

引用格式: 刘佳, 钱涛, 2023. 柴达木盆地北缘早二叠世凝灰岩的发现及其地质意义 [J]. 地质力学学报, 29 (2): 290–300. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023002

Citation: LIU J, QIAN T, 2023. Discovery of Permian tuff from the northern margin of the Qaidam Basin and its geological implications [J]. Journal of Geomechanics, 29 (2): 290–300. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023002

柴达木盆地北缘早二叠世凝灰岩的发现及其地质意义

刘 佳¹, 钱 涛^{2,3,4}

LIU Jia¹, QIAN Tao^{2,3,4}

1. 陕西能源职业技术学院煤炭与化工产业学院, 陕西 咸阳 712000;

2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

3. 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室, 北京 100081;

4. 中国地质调查局油气地质力学重点实验室, 北京 100081

1. *Coal and Chemical Industry College, Shaanxi Energy Institute, Xianyang 712000, Shaanxi, China;*

2. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

3. *Key Laboratory of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction of Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*

4. *Key Laboratory of Petroleum Geomechanics, China Geological Surveys, Beijing 100081, China*

Discovery of Permian tuff from the northern margin of the Qaidam Basin and its geological implications

Abstract: Whether the Permian sedimentary records are still preserved in the northern Qaidam Basin is an open issue with various viewpoints. Most regional geological correlations imply that those Permian successions have been wholly eroded or that there is no Permian deposition in this area. These arguments were partly derived from the contrasting interpretations of the age of the fossils obtained from the Zhabusagaxiu formation. Other scholars consider that the lower unit of the Zhabusagaxiu formation, composed of alternating sandstone, mudstone, and limestone, belongs to the Carboniferous. In contrast, its upper limestone member should be assigned an early Permian sedimentary age, hinting that Permian successions are preserved in the northern Qaidam Basin. Therefore, it is still unclear whether the Permian sedimentary records are still preserved in the northern Qaidam Basin. In this study, the Keluke and Zhabusagaxiu formations in the Wanggaxiu-Dongdagou section were investigated in the field and measured in detail, and several volcanic tuff interbeddings were identified. Zircon LA-ICP-MS U-Pb geochronological studies were undertaken on zircons retrieved from a collected tuff sample. A high-precision weighted mean age of 295 ± 2 Ma (MSWD = 0.035) was obtained for the first time. This firstly reported age estimate solidly constrains the existence of the Permian strata in the northern Qaidam Basin. This clue will provide new insight into the following oil-gas exploration concerning the Permian successions and also provide a crucial limit on the studies of Carboniferous-Permian global climate change and sea level change.

Keywords: early Permian; Zhabusagaxiu formation; zircon geochronology; northern Qaidam; tuff

摘 要: 柴达木盆地北缘地区是否存在早二叠世沉积记录依旧是一个悬而未决的问题。现有区域地质资料普遍认为二叠系并未沉积或已完全被剥蚀。这分歧起源于对现有的古生物化石形成年代认识的不同。

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20221810); 陕西能源职业技术学院 2022 年度校级科学研究计划项目 (2022KY15KJP); 中国地质科学院基本科研业务项目 (DZLXJK202004)

This research is financially supported by the Geological Survey Project of the China Geological Survey (Grant DD20221810), the Scientific Research Program for 2022 of the Coal and Chemical Industry College (Grant 2022KY15KJP), and the Basic Science Project of the Institute of Geomechanics (Grant DZLXJK202004).

第一作者: 刘佳 (1988—), 女, 硕士, 从事地球化学研究。E-mail: 443259266@qq.com

通讯作者: 钱涛 (1986—), 女, 博士, 副研究员, 从事沉积盆地分析及盆地动力学研究。E-mail: liulianziqt@foxmail.com

收稿日期: 2023-01-03; **修回日期:** 2023-02-20; **责任编辑:** 王婧

此次研究对柴达木盆地北缘东段旺尕秀地区的石炭系克鲁克组和扎布萨尕秀组开展详细的野外地质调查和剖面实测工作, 在东大沟剖面扎布萨尕秀组底部鉴别出数层凝灰岩, 并采集锆石 U-Pb 年代学样品。通过锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年, 首次获得 295 ± 2 Ma (MSWD = 0.035) 的高质量年代学数据。此次发表的数据, 明确了柴达木盆地北缘早二叠世沉积地层的存在。该研究成果为后续柴达木二叠系含油气系统勘探提供了重要的基础地质资料支撑, 并为今后开展石炭纪—二叠纪全球气候变化、海平面升降等方面的研究工作提供了重要的年代学约束。

关键词: 早二叠世; 扎布萨尕秀组; 锆石定年; 柴达木盆地北缘; 凝灰岩

中图分类号: P534.4; P535; P56 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2023) 02-0290-11

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023002

0 引言

柴达木盆地北缘晚古生代发育大套的海陆交互沉积建造, 其沉积充填演化记录了古特提斯洋最北分支的东昆仑洋向北俯冲的一系列弧后构造转换 (Qian et al., 2021; Sun et al., 2022)。油气地质调查揭示石炭纪大面积发育三角洲—潮坪—泻湖沉积, 该套含煤的混积岩系是现阶段柴达木地区古生代含油气系统的勘探热点所在, 被视为油气资源战略突破的新领域 (马寅生等, 2012; 刘文平等, 2016; 张跃等, 2016; 马立成等, 2020)。近些年来, 围绕着该套海相混合沉积建造开展了大量的工作, 在地层学、沉积学、原型盆地及盆地动力学等方面取得了诸多重要进展 (孙娇鹏等, 2014, 2016a; 陈世悦等, 2016; 魏小洁等, 2018; 计文化等, 2020; 高万里等, 2021), 然而地层年代方面的认识依然存在一定的分歧 (王训练等, 2002; Sun et al., 2019a)。

其中一个重要的分歧为柴达木盆地北缘是否存在二叠纪沉积? 现有区域地质资料以及相关地层对比研究普遍认为该地区二叠系并未沉积或已完全被剥蚀, 上石炭统直接被中生界不整合覆盖 (青海省地质矿产局, 1991)。这一分歧起源于对现有的古生物化石形成年代的认识的不同。20 世纪 70 年代开展了 1:20 万区域地质调查工作, 根据化石资料, 建立了柴达木盆地北缘地区上古生界地层的岩石地层格架以及生物地层和年代地层系统, 确定了主要地层界限及其对比关系 (王增吉, 1981; 王增吉和俞学光, 1995); 将该地区石炭系划分为下石炭统城墙沟组、怀头他拉组, 上石炭统克鲁克组 (青海省地质矿产局, 1991), 并认为克鲁克组之上的扎布萨尕秀组下部砂岩、泥

岩、灰岩互层段依旧属于石炭系, 而上部厚层碳酸盐岩段则应划归为二叠系 (王训练等, 2002)。现今的全国地层对比方案也沿袭了该认识, 依旧认为扎布萨尕秀组代表了晚石炭世晚期沉积 (李莹等, 2021)。

然而, 随着国际地层年代对比将石炭系二分、二叠系三分, 已有学者认为扎布萨尕秀组中的部分化石应该是二叠纪的 (马立成等, 2020)。此外, 最新研究在石灰沟剖面扎布萨尕秀组底部砂岩样品中发现大量 ~295 Ma 的碎屑锆石 (Sun et al., 2019a; 马立成等, 2020), 以此为依据推断柴达木盆地北缘可能存在下二叠统地层。然而, 此线索并不能直接地约束地层时代, 因为这些 ~295 Ma 的碎屑锆石只能约束沉积发生于不晚于早二叠世。因此, 柴达木盆地北缘地区是否存在早二叠世沉积记录依旧是一个悬而未决的问题。

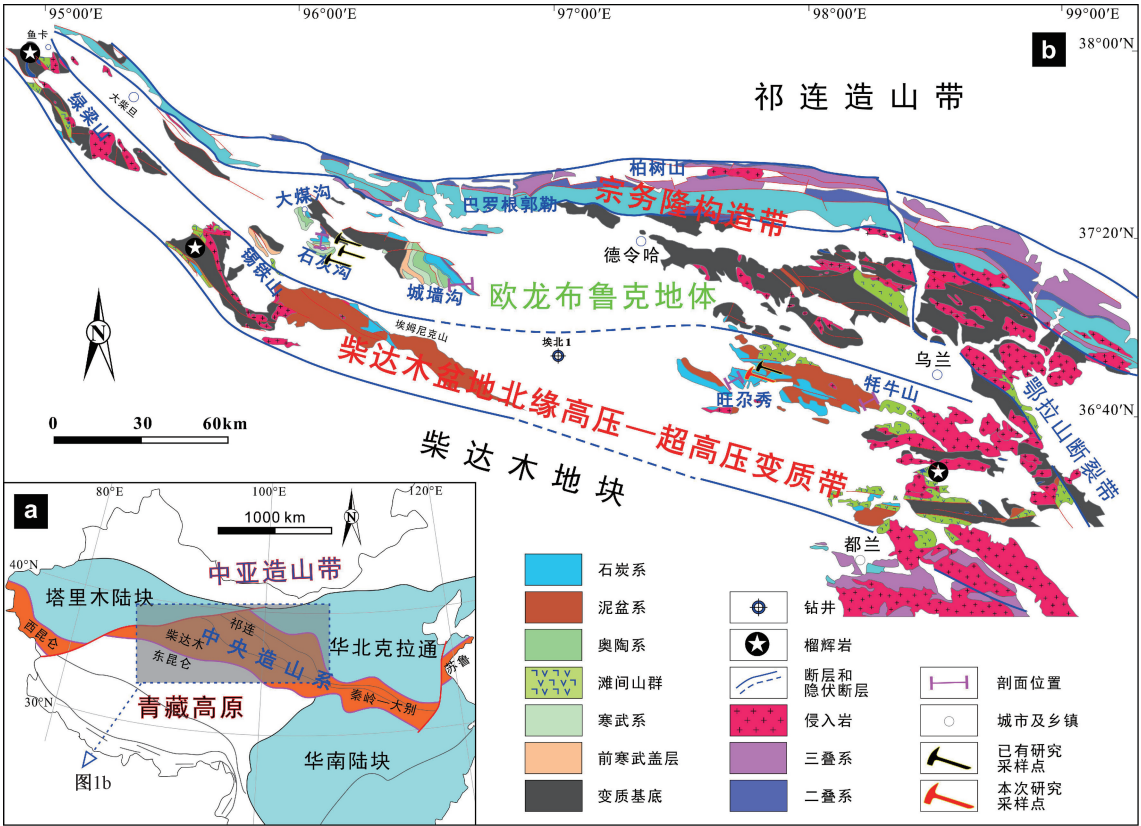
此次研究对柴达木盆地北缘东段旺尕秀东大沟剖面克鲁克组和扎布萨尕秀组开展了详细的野外地质调查和剖面实测。研究团队在剖面的实测过程中在扎布萨尕秀组底部识别出数层凝灰岩夹层, 对这些凝灰岩样品采集手标本制作薄片进行镜下观察等岩石学研究, 并采集了锆石 U-Pb 年代学样品。凝灰岩作为火山碎屑岩随火山爆发产生, 其中含有大量岩浆成因的锆石颗粒。对凝灰岩样品的锆石 U-Pb 年龄测定可以为扎布萨尕秀组底部年龄进行高精度的标定。研究团队对采集到的样品进行锆石 U-Pb LA-ICP-MS 测试, 获得了一组高质量的年代学数据, 以此高精度年龄数据为依据明确了柴达木盆地北缘早二叠世沉积地层的存在。该研究成果不仅解决了长久以来关于柴达木盆地北缘是否存在二叠纪沉积记录以及扎布萨尕秀组下段沉积时代的相关争议, 为后续柴达木盆地二叠系含油气系统研究提供了重要的基础地质资料。

同时，也为今后开展关于石炭纪—二叠纪全球气候变化、海平面升降等全球关注热点科学问题提供了重要的野外地质及年代学支撑。

1 区域地质背景

研究区位于青海省柴达木盆地的东北部、德令哈至都兰一带，在构造位置上位于中央造山系中段的北部，其南北分别是柴达木—东昆仑古生

代—三叠纪造山带和早古生代祁连造山带（图 1a；孙娇鹏等，2016b；Sun et al.，2019b，2020）。柴达木盆地北缘地区晚古生代露头在欧龙布鲁克山、石灰沟、旺尕秀、牦牛山一带出露良好（图 1b），化石丰富，已经开展了大量的古生物学、沉积学的研究工作（青海省地质矿产局，1991；孙娇鹏等，2014；陈世悦等，2016；彭博等，2020；钱涛等，2021），是该区石炭系研究的几个经典剖面（孙娇鹏等，2016a；Sun et al.，2022）。



a—中国大陆地区大地构造纲要图；b—柴达木盆地东北部区域大地构造简图

图 1 柴达木盆地北缘区域地质简图（据 Sun et al.，2022 修改）；

Fig. 1 Simplified geological map of the northern margin of the Qaidam Basin (modified from Sun et al.，2022)

(a) Sketch tectonic map of mainland China; (b) Geologic map of the northeastern Qaidam Basin

从构造位置来看，石灰沟、城墙沟等剖面位于欧龙布鲁克地体内，而穿山沟、旺尕秀剖面则位于柴达木盆地北缘加里东高压—超高压变质带内（图 1b）。欧龙布鲁克地体的石炭系覆盖在奥陶系石灰沟组复理石之上，志留纪—泥盆纪沉积缺失（Sun et al.，2022）；而柴达木盆地造山带内，泥盆系牦牛山组裂谷沉积覆盖在寒武纪—志留纪滩间山群火山建造之上，其上被下石炭统不同层位低角度超覆（图 2；孙娇鹏等，2014，2015，2016a；Sun et al.，2022）。

受东昆仑洋向北俯冲影响，石炭纪—二叠纪整个柴达木盆地地区位于东昆仑岩浆弧弧后位置，盆地地形相对平坦（Sun et al.，2022）。柴达木盆地北缘地区位于弧后位置，发育向北倾斜的浅水陆表海盆地，其北部是宗务隆裂陷海槽，发育宗务隆群的夹基性火山岩的深水盆地组合，二叠纪早期转为浅水碳酸盐岩缓坡沉积（孙娇鹏等，2014；陈世悦等，2016）。在此背景下，柴达木盆地北缘地区发育一套滨海相浅水碳酸盐岩—陆源碎屑岩混合沉积（孙娇鹏，2015），自下而上发育下

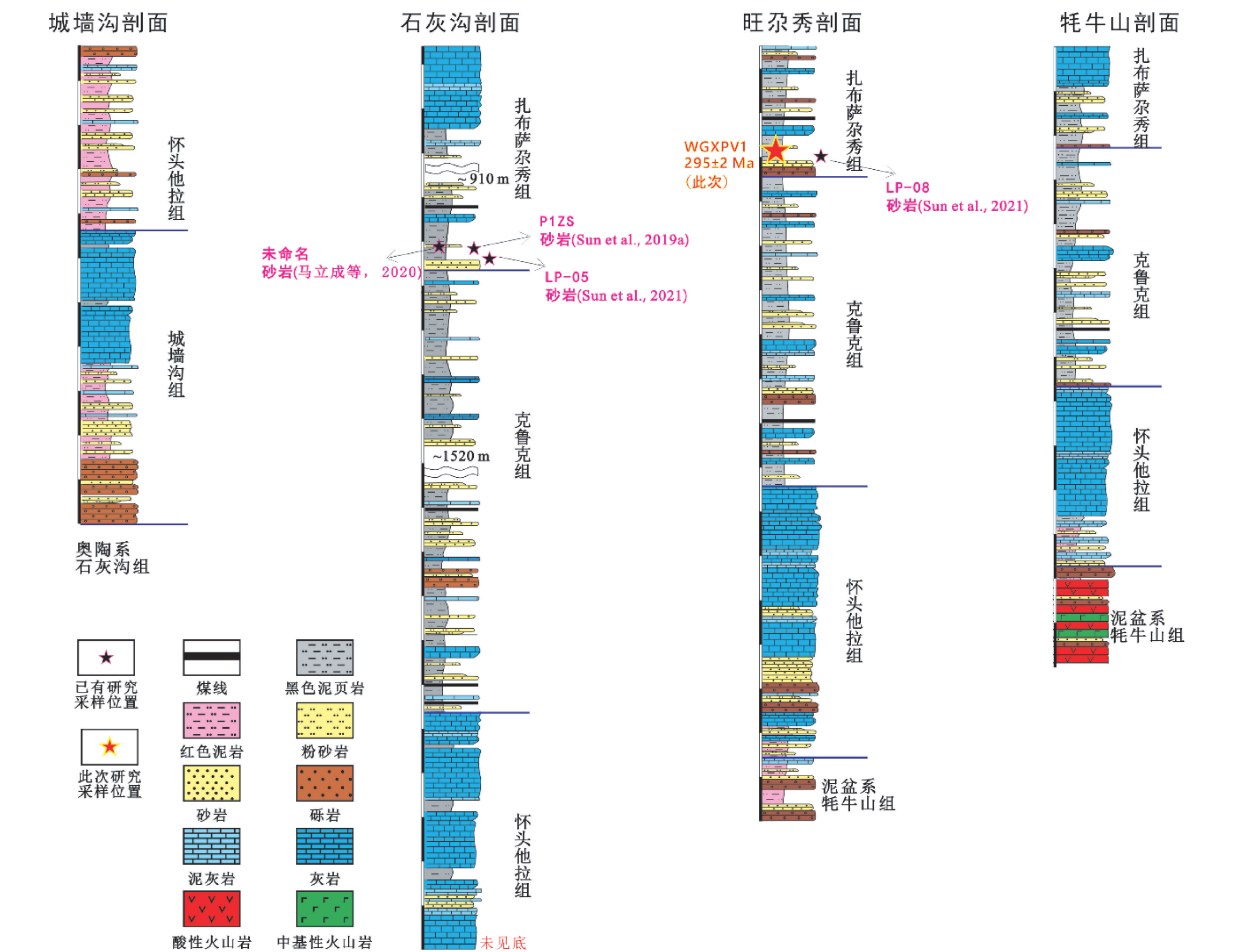


图 2 柴达木盆地北缘典型石炭系—二叠系剖面地层柱状图 (剖面位置见图 1; 据 Sun et al., 2022 修改)
Fig. 2 Stratigraphic columns for representative sections in the northern Qaidam Basin (The profiles are shown in Fig. 1; modified from Sun et al., 2022)

石炭统的城墙沟组、怀头他拉组, 上石炭统的克鲁克组, 以及下二叠统扎布萨尕秀组 (图 2)。柴达木盆地北缘地区的石炭系—二叠系沉积序列旋回性明显 (盛金章, 1962)。下石炭统的城墙沟组和怀头他拉组均可划分为下部的滨海三角洲砂泥岩互层组合以及上部的远岸碳酸盐岩生物碎屑灰岩段, 代表了早石炭世两期的海平面升降。上石炭统克鲁克组则发育 20 余个潮坪—障壁岛—潟湖—潮下碳酸盐岩的高频旋回地层, 每个序列大致厚约 20 m (孙娇鹏等, 2014)。下二叠统的扎布萨尕秀组, 其下段的岩性组合与下伏克鲁克组差别不大, 以砂岩—泥岩—灰岩互层为主要特征 (马立成等, 2020), 上部则发育厚层碳酸盐岩建造, 代表了海侵形成的远岸碳酸盐岩缓坡沉积 (陈世悦等, 2016)。

2 采样位置和样品简介

研究区位于柴达木盆地北缘造山带东段旺尔

秀一带, 野外调查过程中对东大沟剖面进行了详细的实测。东大沟剖面位于德都公路东侧, 是一个老煤矿, 露头沿矿沟出露。克鲁克组和扎布萨尕秀组在该剖面连续出露, 地层整体向北倾斜, 局部被断层破坏 (图 3)。

该区扎布萨尕秀组下部以黑色页岩发育为主, 与中厚层泥晶灰岩互层产出, 局部夹劣质煤线, 岩石组合和下伏克鲁克组较为接近, 1:20 万区域图上划归上石炭统 (青海省地质矿产局, 1991)。野外调查过程中, 在扎布萨尕秀组的中部发现数层土黄色凝灰岩。所采样品 WGXPV1 位于矿洞边部, GPS 坐标为 36°57′07.3″、97°40′41.5″, 深度 3125.7 m。凝灰岩在露头上以 ~10 cm 薄夹层形式出现在炭质泥岩之间, 2 m 剖面内共出露 7 层 (图 4a)。

凝灰岩多为土黄色, 大部分已经遇水发生黏土化, 横向上层厚变化稳定, 无明显颗粒感。岩矿鉴定结果显示, 虽然具有一定的高岭土化, 但矿物组成清晰显示该样品为岩屑晶屑玻屑凝灰岩

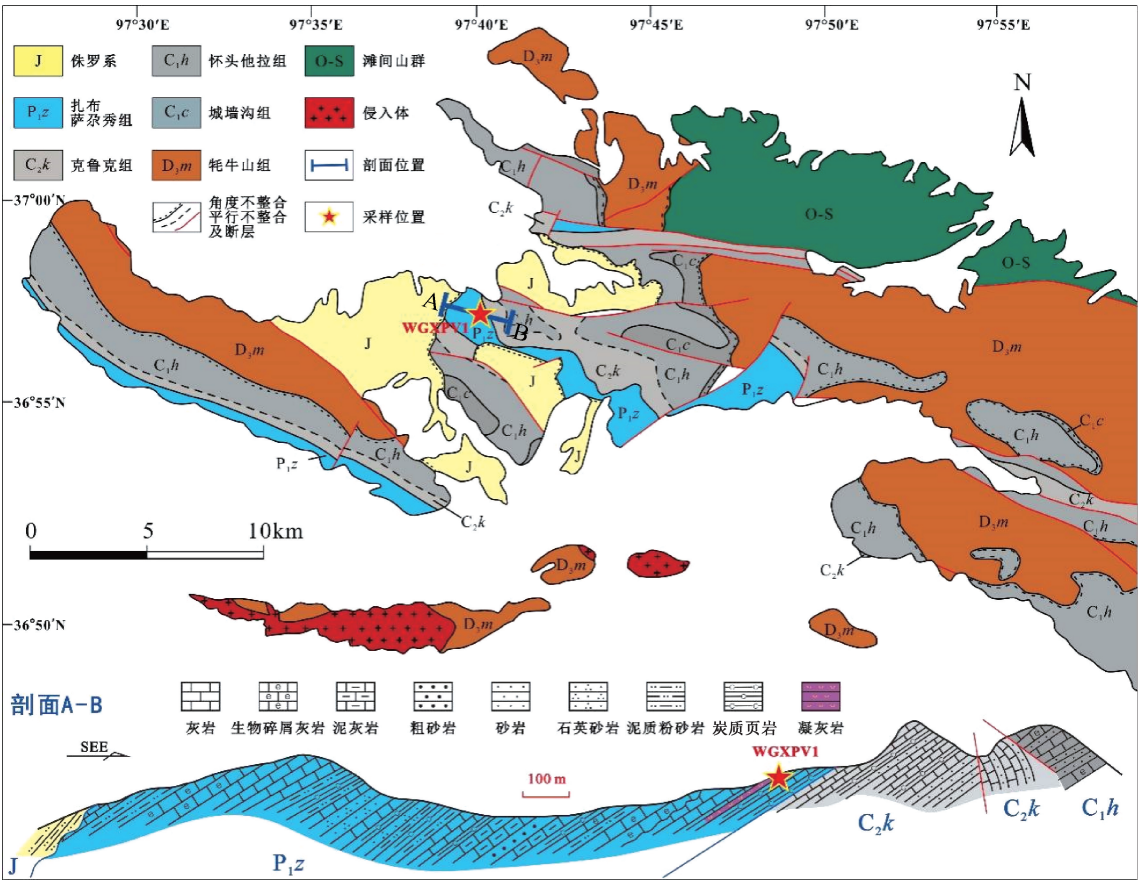


图 3 旺尕秀地区地质简图及旺尕秀剖面地层剖面简图（据青海省地质矿产局，1991 修改）

Fig.3 Simplified geologic map of the Wanggaxiu area and stratigraphic profile of the Wanggaxiu section（modified from Qinghai Bureau of Geology and Mineral Resources, 1991）

（图 4b、4c），矿物以晶屑石英、长石为主，含大量玻屑和凝灰质碎屑，气孔十分发育且未变形。

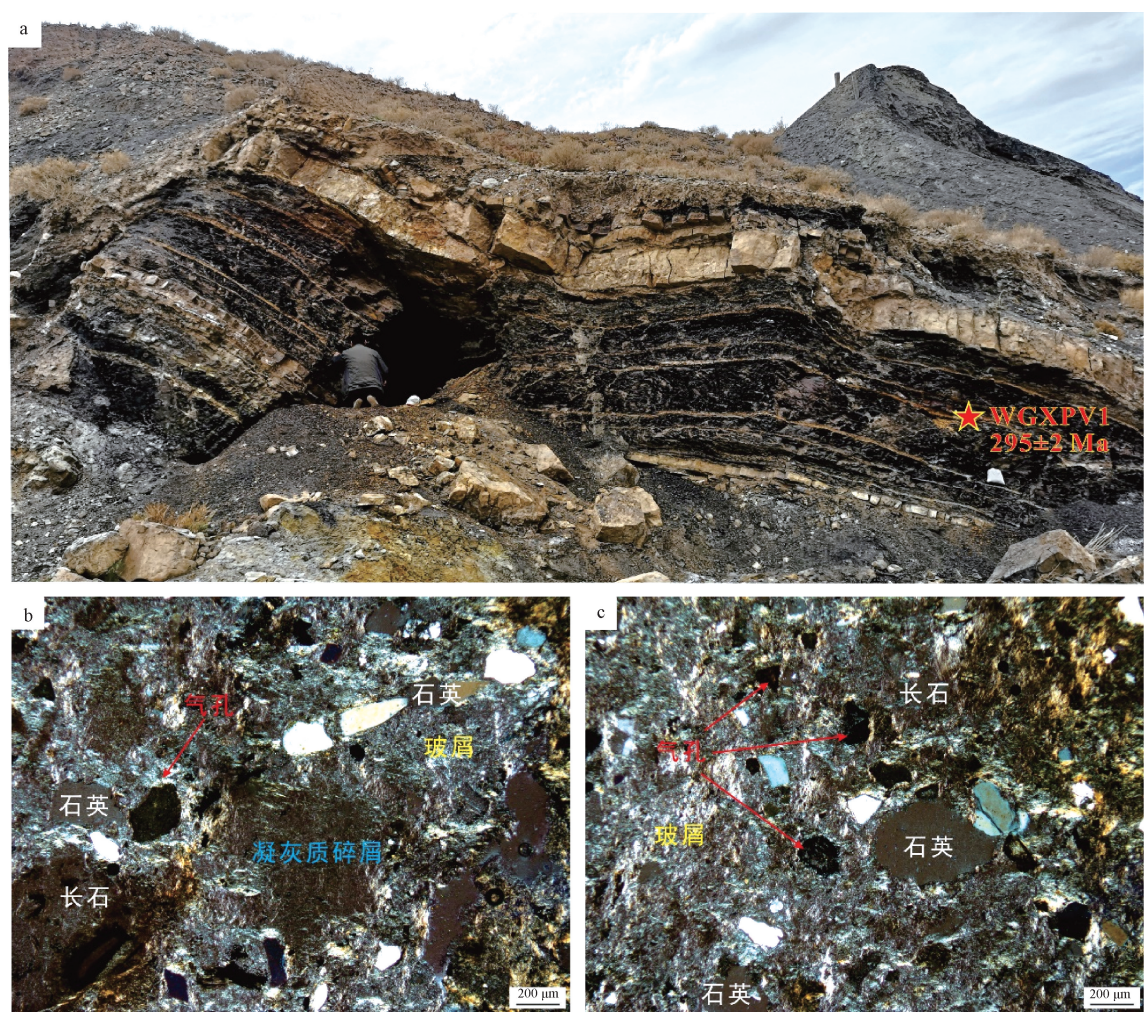
3 分析测试手段和测试结果

样品粉碎、锆石挑选和制靶在廊坊地质研究所完成。使用重磁法对重矿物进行萃取，挑选出>2000 颗锆石颗粒，进而随机选取 200 颗无包裹体和明显裂缝的锆石。这些锆石被粘贴到环氧树脂并进行剖光，露出锆石内部结构。锆石阴极发光（CL）照射以及锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。为揭示锆石的内部结构，锆石阴极发光照片使用美国 Gatan 公司生产的 Mono CL3 阴极发光系统，LA-ICP-MS 定年采用 Hewlett Packard 公司的 Agilent7500a ICP-MS 和德国的 ComPex102 Excimer，其工作波长 193 nm。激光剥蚀的直径约 35 μm，其他分析测试的流程和细节见 Liu et al.（2007），实验流程及相关参数设置依照其他学

者长期论证（王森等，2022），可以得到完整可靠的数据结果。大部分的测试点位于锆石边部振荡环带发育的位置，少量点位于核部。完整的分析测试结果，包括锆石 U-Pb 同位素组成数据以及相应的锆石年龄结果见表 1。当²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄大于 1000 Ma，选取²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄代表锆石形成年代；当²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄小于 1000 Ma，²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄则更能代表锆石结晶时代（Black et al.，2003）。

样品 WGXPV1 锆石大多为自形且发育非常清晰的同心振荡环带（图 5），锆石 Th/U 值比较高，全部大于 0.57（表 1），清楚地表明这些锆石都是岩浆结晶成因锆石（Belousova et al.，2002；Corfu et al.，2003）。

总共对 30 颗锆石开展了 LA-ICP-MS U-Pb 测年，测试结果谐和度均大于 93%，属于谐和、可靠数据。这 30 颗锆石年龄分布在 292±7 Ma 至 298±7 Ma，得出加权平均年龄 295±2 Ma（图 6），且具有极好的 MSWD 值（0.035）。



a—旺尕秀剖面扎布萨尕秀组下部岩石组合特征及样品 WGXPV1 采样位置 (红色星号, 镜向 220°); b、c—镜下照片 (正交偏光)

图 4 旺尕秀剖面野外及样品镜下照片

Fig. 4 Photos of Wangxixiu section in the field and samples under microscope

(a) Lithological association of the lower section of the Zhabusagaxiu formation at the Wangxixiu section with a red star showing the position of the Sample WFXPV1, Lens direction 220°; (b and c) Petrology of the Sample WFXPV1 under microscope sing circular polarization

4 讨论

基于生物地层和年代地层序列的对比, 现有研究对扎布萨尕秀组形成时代的观点主要有两种, 一是认为扎布萨尕秀组完全属于晚石炭世 (俞建章和林英钊, 1961; 杨式溥等, 1980; 施希德, 1983; 贺广田和薛连明, 1986), 即柴达木盆地北缘古生界最高层位是上石炭统, 二叠纪地层缺失。朱秀芳 (1987) 则强调扎布萨尕秀组上段厚层灰岩含有大量的蠕类 *Pseudoschwagerina* (假希瓦格蠕) 和 *Sphaeroschwagerina* (球希瓦格蠕), 石炭系顶界应放在该化石带之下, 即扎布萨尕秀组下段

形成于晚石炭世, 而上段代表了早二叠世早期沉积 (王训练等, 2002)。在最新的全国地层对比方案中, 扎布萨尕秀组依旧被视为晚石炭世晚期沉积 (李莹等, 2021)。

近些年的研究在石灰沟剖面扎布萨尕秀组底部砂岩获得了 288 ± 2 Ma、 293 ± 3 Ma 的最年轻碎屑锆石年龄数据 (Sun et al., 2019a; 马立成等, 2020)。最近, Sun et al. (2022) 在旺尕秀剖面扎布萨尕秀组底部也获得了 300 ± 2 Ma 的最年轻碎屑锆石年代学数据。这些数据普遍晚于 299 Ma 的国际石炭纪—二叠纪界限年龄 (Cohen et al., 2013), 暗示扎布萨尕秀组下部砂泥岩互层层段应该沉积于石炭纪之后。然而, 扎布萨尕秀组是否是早二

表 1 旺尕秀地区下二叠统凝灰岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析数据

Table 1 LA-ICP-MS U-Pb dating data of zircons from a tuff of the Lower Permian in the Wanggaxiu area

编号	元素含量/ $\times 10^{-6}$				Th/U	同位素比值						同位素年龄/Ma							
	Pb	Th	U			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	谐和度	
1	8.1	96.2	124.1	0.8	0.0539	0.0023	0.3489	0.0151	0.0469	0.0011	368	94	304	11	296	7	97%		
2	10.1	131.8	155.1	0.8	0.0526	0.0023	0.3365	0.0147	0.0464	0.0011	313	97	295	11	292	7	99%		
3	27.3	496.6	372.7	1.3	0.0528	0.0018	0.3398	0.0114	0.0467	0.0010	318	74	297	9	295	6	99%		
4	16.1	218.8	240.6	0.9	0.0528	0.0019	0.3423	0.0124	0.0471	0.0011	319	81	299	9	296	6	99%		
5	6.8	102.3	98.5	1.0	0.0527	0.0029	0.3377	0.0186	0.0465	0.0011	315	122	295	14	293	7	99%		
6	10.5	137.7	158.6	0.9	0.0540	0.0024	0.3490	0.0154	0.0469	0.0011	371	96	304	12	295	7	97%		
7	13.5	241.8	193.2	1.3	0.0510	0.0040	0.3263	0.0249	0.0464	0.0013	240	170	287	19	293	8	98%		
8	9.9	140.5	143.3	1.0	0.0523	0.0022	0.3410	0.0141	0.0473	0.0011	300	92	298	11	298	7	100%		
9	10.8	102.5	172.7	0.6	0.0544	0.0021	0.3527	0.0137	0.0471	0.0011	386	84	307	10	296	6	97%		
10	15.9	175.3	249.3	0.7	0.0523	0.0016	0.3367	0.0106	0.0467	0.0010	298	69	295	8	294	6	100%		
11	21.5	250.8	332.6	0.8	0.0545	0.0022	0.3512	0.0140	0.0468	0.0011	390	87	306	11	295	6	96%		
12	14.4	232.3	200.1	1.2	0.0536	0.0017	0.3468	0.0111	0.0470	0.0010	352	70	302	8	296	6	98%		
13	11.5	177.0	163.1	1.1	0.0535	0.0021	0.3467	0.0133	0.0470	0.0011	348	84	302	10	296	6	98%		
14	6.4	80.0	96.5	0.8	0.0530	0.0028	0.3409	0.0176	0.0467	0.0011	327	114	298	13	294	7	99%		
15	8.3	126.3	120.2	1.1	0.0534	0.0026	0.3427	0.0166	0.0466	0.0011	344	107	299	13	293	7	98%		
16	13.9	199.9	208.3	1.0	0.0504	0.0016	0.3260	0.0107	0.0469	0.0010	215	73	287	8	295	6	97%		
17	5.9	73.8	91.6	0.8	0.0564	0.0035	0.3653	0.0224	0.0470	0.0012	467	132	316	17	296	7	93%		
18	10.2	144.5	153.3	0.9	0.0559	0.0026	0.3614	0.0167	0.0469	0.0011	449	101	313	12	295	7	94%		
19	9.0	138.9	133.0	1.0	0.0556	0.0032	0.3570	0.0201	0.0466	0.0011	437	122	310	15	293	7	94%		
20	16.1	245.8	234.7	1.0	0.0533	0.0016	0.3450	0.0104	0.0469	0.0010	343	66	301	8	296	6	98%		
21	13.7	219.8	199.6	1.1	0.0533	0.0017	0.3439	0.0111	0.0468	0.0010	341	71	300	8	295	6	98%		
22	15.3	252.8	218.9	1.2	0.0528	0.0016	0.3422	0.0108	0.0470	0.0010	322	69	299	8	296	6	99%		
23	12.0	194.4	172.2	1.1	0.0530	0.0027	0.3429	0.0175	0.0469	0.0011	329	113	299	13	296	7	99%		
24	12.9	160.6	198.6	0.8	0.0559	0.0024	0.3595	0.0151	0.0467	0.0011	446	91	312	11	294	7	94%		
25	11.8	190.6	169.7	1.1	0.0543	0.0028	0.3506	0.0180	0.0468	0.0011	384	112	305	14	295	7	97%		
26	7.7	71.4	125.0	0.6	0.0542	0.0021	0.3514	0.0138	0.0470	0.0011	379	85	306	10	296	6	97%		
27	16.9	278.8	242.5	1.1	0.0546	0.0031	0.3520	0.0199	0.0468	0.0011	395	123	306	15	295	7	96%		
28	8.7	137.1	124.5	1.1	0.0513	0.0028	0.3330	0.0180	0.0471	0.0011	255	121	292	14	297	7	98%		
29	15.6	251.1	223.0	1.1	0.0536	0.0018	0.3459	0.0115	0.0468	0.0010	353	73	302	9	295	6	98%		
30	7.1	90.7	109.1	0.8	0.0530	0.0033	0.3429	0.0209	0.0469	0.0012	328	134	299	16	296	7	99%		



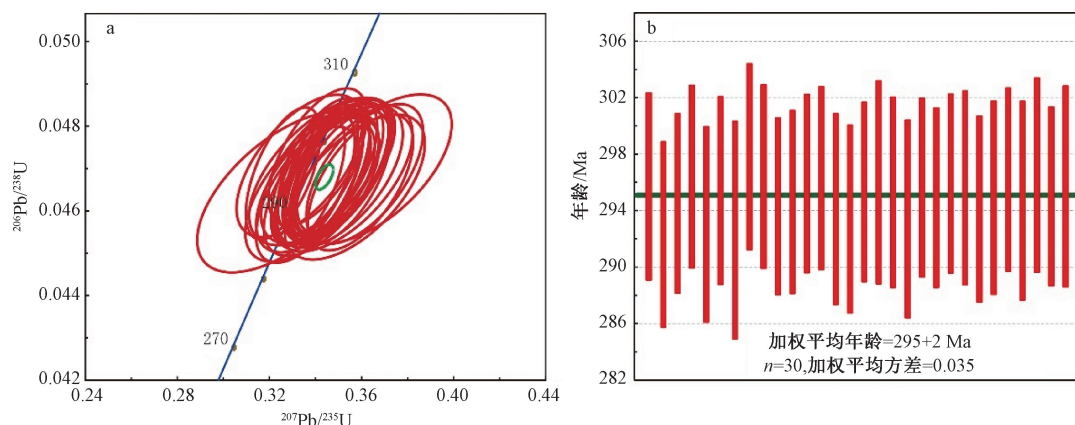
图 5 样品 WGXPV1 锆石阴极发光照片（黄色为谐和年龄，白色为 Th/U 值）

Fig. 5 Cathodoluminescence photos of the zircons from the sample WGXPV1 (Yellow numbers represent harmonic ages, and white numbers represent Th/U values)

叠世沉积，其与下伏上石炭统克鲁克组之间是否存在明显的沉积间断有待进一步探讨。

野外产出状态和手标本鉴定显示，此次所识别出来的凝灰岩质地较纯、无明显颗粒感；薄片鉴定显示，此次所获取的样品为岩屑晶屑玻屑凝灰岩（图 4）；且从扎布萨尕秀组的样品

（WGXPV1）中获得的锆石均为自形锆石，无任何沉积搬运改造的痕迹（图 5）。同时，所获得的锆石年龄较为集中，这表明该样品属于凝灰岩，与野外岩石学观测一致。因此，所获得的 295±2 Ma 加权平均年龄代表了扎布萨尕秀组下段火山灰喷发年龄，所给出的年龄可以约束其所在层位的沉



a—单颗粒锆石年龄谐和图；b—加权平均年龄图

图6 样品 WGXPV1 锆石 U-Pb 年龄结果

Fig. 6 Zircon U-Pb dating results of the sample WGXPV1

(a) Concordia diagrams showing the results of single-grain zircon U-Pb analyses; (b) Diagram of weighted mean ages

积时代对应早二叠世早期,这也与前期在砂岩中获得的 300 ± 2 Ma 最年轻碎屑锆石年龄数据 (Sun et al., 2019a; 马立成等, 2020) 一致。通过观测现有研究中石灰沟砂岩样品的镜下照片 (Sun et al., 2019a; 马立成等, 2020), 发现这些砂岩样品应该是凝灰质砂岩, 颗粒间填隙物绝大多数是凝灰质, 因此其在石灰沟获得的最年轻碎屑锆石年龄也能代表地层沉积年代。此外, 现有研究在石灰沟剖面扎布萨尕秀组也鉴定出疑似火山岩凝灰岩、含玻屑熔岩团块火山凝灰岩 (贺广田等, 1987), 暗示沉积期火山喷发频繁, 这也与砂岩薄片普遍含有大量凝灰质杂基一致, 但是其描述的石灰沟剖面火山岩在此次研究中并未找到。

二叠纪生物带划分和对比研究认为, 蠕类和牙形石在国际具有较为广泛的对比意义 (金玉环等, 2000; Shen et al., 2019; 沈树忠等, 2020; 申博恒等, 2021)。一般认为, 二叠系的底界以牙形类 *Streptognathodus isolatus* 的首次出现作为标志, 其对应的绝对年龄为 298.9 ± 0.15 Ma, 大致以膨胀型的蠕类 *Pseudoschwagerina* 或 *Sphaeroschwagerina* 的出现为标志, 这些蠕类化石也是华北太原组下部的常见化石组合, 在华南、北美和俄罗斯等多个块体完全可以对比 (沈树忠等, 2020)。而现有对扎布萨尕秀组上段的研究已经鉴定出蠕类 *Pseudoschwagerina* 和 *Sphaeroschwagerina* 化石组合 (朱秀芳, 1987; 王训练等, 2002), 证明扎布萨尕秀组上段属于二叠纪早期沉积。最近, 马立成等 (2020) 在石灰沟剖面扎布萨尕秀组中下部也

鉴定出大量的膨胀型蠕类 *Pseudoschwagerina* 和 *Sphaeroschwagerina*, 这意味着二叠系的底界应该下移至扎布萨尕秀组底部。而旺尕秀一带的区调也显示扎布萨尕秀组内普遍存在蠕类化石 *Pseudoschwagerina* 和 *Sphaeroschwagerina* (青海省地质矿产局, 1978), 同样证实了扎布萨尕秀组应完全划归为下二叠统, 这也与此次研究给出的 295 ± 2 Ma 的凝灰岩年龄一致。

总的来说, 石灰沟和旺尕秀剖面实测结果表明, 柴达木盆地北缘地区石炭系和二叠系 (即克鲁克组和扎布萨尕秀组) 为连续海相沉积 (图 2, 图 3), 均为滨海相潮坪-潟湖沉积, 发育岩石组合特征极为类似的暗色泥页岩夹中厚层灰岩 (孙娇鹏等, 2014; 陈世悦等, 2016), 二者之间无明显沉积间断, 可以认为扎布萨尕秀组下部沉积于早二叠世, 而克鲁克组则代表了整个晚石炭世的沉积记录。该新认识得到了古生物资料的佐证。这些资料表明, 柴达木盆地北缘的石灰沟和旺尕秀剖面连续发育晚石炭世至早二叠世沉积, 且在多个剖面发现火山岩夹层, 例如石灰沟剖面 (贺广田和薛连明, 1986), 以及此次新发现的扎布萨尕秀剖面。现有研究已经揭示柴达木盆地北缘的滨海相砂岩-泥岩-灰岩的混合沉积记录了晚石炭世—早二叠世与冈瓦纳冰川活动相关的气候、海平面变化 (杨平和胡勇, 2006; 孙娇鹏等, 2014), 对其沉积地层学和同位素地层学的研究无疑具有更为广泛的区域乃至全球的对比意义。而此研究给出的可靠年龄, 将扎布萨尕秀组沉积起

始时限约束到了二叠纪初期，也将为后续相关工作的区域对比提供重要的地层年代学依据。同时，在未来对该层凝灰岩样品中所含大量锆石进行 (U-Th) /He 及其他低温热年代学的相关研究 (李晨星等, 2022)，可以取得柴达木北缘构造热演化史的重要进展，具有极其广泛的区域 (柴达木盆地北缘) 和宏观 (国内对比和国际对比) 影响。

5 结论

(1) 在柴达木盆地北缘旺尕秀东大沟剖面首次发现早二叠世凝灰岩，并获得了 295 ± 2 Ma 的加权平均年龄。该年龄年轻于国际石炭纪—二叠纪的界限年龄 (~ 299 Ma)。

(2) 测年数据间接证明扎布萨尕秀组下部可能沉积于早二叠世早期，柴达木盆地北缘极有可能发育二叠纪早期海相地层。

(3) 柴达木盆地北缘保存的连续且完整的晚石炭世—早二叠世沉积记录，为后续研究区域石炭纪—二叠纪沉积、气候和构造演化提供了重要的年代地层约束。

致谢： 岩石薄片鉴定得到了江万研究员的大力指导，在此深表感谢。也感谢编辑和审稿专家给出的多轮评审意见，尤其是对样品是否是凝灰岩的评审，极大地提高了文章论证的可靠性。

References

BELOUSOVA E, GRIFFIN W, O'REILLY S Y, et al. , 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143 (5): 602-622.

BLACK L P, KAMO S L, ALLEN C M, et al. , 2003. TEMORA 1: a new zircon standard for phanerozoic U-Pb geochronology [J]. *Chemical Geology*, 200 (1-2): 155-170.

CHEN S Y, BI M W, SUN J P, et al. , 2016. Mixed sedimentary characteristics and controlling factors of Upper Paleozoic Group in Northern Qaidam Basin [J]. *Geological Bulletin of China*, 35 (2-3): 282-292. (in Chinese with English abstract)

COHEN K M, FINNEY S C, GIBBARD P L, et al. , 2013. The ICS international chronostratigraphic chart [J]. *Episodes*, 36 (3): 199-204.

CORFU F, HANCHARJM, HOSKIN P W O, et al. , 2003. Atlas of zircon textures [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53 (1): 469-500.

GAO W L, WANG Z X, LI L L, et al. , 2021. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ laser dating of the Zongwulong ductile shear zone in northeastern Tibetan Plateau:

Constraints on the time of Indosinianorogeny [J]. *Geology in China*, 48 (1): 149-160. (in Chinese with English abstract)

HE G T, XUE L M, 1986. The carboniferous system of Qinghai province [J]. *Regional Geology of China* (3): 211-220. (in Chinese with English abstract)

HE G T, WANG Z J, ZHAN L P, et al. , 1987. The Late Carboniferous strata from north margin of Qaidam Basin [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*. 17 (3): 141-158. (in Chinese with English abstract)

JI W H, LI R S, CHEN F N, et al. , 2020. Tectonic reconstruction of northwest China in the Nanhua-Paleozoic and discussions on key issues [J]. *Journal of Geomechanics*, 26 (5): 634-655. (in Chinese with English abstract)

JIN Y G, SHANG Q H, HOU J P, et al. , 2000. Chinese stratigraphic code-Permian [M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)

LI C X, CHANG J, QIU N S, et al. , 2022. Meso-Neoproterozoic tectono-thermal evolution in the northern margin of North ChinaCraton: Constraints from zircon (U-Th) /He ages [J]. *Journal of Geomechanics*, 28 (1): 113-125.

LI Y, WANG X D, HU K Y, et al. , 2021. Lithostratigraphic subdivision and correlation of the Carboniferous in China [J]. *Journal of Stratigraphy*, 45 (3): 303-318. (in Chinese with English abstract)

LIU W P, LIU C L, WAN M X, et al. , 2016. A study of the Lower Paleozoic accumulation condition in Delingha region in Qaidam Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 23 (5): 119-126. (in Chinese with English abstract)

LIU X M, GAO S, DIWU C R, et al. , 2007. Simultaneous *in-situ* determination of U-Pb age and trace elements in zircon by LA-ICP-MS in 20 μm spot size [J]. *Chinese Science Bulletin*, 52 (9): 1257-1264.

MA L C, JIANG W, XIAO Z X, et al. , 2020. Discussion on the depositional timing of the Zhabusagaxiu formation in the eastern QaidamBasin, China [J]. *Journal of Geomechanics*, 26 (6): 961-972. (in Chinese with English abstract)

MA Y S, YIN C M, LIU C L, et al. , 2012. The progress of carboniferous oil and gas investigation and assessment in Qaidam basin [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33 (2): 135-144. (in Chinese with English abstract)

PENG B, ZHANG H, YANG S H, et al. , 2020. Logging characterization of Carboniferous fractured-vuggy karst reservoirs in the eastern Qaidam basin [J]. *Journal of Geomechanics*, 26 (6): 923-931. (in Chinese with English abstract)

QIAN T, WANG Z X, WANG Y, et al. , 2021. Jurassic evolution of the Qaidam Basin in western China: Constrained by stratigraphic succession, detrital zircon U-Pb geochronology and Hf isotope analysis [J]. *GSA Bulletin*, 133 (11-12): 2291-2318.

QIAN T, LI W P, GAO W L, et al. , 2021. A preliminary study on post-orogenesis of the North Qaidam tectonic belt duringthe Early Paleozoic by provenance analysis of the Devonian sediment [J]. *ACTA GEOLOGICA SINICA*, 1-17 [2023-03-10]. (in Chinese

with English abstract)

Qinghai Bureau of Geology and Mineral Resources (BGMR), 1978. Regional Geological investigation of the Delinghajiuzhi Area. Unpublished scientific report as a part of the Regional Geology of Qinghai Province, 1-124 (in Chinese).

Qinghai Bureau of Geology and Mineral Resources (QBGMR), 1991. Regional geology of the Qinghai province [M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-62. (in Chinese)

SHEN B H, SHEN S Z, HOU Z S, et al. , 2021. Lithostratigraphic subdivision and correlation of the Permian in China [J]. Journal of Stratigraphy, 45 (3): 319-339. (in Chinese with English abstract)

SHEN S Z, XU H P, YUAN D X, et al. , 2020. Permian stratigraphy and index fossils of China [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press. (in Chinese with English abstract)

SHEN S Z, ZHANG H, ZHANG Y C, et al. , 2019. Permian integrative stratigraphy and timescale of China [J]. Science China Earth Sciences, 62 (1): 154-188.

SHENG J Z, 1962. Permian in China [M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)

SHI X D, 1983. The discovery of tournaisian in the MT. Amunike of the North-Eastern Qaidam basin, with a discussion on the decision of the lower Carboniferous in the MT. Oulongbuluke [J]. Geological Anthology of Qinghai Tibet Plateau (5): 187-206. (in Chinese with English abstract)

SUN J P, CHEN S Y, HU Z Y, et al. , 2014. Research on the mixed model and developmental characteristic of the clastic-carbonate diamictite facies in the northern Qaidam [J]. Natural Gas Geoscience, 25 (10): 1586-1593. (in Chinese with English abstract)

SUN J P, 2015. Neoproterozoic to Paleozoic basin-mountain framework and Palaeotectonic-Paleogeography evolution of northeast Qaidam [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China): 1-155. (in Chinese with English abstract)

SUN J P, CHEN S Y, PENG Y, et al. , 2015. Research on Northern Qaidam tectonic attributes during Devonian [J]. Journal of China University of Petroleum, 39 (2): 23-30. (in Chinese with English abstract)

SUN J P, CHEN S Y, LIU C L, et al. , 2016a. Tectonic setting of Northeastern Qaidam Basin and its evolution during the Late Paleozoic; Evidence from geochemical characteristics of detrital rock [J]. Earth Science Frontiers, 23 (5): 45-55. (in Chinese with English abstract)

SUN J P, CHEN S Y, MA Y S, et al. , 2016b. Early Ordovician continental-arc collision and retro-arc foreland basin on the Northern margin of Qaidam basin: geochemical evidence from Clastic rocks [J]. Acta Geologica Sinica, 90 (1): 80-92. (in Chinese with English abstract)

SUN J P, JIANG W, MA L C, 2019a. Early Permian strata exist in the Olongbluk block [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 93 (2): 481-482.

SUN J P, DONG Y P, MA L C, et al. , 2019b. Late Paleoproterozoic tectonic evolution of the Olongbuluke Terrane, northern Qaidam, China: Constraints from stratigraphy and detrital zircon geochronology [J]. Precambrian Research, 331: 105349.

SUN J P, DONG Y P, JIAN G W, et al. , 2020. Reconstructing the Olongbuluke Terrane (northern Tibet) in the end-Neoproterozoic to Ordovician Indian margin of Gondwana [J]. Precambrian Research, 348: 105865.

SUN J P, DONG Y P, MA L C, et al. , 2022. Devonian to Triassic tectonic evolution and basin transition in the East Kunlun-Qaidam Area, northern Tibetan plateau: Constraints from stratigraphy and detrital zircon U-Pb geochronology [J]. GSA Bulletin, 134 (7-8): 1967-1993.

WANG S, ZHANG S H, ZHANG Q Q, et al. , 2022. In-situ zircon U-Pb dating method by LA-ICP-MS and discussions on the effect of different beam spot diameters on the dating results [J]. Journal of Geomechanics, 28 (4): 642-652.

WANG X L, GAO J H, ZHANG H J, et al. , 2002. Recognition of the top and base boundaries of the Carboniferous system in the Northern margin of the Qaidam Basin [J]. Earth Science Frontiers, 9 (3): 65-72. (in Chinese with English abstract)

WANG Z J, 1981. Rugose corals from the early lower Carboniferous Chuan-Shangou Formation in Amunike mountain, Qinghai Province [J]. Acta Geologica Sinica, 55 (3): 170-178. (in Chinese with English abstract)

WANG Z J, YU X G, 1995. The late carboniferous Rugose corals from Shihuigou on the North Margin of the Qaidam basin [J]. Acta Geoscientia Sinica (3): 310-327. (in Chinese with English abstract)

WEI X J, MA Y S, LI Z X, et al. , 2018. High-frequency alternations and driving mechanisms of clastic-carbonate successions in the Upper Carboniferous, northern Qaidam Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 20 (3): 409-422. (in Chinese with English abstract)

YANG P, HU Y, 2006. Paleocology and sedimentary environment of carboniferous in Qaidam Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 27 (3): 280-284. (in Chinese with English abstract)

YANG S P, HOU H F, GAO L D, et al. , 1980. The carboniferous system of China [J]. Acta Geologica Sinica (3): 167-175. (in Chinese with English abstract)

YU J Z, LIN Y Y, 1961. Discussion on Early Carboniferous stratigraphic correlation on the Southern and Northern slopes of Qilian Mountains from coral fossils [J]. Acta Geologica Sinica, 41 (2): 154-173. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Y, CHEN S Y, SUN J P, et al. , 2016. Lithofacies and sedimentary environment of shale in Carboniferous Keluke Formation, Northern Qaidam Basin [J]. Earth Science Frontiers, 23 (5): 86-94. (in Chinese with English abstract)

ZHU X F, 1987. Carboniferous and Permian Fufulinids from Ulan county, Qinghai province [J]. Bulletin of the Institute of Geology Chinese Academy of Geological Sciences (2): 1-49. (in Chinese)

附中文参考文献

陈世悦, 毕明威, 孙娇鹏, 等, 2016. 柴北缘上古生界混合沉积特征及控制因素 [J]. 地质通报, 35 (2-3): 282-292.

高万里, 王宗秀, 李磊磊, 等, 2021. 青藏高原东北缘宗务隆韧性剪切带⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学及对印支期造山时限的制约 [J]. 中国地质, 48 (1): 149-160.

贺广田, 薛连明, 1986. 青海的石炭系 [J]. 中国区域地质 (3): 211-220.

贺广田, 王增吉, 詹立培, 等, 1987. 柴达木盆地北缘晚石炭世地层 [J]. 中国地质科学院院报, 17 (3): 141-158.

计文化, 李荣社, 陈奋宁, 等, 2020. 中国西北地区南华纪—古生代构造重建及关键问题讨论 [J]. 地质力学学报, 26 (5): 634-655.

金玉玕, 尚庆华, 侯静鹏, 等, 2000. 中国地层典—二叠系 [M]. 北京: 地质出版社.

李晨星, 常健, 邱楠生, 等, 2022. 华北克拉通北缘中—新元古界构造—热演化: 来自锆石 (U-Th) /He 年龄的约束 [J]. 地质力学学报, 28 (1): 113-125.

李莹, 王向东, 胡科毅, 等, 2021. 中国石炭纪岩石地层划分和对比 [J]. 地层学杂志, 45 (3): 303-318.

刘文平, 刘成林, 万茂霞, 等, 2016. 柴达木盆地德令哈地区下古生界成藏地质条件研究 [J]. 地学前缘, 23 (5): 119-126.

马立成, 江万, 肖宙轩, 等, 2020. 柴达木盆地东部扎布萨尕秀组的时代归属讨论 [J]. 地质力学学报, 26 (6): 961-972.

马寅生, 尹成明, 刘成林, 等, 2012. 柴达木盆地石炭系油气资源调查评价进展 [J]. 地球学报, 33 (2): 135-144.

彭博, 张浩, 杨晟颢, 等, 2020. 柴达木盆地东部石炭系古岩溶缝洞单元测井响应 [J]. 地质力学学报, 26 (6): 923-931.

钱涛, 李王鹏, 高万里, 等, 2021. 柴北缘构造带早古生代造山后作用初探: 泥盆纪沉积物物源示踪 [J]. 地质学报, 1-17 [2023-03-10].

青海省地质矿产局, 1978. 1:200000 区域地质调查报告: 德令哈旧址幅 [M]. 北京: 地质出版社: 1-112.

青海省地质矿产局, 1991. 青海省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社: 1-662.

申博恒, 沈树忠, 侯章帅, 等, 2021. 中国二叠纪岩石地层划分和对比 [J]. 地层学杂志, 45 (3): 319-339.

沈树忠, 徐海鹏, 袁东勋, 等, 2020. 中国二叠纪地层及标准化石图集 [M]. 杭州: 浙江大学出版社.

盛金章, 1962. 中国的二叠系 [M]. 北京: 科学出版社.

施希德, 1983. 柴达木东北缘阿木尼克山杜内阶的发现: 兼对欧龙布鲁克下石炭统划分的讨论 [J]. 青藏高原地质文集 (5): 187-206.

孙娇鹏, 陈世悦, 胡忠亚, 等, 2014. 柴东北缘古生代碎屑岩—碳酸盐岩混积相发育特征及组合模式研究 [J]. 天然气地球科学, 25 (10): 1586-1593.

孙娇鹏, 2015. 柴达木东北部新元古代—古生代盆地格局及构造古地理演化 [D]. 青岛: 中国石油大学 (华东): 1-155.

孙娇鹏, 陈世悦, 彭渊, 等, 2015. 柴北缘构造带泥盆纪构造属性研究 [J]. 中国石油大学学报 (自然科学版), 39 (2): 23-30.

孙娇鹏, 陈世悦, 刘成林, 等, 2016a. 柴达木盆地东北部晚古生代盆地构造环境: 来自碎屑岩地球化学的证据 [J]. 地学前缘, 23 (5): 45-55.

孙娇鹏, 陈世悦, 马寅生, 等, 2016b. 柴达木盆地北缘早奥陶世陆—弧碰撞及弧后前陆盆地: 来自碎屑岩地球化学的证据 [J]. 地质学报, 90 (1): 80-92.

王森, 张拴宏, 张琪琪, 等, 2022. LA-ICP-MS 锆石微区 U-Pb 定年方法及不同束斑直径对年龄结果的影响作用探讨 [J]. 地质力学学报, 28 (4): 642-652.

王训练, 高金汉, 张海军, 等, 2002. 柴达木盆地北缘石炭系顶、底界线再认识 [J]. 地学前缘, 9 (3): 65-72.

王增吉, 1981. 柴达木盆地北缘早石炭世早期穿山沟组的皱纹珊瑚 [J]. 地质学报, 55 (3): 170-178.

王增吉, 俞学光, 1995. 柴达木盆地北缘石灰沟晚石炭世的四射珊瑚 [J]. 地球学报 (3): 310-327.

魏小洁, 马寅生, 李宗星, 等, 2018. 柴达木盆地北缘上石炭统碎屑岩—碳酸盐岩高频转换过程及驱动机制 [J]. 古地理学报, 20 (3): 409-422.

杨平, 胡勇, 2006. 柴达木盆地石炭纪古生态与沉积环境 [J]. 新疆石油地质, 27 (3): 280-284.

杨式溥, 侯鸿飞, 高联达, 等, 1980. 中国的石炭系 [J]. 地质学报 (3): 167-175.

俞建章, 林英铎, 1961. 从珊瑚化石来讨论祁连山南北坡早石炭世地层对比问题 [J]. 地质学报, 41 (2): 154-173.

张跃, 陈世悦, 孙娇鹏, 等, 2016. 柴北缘石炭系克鲁克组泥页岩岩相特征与沉积环境分析 [J]. 地学前缘, 23 (5): 86-94.

朱秀芳, 1987. 青海乌兰石炭—二叠纪的蠕类动物群 [J]. 中国地质科学院地质研究所所刊, (2): 1-49.