中国科学: 地球科学 2024 年 第 54 卷 第 4 期: 936 ~ 967
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

评 述

青藏高原及其周边成冰纪-埃迪卡拉纪综合地层、生物群与古地理演化

孙郎[1,2†], Malik Muhammad Saud Sajid KHAN[1,2†], 杨传[1], 孙智新[1,2], 潘兵[1], Shehryar AHMED[1,2], 苗兰云[1], 孙玮辰[1], 胡春林[1], 孙晓娟[1], 罗翠[1], 陈波[1], 殷宗军[1], 赵方臣[1,2], 李国祥[1], 朱茂炎[1,2*]

1. 中国科学院南京地质古生物研究所, 现代古生物学和地层学国家重点实验室, 南京 210008;
2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049
* 通讯作者, E-mail: myzhu@nigpas.ac.cn
† 同等贡献

收稿日期: 2023-07-11; 收修改稿日期: 2023-11-11; 接受日期: 2023-11-16; 网络版发表日期: 2024-02-07
第二次青藏高原综合科学考察研究项目(编号: 2019QZKK0706)和国家自然科学基金项目(批准号: 41921002)资助

摘要 青藏高原及其周边的块体, 包括印度板块、拉萨地块、羌塘地块、塔里木板块、欧龙布鲁克地块、中祁连地块、阿拉善地块、华北板块、扬子板块、中伊朗地块和阿曼等, 以及各块体之间造山带的复杂演化历史是地球科学研究的前沿和热点. 成冰系和埃迪卡拉系广泛分布于该地区的各个构造单元, 其中阿曼、印度板块、扬子板块以及塔里木板块发育有相对完整的成冰系和埃迪卡拉系; 而在中伊朗地块、南羌塘地块、中祁连地块、阿拉善地块及华北板块, 目前已知仅有埃迪卡拉系发育. 基于前人对青藏高原及其周边地区成冰系和埃迪卡拉系的研究, 结合第二次青藏高原综合科学考察研究项目开展以来获得的新资料和研究进展, 本文建立了该地区成冰系和埃迪卡拉系代表性地层序列对比表. 在此基础上, 本文梳理了该地区这一时期生物群和重大地质事件的研究现状和存在的问题. 结果表明, 该地区各板块埃迪卡拉纪化石的保存和组合面貌各具特色, 但普遍发现有典型埃迪卡拉纪末期化石分子*Cloudina*和*Shaanxilithes*; 除成冰纪两次全球性冰期事件外, 在青藏高原北缘各块体(华北板块、阿拉善地块、北祁连构造带、中祁连地块、欧龙布鲁克地块、塔里木板块)以及伊朗中南部普遍记录了一次埃迪卡拉纪晚期的冰川事件, 但该事件的时限、分布范围和成因有待进一步揭示; 同时, 埃迪卡拉纪中期DOUNCE/Shuram碳同位素负异常事件在青藏高原周边地区也具有广泛记录. 综合现有研究资料发现, 在成冰纪-埃迪卡拉纪期间, 青藏高原及其周边地区大多数块体从罗迪尼亚超大陆裂解出来后, 可能通过泛非运动构成东冈瓦纳大陆的一部分, 而部分板块(如华北板块)位于冈瓦纳大陆和劳伦大陆之间. 总体而言, 该地区的主要块体在成冰纪-埃迪卡拉纪期间具体的古地理演化模型存在较多争议, 亟需开展进一步的研究工作.

关键词 青藏高原, 成冰系, 埃迪卡拉系, 地层, 古地理, 生物群, 冈瓦纳大陆

中文引用格式: 孙郎, Khan M M S S, 杨传, 孙智新, 潘兵, Ahmed S, 苗兰云, 孙玮辰, 胡春林, 孙晓娟, 罗翠, 陈波, 殷宗军, 赵方臣, 李国祥, 朱茂炎. 2024. 青藏高原及其周边成冰纪-埃迪卡拉纪综合地层、生物群与古地理演化. 中国科学: 地球科学, 54(4): 936–967, doi: 10.1360/SSTe-2023-0148
英文引用格式: Sun L, Khan M M S S, Yang C, Sun Z, Pan B, Ahmed S, Miao L, Sun W, Hu C, Sun X, Luo C, Chen B, Yin Z, Zhao F, Li G, Zhu M. 2024. Cryogenian and Ediacaran integrative stratigraphy, biotas, and paleogeographical evolution of the Qinghai-Tibetan Plateau and its surrounding areas. Science China Earth Sciences, 67(4): 919–949, https://doi.org/10.1007/s11430-023-1228-x

© 2024 《中国科学》杂志社

1　引言

中国西部青藏高原及其周边地区具有复杂的地质记录, 保存了多个时期不同大洋演化的证据, 是特提斯构造域的重要组成部分(Metcalfe, 2013; 吴福元等, 2020). 近年来, 国内外学者针对青藏高原及其周边地区各组成地块在显生宙的构造演化、形成机制及其对生物和气候环境的影响等方面开展了大量研究, 并取得了丰硕成果(例如, 吴福元等, 2020; 赵佳港等, 2022; Ding等, 2022). 相对而言, 由于地处高原边远地区, 地质记录出露较少, 且遭受显生宙以来尤其是新生代以来多期构造事件的叠加改造, 青藏高原核心区和东北缘的前寒武纪地层、古生物、古地理和构造演化等方面的研究均较为薄弱.

以特提斯构造域为轮廓的青藏高原及其周边地区的前寒武纪地质研究工作始于20世纪上半叶, 前人在这一时期对该地区不同区域的前寒武纪地层进行了基础性调查和年代划分(例如, Auden, 1934; 谢家荣, 1941). 中国青藏高原核心区及其东北缘前寒武系的地质调查研究开始于20世纪60年代, 首先是祁连山地区的地质考察(涂光炽, 1963; 中国科学院祁连山地质队, 1963), 以及随后启动于1973年的“第一次青藏高原综合科学考察”(穆恩之等, 1973; 焦淑沛和陈国恩, 1983; 王云山等, 1983; 陈基娘和王云山, 1985; 茅燕石等, 1985; 卫管一和孙似洪, 1986). 结合地质普查和填图工作以及已有的原“震旦系”研究(王曰伦, 1955; 刘鸿允和刘钰, 1963; 王云山, 1977; 张文堂等, 1979), 至20世纪80、90年代, 中国学者基本建立了青藏高原及其周边各地区前寒武纪地层序列和对比框架(王云山等, 1980; 殷继成, 1980; 顾其昌, 1982; 钱家骐, 1986; 余以生, 1994; 云南省地质矿产局, 1997; 青海省地质矿产局, 1997; 西藏自治区地质矿产局, 1997). 与此同时, 国外学者针对各自不同区域广泛开展了地质普查工作, 在各地区建立了前寒武纪岩石地层序列(Dedual, 1967; Stöcklin, 1968; Latif, 1970, 1974; Rattan, 1973; Gorin等, 1982; Gee和Gee, 1989).

21世纪以来, 青藏高原的地质演化和矿产资源研究受到更多关注. 一方面, 中国境内青藏高原前寒武系的地质调查和研究得到了进一步的加强和深入细化(例如, 李荣社等, 2004; 何世平等, 2010, 2014); 另一方面, 该地区的前寒武纪和早古生代地层框架和构造演化也得到了进一步认识(例如, Gehrels等, 2003a, 2003b; Yang等, 2006; Zhu等, 2011). 2017年“第二次青藏高原综合科学考察”启动以来, 青藏高原核心区和东北缘地区的前寒武纪, 包括成冰纪和埃迪卡拉纪的地层学、古生物学和古地理学方面的新资料不断增加(例如, Hu等, 2018; Myrow等, 2018; 王明等, 2018; Pang等, 2021; 张予杰等, 2021; 孙郎等, 2022; Sun等, 2022; Zhang X等, 2023); 尤其是在地质记录相对完整的青藏高原东北缘地区, 前寒武纪至寒武纪转折时期构造演化模型也逐渐得到揭示(例如, Peng等, 2019; Yu等, 2021; Wu C等, 2021; 吴晨等, 2023).

目前, 在研究较为深入的地区, 如喜马拉雅地区、塔里木和阿曼等地, 成冰纪-埃迪卡拉纪年代地层框架已基本建立(Bowring等, 2007; Zhu和Wang, 2011; 朱茂炎等, 2016; Myrow等, 2018; Jain等, 2020; 周传明等, 2021), 相关成果已经被应用于成冰纪-埃迪卡拉纪古地理和构造演变研究(例如, Jiang等, 2003; Myrow等, 2018; Xiao等, 2022; Wang等, 2023). 而在工作难度较大的青藏高原核心区和东北缘地区, 虽然前寒武纪末期地层序列已经初步建立(钱家骐, 1986; 青海省地质矿产局, 1997; 甘肃省地质矿产局, 1997; 西藏自治区地质矿产局, 1997; 何世平等, 2014), 但由于国际地层年代表中成冰系和埃迪卡拉系的定义和底界年龄的修订(Shields-Zhou等, 2016), 该地区岩石地层和年代地层框架需要重新厘定(王明等, 2018; Zhao等, 2020; 孙郎等, 2022; Sun等, 2022). 同时, 有关青藏高原及周边地区在新元古代至早古生代时期的构造演化存在不同的模型(Yang等, 2006; Xiao等, 2009; Song等, 2013, 2014; Peng等, 2019; Wu C等, 2021; 吴晨等, 2023), 检验这些模型需要建立各地区相对完整且可以对比的地层序列. 为此, 本文以青藏高原及其周边特提斯构造域内的板块和地块及其之间的构造带为研究对象, 建立了各地区成冰纪和埃迪卡拉纪代表性地层序列对比表. 在此基础上, 初步总结了区域内在该时期的生物群、重大地质事件和古地理演化, 可为青藏高原及其周边成冰纪-埃迪卡拉纪综合地质研究提供基础资料.

2　成冰纪和埃迪卡拉纪年代地层学

自1966年国际地层委员会前寒武纪地层分会成立

之后, 多年的讨论和实践形成了当今前寒武纪划分的基本原则. 与显生宙以全球界线层型剖面及点位(Global Boundary Stratotype Section and Point, GSSP)为标准不同, 前寒武纪的年代划分以全球大部分地区岩浆-构造演化的阶段性为依据, 以全球标准地层年龄(Global Standard Stratigraphic Age, GSSA)为界线(Plumb和James, 1986). 1989年, 国际地质科学联合会正式批准了将新元古代三分为拉伸纪(Tonian)、成冰纪(Cryogenian)及新元古代Ⅲ纪(Neoproterozoic Ⅲ)的方案, 界线年龄分别为1Ga、0.85Ga及0.65Ga. 之后, 随着更多保存有较好的岩石层序及生物化石的新元古代地层剖面在全球各地得以发现, 在前寒武纪特别是在新元古代建立GSSP成为可能(详见朱茂炎(2016)及其参考文献).

经过多年研究, 国际地层委员会末元古系分会在2004年接受了Cloud和Glaessner(1982)的命名, 以埃迪卡拉系代替原新元古界Ⅲ系, 并确认了埃迪卡拉系底界的GSSP(Knoll等, 2006). 埃迪卡拉系底界的GSSP位于澳大利亚Flinders山脉Enorama Creek剖面, 它以Nuccaleena组"盖帽碳酸盐岩"(Cap Carbonate)与下伏冰碛杂砾岩的界线为标志, 其底界年龄为635Ma(Knoll等, 2004, 2006), 而根据目前国际地层年代表的建议年龄, 埃迪卡拉系的顶界年龄为(538.8±0.2)Ma. 埃迪卡拉系底界GSSP的建立, 开创了在前寒武系以GSSP代替GSSA作为年代地层划分标准的先河. 在此之后, 国际地层学界逐渐开始了在前寒武系用GSSP替代GSSA的研究, 一些新的前寒武系再划分和界线标准方案先后被提出(Van Kranendonk等, 2012; Shields等, 2022). 目前, 国际地层学界正在努力解决埃迪卡拉系内部"统"和"阶"一级的年代地层划分问题. 依据碳同位素异常事件、大型具刺疑源类和埃迪卡拉化石群的演化等生物-环境事件, 结合同位素年代学, Narbonne等(2012)以Gaskiers冰期事件和DOUNCE/Shuram事件或单纯以Gaskiers冰期作为界线, 将埃迪卡拉系划分为上、中、下三统或上、下两统, Gaskiers冰期具有精确的年龄控制(~580Ma; Pu等, 2016), 而DOUNCE/Shuram事件大致发生于574~564Ma之间(Rooney等, 2020a; Yang等, 2021). Xiao等(2016)以Narbonne等(2012)的三统方案为基础, 认为下统可以进一步划分为两阶, 其中第一阶为冰期结束后的"盖帽白云岩"沉积, 第二阶代表了以大型具刺疑源类为主的微体真核生物的繁盛. Zhu等(2007a, 2022)、刘鹏举等(2012, 2016)、朱茂炎等(2016)、周传明等(2019)也先后提出了中国埃迪卡拉系再划分的建议方案. 然而, 上述埃迪卡拉系再划分方案还未获得共识, 具体研究现状参考上述文献, 这里不做赘述.

埃迪卡拉系底界GSSP确立之后, 成冰系底界GSSP的问题也被提上国际地层委员会的日程. 尽管国际地层委员会成冰系分会自建立以来, 还未就成冰系的底界定义以及GSSP的建立标准达成共识, 但全球地层记录都表明, 成冰纪由两次全球性冰期(较老的Sturtian冰期和较年轻的Marinoan冰期)和一个间冰期组成. 近年来, 多项研究在全球Sturtian冰期的冰碛岩底界附近获得了一系列接近720Ma的同位素年龄数据, 表明Sturtian冰期在全球同时快速开始(Macdonald等, 2010, 2018; Lan等, 2014, 2020; Song等, 2017), 因此720Ma也暂时被作为成冰系底界的年龄(Shields-Zhou等, 2016). 目前, 一系列新的年代学研究表明, Sturtian冰期在661Ma左右结束(Zhou等, 2004, 2020; Kendall等, 2006; Fanning和Link, 2008; Yu等, 2017; Rooney等, 2014, 2015, 2020b; Cox等, 2018; Ma等, 2023). 当前, 有关间冰期和Marinoan冰期起止时间的研究也进展迅速. Zhang等(2008)及Liu等(2015)分别在扬子板块间冰期沉积大塘坡组顶部的火山灰中获得了(654.5±3.8)Ma和(654.2±2.7)Ma的锆石U-Pb年龄. Kendall等(2006, 2009)则利用Re-Os同位素体系定年分别在澳大利亚阿德莱德的Tapley Hill组及塔斯马尼亚的Togari群的黑色页岩中获得了(643.0±2.4)Ma和(640.7±4.7)Ma的年龄. Nelson等(2020)在美国死亡谷代表间冰期沉积的Thorndike亚段中获得了(651.69±0.59)Ma的最大沉积年龄, 表明Wildrose冰碛岩所代表的Marinoan冰期的开始时间晚于652Ma. 而阿曼Fiq组和华南大塘坡组旋回地层学研究表明, 阿曼的Marinoan冰期可能开始于650~641Ma(Gong, 2021), 华南南沱组代表的Marinoan冰期沉积则开始于650Ma左右(Bao等, 2018). Marinoan冰期的结束时间在华南有较好的年代学控制, 峡东陡山沱组底部"盖帽碳酸盐岩"中的火山灰年龄((635.2±0.2)Ma)和云南峨山南沱组顶部的火山灰年龄((634.57±0.88)Ma)表明Marinoan冰期的结束在635Ma左右(Condon等, 2005; Zhou等, 2019), 这也是目前国际地层表中埃迪卡拉系底界所采用的年龄.

3　青藏高原及周边成冰纪-埃迪卡拉纪岩石地层序列

本文所涉及的青藏高原及周边地区是指西起阿曼、东至扬子板块、北以中亚造山带为界的特提斯构造域. 包括扬子板块、华北板块、塔里木板块、阿拉善地块、中祁连地块、欧龙布鲁克地块、北羌塘地块、南羌塘地块、拉萨地块、印度板块、伊朗和阿曼地区的稳定沉积单元以及上述各单元之间的构造带(图1). 已有资料表明, 成冰系在塔里木板块、扬子板块和印度板块广泛分布, 在华北板块西缘、阿拉善地块、南羌塘地块、欧龙布鲁克地块、祁连山地区和伊朗缺失; 而埃迪卡拉系在青藏高原及其周边都有分布. 本文选择了跨越全区的27个代表性岩石地层序列(图2、图3), 对青藏高原及其周边成冰系-埃迪卡拉系的发育和地层研究进展进行总体介绍.

3.1　扬子板块西缘

扬子板块西缘的成冰系-埃迪卡拉系以滇东及川西南地区为代表. 滇东澄江地区的成冰系和埃迪卡拉系研究有悠久的历史, 自Misch在1942年初次报道以来, 前人曾多次进行总结(王曰伦, 1955; 刘鸿允和刘钰, 1963; 中国科学院南京地质古生物研究所, 1974; 曹仁关等, 1980; 云南省地质矿产局, 1997; 朱茂炎等, 2016; 周传明等, 2021). 这一地区的成冰系-埃迪卡拉系自下向上包括: 成冰系南沱组、埃迪卡拉系鲁拿寺组和灯影组(图2, 地层柱1). 南沱组岩性主要为冰碛杂砾岩, 不整合于澄江组砂岩之上. 江新胜等(2012)推测澄江组顶部可能为拉伸纪晚期沉积, 崔晓庄等(2013)对澄江组顶部凝灰岩锆石的U-Pb定年结果为(725±11) Ma. 结合Zhou等(2019)在滇东南沱组顶部凝灰岩中获得的锆石U-Pb年龄(634.57±0.88)Ma, 澄江地区的南沱组代表了Marinoan冰期的沉积(Zhou等, 2019), 澄江组与南沱组之间的不整合代表成冰纪早期的沉积缺失. 南沱组之上为鲁拿寺组及灯影组, 其中鲁拿寺组主要为灰岩夹白云岩, 底部为数十米的紫红色砂岩和粉砂岩(Zhu等, 2007a), 灯影组为厚层白云岩夹泥质白云岩、粉砂岩. 鲁拿寺组和灯影组碳同位素地层学对比

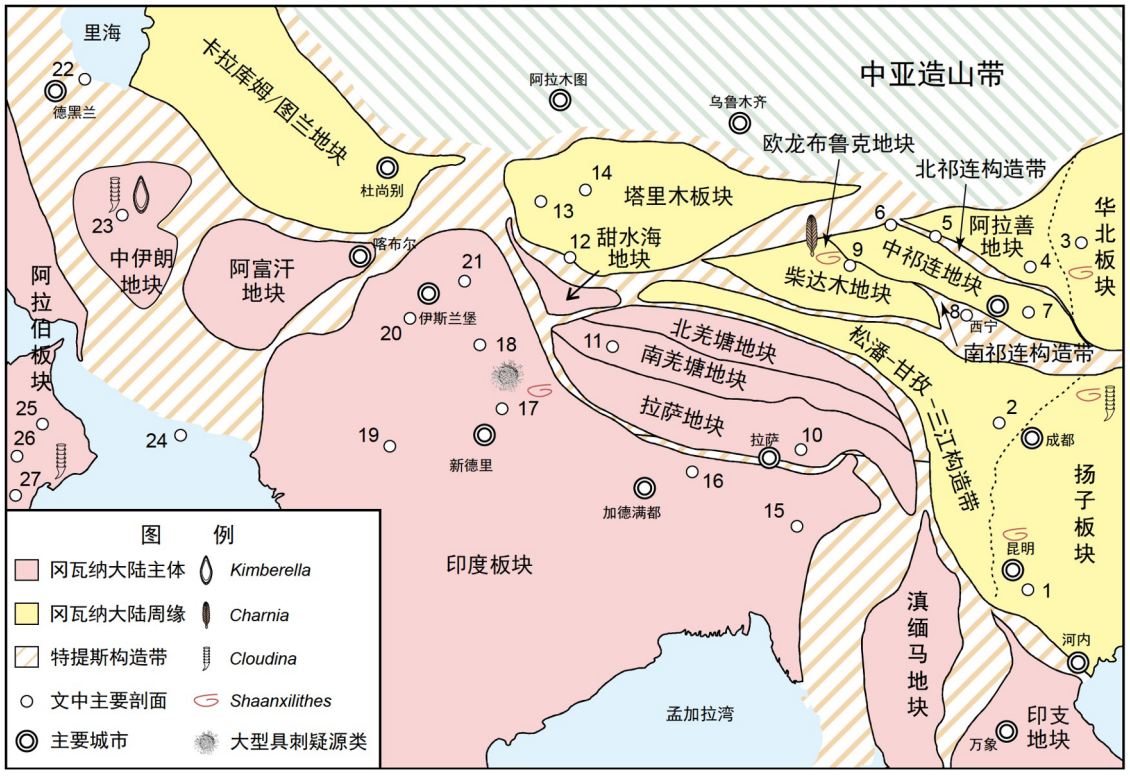

图 1　青藏高原及周边构造单元划分及主要前寒武纪参考剖面与化石点分布位置

图中编号对应图2和图3地层柱编号; 修改自吴福元等(2020)

研究表明, 鲁拿寺组与灯影组为埃迪卡拉系, 其中鲁拿寺组顶部出现的碳同位素显著负异常与三峡地区陡山沱组顶部的碳同位素显著负异常可以进行对比, 称为“DOUNCE”事件, 具有全球地层对比意义(Zhu等, 2007a, 2007b; Lu等, 2013). 滇东灯影组碳同位素化学地层学研究表明, 灯影组顶部接近寒武系底界(Zhu等, 2007a), 灯影组上部*Shaanxilithes*的发现支持了这一推断(Zhu和Zhang, 2006; 张志亮等, 2015; 房瑞森等, 2021).

川西南甘洛地区的成冰系-埃迪卡拉系划分和对比研究主要集中于建国后(西南地质科学研究所, 1978; 殷继成, 1980), 这套地层序列自下向上包括列古六组、观音崖组及灯影组(洪椿坪组)(朱茂炎等, 2016; 周传明等, 2021; 图2, 地层柱2). 列古六组平行不整合于开建桥组之上, 卓皆文等(2015)在开建桥组获得了(801.3±7.2)Ma的凝灰岩锆石年龄, 说明开建桥组为拉伸纪地层. 列古六组底部为一套可能为冰川成因的凝灰质杂砾岩, 锆石U-Pb年龄表明这套杂砾岩的最大沉积年龄为(724±12)Ma(江卓斐等, 2017), 因此可能代表了成冰纪冰期沉积物, 列古六组中上部可能延伸至埃迪卡拉系(周传明等, 2021). 观音崖组底部为砂岩, 其上部及灯影组(洪椿坪组)为碳酸盐岩沉积. 碳同位素化学地层数据支持观音崖组上部灰岩层与湖北宜昌三峡地区埃迪卡拉系陡山沱组上部地层对比、灯影组(洪椿坪组)与三峡地区灯影组对比(Wang等, 2012).

3.2 华北板块西缘

与青藏高原临近的贺兰山地区属于华北板块西部, 与华北板块南部边缘地区相似, 该地区寒武系底部存在一个巨大的地层不整合面, 普遍缺失成冰系(He等, 2017; 庞科等, 2021). 埃迪卡拉系自下向上包括正目观组和兔儿坑组(周传明等, 2021). 正目观组建立于宁夏的苏峪口剖面(张文堂等, 1979; 顾其昌, 1982; 图2, 地层柱3), 以发育有冰碛杂砾岩为特征, 正目观组冰碛岩之下为厚达千余米的王全口组碳酸盐岩地层. 兔儿坑组由原正目观组解体而来, 上覆寒武系苏峪口组碎屑岩(蔡雄飞等, 2013), 产出典型的埃迪卡拉纪晚期化石, 如*Shaanxilithes*(Shen等, 2007, 2010), 由此可推断其下的正目观组应当与埃迪卡拉纪晚期的冰期相关, 可与华北板块南缘的罗圈组对比(Shen等, 2007, 2010; Wang等, 2021b).

3.3 阿拉善地块

位于祁连山以北的阿拉善地块大面积被现代沉积物覆盖, 岩石露头局限. 而在甘肃金昌一带龙首山地区则广泛出露前寒武纪地层, 底部的龙首山群为变质岩基底, 上覆墩子沟群和韩母山群组成的沉积盖层(图2, 地层柱4), 两者之间为角度不整合接触(国家地质总局西安地质矿产研究所前寒武纪组, 1979). 其中, 墩子沟群的石英片岩被认为属于中元古代-新元古代早期地层, 韩母山群曾被认为属于南华系-震旦系(即成冰系-埃迪卡拉系)(陆松年等, 2002; 许安东和姜修道, 2003). 韩母山群由下部的烧火筒沟组与上部的草大坂组组成(赵祥生等, 1980; 余以生, 1994; 图2). 烧火筒沟组与下伏墩子沟群呈角度不整合接触, 岩性主要为冰碛杂砾岩, 这套冰碛杂砾岩过去曾被认为可以与扬子板块上的成冰系南沱组对比(余以生, 1994). 考虑到青藏高原东北缘的地块上大都发育有相当于华北板块埃迪卡拉系罗圈组的冰碛岩, 而缺乏真正的成冰纪沉积, 烧火筒沟组更可能与华北板块的罗圈组相当, 属于埃迪卡拉纪末期冰期沉积. 草大坂组平行不整合于烧火筒沟组之上, 以碳酸盐岩为主, 夹有少量碎屑岩, 底部发育含磷质岩系. 草大坂组曾被认为与扬子板块埃迪卡拉系陡山沱组和灯影组对比(余以生, 1994), 但其底部含磷地层与华北板块和扬子板块的寒武系底部普遍发育的含磷岩系非常相似, 曾有可疑的海百合茎和海绵骨针化石报道, 因而有可能属于寒武系、甚至奥陶系(夏明哲等, 2011; 谢从瑞等, 2013). 目前来看, 无论是烧火筒沟组还是草大坂组都需要进一步研究加以厘定.

3.4 祁连山地区

祁连山地区在构造上自北向南可划分为北祁连构造带、中祁连地块以及南祁连构造带, 前寒武系在全区均有分布, 但地层序列划分存在不同方案, 同时由于证据缺乏, 许多地层单元的时代也存在争议(余以生, 1994; 甘肃省地质矿产局, 1989, 1997). 我们最新的考察研究表明, 成冰系在整个祁连山地区可能均缺失(孙郎等, 2022), 而埃迪卡拉系在三个构造单元中都有分布(图2).

在北祁连构造带, 埃迪卡拉系自下而上被划分为朱龙关群、镜铁山群、大柳沟群和白杨沟群(甘肃省地质矿产局, 1989; 周传明等, 2021 ; 图2, 地层柱5). 朱

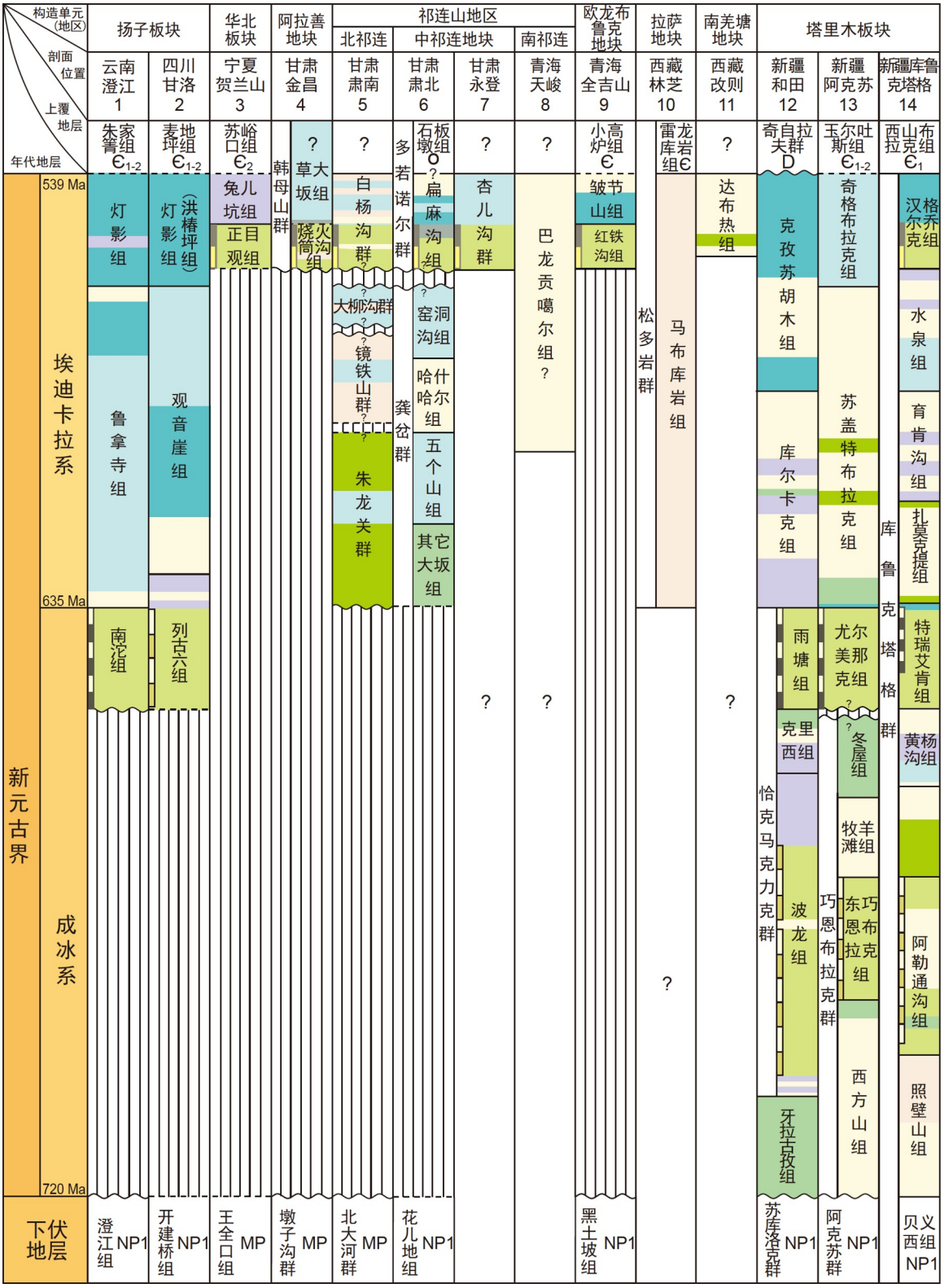

图 2　**青藏高原及其周边成冰纪-埃迪卡拉纪岩石地层对比表**

图例和缩写含义见图3

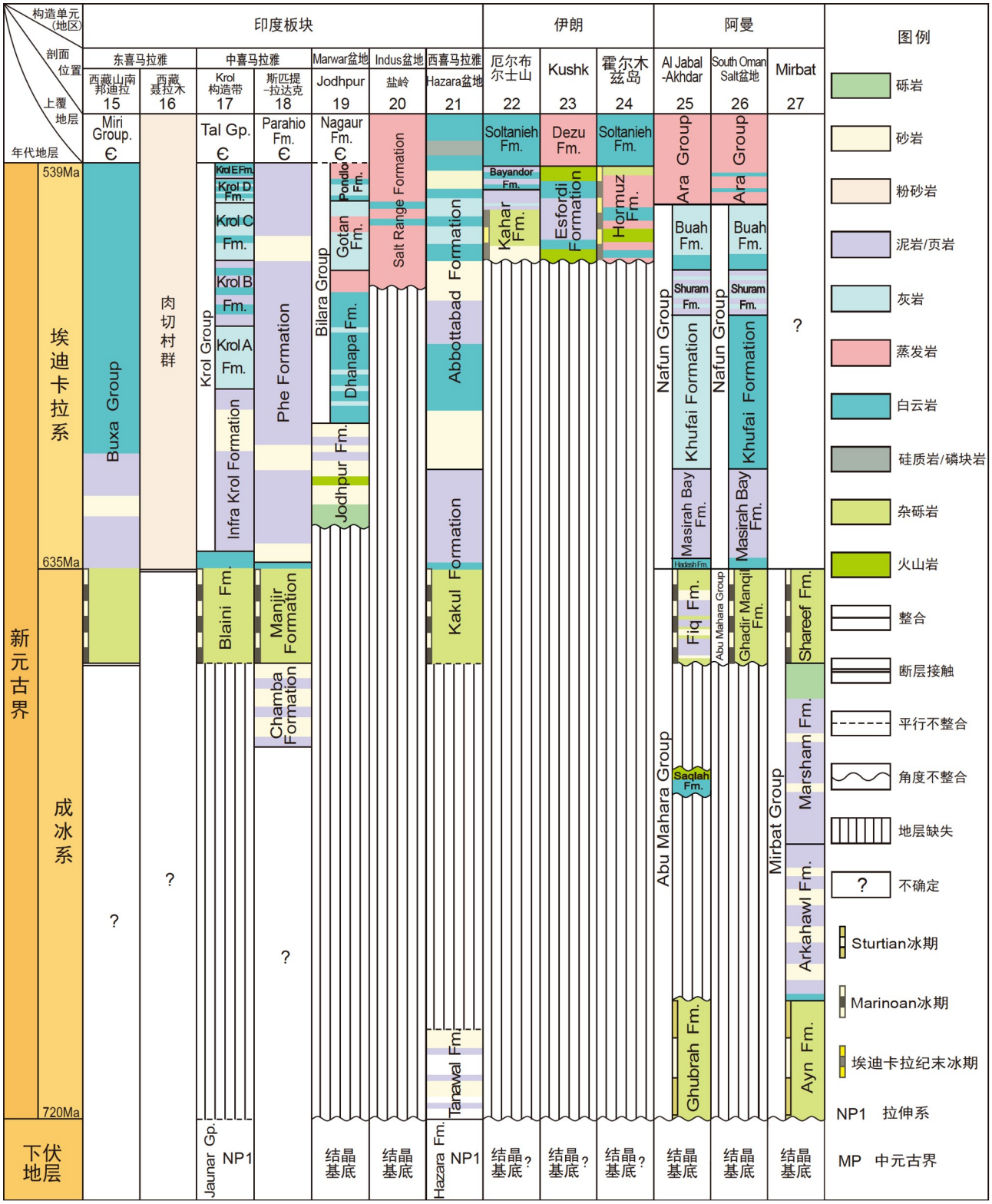

图 3　青藏高原及其周边成冰纪-埃迪卡拉纪岩石地层对比表

龙关群分为上、下两个岩组，下岩组主要为玄武岩夹灰岩，上岩组以碎屑岩为主夹玄武岩及赤铁矿层. 镜铁山群与朱龙关群呈平行不整合接触，下部主要为碎屑岩夹铁矿层，上部则以碳酸盐岩为主. 大柳沟群与镜铁山群呈角度不整合接触，分为三个岩组，下岩组和中岩组以夹碎屑岩的灰岩为主，上岩组碎屑岩成分更多. 白杨沟群与大柳沟群呈角度不整合接触，分为上、下两个岩组，下岩组主要为含砾千枚岩，可能为冰川成因，上岩组则以夹灰岩的砂质板岩、千枚岩为特征(甘肃省地质矿产局, 1989). Xu等(2015)曾在肃南地区朱龙关群的玄武岩中获得了600~580Ma的年龄, Yang X等(2022, 2023)也在同一套地层中获得了埃迪卡拉纪末期(~590Ma)的火山灰年龄，支持朱龙关群属于埃迪卡拉系. 由此可以推断，朱龙关群之上的镜铁山群、大柳沟群及白杨沟群应当也为埃迪卡拉系. 尽管白杨沟群冰碛杂砾岩曾经被认为属于成冰系(余以生, 1994)，但最新的观点均认为它与华北板块的正目观组、欧龙布鲁克地块红铁沟组和塔里木板块库鲁克塔格地区汉格尔乔克组冰碛杂砾岩相当，属于埃迪卡拉纪末的同一期冰期沉积记录(周传明等, 2021).

在中祁连地块西段，前寒武系自下而上由托赖群、托来南山群、龚岔群和多若诺尔群组成(钱家骐, 1986; 余以生, 1994; 甘肃省地质矿产局, 1997; 图2, 地层柱6). 其中, 龚岔群平行不整合于拉伸系托来南山群之上(Gehrels等, 2003b)，自下而上被划分为其他大坂组、五个山组、哈什哈尔组及窑洞沟组. 其他大坂组主要为粗碎屑岩，五个山组主要为灰岩，哈什哈尔组主要为砂质板岩，窑洞沟组主要为灰岩和角砾状灰岩, 这套地层长期被认为属于新元古代早期地层(青白口系)(钱家骐, 1986; 甘肃省地质矿产局, 1997). 龚岔群之上的多若诺尔群，自下向上为扁麻沟组、石板墩组及查干布尔嘎斯组. 扁麻沟组角度不整合于窑洞沟组之上，岩性主要为可能是冰川成因的杂砾岩，石板墩组主要为火山碎屑岩、火山岩夹硅质岩、碎屑岩，查干布尔嘎斯组主要为硅质板岩、灰岩、千枚岩. 多若诺尔群下部扁麻沟组具有冰川成因的杂砾岩，因而一直被认为是成冰系(钱家骐, 1986; 余以生, 1994). 最近, 我们在肃北地区的龚岔群哈什哈尔组中获得了(569±2)Ma的最大沉积年龄，表明龚岔群可能整体属于埃迪卡拉系(孙郎等, 2022). 同时，这一年龄也相应地间接支持了曾与南沱组对比的多若诺尔群扁麻沟组冰碛杂砾岩属于埃迪卡拉纪晚期的冰期记录(孙郎等, 2022). 而在肃北地区盐池湾扁麻沟组之上的石板墩组火山岩中, Zhao等(2020)获得了中奥陶世年龄, 因此石板墩组及其以上的多若诺尔群可能不属于埃迪卡拉系.

值得注意的是，中祁连地块东段永登地区杏儿沟群下部的杂砾岩可能为冰川沉积(图2, 地层柱7), 曾被认为可以与扬子板块的南沱组对比(赵祥生等, 1980). 考虑到整个祁连山地区及周边新元古代冰碛杂砾岩均属于埃迪卡拉纪末期，杏儿沟群的时代也可能与它们相同，代表了埃迪卡拉系在中祁连地块东段的记录, 但需要可靠的地层学和年代学证据加以证实.

南祁连构造带中的前寒武系原被认为只包含化隆群，化隆群与寒武系深沟群之间存在时间跨度巨大的沉积间断(青海省地质矿产局, 1997). 最近, Li等(2019)将原属下古生界的巴龙贡噶尔组分解，认为其中部分地层的最大沉积年龄可以下延至成冰纪或埃迪卡拉纪, 这表明埃迪卡拉纪地层也可能存在于这一地区(图2, 地层柱8). 然而, 这套地层暂时并未得到重新厘定和命名.

3.5　欧龙布鲁克地块

在青海海西州德令哈市以西地区的欧龙布鲁克地块, 发育了一套新元古代地层, 其中以出露于全吉山的全吉群研究较为详细. 全吉群为一套浅变质的沉积盖层，以角度不整合上覆于达肯大坂群变质岩系之上, 自下向上包括麻黄沟组、枯柏木组、石英梁组、红藻山组、黑土坡组、红铁沟组和皱节山组(王云山等, 1980), 这套地层过去曾被认为全部属于震旦系和下寒武统(王云山, 1977; 王云山等, 1980). 然而, 全吉群石英梁组玄武安山岩年龄(800Ma; 李怀坤等, 1999)、红藻山组凝灰岩年龄(1640~1646Ma; 张海军等, 2016)和各组的碎屑锆石U-Pb定年(张璐等, 2012; Sun等, 2022)均与原有认知差距较大，近年来皱节山组中也发现有典型埃迪卡拉纪末期化石*Charnia*和*Shaanxilithes*(王云山等, 1980; Shen等, 2007; Pang等, 2021), 甚至遗迹化石(Wang Y等, 2015)等, 岩组之间还存在不整合接触关系(王超等, 2015). 以上证据均表明这套地层的形成历史复杂，形成时代跨度大(中元古代至新元古代末), 且中间存在地层缺失，因而全吉群应该解体的建议是合理的(王超等, 2015; 张海军等, 2016).

总体上, 依据现有证据, 黑土坡组可能沉积于拉伸纪(Sun等, 2022), 而黑土坡组之上的红铁沟组和皱节山组可以明确属于埃迪卡拉纪晚期地层(周传明等, 2021)(图2, 地层柱9). 因为红铁沟组发育有典型的冰碛杂砾岩, 上覆类似塔里木板块库鲁克塔格地区汉格尔乔克组冰碛杂砾岩之上的"盖帽碳酸盐岩", 且二者的碳同位素特征类似(Shen等, 2010), 之上连续沉积的皱节山组含有埃迪卡拉纪末期化石(王云山等, 1980; Shen等, 2007; Wang Y等, 2015; Pang等, 2021), 构成与塔里木板块、华北板块埃迪卡拉系相似的地层序列. 而黑土坡组及其之下各组的地层时代, 目前的证据很难确定属于新元古代还是中元古代, 有待未来更多研究加以厘定.

3.6 拉萨地块

最新研究表明, 拉萨地块形成于新元古代晚期岛弧系统, 构成冈瓦纳大陆形成初期东非造山带的一部分(Zhang X等, 2023). 因此, 拉萨地块新元古代晚期地层均为变质岩系, 缺少明确的成冰系和埃迪卡拉系记录. 分布在门巴、工布江达和林芝西北的松多岩群为一套原岩为碎屑岩的变质岩系, 包含岔萨岗岩组、马布库岩组及雷龙库岩组, 时代争议颇多, 曾被认为属于上古生界(西藏自治区地质矿产局, 1993, 1997). 后续研究在岔萨岗岩组中获得了古元古代同位素年龄, 据此岔萨岗岩组被从松多岩群划分出来, 单独构成岔萨岗岩群(何世平等, 2013, 2014). 目前, 松多岩群自下向上包括马布库岩组和雷龙库岩组(图2, 地层柱10), 其中马布库岩组被认为可能为埃迪卡拉系, 而雷龙库岩组为寒武系, 但这种时代归属尚没有可信的地层学证据(何世平等, 2014). 另外, 分布于林芝、米林和郎县一带的一套名为林芝岩群的变质岩系, 由于缺少可靠的同位素年代学资料, 被暂时认为可能相当于中-新元古代地层(何世平等, 2014), 是否包含成冰系-埃迪卡拉系有待确认.

3.7 南羌塘地块

长期以来, 青藏高原研究的核心区域并未发现明确的成冰纪和埃迪卡拉纪地层. 最近, 王明等(2018)在南羌塘地块改则县发现一套碎屑岩地层, 并将其命名为达布热组(图2, 地层柱11), 碎屑锆石U-Pb定年结果表明这套地层沉积于约550Ma, 可能是埃迪卡拉纪末期沉积. 达布热组的上下地层关系不明, 露头剖面上以断层与上古生界和新生界接触. 物源分析表明, 达布热组与印度板块北缘碎屑物质物源基本一致(Wang M等, 2015), 显示了两者之间的构造相关性.

3.8 塔里木板块

塔里木板块的成冰系-埃迪卡拉系以和田、阿克苏和库鲁克塔格三个地区最为典型. 和田地区的铁克里克山出露一套成冰纪-埃迪卡拉纪地层, 自下向上包含牙拉古孜组、波龙组、克里西组、雨塘组、库尔卡克组和克孜苏胡木组(马世鹏等, 1989; Zhu和Wang, 2011; 图2, 地层柱12). 其中, 牙拉古孜组为肉红色的砾岩; 波龙组由冰碛杂砾岩、砾岩夹泥岩和粉砂岩组成; 克里西组底部为粉砂岩和泥岩, 中部为石英砂岩, 顶部为砾岩; 雨塘组底部为一套冰碛杂砾岩, 上部为粉砂岩及砾岩; 库尔卡克组为碎屑岩沉积, 底部为黑色页岩, 中部为砂岩及砾岩, 顶部渐变为粉砂岩和页岩; 克孜苏胡木组主要为白云岩夹砂岩(马世鹏等, 1989; Zhu和Wang, 2011). 最近, 多项针对这套地层U-Pb年代学的研究得到了开展, 李王鹏等(2021)研究认为波龙组的沉积晚于(710±13)Ma, 雨塘组的沉积晚于(656±18) Ma; 易子渊等(2023)在波龙组底部获得最大沉积年龄为(693±3)Ma, 而其顶部的最大沉积年龄为(690±3)Ma, 雨塘组的最大沉积年龄为(643±4)Ma. 上述研究表明波龙组冰碛岩形成于成冰纪早期的Sturtian冰期, 雨塘组为成冰纪末期的沉积, 其中的冰碛杂砾岩代表了Marinoan冰期沉积. 由此可见, 整合覆盖在雨塘组之上的库尔卡克组和克孜苏胡木组为埃迪卡拉系(李王鹏等, 2021).

阿克苏地区的成冰系为巧恩布拉克群, 自下向上包括西方山组、东巧恩布拉克组、牧羊滩组、冬屋组及尤尔美那克组(高振家等, 1986; Zhu和Wang, 2011; 图2, 地层柱13). 西方山组与下伏阿克苏群呈角度不整合接触, 岩性主要为砂岩夹粉砂岩, 碎屑锆石U-Pb年代学表明其沉积可能晚于720Ma(Wu L等, 2021), 因此西方山组可能代表了成冰纪沉积的开始. 东巧恩布拉克组底部为砾岩, 中上部为冰碛杂砾岩, 目前仍缺少对其沉积时代的研究. 牧羊滩组主要为砂岩夹粉砂岩, 冬屋组为砾岩. 尤尔美那克组主要为冰碛杂砾岩, 其上为以砂岩夹玄武岩为主的苏盖特布拉克组, 以及白云岩为主的奇格布拉克组. 苏盖特布拉克组和奇格布拉

克组层序地层学研究表明，二者可能对比于扬子板块的陡山沱组及灯影组(何金有等，2007). 同时，何景文等(2015)的碎屑锆石U-Pb年代学研究表明，苏盖特布拉克组沉积晚于630Ma，因此苏盖特布拉克组为该地区埃迪卡拉系的下部地层(Zhu和Wang，2011). Yao等(2005)对奇格布拉克组之上的玉尔吐斯组磷块岩开展了疑源类研究，表明玉尔吐斯组应当沉积于寒武纪早期. 玉尔吐斯组还发现有小壳化石(钱建新和肖兵，1984；肖兵，1989；肖兵和段承华，1992；钱逸等，2000)，其中的*Anabarites trisulcatus*化石带标志了寒武系的开始，区域内埃迪卡拉系-寒武系的界线大致与玉尔吐斯组底部相当.

库鲁克塔格地区的新元古界发育有多层冰碛杂砾岩，这一地层序列自下向上依次包括贝义西组、照壁山组、阿勒通沟组、黄杨沟组、特瑞艾肯组、扎莫克提组、育肯沟组、水泉组和汉格尔乔克组(高振家等，1980，1984；Zhu和Wang，2011；图2，地层柱14). 贝义西组底部为一套砾岩及火山岩，中部主要为砂岩，顶部为冰碛杂砾岩夹泥岩，Xu等(2009)和高林志等(2010)针对这套地层开展了年代学工作，分别在贝义西组底部火山岩中获得了(740±7)Ma、(739±6)Ma的锆石U-Pb年龄，在顶部火山岩中获得了(725±10)Ma的年龄. 由于针对贝义西组的年代学和综述性工作均出版于成冰系底界修订之前(Shields-Zhou等，2016)，早期工作中贝义西组多被认为属于成冰系(例如，Zhu和Wang，2011)，这与目前以Sturtian冰期沉积物底界为成冰系底界定义的年龄(720Ma)之间存在矛盾(Shields-Zhou等，2016). 鉴于贝义西组获得的年龄，贝义西组中的冰碛杂砾岩被认为是成冰纪之前的冰期记录，与非洲Kalahari板块的Kaigas冰期时代相当(Frimmel等，1996；Xu等，2009；高林志等，2010)，因而库鲁克塔格地区的成冰系最底部可能是上覆于贝义西组的照壁山组，但这一推测还需要今后进一步研究进行论证. 照壁山组下部主要是砂岩，向上粒度变细，岩性转变为以粉砂岩为主的细碎屑岩. 阿勒通沟组与下伏照壁山组呈平行不整合接触(Zhu和Wang，2011)，岩性主要为冰碛杂砾岩，夹有多层含砾砂岩、砂岩. 同时，上覆于阿勒通沟组的黄杨沟组底部为玄武岩，中上部主要为砂岩，顶部为一套灰岩. 黄杨沟组底部的火山岩锆石U-Pb定年结果为(654±10)Ma(He等，2014)，这同时限定阿勒通沟组的沉积早于约654Ma. 特瑞艾肯组主体为冰碛杂砾岩，夹有多层粉砂岩及砂岩，顶部为白云岩. Ren等(2020)在兴地地区特瑞艾肯组的凝灰岩中获得了(636±2)Ma的年龄，说明特瑞艾肯组沉积于成冰纪晚期，而扎莫克提组顶部的玄武岩及火山灰年龄约为615Ma(Xu等，2009；He等，2014)，表明特瑞艾肯组顶部的白云岩相当于Marinoan冰期结束之后沉积的“盖帽碳酸盐岩”，标志着埃迪卡拉系的开始. 育肯沟组主要为粉砂岩及泥岩，水泉组为白云岩夹粉砂岩，汉格尔乔克组主要为冰碛杂砾岩. 碎屑锆石定年表明育肯沟组和水泉组的沉积晚于600Ma(Ren等，2020)，碳同位素数据表明汉格尔乔克组的沉积晚于570Ma(Wang等，2023). 微体化石证据表明，汉格尔乔克组之上的西山布拉克组沉积于寒武纪最早期(Yao等，2005；Zhang Z等，2023)，因此汉格尔乔克组可能沉积于埃迪卡拉纪晚期，其中的冰碛杂砾岩可能对比于华北板块的罗圈组和正目观组冰碛杂砾岩，属于同一次冰期沉积记录.

3.9　印度板块

成冰系-埃迪卡拉系分布于印度板块北缘喜马拉雅山脉的多个区域，在靠近板块内部的Indus盆地和Marwar盆地也有发育. 在东喜马拉雅地区，成冰系-埃迪卡拉系主要是出露在西藏山南的Buxa群和聂拉木地区的肉切村群. 其中，Buxa群底部为一套冰碛杂砾岩，向上粒度变细，中、上部主要为白云岩(Tewari，2003；图3，地层柱15). Buxa群白云岩中的微体化石和叠层石组合特征表明，这套白云岩可能沉积于新元古代晚期(Tewari，2004；Shukla等，2006). 由于缺少年代学研究，现暂将Buxa群底部的杂砾岩置于成冰系上部，其上的碎屑岩及碳酸盐岩置于埃迪卡拉系. 肉切村群是出露于西藏聂拉木县周边的变质岩系(穆恩之等，1973；西藏自治区地质矿产局，1997)，下部为眼球状花岗质糜棱岩，中、上部由变粒岩、大理岩、糜棱岩组成，与下伏聂拉木群呈断层接触，顶部与奥陶系甲村群为断层接触(图3，地层柱16). 在肉切村群获得的锆石U-Pb年龄(686Ma)表明其可能为新元古代晚期地层，不排除延伸至寒武系的可能性(邹光富等，2006；何世平等，2014).

中喜马拉雅地区的成冰系-埃迪卡拉系主要分布于Krol构造带(图3，地层柱17)，自下而上分为Blaini组和Krol群. Blaini组由下部的冰碛杂砾岩和顶部的白云岩组成，其中获得的碎屑锆石年龄((642±9)Ma)和地球

化学特征表明, Blaini组下部冰碛杂砾岩可能代表了成冰纪晚期的沉积, 而上部白云岩可能代表了冰期结束后的“盖帽碳酸盐岩”(Jiang等, 2003; Kaufman等, 2006; Tewari, 2012; Colleps等, 2018). Krol群自下向上包括Infra Krol组、Krol A、B、C、D、E组(Auden, 1934; Jain等, 2020). 这套地层也曾被划分为Chambaghat组、Mahi组、Jarashi组和Kauriyala组, 其中Chambaghat组与Infra Krol组对应, Mahi组与Krol A组对应, Jarashi组与Krol B组对应, 而Kauriyala组对应于Krol C、Krol D和Krol E组(Shanker等, 1993, 1997). 但由于前一划分方案已经得到了较为广泛的使用, 后一方案并未被Jain等(2020)推荐使用. Infra Krol组以碎屑岩为主, 底部为黑色页岩及泥岩, 向上粒度变粗转变为砂岩, 其上的Krol A组为灰岩夹钙质泥岩; Krol B组为页岩、粉砂岩夹白云岩; Krol C组的岩性主要为灰岩; Krol D组为白云质灰岩、白云岩, 可见叠层石; Krol E组为灰岩(Jain等, 2020). 碳同位素及生物地层学研究表明, Krol群可能大部位于埃迪卡拉系的中下部, 与华南的陡山沱组及灯影组的下部相当(Xiao等, 2022). 与此同时, Krol群内发现有*Shaanxilithes*(Tarhan等, 2014), 表明了其内部埃迪卡拉系-寒武系过渡地层的存在. 覆盖于Krol群之上的Tal群内发现有寒武纪早期的小壳化石、疑源类和三叶虫化石(Hughes等, 2005; Hughes, 2016), 表明埃迪卡拉系结束于Tal群.

在中喜马拉雅的斯匹提-拉达克地区, 也发育有成冰系和埃迪卡拉系. 这一地区的成冰系自下向上包括Chamba组和Manjir组(Rattan, 1973; Draganits等, 2008; 图3, 地层柱18). 其中, Manjir组主要为冰碛杂砾岩, 顶部含有一层较薄的疑似“盖帽碳酸盐岩”的沉积(Frank等, 1995). Myrow等(2018)在Manjir组获得的碎屑锆石年龄普遍大于631Ma, 表明Manjir组可能为Marinoan冰期的沉积记录. Manjir组之上为Phe组, 在Myrow等(2018)获得的Phe组碎屑锆石年龄中, 一个样品最小的一组年龄在562~559Ma之间, 另一个样品的最年轻碎屑锆石年龄为(569±13)Ma, 说明Phe组为埃迪卡拉纪沉积.

分布于印度板块西部Rajasthan地区的Marwar超群曾被认为形成于晚新元古代至寒武纪. 最近, Xu等(2022)在Marwar超群的Jodhpur群中获得了(651±18) Ma的火山灰年龄, 支持了这一地层单位沉积于成冰纪的观点. 上覆的Bilara群主要由碳酸盐岩组成, 自下向上可细分为Dhanapa组、Gotan组和Pondlo组(图3, 地层柱19), 最新的碳同位素研究表明全球性的DOUNCE/Shuram事件、BACE在Bilara群中部均有所出现, 说明Bilara群的中下部为埃迪卡拉系(Pandit等, 2001; Mazumdar和Strauss, 2006; Ansari等, 2018; George等, 2021). 在印度板块西部的巴基斯坦盐岭地区, 出露一套夹少量碳酸盐岩的著名蒸发岩系, 称为Salt Range组, 被认为是前寒武纪沉积地层(图3; 地层柱20)(Gee和Gee, 1989). 这套蒸发岩可能与阿曼地区埃迪卡拉系普遍发育的蒸发岩系相当(Myrow等, 2018), 代表了冈瓦纳大陆北缘相同沉积相的沉积物.

在西喜马拉雅地区Hazara盆地, 成冰系-埃迪卡拉系自下而上包括Kakul组和Abbottabad组(Latif, 1970, 1974; Umar等, 2015; Qasim等, 2017; Khan等, 2022; 图3, 地层柱21). Kakul组中发育一套冰碛杂砾岩, 杂砾岩之上为一套白云岩. 其中, 冰碛杂砾岩被认为代表了Marinoan冰期的沉积物, 而冰碛岩之上的白云岩则为冰期结束后沉积的“盖帽碳酸盐岩”(Khan等, 2022); Qasim等(2017)在Kakul组上部获得的埃迪卡拉纪碎屑锆石年龄(~598Ma), 也支持这套白云岩沉积于埃迪卡拉纪早期. Abbottabad组主要为碳酸盐岩, 夹有一些碎屑岩沉积, 其准确的地层年代缺少直接证据. 根据Abbottabad组顶部出产的寒武纪最早期小壳化石(Ahmed等, 2023), Abbottabad组的主体部分应该属于埃迪卡拉系上部.

3.10 伊朗

目前已知伊朗的新元古代晚期地层主要分布于北部厄尔布尔士(Alborz)山和中南部的霍尔木兹(Hormuz)岛以及中伊朗地块(图3). 这套地层以角度不整合覆盖于变质基底之上, 主要由埃迪卡拉系上部构成, 缺失成冰系记录.

在厄尔布尔士山, 埃迪卡拉系Kahar组直接角度不整合于变质基底之上(Dedual, 1967; Stöcklin, 1968; Ghorbani, 2013; 图3, 地层柱22). Kahar组主要由碎屑岩组成, 夹有少量碳酸盐岩, 底部有冰碛杂砾岩. 冰碛杂砾岩上、下层位的碎屑锆石U-Pb年代学表明, Kahar组沉积年龄不早于560~550Ma(Etemad-Saeed等, 2016). 覆盖在Kahar组之上的Bayandor组为白云岩与泥岩的交互沉积, 寒武系Soltanieh组整合于Bayandor组之上, 产有标志着寒武纪沉积开始的遗迹化石(*Trep-*

tichnus pedum)以及小壳化石(Shahkarami等, 2017; Devaere等, 2021).

在伊朗南部霍尔木兹(Hormuz)岛、中部的Bafq-Saghand地区和中东部Kerman地区，埃迪卡拉系分别称为Hormuz组、Esfordi组和Dezu组(图3，地层柱23、24). 这套地层是含有大量流纹岩、凝灰质页岩和碎屑岩的沉积序列，底部有冰碛杂砾岩和覆盖在其之上的“盖帽碳酸盐岩”. 其中富含条带状铁矿，是伊朗重要的铁矿层位(Aftabi等, 2022).

特别值得关注的是，在中部Bafq-Saghand地区Kushk-Chahmir附近，Esfordi组Kushk页岩段和南部Hormuz组都发现有埃迪卡拉纪典型化石(Aftabi等, 2022). 其中，尤以Kushk页岩段中的化石最为丰富，不仅包括*Chuaria*、*Kimberella*等埃迪卡拉纪化石，还包括*Cloudina*、*Corumbella*等埃迪卡拉纪末期管状化石(Vickers-Rich等, 2017; Vaziri等, 2018, 2021). Vickers-Rich等(2017)还在Kushk页岩系中获得了(581±8.6)Ma的碎屑锆石年龄，进一步支持这套地层沉积于埃迪卡拉纪晚期.

3.11　阿曼

阿曼地区的成冰系-埃迪卡拉系主要为Huqf超群，自下向上包括Abu Mahara群、Nafun群和Ara群(Gorin等, 1982; Amthor等, 2003; Bowring等, 2007; Allen等, 2011a, 2011b)，这一序列分布于北部Al Jabal-Akhdar地区和南部South Oman Salt盆地，而东南沿海的Mirbat地区仅发育有成冰系Mirbat群(Rieu等, 2007)(图3).

在Al Jabal-Akhdar地区，成冰系-埃迪卡拉系自下而上包括Ghubra组、Saqlah组、Fiq组、Hadash组、Masirah Bay组、Khufai组、Shuram组、Buah组以及Ara群(Bowring等, 2007; 图3, 地层柱25). Ghubrah组与下伏的基底呈角度不整合接触，岩性主要为冰碛杂砾岩. 年代学研究表明Ghubrah组的沉积不早于717Ma，可能为成冰纪早期的冰期沉积(Brasier等, 2000; Allen等, 2004; Bowring等, 2007). Saqlah组主要为白云岩及火山岩. Fiq组的下部主要为碎屑岩，顶部发育有一套冰碛杂砾岩，这套冰碛杂砾岩的沉积时代晚于654Ma(Brasier等, 2000; Bowring等, 2007)，结合Fiq组之上Hadash组白云岩的负δ^{13}C值(Leather等, 2002; Allen等, 2011a)，Fiq组顶部的冰碛杂砾岩应当是成冰纪末沉积，而Hadash组为“盖帽碳酸盐岩”，代表了埃迪卡拉纪沉积的开始. 在Hadash组之上，Khufai组主要为灰岩，Shuram组为泥岩与灰岩的交互沉积，Buah组主要为碳酸盐岩沉积，Ara群则主要为蒸发岩. Ara群底部发现有埃迪卡拉纪末化石*Cloudina*和*Namacalathus*(Amthor等, 2003; Schröder等, 2003)，说明埃迪卡拉系结束于Ara群的底部.

在South Oman Salt盆地，成冰系-埃迪卡拉系包括Abu Mahara群的Ghadir Manqil组，以及Nafun群的Masirah Bay组、Khufai组、Shuram组以及Buah组，岩性上与Al Jabal-Akhdar地区的Nafun群各组一致(Amthor等, 2005; 图3, 地层柱26). Ghadir Manqil组与下伏基底呈角度不整合接触，岩性主要为冰碛杂砾岩，其内含有疑源类(Amthor等, 2005). Masirah Bay组整合于Ghadir Manqil组冰碛杂砾岩之上，其底部为一套白云岩，代表了埃迪卡拉系的开始. Shuram组中出现的显著碳同位素负异常在全球范围内有广泛发现(Grotzinger等, 2011)，结合Rooney等(2020a)和Yang等(2021)开展的综合年代学工作，Shuram组底部的沉积时代可能在574~564Ma. Ara群的下部产出有*Cloudina*和*Namacalathus*，表明Ara群下部可能为前寒武系与寒武系的界线(Amthor等, 2003, 2005).

在Mirbat地区，成冰系包括Ayn组、Arkhawl组、Marsham组和Shareef组(Allen等, 2011b; 图3，地层柱27). Ayn组与下伏基底呈角度不整合接触，岩性主要为冰碛杂砾岩，碎屑锆石U-Pb年代学表明其沉积时代晚于722Ma(Allen等, 2011b)，代表了成冰纪早期的沉积. Arkahawl和Marsham组主要为页岩夹砂岩，但Marsham组顶部出现了一套砾岩. Shareef组主要为冰碛杂砾岩，其上被中生代沉积物覆盖(Allen等, 2011b)，目前仍缺少可以用来限制其沉积时代的证据，Rieu等(2007)认为Shareef组可以与Fiq组对比，可能也代表了成冰纪末的沉积.

4　青藏高原及周边成冰纪-埃迪卡拉纪生物群

成冰纪-埃迪卡拉纪是生物演化的关键转折期，经历了中、新元古代的缓慢演化过程之后，真核生物在成冰纪期间或结束之后发生了革命性演变(图4). 海洋初级生产者可能在成冰纪间冰期完成了从原核生物主导到真核生物主导的转变(Brocks等, 2017). 最引人注

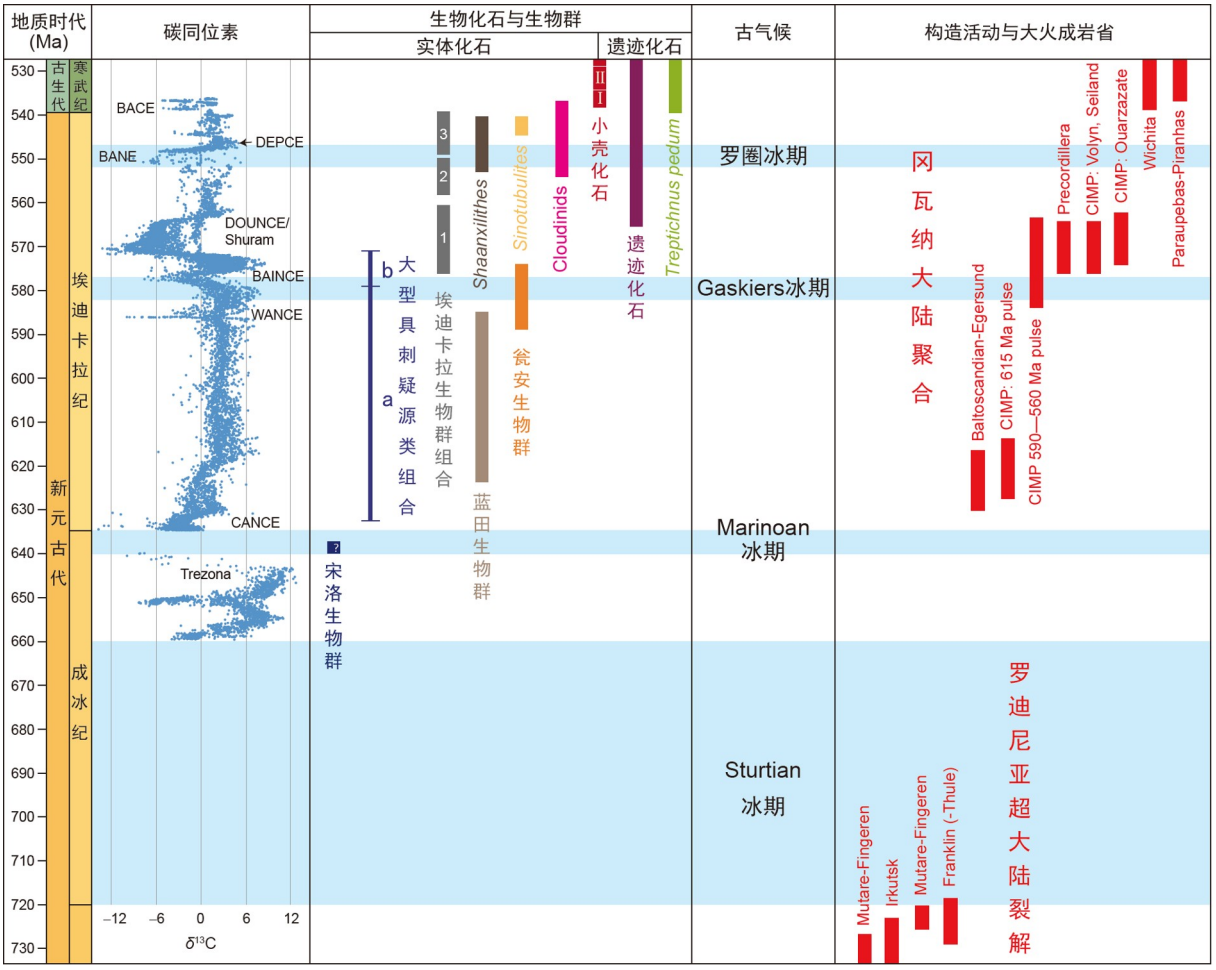

图 4　成冰纪至埃迪卡拉纪地质事件及生物化石和生物群分布

碳同位素数据修改自Halverson等(2005)、Bold等(2016)、Yang等(2021)及Chen B等(2022); 生物化石和生物群分布修改自Zhu等(2017)和Yang等(2021); 构造活动和大火成岩省资料修改自Li等(2023). 大型具刺疑源类组合(朱茂炎等, 2016; Zhu等, 2022): a, *Tianzhushania spinosa*带; b, *Tanarium conoideum-Hocosphaeridium scaberfacium-Hocosphaeridium anozos*组合带. 埃迪卡拉化石群组合: 1, 阿瓦隆组合; 2, 白海组合; 3, 纳玛组合

目的是，真核多细胞生物在成冰纪极端气候结束之后发生了快速大辐射，标志性的生物化石群包括扬子板块上的埃迪卡拉系陡山沱组中的一系列化石群. 蓝田生物群(602Ma)(Yuan等, 2011; Yang C等, 2022)和庙河生物群(约570~560Ma)(Xiao等, 2002)主要由以碳质膜形式保存的宏体多细胞藻类组成. 磷酸盐化的微体多细胞化石群——瓮安生物群中，除多细胞藻类外，还发现有多种类型的原始动物胚胎和微型成体化石(例如, Li等, 1998; Xiao等, 1998; Yin等, 2015, 2022). 其中，一些常见于瓮安生物群的表面具有复杂装饰的大型疑源类化石，在全球各地埃迪卡拉纪早、中期地层也很常见(Liu和Moczydłowska, 2019). 它们不仅反映了微体真核生物的大辐射，其多样性和快速演化也为该时期全球地层划分和对比提供了生物地层学依据(Xiao等, 2016; Liu和Moczydłowska, 2019; 周传明等, 2019).

进入埃迪卡拉纪中、晚期，众所周知的是在全球范围内广泛出现的埃迪卡拉化石群(Ediacara Biota)(Narbonne, 2005; Xiao和Laflamme, 2009), 其中不同构型的宏体化石代表了动物在寒武纪早期生命大爆发之前的精彩篇章(Dunn和Liu, 2019). 同时, 在埃迪卡拉纪中、晚期, 全球范围内还出现了各种遗迹化石(Mángano和Buatois, 2020), 以及不同特征的带状和管状化石等，如克劳德管类(Cloudiniids)、*Palaeopaschinus*和

Shaanxilithes (Schiffbauer等, 2016). 与同期的化石一样, 这些化石与寒武纪早期繁盛的小壳化石具有显著差异, 大部分都在埃迪卡拉纪末发生灭绝, 但也有部分分子延续到寒武纪早期(Yang等, 2016; Zhu等, 2017; Cai等, 2019)(图4).

上述成冰纪-埃迪卡拉纪的生物群演化在青藏高原及其周边不同块体或多或少也有记录, 但差异明显(图1). 首先, 扬子板块是全球成冰纪-埃迪卡拉纪生物群保存记录最好的地区, 不仅包括上述陡山沱组的蓝田生物群、庙河生物群和瓮安生物群, 还有灯影组的西陵峡生物群和高家山生物群等(详见朱茂炎等(2019)及其中文献). 特别是近年来在神农架地区南沱组中发现的宋洛生物群, 是全球唯一在成冰纪冰期地层中发现的多细胞藻类化石群(Ye等, 2015). 在扬子板块与青藏高原相邻的滇东地区, 灯影组广泛发现*Shaanxilithes* (Zhu和Zhang, 2006; 张志亮等, 2015; 房瑞森等, 2021). 除此之外, 在灯影组与朱家箐组界线附近也发现有带状化石*Vendotaenia*(Zhu和Zhang, 2006). 在扬子板块西北部的陕西宁强地区, 高家山生物群中广泛发现有典型的埃迪卡拉纪末期管状化石, 如*Cloudinia*、*Sinotubulites*和*Shaanxilithes*等(Hua等, 2007; Cai等, 2010, 2015, 2019; Chen W等, 2022).

在华北板块与青藏高原东北缘相邻的贺兰山地区, 埃迪卡拉纪末期典型的管状和带状化石*Shaanxilithes*和*Palaeopascichnus*非常常见(Shen等, 2007; Wang等, 2021a, 2021b). 这些化石在欧龙布鲁克地块皱节山组中也有发现, 除了*Shaanxilithes*和*Palaeopascichnus*外, 还发现有典型埃迪卡拉化石群化石*Charnia*和可能的*Aspidella* (Shen等, 2007; Pang等, 2021; Wang等, 2021a, 2021b). *Shaanxilithes*、*Palaeopascichnus*和*Charnia*化石在贺兰山、全吉山以及塔里木库鲁克塔格地区埃迪卡拉纪末期冰碛杂砾岩之上地层的发现, 不仅为华北板块、欧龙布鲁克地块和塔里木板块上的埃迪卡拉纪末期冰碛地层的对比提供了关键证据, 也表明埃迪卡拉纪晚期这些块体之间古地理位置的密切联系(Pang等, 2021).

印度板块的埃迪卡拉纪化石报道不多, 主要是疑源类化石. Prasad和Asher(2016)在Palaita地区的Vindhyan超群中发现了丰富的具刺疑源类化石, 认为与典型的埃迪卡拉纪早、中期大型具刺疑源类相似, 表明原被认为属于上古元古界至中元古界的Lower Vindhyan群可能实际属于埃迪卡拉系, 不过这一丰富的具刺疑源类化石群来自岩芯样品, 具体层位并不十分明确. Joshi和Tiwari(2016)对Krol地区的Infra Krol组开展了疑源类研究, 其中的*Tianzhushania*可以与扬子板块陡山沱组*Tianzhushania*组合进行对比. 最近, Xiao等(2022)对Krol地区的进一步研究表明, Infra Krol组发现的*Tianzhushania spinosa*和*T. polysiphonia*可能与Liu和Moczydłowska(2019)在扬子板块建立的*Appendisphaera grandis-Weissiella grandistella-Tianzhushania spinosa*组合带对比, 而Krol A组中发现的*Schizofusa zangwenlongii*可能属于*Tanarium tuberosum-Schizofusa zangwenlongii*组合带. 结合碳同位素地层学数据, Xiao等(2022)认为扬子板块陡山沱组出现在BAINCE/EN2上下的哑段可能是古环境变化原因导致的; 同时, 大型具刺疑源类的对比也支持了印度板块北缘在埃迪卡拉纪时与扬子板块西南缘直面相邻的观点(Jiang等, 2003), 显示了大型具刺疑源类在埃迪卡拉纪地层对比和古地理重建方面的巨大潜力. 此外, 埃迪卡拉纪-寒武纪转折时期特征性化石*Shaanxilithes*在中喜马拉雅的Krol群顶部和Tal群底部也有所发现(Tarhan等, 2014). 在印度板块内部, 可能的埃迪卡拉纪化石*Arumberia banski*也被报道于Marwar盆地的Jodhpur群(Kumar和Pandey, 2009). 除此之外, 印度板块最近还报道了典型埃迪卡拉化石群化石*Dickinsonia*(Retallack等, 2021), 但目前这一所谓化石已被Meert等(2023)论证为假化石.

如前文所述, 近年来伊朗的埃迪卡拉纪发现有丰富的埃迪卡拉纪末化石, 主要分布在中南部地区. 最初发现在中部Bafq-Saghand地区Kushk-Chahmir附近Dargazin剖面和Wedge剖面的Kushk页岩段, 主要化石包括*Persimedusites*、*Crumbella*、疑似的*Namalia*、以及遗迹化石和可能的藻类等(Vickers-Rich等, 2017). 后来, Vaziri等(2018)又发现有*Cloudina*、*Kimberella*、*Corumbella*、Rangeomorpha、Erniettomorpha、*Charnia*以及一些管状化石等, 最近他们还建立了一个可能含有有机质外壳的管状化石新属新种, 命名为*Convolutubus dargazinensis*(Vaziri等, 2021). 总体来看, 在伊朗发现的埃迪卡拉纪晚期化石既有全球其他地区的典型分子, 又具有一些特色分子, 值得关注. 与之相似的是阿曼地区, 目前已知不仅有埃迪卡拉纪末期标志性化石*Cloudina*外, 还发现了在青藏高原及周边地区从

未发现的*Namacalathus*(Amthor等, 2003; Schröder等, 2003), 该化石在非洲纳米比亚南部非常常见.

总之, 青藏高原及其周边的成冰纪-埃迪卡拉纪化石记录在不同地区差异明显, 发现的化石群既具有一定的共同点又各具特色. 首先, 扬子板块的化石记录保存最好, 类型最丰富, 成为研究成冰纪-埃迪卡拉纪生物演化的焦点. 第二, *Cloudina*及*Shaanxilithes*在各主要块体均有所发现. 第三, 各区域的化石组成特征区别也较为明显. 目前, 繁盛于埃迪卡拉纪早中期的大型具刺疑源类化石仅在扬子板块和印度板块具有良好的记录; 而典型的埃迪卡拉化石群也仅在扬子板块、欧龙布鲁克地块和伊朗中南部有所发现, 且保存方式和面貌差异明显.

5 青藏高原及周边成冰纪-埃迪卡拉纪重大地质事件

除上述生物群演化之外, 作为地球-生命系统演化的关键转折期, 成冰纪-埃迪卡拉纪时期地球岩石圈、水圈和大气圈均发生了重大演变事件, 包括与罗迪尼亚超大陆裂解和冈瓦纳大陆聚合相关的构造-岩浆事件、新元古代大气和海洋氧化事件, 以及以极冷的"雪球地球"冰期等为代表的重大古气候事件等等.

5.1 构造-岩浆事件

成冰纪-埃迪卡拉纪是罗迪尼亚超大陆裂解和冈瓦纳大陆聚合的时期, 因此发生了一系列与之相关的岩浆作用和造山运动(图4). 其中, 与罗迪尼亚超大陆裂解相关的岩浆记录主要为大火成岩省, 可以大致分为两期: 第一期发生于成冰纪的早期, 以富兰克林大火成岩省为代表, 记录了罗迪尼亚超大陆裂解晚期的构造运动(Heaman等, 1992; Lu等, 2022); 第二期发生于埃迪卡拉纪, 以中伊阿佩托斯火成岩省为代表, 记录了劳伦-波罗的大陆从罗迪尼亚超大陆裂解出来后, 二者发生分离而产生伊阿佩托斯洋的过程(van Staal等, 2012). 扬子板块北缘南秦岭地区耀岭河群下部出现的大规模岩浆岩(~720Ma), 是第一期岩浆记录的组成部分, 为地幔柱驱动罗迪尼亚超大陆裂解提供了新证据(Lu等, 2022).

冈瓦纳大陆在埃迪卡拉纪拼合而成, 通常可分为东冈瓦纳大陆和西冈瓦纳大陆. 其中, 东冈瓦纳大陆包括澳大利亚、印度板块、东南极板块、华南板块以及青藏高原及其周边的主要板块; 西冈瓦纳大陆则主要由非洲(刚果板块、撒哈拉板块、西非板块、克拉哈里板块)和南美(亚马逊板块、圣弗朗西斯科地块等)的块体组成(Zhao等, 2018). 冈瓦纳大陆主要是在630~520Ma期间, 通过东非、Brasiliano-Damara和Kuunga-Pinjarra三条碰撞造山带聚合而成(Cawood等, 2007), 通常称为泛非造山带.

在冈瓦纳大陆聚合时期, 除了印度板块东缘和西缘的岩浆活动分别受控于东非和Kuunga-Pinjarra造山作用以外, 青藏高原及其周边地区的岩浆活动主要与冈瓦纳大陆边缘的造山作用有关(Cawood等, 2021). 其中, 伊朗地区的岩浆活动受控于Avalonian-Cadomian造山作用, 其他地区受控于North Indo-Australia造山作用(Cawood等, 2021). 总体而言, 青藏高原及其周边地区广泛记录了冈瓦纳大陆聚合时期的岩浆活动, 比如伊朗和北拉萨地块具有埃迪卡拉纪晚期原特提斯洋俯冲相关的活动大陆边缘岩浆岩(Moghadam等, 2017; Hu等, 2018), 塔里木板块和华南板块具有成冰纪-埃迪卡拉纪过渡时期冈瓦纳大陆周缘俯冲带弧后伸展相关的裂谷岩浆岩等(Zhao和Asimow, 2018; Zhou等, 2022).

5.2 古气候事件

成冰纪-埃迪卡拉纪是地球历史上气候变化最剧烈的时期. 成冰纪期间发生了全球性的极端冰期事件, 即"雪球地球"事件, 包括成冰纪早期的Sturtian冰期和晚期的Marinoan冰期(Hoffman等, 2017). 成冰纪的冰期沉积在扬子板块、塔里木板块、印度板块以及阿曼均有分布. 其中, 扬子板块西缘滇东地区的南沱组和川西南地区的列古六组属于成冰纪冰川沉积记录. 滇东峨山地区南沱组顶部凝灰质泥岩获得的锆石U-Pb年龄为(634.6±0.9)Ma, 证实其属于Marinoan冰期的沉积记录(Zhou等, 2019). 塔里木板块的地层学和地质年代学研究结果表明, 成冰纪的两次全球冰期在该地区均有记录(Xu等, 2009; 高林志等, 2010; Zhu和Wang, 2011; He等, 2014). 其中, Sturtian冰期记录包括库鲁克塔格地区阿勒通沟组、阿克苏地区的东巧恩布拉克组、和田地区的波龙组; Marinoan冰期记录包括库鲁克塔格地区的特瑞艾肯组、阿克苏地区的尤尔美那克组、和田地区的雨塘组(图2). 印度板块喜马拉雅西部

Hazara盆地的Kakul组下部和喜马拉雅中部Krol构造带的Blaini组都具有冰碛砾岩和“盖帽碳酸盐岩”的岩石组合, 上覆埃迪卡拉纪地层, 因而属于Marinoan冰期的产物(Etienne等, 2011; Khan等, 2022), 这一推断得到碎屑锆石U-Pb年龄和疑源类组合的支持(Qasim等, 2017; Xiao等, 2022). 阿曼也发育有较为完整的成冰纪地层, 以Al Jabal-Akhdar地区为例, Ghubrah组和Fiq组的冰碛砾岩分别代表了成冰纪Sturtian和Marinoan两次冰期的沉积记录(Bowring等, 2007).

目前的研究表明, 埃迪卡拉纪中、晚期发生了至少两次规模和范围不等的冰期事件, 应该属于区域性的冰期事件, 在规模上远小于成冰纪的全球性冰期. 这两次冰期包括Gaskiers冰期和埃迪卡拉纪末冰期, 前者的冰川记录主要位于纽芬兰地区, 年龄被确定为~580Ma(Pu等, 2016); 后一冰川记录分布范围较广, 全球范围内主要在华北板块、柴达木地块、塔里木板块、伊朗、欧洲、西非板块和卡拉哈里板块等地区有所发现(Zhu和Wang, 2011; Etemad-Saeed等, 2015; Pang等, 2021; Linnemann等, 2021), 在中国以华北板块罗圈组冰碛杂砾岩为代表(周传明等, 2019). 值得注意的是, 不同地区的埃迪卡拉纪末冰期沉积的时代尚未得到很好的厘定, 因此它们是否属于同一次冰期事件有待确认. 最近, Wang等(2023)将全球不同地区埃迪卡拉纪中、晚期冰期记录统称为一次“晚埃迪卡拉纪大冰期”事件. 他们认为这次冰期的持续时间达到了20个百万年(580~560Ma), 在此期间冰盖主要集中在中高纬度地区, 冰盖的产生和消融受控于真极移事件引起的板块纬度快速变化, 从而造成全球不同地区冰期记录的不等时性和地层序列的差异(Wang等, 2023).

青藏高原及其周边地区缺乏确切的与Gaskiers冰期相对应的沉积记录, 而广泛保存有埃迪卡拉纪晚期冰期事件的沉积记录(图5). 比如, 北祁连构造带的白杨沟群、中祁连地块东段的杏儿沟群和西段的扁麻沟组、欧龙布鲁克地块的红铁沟组、阿拉善地块的烧火筒沟组、华北板块的正目观组, 以及伊朗厄尔布尔士山地区的Kahar组和扎格罗斯山地区的Hormuz组冰碛杂砾岩等(图5). 尽管这些地层都缺乏准确的绝对年龄约束, 但已有的碎屑锆石U-Pb年龄(Etemad-Saeed等, 2016; Yang X等, 2022, 2023; 孙郎等, 2022)和化石记录(Shen等, 2007; Pang等, 2021)均表明, 它们沉积于埃迪卡拉纪晚期.

5.3　碳同位素异常事件

成冰纪-埃迪卡拉纪碳酸盐岩碳同位素组成的剧烈变化, 不仅是理解当时海洋环境变化的关键, 而且是该时期地层划分与对比的重要依据(图6). 由于缺乏广泛的碳酸盐岩沉积, 成冰纪的碳酸盐岩碳同位素数据主要来自于Sturtian冰期和Marinoan冰期之间的间冰期地层, 记录了分别位于间冰期地层底部、中部和顶部的三次碳同位素负异常事件(Swanson-Hysell等, 2010; Bold等, 2016). 埃迪卡拉纪碳同位素地层记录较完整, 显示出多次碳同位素负异常事件, 并得到了深入细致的研究. 从老到新, 埃迪卡拉纪显著的碳同位素负异常事件包括CANCE(CAp Negative Carbon isotope Excursion)、WANCE(Weng’An Negative Carbon isotope Excursion)、BAINCE(BAIguoyuan Negative Carbon isotope Excursion)、DOUNCE(DOUshantuo Negative Carbon isotope Excursion)/Shuram事件和BACE(BAsal Cambrian Carbon isotope Excursion)(Zhu等, 2007b, 2013; Xiao等, 2016; 周传明等, 2019; Yang等, 2021; Bowyer等, 2022); 此外, 埃迪卡拉纪末期还记录了一些规模较小的碳同位素负异常事件(Bowyer等, 2022). 关于这些碳同位素负异常事件的成因, 目前争议较大, 提出的机制包括成岩作用改造、自生碳酸盐和海洋溶解有机碳库氧化等(Rothman等, 2003; Derry, 2010; Schrag等, 2013; Shields等, 2019). 其中, 在海洋溶解有机碳库氧化模型中, 这些碳同位素负异常事件代表氧化剂的多期次输入和对应的海洋溶解有机碳库的阶段性氧化, 最终引起海洋溶解有机碳库的消亡(Shields等, 2019).

在青藏高原及其周边地区, 成冰纪地层的碳同位素数据稀少, 如Xiao等(2004)从塔里木板块库鲁克塔格地区的阿勒通沟组和特瑞艾肯组获得少量碳酸盐岩碳同位素数据. 埃迪卡拉纪碳同位素研究主要集中于扬子板块西南缘、印度板块北缘、阿曼和塔里木板块北缘等地区. 扬子板块西南缘的陡山沱组上部记录了显著的DOUNCE事件, 其最低值可低至−10‰; 上覆灯影组的碳同位素以正值为主, 底部记录了550Ma附近BANE事件的恢复阶段(Yang等, 2021; Bowyer等, 2022), 顶部记录了BACE事件的开始阶段(Zhu等, 2007a). 印度板块北缘的埃迪卡拉纪碳同位素研究主要集中于Krol构造带. 该地区成冰纪晚期Blaini组冰碛

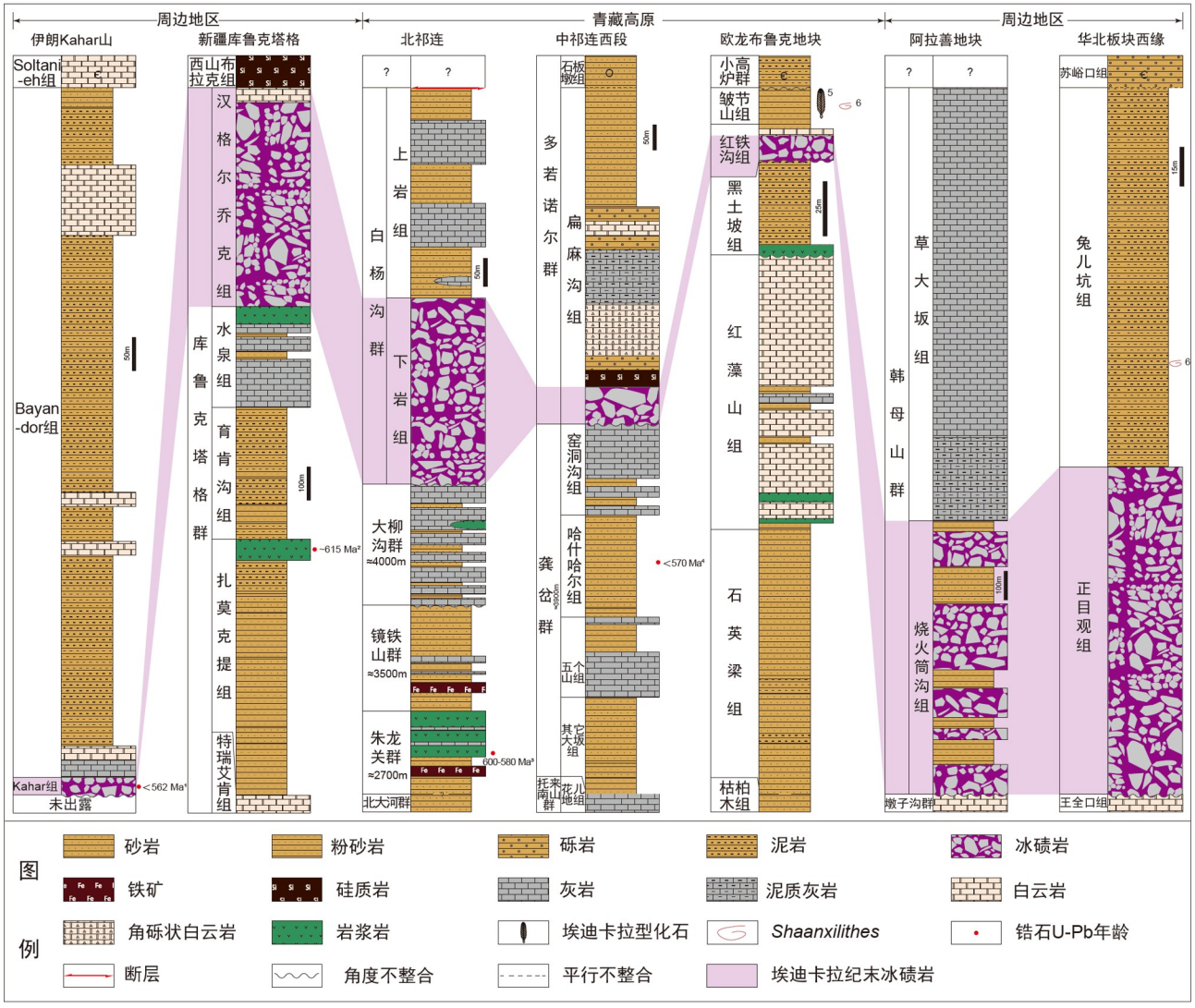

图 5　青藏高原及其周边埃迪卡拉纪冰碛岩发育地层对比图

伊朗地层柱状图修改自Etemad-Saeed等(2016), 新疆库鲁克塔格地层柱状图修改自Zhu和Wang(2011), 北祁连地层柱状图修改自甘肃省地质矿产局(1989), 中祁连西段地层柱状图修改自余以生(1994), 欧龙布鲁克地块地层柱状图修改自Sun等(2022), 阿拉善地块地层柱状图修改自余以生(1994), 华北板块西缘地层柱状图修改自Shen等(2007). 化石及年龄数据来源: 1, Etemad-Saeed等(2016); 2, He等(2014); 3, Xu等(2015); 4, 孙郎等(2022); 5, Pang等(2021); 6, Shen等(2007)

砾岩之上的“盖帽碳酸盐岩”记录了CANCE事件, Krol群下部缺失了碳酸盐岩沉积, 这段地层暂无碳同位素数据, 但其上的碳酸盐岩地层中可见多个碳同位素负异常事件(Kaufman等, 2006; Xiao等, 2022). 最近, 这段地层得到了碳同位素地层学和疑源类生物地层学的综合研究, 疑源类组合面貌表明这套地层中自下而上出现的第二个负异常可以对应到扬子板块陡山沱组顶部出现的DOUNCE/Shuram事件, 其下漂移幅度更大的负异常则可以对应于BAINCE, 而碳氧同位素数据表明, 这一负异常事件较大的漂移幅度可能是后期成岩作用改造导致的(Xiao等, 2022). 阿曼埃迪卡拉系底部的Hadash组“盖帽碳酸盐”岩记录了CANCE事件, 中部Shuram组记录了DOUNCE/Shuram事件(Le Guerroué等, 2006). 阿曼埃迪卡拉系顶部的Ara群记录了一个碳同位素负异常事件, 曾经被广泛认为是BACE事件(Amthor等, 2003; Bowring等, 2007), 最近研究认为该

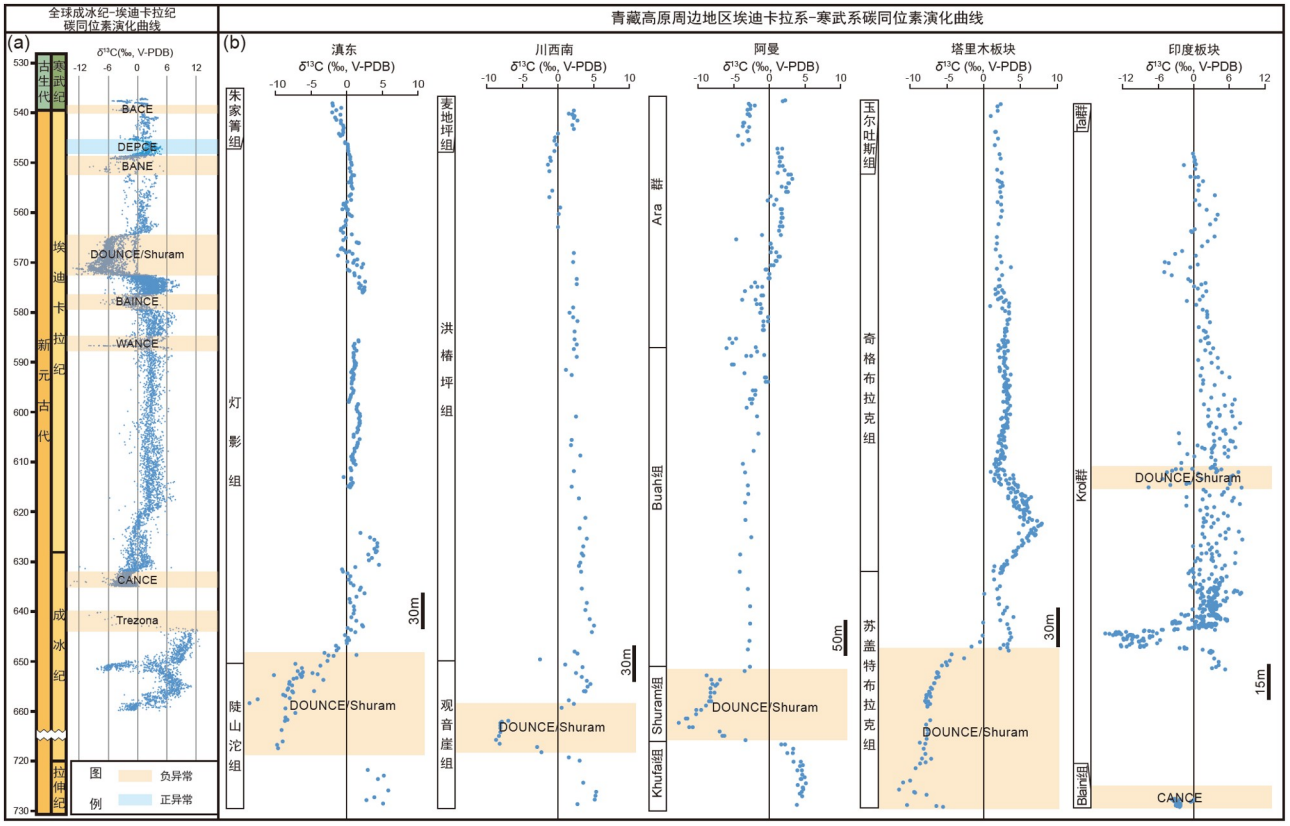

图 6　青藏高原周边埃迪卡拉纪–寒武纪碳同位素演化曲线及其与全球碳同位素演化曲线的对比

(a) 全球成冰纪-埃迪卡拉纪碳同位素演化曲线; 数据修改自Halverson等(2005)、Bold等(2016)、Yang等(2021)及Chen B等(2022). (b) 青藏高原周边埃迪卡拉纪-寒武纪早期碳同位素演化曲线; 滇东数据修改自Zhu等(2007a), 川西南数据修改自Wang等(2012), 阿曼数据修改Rooney等(2020a), 塔里木板块数据修改自Zhang等(2020, 2022)和Wang Y等(2022), 印度板块数据修改自Kaufman等(2006)、Etienne等(2011)和Xiao等(2022)

负异常事件早于BACE事件约3~4百万年(Bowyer等, 2022).

塔里木板块埃迪卡拉纪碳同位素研究数据主要来自于板块北缘的阿克苏和库鲁克塔格地区. 在阿克苏地区, 苏盖特布拉克组上段的下部记录了DOUNCE/Shuram事件(Wang Y等, 2022), 其上覆的奇格布拉克组下部记录了一个碳同位素正异常事件(Zhang等, 2020, 2022; Wang Y等, 2022), 可对比于华南灯影组下部的碳同位素正异常事件(Zhu等, 2007a); BACE事件记录于奇格布拉克组之上的玉尔吐斯组(Zhang等, 2020, 2022). 在库鲁克塔格地区, 扎莫克提组底部、水泉组和汉格尔乔克组顶部均记录了碳同位素负异常事件, 分别对应于CANCE、DOUNCE/Shuram事件和汉格尔乔克冰期"盖帽碳酸盐岩"的负异常事件(Xiao等, 2004; Zhu和Wang, 2011; Wang等, 2023).

5.4　新元古代大氧化事件

地球大气圈在前寒武纪经历了两次显著的增氧事件, 第一次是发生于2400~2100Ma的大氧化事件(Great Oxygenation Event, GOE), 第二次是发生于新元古代的氧化事件(Neoproterozoic Oxygenation Event, NOE) (Shields-Zhou和Och, 2011; Och和Shields-Zhou, 2012; Lenton等, 2014; Lyons等, 2014; Poulton等, 2021). GOE使得大气圈的氧气含量从低于10^{-5}PAL(Present Atmosphere Level, 现代大气水平)增加到10^{-4}~10^{-1}PAL, NOE期间大气圈的氧气含量最高可至~0.50PAL(Lyons等, 2014; Williams等, 2019; Krause等, 2022). 大气氧不仅是复杂多细胞动物新陈代谢的必要条件, 对动物来讲, 足够的氧气更是保证动物复杂构型、运动、取食和骨骼化等生命特征性活动的前提. 因此, NOE被认

为是动物起源和早期快速演化的关键因素(Och和Shields-Zhou, 2012; Lyons等, 2014). 截止目前, NOE得到了众多不同地球化学指标和地球化学数值模型的支持(Och和Shields-Zhou, 2012; Li等, 2018; Liu等, 2019; Williams等, 2019; Krause等, 2022), 但是当时海洋的氧化还原状态并未呈现线性增加的趋势, 而是表现出动态变化的特征, 这可能是控制该时期生物阶段性演化的原因(Zhu等, 2007b; Li等, 2018).

在青藏高原及其周边地区, 受限于适合开展氧化还原指标研究的地质样品, 成冰纪海洋氧化还原状态的研究主要聚焦于扬子板块间冰期地层大塘坡组, 少量研究样品来自于扬子板块Marinoan冰期地层南沱组. 铁组分、Mo含量和同位素数据表明, 大塘坡组沉积时期, 南华盆地底层海水总体呈缺氧状态, 并伴随着间歇性的短暂氧化事件(Feng等, 2010; Cheng等, 2018; Tan等, 2021). 南沱组中黑色页岩的C-N同位素和铁组分数据表明, 其沉积时底层海水总体为缺氧铁化状态, 表层开阔海水为有氧状态(Song等, 2023); 南沱组顶部黄铁矿结核的地球化学成分表明, 在Marinoan冰期结束时, 南华盆地海水发生短暂的缺氧硫化(Lang等, 2018).

埃迪卡拉纪的海洋氧化还原状态吸引了大量的关注, 研究结果为NOE提供了重要的证据. 在青藏高原及其周边地区, 这些研究主要集中于扬子板块, 还有少量研究来自于塔里木板块和阿曼地区. 埃迪卡拉纪地层的元素和同位素数据表明, 该时期深部海水整体处于缺氧铁化状态, 陆架边缘存在动态变化的硫化海水楔, 并发生多期次的深海氧化事件, 表层海水总体处于氧化状态(McFadden等, 2008; Li等, 2010; Sahoo等, 2016; 陈知和陈波, 2022). 其中, 围绕DOUNCE/Shuram事件开展的地球化学研究最为深入, 特别是基于扬子板块陡山沱组开展的研究. 最新的地球化学数据和数值模拟支持DOUNCE是一次海洋氧化事件(例如, Shi等, 2018; Shields等, 2019; Chen B等, 2022), 硫酸盐的输入和黄铁矿的埋藏过程共同提供了海洋溶解有机碳库氧化所需的氧化剂(Shields等, 2019). 由于海洋溶解有机碳库的缓冲作用, 这次海洋氧化事件不一定意味着大气氧的增加. 陡山沱组DOUNCE段地层的U和Tl同位素暗示当时氧化海底的占比已经接近现代水平(Zhang等, 2019; Fan等, 2020), 而阿曼和加拿大相当地层的铁组分和Tl同位素数据却暗示当时的海洋仍然以缺氧水体为主(Ostrander等, 2023). 总体而言, 尽管不同的地球化学指标和模型揭示出的埃迪卡拉纪海洋氧化程度在不同地区表现有差异, 但埃迪卡拉纪中、晚期海洋总体表现为氧化程度增加的趋势, 这也是埃迪卡拉纪中、晚期生物演化加速的关键因素.

6 青藏高原及周边成冰纪-埃迪卡拉纪古地理演化

成冰纪-埃迪卡拉纪期间, 青藏高原及其周边地区的古地理演化主要与罗迪尼亚超大陆的裂解和冈瓦纳大陆的聚合有关, 相关块体在这一跨越近2亿年的时间内发生快速的运动, 相互之间的古地理关系演变非常复杂(图7). 依据目前资料, 针对青藏高原及其周边各个地块在该时期的古地理演化研究工作还缺乏系统性, 得出的结论存在较大分歧. 鉴于其复杂性和资料限制, 本文仅对青藏高原及其周边地区主要块体在成冰纪至埃迪卡拉纪的古地理演化做一简要介绍, 详细论述请参考相关综述研究成果(例如, Cawood等, 2018; Zhao等, 2018; Dong等, 2022; Li等, 2023).

首先, 华北板块缺乏成冰纪-埃迪卡拉纪古地磁数据, 因此它在该时期的古地理演化主要依赖于华北板块在拉伸纪和寒武纪时期的古地理位置推测重建. 古地磁数据表明, 在新元古代早期, 华北板块与劳伦大陆的西北缘相邻, 受地幔柱活动影响, 二者在拉伸纪晚期发生分离(Ding等, 2021). 随后, 华北板块向西漂移, 在埃迪卡拉纪–寒武纪过渡时期处于劳伦大陆和澳大利亚之间的位置(Zhao等, 2021). 欧龙布鲁克地块在成冰纪-埃迪卡拉纪与华北板块南缘相邻(Wang C等, 2022), 因此二者具有相同的古地理演化历史. 阿拉善地块也曾被认为在新元古代是华北板块的一部分(Hu等, 2014), 但也有学者认为, 阿拉善地块与华北板块的碰撞拼贴发生于早古生代(Zhang等, 2016), 前者在新元古代可能与华夏地块在构造上存在一定的相关性(Dan等, 2014).

扬子板块和华夏地块在新元古代早期碰撞拼贴形成华南板块, 但是该拼贴过程发生的时间以及华南板块在罗迪尼亚超大陆中的古地理位置争议较大(李献华等, 2012), 影响了华南板块在成冰纪-埃迪卡拉纪的古地理重建. 一种观点认为, 华南板块处于罗迪尼亚超大陆的中心, 在拉伸纪-成冰纪过渡时期从劳伦大陆和

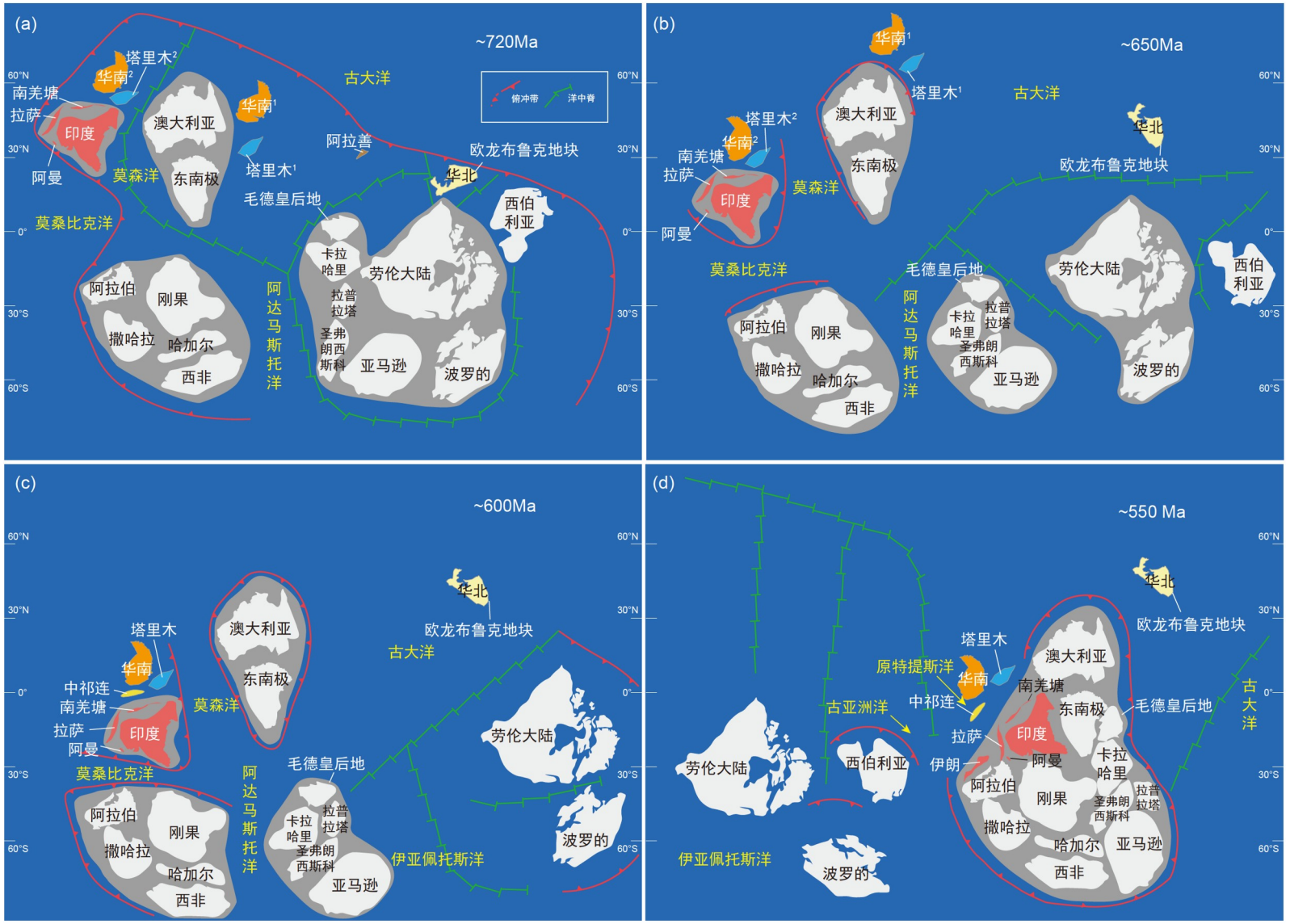

图 7　青藏高原及周边成冰纪-埃迪卡拉纪古地理演化

修改自Zhao等(2018)和Li等(2023). (a) ~720Ma各板块古地理分布(1: 华南板块位于超大陆中心观点; 2: 华南板块位于超大陆边缘观点); (b) ~650Ma各板块古地理分布(1和2含义同图7a); (c) ~600Ma各板块古地理分布; (d) ~550Ma各板块古地理分布

澳大利亚之间裂离出来, 在埃迪卡拉纪-寒武纪过渡时期到达印度板块的北缘, 成为冈瓦纳大陆的一部分(Li等, 2023; 图7a-1). 另一种观点认为, 华南板块处于罗迪尼亚超大陆的边缘, 与印度板块北缘相邻并一直持续到冈瓦纳大陆形成时期(Cawood等, 2018; 图7a-2). 最新的古地磁数据倾向于将华南板块置于罗迪尼亚超大陆的边缘(Park等, 2021; Chang等, 2022). 而在新元古代末期, 华南板块位于印度板块北缘得到了共识(Yang等, 2020). 塔里木板块具有与华南板块相似的新元古代地质记录和视极移曲线, 因此二者被认为在新元古代一直是相邻的, 具有相似的古地理演化历史(Lu等, 2008; Li等, 2023), 但也有观点认为, 塔里木板块和华南板块在罗迪尼亚超大陆裂解的过程中对向旋转, 在埃迪卡拉纪初分别位于劳伦大陆以北和澳大利亚东北的位置(Wen等, 2017).

相对而言, 印度板块在罗迪尼亚超大陆和冈瓦纳大陆中的位置争议较小. 在IGCP 440项目支持下的罗迪尼亚超大陆重建方案中(Li等, 2008), 印度板块被置于与其在冈瓦纳大陆中相似的位置, 即与澳大利亚-东南极相邻; 在最新的罗迪尼亚超大陆重建方案中, 考虑到印度板块760Ma马拉尼古地磁数据, Li等(2023)将印度板块置于与澳大利亚西北部相邻的位置. 印度板块在拉伸纪-成冰纪过渡时期从罗迪尼亚超大陆裂离出来, 在埃迪卡拉纪-寒武纪过渡时期通过Kuunga-Pinjarra造山带与澳大利亚-东南极碰撞拼贴形成东冈瓦纳大陆的主要组成部分(Cawood等, 2007; Li等, 2023).

目前, 围绕前文所述的各个小地块在新元古代古地理演化开展的研究工作仍然不足. 中祁连地块缺失了成冰纪地层(孙郎等, 2022), 碎屑锆石年龄谱特征则表明其在埃迪卡拉纪时可能位于靠近印度板块的位置(Li等, 2019). 南羌塘地块达布热组沉积于约550Ma, 其碎屑锆石年龄谱显示其此时可能位于印度板块北缘的位置(Wang M等, 2015). Hu等(2018)和Zhang X等(2023)通过对拉萨地块新元古代岩浆作用和变质事件的研究, 认为拉萨地块在成冰纪-埃迪卡拉纪处于印度板块和阿拉伯-努比亚地盾之间, 岩浆变质作用受到东非造山带的影响. Zhu等(2011)通过对拉萨地块古生代地层碎屑锆石的物源研究, 认为拉萨地块在古生代位于澳大利亚的西北缘. 因此, 在新元古代–古生代过渡时期, 拉萨地块可能从印度板块的西侧, 经由侧向逃逸和沿冈瓦纳大陆北缘的右旋走滑作用, 移动到澳大利亚的西侧(Zhang X等, 2023). 阿曼成冰纪冰碛杂砾岩的砾石表明当时的大陆地壳可能是与火山弧相关的新生地壳(Allen, 2007), 结合印度板块在拉伸纪的大陆边缘岩浆活动特征, 阿曼地区当时可能位于印度板块的大陆边缘(de Wall等, 2022). 这种推断也得到了碎屑锆石年龄谱的支持, 阿曼新元古界碎屑锆石的年龄谱特征具有明显的东冈瓦纳大陆特征, 在寒武纪之前也未发生明显变化(Gomez-Perez等, 2019), 因此阿曼在寒武纪之前可能一直位于印度板块的大陆边缘. 而中伊朗地块虽然缺失了成冰纪地层, 但目前仅有的埃迪卡拉系碎屑锆石年龄谱特征表明其在埃迪卡拉纪晚期时可能位于阿拉伯板块外围(Etemad-Saeed等, 2015), 这种认识目前也基本得到了认可(例如, Zhao等, 2018; Li等, 2023)(图7). 总体而言, 上述青藏高原及其周边的小地块在成冰纪-埃迪卡拉纪沿着印度的北侧和澳大利亚的西北侧分布, 处于裂解的罗迪尼亚超大陆和正在聚合的冈瓦纳大陆的外缘(Zhao等, 2018). 但是, 上述观点也仅为较为少量研究的成果, 这些小地块在成冰纪-埃迪卡拉纪确切的相对古地理位置和详细的构造演化历史, 仍然存在不同的认识, 需要今后采用不同研究手段加以验证.

7 结论

(1) 青藏高原周边普遍发育成冰系和埃迪卡拉系, 其中扬子板块、印度板块和阿曼等地记录最为完整. 而青藏高原核心区及其东北缘、伊朗、阿拉善地块和华北板块普遍缺失成冰系, 仅发育埃迪卡拉系. 青藏高原及其周边地区成冰纪-埃迪卡拉纪生物化石记录在不同地区差异明显, 其中扬子板块的化石记录保存最好、化石类型最为丰富. 繁盛于埃迪卡拉纪早中期的大型具刺疑源类化石仅在扬子板块和印度板块具有良好的记录; 典型的埃迪卡拉化石群主要分布在扬子板块、欧龙布鲁克地块和伊朗中南部, 且各地区的化石保存和面貌差异明显; 埃迪卡拉纪晚期典型化石*Cloudina*和*Shaanxilithes*在各主要块体均有所发现.

(2) 成冰纪-埃迪卡拉纪的冰期记录普遍发育于青藏高原及其周边地区, 其中成冰纪的冰期记录主要见于扬子板块、塔里木板块、印度板块和阿曼等地区; 埃迪卡拉纪冰期记录则广泛见于青藏高原东北缘、阿拉善地块、华北板块、塔里木板块和伊朗等地区, 但

主要为埃迪卡拉纪晚期的冰期沉积而非Gaskiers冰期. 青藏高原及其周边地区的埃迪卡拉纪碳同位素化学地层研究主要集中于扬子板块、塔里木板块、印度板块和阿曼等地区, 且都记录了埃迪卡拉纪中期全球性的DOUNCE/Shuram事件.

(3) 总体而言, 在成冰纪至埃迪卡拉纪时期, 青藏高原及其周边地区大多数块体位于东冈瓦纳大陆的北缘, 少数块体(比如华北板块)位于冈瓦纳大陆和劳伦大陆之间. 诸如华北板块和印度板块等少数板块的古地理演化历史较为清晰, 而华南板块、中祁连地块、欧龙布鲁克地块、南羌塘地块、拉萨地块、中伊朗地块及其周边微地块的古地理演化仍不明朗, 争议较大, 亟需开展进一步研究工作.

致谢　感谢两位评审专家的审阅, 并提出宝贵修改意见.

参考文献

Ahmed S, 潘兵, Khan M M S S, 李国祥, Qasim M, 朱茂炎. 2023. 巴基斯坦北部小喜马拉雅区Abbottabad组Sirban段小壳化石的首次发现及其地层学意义. 地层学杂志, 47: 339–352

蔡雄飞, 杨捷, 何文键, 曾佐勋. 2013. 贺兰山震旦系研究的新进展——对正目观组、兔儿坑组的再认识. 地层学杂志, 37: 377–386

曹仁关, 武希彻, 戈宏儒, 骆万成, 梁其中. 1980. 云南晋宁王家湾震旦系. 见: 中国地质科学院天津地质矿产研究所, 主编. 中国震旦亚界. 天津: 天津科学技术出版社. 115–132

陈基娘, 王云山. 1985. 青海下元古界变质作用特征. 见: 地质矿产部青藏高原地质文集编委会, 主编. 青藏高原地质文集17. 北京: 地质出版社. 19–46

陈知, 陈波. 2022. 三峡地区埃迪卡拉纪的浅海氧化还原环境变化: 来自碳酸盐岩Ce异常的证据. 地层学杂志, 46: 109–117

崔晓庄, 江新胜, 王剑, 卓皆文, 熊国庆, 陆俊泽, 邓奇, 伍皓, 刘建辉. 2013. 滇中新元古代澄江组层型剖面锆石U-Pb年代学及其地质意义. 现代地质, 27: 547–556

房瑞森, 梁悦, 华洪, 张志飞. 2021. 埃迪卡拉纪晚期疑难化石*Shaanxilithes*在云南会泽朱家箐剖面的首现及其意义. 古生物学报, 60: 25–41

甘肃省地质矿产局. 1989. 甘肃省区域地质志. 北京: 地质出版社

甘肃省地质矿产局. 1997. 甘肃省岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社

高林志, 王宗起, 许志琴, 杨经绥, 张维. 2010. 塔里木盆地库鲁克塔格地区新元古代冰碛岩锆石SHRIMP U-Pb年龄新证据. 地质通报, 29(增刊): 205–213

高振家, 彭昌文, 李永安, 钱建新, 朱诚顺. 1980. 新疆库鲁克塔格震旦系和冰川沉积. 见: 中国地质科学院天津地质矿产研究所, 主编. 中国震旦亚界. 天津: 天津科学技术出版社. 186–213

高振家, 彭昌文, 李永安, 朱诚顺, 章森桂. 1984. 新疆库鲁克塔格震旦系、寒武纪地层划分和对比. 见: 高振家, 朱诚顺等, 主编. 新疆前寒武纪地质. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社. 1–106

高振家, 王务严, 彭昌文, 李永安, 肖兵. 1986. 新疆阿克苏-乌什地区震旦系. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社

顾其昌. 1982. 贺兰山的晚前寒武纪冰碛层. 地层学杂志, (2): 156–157

国家地质总局西安地质矿产研究所前寒武纪组. 1979. 甘肃龙首山区前寒武系. 西北地质, (1): 1–12

何金有, 徐备, 孟祥英, 寇晓威, 刘兵, 王宇, 米合. 2007. 新疆库鲁克塔格地区新元古代层序地层学研究及对比. 岩石学报, 23: 1645–1654

何景文, 朱文斌, 郑碧海, 吴海林, 葛荣峰, 罗楚. 2015. 塔里木西北缘阿克苏地区震旦系苏盖特布拉克组沉积物源分析: 碎屑锆石年代学证据. 地质学报, 89: 149–162

何世平, 李荣社, 王超, 刘良, 时超. 2014. 青藏高原及邻区前寒武纪地质. 武汉: 中国地质大学出版社

何世平, 李荣社, 王超, 张宏飞计文化, 于浦生, 辜平阳, 时超. 2013. 青藏高原拉萨地块发现古元古代地体. 地球科学——中国地质大学学报, 38: 519–528

何世平, 李荣社, 于浦生, 王超. 2010. 青藏高原及邻区前寒武纪地质图(1:1500000)说明书. 北京: 地质出版社

江新胜, 王剑, 崔晓庄, 卓皆文, 熊国庆, 陆俊泽, 刘建辉. 2012. 滇中新元古代澄江组锆石SHRIMP U-Pb年代学研究及其地质意义. 中国科学: 地球科学, 42: 1496–1507

江卓斐, 崔晓庄, 卓皆文, 王剑, 熊国庆, 陆俊泽, 伍皓, 蔡娟娟. 2017. 川西列古六组底部凝灰质杂砾岩锆石U-Pb年龄及其意义. 矿物岩石, 31: 57–65

焦淑沛, 陈国恩. 1983. 青藏高原前寒武系的划分与对比. 见: 地质矿产部青藏高原地质文集编委会, 主编. 青藏高原地质文集2 地层·古生物. 北京: 地质出版社. 39–55

李怀坤, 陆松年, 赵风清, 李惠民, 于海峰, 郑健康. 1999. 柴达木北缘新元古代重大地质事件年代格架. 现代地质, (2): 224–225

李荣社, 杨永成, 孟勇. 2004. 青藏高原1:25万区域地质调查主要成果和进展综述(北区). 地质通报, (增刊): 421–426

李王鹏, 李慧莉, 王毅, 刘少峰, 张仲培, 杨伟利, 蔡习尧, 钱涛, 李晓剑. 2021. 塔里木盆地西南缘叶城地区新元古代冰期事件. 地学前缘, 29: 356–380

李献华, 李武显, 何斌. 2012. 华南陆块的形成与Rodinia超大陆聚合-裂解——观察、解释与检验. 矿物岩石地球化学通报, 31: 543–559

刘鸿允, 刘钰. 1963. 云南中东部震旦纪地层的组成、划分与发育. 地质学报, (1): 53–78

刘鹏举, 尹崇玉, 陈寿铭, 李猛, 高林志, 唐烽. 2012. 华南峡东地区埃迪卡拉(震旦)纪年代地层划分初探. 地质学报, 86: 849–866

刘鹏举, 尹崇玉, 唐烽. 2016. 华南埃迪卡拉纪(震旦纪)生物地层学研究进展. 见: 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. 89–103

陆松年, 于海峰, 赵风清, 金巍, 李怀坤, 李铨, 杨春亮, 李惠民, 郑健康, 张梅生, 蒋明媚, 葛肖虹, 修群业, 张文治, 郭进京, 刘永江. 2002. 青藏高原北部前寒武纪地质初探. 北京: 地质出版社

马世鹏, 汪玉珍, 方锡廉. 1989. 西昆仑山北坡的震旦系. 新疆地质, (4): 68–79

茅燕石, 卫管一, 张伯南, 孙似洪, 石绍清. 1985. 西藏喜马拉雅前寒武系基底岩系的变质作用特征. 见: 地质矿产部青藏高原地质文集编委会, 主编. 1985. 青藏高原地质文集17. 北京: 地质出版社. 47–60

穆恩之, 文世宣, 王义刚, 章炳高, 尹集祥. 1973. 中国西藏南部珠穆朗玛峯地区的地层. 中国科学, 1: 59–71

庞科, 唐卿, 万斌, 李光金, 陈雷, 袁训来, 周传明. 2021. 华北地台胶辽徐淮地区中-新元古代地层研究进展. 地层学杂志, 45: 467–492

钱家骐. 1986. 地层划分. 甘肃地质, (4-6): 4–39

钱建新, 肖兵. 1984. 新疆阿克苏-乌什地区早寒武世小壳动物群. 地层古生物论文集, (2): 65–90

钱逸, 尹恭正, 肖兵. 2000. 新疆下寒武统玉尔吐斯组软舌螺口盖和口盖状化石. 微体古生物学报, (4): 404–415

青海省地质矿产局. 1997. 青海省岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社

孙郎, 杨传, 孙智新, 孙玮辰, 苗兰云, 潘兵, 陈波, 殷宗军, 赵方臣, 李国祥, 朱茂炎. 2022. 中祁连西段前寒武纪地层时代新认识: 肃北地区石板墩铁矿的碎屑锆石U-Pb年代学. 地层学杂志, 46: 215–229

涂光炽. 1963. 祁连山构造-岩相带. 见: 中国科学院地质研究所, 中国科学院地质古生物研究所, 中国科学院兰州地质研究室, 北京地质学院, 主编. 1960. 祁连山地质志(第二卷第一分册). 北京: 科学出版社. 29–39

王超, 李猛, 李荣社, 彭岩, 张吉衡, 张海军, 王健. 2015. 青海柴达木盆地北缘全吉群内部存在区域性不整合. 地质通报, 34: 364–373

王明, 曾孝文, 李才, 李航, 解超明, 范建军. 2018. 藏北羌塘南部埃迪卡拉系达布热组的建立及其地质意义. 地质通报, 37: 1379–1386

王曰伦. 1955. 中国震旦纪冰碛层及其对地层划分的意义. 地质学报, (4): 327–360

王云山, 庄庆兴, 史从彦, 刘继芳, 郑亮峙. 1980. 柴达木盆地北缘的全吉群. 见: 中国地质科学院天津地质矿产研究所, 主编. 中国震旦亚界. 天津: 天津科学技术出版社. 214–230

王云山, 庄庆兴, 史从彦. 1983. 青海前寒武系地质特征. 见: 地质矿产部青藏高原地质文集编委会, 主编. 青藏高原地质文集2 地层·古生物. 北京: 地质出版社. 56–69

王云山. 1977. 青海全吉山红铁沟冰碛层的确定. 西北地质, (4): 36–39

卫管一, 孙似洪. 1986. 西藏聂拉木地区前寒武纪变质岩系的岩石化学. 见: 地质矿产部青藏高原地质文集编委会, 主编. 青藏高原地质文集9. 北京: 地质出版社. 151–164

吴晨, 陈宣华, 丁林. 2023. 祁连造山带构造演化与新生代变形历史. 地学前缘, 30: 262–281

吴福元, 万博, 赵亮, 肖文交, 朱日祥. 2020. 特提斯地球动力学. 岩石学报, 36: 1627–1674

西藏自治区地质矿产局. 1993. 西藏自治区区域地质志. 北京: 地质出版社

西藏自治区地质矿产局. 1997. 西藏自治区岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社

西南地质科学研究所. 1978. 西南地区古生物图册四川分册1震旦纪-泥盆纪. 北京: 地质出版社

夏明哲, 夏昭德, 卢荣辉, 姜常义. 2011. 龙首山地块的归属问题: 来自地壳结构和中—新元古代地层的证据. 地球科学与环境学报, 33: 132–136

肖兵, 段承华. 1992. 新疆早寒武世玉尔吐斯小壳动物群再研究. 新疆地质, (3): 212–232

肖兵. 1989. 化石*Anabarites*的发现及再论玉尔吐斯组的时代归属. 新疆地质, (4): 35–39

谢从瑞, 校培喜, 杨忠智, 曹宣铎, 胡云绪. 2013. 甘肃龙首山地区韩母山群研究的新进展. 地层学杂志, 37: 54–57

谢家荣. 1941. 云南矿产概论. 地质论评, (增刊): 1–42

许安东, 姜修道. 2003. 华北地台西缘中元古界蓟县系墩子沟群特征及其地质意义. 长安大学学报——地球科学版, 25: 27–30

易子渊, 魏国齐, 郭召杰. 2023. 塔里木克拉通经历过格林威尔造山运动吗? 来自碎屑锆石年代学的证据. 地球科学, 4: 1405–1420

殷继成. 1980. 四川西部甘洛-峨眉地区震旦系及其界线. 见: 中国地质科学院天津地质矿产研究所. 中国震旦亚界. 天津: 天津科学技术出版社. 133–146

余以生. 1994. 甘肃的震旦系. 甘肃地质学报, (增刊): 54–89

云南省地质矿产局. 1997. 云南省岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社

张海军, 王训练, 王勋, 周洪瑞. 2016. 柴达木盆地北缘全吉群红藻山组凝灰岩锆石U-Pb年龄及其地质意义. 地学前缘, 23: 202–218

张璐, 巴金, 陈能松, 王勤燕, 廖梵汐, 李晓彦. 2012. 全吉群碎屑锆石的U-Pb年龄谱和微量元素: 基底热事件信息和早期演化启示. 地球科学, 37(增刊): 28–42

张文堂, 朱兆玲, 袁克兴, 林焕令, 钱逸, 伍鸿基, 袁金良. 1979. 华北南部、西南部寒武系及上前寒武系的分界. 地层学杂志, (1): 51–56

张予杰, 张以春, 王冬兵, 苟正彬. 2021. 青藏高原中南部前寒武系及古生界岩石地层组成和时代特征. 地质通报, 41: 1814–1835

张志亮, 华洪, 张志飞. 2015. 埃迪卡拉纪疑难化石*Shaanxilithes*在云南王家湾剖面的发现及地层意义. 古生物学报, 54: 12–28

赵佳港, 李树峰, Alexander F, Paul J V, Tammo R, 陈琳琳, 周浙昆, 苏涛. 2022. 古近纪至新近纪青藏高原的气候演变及其驱动因素.

中国科学: 地球科学, 52: 1562–1576
赵祥生, 张录易, 邹湘华, 王树洗, 胡云绪. 1980. 西北地区震旦纪冰碛层及其地质意义. 见: 中国地质科学院天津地质矿产研究所. 中国震旦亚界. 天津: 天津科学技术出版社. 164–185
中国科学院南京地质古生物研究所. 1974. 西南地区地层古生物手册. 北京: 科学出版社
中国科学院祁连山地质队. 1963. 祁连山地层. 见: 中国科学院地质研究所, 中国科学院地质古生物研究所, 中国科学院兰州地质研究室, 北京地质学院. 1960. 祁连山地质志(第二卷第一分册). 北京: 科学出版社. 40–169
周传明, 欧阳晴, 王伟, 万斌, 关成国, 陈哲, 袁训来. 2021. 中国埃迪卡拉纪岩石地层划分和对比. 地层学杂志, 45: 211–222
周传明, 袁训来, 肖书海, 陈哲, 华洪. 2019. 中国埃迪卡拉纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49: 7–25
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-储-盖层发育与沉积环境. 见: 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
朱茂炎, 赵方臣, 殷宗军, 曾晗, 李国祥. 2019. 中国的寒武纪大爆发研究: 进展与展望. 中国科学: 地球科学, 49: 1455–1490
朱茂炎. 2016. 全球新元古代沉积地层研究现状. 见: 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. 3–24
卓皆文, 江新胜, 王剑, 崔晓庄, 伍皓, 熊国庆, 陆俊泽, 江卓斐. 2015. 川西新元古界开建桥组底部沉凝灰岩锆石SHRIMP U-Pb年龄及其地质意义. 矿物岩石, 35: 91–99
邹光富, 朱同兴, 贾保江, 周铭魁. 2006. 西藏南部聂拉木地区前寒武纪结晶基底的组成及其特征. 沉积与特提斯地质, 26: 14–21
Aftabi A, Atapour H, Mohseni S. 2022. The Ediacaran record of glaciogenic dropstones, diamictites and cap carbonates associated with non-metamorphosed banded iron formations (BIFs) in Iran. Precambrian Res, 378: 106740
Allen P A, Leather J, Brasier M D, Rieu R, McCarron M, Guerroué E l, Etienne J L, Cozzi A. 2011a. Chapter 20 The Abu Mahara Group (Ghubrah and Fiq formations), Jabal Akhdar, Oman. Memoirs, 36: 251–262
Allen P A, Leather J, Brasier M D. 2004. The Neoproterozoic Fiq glaciation and its aftermath, Huqf supergroup of Oman. Basin Res, 16: 507–534
Allen P A, Rieu R, Etienne J L, Matter A, Cozzi A. 2011b. Chapter 19 —The Ayn Formation of the Mirbat Group, Dhofar, Oman. Memoirs, 36: 239–249
Allen P A. 2007. The Huqf Supergroup of Oman: Basin development and context for Neoproterozoic glaciation. Earth-Sci Rev, 84: 139–185
Amthor J E, Grotzinger J P, Schröder S, Bowring S A, Ramezani J, Martin M W, Matter A. 2003. Extinction of *Cloudina* and *Namacalathus* at the Precambrian-Cambrian boundary in Oman. Geology, 31: 431–434
Amthor J E, Ramseyer K, Faulkner T, Lucas P. 2005. Stratigraphy and sedimentology of a chert reservoir at the Precambrian-Cambrian Boundary: The Al Shomou Silicilyte, South Oman Salt Basin. GeoArabia, 10: 89–122
Ansari A H, Pandey S K, Sharma M, Agrawal S, Kumar Y. 2018. Carbon and oxygen isotope stratigraphy of the Ediacaran Bilara Group, Marwar Supergroup, India: Evidence for high amplitude carbon isotopic negative excursions. Precambrian Res, 308: 75–91
Auden. 1934. The geology of the Krol belt. Geol India Surv Record, 67: 357–454
Bao X, Zhang S, Jiang G, Wu H, Li H, Wang X, An Z, Yang T. 2018. Cyclostratigraphic constraints on the duration of the Datangpo Formation and the onset age of the Nantuo (Marinoan) glaciation in South China. Earth Planet Sci Lett, 483: 52–63
Bold U, Smith E F, Rooney A D, Bowring S A, Buchwaldt R, Dudas F, Ramezani J, Crowley J L, Schrag D P, Macdonald F A. 2016. Neoproterozoic stratigraphy of the Zavkhan terrane of Mongolia: The backbone for Cryogenian and early Ediacaran chemostratigraphic records. Am J Sci, 316: 1–63
Bowring S A, Grotzinger J P, Condon D J, Ramezani J, Newall M J, Allen P A. 2007. Geochronologic constraints on the chronostratigraphic framework of the Neoproterozoic Huqf Supergroup, Sultanate of Oman. Am J Sci, 307: 1097–1145
Bowyer F T, Zhuravlev A Y, Wood R A, Shields G A, Zhou Y, Curtis A, Poulton S W, Condon D J, Yang C, Zhu M. 2022. Calibrating the temporal and spatial dynamics of the Ediacaran-Cambrian radiation of animals. Earth-Sci Rev, 225: 103913
Brasier M, McCarron G, Tucker R, Leather J, Allen P, Shields G. 2000. New U-Pb zircon dates for the Neoproterozoic Ghubrah glaciation and for the top of the Huqf Supergroup, Oman. Geology, 28: 175–178
Brocks J J, Jarrett A J M, Sirantoine E, Hallmann C, Hoshino Y, Liyanage T. 2017. The rise of algae in Cryogenian oceans and the emergence of animals. Nature, 548: 578–581
Cai Y, Hua H, Xiao S, Schiffbauer J D, Li P. 2010. Biostratinomy of the Late Ediacaran pyritized Gaojiashan lagerstätte from Southern Shaanxi, South China: Importance of event deposits. Palaios, 25: 487–506
Cai Y, Xiao S, Hua H, Yuan X. 2015. New material of the biomineralizing tubular fossil Sinotubulites from the late Ediacaran Dengying Formation, South China. Precambrian Res, 261: 12–24
Cai Y, Xiao S, Li G, Hua H. 2019. Diverse biomineralizing animals in the terminal Ediacaran Period herald the Cambrian explosion.

Geology, 47: 380–384

Cawood P A, Johnson M R W, Nemchin A A. 2007. Early Palaeozoic orogenesis along the Indian margin of Gondwana: Tectonic response to Gondwana assembly. Earth Planet Sci Lett, 255: 70–84

Cawood P A, Martin E L, Murphy J B, Pisarevsky S A. 2021. Gondwana's interlinked peripheral orogens. Earth Planet Sci Lett, 568: 117057

Cawood P A, Zhao G, Yao J, Wang W, Xu Y, Wang Y. 2018. Reconstructing South China in Phanerozoic and Precambrian supercontinents. Earth-Sci Rev, 186: 173–194

Chang L, Zhang S, Li H, Xian H, Wu H, Yang T. 2022. New Paleomagnetic insights into the Neoproterozoic connection between South China and India and their position in Rodinia. Geophys Res Lett, 49: e2022GL098348

Chen B, Hu C, Mills B J W, He T, Andersen M B, Chen X, Liu P, Lu M, Newton R J, Poulton S W, Shields G A, Zhu M. 2022. A short-lived oxidation event during the early Ediacaran and delayed oxygenation of the Proterozoic ocean. Earth Planet Sci Lett, 577: 117274

Chen W, Cai Y, Liang D, Wang X. 2022. Two tubular fossil assemblages from the terminal Ediacaran Dengying Formation in southern Shaanxi Province of South China. Precambrian Res, 378: 106762

Cheng M, Li C, Chen X, Zhou L, Algeo T J., Ling H F, Feng L J, Jin C S. 2018. Delayed Neoproterozoic oceanic oxygenation: Evidence from Mo isotopes of the Cryogenian Datangpo Formation. Precambrian Res, 319: 187–197

Cloud P, Glaessner M F. 1982. The Ediacarian Period and System: Metazoa inherit the Earth. Science, 217: 783–792

Colleps C L, McKenzie N R, Stockli D F, Hughes N C, Singh B P, Webb A A G, Myrow P M, Planavsky N J, Horton B K. 2018. Zircon (U-Th)/He thermochronometric constraints on Himalayan thrust belt exhumation, bedrock weathering, and Cenozoic seawater chemistry. Geochem Geophys Geosyst, 19: 257–271

Condon D J, Zhu M, Bowring S., Wang W, Yang A, Jin Y. 2005. U-Pb ages from the Neoproterozoic Doushantuo Formation, China. Science, 308: 95–98

Cox G M, Isakson V, Hoffman P F, Gernon T M, Schmitz M D, Shahin S, Collins A S, Preiss W, Blades M L, Mitchell R N, Nordsvan A. 2018. South Australian U-Pb zircon (CA-ID-TIMS) age supports globally synchronous Sturtian deglaciation. Precambrian Res, 315: 257–263

Dan W, Li X H, Wang Q, Wang X C, Liu Y. 2014. Neoproterozoic S-type granites in the Alxa Block, westernmost North China and tectonic implications: *In situ* zircon U-Pb-Hf-O isotopic and geochemical constraints. Am J Sci, 314: 110–153

Dedual E. 1967. Zur geologie des mittleren und unteren Karaj-Tales, zentral-Elburz (Iran). Mitt Geol Inst E T H Univ Zurich, 79: 45–75

Derry L A. 2010. A burial diagenesis origin for the Ediacaran Shuram-Wonoka carbon isotope anomaly. Earth Planet Sci Lett, 294: 152–162

Devaere L, Korn D, Ghaderi A, Struck U, Bavandpur A K. 2021. New and revised small shelly fossil record from the lower Cambrian of northern Iran. Pap Palaeontol, 7: 2141–2181

Ding J, Zhang S, Evans D A D, Yang T, Li H, Wu H, Chen J. 2021. North China craton: The conjugate margin for northwestern Laurentia in Rodinia. Geology, 49: 773–778

Ding L, Kapp P, Cai F, Garzione C, Xiong Z, Wang H, Wang C. 2022. Timing and mechanisms of Tibetan Plateau uplift. Nat Revi Earth Environ, 3: 652–667

Dong Y, Sun S, Santosh M, Hui B, Sun J, Zhang F, Cheng B, Yang Z, Shi X, He D, Yang L, Cheng C, Liu X, Zhou X, Wang W, Qi N. 2022. Cross Orogenic Belts in Central China: Implications for the tectonic and paleogeographic evolution of the East Asian continental collage. Gondwana Res, 109: 18–88

Draganits E, Schlaf J, Grasemann B, Argles T. 2008. Giant submarine landslide grooves in the Neoproterozoic/Lower Cambrian Phe Formation, northwest Himalaya: Mechanisms of formation and palaeogeographic implications. Sediment Geol, 205: 126–141

Dunn F S, Liu A G. 2019. Viewing the Ediacaran biota as a failed experiment is unhelpful. Nat Ecol Evol, 3: 512–514

Etemad-Saeed N, Hosseini-Barzi M, Adabi M H, Miller N R, Sadeghi A, Houshmandzadeh A, Stockli D F. 2016. Evidence for ca. 560 Ma Ediacaran glaciation in the Kahar Formation, central Alborz Mountains, northern Iran. Gondwana Res, 31: 164–183

Etemad-Saeed N, Hosseini-Barzi M, Adabi M H, Sadeghi A, Houshmandzadeh A. 2015. Provenance of Neoproterozoic sedimentary basement of northern Iran, Kahar Formation. J African Earth Sci, 111: 54–75

Etienne J L, Allen P A, Guerroué E, Heaman L, Ghosh S K, Islam R. 2011. Chapter 31—The Blaini Formation of the Lesser Himalaya, NW India. Memoirs, 36: 347–355

Fan H, Nielsen S G, Owens J D, Auro M, Shu Y, Hardisty D S, Horner T J, Bowman C N, Young S A, Wen H. 2020. Constraining oceanic oxygenation during the Shuram excursion in South China using thallium isotopes. Geobiology, 18: 348–365

Fanning C M, Link P K. 2008. Age constraints for the Sturtian Glaciation data from the Adelaide Geosyncline, South Australia and Pocatello Formation, Idaho, USA. In: Selwyn Symposium 2008 GSA Victoria Division. 91: 57–62

Feng L J, Chu X L, Huang J, Zhang Q R, Chang H J. 2010. Reconstruction of paleo-redox conditions and early sulfur cycling

during deposition of the Cryogenian Datangpo Formation in South China. Gondwana Res, 18: 632–637

Frank W, Grasemann B, Guntli P, Miller C. 1995. Geological map of the Kishtwar, Chamba, and Kulu region, NW Himalaya, India. Jahrbuch der Geologischen Bundesanstakt, 138: 299–308

Frimmel H E, Klötzli U S, Siegfried P R. 1996. New Pb-Pb single zircon age constraints on the timing of Neoproterozoic glaciation and continental break-up in Namibia. J Geol, 104: 459–469

Gee E R, Gee D G. 1989. Overview of the geology and structure of the Salt Range, with observations on related areas of northern Pakistan. In: Malinconico L L, Lillie R J, eds. Tectonics of the Western Himalayas. Boulder: Geological Society of America

Gehrels G E, Yin A, Wang X F. 2003a. Magmatic history of the northeastern Tibetan Plateau. J Geophys Res, 108: 2002JB001876

Gehrels G E, Yin A, Wang X F. 2003b. Detrital-zircon geochronology of the northeastern Tibetan Plateau. Geol Soc Amer Bull, 115: 991–896

George B G, Kumar S, Ray J S. 2021. C-Sr isotope stratigraphy of carbonate formations of the late Neoproterozoic—Cambrian Marwar Supergroup, western India. Precambrian Res, 364: 106378

Ghorbani M. 2013. The Economic Geology of Iran. Dordrecht: Springer

Gomez-Perez I, Moss J, Morton A. 2019. Early tectonic evolution of Oman: Insights from clastic provenance data and implications for the structural evolution of Arabia. Muscat: AAPG Middle East Region Geoscience Technology Worshop

Gong Z. 2021. Cyclostratigraphy of the Cryogenian Fiq Formation, Oman and its implications for the age of the Marinoan glaciation. Glob Planet Change, 204: 103584

Gorin G E, Racz L G, Walter M R. 1982. Late Precambrian-Cambrian sediments of Huqf Group, Sultanate of Oman. AAPG Bull, 66: 2609–2627

Grotzinger J P, Fike D A, Fischer W W. 2011. Enigmatic origin of the largest-known carbon isotope excursion in Earth's history. Nat Geosci, 4: 285–292

Halverson G P, Hoffman P F, Schrag D P, Maloof A C, Rice A H N. 2005. Toward a Neoproterozoic composite carbon-isotope record. GSA Bull, 117: 1181–1207

He J, Zhu W, Ge R. 2014. New age constraints on Neoproterozoic diamicites in Kuruktag, NW China and Precambrian crustal evolution of the Tarim Craton. Precambrian Res, 241: 44–60

He T, Zhou Y, Vermeesch P, Rittner M, Miao L, Zhu M, Carter A, Pogge von Strandmann P A E, Shields G A. 2017. Measuring the 'Great Unconformity' on the North China Craton using new detrital zircon age data. Geol Soc Lond Spec Publ, 448: 145–159

Heaman L M, LeCheminant A N, Rainbird R H. 1992. Nature and timing of Franklin igneous events, Canada: Implications for a Late Proterozoic mantle plume and the break-up of Laurentia. Earth Planet Sci Lett, 109: 117–131

Hoffman P F, Dorian S A, Ashkenazy Y, Douglas I B, Jochen J B, Phoebe A C, Grant M C, Jessica R C, Donnadieu Y, Douglas H E, Ian J F, Ferreira D, Jason C G, Galen P H, Malte F J, Guillaume L H, Gordon D L, Macdonald F A, Adam C M, Partin C A, Ramstein G, Rose B E J, Rose C V, Sadler P M, Tziperman E, Voigt A, Warren S G. 2017. Snowball Earth climate dynamics and Cryogenian geology-geobiology. Sci Adv, 3: 1–43

Hu J, Gong W, Wu S, Liu Y, Liu S. 2014. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Langshan Group in the northeast margin of the Alxa block, with tectonic implications. Precambrian Res, 255: 756–770

Hu P, Zhai Q, Wang J, Tang Y, Wang H, Hou K. 2018. Ediacaran magmatism in the North Lhasa terrane, Tibet and its tectonic implications. Precambrian Res, 307: 137–154

Hua H, Zhe C, Xunlai Y. 2007. The advent of mineralized skeletons in Neoproterozoic Metazoa—New fossil evidence from the Gaojiashan Fauna. Geol J, 42: 263–279

Hughes N C, Peng S, Bhargava O N, Ahluwalia A D, Walia S, Myrow P M, Parcha S K. 2005. Cambrian biostratigraphy of the Tal Group, Lesser Himalaya, India, and early Tsanglangpuan (late early Cambrian) trilobites from the Nigali Dhar syncline. Geol Mag, 142: 57–80

Hughes N C. 2016. The Cambrian palaeontological record of the Indian subcontinent. Earth-Sci Rev, 159: 428–461

Jain J K, Banerjee D M, Kale V S. 2020. Tectonics of the India Subcontinent. Switzerland: Springer

Jiang G, Sohl L E, Christie-Blick N. 2003. Neoproterozoic stratigraphic comparison of the Lesser Himalaya (India) and Yangtze block (south China): Paleogeographic implications. Geology, 31: 917–920

Joshi H, Tiwari M. 2016. Tianzhushania spinosa and other large acanthomorphic acritarchs of Ediacaran Period from the Infrakrol Formation, Lesser Himalaya, India. Precambrian Res, 286: 325–336

Kaufman A J, Jiang G Q, Christie-Blick N, Banerjee D M, Rai V. 2006. Stable isotope record of the terminal Neoproterozoic Krol platform in the Lesser Himalayas of northern India. Precambrian Res, 147: 156–185

Kendall B, Creaser R A, Calver C R, Raub T D, Evans D A D. 2009. Correlation of Sturtian diamictite successions in southern Australia and northwestern Tasmania by Re-Os black shale geochronology and the ambiguity of "Sturtian"-type diamictite-cap carbonate pairs as chronostratigraphic marker horizons. Precambrian Res, 172: 301–310

Kendall B, Creaser R A, Selby D. 2006. Re-Os geochronology of postglacial black shales in Australia: Constraints on the timing of "Sturtian" glaciation. Geology, 34: 729–732

Khan M M S S, Umar M, Pan B, Sun X, Ahmed S, Luo C, Zhao F, Yin Z, Qasim M, Jadoon I A K, Shen S, Ding L, Zhu M. 2022. A newly discovered Neoproterozoic diamictite-cap carbonate couplet from the Western Himalaya: The expansion of the Marinoan snowball Earth glaciation to the northwestern margin of the Indian Plate in North Pakistan. Precambrian Res, 378: 106759

Knoll A H, Walter M R, Narbonne G M, Christie-Blick N. 2004. A new period for the geologic time scale. Science, 305: 621–622

Knoll A H, Walter M R, Narbonne G M, Christie-Blick N. 2006. The Ediacaran period: A new addition to the geologic time scale. Lethaia, 39: 13–30

Krause A J, Mills B J W, Merdith A S, Lenton T M, Poulton S W. 2022. Extreme variability in atmospheric oxygen levels in the late Precambrian. Sci Adv, 8: 8191

Kumar S, Pandey S K. 2009. Note on the occurence of *Arumberia banksi* and associated fossils from the Jodhpur Sandstone, Marwar Supergroup, Western Rajasthan. J Palaeontol Soc India, 54: 171–178

Lan Z, Huyskens M H, Lu K, Li X H, Zhang G, Lu D, Yin Q Z. 2020. Toward refining the onset age of Sturtian glaciation in South China. Precambrian Res, 338: 105555

Lan Z, Li X, Zhu M, Chen Z Q, Zhang Q, Li Q, Lu D, Liu Y, Tang G. 2014. A rapid and synchronous initiation of the wide spread Cryogenian glaciations. Precambrian Res, 255: 401–411

Lang X, Shen B, Peng Y, Xiao S, Zhou C, Bao H, Kaufman A J, Huang K, Crockford P W, Liu Y, Tang W, Ma H. 2018. Transient marine euxinia at the end of the terminal Cryogenian glaciation. Nat Commun, 9: 3019

Latif M. 1970. Explanatory notes on the Geology of South Eastern Hazara, to accompany the revised Geological Map. Jb Geol Bundesanst, 15: 5–19

Latif M. 1974. A Cambrian age for the Abbottabad group of Hazara, Pakistan. Geol Bull Panjab Univ, 10: 1–20

Le Guerroué E, Allen P A, Cozzi A. 2006. Chemostratigraphic and sedimentological framework of the largest negative carbon isotopic excursion in Earth history: The Neoproterozoic Shuram Formation (Nafun Group, Oman). Precambrian Res, 146: 68–92

Leather J, Allen P A, Brasier M D, Cozzi A. 2002. Neoproterozoic snowball Earth under scrutiny: Evidence from the Fiq glaciation of Oman. Geology, 30: 891–894

Lenton T M, Boyle R A, Poulton S W, Shields-Zhou G A, Butterfield N J. 2014. Co-evolution of eukaryotes and ocean oxygenation in the Neoproterozoic era. Nat Geosci, 7: 257–265

Li C W, Chen J Y, Hua T E. 1998. Precambrian sponges with cellular structures. Science, 279: 879–882

Li C, Cheng M, Zhu M, Lyons T W. 2018. Heterogeneous and dynamic marine shelf oxygenation and coupled early animal evolution. Emerg Top in Life Sci, 2: 279–288

Li C, Love G D, Lyons T W, Fike D A, Sessions A L, Chu X. 2010. A stratified redox model for the Ediacaran Ocean. Science, 328: 80–83

Li M, Wang C, Li R, Meert J G, Peng Y, Zhang J. 2019. Identifying late Neoproterozoic-early Paleozoic sediments in the South Qilian Belt, China: A peri-Gondwana connection in the northern Tibetan Plateau. Gondwana Res, 76: 173–184

Li Z X, Bogdanova S V, Collins A S, Davidson A, De Waele B, Ernst R E, Fitzsimons I C W, Fuck R A, Gladkochub D P, Jacobs J, Karlstrom K E, Lu S, Natapov L M, Pease V, Pisarevsky S A, Thrane K, Vernikovsky V. 2008. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis. Precambrian Res, 160: 179–210

Li Z X, Liu Y, Ernst R. 2023. A dynamic 2000–540 Ma Earth history: From cratonic amalgamation to the age of supercontinent cycle. Earth-Sci Rev, 238: 104336

Linnemann U, Hofmann M, Gärtner A, Gärtner J, Zieger J, Krause R, Haenel R, Mende K, Ovtcharova M, Schaltegger U, Vickers-Rich P. 2021. An upper Ediacaran glacial period in Cadomia: The Granville tillite (Armorican Massif)-sedimentology, geochronology and provenance. Geol Mag, 159: 999–1013

Liu H, Zartman R E, Ireland T R, Sun W. 2019. Global atmospheric oxygen variations recorded by Th/U systematics of igneous rocks. Proc Natl Acad Sci USA, 116: 18854–18859

Liu P, Li X, Chen S, Lan Z, Yang B, Shang X, Yin C. 2015. New SIMS U-Pb zircon age and its constraint on the beginning of the Nantuo glaciation. Sci Bull, 60: 958–963

Liu P, Moczydłowska M. 2019. Ediacaran microfossils from the Doushantuo Formation chert nodules in the Yangtze Gorges area, South China, and new biozones. Fossi Strata, 65: 1–172

Lu K, Mitchell R N, Yang C, Zhou J L, Wu L G, Wang X C, Li X H. 2022. Widespread magmatic provinces at the onset of the Sturtian snowball Earth. Earth Planet Sci Lett, 594: 117736

Lu M, Zhu M, Zhang J, Shields-Zhou G, Li G, Zhao F, Zhao X, Zhao M. 2013. The DOUNCE event at the top of the Ediacaran Doushantuo Formation, South China: Broad stratigraphic occurrence and non-diagenetic origin. Precambrian Res, 225: 86–109

Lu S, Li H, Zhang C, Niu G. 2008. Geological and geochronological evidence for the Precambrian evolution of the Tarim Craton and surrounding continental fragments. Precambrian Res, 160: 94–107

Lyons T W, Reinhard C T, Planavsky N J. 2014. The rise of oxygen in Earth's early ocean and atmosphere. Nature, 506: 307–315

Ma X, Wang J, Algeo T J, Wang Z, Cen Y, Chen C, Chen D, Lu J, Yang Y. 2023. U-Pb dating of detrital zircons from the Datangpo Formation, South China: Implications for Sturtian deglaciation age

and Nanhua stratal provenance. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 617: 111494

Macdonald F A, Schmitz M D, Crowley J L, Roots C F, Jones D S, Maloof A C, Strauss J V, Cohen P A, Johnston D T, Schrag D P. 2010. Calibrating the Cryogenian. Science, 327: 1241–1243

Macdonald F A, Schmitz M D, Strauss J V, Halverson G P, Gibson T M, Eyster A, Cox G, Mamrol P, Crowley J L. 2018. Cryogenian of Yukon. Precambrian Res, 319: 114–143

Mángano M G, Buatois L A. 2020. The rise and early evolution of animals: Where do we stand from a trace-fossil perspective? Interface Focus, 10: 20190103

Mazumdar A, Strauss H. 2006. Sulfur and strontium isotopic compositions of carbonate and evaporite rocks from the late Neoproterozoic-early Cambrian Bilara Group (Nagaur-Ganganagar Basin, India): Constraints on intrabasinal correlation and global sulfur cycle. Precambrian Res, 149: 217–230

McFadden K A, Huang J, Chu X, Jiang G, Kaufman A J, Zhou C, Yuan X, Xiao S. 2008. Pulsed oxidation and biological evolution in the Ediacaran Doushantuo Formation. Proc Natl Acad Sci USA, 105: 3197–3202

Meert J G, Pandit M K, Kwafo S, Singha A. 2023. Stinging News: “Dickinsonia” discovered in the Upper Vindhyan of India not worth the buzz. Gondwana Res, 117: 1–7

Metcalfe I. 2013. Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys. J Asian Earth Sci, 66: 1–33

Moghadam H S, Li X H, Santos J F, Stern R J, Griffin W L, Ghorbani G, Sarebani N. 2017. Neoproterozoic magmatic flare-up along the N. margin of Gondwana: The Taknar complex, NE Iran. Earth Planet Sci Lett, 474: 83–96

Myrow P M, Hughes N C, McKenzie N R. 2018. Reconstructing the Himalayan margin prior to collision with Asia: Proterozoic and lower Paleozoic geology and its implications for Cenozoic tectonics. Geol Soc Lond Spec Publ, 483: 39–64

Narbonne G M, Xiao S, Shields G A, Gehling J G. 2012. Chapter 18: The Ediacaran period. In: Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, Ogg G M, eds. The Geologic Time Scale. Boston: Elsevier. 413–435

Narbonne G M. 2005. The Ediacaran Biota: Neoproterozoic origin of animals and their ecosystems. Annu Rev Earth Planet Sci, 33: 421–442

Nelson L L, Smith E F, Hodgin E B, Crowley J L, Schmitz M D, Macdonald F A. 2020. Geochronological constraints on Neoproterozoic rifting and onset of the Marinoan glaciation from the Kingston Peak Formation in Death Valley, California (USA). Geology, 48: 1083–1087

Och L M, Shields-Zhou G A. 2012. The Neoproterozoic oxygenation event: Environmental perturbations and biogeochemical cycling. Earth-Sci Rev, 110: 26–57

Ostrander C M, Bjerrum C J, Ahm A C, Stenger S R, Bergmann K D, El-Ghali M A K, Harthi A R, Aisri Z, Nielsen S G. 2023. Widespread seafloor anoxia during generation of the Ediacaran Shuram carbon isotope excursion. Geobiology, 21: 556–570

Pandit M K, Sial A N, Jamrani S S, Ferreira V P. 2001. Carbon isotopic profile across the bilara group rocks of trans-Aravalli Marwar Supergroup in Western India: Implications for Neoproterozoic-Cambrian transition. Gondwana Res, 4: 387–394

Pang K, Wu C, Sun Y, Ouyang Q, Yuan X, Shen B, Lang X, Wang R, Chen Z, Zhou C. 2021. New Ediacara-type fossils and late Ediacaran stratigraphy from the northern Qaidam Basin (China): Paleogeographic implications. Geology, 49: 1160–1164

Park Y, Swanson-Hysell N L, Xian H, Zhang S, Condon D J, Fu H, Macdonald F A. 2021. A consistently high-latitude South China from 820 to 780 Ma: Implications for exclusion from Rodinia and the feasibility of large-scale true polar wander. J Geophys Res-Solid Earth, 126: e2020JB021541

Peng Y, Yu S, Li S, Zhang J, Liu Y, Li Y, Santosh M. 2019. Early Neoproterozoic magmatic imprints in the Altun-Qilian-Kunlun region of the Qinghai-Tibet Plateau: Response to the assembly and breakup of Rodinia supercontinent. Earth-Sci Rev, 199: 102954

Plumb K A, James H L. 1986. Subdivision of precambrian time: Recommendations and suggestions by the subcommission on precambrian stratigraphy. Precambrian Res, 32: 65–92

Poulton S W, Bekker A, Cumming V M, Zerkle A L, Canfield D E, Johnston D T. 2021. A 200-million-year delay in permanent atmospheric oxygenation. Nature, 592: 232–236

Prasad B, Asher R. 2016. Record of Ediacaran complex acanthomorphic acritarch from the Lower Vindhyan succession of the Chambal Valley (East Rajasthan), India and their biostratigraphic significance. J Palaeontol Soc India, 61: 29–62

Pu J P, Bowring S A, Ramezani J, Myrow P, Raub T D, Landing E, Mills A, Hodgin E, Macdonald F A. 2016. Dodging snowballs: Geochronology of the Gaskiers glaciation and the first appearance of the Ediacaran biota. Geology, 44: 955–958

Qasim M, Ding L, Khan M A, Umar M, Jadoon I A K, Haneef M, Baral U, Cai F, Shah A., Yao W. 2017. Late Neoproterozoic-Early Palaeozoic stratigraphic succession, Western Himalaya, North Pakistan: Detrital zircon provenance and tectonic implications. Geol J, 53: 2258–2279

Rattan S S. 1973. Stratigraphy and sedimentation of the Chamba area, Western Himachal Pradesh. Himalayan Geol, 3: 231–248

Ren R, Guan S W, Zhang S C, Wu L, Zhang H Y. 2020. How did the peripheral subduction drive the Rodinia breakup: Constraints from

the Neoproterozoic tectonic process in the northern Tarim Craton. Precambrian Res, 339: 105612

Retallack G J, Matthews N A, Master S, Khangar R G, Khan M. 2021. Dickinsonia discovered in India and late Ediacaran biogeography. Gondwana Res, 90: 165–170

Rieu R, Allen P A, Plotze M, Pettke T. 2007. Compositional and mineralogical variations in a Neoproterozoic glacially influenced succession, Mirbat area, south Oman: Implications for paleo-weathering conditions. Precambrian Res, 154: 248–265

Rooney A D, Cantine M D, Bergmann K D, Gómez-Pérez I, Al Baloushi B, Boag T H, Busch J F, Sperling E A, Strauss J V. 2020b. Calibrating the coevolution of Ediacaran life and environment. Proc Natl Acad Sci USA, 117: 16824–16830

Rooney A D, Macdonald F A, Strauss J V, Dudás F Ö, Hallmann C, Selby D. 2014. Re-Os geochronology and coupled Os-Sr isotope constraints on the Sturtian snowball Earth. Proc Natl Acad Sci USA, 111: 51–56

Rooney A D, Strauss J V, Brandon A D, Macdonald F A. 2015. A Cryogenian chronology: Two long-lasting synchronous Neoproterozoic glaciations. Geology, 43: 459–462

Rooney A D, Yang C, Condon D J, Zhu M, Macdonald F A. 2020a. U-Pb and Re-Os geochronology tracks stratigraphic condensation in the Sturtian snowball Earth aftermath. Geology, 48: 625–629

Rothman D H, Hayes J M, Summons R E. 2003. Dynamics of the Neoproterozoic carbon cycle. Proc Natl Acad Sci USA, 100: 8124–8129

Sahoo S K, Planavsky N J, Jiang G, Kendall B, Owens J D, Wang X, Shi X, Anbar A D, Lyons T W. 2016. Oceanic oxygenation events in the anoxic Ediacaran ocean. Geobiology, 14: 457–468

Schiffbauer J D, Huntley J W, O'Neil G R, Darroch S A F, Laflamme M, Cai Y. 2016. The latest Ediacaran wormworld fauna: Setting the ecological stage for the Cambrian explosion. GSA Today, 26: 4–11

Schrag D P, Higgins J A, Macdonald F A, Johnston D T. 2013. Authigenic carbonate and the history of the global carbon cycle. Science, 339: 540–543

Schröder S, Schreiber B C, Amthor J E, Matter A. 2003. A depositional model for the terminal Neoproterozoic-Early Cambrian Ara Group evaporites in south Oman. Sedimentology, 50: 879–898

Shahkarami S, Mángano M G, Buatois L A. 2017. Ichnostratigraphy of the Ediacaran-Cambrian boundary: New insights on lower Cambrian biozonations from the Soltanieh Formation of northern Iran. J Paleontol, 91: 1178–1198

Shanker R, Kumar G, Mathur V K, Joshi A. 1993. Stratigraphy of Blaini, Infra Krol and Tal succession, Krol Belt, Lesser Himalaya. Indian J Petrol Geol, 2: 99–136

Shanker R, Mathur V K, Kumar G. 1997. Additional Ediacaran biota from the Krol Group, Lesser Himalaya, India and their significance. Geosci J, 18: 79–91

Shen B, Xiao S, Dong L, Zhou C, Liu J. 2007. Problematic macrofossils from Ediacaran successions in the North China and Chaidam blocks: Implications for their evolutionary roots and biostratigraphic significance. J Paleontol, 81: 1396–1411

Shen B, Xiao S, Zhou C, Kaufman A J, Yuan X. 2010. Carbon and sulfur isotope chemostratigraphy of the Neoproterozoic Quanji Group of the Chaidam Basin, NW China: Basin stratification in the aftermath of an Ediacaran glaciation postdating the Shuram event? Precambrian Res, 177: 241–252

Shi W, Li C, Luo G, Huang J, Algeo T J, Jin C, Zhang Z, Cheng M. 2018. Sulfur isotope evidence for transient marine-shelf oxidation during the Ediacaran Shuram Excursion. Geology, 46: 267–270

Shields G A, Mills B J W, Zhu M, Raub T D, Daines S J, Lenton T M. 2019. Unique Neoproterozoic carbon isotope excursions sustained by coupled evaporite dissolution and pyrite burial. Nat Geosci, 12: 823–827

Shields G A, Strachan R A, Susannah M P, 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, Zhang S, Zhou Y, Zhu M. 2022. A template for an improved rock-based subdivision of the pre-Cryogenian time scale. JGS, 179: jgs2020–222

Shields-Zhou G A, Porter S, Halverson G P. 2016. A new rock-based definition for the Cryogenian Period (circa 720–635 Ma). Episodes, 39: 3–8

Shields-Zhou G, Och L. 2011. The case for a Neoproterozoic oxygenation event: Geochemical evidence and biological consequences. GSA Today, 21: 4–11

Shukla M, Tewari V C, Babu R, Sharma A. 2006. Microfossils from the Neoproterozoic Buxa Dolomite, west Siang district, Arunachal Lesser Himalaya, India and their significance. J Palaeontol Soc India, 51: 57–73

Song D, Xiao W, Collins A S, Glorie S, Han C, Li Y. 2017. New chronological constrains on the tectonic affinity of the Alxa Block, NW China. Precambrian Res, 299: 230–243

Song H, An Z, Ye Q, Stüeken E E, Li J, Hu J, Algeo T J, Tian L, Chu D, Song H, Xiao S, Tong J. 2023. Mid-latitudinal habitable environment for marine eukaryotes during the waning stage of the Marinoan snowball glaciation. Nat Commun, 14: 1564

Song G, Wang X, Shi X, Jiang G. 2017. New U-Pb age constraints on the upper Banxi Group and synchrony of the Sturtian glaciation in

South China. Geosci Front, 8: 1161–1173
Song S, Niu Y, Su L, Xia X. 2013. Tectonics of the North Qilian orogen, NW China. Gondwana Res, 23: 1378–1401
Song S, Niu Y, Su L, Zhang C, Zhang L. 2014. Continental orogenesis from ocean subduction, continent collision/subduction, to orogen collapse, and orogen recycling: The example of the North Qaidam UHPM belt, NW China. Earth-Sci Rev, 129: 59–84
Stöcklin J. 1968. Structural history and tectonics of Iran: A review. AAPG Bull, 52: 1229–1258
Sun Y, Ouyang Q, Pang K, Wu C, Chen Z, Yuan X, Zhou C. 2022. Detrital zircon geochronology and stratigraphy of the Proterozoic strata in the olongbuluke terrane of Northwest China: Implications for the great unconformity. Precambrian Res, 376: 106684
Swanson-Hysell N L, Rose C V, Calmet C C, Halverson G P, Hurtgen M T, Maloof A C. 2010. Cryogenian glaciation and the onset of carbon-isotope decoupling. Science, 328: 608–611
Tan Z, Jia W, Li J, Yin L, Wang S, Wu J, Song J, Peng P. 2021. Geochemistry and molybdenum isotopes of the basal Datangpo Formation: Implications for ocean-redox conditions and organic matter accumulation during the Cryogenian interglaciation. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 563: 110169
Tarhan L G, Hughes N C, Myrow P M, Bhargava O N, Ahluwalia A D, Kudryavtsev A B, Donoghue P. 2014. Precambrian-Cambrian boundary interval occurrence and form of the enigmatic tubular body fossil *Shaanxilithes* ningqiangensis from the Lesser Himalaya of India. Palaeontology, 57: 283–298
Tewari V C. 2003. Sedimentology, palaeobiology, and stable isotope chemostratigraphy of the terminal Neoproterozoic buxa dolomite, Arunachal Pradesh, NE Lesser Himalaya. Himalayan Geol, 24: 1–18
Tewari V C. 2004. Palaeobiology and biosedimentology of the stromatolitic buxa dolomite, ranjit window, Sikkim, Ne Lesser Himalaya, India. In: Joseph S, Julian C F, Tobias O, Francis R, eds. Life in the Universe. Dordrecht: Elsvier. 249–250
Tewari V C. 2012. Neoproterozoic Blaini glacial diamictite and Ediacaran Krol carbonate sedimentation in the Lesser Himalaya, India. Geol Soc Lond Spec Publ, 366: 265–276
Umar M, Sabir M A, Farooq M, Khan M M S S, Faridullah F, Jadoon U K, Khan A S. 2015. Stratigraphic and sedimentological attributes in Hazara Basin Lesser Himalaya, North Pakistan: Their role in deciphering minerals potential. Arab J Geosci, 8: 1653–1667
Van Kranendonk M J, Altermann W, Beard B L, Hoffman P F, Johnson C M, Kasting J F, Melezhik V A, Nutman A P, Papineau D, Pirajno F. 2012. A chronostratigraphic division of the Precambrian: Possibilities and challenges. In: Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M, Ogg G. eds. The Geologic Time Scale 2012. Boston: Elsevier. 299–392
van Staal C R, Barr S M, Murphy J B. 2012. Provenance and tectonic evolution of Ganderia: Constraints on the evolution of the Iapetus and Rheic oceans. Geology, 40: 987–990
Vaziri S H, Majidifard M R, Darroch S A F, Laflamme M. 2021. Ediacaran diversity and paleoecology from central Iran. J Paleontol, 95: 236–251
Vaziri S H, Majidifard M R, Laflamme M. 2018. Diverse assemblage of Ediacaran fossils from Central Iran. Sci Rep, 8: 5060
Vickers-Rich P, Soleimani S, Farjandi F, Zand M, Linnemann U, Hofmann M, Wilson S A, Cas R, Rich T H. 2017. A preliminary report on new Ediacaran fossils from Iran. Alcheringa-An Australasian J Palaeontology, 42: 230–243
de Wall H, Regelous A, Tomaschek F, Bestmann M, Hahn G, Sharma K K. 2022. Tonian evolution of an active continental margin—A model for Neoproterozoic NW India-SE Pakistan-E Oman linkage. Precambrian Res, 381: 106822
Wang C, Evans D A D, Li M, Zhang J H, Han J, Wen B, Wang J, Zhao J F. 2022. Proterozoic-Mesozoic development of the Quanji Block from Northern Tibet and the cratonic assembly of eastern Asia. Am J Sci, 322: 705–727
Wang M, Li C, Xie C. 2015. Dating of detrital zircons from the Dabure clastic rocks: The discovery of Neoproterozoic strata in southern Qiangtang, Tibet. Int Geol Rev, 58: 216–227
Wang R, Shen B, Lang X, Wen B, Mitchell R N, Ma H, Yin Z, Peng Y, Liu Y, Zhou C. 2023. A Great late Ediacaran ice age. Natl Sci Rev, 10: nwad117
Wang W, Zhou C, Yuan X, Chen Z, Xiao S. 2012. A pronounced negative δ^{13}C excursion in an Ediacaran succession of western Yangtze Platform: A possible equivalent to the Shuram event and its implication for chemostratigraphic correlation in South China. Gondwana Res, 22: 1091–1101
Wang X, Zhang X, Liu W. 2021b. Biostratigraphic constraints on the age of Neoproterozoic glaciation in North China. J Asian Earth Sci, 219: 104894
Wang X, Zhang X, Zhang Y, Cui L, Li L. 2021a. New materials reveal *Shaanxilithes* as a *Cloudina*-like organism of the late Ediacaran. Precambrian Res, 362: 106277
Wang Y, Chen D, Liu M, Liu K, Tang P. 2022. Ediacaran carbon cycling and Shuram excursion recorded in the Tarim Block, northwestern China. Precambrian Res, 377: 106694
Wang Y, Wang X, Wang Y. 2015. Cambrian ichnofossils from the Zhoujieshan Formation (Quanji Group) overlying tillites in the Northern margin of the Qaidam Basin, NW China. J Earth Sci, 26: 203–210
Wen B, Evans D A D, Li Y X. 2017. Neoproterozoic paleogeography of the Tarim Block: An extended or alternative “missing-link” model

for Rodinia? Earth Planet Sci Lett, 458: 92–106

Williams J J, Mills B J W, Lenton T M. 2019. A tectonically driven Ediacaran oxygenation event. Nat Commun, 10: 2690

Wu C, Zuza A V, Yin A, Chen X, Haproff P J, Li J, Li B, Ding L. 2021. Punctuated orogeny during the assembly of Asia: Tectonostratigraphic evolution of the North China Craton and the Qilian Shan from the Paleoproterozoic to Early Paleozoic. Tectonics, 40: e2020TC006503

Wu L, Guan S, Ren R, Zhang C Y, Feng X. 2021. Neoproterozoic glaciations and rift evolution in the northwest Tarim Craton, China: New constraints from geochronological, geochemical, and geophysical data. Int Geol Rev, 63: 1–20

Xiao S, Bao H, Wang H, Kaufman A J, Zhou C, Li G, Yuan X, Ling H. 2004. The Neoproterozoic Quruqtagh Group in eastern Chinese Tianshan: Evidence for a post-Marinoan glaciation. Precambrian Res, 130: 1–26

Xiao S, Jiang G, Ye Q, Ouyang Q, Banerjee D M, Singh B P, Muscente A D, Zhou C, Hughes N C. 2022. Systematic paleontology, acritarch biostratigraphy, and δ^{13} C chemostratigraphy of the early Ediacaran Krol A Formation, Lesser Himalaya, northern India. J Paleontol, 1–62

Xiao S, Laflamme M. 2009. On the eve of animal radiation: Phylogeny, ecology and evolution of the Ediacara biota. Trends Ecol Evol, 24: 31–40

Xiao S, Narbonne G M, Zhou C, Laflamme M, Grazhdankin D V, Moczydlowska-Vidal M, Cui H. 2016. Towards an Ediacaran time scale: Problems, protocols, and prospects. Episodes, 39: 540–555

Xiao S, Yuan X, Steiner M, Knoll A H. 2002. Macroscopic carbonaceous compressions in a terminal Proterozoic shale: A systematic reassessment of the Miaohe Biota, South China. J Paleontology, 76: 347–376

Xiao S, Zhang Y, Knoll A H. 1998. Three-dimensional preservation of algae and animal embryos in a Neoproterozoic phosphorite. Nature, 391: 553–558

Xiao W, Windley B F, Yong Y, Yan Z, Yuan C, Liu C, Li J. 2009. Early Paleozoic to Devonian multiple-accretionary model for the Qilian Shan, NW China. J Asian Earth Sci, 35: 323–333

Xu B, Xiao S, Zou H, Chen Y, Li Z, Song B., Liu D, Zhou C, Yuan X. 2009. SHRIMP zircon U-Pb age constraints on Neoproterozoic Quruqtagh diamictites in NW China. Precambrian Res, 168: 247–258

Xu H, Meert J G, Pandit M K. 2022. Age of the Marwar Supergroup, NW India: A note on the U-Pb geochronology of Jodhpur Group felsic volcanics. Geosci Front, 13: 101287

Xu X, Song S, Su L, Li Z, Niu Y, Allen M B. 2015. The 600–580 Ma continental rift basalts in North Qilian Shan, northwest China: Links between the Qilian-Qaidam block and SE Australia, and the reconstruction of East Gondwana. Precambrian Res, 257: 47–64

Yang B, Steiner M, Zhu M, Li G, Liu J, Liu P. 2016. Transitional Ediacaran-Cambrian small skeletal fossil assemblages from South China and Kazakhstan: Implications for chronostratigraphy and metazoan evolution. Precambrian Res, 285: 202–215

Yang C, Li X, Li Z, Zhu M, Lu K. 2020. Provenance evolution of age-calibrated strata reveals when and how South China Block collided with Gondwana. Geophys Res Lett, 47: e2020GL090282

Yang C, Li Y, Selby D, Wan B, Guan C, Zhou C, Li X H. 2022. Implications for Ediacaran biological evolution from the ca. 602 Ma Lantian biota in China. Geology, 50: 562–566

Yang C, Rooney A D, Condon D J, Li X H, Grazhdankin D V, Bowyer F T, Hu C, Macdonald F A, Zhu M. 2021. The tempo of Ediacaran evolution. Sci Adv, 7: 9643

Yang J, Wu C, Zhang J, Shi R, Meng F, Wooden J, Yang H Y. 2006. Protolith of eclogites in the north Qaidam and Altun UHP terrane, NW China: Earlier oceanic crust? J Asian Earth Sci, 28: 185–204

Yang X, Mao J, Li R, Jiang Z, Yu M, Xu L, Reershemius T, Planavsky N J. 2023. The deposition and significance of an Ediacaran non-glacial iron formation. Geobiology, 21: 44–65

Yang X, Mao J, Santosh M, Li R, Wu C, Gao J, Zhang X, Wang Z. 2022. Ediacaran iron formations from the North Qilian Orogenic Belt, China: Age, geochemistry, Sm-Nd isotopes and link with submarine volcanism. Precambrian Res, 368: 106498

Yao J, Xiao S, Yin L, Li G, Yuan X. 2005. Basal Cambrian Microfossils from the Yurtus and Xishanblaq Formations (Tarim, North-West China): Systematic Revision and Biostratigraphic Correlation of Micrhystridium-Like Acritarchs. Palaeontology, 48: 687–708

Ye Q, Tong J, Xiao S, Zhu S, An Z, Tian L, Hu J. 2015. The survival of benthic macroscopic phototrophs on a Neoproterozoic snowball Earth. Geology, 43: 507–510

Yin Z, Sun W, Liu P, Chen J, Bottjer D J, Li J, Zhu M. 2022. Diverse and complex developmental mechanisms of early Ediacaran embryo-like fossils from the Weng'an Biota, southwest China. Phil Trans R Soc B, 377: 20210032

Yin Z, Zhu M, Davidson E H, Bottjer D J, Zhao F, Tafforeau P. 2015. \fpage{E1460}, Sponge grade body fossil with cellular resolution dating 60 Myr before the Cambrian. Proc Natl Acad Sci USA, 112: E1453

Yu S, Peng Y, Zhang J, Li S, Santosh M, Li Y, Liu Y, Gao X, Ji W, Lv P, Li C, Jiang X, Qi L, Xie W, Xu L. 2021. Tectono-thermal evolution of the Qilian orogenic system: Tracing the subduction, accretion and closure of the Proto-Tethys Ocean. Earth-Sci Rev, 215: 103547

Yu W, Algeo T J, Du Y, Zhou Q, Wang P, Xu Y, Yuan L, Pan W. 2017.

Newly discovered Sturtian cap carbonate in the Nanhua Basin, South China. Precambrian Res, 293: 112–130

Yuan X, Chen Z, Xiao S, Zhou C, Hua H. 2011. An early Ediacaran assemblage of macroscopic and morphologically differentiated eukaryotes. Nature, 470: 390–393

Zhang F, Xiao S, Romaniello S J, Hardisty D, Li C, Melezhik V, Pokrovsky B, Cheng M, Shi W, Lenton T M, Anbar A D. 2019. Global marine redox changes drove the rise and fall of the Ediacara biota. Geobiology, 17: 594–610

Zhang S, Jiang G, Han Y. 2008. The age of the Nantuo Formation and Nantuo glaciation in South China. Terra Nova, 20: 289–294

Zhang X, Wang Q, Dan W, Wyman D. 2023. Locating Lhasa terrane in the Rodinia and Gondwana supercontinents: A key piece of the reconstruction puzzle. GSA Bull, 135: 67–80

Zhang B, Zhang J, Zhang Y, Zhao H, Wang Y, Nie F. 2016. Tectonic affinity of the Alxa Block, Northwest China: Constrained by detrital zircon U-Pb ages from the early Paleozoic strata on its southern and eastern margins. Sediment Geol, 339: 289–303

Zhang Y, Yang T, Hohl S V, Zhu B, He T, Pan W, Chen Y, Yao X, Jiang S. 2020. Seawater carbon and strontium isotope variations through the late Ediacaran to late Cambrian in the Tarim Basin. Precambrian Res, 345: 105769

Zhang Z, Ou Z, Li H, Li S, Wu J, Meng F. 2023. Early Cambrian microfossils from the cherts in carbonates of the Kuruktag area, the Tarim block. Carbonates Evaporites, 38: 32

Zhang Z, Zhu G, Wu G, Li T, Feng X, Jing Y. 2022. Carbon isotopic chemostratigraphy of the Ediacaran-Cambrian successions in the northwestern Tarim Craton, NW China: Correlations with Gondwana supercontinent. Glob Planet Change, 208: 103702

Zhao G, Wang C, Zhu X, Hao J, Li H, Meert J G, Gai Y, Long X, Ma T. 2020. Intraoceanic back-arc magma diversity: Insights from a relic of the Proto-Tethys oceanic lithosphere in the western Qilian Orogen, NW China. Chem Geol, 550: 119756

Zhao G, Wang Y, Huang B, Dong Y, Li S, Zhang G, Yu S. 2018. Geological reconstructions of the East Asian blocks: From the breakup of Rodinia to the assembly of Pangea. Earth-Sci Rev, 186: 262–286

Zhao H, Zhang S, Zhu M, Ding J, Li H, Yang T, Wu H. 2021. Paleomagnetic insights into the Cambrian biogeographic conundrum: Did the North China craton link Laurentia and East Gondwana? Geology, 49: 372–376

Zhao J H, Asimow P D. 2018. Formation and evolution of a magmatic system in a rifting continental margin: Neoproterozoic arc- and MORB-like dike swarms in South China. J Petrol, 59: 1811–1844

Zhou C, Huyskens M H, Lang X, Xiao S, Yin Q Z. 2019. Calibrating the terminations of Cryogenian global glaciations. Geology, 47: 251–254

Zhou C M, Huyskens M H, Xiao S, Yin Q Z. 2020. Refining the termination age of the Cryogenian Sturtian glaciation in South China. Palaeoworld, 29: 462–468

Zhou C, Tucker R, Xiao S, Peng Z, Yuan X, Chen Z. 2004. New constraints on the ages of Neoproterozoic glaciations in south China. Geology, 32: 437–440

Zhou X, Tian W, Wu G, Damian Nance R, Chen Y, Zhao Y, Yan W, Zhang Y. 2022. Geochemistry and U-Pb-Hf zircon systematics of Cryogenian syn-rift magmatic rocks from the subsurface of the Tarim Craton: Implications for subduction-related continental rifting. Precambrian Res, 377: 106733

Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y, Dilek Y, Mo X X. 2011. Lhasa terrane in southern Tibet came from Australia. Geology, 39: 727–730

Zhu M, Lu M, Zhang J, Zhao F, Li G, Yang A, Zhao X, Zhao M. 2013. Carbon isotope chemostratigraphy and sedimentary facies evolution of the Ediacaran Doushantuo Formation in western Hubei, South China. Precambrian Res, 225: 7–28

Zhu M, Strauss H, Shields G A. 2007b. From snowball Earth to the Cambrian bioradiation: Calibration of Ediacaran-Cambrian Earth history in South China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 254: 1–6

Zhu M, Wang H. 2011. Chapter 33—Neoproterozoic glaciogenic diamictites of the Tarim Block, NW China. Memoirs, 36: 367–378

Zhu M, Zhang J, Yang A, Li G, Zhao F, Lu M, Yin Z, Miao L, Hu C. 2022. Neoproterozoic stratigraphy, depositional environments and hydrocarbon source-reservoir-seal bed assemblage in South China. In: Wang T, eds. Meso-Neoproterozoic Geology and Petroleum Resources in China. Chapter 5. Singapore: Springer. 181–227

Zhu M, Zhang J, Yang A. 2007a. Integrated Ediacaran (Sinian) chronostratigraphy of South China. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 254: 7–61

Zhu M, Zhang J. 2006. Ediacaran-Cambrian boundary sections and Early Cambrian Chengjiang nonmineralized fossils in eastern Yunnan Province, southwestern China: Introduction. In. Peng S C, Badcock L E, Zhu M Y, eds. Cambrian System of China and Korea. University of Science and Technology of China Press. Hefei: China. 1–12

Zhu M, Zhuravlev A Y, Wood R A, Zhao F, Sukhov S S. 2017. A deep root for the Cambrian explosion: Implications of new bio- and chemostratigraphy from the Siberian Platform. Geology, 45: 459–462

(责任编委: 沈树忠)