



引文格式: 牛亚卓, 史冀忠, 赵国春, 等. 中亚造山带南缘晚石炭世—早二叠世碳酸盐岩台地的建立和消亡[J]. 西北地质, 2024, 57(6): 95–112. DOI: 10.12401/j.nwg.2024075

Citation: NIU Yazhuo, SHI Jizhong, ZHAO Guochun, et al. Formation and Demise of Late Carboniferous to Early Permian Carbonate Platforms on the Southern Margin of the Central Asian Orogenic Belt[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(6): 95–112. DOI: 10.12401/j.nwg.2024075

# 中亚造山带南缘晚石炭世—早二叠世碳酸盐岩台地的建立和消亡

牛亚卓<sup>1,2</sup>, 史冀忠<sup>1</sup>, 赵国春<sup>2</sup>, 牛文超<sup>3</sup>, 陈高潮<sup>1</sup>, 宋博<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710119; 2. 西北大学, 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 3. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170)

**摘要:** 碳酸盐岩台地具有重要的古海洋环境指示意义。中亚造山带南缘在晚石炭世—早二叠世出现大规模分布的碳酸盐岩地层, 但这些岩石地层单元缺少精确时代约束和系统对比研究, 因而制约了进一步古地理和古环境意义的讨论。此次研究报道了阿拉善地块北缘“阿木山组”实测剖面的地层层序, 提供了火山岩夹层的锆石 U-Pb 同位素年龄, 精确约束了碳酸盐岩台地的时代和分布。研究表明: 研究区恩格尔乌苏断裂带以北的“阿木山组”应修订为“格根敖包组”, 以碎屑岩为主, 时代为晚石炭世卡西莫夫期—早二叠世阿瑟尔期 (<296.1 Ma)。该断裂带以南的阿木山组的碳酸盐岩台地以连续出露、富含瓣类化石的灰岩为标志, 时代为晚石炭世格舍尔期—早二叠世阿瑟尔期 (303.2~295.3 Ma)。笔者根据研究区与甘肃北山、内蒙古中部等地区的高精度地层对比提出, 中亚造山带南缘的碳酸盐岩台地是全球晚石炭世海侵和古亚洲洋南缘亚热带气候的产物, 早—中二叠世的裂谷作用是这些碳酸盐台地消亡的主要原因。

**关键词:** 阿拉善地块; 古海洋; 碳酸盐岩台地; 同位素年代学; 晚石炭世—早二叠世

中图分类号: P618.13

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)06-0095-18

## Formation and Demise of Late Carboniferous to Early Permian Carbonate Platforms on the Southern Margin of the Central Asian Orogenic Belt

NIU Yazhuo<sup>1,2</sup>, SHI Jizhong<sup>1</sup>, ZHAO Guochun<sup>2</sup>, NIU Wenchao<sup>3</sup>, CHEN Gaochao<sup>1</sup>, SONG Bo<sup>1</sup>

(1. Xi'an Center of China Geological Survey/Northwest China Center of Geoscience Innovation, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 2. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China; 3. Tianjin Center of China Geological Survey, Tianjin 300170, China)

**Abstract:** Carbonate platforms have significant implications for the ancient marine environment. During the Late Carboniferous to Early Permian, continuous deposited carbonate strata were widely distributed on the

收稿日期: 2024-07-01; 修回日期: 2024-08-09; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“中亚造山带北山北部石炭系火山—沉积层序及其对古地理重建的时空制约”(42072132), 中国地质调查局项目“氦气资源调查评价与示范”(DD20221665)联合资助。

作者简介: 牛亚卓(1987-), 副研究员, 从事造山带地层学、沉积大地构造学、古地理重建工作。E-mail: nyazhuo@cgs.gov.cn。

southern margin of the Central Asian Orogenic Belt. However, these rock units lack precise age constraints and systematic correlation, thus limiting further discussions on their paleogeographic and paleoenvironmental significance. This study reports the stratigraphic sequence of the "Amushan Formation" measured sections on the northern margin of the Alxa Block and provides zircon U-Pb isotope ages from volcanic intercalations, precisely constraining the age and distribution of the carbonate platforms. The results indicate that the "Amushan Formation" north of the Engerwusu Fault Zone should be revised to the "Gegenaoobao Formation," which is dominated by clastic rocks and dates to the Kasimovian to Asselian (<296.1 Ma). South of the fault zone, the carbonate platform of the Amushan Formation is characterized by continuously deposited and fusulinid-rich limestone with ages from the Gzhelian to Asselian (303.2~295.3 Ma). Based on high-resolution stratigraphic correlations with areas such as Beishan in Gansu and central Inner Mongolia, this study proposes that the carbonate platforms at the southern margin of the Central Asian Orogenic Belt were a product of global Late Carboniferous transgression and the subtropical climate of the southern margin of the Paleo-Asian Ocean. The rifting during the Early to Middle Permian was the primary reason for the demise of these carbonate platforms.

**Keywords:** Alxa Block; carbonate platform; isotopic chronology; Late Carboniferous–Early Permian; paleo-ocean

碳酸盐岩台地是古海洋环境的重要组成部分,对海洋水体的深度、温度、陆源碎屑供给等控制因素有严格的要求,因而具有重要的环境指示意义(刘宝珺等, 1985; Reading, 1996; Flügel, 2010)。古亚洲洋是石炭纪—二叠纪全球古地理中北半球中—高纬度古海洋的重要组成部分,其中发育的碳酸盐岩台地对探讨古海平面变化、古气候带、洋盆位置有重要意义(Sengör et al., 1993; Xiao et al., 2015; Zhao et al., 2018; Cao et al., 2020; Niu et al., 2021)。

古亚洲洋俯冲汇聚形成了地质历史上最大的增生造山带——中亚造山带(吴泰然等, 1993; Xiao et al., 2015; Zhao et al., 2018; Liu et al., 2019; Niu et al., 2021; 王文宝等, 2024; 吴妍蓉等, 2024)。中亚造山带南缘出露出一套横向展布约 1 800 km, 纵向连续沉积的上石炭统—下二叠统碳酸盐岩, 其分布范围西起甘肃北山, 经内蒙古阿拉善北缘、东至西乌珠穆沁旗(内蒙古自治区地质矿产局, 1991, 1996; 张玉清等, 2016; Yan et al., 2019; 田坤烜等, 2019)。这套地层被大多数研究者划分入“阿木山组”, 然而, 不同学者对“阿木山组”的岩性组成、时代延限、以及和基本同期的“本巴图组”“格根敖包组”的对应关系认识不同, 直接限制了对古亚洲洋演化过程及其在晚古生代海洋环境的探讨(韩建修等, 1979; 鲍庆中等, 2006; Shen et al., 2006; 张玉清等, 2016; Zhu et al., 2017)。

阿拉善地块北缘位于中亚造山带中段, 西连北山造山带, 东接兴蒙造山带, 处于图瓦—蒙古弧盆拼贴体

和塔里木—华北陆缘拼贴体的交叠处, 具有重要的大地构造位置(吴泰然等, 1993; Xiao et al., 2015; Liu et al., 2019; Song et al., 2020)。“阿木山组”在阿拉善地块北缘广泛出露, 富含海相生物和火山岩夹层, 为建立中亚造山带中段上石炭统—下二叠统对比框架提供了良好的素材(内蒙古自治区地质矿产局, 1996; 卢进才等, 2012; 张玉清等, 2016)。在 20 世纪 70~80 年代的 1:20 万区域地质调查中, 阿木山组被分为碳酸盐岩段、碎屑岩段、火山岩段等地层单元, 其中碳酸盐岩段产出蜓类 *Triticites* 带和 *Pseudoschwagerina* 带, 时代为晚石炭世—早二叠世, 但其他岩段普遍缺少有效的时代证据(甘肃省地质局区域地质调查队, 1980; 宁夏回族自治区地质局区域地质调查队, 1980; 甘肃省省地质局地质力学区域测量队, 1981; 内蒙古自治区地质矿产局, 1996)。21 世纪以来, 一些学者对阿木山组的划分提出质疑, 认为一部分 1:20 万区域地质调查中的阿木山组的岩石组合中没有大套碳酸盐岩, 部分剖面的同位素年龄不在“晚石炭世—早二叠世”的时代延限(Zheng et al., 2014; Shi et al., 2016)。这些成果促使采用高精度测年方法厘定前人研究中“阿木山组”的时代, 结合构造地质背景精确约束碳酸盐岩台地的时空分布, 分析其建立和消亡的古海洋环境意义。

文中报道了笔者及合作团队自 2011 年以来在阿拉善地块北缘实测的 5 条原“阿木山组”剖面的岩性组成、层序结构、化石组合, 并对其中 4 层的火山岩开展 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测试。基于这些数据,

此次研究精确约束了阿拉善北缘碳酸盐岩台地的发育时代,建立了天山—兴蒙构造带上石炭统—下二叠统高精度对比框架,由此分析碳酸盐台地的时空分布并探讨其古环境意义。

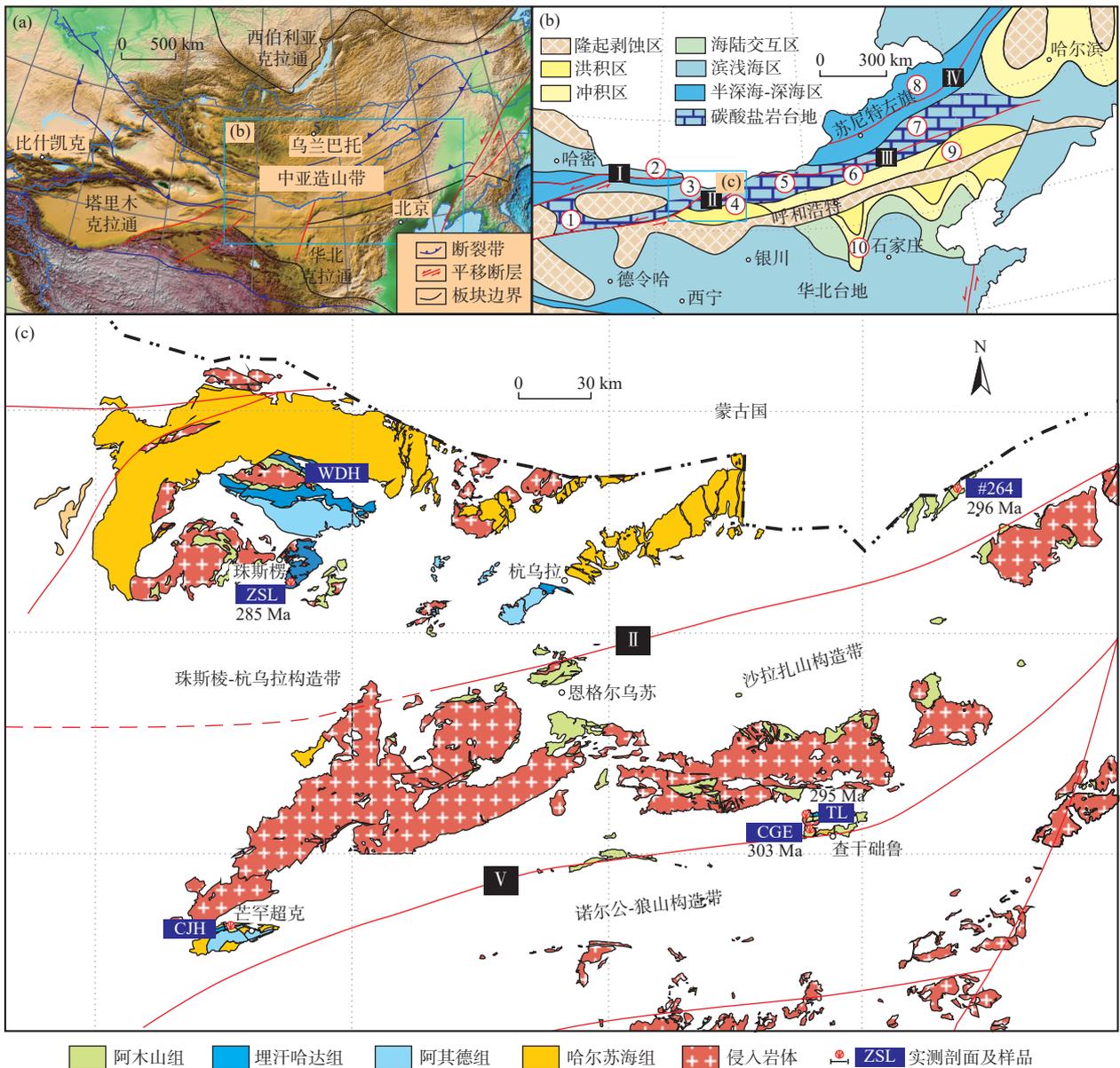
# 1 地质背景

## 1.1 大地构造背景

中亚造山带的大地构造位置位于西伯利亚克拉

通和华北—塔里木克拉通之间,是横亘亚洲中部和东部,西起乌拉尔山,经哈萨克斯坦、华北、蒙古国,直至鄂霍茨克洋的巨型造山系统(图 1a)(Xiao et al., 2015; Sengör et al., 2018; Zhou et al., 2018; 张海迪等, 2021)。Xiao 等(2015)将中亚造山带分为哈萨克斯坦、蒙古、塔里木—华北 3 个巨型拼贴体,认为索伦缝合带是蒙古拼贴体和塔里木—华北拼贴体之间的界线。

阿拉善地块及其北缘的地质体,自北向南被雅干、恩格尔乌苏、查干础鲁 3 条断裂带,分为雅干、珠斯



I. 红石山断裂带; II. 恩格尔乌苏断裂带; III. 索伦断裂带; IV. 贺根山断裂带; V. 查干础鲁断裂带; 各剖面岩性柱状图参见图 2 和图 7  
 图 1 中亚造山带构造位置图(a)、研究区上石炭统—下二叠统代表剖面分布图(b)及阿拉善地块北缘地质简图(c)  
 (据 Niu, et al., 2021, 郑和荣等, 2010 和卢进才等, 2012 修编)

Fig. 1 (a) Schematic map showing the tectonic location of the Central Asian Orogenic Belt, (b) distribution of the Upper Carboniferous–Lower Permian sections in the studied areas, and (c) simplified geological map of the northern Alxa Block

楞-杭乌拉、沙拉扎山、诺尔公-狼山4个构造带(吴泰然等, 1993)(图1b、图1c)。早前寒武纪变质基底岩石主要分布在诺尔公-狼山构造带, 其岩石组合和岩浆-变质事件反应阿拉善地块在中元古代—新元古代可能是华北克拉通的一部分(张建新等, 2018; Zhang et al., 2022)。其他3个构造带主要由古生代侵入岩、火山岩和碎屑岩组成, 普遍认为是古亚洲洋向南俯冲的产物(吴泰然等, 1993; Xiao et al., 2015; Song et al., 2020)。恩格尔乌苏断裂带和查干础鲁断裂带兼具蛇绿岩带性质。研究认为恩格尔乌苏蛇绿岩带可能东连索伦缝合带, 代表古亚洲洋最年轻的洋盆之一(吴泰然等, 1993; Liu et al., 2019; Song et al., 2020; Tian et al., 2020)(图1b)。石炭纪—二叠纪地层主要分布在恩格尔乌苏断裂带两侧的珠斯楞-杭乌拉构造带和沙拉扎山构造带(图1c)。恩格尔乌苏断裂带两侧的地层对比研究能够限制古亚洲洋演化的最晚时限。

## 1.2 阿木山组的沿革

阿木山组由原地质部241地质队于1955年创建于内蒙古中部达尔罕茂明安联合旗阿木山剖面, 原始定义为一套碎屑岩和碳酸盐岩组成的晚石炭世海相地层, 分布范围西起阿拉善右旗, 东达霍林河, 北连中蒙边境, 南至西拉木伦缝合带(韩建修等, 1979; 内蒙古自治区地质矿产局, 1991, 1996)。阿木山组的定义和分布在其后的60年中被不断讨论和修正, 不同学者对于阿木山组的岩性组合、分布范围和时代延限有不同认识。

就岩性组合而言, 一些学者认为达尔罕茂联合旗附近上石炭统为碳酸盐岩和碎屑岩“锯齿状交错”分布, 自西向东有碳酸盐岩逐步增多的规律, 提议将以碳酸盐岩为主, 产出丰富蠕类化石的地层划分为“阿木山组”, 将以碎屑岩和火山碎屑岩为主的地层划分为“本巴图组”, 阿木山组整合于本巴图组之上(韩建修等, 1979; 张玉清等, 2016; 杨海星等, 2020)。就分布范围而言, 一些学者则提议将阿木山组的适用范围限制在索伦缝合带和西拉木伦缝合带之间, 索伦缝合带以北以火山岩和碎屑岩为主的上石炭统应划入“格根敖包组”或“本巴图组”(苏养正, 1996; 张玉清等, 2016; Zhu et al., 2017)。就时代延限而言, 内蒙古中部的阿木山组碳酸盐岩中产出蠕类 *Triticites* 带和 *Pseudoschwagerina* 带的重要分子, 与华北太原组、华南船山灰岩和马平灰岩、俄罗斯地台卡西莫夫组—阿瑟尔组的蠕类动物群面貌一致, 普遍认为其时代为

晚石炭世卡西莫夫期(Kasimovian)—早二叠世阿瑟尔期(Asselian), 但缺少高精度同位素绝对年龄约束(盛金章, 1958; 韩建修等, 1979; Shen et al., 2006)。田坤焜等(2019)根据苏尼特右旗的德言其庙剖面中的蠕类化石, 在阿木山组建立 *Pseudoschwagerina urdalensis*—*Rugosofusulina intermedia* 带等3个化石带, 建议将该组时代上限提高至空谷期(Kungurian)。

## 1.3 阿拉善地块北缘的阿木山组

阿拉善地块北缘的地层学研究基于20世纪70~80年代开展的1:20万区域地质调查资料。*Triticites* 带和 *Pseudoschwagerina* 带的蠕类化石在1:20万因格井幅、乌力吉幅和三道桥幅均有发现(宁夏回族自治区地质局区域地质调查队, 1980; 甘肃省地质局区域地质调查队, 1980; 甘肃省省地质局地质力学区域测量队, 1981)。其中, 乌力吉幅的陶来剖面以碳酸盐岩为主, 化石丰富, 与内蒙古中部的阿木山组的岩性组合或化石特征基本一致(卜建军等, 2012; Zhu et al., 2017)。然而, 1:20万区域地质调查中在研究区划分出一些以碎屑岩、火山岩或者板岩为主的阿木山组, 这些岩段和含蠕类化石的碳酸盐岩段缺少清晰的叠覆关系, 也缺少较为准确的年代依据。近十年来, 随着同位素年代学的发展, 一些火山岩的绝对年龄和碎屑岩的最大沉积年龄(MDA)逐渐在研究区的阿木山组中报道。这些年龄一部分支持阿木山组晚石炭世—早二叠世的时代延限, 如恩格尔乌苏地区的玄武岩年龄(302 Ma)(Zheng et al., 2014); 另一些年龄则明显超出阿木山组的时代延限, 如乌力吉地区的英安岩年龄(254 Ma, 晚二叠世)(Zheng et al., 2014)和三道桥地区的碎屑岩年龄(<274 Ma, 中二叠世或更年轻时代)(郭硕等, 2019)。这些新进展促使地质工作者系统厘定阿拉善地块北缘古生物资料 and 同位素年龄, 重建研究区上石炭统—下二叠统层序, 进而对比分析中亚造山带中段阿木山组的岩性组合、时代延限和构造背景, 探讨碳酸盐岩台地的时限、分布和古环境意义。

## 2 实测剖面及样品

1:20万区域地质调查资料是在阿拉善地块北缘开展的沉积学、物源学、地球化学以及构造地质学的基础(宁夏回族自治区地质局区域地质调查队, 1980; 甘肃省地质局区域地质调查队, 1980; 甘肃省省地质局地质力学区域测量队, 1981), 同位素年代学

数据提供了地层划分和时代对比的新依据(Zhu et al., 2017; 卢进才等, 2018; Liu et al., 2019; Song et al., 2020; Chen et al., 2021)。然而, 由于研究时代不同, 很大一部分同位素年龄样品缺少明确的地层层序位置。为了解析阿木山组层序结构、重建其年代地层序列, 此次研究介绍笔者团队自2011年以来测量的5条“阿木山组”剖面 and 火山岩夹层同位素年龄的样品位置(图1c、图2)。这些剖面的层序结构可与1:20万区域地质调查中剖面对应, 其中珠斯楞剖面、乌登汗剖面和264界碑剖面位于珠斯楞—杭乌拉构造带, 川吉哈达剖面和陶来—查古尔剖面位于沙拉扎山构造带。

### 2.1 珠斯楞剖面

根据甘肃省省地质局地质力学区域测量队(1981)资料, 珠斯楞剖面相当于1:20万拐子湖幅的阿木山组碎屑岩段。该剖面底部被第四系砂砾覆盖, 顶部与火山岩段之间断层接触, 剖面内部地层残余厚度为1603 m, 主体由砂岩和粉砂岩组成(图2)。剖面下部有大理岩、灰岩、火山岩和凝灰岩夹层。同位素样品11ZSL-TW1 采自剖面下部的英安岩夹层, 岩石主要由细小长石和石英组成, 呈隐晶质, 具有微弱的流纹构造; 有少量长石斑晶(<5%), 已绢云母化; 受脆性变形影响产生诸多碎裂纹, 其中被方解石、石英和铁质物填充(图3a)。剖面上部出现大量基性火山岩夹层和一层灰岩夹层, 灰岩夹层中产出腕足类化石 *Spiriferella* sp. 和 *Marginifera* sp. (甘肃省省地质局地质力学区域测量队, 1981)。

### 2.2 乌登汗剖面

根据甘肃省省地质局地质力学区域测量队(1981)资料, 乌登汗剖面相当于1:20万拐子湖幅的阿木山组碎屑岩段。笔者在剖面底部新发现“阿木山组”生物碎屑灰岩与花岗岩体的不整合接触关系(图4a)。下伏花岗岩体的锆石 U-Pb 年龄为 383~348 Ma, 时代为中泥盆世—早石炭世(Zhang et al., 2017; Song et al., 2020)。不整合接触界面以一层厚度约为 3 cm 的钙质底砾岩为标志, 砾石砾径为 2~12.5 mm, 砾石含量自下而上逐渐减少, 最多可达 65%。砾石成分单一, 由花岗岩碎屑组成; 钙质胶结物由细小方解石组成, 其中有较多的腕足类、苔藓虫、有孔虫等海相生物碎屑(图4b)。格根敖包组厚度为 247 m, 下部为生物碎屑灰岩和核形石灰岩, 中部和上部为砂岩和粉砂岩互层。灰岩中产出腕足类 *Uncinunellina wangenheimi*, *Mar-*

*tinia* cf. *semiglobosa*, *M. cf. incerta*, *Stenosisma shanhsiensis*, *S. cf. biplicata*(图4c)(甘肃省省地质局地质力学区域测量队, 1981)。在该剖面顶部, 埋汗哈达组角度不整合于“阿木山组”之上, 有底砾岩出露。

### 2.3 264 界碑剖面

264 界碑剖面位于珠斯楞—杭乌拉构造带, 根据内蒙古自治区第一区域地质调查队(1982)资料, 相当于1:20万乌尔特幅阿木山组的碎屑岩段。该剖面底部和顶部均与花岗岩体断层接触, 剖面内部残余厚度为788 m, 主体由砂岩和粉砂岩组成, 有多层砾岩、灰岩、泥岩夹层, 灰岩中产出丰富的腕足类、珊瑚等海相动物化石(图2)。同位素样品 19264-TW1 采自剖面顶部的玄武岩层, 岩石主要由斜长石和火山玻璃组成, 板条状的斜长石杂乱排列, 其间被火山玻璃填充, 形成间隐结构。火山玻璃已脱玻化, 形成新生的鳞片状绿泥石集合体(图3b)。岩石中有少量气孔(<8%), 填充物为方解石和石英。该剖面产出的化石主要为腕足类 *Echinoconchus elegans*, *Martinia* sp., *Marginifera* sp., *Neospirifer* sp., *Athyris* sp. (内蒙古自治区第一区域地质调查队, 1982)。

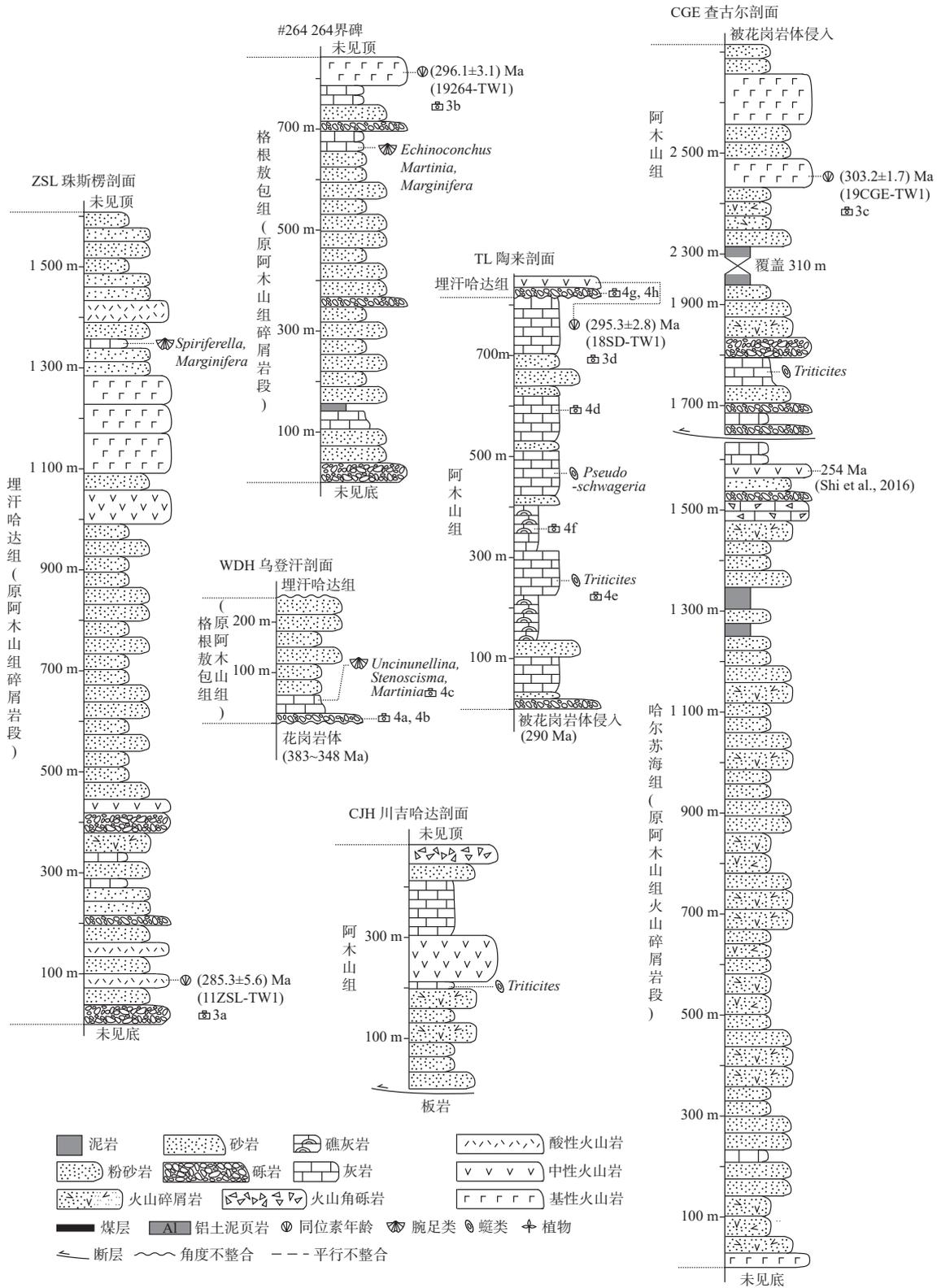
### 2.4 川吉哈达剖面

根据内蒙古自治区第一区域地质调查队(1982)资料, 川吉哈达剖面相当于1:20万因格井幅的阿木山组的火山岩段。该剖面底部与阿木山组板岩段断层接触, 顶部与下—中二叠统埋汗哈达组断层接触, 残余厚度为481 m。该剖面底部出露凝灰质砂岩和粉砂岩, 主体由火山岩和火山碎屑岩组成, 上部夹一层厚度达166 m的结晶灰岩(图2)。灰岩中产出 *Triticites* sp., *Triticites ohioensis*, *Rugosofusulina* sp., *R. alpina*, *Quasifusulina* sp., *Schwagerina* sp. (甘肃省地质局区域地质调查队, 1980)。

### 2.5 查古尔—陶来剖面

查古尔—陶来剖面是阿拉善地块北缘最具代表性的阿木山组剖面, 位于沙拉扎山构造带。该剖面通常分为查古尔剖面和陶来剖面, 其中前者以火山碎屑岩为主, 相当于1:20万乌力吉幅的火山碎屑岩段(第一岩段), 后者以碳酸盐岩为主, 相当于乌力吉幅的碳酸盐岩段(第二岩段)(宁夏回族自治区地质局区域地质调查队, 1980)。两者之间的接触关系被花岗闪长岩侵入破坏。

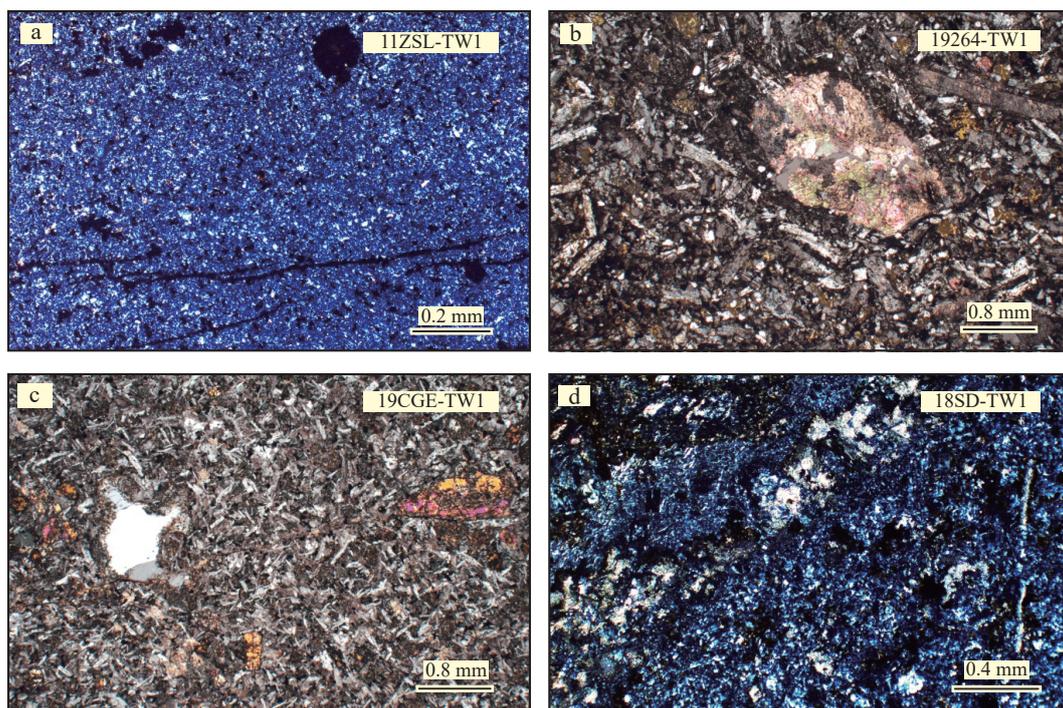
本次实测的查古尔剖面底部未出露, 顶部被花岗岩体侵入破坏, 残余厚度为2640 m(图2)。该剖面在



ZSL 剖面起点经纬度为 N41°30'14", E102°44'39"; WDH 剖面起点经纬度为 N41°48'31", E102°46'36"; #264 剖面起点经纬度为 N41°45'49", E105°22'19"; CJH 剖面起点经纬度为 N40°27'35", E102°37'04"; CGE 剖面起点经纬度为 N40°43'14", E104°48'0.2"; TL 剖面起点经纬度为 N40°45'56", E104°47'0.1"

图2 阿拉善地块北缘上石炭统—下二叠统实测剖面综合柱状图(剖面位置参见图 1c)

Fig. 2 Generalized composite sections of the Upper Carboniferous–Lower Permian sections in the northern Alxa Block



a. 英安岩样品 11ZSL-TW1; b. 玄武岩样品 19264-TW1; c. 玄武岩样品 19CGE-TW1; d. 安山岩样品 18SD-TW1

图3 阿拉善地块北缘上石炭统—下二叠统剖面火山岩同位素样品岩石薄片照片(样品层位参见图2)

Fig. 3 Representative microphotographs of isotopic samples of volcanic beds in the Upper Carboniferous–Lower Permian sections from the northern Alxa Block (See Figs 2 for the locations of samples)

1632 m 处被断层分为上、下两部分,下部岩性主体为凝灰质砂岩、粉砂岩、砂岩,有少量砾岩、碳酸盐岩、火山岩夹层。Shi 等(2016)在相应层位的英安岩中获得锆石同位素年龄 254 Ma,在砂岩中获得的碎屑锆石年龄(<270 Ma)。查古尔剖面上部碳酸盐岩和基性火山岩厚度明显增多,碳酸盐岩中产出蛭类化石 *Triticites* sp.和 *Schwagerina* sp.。同位素样品 19CGE-TW1 采自剖面上部玄武岩层,岩石中有少量辉石斑晶(<3%),呈板柱状,粒径为 0.2~0.5 mm,晶体通常发生中等绿帘石化或绿泥石化;基质由斜长石、辉石和火山玻璃组成,形成拉斑玄武岩结构,火山玻璃已脱玻化并被绿泥石交代。岩石中有少量气孔,常被方解石、绿泥石和石英填充(图 3c)。

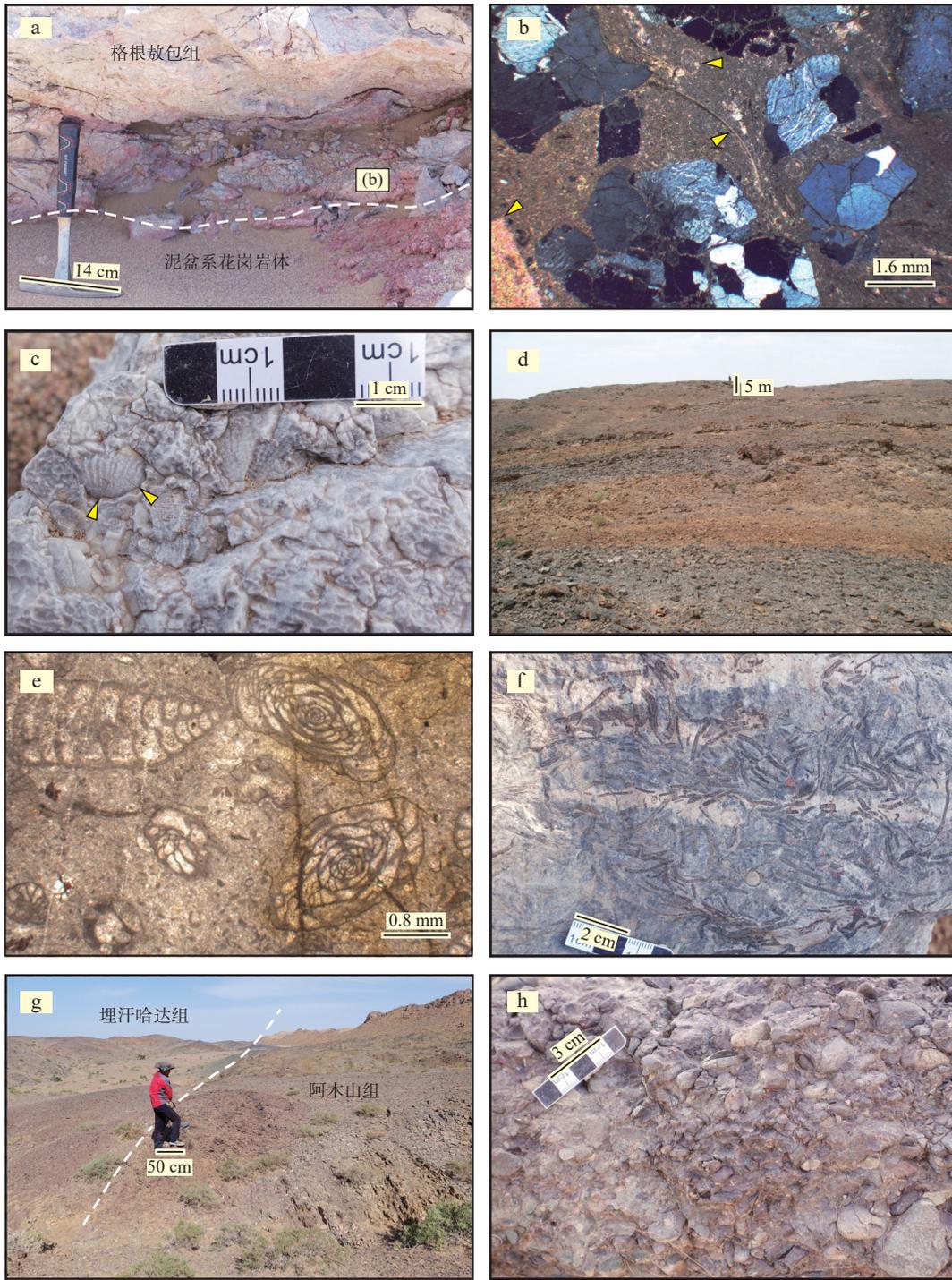
陶来剖面底部被花岗岩体侵入破坏,顶部角度不整合于埋汗哈达组碎屑岩段之下,地层层序完整,残余厚度为 800 m(图 2)。该剖面总体以蛭类泥粒灰岩、鲕粒灰岩、珊瑚障积岩、纹层状粘结灰岩、藻灰岩、生物碎屑颗粒灰岩为主,有多套砾岩、砂岩、粉砂岩夹层。灰岩累计厚度达 638 m,最大连续厚度可达 264 m(图 4d)。灰岩中富含蛭类、珊瑚和藻类化石,其中蛭类自下向上可分为 *Triticites* 组合和 *Pseudoschwageri-*

*na* 组合(卜建军等,2012)(图 4e、图 4f)。在该剖面顶部,碎屑岩段以褐红色底砾岩为标志角度不整合于碳酸盐岩段之上(图 4g)。底砾岩中主要为安山岩和英安岩砾石(65%~75%),有板岩和灰岩砾石(25%~35%)(图 4h)。底砾岩之上出露一层厚度 15 m 的安山岩,同位素样品 18SD-TW1 采集于该层。岩石中斑晶主要斜长石,但多被方解石后期交代;基质由细小斜长石组成,呈显微嵌晶结构(图 3d)。

### 3 火山岩锆石 U-Pb 年代学

#### 3.1 分析方法

本次研究在实测剖面中挑选了 4 件火山岩样品进行了锆石 U-Pb 年龄分析。将火山岩样品破碎和分离后,挑选晶型完好的颗粒用环氧树脂固定并抛光。利用阴极发光(CL)图像分析锆石内部结构,挑选无裂缝、无明显包裹体、岩浆振荡环带发育的锆石,进行激光剥蚀等离子质谱(LA-ICP-MS)锆石 U-Pb 年龄分析。所有分析测试均在自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室完成,定年所用仪器为 Agilent 7500 型 ICP-MS、ComPex102 ArF 准分子激光器(工作物质



a. 格根敖包组不整合于泥盆系花岗岩体之上； b. 格根敖包组底部钙质底砾岩，由花岗岩砾石和富含海相生物碎屑的化石(黄色箭头所示)的胶结物组成； c. 生物碎屑灰岩，含腕足类化石(黄色箭头所示)； d. 连续沉积的碳酸盐岩； e. 灰岩中的蠕类和孔虫化石； f. 叶状藻灰岩； g. 埋汗哈达组碎屑岩角度不整合于阿木山组碳酸盐岩之上； h. 埋汗哈达组底部底砾岩，由安山岩、英安岩、板岩和灰岩砾石组成

图4 阿拉善地块北缘上石炭统一下二叠统剖面野外照片(照片层位参见图2)

Fig. 4 Representative outcrop photographs of the Upper Carboniferous–Lower Permian sections from the northern Alxa Block (See Figs 2 for the locations of photos)

ArF 波长 193 nm) 和 GeoLas 200M 光学系统, 实验原理及步骤参见李艳广等(2015, 2023)。实验中采用标

样 91500 作为外部标准, GJ-1 作为监测标样。采用 Glitter 程序对分析计数结果进行同位素比值和年龄的

计算, 普通 Pb 校正参照并按照 LAM-ICP-MS Common Lead Correction ver 3.15 (Andersen, 2002), 年龄计算及谐和图采用 Isoplot 完成 (Ludwig, 2003)。所有测年数据见表 1。

### 3.2 分析结果

4 件火山岩样品的锆石晶型普遍较为完整, 具有清晰的岩浆振荡环带 (图 5)。

样品 11ZSL-TW1 共获得 18 个谐和年龄, 其中 12

表 1 中亚造山带南缘晚石炭世—早二叠世火山岩夹层 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄数据统计表

Tab. 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb age of Late Carboniferan-Early Permian volcanic intercalations in the southern margin of the Central Asian orogenic belt

测点 编号	含量 ( $10^{-6}$ )				同位素比值						同位素年龄 (Ma)						谐和度
	$^{206}\text{Pb}$	$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	
11ZSL-TW1 英安岩 珠斯棱剖面																	
-01	51.0	213.6	266.9	0.80	0.0514	0.0061	0.3127	0.0356	0.0441	0.0014	258	199	276	28	278	8	99
-02	113.0	90.0	122.8	0.73	0.0864	0.0075	2.7734	0.2265	0.2327	0.0077	1347	107	1348	61	1349	40	100
-03	38.0	124.6	199.9	0.62	0.0525	0.0088	0.3344	0.0540	0.0462	0.0019	309	283	293	41	291	12	101
-04	147.9	716.9	795.4	0.90	0.0534	0.0049	0.3480	0.0301	0.0472	0.0012	348	149	303	23	297	8	102
-05	116.4	335.0	593.1	0.56	0.0557	0.0070	0.3358	0.0410	0.0438	0.0013	439	286	294	31	276	8	107
-06	37.4	175.4	233.3	0.75	0.0529	0.0189	0.3411	0.1193	0.0468	0.0039	325	504	298	90	295	24	101
-07	59.8	188.5	292.7	0.64	0.0476	0.0096	0.2982	0.0589	0.0454	0.0017	82	354	265	46	286	11	93
-08	33.3	124.4	176.9	0.70	0.0585	0.0098	0.3570	0.0578	0.0443	0.0019	547	281	310	43	279	12	111
-09	177.3	73.2	283.7	0.26	0.0693	0.0028	1.4321	0.0439	0.1499	0.0027	908	34	902	18	900	15	100
-10	59.3	187.2	314.9	0.59	0.0583	0.0087	0.3520	0.0505	0.0438	0.0017	541	248	306	38	276	11	111
-11	66.2	211.8	359.7	0.59	0.0505	0.0078	0.3275	0.0489	0.0471	0.0018	218	261	288	37	296	11	97
-12	40.3	167.1	200.1	0.84	0.0502	0.0095	0.3099	0.0566	0.0448	0.0021	205	293	274	44	282	13	97
-13	246.1	82.3	214.3	0.38	0.1061	0.0048	4.4894	0.1655	0.3071	0.0066	1733	37	1729	31	1726	32	100
-14	47.1	108.7	244.8	0.44	0.0533	0.0070	0.3440	0.0433	0.0468	0.0016	341	219	300	33	295	10	102
-15	65.5	251.4	354.6	0.71	0.0536	0.0058	0.3305	0.0342	0.0447	0.0013	356	179	290	26	282	8	103
-16	42.0	136.3	224.5	0.61	0.0520	0.0053	0.3153	0.0305	0.0440	0.0012	287	167	278	24	277	8	100
-17	96.7	311.9	532.9	0.59	0.0526	0.0088	0.4182	0.0675	0.0577	0.0024	310	282	355	48	362	15	98
-18	57.2	262.5	322.6	0.81	0.0511	0.0105	0.3259	0.0652	0.0463	0.0023	247	317	286	50	291	14	98
-19	66.8	293.0	376.8	0.78	0.0529	0.0047	0.3086	0.0258	0.0423	0.0011	324	144	273	20	267	7	102
-20	64.5	97.8	237.4	0.41	0.0550	0.0081	0.4993	0.0707	0.0659	0.0026	411	245	411	48	412	16	100
19264-TW1 玄武岩 264界碑剖面																	
-01	323.3	10.0	1330.1	0.01	0.0536	0.0012	0.3799	0.0078	0.0514	0.0004	355	50	327	6	323	2	101
-02	67.3	308.6	278.2	1.11	0.0572	0.0037	0.3691	0.0235	0.0468	0.0006	498	147	319	17	295	4	108
-03	90.1	194.9	302.5	0.64	0.0606	0.0024	0.5691	0.0215	0.0681	0.0006	624	86	457	14	425	4	108
-04	53.5	125.9	206.8	0.61	0.0543	0.0018	0.4825	0.0148	0.0645	0.0006	384	52	400	10	403	4	99
-05	50.9	149.1	260.3	0.57	0.0561	0.0026	0.3703	0.0167	0.0480	0.0006	455	78	320	12	302	4	106
-06	140.9	244.3	509.0	0.48	0.0549	0.0009	0.5107	0.0073	0.0676	0.0004	407	21	419	5	421	3	100
-07	32.4	137.5	182.3	0.75	0.0496	0.0037	0.3197	0.0231	0.0468	0.0008	174	131	282	18	295	5	96
-08	43.2	94.6	204.0	0.46	0.0567	0.0029	0.3677	0.0183	0.0470	0.0005	480	116	318	14	296	3	107
-09	159.8	49.9	665.6	0.07	0.0527	0.0011	0.4299	0.0083	0.0592	0.0004	316	31	363	6	371	3	98
-10	49.8	193.7	251.2	0.77	0.0809	0.0022	0.5370	0.0138	0.0482	0.0005	1218	36	436	9	304	3	143
-11	265.9	353.9	1078.8	0.33	0.0545	0.0010	0.4766	0.0077	0.0635	0.0004	392	24	396	5	397	3	100
-12	10.8	27.9	48.5	0.58	0.0527	0.0047	0.4207	0.0368	0.0579	0.0012	316	161	357	26	363	7	98
-13	116.7	568.8	369.7	1.54	0.0557	0.0015	0.5666	0.0141	0.0738	0.0006	441	41	456	9	459	4	99
-14	79.2	143.9	387.7	0.37	0.0775	0.0027	0.5089	0.0165	0.0476	0.0005	1135	47	418	11	300	3	139
-15	139.4	193.3	516.1	0.37	0.0558	0.0017	0.5142	0.0150	0.0669	0.0005	443	69	421	10	417	3	101
-16	80.6	222.9	357.4	0.62	0.0612	0.0020	0.4227	0.0129	0.0501	0.0005	647	49	358	9	315	3	114
-17	9.3	20.3	50.5	0.40	0.0472	0.0054	0.3097	0.0345	0.0476	0.0012	60	198	274	27	300	7	91
-18	30.3	115.1	130.3	0.88	0.0596	0.0079	0.4223	0.0556	0.0514	0.0009	589	301	358	40	323	6	111
-19	46.5	172.4	248.8	0.69	0.0561	0.0037	0.3599	0.0232	0.0466	0.0005	455	149	312	17	293	3	106
-20	33.2	53.7	101.2	0.53	0.0600	0.0028	0.6652	0.0294	0.0805	0.0010	603	74	518	18	499	6	104

续表 1

测点 编号	含量 ( $10^{-6}$ )				同位素比值					同位素年龄 (Ma)					谐和度		
	$^{206}\text{Pb}$	$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$
19CGE-TW1 玄武岩 查古尔剖面																	
-01	19.1	58.4	94.5	0.62	0.054 6	0.003 9	0.364 9	0.025 5	0.048 5	0.000 8	396	129	316	19	305	5	104
-02	55.9	164.0	268.4	0.61	0.055 3	0.001 9	0.369 4	0.011 8	0.048 5	0.000 5	424	55	319	9	305	3	105
-03	18.4	77.3	95.1	0.81	0.052 0	0.003 1	0.344 4	0.020 1	0.048 1	0.000 7	285	109	301	15	303	4	99
-04	20.6	71.5	110.9	0.64	0.052 8	0.003 2	0.350 5	0.020 7	0.048 2	0.000 7	318	109	305	16	303	4	101
-05	16.0	56.1	83.9	0.67	0.052 2	0.003 3	0.347 6	0.021 2	0.048 3	0.000 7	294	115	303	16	304	4	100
-06	25.4	82.8	132.4	0.63	0.051 4	0.002 6	0.342 9	0.016 7	0.048 4	0.000 6	258	90	299	13	305	4	98
-07	29.7	149.1	157.6	0.95	0.054 1	0.002 6	0.356 7	0.016 4	0.047 8	0.000 6	374	82	310	12	301	4	103
-08	28.7	57.0	111.8	0.51	0.054 7	0.002 7	0.494 2	0.023 3	0.065 5	0.000 8	401	84	408	16	409	5	100
-09	12.8	52.2	62.7	0.83	0.054 3	0.004 7	0.360 5	0.030 6	0.048 2	0.000 8	381	198	313	23	303	5	103
-10	19.7	65.6	106.4	0.62	0.056 4	0.003 0	0.373 0	0.019 1	0.048 0	0.000 6	467	90	322	14	302	4	107
-11	54.9	187.5	290.8	0.64	0.053 3	0.002 0	0.352 4	0.012 3	0.048 0	0.000 5	341	61	307	9	302	3	102
-12	24.6	130.8	135.1	0.97	0.049 3	0.002 7	0.324 9	0.017 4	0.047 8	0.000 6	162	98	286	13	301	4	95
-13	22.1	63.0	95.2	0.66	0.049 9	0.007 7	0.328 6	0.050 8	0.047 8	0.000 7	190	313	288	39	301	4	96
-14	33.1	140.7	177.6	0.79	0.054 8	0.002 4	0.364 7	0.015 5	0.048 3	0.000 6	404	75	316	12	304	3	104
-15	12.7	40.5	67.4	0.60	0.055 8	0.003 7	0.372 2	0.023 7	0.048 3	0.000 8	445	114	321	18	304	5	106
-16	22.1	76.6	114.0	0.67	0.046 9	0.003 0	0.312 5	0.019 5	0.048 3	0.000 7	44	109	276	15	304	4	91
-17	21.9	71.2	117.6	0.61	0.055 5	0.003 0	0.370 3	0.019 1	0.048 4	0.000 6	430	91	320	14	305	4	105
-18	20.8	66.6	114.2	0.58	0.050 1	0.002 2	0.331 4	0.013 9	0.048 0	0.000 5	199	77	291	11	302	3	96
-19	17.7	63.4	95.3	0.67	0.053 8	0.003 9	0.357 9	0.025 5	0.048 3	0.000 7	362	168	311	19	304	4	102
-20	26.0	117.3	137.5	0.85	0.056 3	0.002 5	0.374 7	0.016 1	0.048 3	0.000 6	465	74	323	12	304	4	106
18SD-TW1 安山岩 陶来剖面																	
-01	7.9	22.1	35.0	0.63	0.056 0	0.007 4	0.370 9	0.048 0	0.048 0	0.001 5	454	234	320	36	302	9	106
-02	9.8	32.5	43.5	0.75	0.054 6	0.006 0	0.361 7	0.039 2	0.048 0	0.001 3	395	196	313	29	302	8	104
-03	15.6	71.4	72.7	0.98	0.050 2	0.004 6	0.318 8	0.028 5	0.046 0	0.001 0	203	161	281	22	290	6	97
-04	12.4	33.8	56.9	0.59	0.054 4	0.005 8	0.351 0	0.036 7	0.046 8	0.001 1	386	191	305	28	295	7	103
-05	10.4	42.7	47.7	0.90	0.049 0	0.005 6	0.316 1	0.035 5	0.046 8	0.001 2	146	205	279	27	295	7	95
-06	22.2	77.8	100.9	0.77	0.054 5	0.004 2	0.355 9	0.027 1	0.047 3	0.000 9	391	136	309	20	298	6	104
-07	14.5	60.4	66.1	0.91	0.052 3	0.005 4	0.341 8	0.034 3	0.047 4	0.001 1	299	183	299	26	298	7	100
-08	9.8	24.6	45.3	0.54	0.059 5	0.007 3	0.383 4	0.045 9	0.046 7	0.001 4	586	210	330	34	294	9	112
-09	15.2	44.8	70.3	0.64	0.050 2	0.005 2	0.324 6	0.033 1	0.046 8	0.001 1	206	185	285	25	295	7	97
-10	17.7	70.0	80.6	0.87	0.060 1	0.005 5	0.395 6	0.034 9	0.047 7	0.001 1	606	151	338	25	301	7	112
-11	11.6	49.3	53.6	0.92	0.050 1	0.006 8	0.326 4	0.043 5	0.047 2	0.001 4	201	243	287	33	297	8	97
-12	13.3	44.6	61.5	0.72	0.057 3	0.006 8	0.374 3	0.043 5	0.047 3	0.001 3	505	211	323	32	298	8	108
-13	14.4	38.1	68.1	0.56	0.053 9	0.005 9	0.345 4	0.036 6	0.046 4	0.001 2	369	192	301	28	293	7	103
-14	16.7	53.5	79.2	0.67	0.054 5	0.005 0	0.346 6	0.031 0	0.046 1	0.001 0	392	162	302	23	291	6	104
-15	31.9	149.0	147.9	1.01	0.051 1	0.003 3	0.334 2	0.021 2	0.047 5	0.000 8	244	114	293	16	299	5	98
-16	25.4	151.2	120.2	1.26	0.051 9	0.003 3	0.335 1	0.021 1	0.046 9	0.000 8	279	113	293	16	295	5	99
-17	31.7	175.0	157.0	1.11	0.052 7	0.003 3	0.326 2	0.019 8	0.044 9	0.000 8	316	107	287	15	283	5	101
-18	20.3	77.0	95.4	0.81	0.049 7	0.004 1	0.323 7	0.026 0	0.047 2	0.000 9	181	144	285	20	297	6	96
-19	18.8	94.7	88.2	1.07	0.052 1	0.004 0	0.340 4	0.025 6	0.047 4	0.000 9	288	136	297	19	299	6	99
-20	16.0	45.7	75.4	0.61	0.054 5	0.004 4	0.355 7	0.028 0	0.047 3	0.001 0	391	141	309	21	298	6	104

枚锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 297~276 Ma 之间(图 5a、图 6a), 其加权平均值为  $(285.3 \pm 5.6)\text{Ma}$  ( $n = 12$ ,  $\text{MSWD} = 0.73$ )(图 6b), 另有 6 个年龄分别为 1 733、1 347、900、412、362 和 267 Ma。

样品 19 264-TW1 共获得 16 个谐和年龄, 其中 6 枚锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 302~293 Ma 之间(图 5b、

图 6c), 其加权平均值为  $(296.1 \pm 3.1)\text{Ma}$  ( $n = 6$ ,  $\text{MSWD} = 0.74$ )(图 6d), 另有 10 个年龄零散分布在 499~323 Ma 之间。

样品 19CGE-TW1 共获得 20 个谐和年龄, 其中 15 枚锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中在 305~301 Ma 之间(图 5c、图 6e), 其加权平均值为  $(303.2 \pm 1.7)\text{Ma}$  ( $n =$

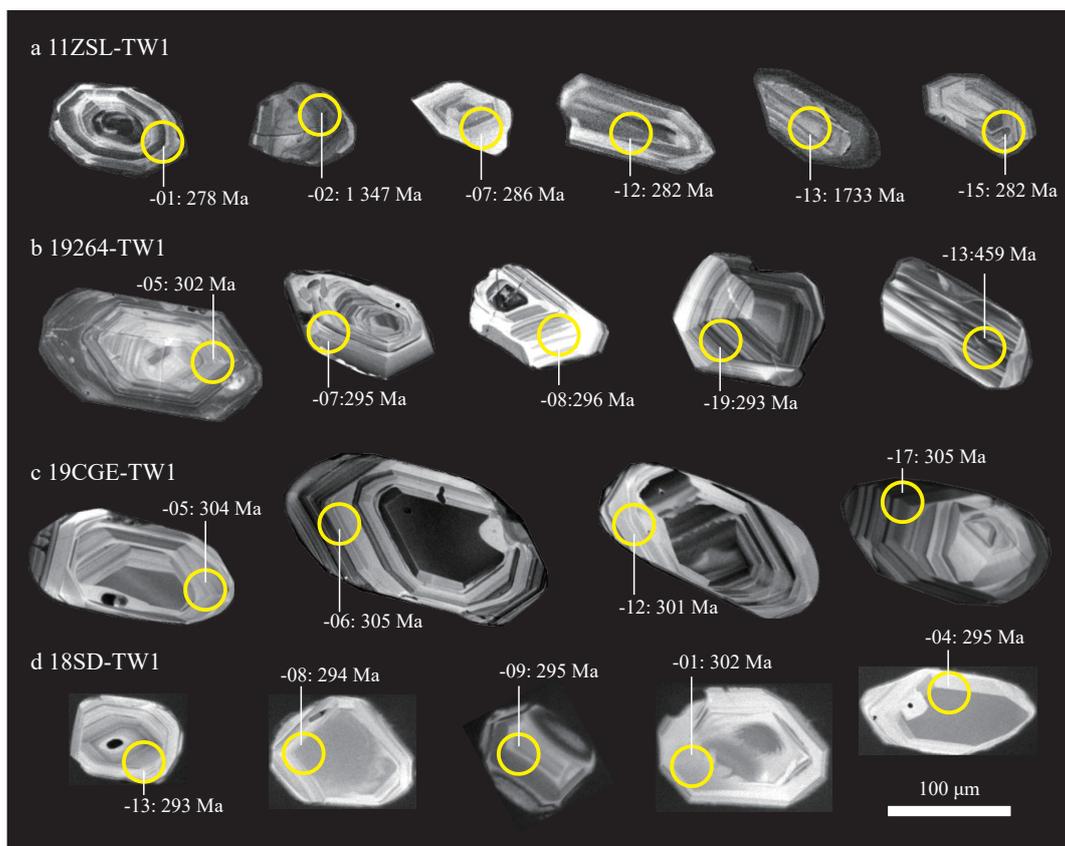


图5 阿拉善地块北缘火山岩部分锆石阴极发光图像及 LA-ICP-MS 测点位置

Fig. 5 CL images and LA-ICP-MS dating spots of selected zircons of the volcanic rocks in the northern Alxa Block

19, MSWD = 0.14)(图 6f), 另有 1 个年龄为 409 Ma。

样品 18SD-TW1 共获得 20 个谐和年龄,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄集中在 283~302 Ma 之间(图 5d、图 6g), 其加权平均值为  $(295.3 \pm 2.8)\text{Ma}$  ( $n = 20$ , MSWD = 0.56)(图 6h)。

## 4 讨论

### 4.1 阿拉善地块北缘晚石炭世—早二叠世地层厘定

20 世纪 70~80 年代的 1:20 万区域地质调查中, 阿拉善地块北缘的石炭纪—二叠纪地层自下而上依次为阿木山组、埋汗哈达组、阿其德组和哈尔苏海组。20 世纪 90 年代, 区域地质志和岩石地层清理工作中建议该区域的地层统一采用临近的北山地区地层命名, 即干泉组、双堡塘组、金塔组和方山口组(内蒙古自治区地质矿产局, 1991, 1996)。2007 年以来, 笔者团队在该区域进行油气和地层工作中, 发现阿拉善地块北部和北山地区被阿尔金走滑断裂分隔(图 1c)。这两个地区的石炭纪—二叠纪岩石地层相似, 但也存在区别, 特别是晚二叠世哈尔苏海组与方山口组存在较大岩性差异。因此, 笔者建议该阿拉善北缘岩石地

层命名仍采用 1:20 万区域地质调查中的“阿木山组、埋汗哈达组、阿其德组和哈尔苏海组”岩石地层单位名称(卢进才等, 2012; Niu et al., 2018)。

阿木山组按照地质部 241 地质队于 1955 年定义的层型剖面, 是一套由碎屑岩和碳酸盐岩组成的海相地层(韩建修等, 1979)。然而, 这一定义过于宽泛, 很难与上覆地层和下伏地层单元区分, 也不利于和同一时代其他构造单元的地层对比。自 1955 年创名以来, “阿木山组”在不同地区被划分为数量不等的岩性段(2~6 个), 也有学者提出从“阿木山组”中分解出“本巴图组”、“格根敖包组”等地层单元, 造成了不同文献中“阿木山组”并不一致(韩建修等, 1979; 苏养正, 1996; 张玉清等, 2016; 杨海星等, 2020)。内蒙古自治区地质矿产局(1996)对研究区的岩石地层单元进行系统厘定, 重新定义“阿木山组”为“分布于内蒙古草原地区晚石炭世海相碳酸盐岩为主的岩石地层序列”。这一定义更加准确, 有效区分出了“阿木山组”和其他相邻地层单元, 更有利于区域地层单元划分和对比。

按照阿木山组以海相碳酸盐岩为主的定义, 阿拉

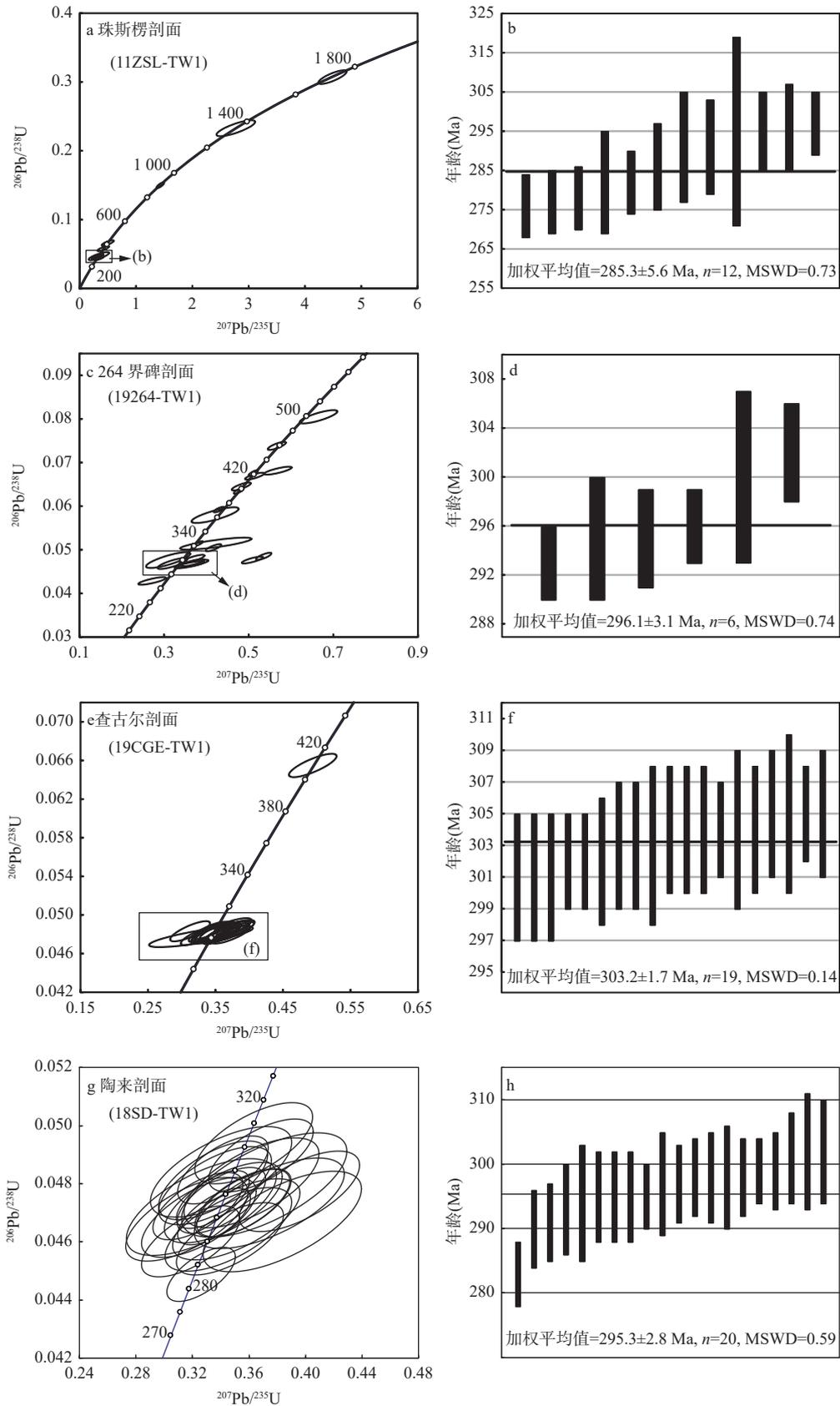


图6 阿拉善地块北缘火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄谐和图和加权平均图

Fig. 6 LA-ICP-MS zircon U-Pb weight average and concordia diagrams of zircons from the volcanic rocks in the northern Alxa Block

善北缘剖面中只有查古尔—陶来剖面符合该定义。该剖面碳酸盐岩累计厚度达 638 m, 产出蛭类 *Triticites* 和 *Pseudoschwagerina* 组合。查古尔剖面上部阿木山组的安山岩出露在含 *Triticites* 的灰岩之间, 同位素年龄为  $(303.2 \pm 1.7)$  Ma, 时代为晚石炭世格舍尔期。陶来剖面顶部不整合于阿木山组之上的埋汗哈达组中, 安山岩夹层年龄为  $(295.3 \pm 2.8)$  Ma, 时代为早二叠世阿瑟尔期。由此可见, 查古尔剖面上部和陶来剖面的阿木山组时代为晚石炭世格舍尔期—早二叠世阿瑟尔期 ( $> 303.2 \sim 295.3$  Ma)。另外, 查古尔剖面下部以火山碎屑岩为主, 与上部地层之间为断层接触, 与本地区上二叠统哈尔苏海组岩性相似。查古尔剖面下部火山岩夹层年龄为 254 Ma (Shi et al., 2016), 碎屑锆石最大沉积年龄为 270 Ma (未发表数据), 进一步证明该段地层应修订为上二叠统哈尔苏海组 (图 2)。

以碳酸盐岩为主的阿木山组在阿拉善北缘主要分布在沙拉扎山构造带乌力吉地区, 而恩格尔乌苏断裂带以北的珠斯楞—杭乌拉构造带的“阿木山组”岩石组合特征与阿木山组定义中的“海相碳酸盐岩为主”和“含蛭类化石”不符。珠斯楞剖面是该带 1:20 万区域地质调查中“阿木山组”的代表剖面。然而, 该剖面以碎屑岩和火山岩为主, 仅有 3 层厚度为 10~30 cm 的灰岩夹层, 与埋汗哈达组岩性较为相似。该剖面英安岩夹层的同位素年龄为  $(285.3 \pm 5.6)$  Ma, 时代位于早二叠世亚丁斯克期 (Artinskian), 与区域上埋汗哈达组时代延限一致。该剖面出露的腕足类化石 *Spiriferella* sp., *Marginifera* sp. 也大多出现在埋汗哈达组或双堡塘组的 *Spiriferella-Kochiproductus* 和 *Paramarginifera-Transennatia* 组合中, 而与阿木山组和干泉组的 *Choristites-Martinia* 组合有较大差异 (张研, 1990; 卜建军等, 2011; Niu et al., 2018)。由此可见, 珠斯楞剖面的“阿木山组”应修正为“埋汗哈达组”。

乌登汗剖面 and 264 界碑剖面以碎屑岩为主, 灰岩夹层产出的腕足类 *Uncinunellina wangenheimi*, *Martinia* cf. *semiglobosa*, *Echinoconchus elegans* 是北山地区干泉组和河北太原组底部腕足类组合的重要分子, 时代为晚石炭世卡西莫夫期—格舍尔期 (范炳恒, 1998; Niu et al., 2018)。264 界碑剖面顶部玄武岩层的年龄为  $(296.1 \pm 3.1)$  Ma, 时代为早二叠世阿瑟尔期。就岩相组合而言, 珠斯楞—杭乌拉构造带“阿木山组”与该组的定义有明显区别, 并非以碳酸盐岩为主。就地层

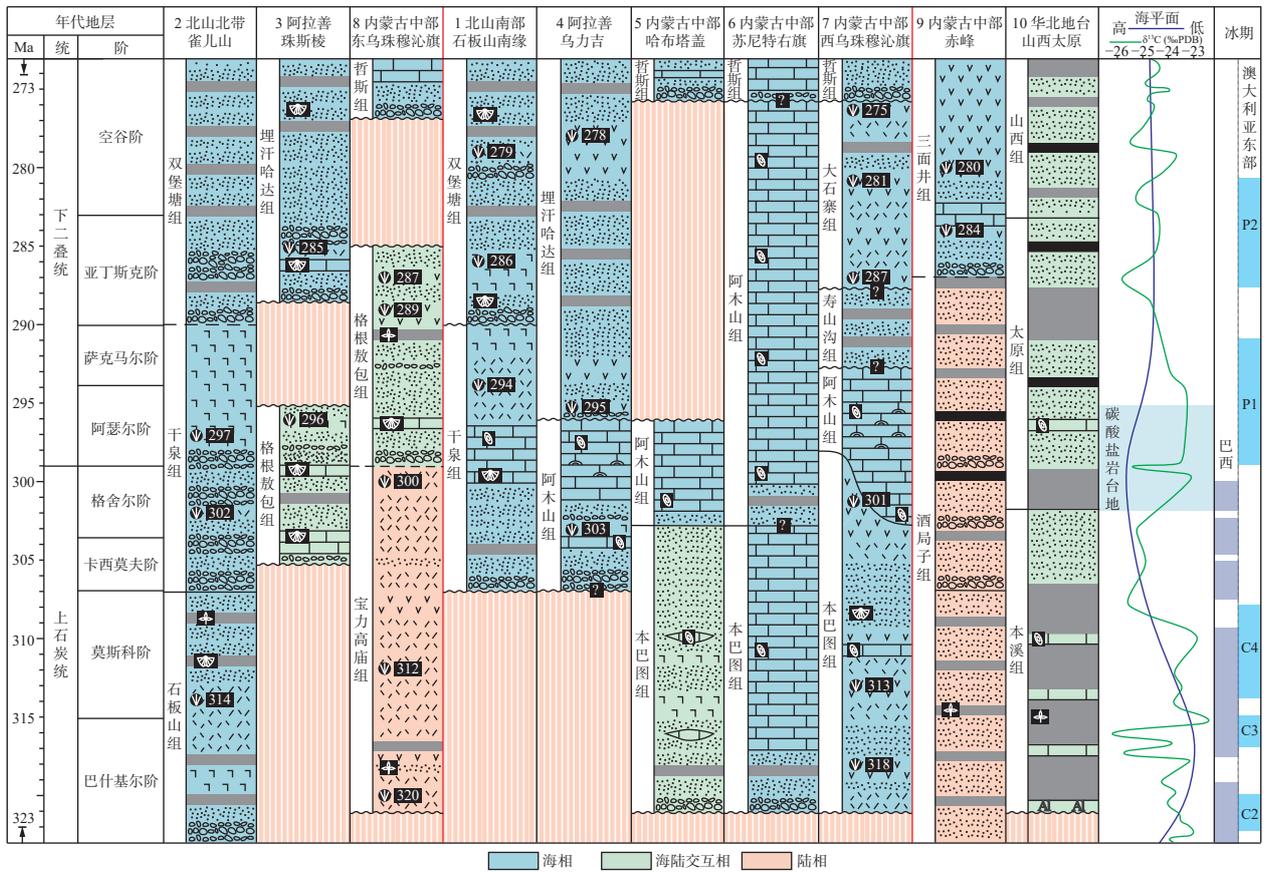
时代而言, 乌登汗剖面 and 264 界碑剖面产出的化石和火山岩同位素年龄证明地层时代为晚石炭世卡西莫夫期—早二叠世阿瑟尔期, 为阿木山组同期地层。参照内蒙古自治区地质矿产局 (1996) 和张玉清等 (2016) 的方案, 笔者建议将珠斯楞—杭乌拉构造带以碎屑岩为主的晚石炭世—早二叠世“阿木山组”统一修订为“格根敖包组”。

#### 4.2 中亚造山带南缘碳酸盐岩台地分布和时限

沙拉扎山构造带查古尔—陶来剖面的阿木山组碳酸盐岩连续出露厚度可达 264 m, 累计厚度可达 638 m, 岩性以蛭类泥粒灰岩为主, 有鲕粒灰岩、珊瑚障积岩、纹层状粘结灰岩、藻灰岩、生物碎屑颗粒灰岩、砂岩、粉砂岩、细砾岩夹层 (图 2)。蛭类泥粒灰岩中, 蛭类和孔虫含量可达 50% 以上, 壳体大小一般为 0.8~3.5 mm, 其他生物碎屑包括腕足类、海百合和苔藓类生物 (图 4e)。基质由泥晶和亮晶组成。蛭类的轻微破损表明短距离的搬运。这种岩相在中国南方为碳酸盐岩开阔台地的典型标志 (刘宝珺等, 1985)。珊瑚障积岩、纹层状粘结灰岩和藻灰岩代表台地边缘生物礁; 砂岩、粉砂岩和细砾岩代表台地边缘浅滩 (Yan et al., 2019; 史冀忠等, 2024)。

此次研究以 1:20 万区域调查资料为基础, 结合近十年来相关研究 (张玉清等, 2016; Niu et al., 2018; 田坤烜等, 2019; Yan et al., 2019), 系统梳理了中亚造山带南部的石炭纪—二叠纪地层。结果表明: 该区域碳酸盐岩相以厚度较大、沉积连续、富含蛭类化石的灰岩为标志, 主要剖面包括甘肃北山地区的干泉剖面、沙拉扎山构造带查古尔—陶来剖面, 乌拉特后旗乌兰敖包剖面、索伦山附近哈布塔盖剖面、苏尼特右旗德言其庙剖面、苏尼特右旗福禄盖剖面、西乌珠穆沁旗米汗高巧高鲁剖面, 断续相联达 1 800 km (图 1b、图 7) (鲍庆中等, 2006; 韩伟等, 2012; 张玉清等, 2016; 田坤烜等, 2019)。这些碳酸盐岩台地出现在华北地块北缘与中亚造山带交叠处, 跨越了索伦断裂带, 北界为红石山—恩格尔乌苏—贺根山断裂带 (图 1b)。该断裂带以北的甘肃北山雀儿山地区、阿拉善北缘珠斯楞地区、内蒙古中部东乌珠穆沁旗, 上石炭统—下二叠统中并无连续出露的碳酸盐岩, 也未发现蛭类化石 (图 7) (Shen et al., 2006; Zhu et al., 2017; Niu et al., 2018)。

华北北缘晚石炭世—早二叠世碳酸盐岩台地相中的蛭类被自下而上划分为 *Triticites* 带和 *Pseudoschwagerina* 带, 被认为是基本等时的标志地层单元,



剖面岩石组合和同位素年龄参考文献：1、2. 牛亚卓等(2018)、Niu 等(2018)；3、4. 此次研究；5、6. 张玉清等(2016)、田坤烜等(2019)；7、8、9. 鲍庆中等(2006)、Zhu 等(2017)；全球海平面曲线. Haq 等(2008)；华北地台 C 同位素曲线. Lu 等(2021)；晚古生代冰期时代. Fielding 等(2008)、Isbell 等(2021)

图7 中亚造山带南缘上石炭统—下二叠统对比图及碳酸盐岩台地分布图(剖面位置参见图 1c, 岩性花纹参见图 2)

Fig. 7 Stratigraphic correlation of the Upper Carboniferous–Lower Permian strata and distribution of carbonate platform in the southern margin of the Central Asian Orogenic Belt (See Fig. 1c for the locations of sections and Fig. 2 for petrologic patterns)

时代为晚石炭世卡西莫夫期—早二叠世阿瑟尔期(307~295 Ma)(丁蕴杰等, 1984; 张志存等, 1987; 范炳恒, 1998; Shen et al., 2006; 卜建军等, 2012)。然而, 近些年的微体古生物研究和火山岩同位素年代学数据表明这些碳酸盐岩台地的时限并非严格等时(图 7)。Niu 等(2018)在北山地区石板山地区干泉组上部获得同位素年龄 294 Ma, 据此证明该区碳酸盐岩台地上限在阿瑟尔期。此次研究中, 沙拉扎山构造带查古尔—陶来剖面火山岩的高精度同位素年龄将沙拉扎山构造带碳酸盐岩台地的时代精确限制在(303.2±1.7)Ma 和(295.3±2.8)Ma 之间, 即格舍尔期晚期—阿瑟尔期。田坤烜等(2019)在苏尼特右旗德言其庙阿木山组顶部建立 *Pseudoschwagerina urdalensis*–*Rugosofusulina intermedia* 带, 据此建议将该段碳酸盐岩时代提高至空谷期(284~273 Ma)。内蒙古中部西乌珠穆沁旗阿木山组下伏的本巴图组和上覆的大石寨组有大量火

山岩同位素年龄报道, 将该区域阿木山组时代限制在 301~287 Ma 之间, 即格舍尔期—亚丁斯克期(李红英等, 2016; Zhu et al., 2017; 张晓飞等, 2018)。由此可见, 中亚造山带南缘不同地区的碳酸盐岩台地的年代上限在 295~273 Ma 之间变化, 西部北山和阿拉善北区地区的碳酸盐岩台地消亡时间可能较早。

#### 4.3 中亚造山带南缘碳酸盐岩台地成因分析

碳酸盐岩台地的建立需要适宜的海水深度和温度、较少的陆源碎屑、相对丰富的钙质生物群等因素(刘宝珺等, 1985; Reading, 1996; Flügel, 2010)。中亚造山带南缘阿木山组不整合于泥盆系、奥陶系或者前寒武系花岗岩变质岩基地之上, 整合或者平行不整合于上石炭统本巴图组之上(图 7)(鲍庆中等, 2006; 张玉清等, 2016; Zhu et al., 2017)。鲍庆中等(2006)认为阿木山组碳酸盐岩台地发育在晚石炭世海侵序列的顶部, 与本巴图组上段构成了高水位体系。此次研究在红

石山-恩格尔乌苏-贺根山构造带以北发现: 与阿木山组基本同期的格根敖包组不整合于中泥盆统一下石炭统花岗岩体之上, 证明晚石炭世海侵序列在中亚造山带各构造带均有分布。阿拉善北缘阿木山组碳酸盐岩台地时代处于(303.2±1.7)Ma和(295.3±2.8)Ma之间, 与Haq(2008)提出的石炭纪最晚期全球海平面高点时代一致, 也和华北板块太原组毛儿沟灰岩代表的海平面高点一致(范炳恒, 1998; Lu et al., 2021)。此外, 中亚造山带南缘碳酸盐岩台地发育之前, 华北板块C同位素出现两次负漂移, 对应澳大利亚晚古生代冰期C4和P1之间的间冰期, 表明晚石炭世海侵和冰期气候之间的潜在联系(图7)(Fielding et al., 2008; Isbell et al., 2021; Lu et al., 2021)。由此可见, 研究区上石炭统一下二叠统的岩石组成和构造地理分布均支持: 将红石山-恩格尔乌苏-贺根山断裂带以北以碎屑岩为主的地层单元划分为格根敖包组。

就海水温度而言, Yan等(2019)根据晚石炭世叶状藻生物礁在全球分布, 提出西乌珠穆沁旗的阿木山组碳酸盐岩台地位于亚热带气候中。史冀忠等(2024)根据地球化学和C-O同位素特征, 提出阿拉善北缘的碳酸盐岩台地发育在温暖或炎热的亚热带气候中, 古海水温度平均值为21.35℃。Zhao等(1990)和Zhang等(2021)根据古地磁数据, 提出位于贺根山断裂带和索伦断裂带之间的锡林浩特地块(图1c中剖面7号剖面)在晚石炭世位于赤道附近的低纬度地区。与之对应的是, Niu等(2021)提出红石山断裂带在晚石炭世—早二叠世早期分隔了北方大区 and 特提斯大区的动植物群。Zhang等(2021)在贺根山断裂带以北的兴蒙构造带南部地区(图1c中剖面8附近)获得古地磁数据, 证明该构造单元在晚石炭世位于35°N, 提出贺根山断裂带代表的古亚洲洋在晚石炭世宽度可达2700km。红石山-恩格尔乌苏-贺根山断裂带以北碳酸盐岩台地的缺失可能与高纬度寒冷气候相关。综上所述, 晚石炭世全球海平面上升, 古亚洲洋南缘位于低纬度的亚热带气候中, 适宜的海水深度和温度条件下形成了中亚造山带南缘的碳酸盐岩台地。

研究区碳酸盐岩台地的消亡以阿木山组/干泉组与上覆地层的不整合为标志, 该不整合接触在北山南部、阿拉善北缘、内蒙古中部广泛出露(图7)(鲍庆中等, 2006; 牛亚卓等, 2018)。此次研究在阿拉善北缘该不整合界面之上发现红色底砾岩层, 与北山南部、内蒙古中部特征一致, 代表区域隆升剥蚀和新的沉积层

序开始。不整合界面之上的双堡塘组、埋汗哈达组、寿山沟组和大石寨组普遍为水体逐渐加深的裂谷盆地序列, 这些地层单元普遍发育双峰式火山岩, 地球化学特征也指示构造伸展环境(徐备等, 2014; Wang et al., 2017; Xiao et al., 2018)。牛亚卓等(2018)进一步提出该不整合代表裂谷盆地肩部隆升, 陆源火山碎屑供给增多。由此可见, 早—中二叠世中亚造山带南缘普遍发育的裂谷盆地是碳酸盐岩台地消亡的主要原因。

## 5 结论

(1)阿拉善北缘珠斯楞-杭乌拉构造带的格根敖包组以碎屑岩为主, 时代为晚石炭世卡西莫夫期—早二叠世阿瑟尔期(<296.1 Ma), 沙拉扎山构造带的阿木山组以连续出露的碳酸盐岩为标志, 普遍产出螭类化石, 时代晚石炭世格舍尔期—早二叠世阿瑟尔期(>303.2~295.3 Ma)。

(2)中亚造山带南缘晚石炭世—早二叠世的碳酸盐岩台地西起北山南部, 经阿拉善北缘, 东延至内蒙古中部西乌珠穆沁旗。该碳酸盐台地以连续厚度较大、富含螭类化石为标志, 出露在华北板块北缘, 红石山-恩格尔乌苏-贺根山断裂带以南。

(3)中亚造山带南缘的碳酸盐岩台地是全球石炭纪末期海平面上升的产物, 发育在古亚洲洋南缘的亚热带气候中。早—中二叠世裂谷作用造成的局部隆升和大量陆源碎屑供给是碳酸盐岩台地消亡的主要原因。

致谢: 本文为卢进才教授级高级工程师主持的中国地质调查局项目“银额盆地油气地质调查(2011~2018年)”部分成果的深化。两名匿名审稿人提出建设性修改意见。中国地质调查局西安地质调查中心姜亭、魏建设、张宇轩、许伟、王宝文、尹立潮等协助进行野外工作, 叶芳、李艳广和靳梦琪指导完成相关实验。在此谨致谢忱。

## 参考文献(References):

- 鲍庆中, 张长捷, 吴之理, 等. 内蒙古东南部西乌珠穆沁旗地区石炭纪—二叠纪岩石地层和层序地层[J]. 地质通报, 2006, 25(5): 572-579.
- BAO Qingzhong, ZHANG Changjie, WU Zhili, et al. Carboniferous-Permian marine lithostratigraphy and sequence stratigraphy in Xi Ujimqin Qi, southeastern Inner Mongolia, China

- [J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(5): 572-579.
- 卜建军, 段先锋, 牛志军. 内蒙古西部额济纳旗及邻区中二叠统腕足类动物群的特征和时代[J]. *地质通报*, 2011, 30(6): 943-954.
- BU Jianjun, DUAN Xianfeng, NIU Zhijun. Characteristics and geological age of Middle Permian brachiopod fauna from Ejin Banner and its vicinities, western Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(6): 943-954.
- 卜建军, 牛志军, 吴俊, 等. 内蒙古西部额济纳旗及邻区上石炭统一下二叠统阿木山组的沉积特征和时代[J]. *地质通报*, 2012, 31(10): 1669-1683.
- BU Jianjun, NIU Zhijun, WU Jun, et al. Sedimentary characteristics and age of Amushan Formation in Ejin Banner and its adjacent areas, western Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(10): 1669-1683.
- 丁蕴杰, 夏国英, 段承华, 等. 内蒙古哲斯地区早二叠世地层及动物群 [A]. 中国地质科学院天津地质矿产研究所文集 [C]. 1984, 10: 1-244.
- DING Yunjie, XIA Guoying, DUAN Chenghua, et al. Study on the Early Permian stratigraphy and fauna in Zhesi District, Inner Mongolia[A]. *Bulletin Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources*[C]. 1984, 10: 1-244.
- 范炳恒. 华北地台石炭系—二叠系界线的腕足动物标志[J]. *地质论评*, 1998, 44(2): 113-119.
- FAN Bingheng. The brachiopod indicator on the Permo-Carboniferous boundary in the North China Platform[J]. *Geological Review*, 1998, 44(2): 113-119.
- 甘肃省地质局区域地质调查队. 1/20万因格井幅区域地质图及调查报告 (K4831)[R]. 甘肃省地质局区域地质调查队, 1980.
- 甘肃省地质局地质力学区域测量队. 1/20万拐子湖幅区域地质图及调查报告 (K4819)[R]. 甘肃省地质局区域地质调查队, 1981.
- 郭硕, 滕学建, 刘洋, 等. 内蒙古狼山西北缘乌兰敖包地区“阿木山组”沉积时限、物源特征及其地质意义简[J]. *地球科学*, 2019, 44(1): 193-205.
- GUO Shuo, TENG Xuejian, LIU Yang, et al. The age and potential provenance information of Amushan formation in Wulanaobao area, northwestern of Langshan, Inner Mongolia and its geological significance[J]. *Earth Science*, 2019, 44(1): 193-205.
- 韩建修, 郭胜哲, 马秀, 等. 大兴安岭南部中、晚石炭世地层[J]. *地层学杂志*, 1979, 3(3): 214-224.
- HAN Jianxiu, GUO Shengzhe, MA Xiu, et al. Middle and Late Carboniferous strata in the southern Daxinganling[J]. *Acta Stratigraphica Sinica*, 1979, 3(3): 214-224.
- 韩伟, 刘溪, 李金超, 等. 内蒙古乌拉特后旗乌兰敖包地区石炭系—二叠系阿木山组沉积环境[J]. *地质通报*, 2012, 31(10): 1684-1691.
- HAN Wei, LIU Xi, LI Jinchao, et al. Sedimentary environment of Carboniferous-Permian Amushan Formation in Wulanaobao area of Urad Rear Banner, Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(10): 1684-1691.
- 李红英, 周志广, 李鹏举, 等. 内蒙古西乌旗晚石炭世—早二叠世伸展事件——来自大石寨组火山岩的证据[J]. *大地构造与成矿学*, 2016, 40(5): 996-1013.
- LI Hongying, ZHOU Zhiguang, LI Pengjun, et al. A Late Carboniferous-Early Permian extensional event in Xi Ujimqin Qi, Inner Mongolia—Evidence from volcanic rocks of Dashizhai Formation[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2016, 40(5): 996-1013.
- 李艳广, 汪双双, 刘民武, 等. 斜锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年方法及应用[J]. *地质学报*, 2015, 89(12): 2400-2418.
- LI Yanguang, WANG Shuangshuang, LIU Minwu, et al. U-Pb dating study of Baddeleyite by LA-ICP-MS: Technique and application[J]. *Acta Geological Sinica*, 2015, 89(12): 2400-2418.
- 李艳广, 靳梦琪, 汪双双, 等. LA-ICP-MS U-Pb 定年技术相关问题探讨[J]. *西北地质*, 2023, 56(4): 274-282.
- LI Yanguang, JIN Mengqi, WANG Shuangshuang, et al. Exploration of Issues Related to the LA-ICP-MS U-Pb Dating Technique[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(4): 274-282.
- 刘宝珺, 曾允孚. 岩相古地理基础和工作方法 [M]. 北京: 地质出版社, 1985.
- LIU Baojun, ZENG Yongfu. Lithofacies and Paleogeography: Principles and application [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985.
- 卢进才, 陈高潮, 李玉宏, 等. 银额盆地及其邻区石炭—二叠系油气地质条件与资源前景 [M]. 北京: 地质出版社, 2012.
- 卢进才, 史冀忠, 牛亚卓, 等. 内蒙古西部北山-银额地区石炭纪—二叠纪层序地层与沉积演化[J]. *岩石学报*, 2018, 34(10): 3101-3115.
- LU Jincan, SHI Jizhong, NIU Yazhuo, et al. The Carboniferous-Permian sequence stratigraphy and sedimentary evolution of Beishan-Yin'e region, western Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(10): 3101-3115.
- 内蒙古自治区地质矿产局. 内蒙古自治区区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- 内蒙古自治区地质矿产局. 内蒙古自治区岩石地层 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996.
- 内蒙古自治区第一区域地质调查队. 1/20万乌尔特幅区域地质图及调查报告 (K4822)[R]. 内蒙古自治区第一区域地质调查队, 1982.
- 宁夏回族自治区地质局区域地质调查队. 1/20万乌力吉幅区域地质图及调查报告 (K4827) [R]. 宁夏回族自治区地质局区域地质调查队, 1980.
- 牛亚卓, 卢进才, 刘池阳, 等. 甘肃北山地区上石炭统—下二叠统干泉组的时代、分布及其构造意义[J]. *地质论评*, 2018, 64(4): 806-827.
- NIU Yazhuo, LU Jincan, LIU Chiyang, et al. Geochronology and distribution of the Upper Carboniferous-Lower Permian Ganquan Formation in the Beishan Region, northwestern China and its tectonic implication[J]. *Geological Review*, 2018, 64(4): 806-827.
- 盛金章. 内蒙白云鄂博附近上石炭纪的蜓科[J]. *古生物学报*, 1958, 6(1): 37-45.
- SHENG Jinzhang. Upper Carboniferous fusulinids from Baiyunebo, Inner Mongolia [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 1958, 6(1):

- 37-45.
- 史冀忠, 魏建设, 姜亭, 等. 银额盆地石炭系—二叠系阿木山组碳酸盐岩地球化学特征及古海洋环境[J]. 西北地质, 2024, 57(6): 113-126.
- SHI Jizhong, WEI Jianshe, JIANG Ting, et al. Geochemical characteristics and paleo-oceanic environment of carbonate rocks of Carboniferous-Permian Amushan Formation in Yingen-Ejin Banner Basin: A case study of Wuliji-Taolai Section[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(6): 113-126.
- 苏养正. 内蒙古草原地层区的古生代地层[J]. 吉林地质, 1996, 15(3-4): 42-54.
- SU Yangzheng. Paleozoic stratigraphy of Nei Mongol grass stratigraphical province[J]. *Jilin Geology*, 1996, 15(3-4): 42-54.
- 王文宝, 李卫星, 雷聪聪, 等. 中亚造山带中段早—中三叠世埃达克岩和A型花岗岩成因及构造意义[J]. 西北地质, 2024, 57(3): 29-43.
- WANG Wenbao, LI Weixing, LEI Congcong, et al. Early-Middle Triassic Adakitic and A-type Granite in Middle Segment of Central Asian Orogenic Belt: Petrogenesis and Tectonic Implications[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(3): 29-43.
- 田坤烜, 史宇坤, 闫振. 内蒙古苏尼特右旗德音其庙剖面二叠纪蠕类动物群[J]. 微体古生物学报, 2019, 36(3): 232-250.
- TIAN Kunxuan, SHI Yukun, YAN Zhen. Permian fusulinids from the Deyanqimiao III section of Sonid Right Banner, Inner Mongolia[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2019, 36(3): 232-250.
- 吴妍蓉, 周海, 赵国春, 等. 中亚造山带南缘蒙古地区石炭纪—二叠纪岩浆活动及其构造意义[J]. 西北地质, 2024, 57(3): 11-28.
- WU Yanrong, ZHOU Hai, ZHAO Guochun, et al. Carboniferous-Permian Magmatism of Southern Mongolia, Central Asian Orogenic Belt and Its Tectonic Implications[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(3): 11-28.
- 吴泰然, 何国琦. 内蒙古阿拉善地块北缘的构造单元划分及各单元的基本特征[J]. 地质学报, 1993, 67(2): 97-108.
- WU Tairan, HE Guoqi. Tectonic units and their fundamental characteristics on the northern margin of the Alxa Block[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1993, 67(2): 97-108.
- 徐备, 赵盼, 鲍庆中, 等. 兴蒙造山带前中生代构造单元划分初探[J]. 岩石学报, 2014, 30(7): 1841-1857.
- XU Bei, ZHAO Pan, BAO Qingzhong, et al. Preliminary study on the pre-Mesozoic tectonic unit division of the Xing-Meng Orogenic Belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(7): 1841-1857.
- 杨海星, 高利东, 高玉石, 等. 内蒙古霍林河地区晚石炭世本巴图组火山岩年代学、地球化学特征及构造背景[J]. 中国地质, 2020, 47(4): 281-293.
- YANG Haixing, GAO Lidong, GAO Yushi, et al. The chronology, geochemical characteristics and tectonic setting of the volcanic rocks in the Benbatu Formation of Huolinhe area, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 2020, 47(4): 281-293.
- 张海迪, 陈博, 吕鹏瑞, 等. 东天山黄山西角闪辉长岩成因及其地质意义: 来自锆石 U-Pb 年代学及地球化学的证据[J]. 西北地质, 2021, 54(3): 51-65.
- ZHANG Haidi, CHEN Bo, LÜ Pengrui, et al. The Petrogenesis and Geological Significance of the Hornblende Gabbro in Western Huangshan of East Tianshan: Evidence from Zircon U-Pb Chronology and Geochemistry[J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(3): 51-65.
- 张建新, 宫江华. 阿拉善地块性质和归属的再认识[J]. 岩石学报, 2018, 34(4): 940-962.
- ZHANG Jianxin, GONG Jianghua. Revisiting the nature and affinity of the Alxa Block[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(4): 940-962.
- 张晓飞, 周毅, 刘俊来, 等. 内蒙古西乌旗大石寨组火山岩年代学和地球化学特征及地质意义[J]. 岩石学报, 2018, 34(6): 1775-1791.
- ZHANG Xiaofei, ZHOU Yi, LIU Junlai, et al. Geochronology and geochemistry for volcanic rocks of Dashizhai Formation and its geological significance in Xi U jimqin Banner, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(6): 1775-1791.
- 张研. 内蒙古巴丹吉林沙漠南缘额肯阿尔斯楞地区早二叠世腕足动物群[J]. 西北地质科学, 1990, 28: 57-66.
- ZHANG Yan. Early Permian brachiopod fauna from Ekenalsileng region of Badain Jaran Desert south margin, Nei Mongol[J]. *Northwest Geoscience*, 1990, 28: 57-66.
- 张玉清, 张婷. 内蒙古阿木山组[J]. 中国地质, 2016, 43(3): 1000-1015.
- ZHANG Yuqing, ZHANG Ting. Amushan Formation in Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 2016, 43(3): 1000-1015.
- 张志存, 盛金章. 内蒙古白乃庙 *Parafusulina* 动物群[J]. 微体古生物学报, 1987, 4(3): 237-246.
- ZHANG Zhicun, SHENG Jinzhang. *Parafusulina* fauna from Bainaimiao, Nei Mongol[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 1987, 4(3): 237-246.
- 郑和荣, 胡宗全. 中国前中生代构造-岩相古地理图集[M]. 北京: 地质出版社, 2010.
- Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$ [J]. *Chemical Geology*, 2002, 192: 59-79.
- Cao J, Xia L W, Wang T T, et al. An alkaline lake in the Late Paleozoic Ice Age (LPIA): A review and new insights into paleoenvironment and petroleum geology[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 202: 103091.
- Chen Y, Wu T R, Zhang Z C. Detrital zircon U-Pb-Hf isotopes for the Permo-Carboniferous sediments in the northern Alxa area, NW China: provenance and tectonic implications for the middle segment of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Geological Magazine*, 2021, 158(5): 875-890.
- Fielding C R, Frank T D, Birgenheier L P, et al. Stratigraphic imprint of the Late Palaeozoic Ice Age in eastern Australia: a record of alternating glacial and nonglacial climate regime[J]. *Journal of the Geological Society*, 2008, 165(1): 129-140.
- Flügel E. Microfacies of carbonate rocks: analysis, interpretation and application[M]. Verlag Berlin Heidelberg, Springer, 2010.
- Haq B U, Schutter S R. A chronology of Paleozoic sea-level

- changes[J]. *Science*, 2008, 5898(322): 64–68.
- Isbell J L, Vesely F F, Rosa E L M, et al. Evaluation of physical and chemical proxies used to interpret past glaciations with a focus on the late Paleozoic Ice Age [J]. *Earth-Science Reviews*, 2021: 103756.
- Liu Q, Zhao G C, Han Y G, et al. Timing of the final closure of the middle segment of the Paleo-Asian Ocean: Insights from geochronology and geochemistry of Carboniferous–Triassic volcanosedimentary successions in western Inner Mongolia, China[J]. *GSA Bulletin*, 2019, 131(5–6): 941–965.
- Lu J, Wang Y, Yang M F, et al. Records of volcanism and organic carbon isotopic composition ( $\delta_{13C_{org}}$ ) linked to changes in atmospheric  $P_{CO_2}$  and climate during the Pennsylvanian icehouse interval[J]. *Chemical Geology*, 2021, 570: 120168.
- Niu Y Z, Liu C Y, Shi G R, et al. Unconformity-bounded Upper Paleozoic megasequences in the Beishan Region (NW China) and implications for the timing of the Paleo-Asian Ocean closure[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 167: 11–32.
- Ludwig K R. User's manual for a geochronological toolkit for Microsoft Excel (Isoplot/Ex version 3.0) [M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003.
- Niu Y Z, Shi G R, Ji W H, et al. Paleogeographic evolution of a Carboniferous–Permian sea in the southernmost part of the Central Asian Orogenic Belt, NW China: Evidence from microfacies, provenance and paleobiogeography[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 220: 103738.
- Reading H G. Sedimentary environments: processes, facies and stratigraphy [M]. Oxford: Blackwell Science Inc, 1996.
- Sengör A M C., Natalin B A, Burtman V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 1993, 364: 299–307.
- Sengör A M C, Natalin B A, Sunal G, et al. The tectonics of the Altaids: crustal growth during the construction of the continental lithosphere of Central Asia between ~750 and ~130 Ma ago[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2018, 46: 439–494.
- Shen S Z, Zhang H, Shang Q H, et al. Permian stratigraphy and correlation of Northeast China: A review[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 26(3): 304–326.
- Shi G Z, Song G Z, Wang H, et al. Late Paleozoic tectonics of the Solonker Zone in the Wuliji area, Inner Mongolia, China: Insights from stratigraphic sequence, chronology, and sandstone geochemistry[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 127: 100–118.
- Song D F, Xiao W J, Windley B F., et al. Carboniferous to Early Triassic magmatism and accretion in Alxa (NW China): implications for accretionary orogenesis of the southern Altaids[J]. *Journal of the Geological Society*, 2020, 177(5): 997–1012.
- Tian R S, Xie G A, Zhu W B, et al. Late Paleozoic Tectonic Evolution of the Paleo-Asian Ocean in the Northern Alxa Block (NW China)[J]. *Tectonics*, 2020, 39(8): e2020T–e6359T.
- Wang Y, Luo Z H, Santosh M, et al. The Liuyuan Volcanic Belt in NW China revisited: evidence for Permian rifting associated with the assembly of continental blocks in the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Geological Magazine*, 2017, 154(2): 265–285.
- Xiao W J, Windley B F, Han C M, et al. Late Paleozoic to early Triassic multiple roll-back and oroclinal bending of the Mongolia collage in Central Asia[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 186: 94–128.
- Xiao W J, Windley B F, Sun S, et al. A tale of amalgamation of three Permo-Triassic collage systems in Central Asia: Oroclines, sutures, and terminal accretion[J]. *Annual Review of Earth & Planetary Sciences*, 2015, 43(43): 477–507.
- Yan Z, Liu J B, Jin X C, et al. Construction model and paleogeographic distribution of Late Pennsylvanian phylloid algal-microbial reefs: A case study in eastern Inner Mongolia, North China[J]. *Sedimentary Geology*, 2019, 383: 181–194.
- Zhang D H, Huang B C, Meert J G, et al. Micro-blocks in NE Asia amalgamated into the unified Amuria block by ~300 Ma: first paleomagnetic evidence from the Songliao block, NE China [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021: e2021J–e22881J.
- Zhang W, Pease V, Meng Q P, et al. Age and petrogenesis of late Paleozoic granites from the northernmost Alxa region, northwest China, and implications for the tectonic evolution of the region[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2017, 106(1): 79–96.
- Zhang Q, Niu Y Z, Yao J L, et al. Paleogeographic affinity of the Alxa Block across the Archean–Proterozoic: Insights from metamorphosed Archean basement[J]. *Precambrian Research*, 2022, 381: 106864.
- Zhao G C, Wang Y J, Huang B C, 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.
- Zhao X X, Coe S R, Zhou Y X, et al. New paleomagnetic results from northern China: collision and suturing with Siberia and Kazakhstan[J]. *Tectonophysics*, 1990, 181(1): 43–81.
- Zheng R G, Wu T R, Zhang W, et al. Late Paleozoic subduction system in the northern margin of the Alxa block, Altaids: Geochronological and geochemical evidences from ophiolites[J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(2): 842–858.
- Zhou J B, Wilde S A, Zhao G C, et al. Nature and assembly of microcontinental blocks within the Paleo-Asian Ocean[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 186: 76–93.
- Zhu J B, Ren J S. Carboniferous–Permian stratigraphy and sedimentary environment of southeastern Inner Mongolia, China: Constraints on final closure of the Paleo-Asian Ocean[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2017, 91(3): 832–856.