



引文格式:王欣,王健,辜平阳.全吉地块前寒武纪地层学研究进展[J].西北地质,2024,57(5):192-208. DOI: 10.12401/j.nwg.2024023

Citation: WANG Xin, WANG Jian, GU Pingyang. Integrated Precambrian Stratigraphy of the Quanji Massif: A Review[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(5): 192-208. DOI: 10.12401/j.nwg.2024023

全吉地块前寒武纪地层学研究进展

王欣^{1,2,3}, 王健^{1,2}, 辜平阳^{1,2,*}

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 中国地质调查局造山带地质研究中心, 陕西 西安 710119; 2. 自然资源部陕西紫阳中志留统底界层型剖面野外科学观测研究站, 陕西 西安 710119; 3. 现代古生物学和地层学国家重点实验室, 中国科学院南京地质古生物研究所, 江苏 南京 210008)

摘要: 青藏高原北部全吉地块的全吉群和小高炉群记录了“新元古代冰期事件”、“超大陆循环”和“大不整合事件”等一系列意义重大的地质事件, 并以此作为探索全吉地块前寒武纪地质演化史的重要窗口。近年来, 关于全吉地块的前寒武纪生物地层学、年代地层学和事件地层学研究取得了一系列重要进展: ①在全吉地块发现的埃迪卡拉型宏体生物化石以及共生的管状动物化石, 为探索现代型海洋生态系统起源提供了新的视角, 同时将小高炉群的时代上限进一步限定为埃迪卡拉纪晚期(551~543 Ma)。②全吉地块缺失寒武系纽芬兰统, 其埃迪卡拉纪—寒武纪界限的地层缺失大致为 25~50 Ma, 与华北克拉通西缘—西南缘的“大不整合事件”尺度具有相似性。③全吉群红藻山组与上覆地层小高炉群黑土坡组之间存在一个较大的不整合, 年代地层学研究显示红藻山组的形成时代为古元古代末期(1640~1646 Ma), 而不是之前认为的埃迪卡拉纪(635~539 Ma)。④全吉地块仅存在一期新元古代冰碛岩, 即埃迪卡拉纪红铁沟组冰碛岩, 其与华北克拉通西缘—西南缘分布的罗圈组和正目观组冰碛岩时代大致相当。⑤全吉地块与华北克拉通在埃迪卡拉纪—寒武纪过渡时期具有相似的构造—沉积演化史, 二者在埃迪卡拉纪末期同处于中高纬度, 而不是之前认为的低纬度地区。

关键词: 全吉地块; 前寒武纪; 全吉群; 小高炉群; 构造亲缘关系

中图分类号: P534.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)05-0192-17

Integrated Precambrian Stratigraphy of the Quanji Massif: A Review

WANG Xin^{1,2,3}, WANG Jian^{1,2}, GU Pingyang^{1,2,*}

(1. Xi'an Center of China Geological Survey, Centre for Orogenic Belt Geology of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China;
2. Strata type Section for the Bottom of Wenlock-Shaanxi Ziyang Field Scientific Observation, Xi'an 710119, Shaanxi, China;
3. State Key Laboratory of Palaeobiology and Stratigraphy, Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, Jiangsu, China)

收稿日期: 2024-01-20; 修回日期: 2024-03-04; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20243411、DD20240029、DD20230553、DD20230005、DD20230215), 陕西省自然基础研究计划项目(2022JM-149、2023-JC-ZD-14、2022JC-DW5-01、2023-JC-YB-268、2023-JC-ZD-15), 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开放课题基金(213121), 国家自然科学基金(42242201、40872004、41302006)联合资助。

作者简介: 王欣(1984-), 男, 博士, 副研究员, 长期从事古生物学与地层学研究。E-mail: wx200315046@163.com。

* 通讯作者: 辜平阳(1982-), 男, 博士, 正高级工程师, 长期从事前寒武纪构造地质学研究。E-mail: pingyang-322@163.com。

Abstract: The Quanji Group and Xiaogaolu Group in the Quanji Massif of the northern Tibetan Plateau recorded a series of important geological events, such as the Neoproterozoic glacial events, Supercontinent cycle and Great Unconformity (GU), thus offering an important window to review the Precambrian geological evolution of this tectonic unit. Recent investigations on the biostratigraphy, chronostratigraphy, and event stratigraphy indicate that: ① The new finding Ediacara-type fossils and associated tubular organisms provide the new sight into our understanding on the origin of modern-looking marine ecosystem, and constraint the upper age limit of Xiaogaolu Group to the late Ediacaran (551~543 Ma). ② The scale of Ediacaran-Cambrian unconformity in the Quanji massif has been suggested to be the approximately 25~50 Ma with missing stratigraphic successions of Terreneuvian Series (Cambrian), which is broadly correspond to the magnitude of GU at the western-southwestern margins of North China Craton. ③ There is a significant unconformity between the Hongzaoshan Formation (Quanji Group) and the overlying succession Heituopo Formation (Xiaogaolu Group). Chronostratigraphic investigation revealed that the age of Hongzaoshan Formation (Quanji Group) is the late Paleoproterozoic (1 640~1 646 Ma), rather than the Ediacaran period (635~539 Ma) as previously thought. ④ The Quanji massif contains a unique Neoproterozoic glaciation unit, the Hongtiedou diamictite, which is roughly equivalent to the Ediacaran glacial deposits of Zhengmuguan and Luoquan Formation from the western-southwestern margins of North China Craton. ⑤ Both of the Quanji massif and North China Craton have been proposed to be the mid-high latitude region during the late Ediacaran period, rather than the low latitude as previously thought. The common tectonostratigraphic characteristics suggest that the Quanji massif shares the closely tectonic-sedimentary evolution with North China Craton during the Ediacaran-Cambrian transition.

Keywords: Quanji massif; Precambrian; Quanji Group; Xiaogaolu Group; tectonic affinity

全吉地块(又称欧龙布鲁克地块)位于青藏高原东北部, 尽管其出露规模十分有限, 但因其存在变质岩结晶基底德令哈杂岩、达肯大坂岩群以及稳定的前寒武纪沉积盖层全吉群和小高炉群, 被视为中国继华北克拉通、华南板块和塔里木板块之外第4个具有克拉通性质的大地构造单元(陆松年等, 2002; 王超等, 2018)。更为重要的是, 全吉地块位于中国三大板块重要的构造衔接部位, 位置十分特殊。因此, 关于全吉地块的构造亲缘性研究, 将为探索中国三大构造单元的前寒武纪发展演化史提供重要线索(王勤燕等, 2008)。综合基底性质、构造-热事件记录和前寒武纪沉积盖层特征, 前人对全吉地块的构造亲缘属性开展了一系列研究工作, 其结论却不尽相同, 其主要观点包括: 亲华南板块(万渝生等, 2003)、亲华北克拉通(Sun et al., 2019; Wang et al., 2022)、亲塔里木板块(陆松年等, 2002)和相对独立的构造演化史(葛肖虹等, 2000)。

前寒武纪沉积盖层全吉群和小高炉群记录了“超大陆循环”“新元古代冰期事件”“大不整合事件”及“寒武纪生命大爆发”等一系列意义重大的地质演化史, 同时也为全吉地块的构造亲缘性研究

以及古地理重建提供了新的视角(Pang et al., 2021; Wang et al., 2021a)。然而, 由于缺乏可靠的生物地层学和精确的锆石年龄数据, 关于全吉地块的前寒武纪地层格架尚存在较大争议, 制约了上述研究工作的进一步开展(王超等, 2018)。近年来, 随着研究程度的不断深入和研究方法的不断进步, 关于全吉地块的前寒武纪地层学(包括生物地层学、年代地层学和事件地层学)和古生物学研究均取得了一系列重要进展(Shen et al., 2007; 王超等, 2015; 张海军等, 2016; Sun et al., 2019; Pang et al., 2021; Wang et al., 2021a, 2021b; 周传明等, 2021; Wang et al., 2022)。笔者基于前人研究工作, 对全吉地块的前寒武纪地层学、特别是对“新元古代冰碛岩”形成期以及“大不整合事件”发生尺度等重大科学问题研究所取得的进展进行系统地归纳和总结, 进而为探索其前寒武纪构造亲缘关系提供更多的思路 and 参考。

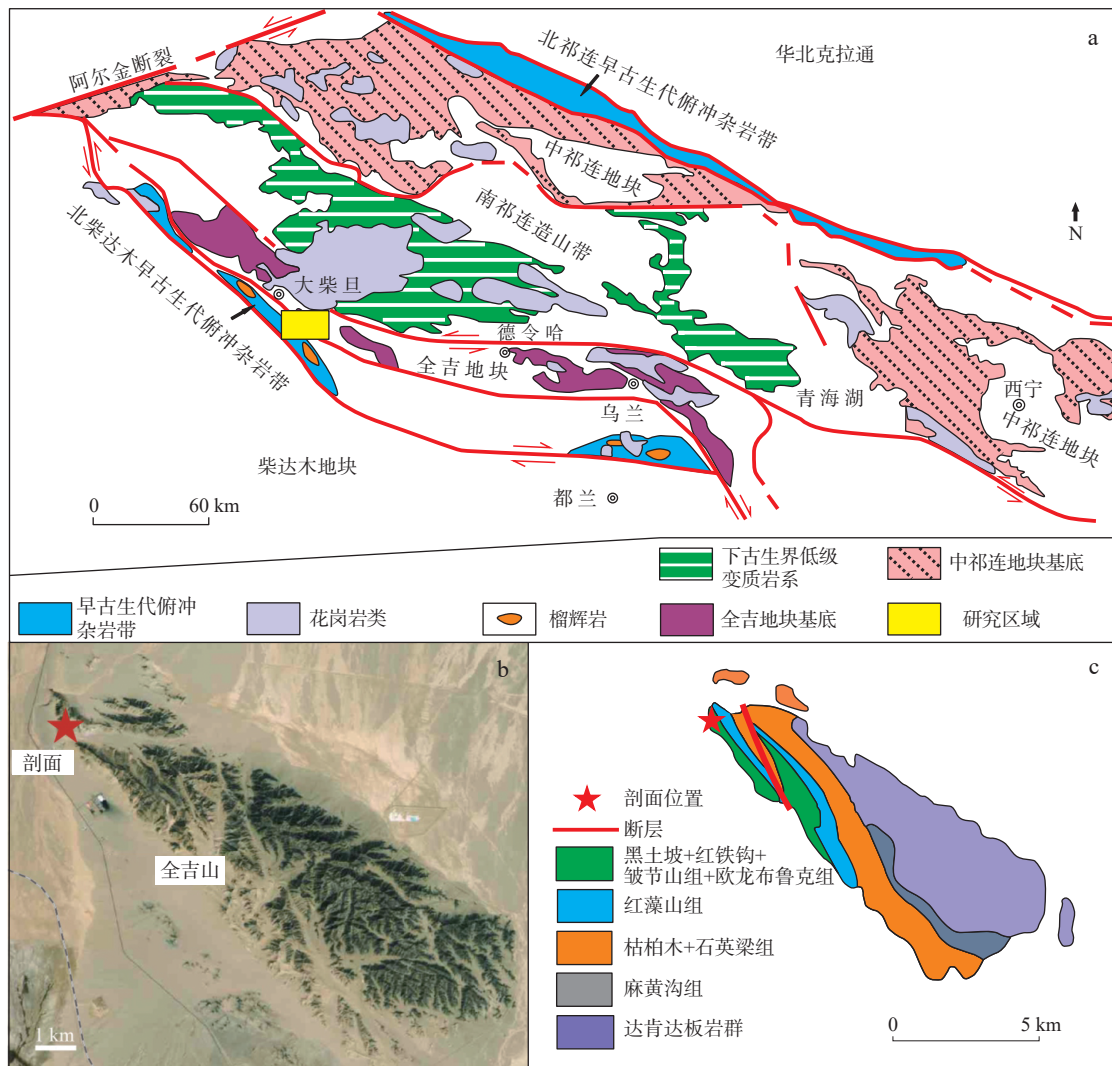
1 构造背景及岩石地层单位简介

全吉地块位于青藏高原东北部, 东迄鄂拉山, 西接阿尔金断裂带, 南至柴北缘超高压变质岩带, 北邻

南祁连构造带(图1)。全吉地块是一个异常古老且相对保存完好的克拉通化构造单元,位于华北克拉通、华南板块和塔里木板块等多个板块和地块的构造衔接部位(图1a),被视为探索原特提斯洋-古特提斯洋时空演化的重要窗口(李猛等,2018; Wang et al., 2022)。全吉群始称“全吉岩系”(表1),是由原地质部青海地质局632大队于1956年创建于青海柴达木盆地北缘的全吉山地区,原始定义为一套未经变质作用的“震旦纪”地层序列(孙崇仁,1997)。朱夏(1957)将“全吉岩系”划分为两部分,下部以碎屑岩为主,上部以碳酸盐岩为主。王云山等(1980)进一步将“全吉群”划分为7个组,自下而上分别为麻黄沟组、桔柏木组、石英梁组、红藻山组、黑土坡组、红铁沟组和

皱节山组(表1)。

王云山等(1983)又将“全吉群”上部的黑土坡组、红铁沟组和皱节山组划归为“小高炉群”,时代归为寒武纪;下部的4个组仍沿用全吉群,时代归为“震旦纪”(表1)。然而,前人关于“全吉群”的研究多采用王云山等(1980)的划分方案,即“全吉群”定义为角度不整合于达肯达板岩群变质岩群之上,平行不整合于寒武纪—奥陶纪欧龙布鲁克群之下的一套地层,自下而上共分为7个组(孙崇仁,1997)。根据红藻山组中获得的两层凝灰岩年龄数据1.62~1.75 Ga(张海军等,2016; Wang et al., 2022),同时综合红藻山组和上覆地层黑土坡组之间的铁质风化壳所指示的不整合界面(王超等,2015),王超等(2018)建



a. 全吉地块及周缘地质简图(据 Chen et al., 2009 修改); b、c. 全吉山地区遥感图及地质简图(剖面位置)

图1 全吉地块及周缘地质简图及剖面位置

Fig. 1 Geological map showing the location of studied section

表 1 全吉群-小高炉群命名沿革

Tab. 1 Naming evolution of the Quanji and Xiaogaolu Group

地层单元	青海石油普查大队 ^①	王云山等 (1980)	王树洗等 (1982)	王云山等 (1983)	孙崇仁等 (1997)	中国地层表 ^②	张海军等 (2016)	王超等 (2018)	本文							
磷块岩	欧龙布鲁克系	寒武系	小高炉群	寒武系	寒武系	寒武系	寒武系	寒武系	寒武系第二统							
皱节山组			寒武系	寒武系	震旦系	寒武系	寒武系	寒武系	寒武系	埃迪卡拉系						
红铁沟组					青白口系						小高炉群	下寒武统	震旦系	小高炉群	震旦系	?
黑土坡组	全吉系	震旦系	全吉群	全吉群	全吉群	全吉群	全吉群	全吉群	固结系							
红藻山组										震旦系	全吉群	震旦系	震旦系	全吉群	全吉群	?
石英梁组										震旦系	全吉群	震旦系	震旦系	全吉群	全吉群	?
枯柏木组										震旦系	全吉群	震旦系	震旦系	全吉群	全吉群	?
麻黄沟组	震旦系	震旦系	震旦系	震旦系	震旦系	震旦系	震旦系	震旦系	?							
古元古代结晶基底																

注: ①. 资料来源于原地质部青海地质局632大队(1956); ②. 资料来源于全国地层委员会《中国地层表》编委会(2014)和全国地层委员会(2018)。

议原全吉群“解体”, 即采用王云山等(1983)的划分方案, 而原“全吉群”上部的黑土坡组、红铁沟组和皱节山组重新划归为“小高炉群”。此次研究中将继续沿用王超等(2018)划分建议(表 1)。全吉群-小高炉群出露范围极为有限, 其中以全吉山地区发育最为完整(图 1b、图 1c); 在欧龙布鲁克山地区缺失黑土坡组、红铁沟组和皱节山组, 即欧龙布鲁克群平行不整合于红藻山组之上(孙崇仁, 1997)。

2 小高炉群的时代上限

皱节山组位于小高炉群顶部, 现定义为整合于红铁沟组冰碛岩之上, 平行不整合于寒武纪—奥陶纪欧龙布鲁克群之下的一套地层(孙崇仁, 1997)。该组下部岩性为灰白色厚层含砾白云岩、含砂屑白云岩, 向上逐渐过渡为紫红色薄层钙质砂岩、粉砂岩, 顶部为浅灰绿色薄层钙质粉砂岩(图 2)。关于皱节山组的形成时代长期以来存在不同认识, 主要观点包括埃迪卡拉纪(Shen et al., 2007)和寒武纪(王云山等, 1980; 孙崇仁, 1997; Wang et al., 2015)。关于皱节山组的生物地层学研究工作开展较早, 王云山等(1980)报道了该组中的皱节虫状(*Sabellidites*-like)遗迹化石, 并将组形成时代限定为寒武纪早期, 这一观点也成为主流观点并为《青海省岩石地层单位》所采纳(孙崇仁, 1997)。Wang 等(2015)描述了产自皱节山组中的遗迹化石

Treptichnus pedum, 并据此将该组时代限定为寒武纪早期。众所周知, *T. pedum* 是划分确定寒武纪底界层型剖面的“明星化石”(Brasier et al., 1994; Buatois, 2017), 其首现位置(FAD)可视为显生宙的“开始”, 意义十分重大。然而, 关于 *T. pedum* 的地层沿限却存在诸多质疑, 甚至在确定寒武纪底界的“金钉子”剖面, 该化石的首现位置也低于寒武系的底界(Gehling et al., 2001; Babcock et al., 2014; Zhu et al., 2019)。Shen 等(2007)描述了产自皱节山组中的条带状疑难化石三属四种(*Helanoichnus helanensis* Yang, 1985; *Palaeopascichnus meniscatus* Shen et al., 2007; *P. minimus* Shen et al., 2007; *Shaanxilithes* cf. *ningqiangensis* Xing et al., 1984), 并倾向于将该组时代限定在埃迪卡拉纪晚期。近年来的一系列研究成果均倾向于将王云山等(1980)报道的皱节虫状(*Sabellidites*-like)遗迹化石以及 Shen 等(2007)描述的一系列条带状疑难化石归并为 *Shaanxilithes ningqiangensis* 的同物异名, 而上述条带状化石间的形态差别也被认为的埋藏差异的结果(Meyer et al., 2012; Wang et al., 2021b)。

Shaanxilithes(陕西迹)是埃迪卡拉纪潜力标准化石, 通常呈条带状压扁保存于碎屑岩中, 化石边缘整齐、宽度相对稳定, 表面具有一系列紧密排列的横纹(图 3a、图 3c、图 3e)。*Shaanxilithes* 最初解释为须腕动物皱节虫类 cf. *Sabellidites*, 被认为是中国首次在前寒武纪地层中发现的后生动物实体化石(陈

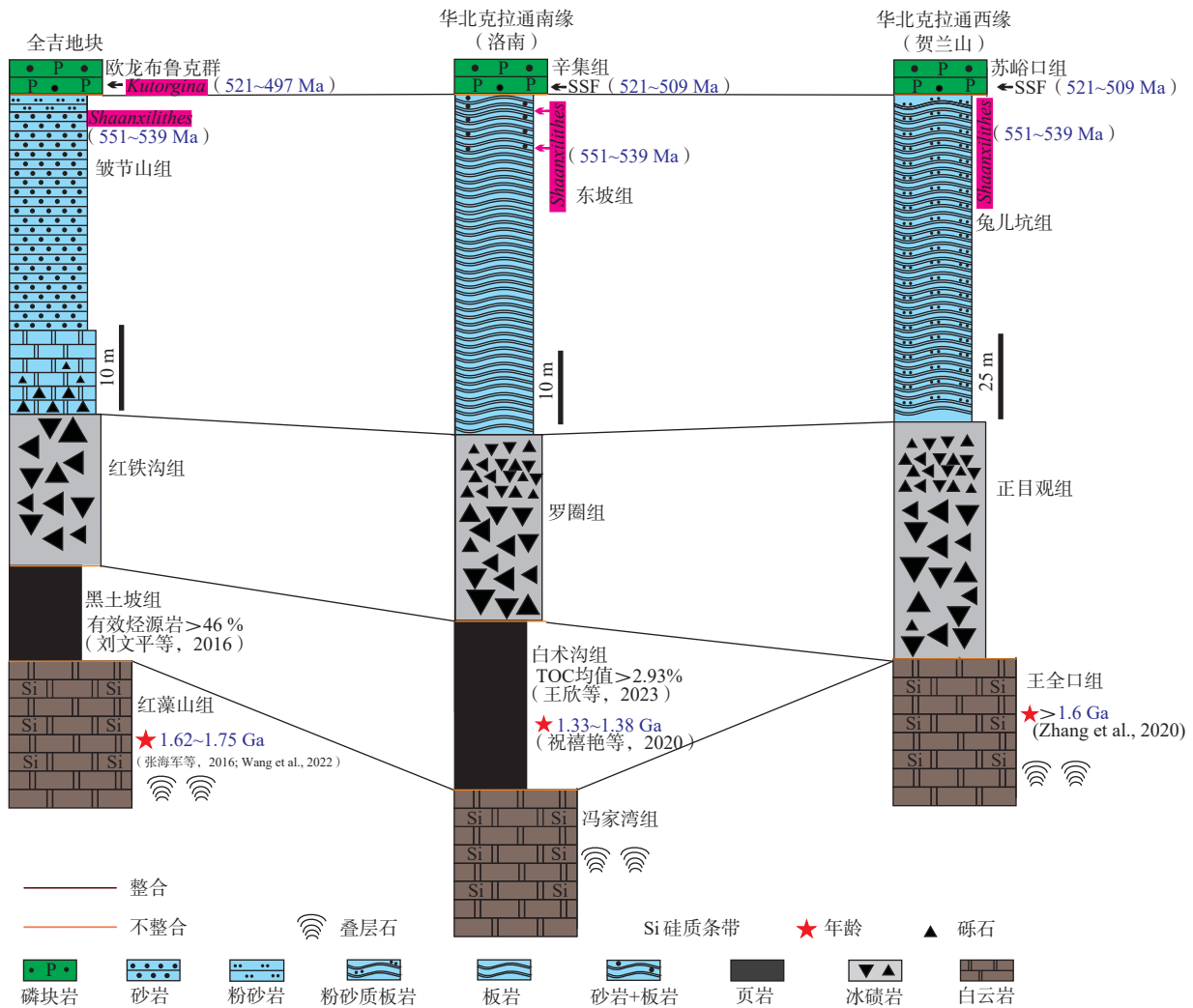


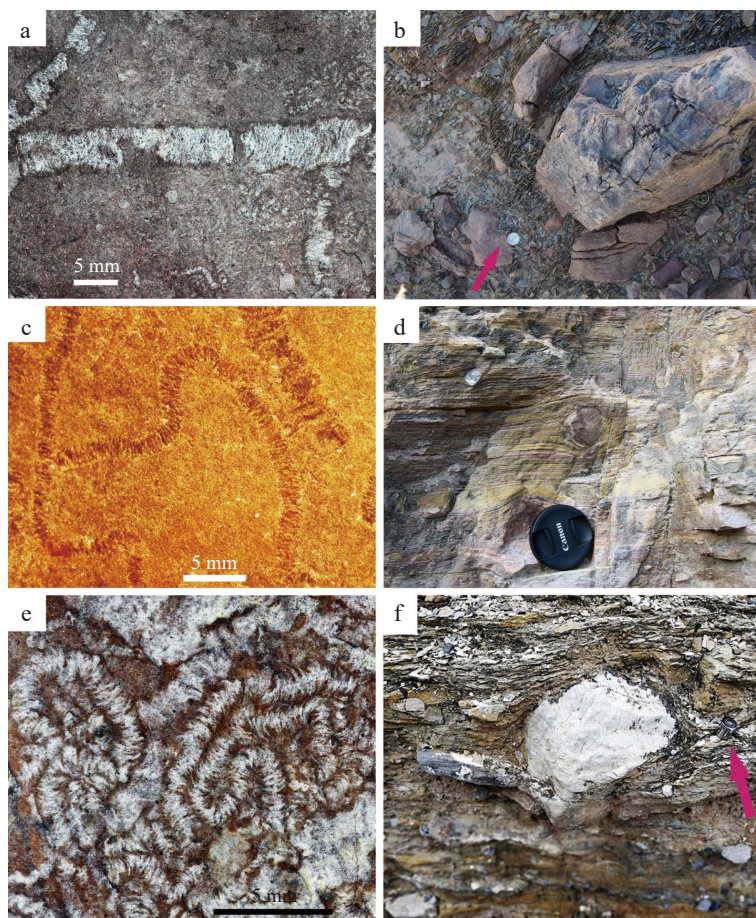
图2 全吉地块和华北克拉通西缘-南缘前寒武纪-寒武纪过渡时期综合柱状图

Fig. 2 Integrative stratigraphic columns of the boundary of Precambrian and Cambrian sequences along the Quanjia Massif and the western-southern margins of NCC

孟莪等, 1975)。邢裕盛等(1984)将采自同一剖面的化石材料进行再研究, 将其重新解释为遗迹化石, 定名为 *Shaanxilithes ningqiangensis* Xing, Yue et Zhang, 1984, 并沿用至今。然而, 关于该化石的分类位置之争并未就此停止, 其主要观点包括: 须腕动物皱节虫类(陈孟莪等, 1975), 沉积构造(罗惠麟, 1982), 遗迹化石(邢裕盛等, 1984; 林世敏等, 1986; 张录易, 1986; 丁莲芳等, 1992; 赵银胜, 1995; 李日辉等, 1997; Weber et al., 2007; Zhuravlev et al., 2009; Rogov et al., 2012), 钙化的藻类碎片(华洪等, 2004)及分类位置不明的后生动物实体化石(Bengtson et al., 1992; Shen et al., 2007; Grazhdankin et al., 2008; Meyer et al., 2012; Tarhan et al., 2014; 张志亮等, 2015; Darroch et al., 2016)。Tarhan 等(2014)在产自印度地区的 *Shaanx-*

ilithes 化石中检测出成熟的干酪根, 证实该化石是一类具有有机质壁的实体化石。自此, 关于该化石的“遗迹”和“实体”之争似乎也告一段落(表2)。根据产自全吉地块和华北克拉通的化石标本特征, *Shaanxilithes* 的原始三维形态被认为是由具褶皱的薄膜状外管和套杯结构形成的内管共同构成, 即 *Cloudina*-like 的非矿化管状动物, 为探索矿化骨骼的起源过程提供了重要线索(Wang et al., 2021b)。

Shaanxilithes 最早报道于华南板块北缘陕南宁强地区晚埃迪卡拉世灯影组高家山段(陈孟莪等, 1975)。自此, 该化石在中国不同大地构造单元相继被发现和报道(表2), 其中华南板块产地包括: 云南东部渔户村组旧城段、贵州清镇桃子冲组、陕西南部-四川北部灯影组高家山段、湖北东南部老堡组(罗惠麟等, 1982;



a、c、e. 埃迪卡拉纪潜力标志化石 *Shaanxilithes*, 分别产自全吉地块的皱节山组以及华北克拉通的东坡组和兔儿坑组(引自 Wang et al., 2021a, 2021b); b、d、f. 冰碛岩中经典的冰砾石沉积构造, 分别产自全吉地块的红铁沟组以及华北克拉通的罗圈组和正目观组(引自 Wang et al., 2021a, 2021b), 箭头指示参照物

图3 埃迪卡拉纪潜力标准化石 *Shaanxilithes* 与如影随形的新元古代冰碛岩

Fig. 3 The potential Ediacaran index fossil *Shaanxilithes* and closely associated Neoproterozoic glacial deposits

邢裕盛等, 1984; 林世敏等, 1986; 张录易, 1986; 丁莲芳等, 1992; Bengtson et al., 1992; 赵银胜, 1995; 华洪等, 2004; Weber et al., 2007; Meyer et al., 2012; 张志亮等, 2015)。

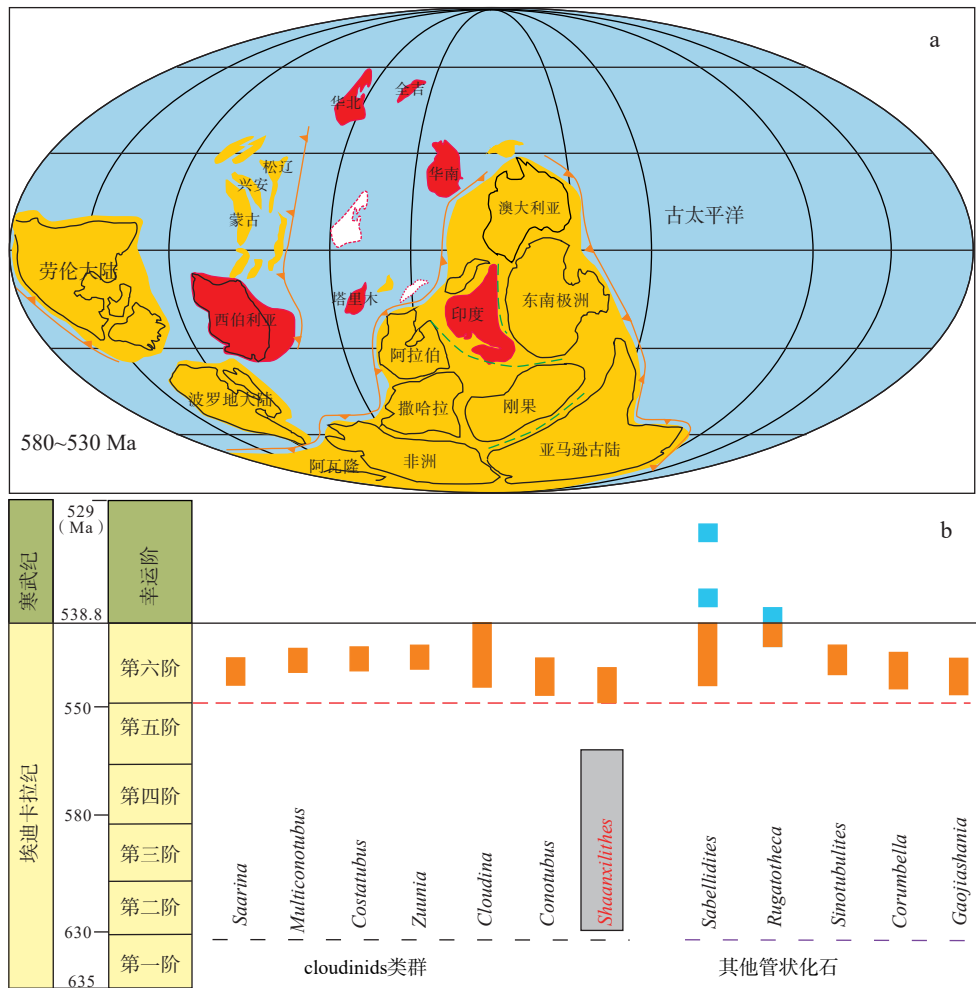
此外, 该化石在中国的产地还包括全吉地块青海柴达木盆地北缘皱节山组(王云山等, 1980; Shen et al., 2007)、华北克拉通西缘宁夏-内蒙古贺兰山地区兔儿坑组(杨式傅等, 1985; 李日辉等, 1997; Shen et al., 2007; Yang et al., 2013; Wang et al., 2021b)和西南缘东坡组(王欣, 2019; Pang et al., 2021; Wang et al., 2021a; 王欣等, 2023)。近年来, *Shaanxilithes* 在西伯利亚板块的 Khatyspyt 组和 Yudoma 组、印度克拉通的 Krol 和 Tal 群及卡拉哈里克拉通的 Nama 群中进一步被研究和报道(图 4, 表 2), 进一步扩大了该化石的分布范围, 提

升了其在全球尺度上的地层对比意义(Zhuravlev et al., 2009; Rogov et al., 2012; Tarhan et al., 2014; Darroch et al., 2016; Wood et al., 2017; Zhu et al., 2017)。

在世界范围, *Shaanxilithes* 的地层产出时代均为晚埃迪卡拉世(图 4, 表 2)。其中, 在西伯利亚板块的地层延限大致为(553±23)Ma(Zhuravlev et al., 2009), 在华南板块的地层延限大致为 551~539 Ma(Zhou et al., 2019), 在卡拉哈里克拉通的地层延限大致为 548.8~539 Ma(Darroch et al., 2016)。关于 *Shaanxilithes* 的形态学复原和亲缘关系研究尚存在不同认识, 但该化石在全球范围内广泛分布, 同时具有相对较短的地层延限, 这些特征都使其成为国际上埃迪卡拉系进一步划分和对比的潜力标准化石(Zhu et al., 2017; Zhou et al., 2019; Pang et al., 2021; Wang et al., 2021a)。文中所关

表2 埃迪卡拉纪潜力标准化石 *Shaanxilithes* 研究简史Tab. 2 The research history of Ediacaran potential index fossil *Shaanxilithes*

定名	解释	产地	时代	岩石地层单位	参考文献
cf. <i>sabellidites</i>	须腕动物	陕西北宁强	震旦纪	灯影组高家山段	陈孟莪等, 1975
—	似皱节虫遗迹	青海柴北缘	震旦纪	皱节山组	王云山等, 1980
—	泥皮构造	云南渔户村	震旦纪	渔户村组	罗惠麟等, 1982
<i>Shaanxilithes ningqiangensis</i>	遗迹化石	陕西北宁强	震旦纪	灯影组高家山段	邢裕盛等, 1984
<i>Helanoichnus helanensis</i>	遗迹化石	宁夏贺兰山	震旦纪	兔儿坑组	杨式傅等, 1985
<i>Ningxiachnus suyukouensis</i>	遗迹化石	宁夏贺兰山	震旦纪	兔儿坑组	杨式傅等, 1985
<i>Taenioichnus zhengmuguanensis</i>	遗迹化石	宁夏贺兰山	震旦纪	兔儿坑组	杨式傅等, 1985
<i>Neonerites nuiserialis</i>	遗迹化石	宁夏贺兰山	震旦纪	兔儿坑组	杨式傅等, 1985
<i>Pracalarituba ningxiaensis</i>	遗迹化石	宁夏贺兰山	震旦纪	兔儿坑组	杨式傅等, 1985
<i>Shaanxilithes ningqiangensis</i>	遗迹化石	陕西北宁强	震旦纪	灯影组高家山段	林世敏等, 1986
<i>Shaanxilithes ningqiangensis</i>	遗迹化石	陕西北宁强	震旦纪	灯影组高家山段	张录易, 1986
<i>Shaanxilithes erodus</i>	遗迹化石	陕西北宁强	震旦纪	灯影组高家山段	张录易, 1986
<i>Shaanxilithes ningqiangensis</i>	实体化石	陕西北宁强	震旦纪	灯影组高家山段	Bengtson et al., 1992
<i>Shaanxilithes ningqiangensis</i>	遗迹化石	鄂东南	震旦纪	老堡组	赵银胜, 1995
<i>Shaanxilithes ningqiangensis</i>	遗迹化石	陕西北宁强	震旦纪	灯影组高家山段	李日辉等, 1997
<i>Shaanxilithes ningqiangensis</i>	钙化藻类	贵州清镇	震旦纪	桃子冲组	华洪等, 2004
<i>Helanoichnus helanensis</i>	实体化石	宁夏贺兰山	埃迪卡拉纪	兔儿坑组	Shen et al., 2007
<i>Helanoichnus helanensis</i>	实体化石	青海柴北缘	埃迪卡拉纪	皱节山组	Shen et al., 2007
<i>Palaeopascichnus meniscatus</i>	实体化石	宁夏贺兰山	埃迪卡拉纪	兔儿坑组	Shen et al., 2007
<i>Palaeopascichnus meniscatus</i>	实体化石	青海柴北缘	埃迪卡拉纪	皱节山组	Shen et al., 2007
<i>Palaeopascichnus minimus</i>	实体化石	宁夏贺兰山	埃迪卡拉纪	兔儿坑组	Shen et al., 2007
<i>Palaeopascichnus minimus</i>	实体化石	青海柴北缘	埃迪卡拉纪	皱节山组	Shen et al., 2007
cf. <i>Shaanxilithes ningqiangensis</i>	实体化石	宁夏贺兰山	埃迪卡拉纪	兔儿坑组	Shen et al., 2007
cf. <i>Shaanxilithes ningqiangensis</i>	实体化石	青海柴北缘	埃迪卡拉纪	皱节山组	Shen et al., 2007
<i>Shaanxilithes ningqiangensis</i>	遗迹化石	陕西北宁强	埃迪卡拉纪	灯影组高家山段	Weber et al., 2007
	实体化石	西伯利亚	埃迪卡拉纪	Khatyspyt组	Grazhdankin et al., 2008
<i>Gaojianshania</i>	遗迹化石	西伯利亚	埃迪卡拉纪	Yudoma组	Zhuravlev et al., 2009
<i>Shaanxilithes ningqiangensis</i>	实体化石	陕西北宁强	埃迪卡拉纪	灯影组高家山段	Meyer et al., 2012
<i>Shaanxilithes ningqiangensis</i>	实体化石	印度	埃迪卡拉纪	Krol, Tal群	Tarhan et al., 2014
<i>Shaanxilithes ningqiangensis</i>	实体化石	云南晋宁	埃迪卡拉纪	渔户村组旧城段	张志亮等, 2015
<i>Shaanxilithes</i>	实体化石	纳米比亚	埃迪卡拉纪	Nama群	Darroch et al., 2016
<i>Shaanxilithes</i>	遗迹化石	西伯利亚	埃迪卡拉纪	Yudoma组	Wood et al., 2017
<i>Shaanxilithes</i>	实体化石	西伯利亚	埃迪卡拉纪	Yudoma组	Zhu et al., 2017
<i>Shaanxilithes ningqiangensis</i>	实体化石	云南晋宁	埃迪卡拉纪	渔户村组旧城段	房瑞森等, 2021
<i>Shaanxilithes ningqiangensis</i>	实体化石	宁夏贺兰山	埃迪卡拉纪	兔儿坑组	Wang et al., 2021a
<i>Shaanxilithes ningqiangensis</i>	实体化石	青海柴北缘	埃迪卡拉纪	皱节山组	Wang et al., 2021a
<i>Shaanxilithes ningqiangensis</i>	实体化石	河南西部	埃迪卡拉纪	东坡组	Wang et al., 2021b
<i>Shaanxilithes ningqiangensis</i>	实体化石	青海柴北缘	埃迪卡拉纪	皱节山组	Pang et al., 2021
<i>Shaanxilithes ningqiangensis</i>	实体化石	陕西商洛、宝鸡	埃迪卡拉纪	东坡组	王欣等, 2023



a. 红色标注板块为 *Shaanxilithes* 的古地理分布范围(据 Zhao et al., 2018; Pang et al., 2021; Wang et al., 2021a 修改);
 b. 埃迪卡拉纪末期管状化石类群的地层延限(据 Yang et al., 2020; Wang et al., 2021b 修改)

图4 埃迪卡拉纪潜力标准化石陕西迹在全球范围内的古地理分布及其地层延限

Fig. 4 Paleogeographic distribution and stratigraphic range of the late Ediacaran potential index fossil *Shaanxilithes* in global scale

注的重点化石产自皱节山组上部, 位于皱节山组(小高炉群)与欧龙布鲁克群界线之下大约 7 m 的位置(图 2、图 3a), 据此可以将小高炉群的时代上限(即皱节山组形成时代)大致限定为埃迪卡拉纪晚期, 大致为 551~539 Ma(图 4)。

以 Avalon 生物群(570~560 Ma)、White Sea 生物群(558~550 Ma)和 Nama 生物群(551~538.8 Ma)为代表的埃迪卡拉型化石库, 见证了以宏体生物为主导的现代型海洋生态系统的起源过程, 同时也作为埃迪卡拉系划分和对比重要的标志(Narbonne, 2005; Darroch et al., 2023)。中国的埃迪卡拉型化石研究总体上相对薄弱, 长久以来的相关工作仅见于华南的石板滩生物群(Chen et al., 2014), 而其他的前寒武纪构造单元尚缺乏此类研究报道。特别需要指出

的是, 近来研究报道产自全吉地块皱节山组中的“叶状体”化石 *Charnia*, 进一步扩大了埃迪卡拉型化石在全球尺度上的古地理分布范围(Pang et al., 2021; Wang et al., 2022), 同时也打开了中国西北地区前寒武纪研究的新局面, 意义十分重大。毫无疑问, “叶状体”化石 *Charnia* 是埃迪卡拉型生物群中的“杰出代表”, 具体表现为地层延限长(Avalon 生物群-Nama 生物群)、在全球范围内广泛分布以及和生境较广等特点(Pang et al., 2021), 特别是成功地渡过了发生于 White Sea-Nama 过渡时期(~550 Ma)的地球历史上首次生物大绝灭事件(Darroch et al., 2023)。总体而言, “全吉山生物群”与华南的石板滩生物群时代大体相当, 其生态系统的主体面貌均为固着底栖的非矿化“管状动物”所主导(如陕西迹和

雾河管),同时共生于埃迪卡拉型“叶状体”化石类群。综合石板滩生物最新的年龄数据(Yang et al., 2021),可以进一步推测小高炉群的时代上限为551~543 Ma。

3 全吉地块的大不整合事件尺度

晚前寒武纪—寒武纪过渡时期是地球演化重要的历史转折期,期间包括“超大陆的聚合和裂解事件”“雪球地球事件”“埃迪卡拉纪大冰期事件”“大不整合事件”“新元古代大氧化事件”及“海水成分变化”等一系列重大的地球环境变化因素(Hoffman et al., 1998; Brennan et al., 2004; Eyles et al., 2004; Canfield et al., 2007; Keller et al., 2019; Wang et al., 2023),同时伴随着“寒武纪大爆发”这一革命性的生物演化事件(Zhang et al., 2014)。在世界范围内,寒武纪界限附近通常存在着不同尺度的沉积间断,具体表现为显生宙沉积盖层不整合于不同时代的前寒武纪岩石之上,即“大不整合事件”(Peters et al., 2012)。关于“大不整合事件”的科学内涵尚存在不同的理解和认识,并导致其触发机制和发生限时长久以来存在较大的争议,其可能的成因解释包括:中元古代—新元古代之交的“罗迪尼亚超大陆聚合和裂解事件”,以“雪球地球事件”为主导的新元古代冰川剥蚀作用,埃迪卡拉纪—寒武纪之交的劳亚古陆“陆缘裂谷活动”和“泛非造山运动”(Squire et al., 2006; Maruyama et al., 2007; Zhang et al., 2012; Cox et al., 2016; Karlstrom et al., 2018; Flowers et al., 2020)。同时,“大不整合事件”所导致强烈的风化和剥蚀作用也给地球环境带来极为深远的影响,包括引起大气成分和海水成分发生剧烈的变化,并可能最终成为诱发“寒武纪生命大爆发”重要的环境因素(Peters et al., 2012)。此次研究关于“大不整合事件”的科学内涵被限定为:发生于埃迪卡拉纪—寒武纪之交的、可能对地球环境和生命起源演化产生深远影响的(如“寒武纪生命大爆发”),同时对于全球构造格局重建(如“泛非造山运动”)和构造亲缘关系讨论具有重要参考价值的地质演化事件(Squire et al., 2006; Peters et al., 2012; Cox et al., 2016; Wan et al., 2019),即对相对狭义的“大不整合事件”开展研究讨论。

欧龙布鲁克群平行不整合于小高炉群皱节山组

之上,其主要分布于全吉山、欧龙布鲁克山以及石灰沟地区。在全吉山地区,欧龙布鲁克群仅存在底部,厚度约为1.5 m,岩性为灰白色厚层含磷砾石英砂岩;在欧龙布鲁克山地区,欧龙布鲁克群沉积厚度近千米,时代为寒武纪—奥陶纪,底部同样为一套含磷岩系。新元古代末期—寒武纪早期是全球范围广泛的成磷期,因此磷块岩也成为这一时期地层划分对比的重要标志之一(Wang et al., 2021a)。部分学者认为,欧龙布鲁克群底部的磷块岩形成时代可与华南地区广泛分布的梅树村期磷块岩(寒武纪纽芬兰统)进行对比,进而提出全吉地块寒武纪的底界应早于520 Ma(马帅等, 2018)。然而,生物地层学资料显示,在欧龙布鲁克山地区南坡欧龙布鲁克群底部磷块岩中产腕足动物*Kutorgina Billings* 1861,并被视为全吉地块早古生代的最低层位(孙崇仁, 1997)。腕足动物*Kutorgina*在全球范围内广泛分布,其产地包括中国、美国、加拿大、哈萨克斯坦、格陵兰、俄罗斯等多个国家和地区,化石延限仅限于寒武纪第二统至第三统(520~497 Ma),具有重要的生物地层学意义(Malakhovskaya, 2013; 刘玉娟等, 2015)。因此,全吉地块缺失寒武纪纽芬兰统,欧龙布鲁克群底部的磷块岩不能等同于华南地区的梅树村期成磷期(图5)。同时,综合小高炉群顶界时限(551~543 Ma),其大不整合事件发生时限造成的沉积间断大致为25~50 Ma。华北克拉通西缘—西南缘同样沉积了一套寒武纪含磷岩系(图5),即苏峪口组 and 辛集组,分别平行不整合于埃迪卡拉纪产*Shaanxilithes*化石的海相碎屑岩兔儿坑组和东坡组之上(图2、图5)。根据三叶虫和小壳化石资料(周志强等, 1976; 张文堂等, 1979; Li et al., 2014, 2016; 潘兵, 2019),苏峪口组和辛集组底界大致为寒武纪第二统第三阶—第四阶(520~509 Ma),即华北克拉通西缘—西南缘同样缺失寒武纪纽芬兰统,其大不整合尺度大致为25~40 Ma(图5)。相信随着生物地层学研究的深入,欧龙布鲁克群底界(520~497 Ma)将会被进一步限定。此次研究中暂将其与华北克拉通的苏峪口组和辛集组进行对比(图5)。近年来,研究显示欧龙布鲁克群下部寒武纪地层的碎屑锆石年龄组成与下伏的前寒武纪沉积盖层存在明显不同,预示着全吉地块在前寒武纪—寒武纪转换时期发生过区域性的大不整合事件(Wang et al., 2022),同时也揭示出全吉地块与华北克拉通南缘在这一时期具有相似的沉积—构造演化史



图5 华南板块、华北克拉通和全吉地块埃迪卡拉纪—寒武纪界线附近岩石地层单位时空对比
(据 Zhou et al., 2019; Zhu et al., 2019; Wang et al., 2021a 修改)

Fig. 5 Integrative stratigraphic correlation of the Ediacaran-Cambrian successions from the North China Craton, South China Block and Qianji massif

(Wang et al., 2021a, 2022)。

4 全吉地块的新元古代冰期记录

4.1 全吉地块的新元古代冰川形成期次

在新元古代末期, 地球曾经历了数次的极寒事件, 而强烈的冰川活动也在全世界范围内留下了大量的冰碛物沉积记录(赵彦彦等, 2011; Yang et al., 2013), 特别是极端气候环境“雪球地球事件”(Snowball Earth)模式的提出(Hoffman et al., 1998), 其“等时性”特征使其成为新元古代地层划分对比的重要标志。目前, 国际上将新元古代冰期事件主体分为拉伸纪 Kaigas 冰期(757~741 Ma)、成冰纪 Sturtian 冰期(717~660 Ma)和 Marinoan 冰期(651~635 Ma)、埃迪卡拉纪 Gaskiers 冰期(~582 Ma)4 期(Yang et al., 2013;

Wang et al., 2023)。其中, Sturtian 冰期和 Marinoan 冰期具有全球性分布特征, 而 Kaigas 冰期和 Gaskiers 冰期的发生范围则相对局限(Yang et al., 2013)。此外, 近年来也有一系列关于埃迪卡拉纪 post-Gaskiers 冰期的相关研究报道, 其形成时限在从极地到赤道不同纬度的构造单元间具有明显的不等时性(580~560 Ma), 但对于早期生命演化意义重大(Wang et al., 2023)。此外, 新元古代冰川事件也被认为与 Rodinia 超大陆裂解过程具有相关性(Eyles et al., 2004), 而冰川的形成期次也为不同前寒武纪板块间的构造亲缘讨论提供重要依据(Young, 1995)。

关于全吉地块的新元古代冰川期次长久以来存在不同认识, 主要观点包括一期(王树洗, 1982; 赵祥生, 1992; 孙崇仁, 1997; Shen et al., 2007; 张海军等, 2016)、二期(金玉声等, 1983; 陈世悦等, 2015)和三期

(孙娇鹏等, 2014, 2016)。麻黄沟组岩性主要是一套砾岩、砂岩及含砾砂岩, 砾石成分受下伏地层所控制; 麻黄沟组与下伏达肯达板变质岩群呈角度不整合接触, 与其上的枯柏木组呈平行不整合接触(孙崇仁, 1997)。金玉声等(1983)首次提出麻黄沟组属于冰川成因, 兼具重力流改造特征, 并将其与华南地区广泛分布的南沱组冰碛岩(Marinoan冰期)进行对比。陈世悦等(2015)认为, 尽管麻黄沟组中缺少“冰坠石”等经典的冰水沉积构造, 但根据该组中砾石的冰川擦痕、镜面和混杂堆积等冰川作用痕迹仍可确定该组的冰川成因。此外, 李怀坤等(2003)报道枯柏木组中的玄武安山岩锆石年龄为(738±28)Ma, 陈世悦等(2015)根据该锆石年龄进而提出下伏地层麻黄沟“冰碛岩”形成时代对应国际上的Kaigas冰期。也有不同观点认为, 麻黄沟组底部含砾粗砂岩具有扇砾岩的特征, 而该组上部发育的斜层理和交错层理则属于典型的河床沉积(李怀坤等, 2003)。同时, 前人在研究中曾指出, 枯柏木组中的玄武安山岩锆石类型十分复杂, 所测得的年龄数据较为混乱, 数据可靠性尚需进一步评估(张海军等, 2016)。

枯柏木组下部为砾岩和含砾砂岩, 向上逐渐过渡为中细粒石英砂岩, 发育斜层理及平行层理, 该组与下伏地层麻黄沟组呈平行不整合接触, 与上覆石英梁组同样为平行不整合接触。根据沉积学特征及化学蚀变指数CIA, 孙娇鹏等(2016)首次提出枯柏木组中的杂砾岩属于冰川成因, 同时根据该组中伴生的BIF型铁建造, 将枯柏木组冰碛岩的形成时代对应新元古代全球性冰川事件Sturtian冰期(相当于华南的长安冰期)。然而, 也有不同观点认为, 枯柏木组中发育不对称波痕及斜层理, 砾石总体上磨圆度较好, 垂向上碎屑粒度分异明显, 属于典型的滨海相沉积(李怀坤等, 2003)。此外, 年代地层学证据显示, 麻黄沟组和枯柏木组中的最小锆石年龄数据分别为1780 Ma和(1781±28)Ma(Sun et al., 2019; 旷红伟等, 2023)。张海军等(2016)在全吉群顶部红藻山组中获得两层凝灰岩的岩浆锆石U-Pb同位素年龄分别为(1640±15)Ma和(1646±20)Ma, 为全吉地块前寒武纪地层格架的确立提供了重要依据(图2), 并据此可以完全排除麻黄沟组和枯柏木组属于新元古代冰川沉积的可能性, 更多的年代学数据见Wang等(2022)。关于小高炉群红铁沟组的冰川成因不存在争议(王树洗, 1982; 王云山等, 1983; 赵祥生, 1992; 孙崇仁, 1997; 李怀坤等, 2003;

Shen et al., 2007; 王超等, 2015; 张海军等, 2016; Pang et al., 2021; Wang et al., 2021a), 该组中冰坠石、冰川擦痕等典型冰川沉积现象十分发育(图3b)。综上所述, 全吉地块中仅存在一期新元古代冰碛岩, 即红铁沟组冰碛岩。

4.2 红铁沟组冰碛岩的时空对比及其构造-古地理意义

中国的主要大地构造单元(包括华南板块、华北克拉通、全吉地块和塔里木板块)均存在新元古代冰碛岩记录。关于构建不同前寒武纪构造单元间新元古代冰碛岩的时空对比关系, 也将为板块间的构造亲缘关系研究提供重要依据。在华南地区的新元古代冰期事件沉积记录主要包括长安冰期和南沱冰期, 并分别对应国际上的Sturtian冰期和Marinoan冰期(Zhou et al., 2004)。在塔里木板块东缘的库鲁克塔格地区可能存在着4期新元古代冰碛岩, 自下而上分别为贝义西组、阿勒通沟组和特瑞爱肯组以及汉格尔乔克组, 并可能分别对应国际上的4期新元古代冰期事件(Xiao et al., 2004; Xu et al., 2009; 2013; 高林志等, 2013)。中国北方的诸多大地构造单元, 包括华北克拉通、全吉地块、北祁连地块和阿拉善地块, 仅存在一期新元古代冰期事件, 但时代归属大都长久存在较大争议(王欣, 2019; 柳永清等, 2023)。

全吉地块仅存在一期新元古代冰碛岩, 即红铁沟组冰碛岩。然而, 由于缺乏精确的锆石年龄数据以及稳定同位素数据, 关于红铁沟组的形成时代尚存在较大争议, 主要观点包括成冰纪(王树洗, 1982; Lu et al., 1985; 赵祥生, 1992)、埃迪卡拉纪(Shen et al., 2007; 张海军等, 2016)和寒武纪(王云山等, 1983; 孙崇仁, 1997)。王云山等(1980)认为, 红藻山组白云岩可与华南地区广泛分布埃迪卡拉纪末期的灯影组白云岩进行对比, 据此推测红铁沟组的形成时代为早寒武世, 这一观点也得到后续研究者的广泛认同并被《青海省岩石地层单位》所采纳(孙崇仁, 1997)。也有不同观点认为, 红藻山组白云岩中的叠层石化石与华北地区蓟县组叠层石组合基本一致, 同时根据皱节山组中所产出的皱节虫类化石认为组形成时代为晚前寒武纪, 据此推测组红铁沟组的形成时代应为成冰纪, 与华南地区广泛分布的南沱组冰碛岩层位相当(王树洗, 1982; 赵祥生, 1992)。此外, 还有部分学者倾向于将红铁沟组与华北克拉通西缘-西南缘发育的正目关组、罗圈组冰碛岩以及塔里木板块发育的汉格尔乔克组冰碛岩进行对比, 并将其时代归为埃迪卡拉纪(Shen et

al., 2007; 张海军等, 2016; Yang et al., 2013)。

受风化作用影响, 红铁沟组与下伏地层黑土坡的界限通常不甚清晰。因此, 关于红铁沟组与黑土坡组的接触关系始终存在较大争议。根据《青海省岩石地层》, 红铁沟组现定义为整合(或不整合)于黑土坡组黄绿色泥质粉砂岩之上, 整合于皱节山组含砾白云岩之下的一套冰碛砾岩(孙崇仁, 1997)。王云山等(1983)认为红铁沟组与黑土坡组呈整合或平行不整合接触, 而赵祥生(1992)则认为二者呈断层式接触。Shen等(2010)认为红铁沟组与黑土坡组呈整合接触。王超等(2015)报道了红铁沟组与黑土坡组之间存在风化壳, 并提出二者间存在一个较大的不整合, 指示了一次大规模的构造运动。关于黑土坡组的生物地层学研究开展较早, 王云山等(1983)首次报道了黑土坡组中的虫牙化石, 并将该组时代归为寒武纪早期。Shen等(2010)认为王云山等(1983)报道的黑土坡中虫牙化石可能是 *Redkinia* 的化石碎片, 并将该组时代划归为埃迪卡拉纪晚期。在世界范围内, 目前 *Redkinia* 仅见报道于东欧地台(~555 Ma), 分布范围相对局限, 加之地层沿限尚不确定。因此, 该化石的生物地层学意义有待进一步的评估(Vorob'Eva et al., 2009)。此外, 前人曾在黑土坡组碳质页岩中获得 Rb-Sr 等值线年龄为(590±26)Ma(王云山等, 1980), 但限于测试方法具有历史局限性, 其数据的可靠性同样值得商榷。综上所述, 鉴于目前黑土坡组中尚缺乏可靠的生物地层学资料和锆石年龄数据, 笔者认为难以通过黑土坡组对红铁沟组冰碛岩形成时代的下限进行精确限定(图2)。前人研究中对于红铁沟组与皱节山组之间的整合关系几乎不存在争议(孙崇仁, 1997; Shen et al., 2007; 张海军等, 2016), 这无疑为红铁沟组的形成时代提供重要依据。综合皱节山组中报道的埃迪卡拉纪潜力标准化石 *Shaanxilithes* 的化石沿限(551~539 Ma), 笔者认为红铁沟组冰碛岩的形成时代应为埃迪卡拉纪(Pang et al., 2021; Wang et al., 2021a), 可能对应国际上的 post-Gaskiers 冰期(580~560 Ma)(Pang et al., 2021; Wang et al., 2023), 而不能等同于华南广泛分布的成冰纪南沱组冰碛岩(图2)。

华北克拉通仅发育一期新元古代冰碛岩, 即“罗圈期”冰碛岩, 整合其上为一套富含有机质的海相细粒碎屑岩, 主要分布于克拉通的西缘-西南缘-南缘(王鸿祯, 1985); 在华北克拉通西缘, 二者分别命名为正目关组(冰碛岩)和兔儿坑组(碎屑岩段); 在克拉通

西南缘二者分别命名为罗圈组(冰碛岩)和东坡组(碎屑岩段)。华北克拉通分布的“罗圈期”冰碛岩通常具有如下特征: ①总体可分为下部的冰川沉积和上部的冰水沉积, 其中冰川沉积多为块状结构, 层理不显, 砾石含量较高, 砾径较大; 冰水沉积的特征为层理逐渐明显, 砾石含量逐渐减少, 可见冰坠石经典沉积构造, 并逐渐过渡为上部的海相细粒碎屑岩段。②砾石成分多受下伏岩体控制, 地层沉积厚度横向上变化较大, 属于与构造活动(裂谷环境)相关的山岳冰川沉积(吴瑞棠等, 1988; 张抗, 1991; 王宗起, 1992; 顾其昌, 1996; 席文祥等, 1997)。与之相似的, 全吉地块分布的红铁沟冰碛岩同样可分为上下两部分, 即下部以块状泥砾岩为主的冰川沉积和上部层理逐渐清晰、含冰坠石构造的冰水沉积(图4)(孙崇仁, 1997; 马帅等, 2019), 其形成于弧后扩张伸展环境(马帅等, 2019), 其砾石成分受下伏岩体控制, 地层沉积厚度在横向上变化较大(孙崇仁, 1997)。

文中所关注的埃迪卡拉纪标准化石 *Shaanxilithes* 在华北西缘-西南缘分布的新元古代末期海相碎屑岩兔儿坑组和东坡组中具有广泛的分布和稳定的层位产出(Shen et al., 2007; Yang et al., 2013; Wang et al., 2021a; 王欣等, 2023), 同时也为整合其下的“罗圈期”冰碛岩提供了可靠的时代依据(图2、图3、图5)。此外, 根据罗圈组和正目观组中碳氧稳定同位素变化特征, 同样指示“罗圈期”冰碛岩的形成时代为埃迪卡拉纪(高林志等, 2010; Yang et al., 2013)。综合岩性组合特征和地层学研究进展(Pang et al., 2021; Wang et al., 2021a), 全吉地块红铁沟组冰碛岩的形成时代可与华北西缘-西南缘分布的正目观组和罗圈组进行对比(图5)。

在缺乏有效的古地磁数据和构造-热事件记录情况下, 地层学(包括生物地层学、年代地层学和事件地层学)和生物古地理研究对于前寒武纪的构造亲缘性解释就更显得尤为重要。古地磁证据显示, 成冰纪时期(720~635 Ma)的冰川作用范围可以达到赤道附近, 即全球冰封的“雪球地球模式”(Hoffman et al., 1998); 相比之下, 显生宙的冰川沉积记录则多发生于中-高纬度地区(Cocks et al., 2020; Pang et al., 2021)。研究显示, 埃迪卡拉纪的 post-Gaskiers 冰期事件(580~560 Ma)受板块纬度变化因素控制因而具有一定的不等时性(Wang et al., 2023), 并可能对早期生命的辐射演化以及地球历史中的首次生命大灭绝事件

产生了一系列深刻地影响。更为重要的是, post-Gaskiers 冰期记录多发生于冈瓦纳大陆周缘的中高纬度地区, 并因此具有重要的构造-古地理重建意义(Pang et al., 2021)。综上所述, 关于全吉地块新元古代冰碛岩形成期次的研究进展, 为中国西北地区的前寒武纪构造-古地理重建研究工作开创了一个新局面, 即在埃迪卡拉纪—寒武纪过渡时期, 全吉地块与华北板块同处于中高纬度, 而不是之前的低纬度地区(图4)(Pang et al., 2021)。

5 结论

(1)综合生物地层学研究进展, 皱节山组的时代为埃迪卡拉纪末期(551~543 Ma), 与华北克拉通西缘-西南缘分布的兔儿坑组和东坡组时代相当。

(2)全吉地块缺失寒武系组芬兰统, 其寒武纪底界的最低层位为第二统或第三统含磷岩系, 其“大不整合事件”造成的地层缺失为25~50 Ma, 同样接近华北克拉通西缘-西南缘。全吉地块仅存在一期新元古代冰碛岩, 即埃迪卡拉纪红铁沟组冰碛岩, 其与华北克拉通西缘-西南缘分布的罗圈组和正目观组冰碛岩时代大致相当。

(3)全吉地块红藻山组白云岩的形成时代为古元古代末期, 可能与华北克拉通西缘-西南缘分布的王全口组和冯家湾组白云岩时代接近, 而不能等同于华南地区广泛分布的埃迪卡拉纪灯影组白云岩。

(4)综合地层组合特征、新元古代冰期形成期次和大不整合事件尺度等研究进展认为, 全吉地块在埃迪卡拉纪—寒武纪过渡时期与华北克拉通具有较近的构造亲缘关系, 二者在这一时期同处于中高纬度, 而不是之前认为的低纬度地区。

致谢: 感谢审稿专家提出的诸多宝贵意见和建议。感谢西北大学王超研究员在本文撰写过程中给予的诸多指导和帮助。

参考文献(References):

陈孟莪, 陈祥高, 劳秋元. 陕南震旦系上部地层中的后生动物化石及其地层意义[J]. 地质科学, 1975, 2(3): 181-190.
CHEN Menge, CHEN Xianggao, LAO Qiuyuan. An introduction to the metazoa fossil from the upper Sinian System in southern Shensi and its stratigraphic significance[J]. Sientia Geologica Sinica, 1975, 2(3): 181-190.

陈世悦, 孙娇鹏, 刘文平, 等. 青海大煤沟新元古代冰碛岩的发现及地质意义[J]. 地层学杂志, 2015, 39(1): 81-88.
CHEN Shiyue, SUN Jiaopeng, LIU Wenping, et al. The discovery of Neoproterozoic tillite in the Damengou region of Qinghai province and its geological significance[J]. Journal of Stratigraphy, 2015, 39(1): 81-88.
丁莲芳, 张录易, 李勇, 等. 扬子地台北缘晚震旦世—早寒武世早期生物群研究[M]. 北京: 科学技术出版社, 1992: 1-156.
房瑞森, 梁悦, 华洪, 等. 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[J]. 古生物学报, 2021, 60(1): 25-41.
FANG Ruisen, LIANG Yue, HUA Hong, et al. First report of the problematic Ediacaran fossil *Shaanxilithes* from the Jiucheng Member of Zhujiaqing Section in Huize, Yunnan province[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2021, 60(1): 25-41.
高林志, 王自强, 张传恒. 华北块体南缘上元古界氧碳同位素特征及其沉积环境意义[J]. 古地学报, 2010, 12(2): 639-654.
GAO Linzhi, WANG Ziqiang, ZHANG Chuanheng. Geochemical character of C/O isotope of the Upper Proterozoic from southern margin of North China Block and implication for its depositional environment[J]. Journal of Palaeogeography, 2010, 12(2): 639-654.
高林志, 郭宪璞, 丁孝忠, 等. 中国塔里木板块南华纪成冰事件及其地层对比[J]. 地球学报, 2013, 34(1): 39-57.
GAO Linzhi, GUO Xianpu, DING Xiaozhong, et al. Nanhua glaciation event and its stratigraphic correlation in Tarim Plate, China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2013, 34(1): 39-57.
葛肖虹, 刘俊来. 被肢解的“西域克拉通”[J]. 岩石学报, 2000, 16(1): 59-66.
GE Xiaohong, LIU Junlai. Broken “Western China Craton”[J]. Acta Petrologica Sinica, 2000, 16(1): 59-66.
顾其昌. 宁夏回族自治区岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996, 1-132.
华洪, 陈哲, 张录易. *Shaanxilithes* 在贵州的发现及其意义[J]. 地层学杂志, 2004, 28(3): 265-269.
HUA Hong, CHEN Zhe, ZHANG Luyi. *Shaanxilithes* from Tao-zichong Formation of Guizhou Province and its significance[J]. Journal of Stratigraphy, 2004, 28(3): 265-269.
金玉声, 邱盛南. 柴达木盆地北缘全吉山震旦系全吉群底部砾岩成因的讨论[J]. 西北地质, 1983, (3): 57-65.
JIN Yusheng, QIU Shengnan. Discussion on the genesis of conglomerates at the bottom of the Sinian Quanji Group in the northern margin of the Qaidam Basin[J]. Northwestern Geology, 1983, (3): 57-65.
旷红伟, 柳永清, 耿元生, 等. 中国中-新元古代地层研究进展及建议划分、对比方案[J]. 地质学报, 2023, 97(12): 3961-4019.
KUANG Hongwei, LIU Yongqing, GENG Yuansheng, et al. Research advances, a subdivision and correlation of the Meso-Neoproterozoic stratigraphy in China[J]. Acta Geologica Sinica,

- 2023, 97(12): 3961-4019.
- 李怀坤, 陆松年, 王惠初, 等. 青海柴北缘新元古代超大陆裂解的地质记录——全吉群[J]. *地质调查与研究*, 2003, 26(1): 27-37.
- LI Huaikun, LU Songnian, WANG Huichu, et al. Geological records of the Neoproterozoic supercontinent fragmentation in the northern margin of Chai Lake, Qinghai Province: Quanji Group [J]. *Geological Survey and Research*, 2003, 26(1): 27-37.
- 李日辉, 杨式浦, 李维群. 中国震旦系-寒武系界线过渡层遗迹化石研究[M]. 北京: 地质出版社, 1997, 1-99.
- 李猛, 王超, 李荣社, 等. 柴达木盆地北缘全吉群皱节山组碎屑锆石年代学特征及其地质意义[J]. *地球科学*, 2018, 43(12): 126-134.
- LI Meng, WANG Chao, LI Rongshe, et al. The Detrital Zircon Geochronology and Geological significance of the Zhoujieshan Formation, Quanji Group in the north margin of Qaidam Basin[J]. *Earth Science*, 2018, 43(12): 126-134.
- 林世敏, 张运芬, 陶喜森, 等. 陕南震旦系上统高家山组发现的后生动物、遗迹化石和宏观藻类[J]. *陕西地质*, 1986, 4(1): 9-17.
- LIN Shimin, ZHANG Yunfen, TAO Xisen, et al. Body and trace fossils of metazoan and algal macrofossils from the upper Sini-an Gaojiashan Formation in southern Shaanxi[J]. *Geology of Shaanxi*, 1986, 4(1): 9-17.
- 刘玉娟, 赵元龙, 刘玉莹, 等. 贵州剑河八郎“清虚洞组” *Kutorgina* Billings, 1861 的初步研究[J]. *古生物学报*, 2015, 54(3): 342-350.
- LIU Yujuan, ZHAO Yuanlong, LIU Yuying, et al. A preliminary study of *Kutorgina* Billings, 1861 from the Cambrian “Tsingshutung Formation” of Guizhou, China[J]. *Acta palaeontologica Sinica*, 2015, 54(3): 342-350.
- 柳永清, 旷红伟, 陈骁帅, 等. 中国北方埃迪卡拉纪冰碛岩及冰川作用[J]. *地质学报*, 2023, 97(12): 3984-4005.
- LIU Yongqing, KUANG Hongwei, CHEN Xiaoshuai, et al. Ediacaran diamictites and glaciation in northern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(12): 3984-4005.
- 陆松年, 于海峰, 赵风清. 青藏高原北部前寒武纪地质初探[M]. 北京: 地质出版社, 2002, 1-130.
- 罗惠麟, 蒋志文, 武希彻, 等. 云南东部震旦系—寒武系界线[M]. 昆明: 云南人民出版社, 1982, 1-200.
- 马帅, 陈世悦, 孙娇鹏, 等. 柴达木盆地北缘新元古代-前中生代几个重要不整合面地质特征及其构造意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2018, 43(6): 22-35.
- MA Shuai, CHEN Shiyue, SUN Jiaopeng, et al. Geological Characteristics of Unconformities in Neoproterozoic to Pre-Mesozoic Sequences in the North Qaidam Area and their Tectonic Implications[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2018, 43(6): 22-35.
- 马帅, 周兆华, 陈世悦, 等. 柴北缘全吉地区晚震旦世冰川沉积特征及地质意义[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2019, 43(3): 1-12.
- MA Shuai, ZHOU Zhaohua, CHEN Shiyue, et al. Glacial sedimentary characteristics of late Sinian in Quanji area in the northern margin of Qaidam Basin and its geological significance[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2019, 43(3): 1-12.
- 潘兵. 华北地台南缘寒武纪早期小壳化石研究[D]. 南京: 中国科学技术大学, 2019, 1-253.
- PAN Bing. Early Cambrian Small Shelly Fossils along the southern margin of North China Platform: systematics, biostratigraphy and palaeobiogeography[D]. Nanjing: University of Science and Technology of China, 2019, 1-253.
- 全国地层委员会. 中国地层表(2014)说明书[M]. 北京: 地质出版社, 2018.
- 全国地层委员会《中国地层表》编委会. 中国地层表[R]. 全国地层委员会《中国地层表》编委会, 2014.
- 孙崇仁. 青海省岩石地层[M]. 北京: 地质出版社, 1997, 1-338.
- 孙娇鹏, 陈世悦, 彭渊, 等. 全吉地区新元古代滨岸冰川沉积特征及地质意义[J]. *地质学报*, 2014, 88(7): 1334-1340.
- SUN Jiaopeng, CHEN Shiyue, PENG Yuan, et al. Sedimentary Characteristic of Neoproterozoic Glaciomarine in the Quanji Area and Its Geological Significance[J]. *Acta geologica Sinica*, 2014, 88(7): 1334-1340.
- 孙娇鹏, 陈世悦, 彭渊, 等. 欧龙布鲁克地块新元古代早期冰川事件: 来自 CIA 指数的证据[J]. *地质论评*, 2016, 62(1): 29-36.
- SUN Jiaopeng, CHEN Shiyue, PENG Yuan, et al. Early Neoproterozoic Glacier Event in Oulongbuluke Block: Evidence from CIA Index[J]. *Geological Review*, 2016, 62(1): 29-36.
- 万渝生, 许志琴, 杨经绥, 等. 祁连造山带及邻区前寒武纪深变质基底的时代和组成[J]. *地球学报*, 2003, 24(74): 319-324.
- WAN Yusheng, XU Zhiqin, YANG Jingsui, et al. The Precambrian High-grade Basement of the Qilian Terrane and Neighboring Areas: Its Ages and Compositions[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2003, 24(74): 319-324.
- 王超, 李猛, 李荣社, 等. 青海柴达木盆地北缘全吉群内部存在区域性不整合[J]. *地质通报*, 2015, 34(2-3): 364-373.
- WANG Chao, LI Meng, LI Rongshe, et al. Recognition of the regional unconformity in the Neoproterozoic Quanji Group on the north margin of the Qaidam Basin in Qinghai Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(2-3): 364-373.
- 王超, 刘良, 李荣社. 青藏高原北缘前寒武纪地质演化: 进展与讨论[J]. *地质科学*, 2018, 53(3): 1-28.
- WANG Chao, LIU Liang, LI Rongshe. Precambrian geology of the northern margin of the Tibetan Plateau: Review and discussion[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2018, 53(3): 1-28.
- 王鸿祯. 中国古地理图集[M]. 北京: 地图出版社, 1985, 1-143.
- 王勤燕, 陈能松, 李晓彦, 等. 全吉地块基底达肯大坂岩群和热事件的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年[J]. *科学通报*, 2008, 53(14): 1693-1701.
- WANG Qinyan, CHEN Nengsong, LI Xiaoyan, et al. LA-ICPMS U-Pb dating for the basement Dakendaban Group and thermal event in Quanji Block[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008,

- 53(14): 1693-1701.
- 王树洗. 青海全吉群的几个叠层石群及其地层意义[J]. 西北地质, 1982, (4): 1-10.
- WANG Shuxi. Stromatolite from Quanji Group in Qinghai Province and its stratigraphic significance[J]. Northwestern Geology, 1982, (4): 1-10.
- 王欣. 晚埃迪卡拉世管状化石陕西迹的形态学、生物地层学及埋藏学研究[D]. 西安: 西北大学, 2019, 1-165.
- WANG Xin. Morphology, Biostratigraphy and Taphonomy of the late Ediacaran tubular fossil *Shaanxilithes*[D]. Xi'an: Northwest University, 2019, 1-165.
- 王欣, 高晓峰, 查显锋. 华北克拉通东坡组形成时代及其油气资源潜力[J]. 地球科学, 2023, 48(12): 4613-4627.
- WANG Xin, GAO Xiaofeng, ZHA Xianfeng. Age and Potential Petroleum Resources of Dongpo Formation in North China Craton[J]. Earth Science, 2023, 48(12): 4613-4627.
- 王云山, 庄庆兴, 史从彦, 等. 柴达木盆地北缘的全吉群[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1980, 214-230.
- WANG Yunshan, ZHUANG Qingxing, SHI Congyan, et al. Quanji Group along the northern border of Chaidamu Basin[M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1980, 214-230.
- 王云山, 陈基娘. 青海小高炉群红铁沟冰碛层岩石特征与时限讨论[J]. 前寒武纪地质, 1983, (1): 145-162.
- WANG Yunshan, CHEN Jiniang. The petrographic characteristics and the age of Hongtiegou tllites from Xiaogaolu Group in Qinghai Province[J]. Precambrian Geology, 1983, (1): 145-162.
- 王宗起. 中朝板块南缘的滑塌堆积及其构造环境[J]. 西安地质学院学报, 1992, 14(3): 31-39.
- WANG Zongqi. Olistostromes and tectonic setting in the southern margin of the Sino-Korean Plate[J]. Journal of Xi'an Institute of Geology, 1992, 14(3): 31-39.
- 吴瑞棠, 关宝德. 论罗圈组的冰成特征及重力流改造[J]. 地质学报, 1988, 1: 78-89.
- WU Ruitang, GUAN Baode. On the glaciogenr characteristics of the Luoquan formation and its reworking by gravity flows[J]. Acta Geologica Sinica, 1988, 1: 78-89.
- 席文祥, 裴放. 河南省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997, 1-299.
- 邢裕盛, 丁启秀, 罗惠麟, 等. 中国震旦系-寒武系界线专号[J]. 中国地质科学院地质研究所所刊, 1984, 10: 111-125.
- XING Yusheng, DING Qixiu, LUO Huilin, et al. The Sinian-Cambrian Boundary of China. Bulletin of the Institute of Geology[J]. Chinese Academy of Geological Sciences, 1984, 1-262.
- 原地质部青海地质局 632 大队. 1956 年年度总结报告[R]. 原地质部青海地质局 632 大队, 1956.
- 杨式傅, 郑昭昌. 宁夏贺兰山震旦纪正目关组遗迹化石[J]. 地球科学, 1985, 10: 9-18.
- YANG Shifu, ZHENG Zhaochang. The Siniantrace fossils from ZhengmuguanFormation of Helanshan Mountain, Ningxia[J]. Earth Science, 1985, 10: 9-18.
- 张海军, 王训练, 王勋, 等. 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[J]. 地学前缘, 2016, 23(5): 202-218.
- ZHANG Haijun, WANG Xunlian, WANG Xun, et al. U-Pb zircon ages of tuff beds from the Hongzaoshan Formation of the Quanji Group in the north margin of the Qaidam Basin, NW China, and their geological significances[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(5): 202-218.
- 张录易. 陕西宁强晚震旦世晚期高家山生物群的发现和初步研究[J]. 西安地质矿产研究所所刊, 1986, 13: 67-88.
- ZHANG Luyi. A discovery and preliminary study of the late stage of late Gaojiashan biota from Sinian in Ningqiang County, Shaanxi[J]. Bulletin of the Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, 1986, 13: 67-88.
- 张抗. 鄂尔多斯盆地边缘沉积盖层底部类冰碛岩的讨论[J]. 中国区域地质, 1991, 1: 79-85.
- ZHANG Kang. Tilloid at the bottom of the sedimentary covers on the margins of the Ordos Basin[J]. Regional Geology of China, 1991, 1: 79-85.
- 张文堂, 朱兆玲, 袁克兴, 等. 华北南部、西南部寒武系及上前寒武系的分界[J]. 地层学杂志, 1979, 3(1): 51-56.
- ZHANG Wentang, ZHU Zhaoling, YUAN Kexing, et al. Upper Precambrian and Cambrian boundary in southern and southwestern parts of North China[J]. Journal of Stratigraphy, 1979, 3(1): 51-56.
- 张志亮, 华洪, 张志飞. 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[J]. 古生物学报, 2015, 54(1): 12-28.
- ZHANG Zhiliang, HUA Hong, ZHANG Zhifei. Problematic Ediacaran fossil *Shaanxilithes* from the Jiucheng Member of Wangjiawan Section in Jinning, Yunnan Province[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2015, 54(1): 12-28.
- 赵祥生. 建所以来西北地区前寒武纪地质研究工作十大进展[J]. 西北地质科学, 1992, 13(2): 129-138.
- ZHAO Xiangsheng. Important progress on Precambrian geology research[J]. Northwest Geoscience, 1992, 13(2): 129-138.
- 赵银胜. 鄂东南的震旦系及其微古植物[J]. 湖北地质, 1995, 9(1): 21-30.
- ZHAO Yinsheng. Sinian of southeastern Hubei and micropalaeophyticum from it[J]. Hubei Geology, 1995, 9(1): 21-30.
- 赵彦彦, 郑永飞. 全球新元古代冰期的记录和时限[J]. 岩石学报, 2011, 27(2): 545-565.
- ZHAO Yanyan, ZHENG Yongfei. Record and time of Neoproterozoic glaciations on Earth[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(2): 545-565.
- 周传明, 欧阳晴, 王伟, 等. 中国埃迪卡拉纪岩石地层划分和对比[J]. 地层学杂志, 2021, 45(3): 211-222.
- ZHOU Chuanming, OUYANG Qing, WANG Wei, et al. Lithostratigraphic subdivision and correlation of the Ediacaran in China [J]. Journal of Stratigraphy, 2021, 45(3): 211-222.

- 周志强, 郑昭昌. 贺兰山地区的寒武系[J]. 西北地质, 1976, 1: 6–20.
- ZHOU Zhiqiang, ZHENG Zhaochang. Cambrian in the Helan Mountains region[J]. Northwestern Geology, 1976, 1: 6–20.
- 朱夏. 关于柴达木盆地的几个主要地质问题[J]. 地质知识, 1957, 6: 1–5.
- ZHU Xia. Some major geological problems in Qaidam Basin[J]. Geology Knowledge, 1957, 6: 1–5.
- Babcock L E, Peng S, Zhu M, et al. Proposed reassessment of the Cambrian GSSP[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2014, 98: 3–10.
- Bengtson S, Yue Z. Predatorial borings in late Precambrian mineralized exoskeletons[J]. *Science*, 1992, 257(5068): 367–369.
- Brasier M D, Cowie J, Taylor, M. Decision on the Precambrian-Cambrian boundary[J]. *Episodes*, 1994, 17(1): 3–8.
- Brennan S T, Lowenstein T K, Horita J. Seawater chemistry and the advent of biocalcification[J]. *Geology*, 2004, 32(6): 473–476.
- Buatois L A. *Treptichnus pedum* and the Ediacaran-Cambrian boundary: Significance and caveats[J]. *Geological Magazine*, 2017, 155(1): 174–180.
- Canfield D E, Poulton S W, Narbonne G M. Late-Neoproterozoic deep-ocean oxygenation and the rise of animal life.[J]. *Science*, 2007, 315(5808): 92–95.
- Chen N, Gong S, Sun M, et al. Precambrian evolution of the Quanji Block, northeastern margin of Tibet: insights from zircon U-Pb and Lu-Hf isotope compositions[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 35(3-4): 367–376.
- Chen Z, Zhou C, Xiao S, et al. New Ediacara fossils preserved in marine limestone and their ecological implications[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 4180.
- Cocks L R M, Torsvik T H. Ordovician palaeogeography and climate change[J]. *Gondwana Research*, 2020, 100: 57–23.
- Cox G M, Halverson G P, Stevenson R K, et al. Continental flood basalt weathering as a trigger for Neoproterozoic Snowball Earth[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 446: 89–99.
- Darroch S A F, Boag T H, Racicot R A. A mixed Ediacaran-metazoan assemblage from the Zaris Sub-basin, Namibia[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 459(3): 198–208.
- Darroch S A F, Smith E F, Nelson L L, et al. Causes and consequences of end-Ediacaran extinction: An update[J]. *Cambrian Prisms: Extinction*, 2023, 1: 1–15.
- Eyles N, Januszczak N. ‘Zipper-rift’: a tectonic model for Neoproterozoic glaciations during the breakup of Rodinia after 750 Ma[J]. *Earth Science Reviews*, 2004, 65(1): 1–73.
- Flowers R M, Macdonald F A, Siddoway C S, et al. Diachronous development of Great Unconformities before Neoproterozoic Snowball Earth[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, 117(19): 10172–10180.
- Gehling J G, Jensen S, Droser M L, et al. Burrowing below the basal Cambrian GSSP, fortune head, Newfoundland[J]. *Geological Magazine*, 2001, 138(2): 213–218.
- Grazhdankin D V, Balthasar U, Nagovitsin K E, et al. Carbonate-hosted Avalon-type fossils in Arctic Siberia[J]. *Geology*, 2008, 36: 803–806.
- Hoffman P F, Kaufman A J, Halverson G P, et al. A Neoproterozoic Snowball Earth[J]. *Science*, 1998, 281(5381): 1342–1346.
- Karlstrom K, Hagadorn J, Gehrels G, et al. Cambrian Sauk transgression in the Grand Canyon region redefined by detrital zircons[J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11(6): 438–443.
- Keller C B, Husson J M, Mitchel R N, et al. Neoproterozoic glacial origin of the Great Unconformity[J]. *PNAS*, 2019, 116(4): 1136–1145.
- Li G, Zhang Z, Hua H, et al. Occurrence of the Enigmatic Bivalved Fossil *Apistococoncha* in the Lower Cambrian of Southeast Shaanxi, North China Platform[J]. *Journal of Paleontology*, 2014, 88(2): 359–366.
- Li L, Zhang X, Yun H, et al. New occurrence of *Cambroclavus absonus* from the lowermost Cambrian of North China and its stratigraphical importance[J]. *Alcheringa*, 2016, 40(1): 1–8.
- Lu S, Ma G, Gao Z, et al. Sinianice ages and glacial sedimentary facies-areas in China[J]. *Precambrian Research*, 1985, 29(1): 53–63.
- Malakhovskaya Y E. Morphogenesis and evolution of *Kutorgina billingsi*, 1861 (Brachiopoda, Kutorginida)[J]. *Paleontological Journal*, 2013, 47(1): 11–22.
- Maruyama S, Santosh M, Zhao D. Superplume, Supercontinent, and post-perovskite: Mantle dynamics and anti-plate tectonics on the core-mantle boundary[J]. *Gondwana Research*, 2007, 11(1-2): 7–37.
- Meyer M, Schiffbauer J D, Xiao S, et al. Taphonomy of the upper Ediacaran enigmatic ribbonlike fossil *Shaanxilithes*[J]. *Palaaios*, 2012, 27: 354–372.
- Narbonne G M. The Ediacaran biota: Neoproterozoic Origin of Animals and Their Ecosystems[J]. *Review of Earth and Planetary Sciences*, 2005, 33: 421–442.
- Pang K, Wu C, Sun Y, et al. New Ediacara-Type Fossils and Late Ediacaran Stratigraphy from the Northern Qaidam Basin (China): Paleogeographic Implications[J]. *Geology*, 2021, 49(10): 1160–1164.
- Peters S E, Gaines R R. Formation of the ‘Great Unconformity’ as a trigger for the Cambrian explosion[J]. *Nature*, 2012, 484(7394): 363–366.
- Rogov V, Marusin V, Bykova N, et al. The oldest evidence of bioturbation on Earth[J]. *Geology*, 2012, 40(5): 395–398.
- Shen B, Xiao S, Dong L, et al. Problematic macrofossils from Ediacaran successions in the North China and Chaidam Block: implications for their evolutionary roots and biostratigraphic significance[J]. *Journal of Paleontology*, 2007, 81(6): 1396–1411.
- Shen B, Xiao S, Zhou C, et al. 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[J]. *Precambrian Research*, 2010, 177(3-4): 241-252.
- Sun J, Dong Y, Ma L, et al. Late Paleoproterozoic tectonic evolution of the Olongbuluke terrane, northern Qaidam, China: Constraints from stratigraphy and detrital zircon geochronology[J]. *Precambrian Research*, 2019, 331: 105349.
- Squire R A, Campbell I H, Allen C M, et al. Did the Transgondwanan Supermountain trigger the explosive radiation of animals on Earth?[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 250(1-2): 116-133.
- Tarhan L, Hughes N, Myrow P, et al. Precambrian-Cambrian boundary interval occurrence and form of the enigmatic tubular body fossil *Shaanxilithes ningqiangensis* from the Lesser Himalaya of India[J]. *Palaentology*, 2014, 57(2): 283-298.
- Vorob'eva N G, Sergeev V N, Knoll A H. Neoproterozoic microfossils from the northeastern margin of the East European Platform[J]. *Journal of Paleontology*, 2009, 83(2): 161-196.
- Wan B, Tang Q, Pang K, et al. Repositioning the Great Unconformity at the southeastern margin of the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 2019, 324: 1-17.
- Wang C, Evans D A D, Li M, et al. Proterozoic-Mesozoic development of the Quanji block from northern Tibet and the cratonic assembly of eastern Asia[J]. *American Journal of Science*, 2022, 322(5): 705-727.
- Wang R, Shen B, Lang X, et al. A Great late Ediacaran ice age[J]. *National Science Review*, 2023, 10(8): nwad117.
- Wang X, Zhang X, Liu W. Biostratigraphic constraints on the age of Neoproterozoic glaciation in North China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2021a, 219: 1-10.
- Wang X, Zhang X, Zhang Y, et al. New materials reveal *Shaanxilithes* as a *Cloudina*-like organism of the late Ediacaran[J]. *Precambrian Research*, 2021b, 362: 1-14.
- Wang Y, Wang X, Wang Y. Cambrian Ichnofossils from the Zhoujieshan Formation (Quanji Group) Overlying Tillites in the Northern Margin of the Qaidam Basin, NW China[J]. *Journal of Earth Science*, 2015, 26(2): 203-210.
- Weber B, Steiner M, Zhu M. Precambrian-Cambrian trace fossils from the Yangtze Platform (South China) and the early evolution of bilaterian lifestyles[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 254(2): 328-249.
- Wood R A, Zhuravlev A Y, Sukhov S S, et al. Demise of Ediacaran dolomitic seas marks widespread biomineralization on the Siberian Platform[J]. *Geology*, 2017, 45(1): 27-30.
- Xiao S, Bao H, Wang H, et al. The Neoproterozoic Quruqtagh Group in eastern Chinese Tianshan: Evidence for a post-Marinoan glaciations[J]. *Precambrian Research*, 2004, 130: 1-26.
- Xu B, Xiao S, Zou H, et al. SHRIMP zircon U-Pb age constraints on Neoproterozoic Quruqtagh diamictites in NW China[J]. *Precambrian Research*, 2009, 168: 247-258.
- Xu B, Zou H, Chen Y, et al. The Sugetbrak basalts from northwestern Tarim Block of northwest China: Geochronology, geochemistry and implications for Rodinia breakup and ice age in the Late Neoproterozoic[J]. *Precambrian Research*, 2013, 236: 214-226.
- Yang B, Steiner M, Schiffbauer J D, et al. Ultrastructure of Ediacaran cloudinids suggests diverse taphonomic histories and affinities with non-biomineralized annelids[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 535.
- Yang J, Zeng Z, Cai X, et al. Carbon and oxygen isotopes analyses for the Sinian carbonates in the Helan Mountain, North China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(32): 3943-3955.
- Yang C, Rooney A D, Condon D J, et al. The tempo of Ediacaran evolution[J]. *Science Advances*, 2021, 219: 1-10.
- Young G M. Are Neoproterozoic glacial deposits preserved on the margins of Laurentia related to the fragmentation of two supercontinents?[J]. *Geology*, 1995, 23(2): 153-156.
- Zhang N, Zhong S, Flowers R M. Predicting and testing continental vertical motion histories since the Paleozoic[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 317-318: 426-435.
- Zhang X, Shu D. Causes and consequences of the Cambrian explosion[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 57(5): 930-942.
- Zhao G, Wang Y, Huang B, et al. Geological reconstructions of the East Asian blocks: From the breakup of Rodinia to the assembly of Pangea[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 186: 262-286.
- Zhou C, Tucker R, Xiao S, et al. New constraints on the ages of Neoproterozoic glaciations in south China[J]. *Geology*, 2004, 32(5): 437-440.
- Zhou C, Yuan X, Xiao S, et al. Ediacaran integrative stratigraphy and timescale of China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2019, 62(1): 7-24.
- Zhu M, Zhuravlev A Y, Wood R A, et al. A deep root for the Cambrian explosion: Implications of new bio- and chemostratigraphy from the Siberian Platform[J]. *Geology*, 2017, 45(5): 459-462.
- Zhu M, Yang A, Yuan J, et al. Cambrian integrative stratigraphy and timescale of China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2019, 62(1): 25-60.
- Zhuravlev A Y, Vintaned J A G, Ivantsov A Y. First finds of problematic Ediacaran fossil *Gaojiashania* in Siberia and its origin [J]. *Geological Magazine*, 2009, 146(2): 775-780.