured $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{17}\text{O}$ values in the diamictite and the underlying shale yields $\delta^{18}\text{O}$ values of weathering water consistent with the isotopic characteristics of modern polar meteoric water, indicating cold climatic conditions. In addition, indicators such as the Chemical Index of Alteration (CIA) suggest that the Mozaan Group diamictites have barely experienced diagenetic alteration or chemical weathering, thus well representing the characteristics of their provenance. Therefore, the following glacial depositional model is proposed based on the above findings: during periods of low sea level, glaciers advanced along valleys toward the continental shelf. The till (glacial sediment) consisted of not only basal till, lateral till, and rock flour produced by glacial abrasion of the bedrock, but also rounded quartz grains mixed from shelf sands and fine-grained weathered materials derived from ferruginous mud. Some diamictites originated from the direct deposition of glacial sediments in periglacial zones and subsequent modification, characterized by a sharp contact between the diamictites and the underlying bedrock, with deformed layers present beneath parts of the diamictites. Another part of the thick diamictite layers, indicated by dropstones in the upper part, was transported by ice rafts to ice-distal glaciomarine environments.

Key words Pongola glaciation, identification marks of glaciation, Archean, Mozaan Group,

South Africa

About the first author KUANG Hongwei, born in 1969, is a professor and doctoral supervisor at the Institute of Geology, CAGS. She is mainly engaged in sedimentology, Meso-Neoproterozoic stratigraphy and event sedimentology, as well as energy geology. E-mail: kuanghw@126.com.

0 引言

地球自诞生以来至少经历了 6 次主要的大型冰期或冰川事件(图 1; Eyles, 2008), 其中最早的冰川事件是南非中太古界 Pongola 超群 Mozaan 群 (~2.9 Ga) 中的 Pongola 冰川 (Young and Nesbitt, 1998), 随后 2.4–2.1 Ga 的 Huronian (休伦) 冰期是地质史上影响最严重且持续时间最长的一次冰期, 研究程度最高的是被称为“Snowball Earth (雪球地球)”的新元古代成冰纪冰期, 与人类关系最为密切的是末次(第四纪)冰期。冰期事件不仅与超大陆的聚合—裂解紧密相关, 而且与生物进化关系密切, 地质时期的任何一次生命演化都与冰期具有不可分割的关系。同时, 不同时期的冰川都形成了独具特色的剥蚀—搬运—沉积记录, 它们是重建冰期全球古地理、古气候和古环境的重要依据。虽然现今地球上的大陆冰川已退缩到两极地区, 但温室气候加剧导致的全球气候变暖和冰融型海平面快速上升对人类生存构成了巨大威胁, 是全人类必须共同面对的严峻议题, 也让笔者更加深刻地认识到研究冰期冰川的形成演化、运动规律、沉积特征以及其与气候和环境之间关系的重要性, 而这也正好是冰川沉积学、古地理学等学科的核心内

容之一。

对休伦冰期以来的 5 次主要冰期前人均有大量著述发表 (Brenchley *et al.*, 1994; Hoffman *et al.*, 1998; Fielding *et al.*, 2008; 崔之久等, 2011; Le Heron *et al.*, 2019; 旷红伟等, 2021; Kuang *et al.*, 2024), 特别是对新元古代冰川沉积作用的研究已经逐渐深入 (Chen *et al.*, 2020, 2021, 2023)。然而, 关于南非中太古代冰川事件目前却知之甚少, 这主要是由于该冰川形成时间过于久远, 地质记录很难良好保存且资料严重缺乏所致。学者们对 Pongola 冰川是否存在一直持有不同看法: 持反对意见的学者认为, Pongola 超群的杂砾岩不具备显著的冰川特征, 其只是受山岳冰川作用影响下的水下重力流沉积; 反之, 则认为 Kaapvaal 地区在 3.0 Ga 经历了早期的克拉通化, 包括构造作用和深成岩浆事件, 这可能导致大气中 CO₂ 含量减少, 最终为大陆冰川的发展提供了合适条件 (von Brunn and Gold, 1993)。Young 等 (1998) 依据各种冰川识别标志和地球化学指标, 论证了南非 Pongola 超群 Mozaan 群冰川记录的存在。支持太古宙存在冰川的研究者认为, 太古宙比现代更冷, 当时年轻的太阳仅释放出比现在低 25%~30% 的热量

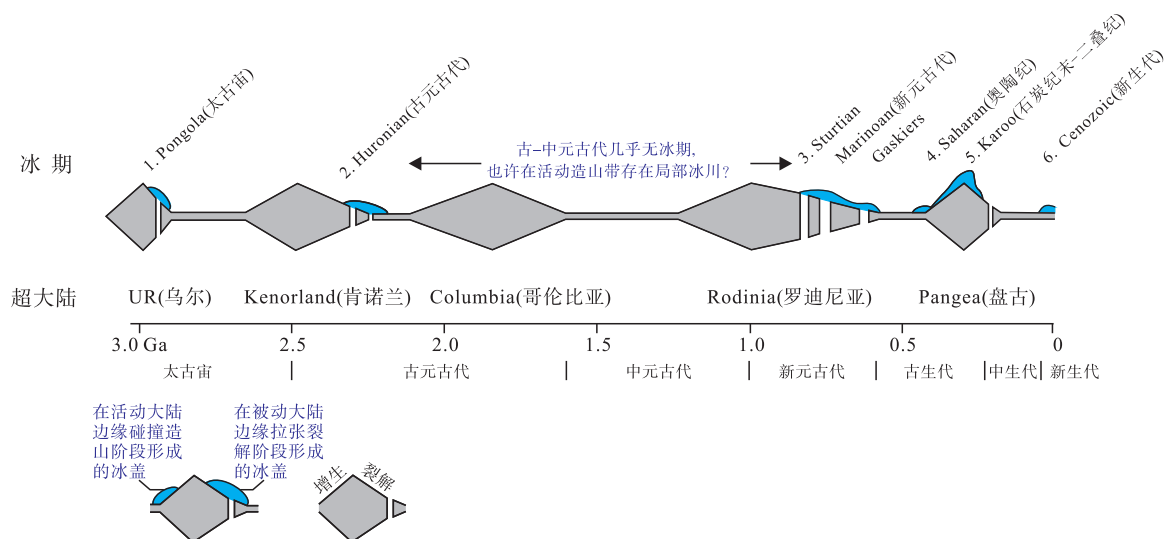


图 1 地质历史时期全球 6 次主要冰川记录 (据 Eyles, 2008)

Fig. 1 Six major glaciation records during the geological history (after Eyles, 2008)

(Sagan and Mullen, 1972; Young, 1991; Kasting, 1993)。Kopp 等 (2005)、Kasting 和 Howard (2006) 推测, 太古宙和古元古代的冰川作用是由于大气中氧浓度的升高抵消了富甲烷大气的温室效应而引发的。然而, 针对太古宙的气候模拟表明, 一个“热温室”支配了太古宙和元古宙的大部分时间, 并阻碍了大范围冰川作用的发生 (Kasting, 1987; Kramers, 2002)。Robert 和 Chaussidon (2006) 通过 Si、O 同位素测试发现, 地球从 3.5 Ga 以来一直处于降温状态, 特别是在 3.5–2.5 Ga 之间, 温度从 70 °C 降低到了 50 °C。通过 Li 同位素示踪发现, 南非 Kaapvaal 盆地 Pongola 超群 Nsuze 群 3.0–2.9 Ga 形成的碳酸盐岩 $\delta^7\text{Li}$ 值为 $\sim 1\text{‰}$, 而 Transvaal 超群 2.6–2.5 Ga 形成的碳酸盐岩 $\delta^7\text{Li}$ 值为 $0\sim 7\text{‰}$, 比 3.0–2.9 Ga 时高出 8‰ , 表明从中太古代到晚太古代, 大陆风化作用减弱、海水温度降低 (付露露等, 2021), 这从另一个角

度支持了 Robert 和 Chaussidon (2006) 的观点。

太古宙究竟有没有发生冰川作用, 以及如何准确判断冰川的存在, 使得冰川标志的识别至关重要。本文旨在通过对南非 Kaapvaal 盆地 Pongola 超群 Mozaan 群中杂砾岩特征的辨析, 讨论该杂砾岩是否为冰碛岩, 并在此基础上总结冰川沉积的识别标志。同时, 希望抛砖引玉, 引起同行更多关注冰川沉积学这一沉积学分支学科在中国的建立和发展。

1 地质背景

作为世界上保存完好的古老克拉通,南非克拉通是研究地球早期演化的宝地,保存了 3.5 Ga 以来的古老变质岩、岩浆岩与沉积地层层序。南非共和国的大部分地区为 Kaapvaal 克拉通,南部位于被动大陆边缘(图 2)。中太古界 Pongola 超群主要分布于 Kaapvaal 克拉通东南部,是保存最古老的

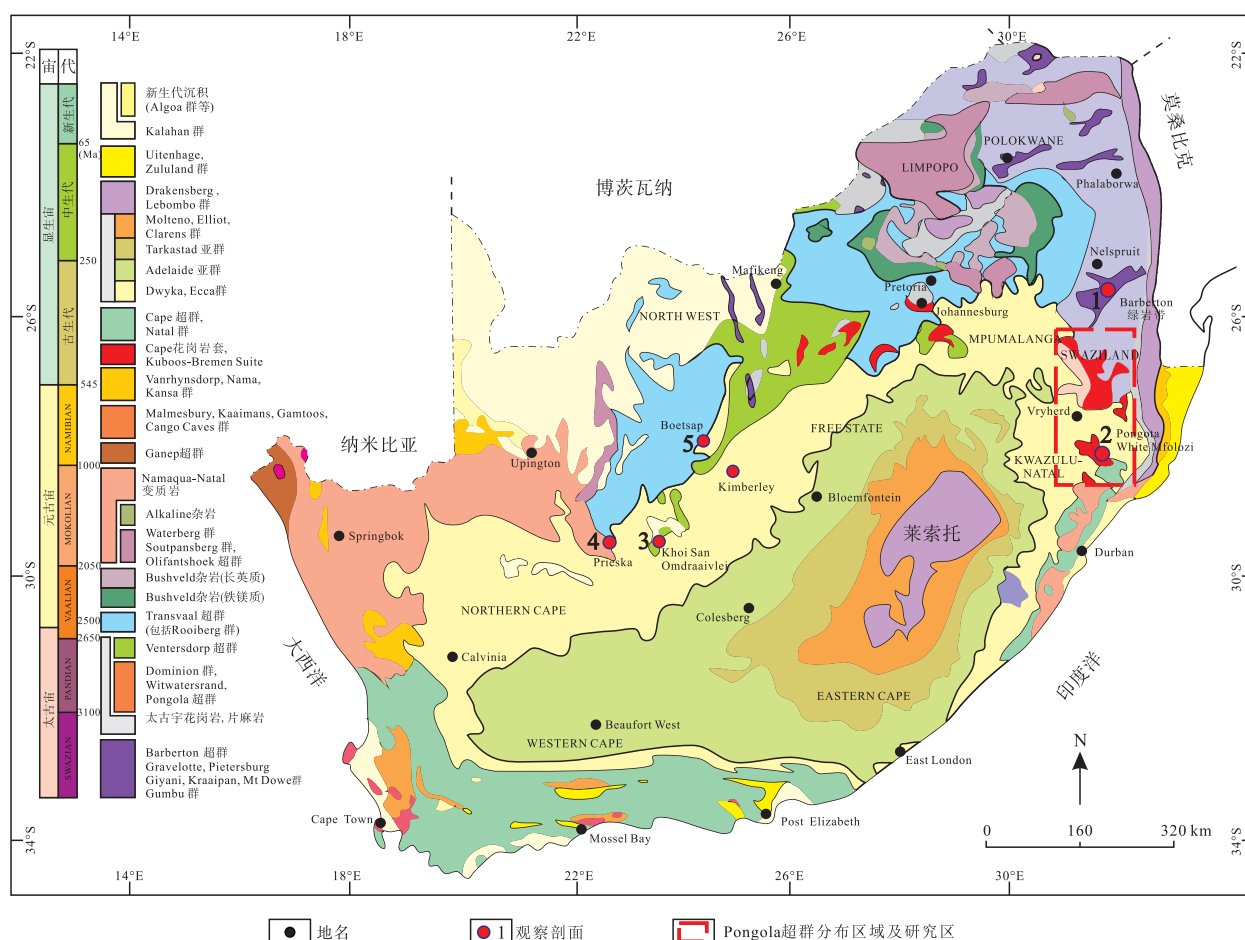


图 2 南非 Kaapvaal 克拉通 Pongola 超群的地层分布 (据 Johnson *et al.*, 2006; 有修改)

Fig. 2 Stratigraphic distribution of the Pongola Supergroup in Kaapvaal Craton, South Africa (modified from Johnson *et al.*, 2006)

克拉通火山-沉积岩序列之一，可进一步分为 Nsuze 群和 Mozaan 群。Nsuze 群主要由滨岸砂岩、潮坪相的叠层石硅质白云岩夹火山岩及铁质泥岩组成。Mozaan 群主要由不等厚、双向交错层理发育的滨岸砂岩与铁质泥岩互层组成。有关 Nsuze 群和 Mozaan 群的关系，有学者认为是上下关系，即 Nsuze 群时限更老，Mozaan 群整合或不整合覆于 Nsuze 群之上 (Wilson *et al.*, 2013)，也有观点认为二者很可能是平行关系 (Mukasa *et al.*, 2013)。无论这两个群的关系如何，依据 Pongola 超群下伏花岗岩类年龄 (3.1–3.3 Ga) 和顶部花岗岩年龄 (2.9–2.8 Ga) (Mukasa *et al.*, 2013)，可将 Pongola 超群的沉积年龄限制在 3.1–2.9 Ga。

实际上，Pongola 超群在 Kaapvaal 克拉通东南部的分布，还可以进一步划分出南、北 2 个次级盆地 (图 3-a)。在南部的 White Mfolozi 河谷，Pongola 超群不整合沉积于花岗岩类基底上，并被二叠系卡鲁超群沉积岩所覆盖。Pongola 超群下部的 Nsuze 群厚约 1400 m，主要由沉积岩与火山岩组成，可分为 5 个组 (图 3-b)。Nsuze 群中部厚 450 m 的 Chobeni 组主要由 4 个不同厚度的潮坪砂岩和碳酸盐岩沉积旋回构成，岩性为叠层石白云岩和白云质砂岩、页岩-砂岩及火山角砾岩与砾质杂砂岩，偶夹脉状层理、交错层理和泥裂 (von Brunn and Mason, 1977; Beukes and Lowe, 1989; Hicks *et al.*, 2011; Siah *et al.*, 2016)，以叠层石大量发育而著称，被称为“最古老的碳酸盐岩潮坪” (图 4)。Pongola 超群上部的 Mozaan 群在 White Mfolozi 剖面厚 700 m 左右，发育厚约 20 m 的杂砾岩 (diamictites)，与 Nsuze 群的关系不清楚，有可能是断层接触。

在该区北部 Swaziland 等地区，Pongola 超群同样不整合沉积于花岗岩类基底上，顶部则被 Venterdorp 超群 (2.72 Ga) 不整合覆盖。上部的 Mozaan 群主要由沉积岩组成，在 Swaziland 的 Hartland 地区厚度可达 4800 m (Gold, 2006)，其角度不整合覆于 Nsuze 群之上，由下往上可分为 9 个组，主要由砂岩、页岩、泥岩组成，局部发育条带状铁建造 (BIF) 与火山岩夹层 (Beukes and Cairncross, 1991)，在南部的浅海环境中局部发育叠层石白云岩 (von Brunn and Hobday, 1976; Beukes and Lowe, 1989; Hicks *et al.*, 2011) (图 3-c)。

厚达 80 多米的杂砾岩赋存于 Mozaan 群 Odwaleni 组中 (图 3)，可能记录了中太古代 (~2.9 Ga) 的冰川作用 (Young *et al.*, 1998)。

2016 年，作者有幸在第 35 届国际地质学大会后，考察了这条由南非 Pretoria University (普利托利亚大学) Wladyslaw Altermann 教授组织的 White Mfolozi 河谷会后考察路线，在 Pongola 超群 Mozaan 群杂砾岩中观察到冰碛岩的特征。结合前人对该观察剖面北部 Swaziland 的 Hartland 地区 Mozaan 群杂砾岩的研究成果，笔者对其是否为冰川沉积进行了简要讨论。

2 Mozaan 群杂砾岩特征

2.1 南部 White Mfolozi 河谷

在 2016 年的地质考察中，笔者沿 White Mfolozi 河谷由南向北，先是见 Nsuze 群的叠层石硅质白云岩向上变为厚层滨岸砂岩夹火山岩与泥岩、白云岩等，总体为一套潮坪—海滩层序。Nsuze 群与 Mozaan 群可能为断层接触，但未观察到。行进到大约 500 m、邻近大桥附近的一个山坳处，可见几百米厚、双向交错层理发育的滨岸中—粗砂岩，之上发育厚约 2 m、黑色、略显纹理、轻微板岩化的含铁粉砂质泥岩 (图 4-a, 4-b)；向上过渡为厚 5 m、双向交错层理发育的灰色细砂岩，局部含有黑灰色泥砾，泥砾成层分布，长轴平行层面，砾径为 5~10 cm (图 4-c)；上覆表面呈土黄色的块状杂砾岩，其与细砂岩截然接触 (图 4-d, 4-e)；杂砾岩之上地层由黑灰色水平和波状纹层发育的含微细紫红色赤铁矿条带的泥岩组成 (图 4-f)，层面上可见菱铁矿结核 (图 4-g)。另外，一些砾岩夹层尽管分选性和磨圆度不太好，但成层性明显，并具有一定的粒序 (图 4-h, 4-i)。

在该剖面上，Mozaan 群总体为一套砂泥互层沉积，中部夹厚约 20 m 的杂砾岩。杂砾岩特征为：(1) 块状堆积、不具成层性 (图 4-d)；(2) 砾石成分以燧石和石英为主，可见白云岩；(3) 砾石分选、磨圆差，呈漂浮状 (图 4-j 至 4-m)；(4) 发育星云构造 (Galaxy structure) (图 4-k 至 4-l)；(5) 有的砾石表面具碎裂结构 (图 4-l)；(6) 可见疑似坠石 (图 4-m)。

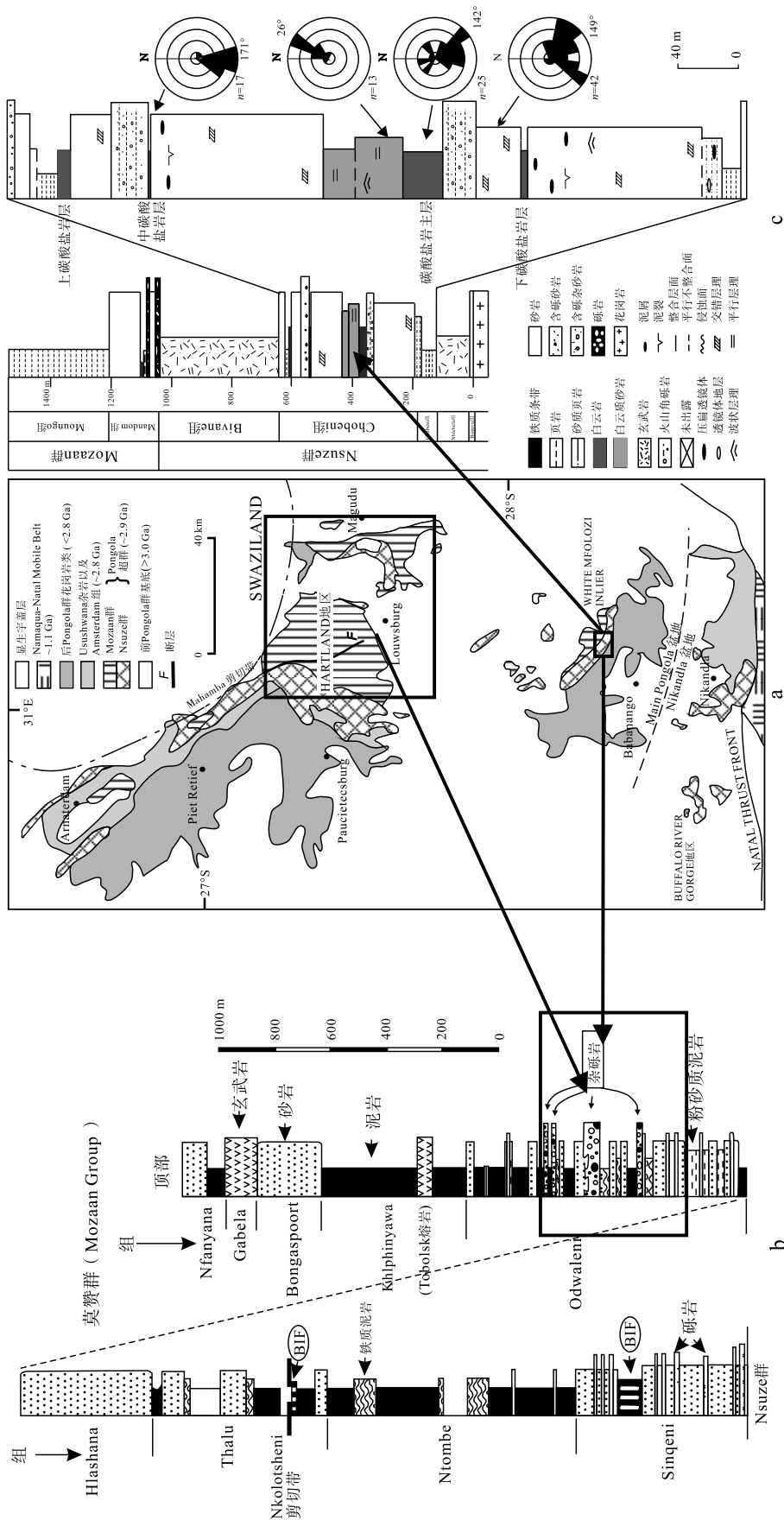


图 3 Pongola 超群在 Kaapvaal 克拉通东南部的分布范围及其地层组成 (据 Young *et al.*, 1998; Wilson *et al.*, 2013; 有修改)

Fig. 3 Distribution and stratigraphy of the Pongola Supergroup in southeast of Kaapvaal Craton (modified from Young *et al.*, 1998; Wilson *et al.*, 2013)



a, b—双向交错层理发育的滨岸相中一粗砂岩，之上发育 2 m 厚黑色含铁粉砂质泥岩；c—含铁粉砂质泥岩向上过渡为 5 m 厚的双向交错层理发育的灰色细砂岩；d, e—块状堆积、不具成层性的杂砾岩；f—杂砾岩之上的黑灰色水平和波状纹层发育的含微细紫红色赤铁矿条带的泥岩；g—黑灰色泥岩，层面上见菱铁矿结核；h, i—分选性和磨圆度一般的砾岩夹层，成层性明显，并有一定的粒序；j—杂砾岩块状堆积、不具成层性，砾石分选性、磨圆度差，呈漂浮状；k, l—星云构造；m—疑似坠石构造

图 4 南非 White Mfolozi 河谷 Mozaan 群杂砾岩及其上、下地层沉积特征

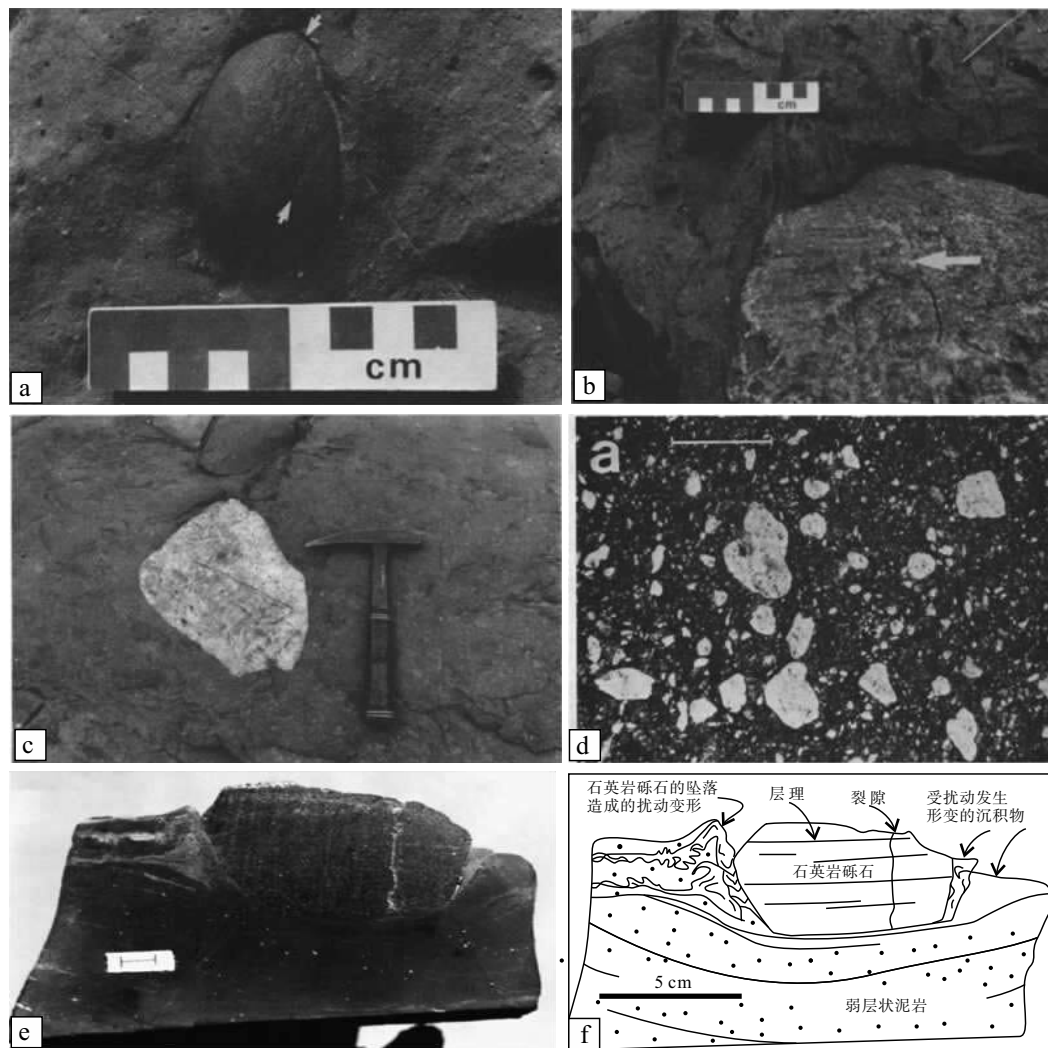
Fig. 4 Sedimentary characteristics of the Mozaan Group diamictite and underlying and overlying strata in White Mfolozi river valley, South Africa

2.2 北部 Swaziland 地区

2.2.1 岩石学特征

在 Swaziland 的 Hartland 地区, Mozaan 群主要由砂岩和泥岩互层组成, 含少量火山岩、卵石质砾岩, 夹铁矿层 (图 3; Beukes and Cairncross, 1991)。杂砾岩赋存于 Mozaan 群 Odwaleni 组, 厚达 80 多米, 通常含有铁质黑色泥岩, 与石英砂岩和杂砂岩互层 (图 3)。共识别出 4 套杂砾岩, 其上整合覆盖厚 200 m 的高成熟度砂岩, 或中等成熟度的粉砂岩和石英砾岩, 其中砂岩中交错层理与波痕

发育, 指示古水流方向主要向南。最底部的杂砾岩位于砂岩之上, 其他的被铁质泥岩层所覆盖。杂砾岩的岩石学特征表现为 (图 5): (1) 砾石分选很差, 呈次圆—棱角状, 最大砾径达 75 cm; (2) 砾石成分复杂, 除石英和燧石外, 还有石英岩、BIF、泥岩、片麻岩、花岗岩和火山岩等各种类型的碎屑 (Von Brunn and Gold, 1993; Young *et al.*, 1998), 而如此不均匀的砾石碎屑组成完全不同于地层序列中的其他砾岩 (图 5-a 至 5-d); (3) 不同粒径、不同成分的砾石漂浮在非常细粒的基质中 (von Brunn and Gold, 1993) (图 5-a 至 5-d); (4) 在



a—Mozaan 群冰碛岩中的石英砾石, 表面擦痕至少保留有 2 个方向 (箭头), 棱角状石英和岩屑颗粒突出在基质中, Mageza 河; b—杂砾岩中石英漂砾具有简单的擦痕 (箭头所示), Klipwal 金矿北东 Mageza 河; c—次圆状石英漂砾镶嵌在 Mozaan 群杂砾岩中; d—Mozaan 群杂砾岩, 石英为主要成分, 细小不透明的磁铁矿颗粒构成了细粒基质部分, 一些颗粒的边界受到低变质作用的影响, 比例尺为 1 mm; e—最厚层杂砾岩顶部铁质纹泥中的坠石, Madaga 河露头区, 比例尺为 1 cm; f—图 e 的素描图。a, b, c 和 d 据 von Brunn 和 Gold (1993); e 和 f 据 Young 等 (1998)

图 5 南非 Swaziland 地区 Mozaan 群杂砾岩特征

Fig. 5 Characteristics of the Mozaan Group diamictite in Swaziland area, South Africa

黑色的泥岩和杂砾岩中，发现带擦痕和光面的砾石，且擦痕方向不限于 1 组（图 5-a, 5-b）；（5）细粒沉积物中的石英砾石有磨圆的迹象（图 5-c）；（6）薄片上，石英颗粒有拉长或变形特征，细小的粉砂级颗粒环绕砂质颗粒分布（图 5-d）；（7）纹泥中发育坠石，有些坠石的周围还有溅起和变形特征（图 5-e, 5-f）。

2.2.2 地球化学特征

在理想情况下，通常需要用大块样品来代表分选差、富含砾石的冰碛岩，但这种取样方式很难在现实中实施。因此，从实际考虑，一般将冰碛岩的基质作为冰碛岩的简单代替（需注意的是，如果某些特定岩石种类存在差异性的机械破坏，则它们在基质中的丰度则可能会被相应的放大）。Young 等（1998）主要研究了 Hartland 地区 Mozaan 群中杂砾岩的基质及其伴生泥岩样品的主、微量元素分布规律，同时将其与 Mozaan 群其他层位泥岩进行对比，以消除样品可能因数量少而不完全具有代表性的影响。该部分内容主要为 Young 等（1998）的研究结果。

2.2.2.1 主量元素分析方法与结果

1) 与 Mozaan 群其他层位的泥岩及老于 3.5 Ga 前的太古宙上地壳的 SiO_2 与 Al_2O_3 相关性对比分析表明，Mozaan 群的杂砾岩和伴生泥岩在该对比图（图 6-a）上分布相对局限，其他层位泥岩则表现出明显的负相关关系。

2) 从现代冰川与非冰川沉积物 SiO_2 与 Al_2O_3 的对比图（图 6-b）中可以看到，来自加拿大巴芬岛北部 Guys Bight 地区（北极地区）的现代冰川河流沉积物分布局限，但是来自澳大利亚东南部温带地区的 Mallacoota 盆地的样品在经历化学风化和机械分选后， SiO_2 和 Al_2O_3 呈线性负相关关系。

3) 在主量元素蛛网图（图 6-c）中，泥岩和杂砾岩的组成非常相似，最显著的差异是泥岩中 Na 亏损和 K 富集。杂砾岩中 Ca、Na、P 明显亏损，K 的亏损程度相对较低。Mozaan 群杂砾岩的主量元素的平均含量比太古宙页岩高。

4) 在 TiO_2 和 Al_2O_3 相关关系图（图 6-d）中，冰碛岩和伴生泥岩的 TiO_2 、 Al_2O_3 含量较高，分布非常局限；而 Mozaan 群其他泥岩的 TiO_2 、 Al_2O_3 含量高，显示出更分散、大致呈线性的分布。杂砾岩和伴生泥岩中 TiO_2 和 Al_2O_3 含量低，可能是由于

Fe 的稀释所造成的，当对 7% 的 Fe_2O_3 (T) 进行“校正”后，杂砾岩和伴生泥岩中的 TiO_2 和 Al_2O_3 含量分布更接近 3.5 Ga 前的地壳估计值。

5) 主量元素的三角图分析。（1）Mozaan 群杂砾岩样品的主量元素 CIA（化学蚀变指数）值介于 58~76 之间，平均为 66.8，低于太古宙页岩的平均估计值（70~75）（Condie, 1993）；同样，Mozaan 群杂砾岩伴生泥岩的 CIA 值也较低，平均为 66.34；相比之下，来自 Mozaan 群的其他泥岩却有着相对较高的 CIA 值（图 6-e 左图）。（2）将 Mozaan 群杂砾岩及伴生泥岩的主量元素投点在三角图及 Fedo 等（1995）的 PIA（斜长石蚀变指数）图上时，显示杂砾岩和伴生泥岩的钙长石组分远高于 Mozaan 群其他泥岩，且不与杂砾岩伴生的 Mozaan 群泥岩分布在三角图顶部附近，具高铝低钙的特征，显示有钠长石的成分（图 6-e 中图）。（3）为了解释 Mozaan 群冰碛岩的异常组成，绘制了“镁铁质三角图”（图 6-e 右图），选取 Al_2O_3 、 $\text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 和 Fe_2O_3 (T) + MgO 的摩尔比例做数轴，结果显示杂砾岩及其伴生泥岩样品靠近虚线（将长石点与 FM 顶点相连），同时 Mozaan 群杂砾岩具有异常高的 Fe_2O_3 (T) 含量，主要成分是 FeO（图 6-e 右图）。

2.2.2.2 微量元素分析方法与结果

Mozaan 群杂砾岩基质和伴生泥岩中多数微量元素相对缺乏，Sr 和 Sc 的亏损尤其强烈（图 7-a）。其中，Mozaan 群部分杂砾岩（和伴生泥岩）的 Th/Sc 值与一般太古宙页岩的 Th/Sc 值相似，但多数略低于 3.5 Ga 前上地壳 Th/Sc 平均估算值（Condie, 1993），而显生宙页岩平均成分的估计值则高得多，接近现今地壳 Th/Sc 平均值（图 7-b）。估算的太古宙和更年轻页岩中的 Sc 含量均略高于其源岩，Th/Sc 值略低于其源岩（如图 7-b 中箭头所指示），推测页岩中 Sc 含量的增加可能反映了黏土矿物的富集（Fedo *et al.*, 1997），与太古宙、元古宙和显生宙砂岩相比成分有明显不同。

3 杂砾岩特征辨析

3.1 冰川沉积的识别方法

冰川沉积物是冰川事件的基本地质记录，也是

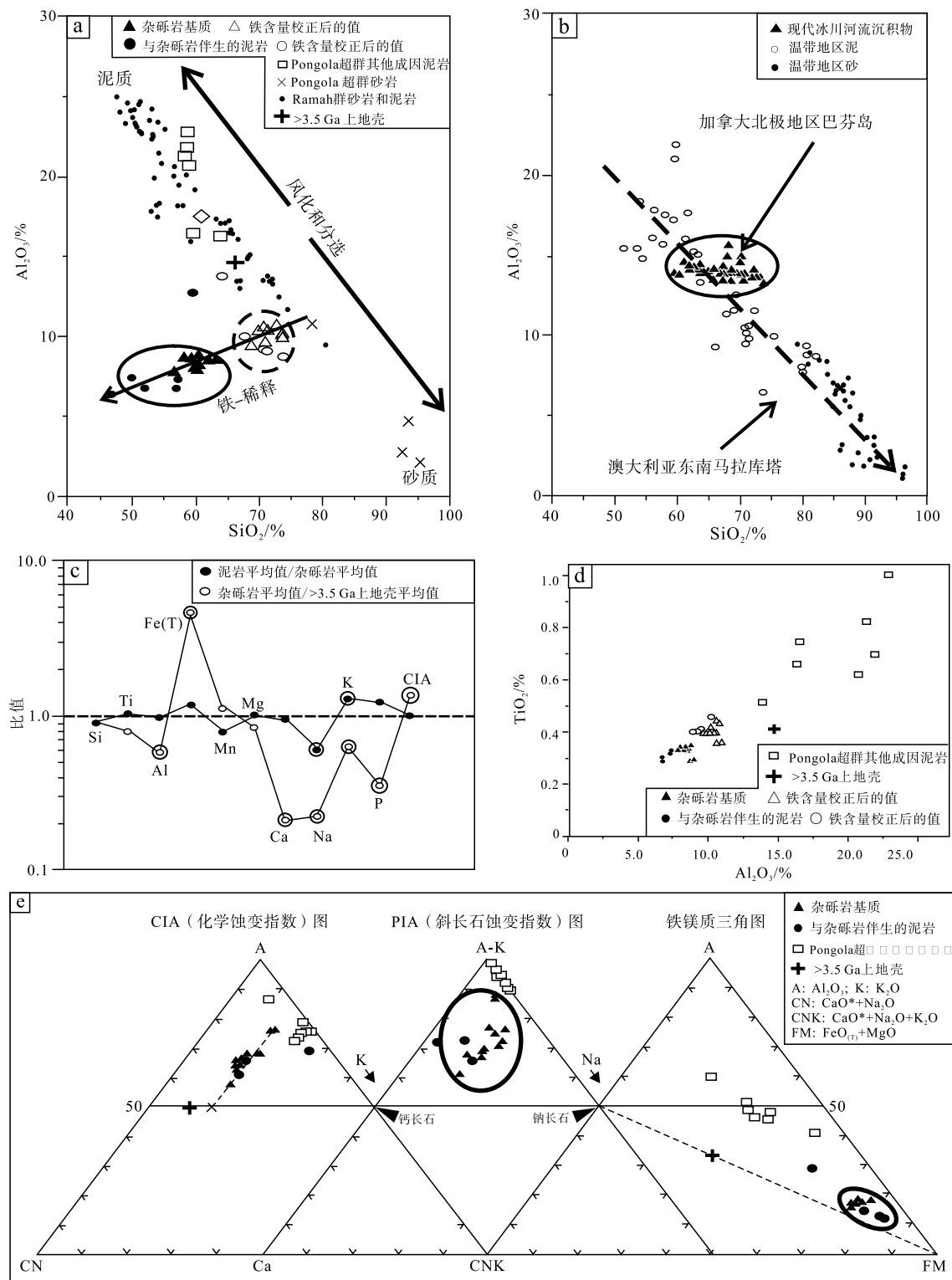


图 6 南非 Mozaan 群杂砾岩的基质及其伴生泥岩样品主量元素分布规律 (据 Young *et al.*, 1998; 有修改)

Fig. 6 Distribution law of major elements of matrix in diamictite and associate mudstone of the Mozaan Group in South Africa (modified from Young *et al.*, 1998)

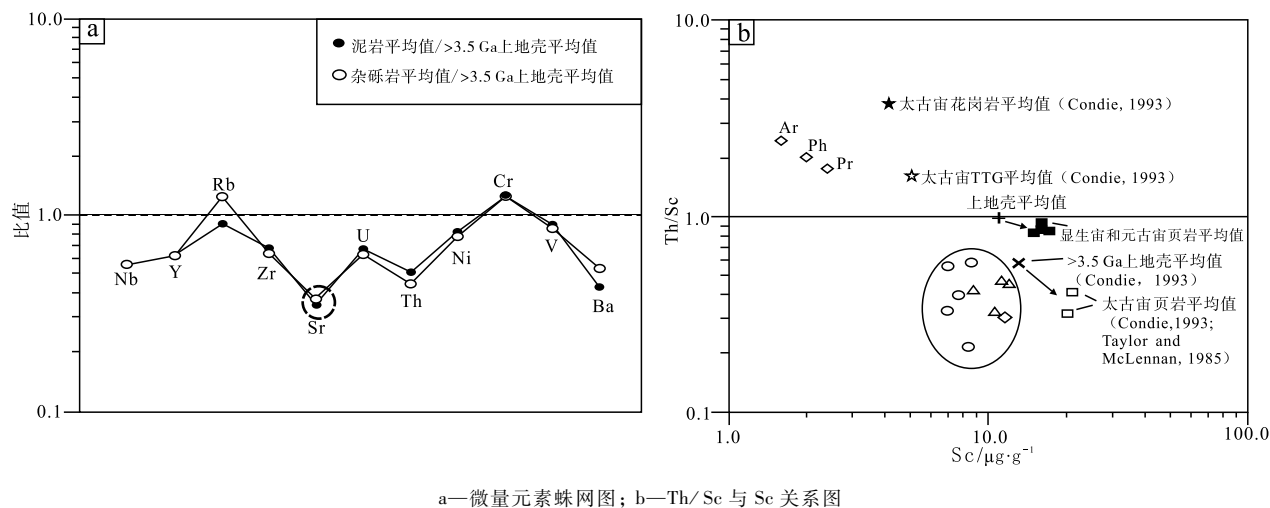


图 7 Mozaan 群杂砾岩的基质及其伴生泥岩样品中微量元素的分布规律 (据 Young *et al.*, 1998)

Fig. 7 Distribution law of minor elements of the matrix in diamictite and associate mudstone of the Mozaan Group in South Africa (after Young *et al.*, 1998)

研究冰川事件的主要证据, 因此如何将地质记录中的冰川沉积物识别出来至关重要。通常, 通过岩石学、矿物学、沉积岩 (物) 的结构、沉积构造、砾石形态、冰川沉积序列、冰川侵蚀地貌、冰下变形构造和地球化学等一系列特征来辨别冰川沉积物。表 1 对一些常见冰川沉积特征、冰川侵蚀地貌和地球化学指标进行了总结。

根据表 1 中归纳的地貌或冰碛岩 (物) 主要特征可以大致识别出冰川沉积, 但应用它们来判断一套杂砾岩是否为冰碛岩时情况可能会变得复杂, 因为许多看似典型的判别标志往往存在多解性, 所有这些特征都不是绝对的 (吴瑞棠和杨玉卿, 1990; Von Brunn and Gold, 1993; Young *et al.*, 1998; Molén, 2023)。例如, 擦痕可由冰川的磨蚀作用形成, 也可能由重力流的刮擦形成, 甚至构造作用形成的擦痕比冰川擦痕更为常见。而且在冰碛岩中并不是所有的冰成沉积特征都会同时出现, 即使典型的冰川识别标志也可能有多解性, 比如, 非冰川成因的碎屑流或泥石流沉积物成分也很复杂, 砾径大小不一, 也可能含有大砾石, 甚至出现擦痕。因此采用表 1 中的特征进行冰川事件识别, 在实际应用中需特别注意, 防止误判。实际上, 冰川磨蚀产生的擦痕与构造或泥石流作用产生的擦痕还是有区别的 (郑本兴和马正海, 1985; 周尚哲, 2021): 冰川砾石上的擦痕系在冰川运动的巨大力量作用下, 不同硬度岩块相互磨蚀刻划而成, 因而

擦痕比较粗而深, 且密集定向分布; 若砾石在冰层中发生多次位移, 则会在砾石表面形成多组交叉擦痕, 擦痕形状呈细长而深、绳形、微弯曲、扫帚状、钉字形等。而泥石流中的砾石表面擦痕是在砾石运移过程中相互碰击推挤造成的, 因其受力方向多变、受力时间短促, 是阵发性或突然受力刻划或撞击而成的, 故其擦痕多为浅而细或粗而短的不光滑刻纹擦痕和打击斑痕 (郑本兴和马正海, 1985; 周尚哲, 2021)。因此, 冰川擦痕常比泥石流产生的擦痕更深, 具有 2 或 3 个运动方向, 而构造运动产生的擦痕往往只有 1 个方向。

在没有冰川擦痕指示且未见坠石的情况下, 可以通过成分、结构、粒度和物源分析来判断是否为冰川沉积物, 也可以通过一些地球化学手段进行辅助。如硅质沉积物的地球化学组分可以反映古气候条件, 因为在寒冷环境中物质的化学风化作用相对较弱, 未分选的物质若是冰川成因, 则未遭受成岩蚀变或是化学风化, 可很好地代表物源区的特征, 作为物源指标。基于此, Mozaan 群冰碛岩采用主量与微量元素分析进行辅助判别 (图 6; 图 7) (Young *et al.*, 1998)。当然, 应用地球化学特征判断冰碛岩的风化程度、从而进一步推测其形成时的古气候背景时, 可能仍存在许多局限, 如样本量是否足够, 或者样本的原始性如何保证。从目前已发表的文献资料来看, 由于冰碛岩具有杂乱的成分和结构以及可能受到后期成岩作用的影响, 因此一直

表 1 冰川沉积岩（物）的基本特征
Table 1 Basic identification characteristics of glacial tillite (sediments)

冰川识别标志		主要特征	识别功能
冰蚀地貌	山峰或山谷形态	U 型谷、刃脊、角峰、冰斗（山岳冰川所特有）	独特标志
冰下底床	冰溜面及伴生冰川侵蚀形貌	擦痕和各种刻痕、颤刻痕、新月形裂缝和凿痕、槽和脊、塑性塑造形态（如贝壳状、纺锤状等）	独特标志，可据此识别冰川运动方向
	羊背石	不对称，光滑缓坡到立陡陡坡为冰川前进方向	独特标志
冰碛岩（物）	杂砾岩特征	分选、磨圆差，含擦痕发育或各种不同形态、大小和成分复杂的砾石，基质支撑为主	带擦痕及各种特殊形态砾石，关键标志
	杂砾岩厚度	一般小于 50 m，薄且局限	辅助标志
	含砾纹泥	粉砂岩或泥岩，具水平层理，含砾石	坠石为关键标志
成分	颗粒组分	岩屑或矿物类型多样，成分成熟度低	辅助标志
结构	分选性与磨圆度	分选性和磨圆度均极差，冰水沉积会稍好	辅助标志
	粒度	双峰式，集中砾和粉砂（黏土）2 个端元	
砾石类型与形态	坠石（漂砾）	直径巨大（几十厘米至几米）的漂砾，异地特征明显	独特标志
	研磨砾石	擦痕石、压扭裂石、压坑和凹面石、子弹状砾石、马鞍石、熨斗石、肾状石、菱面石	独特标志
	多面状砾石	1 个或多个磨光面	
	砾石包壳	砾石表面尚保留 1 层泥膜（皮壳）构造	
微观组构	星云构造或旋转构造	定向拉长的细小砂质或粉砂质颗粒，由于冰的搬运作用而环绕大颗粒的边缘分布	独特标志
沉积构造	常见类型	一般缺失或不明显，冰水中可发育	辅助标志
变形构造	特殊类型	冰下变形构造，如剪切变形、褶皱等常见	重要标志
古生物		陆地冰川沉积物中通常缺失，冰海相中可能存在	辅助标志
沉积序列		一般以冰碛砾岩、砂岩为主，与具纹层粉砂岩、泥岩（含或不含坠石）组合构成向上变细序列	重要标志
地层厚度		垂向、横向上变化极大	辅助标志
地球化学指标	元素相关性	可溶性碱金属 Li-Rb-Cs、过渡金属 Sc-Cr-Co 等与 La 和 Al ₂ O ₃ 呈正相关	辅助标志
	氧化还原敏感元素	Mo、V 的富集或亏损	指示氧化风化作用强弱，辅助标志
	元素或氧化物比值	U/Th、Zr/Sc、Th/Sc、K/Cs 负相关；SiO ₂ /Al ₂ O ₃ 、TiO ₂ /Al ₂ O ₃ 、TiO ₂ /SiO ₂ 不具备明显相关性	辅助标志
	CIA	较低（50~70）	辅助标志，受母岩成分、沉积物再循环、成岩作用干扰
	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr [*]	亏损或下降	辅助标志
	δ ¹⁸ O	平均值以及反演得出风化水的 δ ¹⁸ O 值与极地大气水的对比	辅助标志

以来地球化学方法较少被应用于冰川沉积特征研究。

3.2 Mozaan 群杂砾岩的冰川识别特征

3.0 Ga 时，陆壳已经开始增生并克拉通化，形成早期大陆（Williams *et al.*, 1991；Cawood, 2020）。研究区 Mozaan 群主要由潮间带砂泥岩韵律组成，是早期克拉通化背景下发育的海相沉积（McLennan *et al.*, 1983；Wronkiewicz and Kent,

1989）。古地磁研究表明，Kaaapvaal 克拉通当时处于中高纬度地区（de Kock *et al.*, 2021）。因此，其具备发育冰川所需的大地构造条件，即厚度足够大以及坚固的基底支撑。

Kaaapvaal 克拉通 Mozaan 群杂砾岩及其伴生泥岩岩石学特征为：

1) Mozaan 群杂砾岩在研究区的厚度为 20 ~ 80 m，更接近于冰碛岩或受冰川影响的杂砾岩的特点；相比之下，非冰川成因的杂砾岩（如沉积物重

力流) 常厚度巨大(可达数百米至数千米), 多发育于构造盆地或斜坡带(Molén and Smit, 2022)。

2) Mozaan 群杂砾岩中含有带擦痕、光面和冰川磨蚀的砾石。砾石表面的擦痕通常具有 2 个以上的方向(图 5-a, 5-b), 而且条痕比较深。砾石是否保留冰川磨蚀、搬运的典型痕迹, 以及具有例如子弹状、熨斗状、多面状等形态, 是判断杂砾岩为冰川直接成因的核心依据之一(Kennedy *et al.*, 2019), 有时还可见碎屑铺层(clast pavement)发育且砾石长轴与擦痕平行(Isbell *et al.*, 2021)。由于冰川擦痕常比泥石流擦痕更深, 具有 2 或 3 个方向, 而构造作用产生的擦痕往往只有 1 个方向, 因此, Mozaan 群杂砾岩中的砾石可以排除泥石流或构造作用的影响, 最大的可能是冰川运动造成的。然而, 相比北部 Swaziland 地区, 南部 White Mfolozi 河谷 Mozaan 群杂砾岩中少见发育擦痕的砾石且后者数量较少, 这可能是由于其在冰缘环境中遭受进一步改造所致。此外, 冰川成因杂砾岩的另一核心证据, 即冰下底床表面的冰溜面及伴生冰川侵蚀地貌, 在研究区并未发现。

3) Mozaan 群杂砾岩中的砾石具有多样化的砾径与砾石组分(Young *et al.*, 1998), 相比之下, Pongola 盆地中其他砾岩的砾石主要成分是石英和燧石, 砾径与砾石成分都比较单一。通常, 冰碛岩的砾石一般成分复杂且分选差, 具有明显的盆外砾石特点。但也有学者强调, 必须结合杂砾岩发育地层的构造背景、垂向和横向相变与沉积相综合判断, 这是区分冰川与非冰川杂砾岩的首要前提(Eyles *et al.*, 2004)。另外, 虽然 Kaapvaal 克拉通南部属于被动大陆边缘, 在其演化早期的裂陷盆地内同样可以形成非冰川成因重力流(Eyles and Januszczak, 2004), 然而, Mozaan 群中不同砾径、不同成分的砾石漂浮在细粒的基质中, 区别于普通的重力流, 而和地史上出现的冰碛杂砾岩更相似(图 4; 图 5)。虽然不能完全排除泥石流性质, 但是如此杂乱的物源若是来自一个稳定陆架背景似乎完全不可能。Mozaan 群受到构造作用抬升, 重新沉积并产生了成熟度更高的沉积物, 很可能含有石英和燧石, 但这些杂砾岩中成分复杂且分选差的碎屑岩套不太可能是由这种再沉积作用产生的。

4) Mozaan 群杂砾岩宏观或镜下观察均可见到星云构造(galaxy structure), 其也被称为旋转构造

(rotation structure), 是大多数冰碛物中普遍存在的微结构, 指示冰碛物曾经历塑性变形, 且大概率形成于温暖、松软的冰下变形层中(Menzies and Meer, 2018), 是冰下沉积环境中应力作用与颗粒运动的直接微观证据。星云构造表现为冰下细小的砂质或粉砂质颗粒由于冰川运动过程的粘滞力作用而定向拉长, 而一些更小的碎屑由于冰川的搬运作用, 好像银河系的旋臂一样, 环绕散布在大颗粒的边缘(图 5-d)。这种现象在宏观上也可以观察到(图 4-k, 4-l), 常可看到砾石周围环绕更小的砾级、砂级或粉砂级物质, 这是因为砾级或砂级颗粒在冰下滚动过程中会带动周边物质一起运动。

5) Mozaan 群杂砾岩顶部泥岩中坠石的出现是冰川成因的有力证据, 特别是压实性和“溅起性”特征在碎屑两侧发育, 表明碎屑垂直侵位于未固结或部分固结的层状泥质沉积物中。这通常是携带碎屑荷载的漂浮冰筏进入水体表面后由于融化而使碎屑物质掉落所致。但是, 相比北部 Swaziland 地区, 南部 White Mfolozi 河谷 Mozaan 群杂砾岩中少见坠石记录, Swaziland 地区的少量坠石也可能是由重力流前端产生的少量先锋碎屑堆积(outrunner clasts)(Sohn, 2000)。

6) Mozaan 群杂砾岩中含有磨圆度较好的石英砾石, 这可能说明了其在搬运过程中对冰底携带碎屑物质的加入和改造, 可辅助说明其冰川(下)直接成因。

3.3 Mozaan 群杂砾岩地球化学特征

硅质沉积物的地球化学成分可以反映古气候状况(Young, 1969; Nesbitt and Young, 1996; Pan-ahi and Young, 1997), 同时也可以作为物源指示。然而, 本质上未分选的物质, 如杂砾岩, 则未经过分选过程中的矿物和化学分异(Nesbitt and Young, 1996; Nesbitt *et al.*, 1996)。前人研究了冰碛岩的基质及其伴生泥岩样品中主、微量元素的分布规律, 表明杂砾岩基质与其邻层泥岩所含主量和微量元素类型及含量均一致, 杂砾岩基质中的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值和较低的 CIA 值均说明其未经历明显的化学风化。

3.3.1 主量元素组成与含量(图 6-c)

在 Kaapvaal 克拉通 Mozaan 群中, 与冰碛岩伴生泥岩和杂砾岩的主要元素组成相似, 冰碛岩中 Ca、Na、P 元素明显亏损, K 元素少量亏损, 主量

元素比太古宙页岩的平均含量高,表明组成杂砾岩基质的物质经历了一定的风化作用;而泥岩中 Na 的强烈亏损与 K 的富集,与泥岩中混入较多的风化物质有关。因此,从主量元素含量看,Mozaan 群的杂砾岩及其伴生泥岩仅经历了中度风化。此外,将杂砾岩主量元素平均值与太古宙地盾(>3.5 Ga)页岩估计值(Condie, 1993)进行比较时,杂砾岩中 Fe 含量急剧增加,与许多其他冰海沉积序列(如古元古代冰期事件)特征相同(Li *et al.*, 2016; Le Heron *et al.*, 2022a)。

3.3.2 元素相关性分析

从图 6 可以看出,Mozaan 群冰碛岩和伴生泥岩的投点分布相对局限,没有相关性,而 Mozaan 群其他泥岩(数据来自 McLennan *et al.*, 1983; Wronkiewicz and Kent, 1989; Young *et al.*, 1998)和砂岩的特征(数据来自 Wronkiewicz and Kent, 1989)则呈线性分布,与冰碛岩和伴生泥岩完全不同。对比来自加拿大 Labrador 下元古界 Ramah 群的砂岩和泥岩(Hayashi *et al.*, 1997),其 SiO_2 与 Al_2O_3 呈典型负相关关系。Mozaan 群杂砾岩和伴生泥岩的 TiO_2 和 Al_2O_3 分布非常局限(聚集在一起),Ti/Al 值的分布范围与更新世冰碛岩相似(Young and Nesbitt, 1998);而 Mozaan 群其他泥岩(风化的硅质碎屑沉积物组合)的 TiO_2 和 Al_2O_3 含量较高,并显示出更分散、大致呈线性分布的特征,Ti/Al 值则以线性分布为主(Nesbitt *et al.*, 1996; Young and Nesbitt, 1998)。上述其他沉积岩的线性分布可通过风化过程中岩石矿物的组合来解释:原生硅酸盐中产生的次生铝质黏土矿物经过分选,在不同程度上将粒度较细的铝质黏土与富含硅的残余矿物分离,从而使矿物呈线性分布。而 Mozaan 群的杂砾岩和伴生泥岩的局限分布则是来自结晶基底的冰川沉积物的典型特征,可能反映了其缺乏化学风化和分选作用。这一特征可以从图 6-b 中得到印证,来自加拿大北极地区巴芬岛北部 Guys Bight 地区的现代冰川河流沉积物(Nesbitt and Young, 1996)分布局限,但是来自澳大利亚东南部温带地区的 Mallacoota 盆地的样品(Nesbitt *et al.*, 1996),在经历过化学风化和机械分选后, SiO_2 和 Al_2O_3 呈线性负相关关系。图 6-a 表明,Mozaan 群杂砾岩和伴生泥岩几乎没有受到化学风化作用,这一发现与其冰川成因相一致。

3.3.3 风化作用指标分析

Nesbitt 和 Young (1982)提出的化学蚀变指数(CIA),是量化风化剖面(Nesbitt and Young, 1989; Nesbitt and Wilson, 1992)以及沉积物和沉积岩(Nesbitt and Young, 1982; Nesbitt and Young, 1996; Nesbitt *et al.*, 1996)风化过程的一种方法。从本质上讲,CIA 可以衡量次生铝土矿物与主要硅酸盐矿物(例如长石)的比例。许多研究者都用该指数来分析沉积岩的风化程度(冯连君等, 2003; 齐靛等, 2015; Wang *et al.*, 2020),并据此来鉴别经历过较少风化的古代冰川沉积物(Nesbitt and Young, 1982, 1996; 冯连君等, 2006; Bahlburg and Dobrzinski, 2011; 孙娇鹏等, 2016; 王玉冲等, 2018; Zhang and Zheng, 2022)。Mozaan 群杂砾岩及伴生泥岩 CIA 值较低,平均为 66.08 ~ 66.34;相比之下,Mozaan 群其他泥岩却具有相对较高的 CIA 值(图 6-a 至 6-e)。从图 6 中可以看到,Mozaan 群杂砾岩和伴生泥岩的风化程度远不如其他层位的泥岩,而且大多数杂砾岩和伴生泥岩的 CIA 值也明显低于太古宙页岩的平均估计值。Mozaan 群杂砾岩基质的 CIA 值相对较低,这与冰川成因的解释相符。但是 Mozaan 群杂砾岩的 CIA 值略高于其他一些冰川沉积物,可能反映了随着冰川在沉积盆地中前移,Mozaan 群的泥质沉积中混入了细粒的风化物质。岩石学的观察结果也表明,在杂砾岩基质中存在圆形的石英颗粒(Von Brunn and Gold, 1993; 图 6-a)。

一般认为,地质历史早期化学风化作用强烈,这可能与当时的大气成分有关(McLennan *et al.*, 1983; Wronkiewicz and Kent, 1989; Maynard *et al.*, 1991; Fedo *et al.*, 1996)。如果太古宙确实存在这种强烈的风化条件,那么 Mozaan 群杂砾岩和伴生泥岩中较低的 CIA 值就需要一个特殊的解释,比如冰川成因。

将 Mozaan 群杂砾岩及伴生泥岩的主量元素投点在三角图以及 Fedo 等(1995)的 PIA(斜长石蚀变指数)图(图 6-e)时,杂砾岩和伴生泥岩呈高钙低铝特征,指示低风化程度,而其他泥岩为高铝低钙特征,说明经历了高度风化。在“镁铁质三角图”(图 6-e)中,Mozaan 群冰碛岩及其伴生泥岩样品再次说明了其未风化的特性,而 Mozaan 群其他泥岩远离长石点与 FM 顶点的连线,也说

明了此类泥岩的风化程度较高。镁铁质三角图（图 6-e）中同时还显示了 Mozaan 群杂砾岩具有异常高的 Fe_2O_3 (T) 含量，且主要成分是 FeO。目前这种铁的来源尚不清楚，但类似的富铁泥岩和铁建造通常与新元古代早期冰川成因的冰碛岩有关（Young, 1981, 1988; Breikopf, 1988; Stanistreet *et al.*, 1991; Klein and Beukes, 1993）。这种富含铁的岩石被归因于富含铁的海水上升流被下降的冰川影响的冷洋流所取代（Young, 1981），就像活跃在南极地区的洋流一样（Kort, 1972; Kennett, 1982）。也有学者认为（Cloud, 1976; McLennan, 1980; Veizer, 1984），在太古宙，由于受到高热流和与洋脊快速运动相关的强烈热液循环的影响（Veizer, 1984），深海可能溶解有大量铁。值得注意的是，Witwatersrand 盆地（Government 亚群）杂砾岩中的页岩同样也富含铁。鉴于 Pongola 盆地的杂砾岩与西部 Witwatersrand 盆地中页岩之间可能存在的某种联系，Morris 等（1988）提出，富铁水体的上涌和浅层含氧环境的降水可能是铁富集的主要原因。

3.3.4 微量元素含量指示的风化程度

Th 是一种不相容元素（Taylor and McLennan, 1985），倾向于在岩浆岩序列后期形成阶段富集，而 Sc 则是相容元素，一般在镁铁质矿物中被浸染，因此 Taylor 和 McLennan（1985）认为沉积岩中的 Th/Sc 值可以指示物源。Mozaan 群杂砾岩及其伴生泥岩与 3.5 Ga 前上地壳估计值之间的平均微量元素含量对比表明，沉积岩中大多数微量元素都相对缺乏，原因可能是铁的稀释作用。同时，Sr 和 Sc 的亏损尤其强烈，其中 Sr 通常与 Ca 密切相关，因此 Sr 的亏损可能与上述提到的 Ca 的损耗有关（图 7），而 Ca 的亏损似乎是冰川沉积物的共同特征（Pettijohn and Bastron, 1959; Young, 1969）。Mozaan 群杂砾岩及其伴生泥岩样品具有较低的 Th/Sc 值，可能是样品中缺乏真正的黏土矿物，而不是黏土级别的岩粉。平均页岩估算值和 Mozaan 群样品中较低的 Th/Sc 值，反映了其可能混入了来自镁铁质物源的物质，因为在平均页岩值的情况下，镁铁质来源的物质更容易遭受化学风化，更有可能发生物理破碎并掺入到冰碛岩基质和相关的冰川泥中。

3.4 氧同位素特征

三氧同位素（ $\Delta^{17}\text{O}$ ）分析表明，Mozaan 群杂

砾岩和之下页岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值分别为 $4.7\text{‰} \pm 1.4\text{‰}$ 和 $2.9\text{‰} \pm 0.3\text{‰}$ ，低于目前已知的所有碎屑岩。依据数学反演，其风化水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-18.9\text{‰} \sim -20.9\text{‰}$ ，与现代极地大气水同位素特征一致，指示寒冷气候条件（Hofmann and Bindeman, 2023）。

3.5 Mozaan 群杂砾岩特征

综合前人研究成果，笔者认为 Pongola 超群 Mozaan 群冰碛岩具有以下特征：（1）厚度一般较小；（2）含有多种成分的砾石；（3）发育擦痕和多面状砾石；（4）在纹层状泥岩中发育坠石；（5）砾石分选极差，泥质基质中存在分散的圆形石英颗粒；（6）冰川沉积物在 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 图（图 6-a）上的分布较聚集，明显不同于经历了明显风化和分选的现代和古代沉积物，后者具有典型的线性负相关；（7） $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的分布范围（图 6-d）也很局限，主量元素组成类似，并且杂砾岩基质中富含 Fe_2O_3 (T)，且明显亏损 Ca 和 Na；（8）CIA 和 PIA 指数也能指示冰川成因，在 A-CN-K-FM 三角图中可以明显看出杂砾岩和其他泥岩富铁；（9）杂砾岩和之下页岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值约为 3‰ ，反演得到风化水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值约为 -20‰ ；（10）Kaapvaal 东南部在 2.9 Ga 之前经历了早期克拉通化，古地磁研究指示其处于中高纬度地区，这为冰川的广泛发育提供了一个厚度足够大、出露良好且坚固的基底。

4 Pongola 冰川形成机制讨论

4.1 杂砾岩成因判别特征

长期以来，冰成杂砾岩（冰碛岩）与非冰重力流沉积的区分一直存在争议（Eyles and Januszczak, 2004; Carto and Eyles, 2012; Kennedy *et al.*, 2019），分选差、成分混杂和含巨砾等特征并非冰成杂砾岩专属，需要结合沉积背景、岩石结构、沉积序列、地球化学及构造特征等多指标综合判别。在区分冰碛岩与重力流沉积的判别指标中，比较典型的指标包括地层厚度和展布、地层序列（纹泥中是否伴生坠石）、砾石成分和结构成熟度、擦痕和冰川磨蚀砾石发育、冰下软沉积物变形构造等。此外，有学者还提出了一些冰碛岩可能独有的特征：（1）冰碛砾石的双迎背构造（double stoss-lee forms），即砾石两端均呈现“迎冰面（stoss）平缓、背冰面（lee）陡峭”的不对称结构，这是冰

川磨蚀与挤压共同作用的独特产物,非冰川过程(如沉积物重力流)无法模拟(Molén, 2023)。(2)微观尺度下,石英砾石会由于“冰川磨蚀而非撞击”而形成同步发育的新鲜裂缝与不规则磨蚀痕迹,裂缝边缘粗糙且伴随无定向的磨蚀面,扫描电镜下可见纳米级黏土涂抹层;而非冰重力流仅能形成“单纯裂缝”或“规则磨蚀(如水流导致的圆化)”(Eyles and Januszczak, 2004; Molén, 2023),砾石表面更常见“拼图状纹理”(碎屑被挤压破裂后拼接),砾石和基质之间也形成如同拼图一样的结构(Molén, 2021)。

4.2 Mozaan 群杂砾岩成因

Von Brunn 和 Mason (1977) 对 White Mfolozi 河谷 Pongla 超群 Mozaan 群描述时并未提及冰碛岩的存在,甚至连粗碎屑岩是否存在也未涉及。他们描述的 Mozaan 群完全是一种浅海潮汐环境的产物,只是在有些泥岩中含有一些泥砾。在 Swaziland 的 Hartland 地区近 5000 m 厚 Mozaan 群中发现的 4 套杂砾岩,先被解释为构造作用下重力失衡导致陆架边缘斜坡滑塌形成的碎屑流,后来 von Brunn 和 Gold (1993) 在黑色泥岩中发现带有擦痕和光面的砾石,虽然总体看是碎屑流沉积,但推测也很可能是由于该杂砾岩沉积时盆地处于构造沉降阶段,边缘受构造影响,高原上的冰川碎屑物质与碎屑流沉积物混到了一起,被再次搬运后,顺斜坡沿陆架边缘运移后逐渐沉积下来。与 Pongola 超群大致同期的 Witwatersrand 超群(~ 2870 — ~ 2940 Ma)中也有冰成杂砾岩的报道,但同样有学者根据其中无冰川擦痕砾石、坠石、冰蚀面、外来砾石等冰川典型标志,也提出了非冰川作用的形成方式,例如黏性碎屑流(cohesive debris flows)成因(Martin *et al.*, 1989)。

根据前述对 Mozaan 群杂砾岩的分析和论证可知其整体符合冰川成因特征,但是其纹泥中坠石发育较少且分布局限,表明冰川沉积从冰缘延伸到了冰川远缘深水环境,可能是冰海冰筏沉积,但也不排除其是受冰川影响下的水下碎屑流中的前锋碎屑;较少发育和分布不均的具擦痕砾石也可能是杂砾岩在冰下经由冰缘环境中水下碎屑流搬运改造所致。同时,受成岩作用和变质作用影响,Mozaan 群杂砾岩还经历了轻到中等程度的化学风化(Rainbird *et al.*, 1990; Fedo *et al.*, 1995)。另外,

Mozaan 群受潮汐影响的巨厚潮坪—滨岸相沉积物的成分成熟度和结构成熟度都很高(von Brunn and Hobday, 1976),受到强烈化学风化。相比之下,杂砾岩分选极差,成分成熟度与结构成熟度均低,揭示了其可能为冰川成因;泥质基质中存在分散的圆形石英颗粒,可能是运动过程中混入了潮滩环境中的沙砾,这也进一步揭示该冰碛岩经历了一定距离的搬运。综上,南非的 Mozaan 群杂砾岩记录了中太古代(~ 2.9 Ga)的冰川作用,同时也包括局部受冰川影响的水下碎屑流沉积,很可能是迄今为止地球上最早的冰川沉积记录。

冰川作用的记录在很大程度上取决于地层记录的完整性(Crowell, 1983)。然而,对于古代冰川事件只能获得这类地层记录的一小部分,而且通常是跨地区和全球的碎片性记录(Modie, 2002)。该套冰川沉积仅在南非的 Kaapvaal 东南部和南非西北部 Botswana 的 Witwatersrand 超群发现,在其他大陆或是南非其他地区并未有同期冰川沉积的报道。Pongola 冰川不具备跨区域的冰川沉积记录响应和长期气候冷却信号,更可能是与被动大陆边缘相关的短期区域性或局部性冰川事件。值得指出的是,有学者在研究区北部的巴伯顿绿岩带 Onverwacht 群 Hooggenoeg 组 H6 段长英质火山碎屑岩系中识别出了以冰筏纹泥为代表的冰川沉积(de Wit and Furnes, 2016),其时代(~ 3.5 Ga)要老于 Mozaan 群杂砾岩。然而,也有学者提出了反对其为冰川沉积的意见,认为杂砾岩的结构、“坠石”和纹泥的形态特征等并非冰川成因所致(Lowe and Byerly, 2020)。

太古宙其他冰川活动证据的缺乏部分可能是地层保存的原因,但也很难去进行全球性拓展。关于冰的性质问题,如冰是来自大陆冰原和山脉,还仅是岸边或河流上的冰,目前还不能解决。对于一个局部或区域性冰川,其开始时间及冰盖的范围和性质仍然是一个容易发生争论的议题(Eyles, 1993),故成因也同样很难得到统一的认识。理论上,太古宙“微弱的太阳”可以导致寒冷的气候条件(Sagan and Mullen, 1972; Kasting, 1993)。可是,在太古宙,地球上几乎没有冰川活动的证据(或可以用保存不好来解释),但也可以解释为大气中二氧化碳含量过高,引起相关的温室效应增强(Young, 1991; Kasting, 1993)并最终反转,造

成大陆风化作用加剧, 消耗的 CO_2 (氧化作用) 远远大于风化产生的反馈作用, 因而使地球表层降温并逐渐寒冷冰冻 (Shields *et al.*, 2022)。地球上第 1 次冰川的形成也可能与大气中 CO_2 含量的减少有关。Raymo 和 Ruddiman (1992) 认为, 过去 40 Ma 的气候降温是由于构造作用所导致大气 CO_2 含量的减少。大气中 CO_2 含量减少可归因于喜马拉雅、青藏高原等山地冰川作用产生的细碎物质的风化作用增强, 同时早期大陆的造山运动也会导致大气中 CO_2 含量的显著下降 (Young, 1991), 从而使地表温度降低到地球第 1 个冰期的起点。另外, Kopp 等 (2005)、Kasting 和 Howard (2006) 推断太古宙和古元古代的冰川作用是由大气中 O_2 浓度的升高抵消了富 CH_4 大气的温室升温效应而引发的。

4.3 冰川沉积模式

在低海平面期,冰川除向大陆架地区搬运(物源来自南部),其裹挟的一部分碎屑物质和从古老岩石的物理研磨中得到的岩粉外,冰碛物中还包含了从陆架砂中混入的圆形石英颗粒,以及一些来自铁质泥的细粒风化物质。部分冰碛物在冰缘环境触地卸载并被进一步改造,冰碛岩与基底或下伏沉积呈截然接触关系,部分冰碛岩层下方存在变形层。另一部分被冰筏搬运到冰海远缘环境(图8)。大多数 Mozaan 群层序的典型特征是由前 Mozaan 群基底未风化的冰川碎屑和一些相对风化的沉积物质混合而成。Panahi 和 Young (1997) 通过对苏格兰西部新元古界 Port Askaig 组冰碛岩的地球化学调查,也推断出同生陆架沉积物与冰碛岩有类似的组合。

5 研究意义及展望

冰川事件是指在地质历史的某些时期, 由于大幅度的急剧降温, 在大区域甚至全球范围出现冰川并形成冰川堆积物的地质事件。在漫长的地质时期中, 冰碛物显示出独特的性质, 是地质历史中的特殊事件, 具有重要的研究意义。基于冰川事件不仅可以确定地史上恶劣的严寒气候阶段, 分析古气候演变对地球圈层相互作用、环境、生物演化及成矿的影响, 而且还可以将冰碛岩作为地层划分和对比标志, 探讨某些地史断代的分界。另外, 研究冰川发生与超大陆聚散过程的关联, 恢复古板块位置, 可为全球或区域古板块和古地理重建提供证据。特别是通过鉴古论今, 为应对现今全球气候变化提供参考。

中国具有得天独厚的研究全球不同时代、不同属性冰川地貌及其沉积特征的优越条件。通过研究中国不同时代、不同规模的冰碛岩、冰溜面、冰川沉积构造与冰碛沉积层序,探索区域性和全球性古地理格局,不仅可以揭示深时古环境、古气候及其对生命演化的意义,而且对现今应对全球变化、预测未来气候、环境与生命演化规律、探索地球宜居性条件等,均具有重要科学意义。近年来,中国学者在以新元古代和晚古生代大冰期为代表的深时冰川事件沉积学研究中取得了巨大进展。以新元古代成冰纪“雪球地球”和埃迪卡拉纪冰期为例,在沉积地层格架 (Yu *et al.*, 2020; 旷红伟等, 2023; 李王鹏等, 2023)、冰期启动的沉积响应 (王玉冲等, 2018; Wang *et al.*, 2023a)、冰川作用判别和

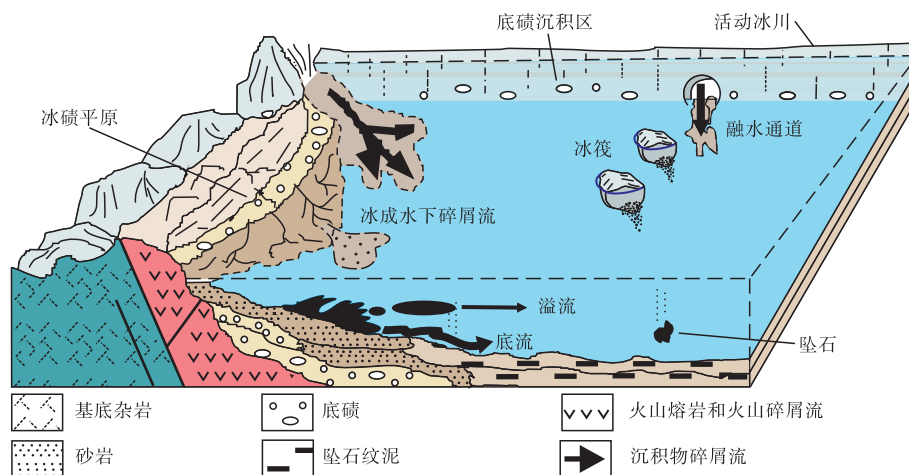


图 8 南非 Pongola 冰川沉积模式 (据 Modie, 2002)

Fig. 8 Schematic depositional model of Pongola glacier in South Africa (after Modie, 2002)

冰川侵蚀形貌 (Chen *et al.*, 2020, 2025; Wang *et al.*, 2022)、冰川沉积旋回的动态变化 (Lang *et al.*, 2016; Hu *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2023)、冰川沉积环境演化和古地理重建 (朱茂炎等, 2016; 王剑等, 2019; Wang *et al.*, 2023b)、生命演化与气候环境的转变 (Ye *et al.*, 2015; 叶云涛等, 2017; Kuang *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2024; Lu *et al.*, 2026; Zhu *et al.*, 2026) 以及间冰期和冰后沉积矿产的形成 (余文超等, 2020; 朱光有等, 2021; 杜远生等, 2025) 等方面取得了大量成果。有关显生宙晚古生代冰期, 由于该时期冰碛岩只在高纬度地区发育, 在低纬度地区更多地体现为海平面升降、碳循环-水圈-气候变化 (郅文昆等, 2010; 杨兵等, 2016; Zhong *et al.*, 2024), 因此, 中国有关晚古生代冰碛岩的沉积学研究主要集中在拉萨地块, 学者们在冰川沉积相的识别与划分和冰川沉积环境演化等方面做了大量工作 (张予杰等, 2013; 李跃, 2016; Wang *et al.*, 2020; 何柯衡等, 2025)。相比之下, 冈瓦纳大陆晚古生代冰川事件在华南的沉积响应和演化过程主要采用冰川性海平面变化、层序地层学、同位素地球化学循环和大陆风化方法等进行研究 (郅文昆等, 2010; Chen *et al.*, 2025; Gao *et al.*, 2025)。

目前, 国际上有关深时冰川沉积学的研究正朝多手段交叉细化研究方向发展, 例如, 使用无人机数字影像对新元古代冰川触地线进行刻画以及垂直运动幅度的判别, 探讨冰川进退行为对轨道变化的敏感性 (Tasistro-Hart *et al.*, 2025); 激光雷达 (LiDAR) 和航天飞机雷达地形测绘任务 (SRTM) 数据以及数字高程模型 (DEM) 分析等技术的交叉应用为冰蚀形貌的高精度定量化研究以及古冰川重建提供了新的研究范式 (Le Heron *et al.*, 2022b)。同时, 冰川沉积学研究尺度也在向微观层面发展, 通过镜下观察揭示冰川剥蚀—搬运—沉积和后期变形过程的冰川显微沉积学在深时冰川沉积研究中得到广泛应用, 结合数值模拟和地球化学分析, 能够建立微观结构与冰下动力学过程的定量关联, 并为解决杂砾岩的冰或非冰成因提供可能的解决方法 (Menzies, 2023)。然而, 目前有关冰碛岩的沉积地球化学研究一般通过 CIA、主量元素比值、Fe 同位素、S 同位素和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}^*$ 等指标来间接指示其沉积物是否经历低化学风化的寒冷环境,

而这些风化指标同时受母岩性质、地貌、暴露时长、风化与搬运过程等多种因素控制, 故开发新的直接指示冰川环境的地球化学指标是亟待解决的问题。迄今为止, 中国对于深时冰川沉积学的详细研究还较少, 且和国际研究现状相比仍没有形成独立的学科体系。因此, 希望有更多学者关注和参与到该领域的研究中来, 结合对现代冰川的认知, 将今论古, 识别和鉴别沉积记录中冰碛岩特征。在此基础上, 以地球系统科学为指导, 在沉积圈科学大背景下, 在中国建立冰川沉积学科体系已成为冰川事件沉积、环境与气候研究的迫切需求。

6 结论

在回顾前人对 Pongola 超群 Mozaan 群杂砾岩是否为冰碛岩的研究过程的中, 总结了识别冰川沉积的标志性特征, 通过对 Mozaan 群杂砾岩的岩石学、沉积学与地球化学特征的分析与甄别, 认为 Pongola 超群 Mozaan 群杂砾岩具有冰川沉积的识别特征, 并同时受到冰川作用影响的水下碎屑流改造, 可将其划归为冰川沉积。在此基础上, 进一步认定南非的 Mozaan 群记录了中太古代 ($\sim 2.9 \text{ Ga}$) 的冰川作用, 是迄今为止地球最早的冰川沉积记录。

致谢 谨以此文缅怀冯增昭先生, 纪念先生诞辰 100 周年! 同时感谢 2016 年一同参加南非野外考察的中国地质科学院矿产资源研究所李延河、李厚民、范昌福研究员和西北大学张兴亮教授等给予的帮助, 特别要感谢南非 Pretoria University (普利托利亚大学) Wladyslaw Altermann 教授及其学生为组织此次野外考察付出的辛勤劳动!

参考文献 (References)

- 崔之久, 陈艺鑫, 张威, 周尚哲, 周力平, 张梅, 李川川. 2011. 中国第四纪冰期历史、特征及成因探讨. 第四纪研究, 31(5): 749-764. [Cui Z J, Chen Y X, Zhang W, Zhou S Z, Zhou L P, Zhang M, Li C C. 2011. Research history, glacial chronology and origins of Quaternary glaciations in China. Quaternary Sciences, 31(5): 749-764]
- 杜远生, 郭华, 张亚冠, 刘建中, 王泽鹏, 吴文明, 陈国勇, 赵征, 邓超. 2025. 基于“磷酸盐工厂”的磷矿沉积学研究: 以黔中地区埃迪卡拉统陡山沱组磷矿为例. 古地理论, 27(5): 1081-1103. [Du Y S, Guo H, Zhang Y G, Liu J Z, Wang Z P, Wu W M, Chen G Y, Zhao Z, Deng C. 2025. Sedimentological study of phosphorite de-

- posits based on "Phosphate Factory" model: A case study of the Ediacaran Doushantuo Formation phosphorites in central Guizhou Province, China. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 27(5): 1081–1103]
- 冯连君, 储雪蕾, 张启锐, 张同钢. 2003. 化学蚀变指数(CIA)及其在新元古代碎屑岩中的应用. *地学前缘*, 10(4): 539–544. [Feng L J, Chu X L, Zhang Q R, Zhang T G. 2003. CIA(chemical index of alteration) and its applications in the in Neoproterozoic clastic rocks. *Earth Science Frontiers*, 10(4): 539–544]
- 冯连君, 储雪蕾, 张同钢, 黄晶. 2006. 莲沱砂岩: 南华大冰期前气候转冷的沉积记录. *岩石学报*, 22(9): 2387–2393. [Feng L J, Chu X L, Zhang T G, Huang J. 2006. Liantuo sandstones: sedimentary records under cold climate before the Nanhua big glaciations. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2387–2393]
- 付露露, 肖益林, 张兴亮, 王洋洋, 谭东波. 2021. Li 同位素组成对太古宙海水相关的表生环境过程的初步限定. *地球科学*, 46(6): 2073–2082. [Fu L L, Xiao Y L, Zhang X L, Wang Y Y, Tan D B. 2021. Preliminary definition of Li isotope compositions on surficial environmental processes associated with Archean seawater. *Earth Science*, 46(6): 2073–2082]
- 何柯衡, 许欢, 安显银, 刘高政, 杜研, 丁家翔, 夏磊, 苑婷媛, 郑洪波. 2025. 拉萨地块晚古生代冰期沉积特征研究: 以申扎地区为例. *沉积学报*, 43(3): 976–995. [He K H, Xu H, An X Y, Liu G Z, Du Y, Ding J X, Xia L, Yuan T Y, Zheng H B. 2025. Sedimentary characteristics of the Late Paleozoic ice age in the Lhasa Block: a case study from the Xainza area. *Acta Sedimentologica Sinica*, 43(3): 976–995]
- 旷红伟, 郑秀娟, 陈骁帅. 2021. 冰雪奇缘: 冰期与冰川那些事. *矿物岩石地球化学通报*, 40(3): 757–762. [Kuang H W, Zheng X J, Chen X S. 2021. Ice age and glacial stories: a review of glaciations and glaciers. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 40(3): 757–762]
- 旷红伟, 柳永清, 耿元生, 彭楠, 王玉冲, 陈骁帅, 刘燕学, 杨锋杰, 赵峰华, 刘鹏举, 杜利林, 宋焕新, 王德海, 王昌勇, 白华青, 东归霖, 祁柯宁. 2023. 中国中一新元古代地层研究进展及建议划分、对比方案. *地质学报*, 97(12): 3961–4019. [Kuang H W, Liu Y Q, Geng Y S, Peng N, Wang Y C, Chen X S, Liu Y X, Yang F J, Zhao F H, Liu P J, Du L L, Song H X, Wang D H, Wang C Y, Bai H Q, Dong G L, Qi K N. 2023. Research advances, a subdivision and correlation of the Meso-Neoproterozoic stratigraphy in China. *Acta Geologica Sinica*, 97(12): 3961–4019]
- 李王鹏, 王毅, 李慧莉, 杨伟利, 张仲培, 陈跃, 王斌, 刘少峰, 顾浩, 钱涛, 李晓剑. 2023. 塔里木地块新元古代冰期事件研究进展. *地质学报*, 97(3): 938–960. [Li W P, Wang Y, Li H L, Yang W L, Zhang Z P, Chen Y, Wang B, Liu S F, Gu H, Qian T, Li X J. 2023. Research progress on the Neoproterozoic glaciations in the Tarim Block. *Acta Geologica Sinica*, 97(3): 938–960]
- 李跃. 2016. 西藏罗仓地区拉嘎组沉积特征及其构造背景探讨. 成都理工大学硕士学位论文: 1–65. [Li Y. 2016. Sedimentary characteristics and tectonic setting of Laga Formation in Luocang area, Tibet. Masteral dissertation of Chengdu University of Technology: 1–65]
- 齐靓, 余文超, 杜远生, 周琦, 郭华, 王佳武, 王萍, 徐源. 2015. 黔东南华纪铁丝垌期—大塘坡期古气候的演变: 来自 CIA 的证据. *地质科技情报*, 34(6): 47–57. [Qi L, Yu W C, Du Y S, Zhou Q, Guo H, Wang J W, Wang P, Xu Y. 2015. Paleoclimate evolution of the Cryogenian Tiesi'ao Formation–Datangpo Formation in eastern Guizhou Province: evidence from the chemical index of alteration. *Geological Science and Technology Information*, 34(6): 47–57]
- 鄯文昆, 张雄华, 杜远生, 张扬. 2010. 华南地区下石炭亚系碳同位素记录及对晚古生代冰期的响应. *中国科学: 地球科学*, 40(11): 1533–1542. [Qie W K, Zhang X H, Du Y S, Zhang Y. 2010. Lower Carboniferous carbon isotope stratigraphy in South China: implications for the Late Paleozoic glaciation. *Scientia Sinica (Terrae)*, 40(11): 1533–1542]
- 孙娇鹏, 陈世悦, 彭渊, 高立祥, 马帅, 邵鹏程, 刘金, 代昆, 郑策. 2016. 欧龙布鲁克山全吉群砂砾岩地球化学特征及地质意义. *矿物学报*, 36(2): 174–182. [Sun J P, Chen S Y, Peng Y, Gao L X, Ma S, Shao P C, Liu J, Dai K, Zheng C. 2016. Geochemical composition of glutenite from Quanji Group in Oulongbuluke Mountain outcrop and its geological significance. *Acta Mineralogica Sinica*, 36(2): 174–182]
- 王剑, 江新胜, 卓皆文, 崔晓庄, 江卓斐, 魏亚楠, 蔡娟娟, 廖忠礼. 2019. 华南新元古代裂谷盆地演化与岩相古地理. 北京: 科学出版社, 1–252. [Wang J, Jiang X S, Zhuo J W, Cui X Z, Jiang Z F, Wei Y N, Cai J J, Liao Z L. 2019. Evolution and Lithofacies Palaeogeography of the Neoproterozoic Rift Basins in South China. Beijing: Science Press, 1–252]
- 王玉冲, 旷红伟, 彭楠, 柳永清, 范正秀, 夏晓旭, 陈骁帅, 郑行海, 孙宇翔. 2018. 扬子克拉通北缘神农架南华系莲沱组寒冷气候的沉积学证据: 冻融构造. *古地理学报*, 20(4): 579–594. [Wang Y C, Kuang H W, Peng N, Liu Y Q, Fan Z X, Xia X X, Chen X S, Zheng H H, Sun Y X. 2018. Freezing and thawing structures: An evidence of cold climate in the Neoproterozoic Liantuo Formation in Shennongjia of northern margin of Yangtze Craton. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 20(4): 579–594]
- 吴瑞棠, 杨玉卿. 1990. 冰川事件的识别标志. *地球科学*, 16(4): 353–359. [Wu R T, Yang Y Q. 1990. The indicators for recognizing glacial events. *Earth Science*, 16(4): 353–359]
- 杨兵, 夏浩东, 杨欣杰, 韦一. 2016. 晚古生代冰期研究进展. *地质科技情报*, 35(2): 140–151. [Yang B, Xia H D, Yang X J, Wei Y. 2016. Late Paleozoic ice age: Review of recent progress. *Geological Science and Technology Information*, 35(2): 140–151]
- 叶云涛, 王华建, 翟俪娜, 周文喜, 王晓梅, 张水昌, 吴朝东. 2017. 新元古代重大地质事件及其与生物演化的耦合关系. *沉积学报*, 35(2): 203–216. [Ye Y T, Wang H J, Zhai L N, Zhou W X, Wang X M, Zhang S C, Wu C D. 2017. Geological events and their biological responses during the Neoproterozoic era. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(2): 203–216]
- 余文超, 杜远生, 周琦, 王萍, 齐靓, 徐源, 靳松, 潘文, 袁良军, 谢小峰,

- 杨炳南. 2020. 华南成冰纪“大塘坡式”锰矿沉积成矿作用与重大地质事件的耦合关系. 古地理学报, 22(5): 855–871. [Yu W C, Du Y S, Zhou Q, Wang P, Qi L, Xu Y, Jin S, Pan W, Yuan L J, Xie X F, Yang B N. 2020. Coupling between metallogenesis of the Cryogenian Datangpo-type manganese deposit in South China and major geological events. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 22(5): 855–871]
- 张予杰, 张以春, 庞维华, 朱同兴. 2013. 西藏申扎地区拉嘎组岩相/沉积相分析. 沉积学报, 31(2): 269–281. [Zhang Y J, Zhang Y C, Pang W H, Zhu T X. 2013. The litho/sedimentary facies analysis of Lagar Formation, Xainza area, Tibet. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(2): 269–281]
- 郑本兴, 马正海. 1985. 冰川沉积与非冰川沉积中砾石和碎屑矿物表面的形态特征. 第四纪研究, 5(1): 69–72. [Zheng B X, Ma Z H. 1985. Surface morphological characteristics of the gravels and the debris minerals in glacial and non-glacial deposits. *Quaternary Sciences*, 5(1): 69–72]
- 周尚哲. 2021. 论冰砾石的形态特征及其与泥石流石的区别. 冰川冻土, 43(3): 683–689. [Zhou S Z. 2021. A study on the morphological features of glaciated stone and its differences from debris flow stone. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 43(3): 683–689]
- 朱光有, 赵坤, 李婷婷, 张志遥. 2021. 中国华南陡山沱组烃源岩的形成机制与分布预测. 地质学报, 95(8): 2553–2574. [Zhu G Y, Zhao K, Li T T, Zhang Z Y. 2021. Formation mechanism and distribution prediction of source rocks in the Ediacaran Doushantuo Formation, South China. *Acta Geologica Sinica*, 95(8): 2553–2574]
- 朱茂炎, 张俊明, 杨爱华, 李国祥, 赵方臣, 吕苗, 殷宗军. 2016. 华南新元古代地层、生一储一盖层发育与沉积环境. 孙枢, 王铁冠(主编). 中国东部中—新元古界地质学与油气资源. 北京: 科学出版社, 107–135. [Zhu M Y, Zhang J M, Yang A H, Li G X, Zhao F C, Lü M, Yin Z J. 2016. Stratigraphy, source-reservoir-cap rock development and sedimentary environments of the Neoproterozoic in South China. In: Sun S, Wang T G (eds). *Meso-Neoproterozoic Geology and Oil and Gas Resources in East China*. Beijing: Science Press, 107–135]
- Bahlburg H, Dobrzinski N. 2011. A review of the Chemical Index of Alteration (CIA) and its application to the study of Neoproterozoic glacial deposits and climate transitions. *Geological Society, London, Memoirs*, 36(1): 81–92.
- Beukes N J, Lowe D R. 1989. Environmental control on diverse stromatolite morphologies in the 3000 Myr Pongola Supergroup, South Africa. *Sedimentology*, 36(3): 383–397.
- Beukes N J, Cairncross B. 1991. A lithostratigraphic-sedimentological reference profile for the Late Archaean Mozaan Group, Pongola Sequence: application to sequence stratigraphy and correlation with the Witwatersrand Supergroup. *South African Journal of Geology*, 94(1): 44–69.
- Breitkopf J H. 1988. Iron formations related to mafic volcanism and ensialic rifting in the southern margin zone of the Damara Orogen, Namibia. *Precambrian Research*, 38(2): 111–130.
- Brenchley P J, Marshall J D, Carden G A F, Robertson D B R, Long D G F, Meidla T, Hints L, Anderson T F. 1994. Bathymetric and isotopic evidence for a short-lived Late Ordovician glaciation in a greenhouse period. *Geology*, 22(4): 295–298.
- Carto S L, Eyles N. 2012. Identifying glacial influences on sedimentation in tectonically-active, mass flow dominated arc basins with reference to the Neoproterozoic Gaskiers glaciation (c. 580 Ma) of the Avalonian-Cadomian Orogenic Belt. *Sedimentary Geology*, 261: 1–14.
- Cawood P A. 2020. Earth Matters: a tempo to our planet's evolution. *Geology*, 48(5): 525–526.
- Chen J T, Li S H, Zhang S, Isson T, Dahl T W, Planavsky N J, Zhang F F, Wang X D, Shen S Z, Montañez I P. 2025. Repeated occurrences of marine *Anoxia* under high atmospheric O_2 and icehouse conditions. *PNAS*, 122: e2420505122.
- Chen X S, Kuang H W, Liu Y Q, Wang Y C, Yang Z R, Vandyk T M, Le Heron D P, Wang S Y, Geng Y S, Bai H Q, Peng N, Xia X X. 2020. Subglacial bedforms and landscapes formed by an ice sheet of Ediacaran-Cambrian age in west Henan, North China. *Precambrian Research*, 344: 105727.
- Chen X S, Kuang H W, Liu Y Q, Le Heron D P, Wang Y C, Peng N, Wang Z X, Zhong Q, Yu H L, Chen J X. 2021. Revisiting the Nantuo Formation in Shennongjia, South China: a new depositional model and multiple glacial cycles in the Cryogenian. *Precambrian Research*, 356: 106132.
- Chen X S, Kuang H W, Liu Y Q, Peng N, Wang Y C, Qi K N. 2023. Sedimentary characteristics and evolution of Ediacaran glaciation in western Henan Province, southern North China Craton. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 632: 111866.
- Chen X S, Kuang H W, Liu Y Q, Le Heron D P, Wang Y C, Peng N, Cui M M, Qi K N. 2025. Dynamics of Marinoan-age glaciers in NW Tarim, China. *Precambrian Research*, 430: 107933.
- Cloud P. 1976. Major Features of Crustal Evolution. Johannesburg: Geological Society of South Africa, 1–33.
- Condie K C. 1993. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales. *Chemical Geology*, 104(1–4): 1–37.
- Crowell J C. 1983. Ice ages recorded on Gondwanan continents. *South African Journal of Geology*, 86(3): 237–262.
- de Kock M O, Luskin C R, Djeutchou C, Wabo H. 2021. Chapter 12 The precambrian drift history and paleogeography of the Kalahari craton. In: Pesonen L J, Salminen J, Elming S Å, Evans D A D, Veikkolainen T (eds). *Ancient Supercontinents and the Paleogeography of Earth*. Netherlands: Elsevier, 377–422.
- de Wit M J, Furnes H. 2016. 3. 5–Ga hydrothermal fields and diamictites in the Barberton Greenstone Belt: Paleoproterozoic crust in cold environments. *Science Advances*, 2(2): e1500368.
- Eyles N. 1993. Earth's glacial record and its tectonic setting. *Earth-Science Reviews*, 35(1–2): 1–248.
- Eyles N. 2008. Glacio-epochs and the supercontinent cycle after

- ~3.0 Ga; tectonic boundary conditions for glaciation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 258(1-2): 89-129.
- Eyles N, Januszczak N. 2004. 'Zipper-rift': a tectonic model for Neoproterozoic glaciations during the breakup of Rodinia after 750 Ma. *Earth-Science Reviews*, 65(1-2): 1-73.
- Fedo C M, Wayne Nesbitt H, Young G M. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23(10): 921-924.
- Fedo C M, Eriksson K A, Krogstad E J. 1996. Geochemistry of shales from the Archean (~3.0 Ga) Buhwa Greenstone Belt, Zimbabwe: implications for provenance and source-area weathering. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(10): 1751-1763.
- Fedo C M, Young G M, Nesbitt H W. 1997. Paleoclimatic control on the composition of the Paleoproterozoic Serpent Formation, Huronian Supergroup, Canada: a greenhouse to icehouse transition. *Precambrian Research*, 86(3-4): 201-223.
- Fielding C R, Frank T D, Isbell J L. 2008. The late Paleozoic ice age: a review of current understanding and synthesis of global climate patterns. Resolving the late Paleozoic ice age in time and space, 441: 343-354.
- Gao B, Xu G Z, Yang W L, Chen J T. 2025. Disentangling continental weathering during the Late Paleozoic ice age. *Geophysical Research Letters*, 52(19): e2025 GL117395.
- Gold D J C. 2006. The Pongola Supergroup. In: Johnson M R, Anhaeusser C R, Thomas R J (eds). *The Geology of South Africa*. Pretoria: The Geological Society of South Africa, Johannesburg and the Council for Geoscience, 135-147.
- Hayashi K I, Fujisawa H, Holland H D, Ohmoto H. 1997. Geochemistry of ~1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(19): 4115-4137.
- Hoffman P F, Kaufman A J, Halverson G P, Schrag D P. 1998. A Neoproterozoic snowball earth. *Science*, 281(5381): 1342-1346.
- Hofmann A, Bindeman I N. 2023. Earth's first glaciation at 2.9 Ga revealed by triple oxygen isotopes. *Geochemical Perspectives Letters*, 26: 20-24.
- Hicks N, Dunlevey J N, Liu K W. 2011. A new stromatolite occurrence in the Nsuze Group, Pongola Supergroup of northern KwaZulu-Natal, South Africa. *South African Journal of Geology*, 114(2): 195-200.
- Hu J, Li C, Tong J N, Ye Q, Tian L, An Z H, Dodd M S, Algeo T J. 2020. Glacial origin of the Cryogenian Nantuo Formation in eastern Shennongjia area (South China): implications for macroalgal survival. *Precambrian Research*, 351: 105969.
- Isbell J L, Vesely F F, Rosa E L M, Pauls K N, Fedorchuk N D, Ives L R W, McNall N B, Litwin S A, Borucki M K, Malone J E, Kusick A R. 2021. Evaluation of physical and chemical proxies used to interpret past glaciations with a focus on the Late Paleozoic Ice Age. *Earth-Science Reviews*, 221: 103756.
- Johnson M R, Anhaeusser C R, Thomas R J. 2006. *The Geology of South Africa*. Pretoria: Geological Society of South Africa, Johannesburg/ Council for Geoscience: 1-691.
- Kasting J F. 1987. Theoretical constraints on oxygen and carbon dioxide concentrations in the Precambrian atmosphere. *Precambrian Research*, 34(3-4): 205-229.
- Kasting J F. 1993. Earth's early atmosphere. *Science*, 259(5097): 920-926.
- Kasting J F, Howard M T. 2006. Atmospheric composition and climate on the early Earth. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 361(1474): 1733-1742.
- Kennedy K, Eyles N, Broughton D. 2019. Basinal setting and origin of thick (1.8 km) mass-flow dominated Grand Conglomérat diamictites, Kamao, Democratic Republic of Congo: resolving climate and tectonic controls during Neoproterozoic glaciations. *Sedimentology*, 66(2): 556-589.
- Kennett J. 1982. *Marine Geology*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1-813.
- Klein C, Beukes N J. 1993. Sedimentology and geochemistry of the glaciogenic late Proterozoic Rapitan iron-formation in Canada. *Economic Geology*, 88(3): 542-565.
- Kopp R E, Kirschvink J L, Hilburn I A, Nash C Z. 2005. The Paleoproterozoic snowball Earth: a climate disaster triggered by the evolution of oxygenic photosynthesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(32): 11131-11136.
- Kort V G. 1972. The Antarctic Ocean, in *Oceanography: Readings from Scientific American*. San Francisco: W. H. Freeman, 83-91.
- Kramers J D. 2002. Global modelling of continent formation and destruction through geological time and implications for CO₂ drawdown in the Archaean Eon. *Geological Society, London, Special Publications*, 199(1): 259-274.
- Kuang H W, Chen X S, Liu Y Q, Wang Y C, Peng N, Le Heron D P, Vandyk T M, Qi K N. 2024. Discover the glacial world on the eve of the Cambrian life explosion: the Ediacaran-Early Cambrian glaciation in the west of Henan Province, North China. In: Hu X M (ed). *Field Trip Guidebook on Chinese Sedimentary Geology*. Singapore: Springer Nature Singapore, 425-514.
- Lang X G, Shen B, Peng Y B, Huang K J, Lü J M, Ma H R. 2016. Ocean oxidation during the deposition of basal Ediacaran Doushantuo cap carbonates in the Yangtze Platform, South China. *Precambrian Research*, 281: 253-268.
- Le Heron D P, Dietrich P, Busfield M E, Kettler C, Bermanschlager S, Grasemann B. 2019. Scratching the surface: footprint of a Late Carboniferous ice sheet. *Geology*, 47(11): 1034-1038.
- Le Heron D P, Busfield M E, Smith A J B, Wimmer S. 2022a. A grounding zone wedge origin for the Palaeoproterozoic Makganyene Formation of South Africa. *Frontiers in Earth Science*, 10: 905602.
- Le Heron D P, Busfield M E, Chen X S, Corkeron M, Davies B J, Dietrich P, Ghienne J-F, Kettler C, Scharfenberg L, Vandyk T M, Wohlschlägl R. 2022b. New perspectives on glacial geomorphology in Earth's deep time record. *Frontiers in Earth Science*, 10: 870359.
- Li S, Gaschnig R M, Rudnick R L. 2016. Insights into chemical weathering/

- ring of the upper continental crust from the geochemistry of ancient glacial diamictites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 176: 96–117.
- Lowe D R, Byerly G R. 2020. The non-glacial and non-cratonic origin of an early Archean felsic volcanoclastic unit, Barberton Greenstone Belt, South Africa. *Precambrian Research*, 341: 105647.
- Lu K, Feng L J, Mitchell R N, Lechte M A, Hoffman P F. 2026. Extremely cold ocean temperatures in iron formation brine pools of snowball Earth. *Nature Communication*, 17: 462.
- Martin D M B, Stanistreet I G, Camden-Smith P M. 1989. The interaction between tectonics and mudflow deposits within the main conglomerate formation in the 2.8–2.7 Ga Witwatersrand Basin. *Precambrian Research*, 44(1): 19–38.
- Maynard J B, Ritger S D, Sutton S J. 1991. Chemistry of sands from the modern Indus River and the Archean Witwatersrand basin: implications for the composition of the Archean atmosphere. *Geology*, 19(3): 265–268.
- McLennan S M. 1980. Timing and relationships among Precambrian crustal and atmospheric evolution and banded iron-formations. In: Trudinger P A, Walter M R, Ralph B J (eds). *Biogeochemistry of Ancient and Modern Environments*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 73–82.
- McLennan S M, Taylor S R, Kröner A. 1983. Geochemical evolution of Archean shales from South Africa. I. The Swaziland and Pongola Supergroups. *Precambrian Research*, 22(1–2): 93–124.
- Menzies J. 2023. Glacial microsedimentology: a new lens to investigate glacial sediments: a review. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 60(4): 366–387.
- Menzies J, Meer J J M. 2018. Micromorphology and microsedimentology of glacial sediments. In: Menzies J, Meer J J M (eds). *Past Glacial Environments*. Netherland: Elsevier, 753–806.
- Modie B N. 2002. A glaciogenic interpretation of a neoarchaeal (~2.78 Ga) volcanogenic sedimentary sequence in the Nnywane formation, Sikwane, Southeast Botswana. *Journal of African Earth Sciences*, 35(1): 163–175.
- Molén M O. 2021. Field evidence suggests that the Palaeoproterozoic Gowganda Formation in Canada is non-glacial in origin. *Geologos*, 27(2): 73–91.
- Molén M O. 2023. Glaciation-induced features or sediment gravity flows: an analytic review. *Journal of Palaeogeography*, 12(4): 487–545.
- Molén M O, Smit J J. 2022. Reconsidering the glaciogenic origin of Gondwana diamictites of the Dwyka Group, South Africa. *Geologos*, 28(2): 83–113.
- Morris R C, Trendall A F, Garrels R M. 1988. A model for the deposition of the microbanded Precambrian iron formations; discussion and reply. *American Journal of Science*, 288(6): 664–673.
- Mukasa S B, Wilson A H, Young K R. 2013. Geochronological constraints on the magmatic and tectonic development of the Pongola Supergroup (Central Region), South Africa. *Precambrian Research*, 224: 268–286.
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299(5885): 715–717.
- Nesbitt H W, Young G M. 1989. Formation and diagenesis of weathering profiles. *The Journal of Geology*, 97(2): 129–147.
- Nesbitt H W, Wilson R E. 1992. Recent chemical weathering of basalts. *American Journal of Science*, 292(10): 740–777.
- Nesbitt H W, Young G M. 1996. Petrogenesis of sediments in the absence of chemical weathering: effects of abrasion and sorting on bulk composition and mineralogy. *Sedimentology*, 43(2): 341–358.
- Nesbitt H W, Young G M, McLennan S M, Keays R R. 1996. Effects of chemical weathering and sorting on the petrogenesis of siliciclastic sediments, with implications for provenance studies. *The Journal of Geology*, 104(5): 525–542.
- Panahi A, Young G M. 1997. A geochemical investigation into the provenance of the Neoproterozoic Port Askaig Tillite, Dalradian Supergroup, western Scotland. *Precambrian Research*, 85(1–2): 81–96.
- Pettijohn F J, Bastron H. 1959. Chemical composition of argillites of the Cobalt Series (Precambrian) and the problem of soda-rich sediments. *Geological Society of America Bulletin*, 70(5): 593–600.
- Rainbird R H, Nesbitt H W, Donaldson J A. 1990. Formation and diagenesis of a sub-Huronian saprolite: comparison with a modern weathering profile. *The Journal of Geology*, 98(6): 801–822.
- Raymo M E, Ruddiman W F. 1992. Tectonic forcing of late Cenozoic climate. *Nature*, 359(6391): 117–122.
- Robert F, Chaussidon M. 2006. A palaeotemperature curve for the Precambrian oceans based on silicon isotopes in cherts. *Nature*, 443(7114): 969–972.
- Sagan C, Mullen G. 1972. Earth and Mars: evolution of atmospheres and surface temperatures. *Science*, 177(4043): 52–56.
- Shields G A, Strachan R A, Porter S M, Halverson G P, Macdonald F A, Plumb K A, de Alvarenga C J, Banerjee D M, Bekker A, Bleeker W, Brasier A, Chakraborty P P, Collins A S, Condie K, Das K, Evans D A D, Ernst R, Fallick A E, Frimmel H, Fuck R, Hoffman P F, Kamber B S, Kuznetsov A B, Mitchell R N, Poiré D G, Poulton S W, Riding R, Sharma M, Storey C, Stueeken E, Tostevin R, Turner E, Xiao S H, Zhang S H, Zhou Y, Zhu M Y. 2022. A template for an improved rock-based subdivision of the pre-Cryogenian timescale. *Journal of the Geological Society*, 179(1): jgs2020–jgs2222.
- Siahi M, Hofmann A, Hegner E, Master S. 2016. Sedimentology and facies analysis of Mesoarchaeal stromatolitic carbonate rocks of the Pongola Supergroup, South Africa. *Precambrian Research*, 278: 244–264.
- Sohn Y K. 2000. Depositional processes of submarine debris flows in the Miocene fan deltas, Pohang Basin, SE Korea with special reference to flow transformation. *Journal of Sedimentary Research*, 70(3): 491–503.
- Stanistreet I G, Kukla P A, Henry G. 1991. Sedimentary basinal responses to a late Precambrian Wilson cycle: the Damara orogen and Nama foreland, Namibia. *Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)*, 13(1): 141–156.

- Taylor R S, McLennan S M. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Oxford: Blackwell, 1–312.
- Tasistro-Hart A R, Macdonald F A, Crowley J L, Schmitz M D. 2025. Four-million-year Marinoan snowball shows multiple routes to deglaciation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 122(18): e2418281122.
- Veizer J. 1984. The evolving earth: water tales. *Precambrian Research*, 25(1–3): 5–12.
- Von Brunn V, Hobday D K. 1976. Early Precambrian tidal sedimentation in the Pongola supergroup of South Africa. *Journal of Sedimentary Research*, 46(3): 670–679.
- Von Brunn V, Mason T R. 1977. Siliciclastic-carbonate tidal deposits from the 3000 MY Pongola Supergroup, South Africa. *Sedimentary Geology*, 18(1): 245–255.
- Von Brunn V, Gold D J C. 1993. Diamictite in the Archaean Pongola sequence of southern Africa. *Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)*, 16(3): 367–374.
- Wang M, Zeng X W, Xie C M, Danzeng A W, Li C, Fan J J, Li H. 2020. Dating of detrital zircon grains and fossils from Late Palaeozoic sediments of the Baruo area, Tibet: Constraints on the Late Palaeozoic evolution of the Lhasa Terrane. *International Geology Review*, 62(4): 465–478.
- Wang P, Du Y S, Yu W C, Algeo T J, Zhou Q, Xu Y, Qi L, Yuan L J, Pan W. 2020. The chemical index of alteration (CIA) as a proxy for climate change during glacial-interglacial transitions in Earth history. *Earth-Science Reviews*, 201: 103032.
- Wang Y C, Kuang H W, Liu Y Q, Chen X S, Zhao F H, Le Heron D P, Vandyk T M, Peng N, Yang Z R, Bai H Q. 2022. Composite sand-ice wedge pseudomorphs suggestive of a frosty Ediacaran-Cambrian transition. *Precambrian Research*, 382: 106873.
- Wang Y C, Kuang H W, Liu Y Q, Zhao F H, Peng N, Chen X S, Qi K N, Liu H, Wang Z X, Zhong Q, Chen J X. 2023a. Sedimentary evolution from greenhouse to icehouse of Neoproterozoic and age constraints in the northern Yangtze Craton. *Global and Planetary Change*, 227: 104179.
- Wang R M, Yin Z J, Shen B. 2023b. A late Ediacaran ice age: the key node in the Earth system evolution. *Earth-Science Reviews*, 247: 104610.
- Williams G E. 1991. Milankovitch-band cyclicity in bedded halite deposits contemporaneous with Late Ordovician-Early Silurian glaciation, Canning Basin, Western Australia. *Earth and Planetary Science Letters*, 103(1–4): 143–155.
- Wilson A, Groenewald B, Palmer C. 2013. Volcanic and volcanoclastic rocks of the Mesoarchaean Pongola Supergroup in South Africa and Swaziland: distribution, physical characteristics, stratigraphy and correlations. *South African Journal of Geology*, 116(1): 119–168.
- Wronkiewicz D J, Kent C C. 1989. Geochemistry and provenance of sediments from the Pongola Supergroup, South Africa: evidence for a 3.0–Ga-old continental craton. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(7): 1537–1549.
- Ye Q, Tong J N, Xiao S H, Zhu S X, An Z H, Tian L, Hu J. 2015. The survival of benthic macroscopic phototrophs on a Neoproterozoic snowball Earth. *Geology*, 43(6): 507–510.
- Young G M. 1969. Geochemistry of Early Proterozoic tillites and argillites of the Gowganda Formation, Ontario, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 33: 483–492.
- Young G M. 1981. The Late Proterozoic Rapitan glaciation in the northern Cordillera. In: Campbell F H A (ed). *Proterozoic Basins of Canada*. Ottawa: Geological Survey of Canada, 25–46.
- Young G M. 1988. Proterozoic plate tectonics, glaciation and iron-formations. *Sedimentary Geology*, 58(2–4): 127–144.
- Young G M. 1991. The geologic record of glaciation: relevance to the climatic history of Earth. *Geoscience Canada*, 18: 100–108.
- Young G M, Nesbitt H W. 1998. Processes controlling the distribution of Ti and Al in weathering profiles, siliciclastic sediments and sedimentary rocks. *Journal of Sedimentary Research*, 68(3): 448–455.
- Young G M, von Brunn V V, Gold D J C, Minter, W E L. 1998. Earth's oldest reported glaciation: physical and chemical evidence from the Archean Mozaan Group (~2.9 Ga) of South Africa. *The Journal of Geology*, 106(5): 523–538.
- Yu Y, Ye Q, Zhang K X, He W H, Song B W, Xu Y D, Kou X H, Wang J X, Yang F L. 2020. Stratigraphic framework of the Cryogenian in China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 94(4): 942–971.
- Zhang B Y, Zheng D S. 2022. Sedimentological, geochemical, and geochronological constraints on the origin of the Neoproterozoic Luoquan Formation at the Southern Margin of the North China Craton. *International Geology Review*, 64(7): 911–932.
- Zhang X S, An Y Q, Chen Y R, Du W D, Wang L Y. 2024. Microbial mat, organic-wall microfossils and geochemistry of the Ediacaran inter-diamictite black sediments in NW China: a short-lived habitable benthic, oxic and photic “ice-free oases”. *Precambrian Research*, 401: 107255.
- Zhong Y T, Chen J T, Liu S G, Yuan C S, Gao B, Isson T T, Algeo T J, Sheng Q Y, Chen B, Luo G M, Wang X D, Qie W K. 2024. Zinc isotope perspective on global carbon cycling during the onset of the late Paleozoic icehouse. *Geology*, 53(2): 99–104.
- Zhu S X, Lang X G, Crockford P W, Zhang B L, Guan C G, Xing C H, Sun Z Y, Hou M C. 2026. Unraveling the marine biogeochemical changes during the Neoproterozoic Snowball Earth collapse. *Earth and Planetary Science Letters*, 678: 119854.

(责任编辑 张西娟)