石油与天然气地质
第47卷 第5期 OIL & GAS GEOLOGY 2026年10月

文章编号:0253-9985(2026)05-1579-15 doi:10.11743/ogg20260510

准噶尔盆地西北缘克百断裂带晚石炭世火山岩成吉思汗山组新认识及其地质意义

——来自百乌21井LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素定年与地震资料的证据

姚宗全[1,2,3],汪子棋[1,2],张小栓[4],王 威[1,2],牟家园[1,2],史耀太[1,2],唐雪颖[1,2]

(1. 新疆大学 地质与矿业工程学院,新疆 乌鲁木齐 830047;2. 新疆中亚造山带大陆动力学与成矿预测自治区重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830000;3. 新疆和田学院,新疆 和田 848000;4. 中国石油 新疆油田分公司 百口泉采油厂,新疆 克拉玛依 834011)

摘要:克百断裂带是准噶尔盆地西北缘晚古生代构造-地层演化与油气勘探的关键区带,区内石炭世火山岩地层归属长期存在争议。以克百断裂带百乌21井钻遇的原被视为早二叠世佳木河组的火山岩系为研究对象,通过综合岩石组合分析、LA-ICP-MS锆石铀(U)-铅(Pb)同位素定年和地震剖面解释,重新厘定了该套火山岩的层位归属。研究结果表明:①百乌21井火山岩系两件凝灰质砂砾岩样品获得的火山岩碎屑锆石U-Pb同位素年龄分别为311.9 Ma ± 2.2 Ma和311.6 Ma ± 2.2 Ma,限定其形成时代为晚石炭世晚期,归为成吉思汗山组(C_2c);②该套岩石组合特征以杏仁状安山岩和玄武安山岩为主,具有亚碱性、富钠贫钾的地球化学特征,与区域上C_2c的特征一致,而与佳木河组(P_1jm)存在显著差异;③地震剖面解析证实,该套地层与下伏地层下石炭统包古图组(C_1b)呈角度不整合接触,与区域上C_2c的底界构造特征一致,与P_1jm的层序叠置关系不同。综合上述证据,将该套火山岩重新厘定为成吉思汗山组。新认识解决了该区长期存在的地层划分争议,完善了准噶尔盆地西北缘晚古生代地层格架,为古亚洲洋西段闭合时限与构造演化过程提供了新的年代学约束,同时也为准噶尔盆地西北缘石炭系深层油气勘探拓展了新的层系与方向。

关键词:LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素定年;地质年代学;地层厘定;成吉思汗山组;克百断裂带;准噶尔盆地西北缘

中图分类号:TE121.3 **文献标识码**:A

New insights into Late Carboniferous volcanic rocks of the Chengjisihanshan Formation in the Kebai fault zone, northwestern margin of the Junggar Basin, and their geological significance: Evidence from LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of well Baiwu 21 and seismic data

YAO Zongquan[1,2,3], WANG Ziqi[1,2], ZHANG Xiaoshuan[4], WANG Wei[1,2], MOU Jiayuan[1,2], SHI Yaotao[1,2], TANG Xueying[1,2]

(1. *School of Geology and Mining Engineering*, *Xinjiang University*, *Urumqi*, *Xinjiang* 830047, *China*; 2. *Xinjiang Key Laboratory for Geodynamic Processes and Metallogenic Prognosis of the Central Asian Orogenic Belt*, *Xinjiang* 830000, *China*; 3. *Xinjiang Hetian College*, *Hetian*, *Xinjiang* 848000, *China*; 4. *Baikouquan Oil Production Plant*, *Xinjiang Oilfield Branch*, *PetroChina*, *Karamay*, *Xinjiang* 834011, *China*)

Abstract: The Kebai fault zone is a critical area for the Late Paleozoic tecto-stratigraphic evolution and hydrocarbon exploration along the northwestern margin of the Junggar Basin. The stratigraphic assignment of the Carboniferous volcanic rocks in the fault zone has long been a controversial issue. The volcanic rock sequence encountered in well Baiwu 21 within the Kebai fault zone, previously assigned to the Early Permian Jiamuhe Formation, was selected as the research object. Integrated lithologicalassociation analysis, LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, and seismic profile interpretation were conducted on this sequence to redefine its stratigraphic assignment. As indicated by the research results, (1) the volcaniclastic zircon U-Pb ages obtained from two tuffaceous sandy conglomerate samples of the volcanic rock sequence in well Baiwu 21 are (311.9 ± 2.2) Ma and (311.6 ± 2.2) Ma, respectively, indicating a formation age

收稿日期:2026-04-04;**修回日期**:2026-08-17。
第一作者简介:姚宗全(1989—),男,博士、教授、博士研究生导师,石油地质学。**E-mail**: yzq@xju.edu.cn。
通信作者简介:汪子棋(2002—),男,硕士研究生,石油地质学。**E-mail**: 1582185309@qq.com。
基金项目:新疆维吾尔自治区天山英才基金项目(2023TSYCCX0002);新疆维吾尔自治区科技计划资助项目(2025A01010)。

of the late stage of Late Carboniferous and reassigning the sequence to the Chengjisihanshan Formation (C_2c). (2) The rock suite is dominated by amygdaloidal andesite and basaltic andesite, exhibiting subalkaline, sodium-rich, and potassium-poor geochemical characteristics that are regionally consistent with those of the C_2c, but markedly distinct from those of the Jiamuhe Formation (P_1jm). (3) Seismic profile interpretation confirms that this stratigraphic unit has an angular unconformity contact with the underlying Lower Carboniferous Baogutu Formation (C_1b), mirroring the basal structural boundaries of the regional C_2c rather than the sequence stacking pattern of P_1jm. Consequently, these multiple lines of evidence justify the redefinition of this volcanic rock sequence as part of the Chengjisihanshan Formation. This new insight resolves the long-standing controversy over stratigraphic division in the area, refines the Late Paleozoic stratigraphic framework along the northwestern margin of the Junggar Basin, and provides fresh chronological constraints on the closure timing and tectonic evolution of the western Paleo-Asian Ocean. Furthermore, it opens up new strata and horizons for deep Carboniferous hydrocarbon exploration in the northwestern margin of the Junggar Basin.

Key words: LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, geochronology, stratigraphic redefinition, Chengjisihanshan Formation, Kebai fault zone, northwestern margin of the Junggar Basin

引用格式:姚宗全,汪子棋,张小栓,等. 准噶尔盆地西北缘克百断裂带晚石炭世火山岩成吉思汗山组新认识及其地质意义——来自百乌21井LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素定年与地震资料的证据[J]. 石油与天然气地质,2026,47(5):1579-1593. DOI:10. 11743/ogg20260510.

YAO Zongquan, WANG Ziqi, ZHANG Xiaoshuan, et al. New insights into Late Carboniferous volcanic rocks of the Chengjisihanshan Formation in the Kebai fault zone, northwestern margin of the Junggar Basin, and their geological significance: Evidence from LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of well Baiwu 21 and seismic data[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(5): 1579-1593. DOI: 10. 11743/ogg20260510.

火山岩油气藏在近20年得到了充分开发并已取得重大突破[1-21]。准噶尔盆地西北缘是中国首批进行火山岩油气藏开发的区域[22-26],近年来聚焦于老区开发,取得了丰富成果。准噶尔盆地西北缘位于中亚造山带西南段,是古亚洲洋俯冲-增生-闭合的核心记录区,其晚古生代地层格架与构造演化是解析中亚造山带大陆增生机制和古亚洲洋闭合的关键科学问题[27-30]。克百断裂带作为盆地西北缘的重要构造单元,经历了海西期以来多期次的构造-岩浆活动,形成了多期次、多类型的火山-沉积地层序列[31]。

长期以来,克百断裂带石炭系-二叠系火山岩地层的划分与对比存在争议,核心聚焦于佳木河组(P_1jm)和成吉思汗山组(C_2c)的时代限定、岩性标志和空间展布规律[32-34]。传统观点将区内钻遇的火山岩系多划归上二叠统佳木河组,认为其是盆地西北缘二叠系重要的油气储集层;而成吉思汗山组则被限定为晚石炭世海相碎屑岩地层[35]。近年来,高精度同位素定年技术的广泛应用为准噶尔盆地西北缘克百断裂带晚古生代火山岩系的地层划分与时代限定提供了重要依据。前人通过对原划归佳木河组的部分火山岩系开展锆石铀(U)-铅(Pb)同位素定年研究后,将准噶尔盆地西北缘晚古生代岩浆活动分为2期:早石炭世(346.0~321.0 Ma)和晚石炭世—早二叠世(316.0~281.0 Ma)[36],这些年龄数据对传统地层划分方案提出了数据支持。

目前,佳木河组现已厘定为分布于准噶尔盆地西北缘乌尔禾以北哈拉阿拉特地区的一套冲积扇-扇三角洲相磨拉石建造,岩性组合以砾岩、含砾砂岩和中砂岩等陆相磨拉石为特征[37]。尽管该区域尚未获得锆石测年数据,但其上覆的白杨河组(286.3 Ma)及下部不整合接触的阿腊德依克赛组均已取得可靠的测年数据或化石证据[38-39],近年来,针对玛湖凹陷等盆地内佳木河组地层研究发现,其与西北缘山区露头地层存在较大差异[40],并非简单的“下碎屑岩、上火山岩”[41]。由于本研究区地处克百断裂带,选择与西北缘山区露头地层进行对比更为合理。同时,不同学者对成吉思汗山组的定义、层型和区域对比方案也存在分歧。部分研究提出废弃原太勒古拉组、新建成吉思汗山组的方案,但在盆地覆盖区的识别与对比仍缺乏钻井-地震联合约束[42-43]。

综上所述,当前克百断裂带晚古生代地层研究存在3个核心科学问题:①缺乏覆盖区钻井火山岩的高精度年代学数据,无法精准限定地层形成时代;②缺乏系统的岩相学-地球化学标志,难以有效区分成吉思汗山组与佳木河组火山岩;③缺乏井-震结合的区域地层格架,无法实现露头区与覆盖区的地层对比。针对上述问题,本研究选取克百断裂带百乌21井为研究对象,通过岩心观察、地震剖面解释和U-Pb同位素测年,系统厘定该井火山岩系的形成时代与地层归属,完善准噶尔盆地西北缘克百断裂带古生代地层格架,并

探讨其构造演化与油气勘探意义,为区域地质研究与深层油气勘探提供关键依据。

1　区域地质背景

克百断裂带位于准噶尔盆地西北缘,是一条大型逆掩推覆大断裂,其形成和演化受到准噶尔盆地西北缘褶皱带和准噶尔中间地块的控制(图 1)。该断裂带经历了中-晚海西期、印支期、燕山期及和喜马拉雅期等多期构造活动的叠加改造[44],不仅控制着古生代地层的沉积与展布,也制约了油气的运移与聚集[45-46]。

区域上,准噶尔盆地西北缘晚古生代地层发育完整,自下而上依次发育下石炭统太勒古拉组(C_1t)、包古图组(C_1b)、希贝库拉斯组(C_1x),上石炭统成吉思汗山组(C_2c)、哈拉阿拉特组(C_2h)、阿腊德依克赛组(C_2al),以及下二叠统佳木河组(P_1jm)、风城组(P_1f)[47]。

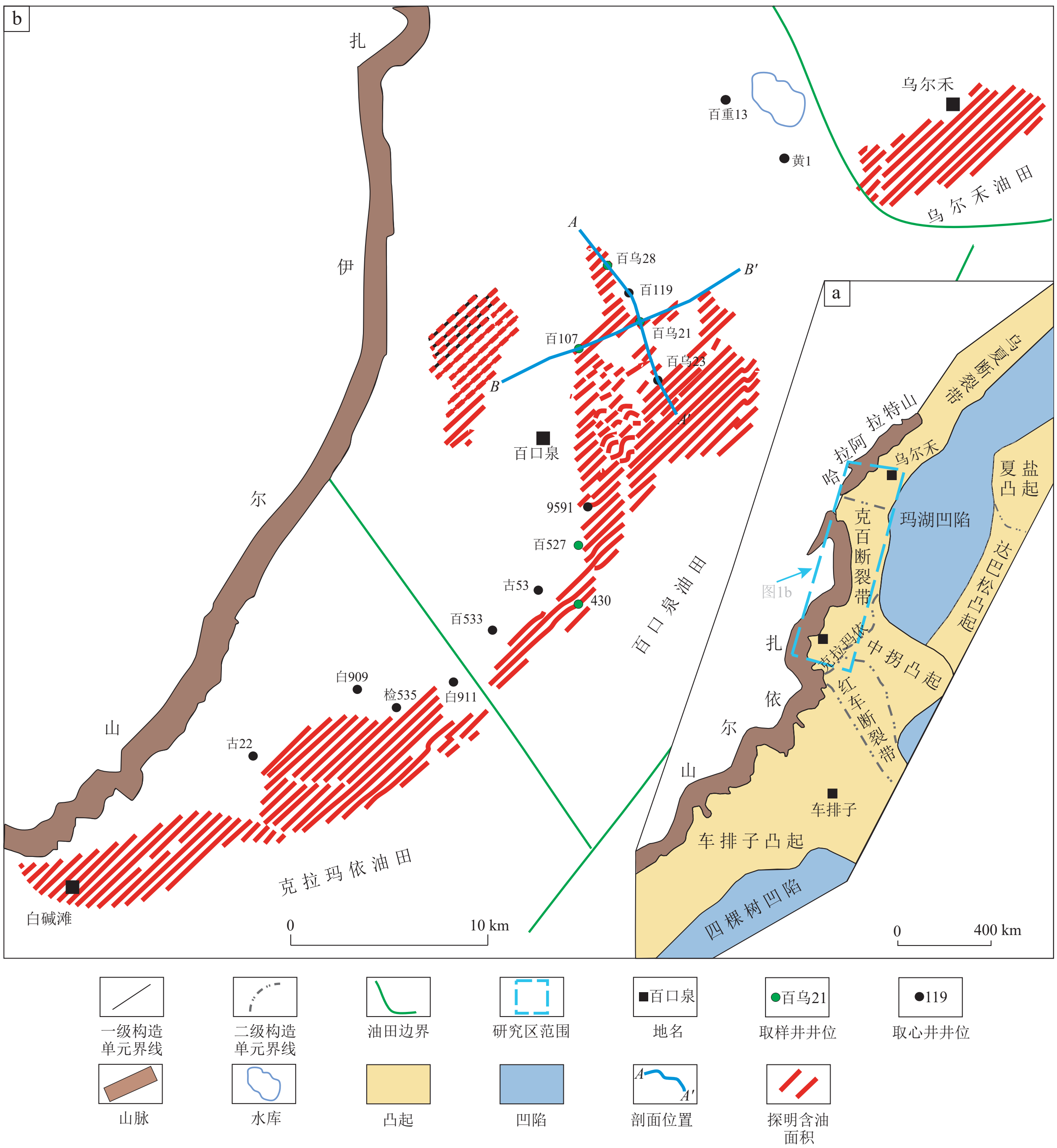

图 1　准噶尔盆地西北缘克百断裂带构造位置(a)(修改自文献[60])和克百断裂带局部地质放大图(b)(修改自文献[61])

Fig. 1　Tectonic location of the Kebai fault zone along the northwestern margin of the Junggar Basin (a) (modified after reference [60]) and enlarged local geological map of the kebai fault zone (b) (modified after reference [61])

其中，C_1x以火山岩和海相沉积碎屑岩为主，C_1b为火山岩与海相碎屑岩互层[48-51]。

传统定义的C_1t由新疆地质局区测队1966年创名，但其岩性组合复杂，包含了不同时代、不同构造环境的地质体，已不符合岩石地层单元中“组”的定义[52]。近年来，多数研究提出废弃该组名，并以成吉思汗山组替代原太勒古拉组的上部层位[40,53]。成吉思汗山组层型位于克拉玛依市以北成吉思汗山一带，其底界以一套底砾岩与下伏早石炭世地层呈角度不整合接触。其岩石组合可以划分为两部分：下段以凝灰质砂砾岩类为主；上段为凝灰岩、玄武岩、安山岩与硅质岩互层，火山岩占比显著增高，是晚石炭世区域岩浆活动的直接记录。已发表的锆石U-Pb同位素年龄集中在312 Ma，显示其形成时代为晚石炭世莫斯科期[54]。P_1jm和P_1f与下伏石炭系地层呈角度不整合接触。传统认为，P_1jm主要为火山岩系，而P_1f则发育白云岩和白云质泥岩等沉积岩[55-59]。受长期地质构造作用影响，克百断裂带上、下盘地层发育差异显著：上盘缺失二叠系和三叠系百口泉组，仅局部残留三叠系的克拉玛依组和白碱滩组；下盘地层发育完整，石炭系—侏罗系均有分布，沉积厚度大，是油气勘探的主要目标区。

2 样品采集与分析测试方法

本次研究的样品均取自克百断裂带百乌21井岩心，取样井段埋深为1 523.25～1 530.10 m，共采集岩心样品15件。取样层位在原地质报告中被划归为下二叠统佳木河组，岩性主要为凝灰质砂砾岩、岩屑凝灰岩和安山岩等。对采集的岩心样品进行系统宏观描述与编录，制作标准岩石薄片，通过透反射偏光显微镜进行岩相学观察、矿物成分鉴定和结构分析，完成岩石类型定名与成岩蚀变特征研究。

锆石单矿物挑选在廊坊市宇弘岩矿科技有限公司完成。经破碎、重选和磁选后，在双目镜下挑选出晶形完整、无裂隙的锆石颗粒。锆石制靶、抛光，并进行透反射和阴极发光(CL)图像拍摄，以上操作均在北京锆年领航科技有限公司完成。通过CL图像识别锆石的内部结构，筛选岩浆成因锆石环带区域作为测年靶位。LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素测试在中国地质科学院地质力学所完成，采用的是德国耶拿分析仪器公司的PQ-MS电感耦合等离子体质谱仪和ESL公司的NWR193nm高能ArF激光器联用系统。测试激光束斑直径和频率分别为30 μm和5 Hz，每个测点的分析流程包括20～30 s空白信号和40 s样品信号采集。测试过程中采用锆石标准91500和玻璃标准物质NIST610分别进行同位素分馏和微量元素含量校正，每测试10个样品点，穿插测试2个标样点和1个监控样点，保证测试精度。测试数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及U-Pb同位素比值和年龄计算)采用软件iolite4完成，锆石U-Pb同位素年龄谱和图绘制和年龄加权平均值计算采用Isoplot/Ex_ver3[62]完成。

BW21-2样品变质岩屑凝灰岩样品取样深度为1 523.56 m(图2)，岩石具变质火山凝灰结构，变余假流纹构造。岩石主要由变余岩屑及基质组成，副矿物见不透明金属矿物。岩石整体发育强硅化明显，且整体发育强烈变质作用。岩屑主要为燧石和含泥质硅质岩，呈次棱角状，粒径介于0.38～0.86 mm，最大值约为1.40 mm。燧石及泥质硅质岩均受重结晶作用，向微晶石英及雏晶云母过渡，另见岩屑内吸附有少量铁质组分。

BW21-4样品凝灰质砂砾岩样品取样深度为1 529.60 m(图2)，岩石具凝灰质砂砾结构，块状构造。砾石主要由晶屑和凝灰岩组成，胶结物主要为火山灰和砂粒，副矿物见不透明金属矿物。岩石整体支撑类型为基质支撑，胶结类型为基底式胶结。砾石成分包括：①凝灰岩，呈次棱角状，粒径介于1.78～3.75 mm，具凝灰结构，块状构造，部分发育强烈褐铁矿化，色较暗；②单晶石英、钾长石构成的砾石，呈次棱角状-次圆状，粒径介于2.00～2.59 mm。单晶石英呈次棱角状，晶内裂纹发育，具平行消光。钾长石呈次棱角状，多为微斜长石，格子双晶发育明显，另见少量条纹长石，条纹结构可见。

本次研究采用的三维地震资料由新疆油田公司百口泉采油厂提供，覆盖克百断裂带全区，地震资料主频介于30～50 Hz，垂向分辨率较高。首先，通过百乌21井的声波测井与密度测井数据制作合成地震记录，完成井震标定，将钻井岩性-地层界面精准对应到地震剖面；在此基础上，搭建过百乌21井的两条连井地震剖面，完成层位追踪、不整合面识别和构造解释，建立区域地层格架。

3 研究结果

3.1 岩石组合特征

研究区岩性主要为火山熔岩(安山岩和玄武质安山岩)，均发生不同程度的蚀变；其次为火山碎屑岩(晶屑凝灰岩)和火山碎屑沉积岩(凝灰质砂砾岩)。岩石

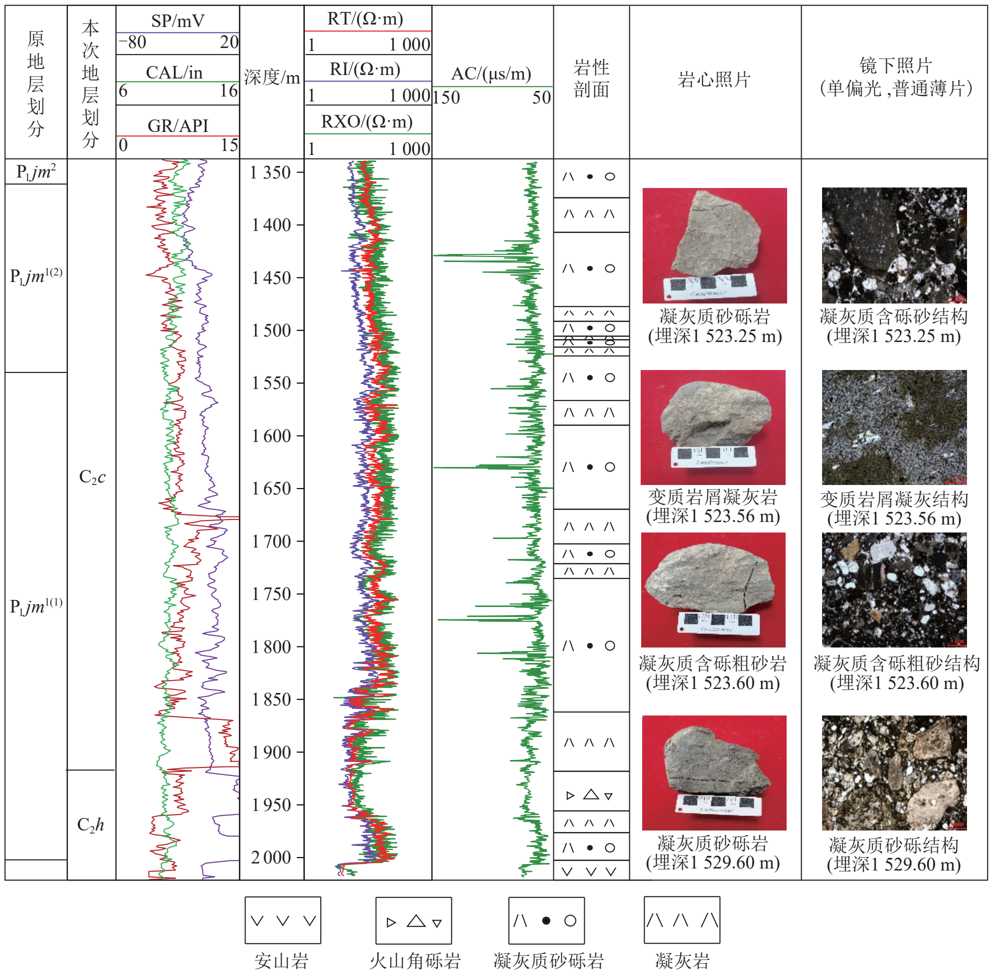

图2　准噶尔盆地西北缘克百断裂带百乌21井单井综合柱状图

Fig. 2　Comprehensive stratigraphic column of well Baiwu 21 in the Kebai fault zone, northwestern margin of the Junggar Basin

$P_1jm^{1(1)}$. 下二叠统佳木河组一段一亚段；$P_1jm^{1(2)}$. 下二叠统佳木河组一段二亚段；P_1jm^2. 下二叠统佳木河组二段；C_2c. 上石炭统成吉思汗山组

具凝灰质砂砾结构。胶结物主要为火山灰，副矿物见不透明金属矿物[63]。岩石整体支撑类型为颗粒支撑，局部见基质支撑，胶结类型为孔隙式(图2)。该岩石组合与区域上成吉思汗山组上段的火山岩组合高度吻合，而与玛湖凹陷周缘佳木河组以中-酸性火山岩为主的岩性组合存在显著差异。

3.2　碎屑锆石LA-ICP-MS年代学测试结果

本次研究对样品BW21-1(埋深1 523.25 m)和样品BW21-15(埋深1 530.10 m)两个样品进行LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素定年。每件样品测试30个点，最终分别筛选出22个谐和度大于90%的有效测点(表1)。

样品BW21-1多呈自形-半自形棱柱状，粒径介于50～180 μm，长/宽比介于1.1～2.4。钍(Th)/铀(U)含量比值较高，介于0.36～1.07(>0.10)。Th含量为(11.77～271.61)×10^{-6}，U含量为(32.80～349.73)×10^{-6}(表1)。铅-206(^{206}Pb)/铀-238(^{238}U)同位素年龄值介于339.00～289.57 Ma，$^{206}Pb/^{238}U$加权平均年龄为311.9 Ma ± 2.2 Ma[平均标准权重偏差(*MSWD*)= 2.70](图3a)，代表该套地层的最大沉积年龄。

样品BW21-15的锆石多呈棱柱状，个别颗粒具磨圆度，粒径介于50～160 μm，长/宽比介于1.1～2.2。Th/U比值较高，介于0.36～1.07。Th含量为(11.36～593.75)×10^{-6}，U含量为(32.55～593.75)×10^{-6}(表1)。$^{206}Pb/^{238}U$年龄值介于331.77～294.34 Ma，$^{206}Pb/^{238}U$加权平均年龄为311.6 ± 2.4 Ma(*MSWD* = 2.10)(图3b)。

两件样品锆石普遍具有清晰震荡环带(图4)，无明显变质增生边，指示其为岩浆成因[64]。每块样品22个数据点集中分布在谐和曲线附近(图3)，代表该套地层碎屑物质沉积集中形成时间。两件样品的加权平均年龄为311.9～311.6 Ma，属于上石炭统C_2c，远早于下二叠统P_1jm的形成时代，而与区域上成吉思汗山

表1 准噶尔盆地西北缘克百断裂带百乌21井上石炭统凝灰质砂砾岩LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素年龄

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic ages for the Upper Carboniferous tuffaceous sandy conglomerate from well Baiwu 21 in the Kebai fault zone, northwestern margin of the Junggar Basin

测点编号	元素含量/10^{-6}			$^{232}Th/^{238}U$	同位素含量比值						同位素年龄/Ma						协和度
	Pb	Th	U		$^{207}Pb/^{206}Pb$	±%	$^{207}Pb/^{235}U$	±%	$^{206}Pb/^{238}U$	±%	$^{207}Pb/^{206}Pb$	σ	$^{206}Pb/^{238}U$	σ	$^{207}Pb/^{235}U$	σ	
BW21-1-1	6.17	44.05	73.43	0.60	0.05	0.01	0.35	0.05	0.05	0	32.35	403.29	311.26	12.35	304.62	41.99	97.87
BW21-1-2	17.67	123.79	216.50	0.57	0.05	0	0.37	0.03	0.05	0	345.59	173.46	305.25	7.41	314.98	19.75	96.81
BW21-1-3	3.56	19.71	44.67	0.44	0.05	0.01	0.39	0.07	0.05	0	225.69	453.79	315.58	13.89	320.89	54.39	98.32
BW21-1-4	2.78	20.09	48.80	0.41	0.06	0.02	0.38	0.11	0.05	0	-248.86	786.31	305.81	15.55	295.92	74.57	96.76
BW21-1-5	29.66	190.98	178.22	1.07	0.06	0.01	0.42	0.05	0.05	0	293.05	284.36	339.00	10.79	348.89	33.80	97.08
BW21-1-6	22.18	151.40	155.36	0.97	0.05	0.01	0.39	0.04	0.05	0	332.94	248.82	325.03	11.77	337.43	31.59	96.18
BW21-1-8	5.76	39.80	79.98	0.50	0.05	0.01	0.38	0.07	0.05	0	-128.18	454.58	335.38	12.55	317.46	48.55	94.66
BW21-1-9	2.86	18.12	40.93	0.44	0.06	0.01	0.37	0.09	0.05	0	-33.54	605.26	308.67	18.39	295.45	64.72	95.72
BW21-1-10	18.52	132.94	349.73	0.38	0.06	0	0.37	0.03	0.05	0	338.67	156.87	308.82	5.31	318.86	19.03	96.75
BW21-1-12	2.81	17.63	43.05	0.41	0.05	0.01	0.36	0.06	0.05	0	79.38	409.94	315.59	15.05	300.15	45.11	95.11
BW21-1-14	2.83	17.19	45.63	0.38	0.06	0.01	0.33	0.08	0.05	0	-224.65	680.55	307.10	15.17	286.71	62.87	93.36
BW21-1-15	3.11	25.68	51.08	0.50	0.05	0.01	0.36	0.09	0.05	0	-22.47	617.85	304.70	16.72	289.40	61.97	94.98
BW21-1-16	4.28	27.80	49.06	0.57	0.05	0.01	0.35	0.07	0.05	0	320.64	379.56	308.60	14.93	292.01	52.75	94.62
BW21-1-17	1.77	11.77	32.84	0.36	0.06	0.02	0.35	0.10	0.05	0	655.97	529.28	289.57	15.86	278.53	75.24	96.19
BW21-1-21	4.24	29.44	55.06	0.53	0.05	0.01	0.36	0.07	0.05	0	-244.09	564.66	310.87	13.94	298.01	49.76	95.86
BW21-1-22	30	212.03	231.81	0.91	0.05	0	0.33	0.03	0.05	0	14.56	257.95	307.90	8.65	292.78	26.11	95.09
BW21-1-23	39.67	271.61	276.86	0.98	0.05	0	0.37	0.03	0.05	0	346.66	165.50	308.92	8.38	315.98	20.89	97.71
BW21-1-24	5.15	34.36	32.80	1.05	0.05	0.01	0.37	0.10	0.05	0	269.49	438.20	316.74	18.63	296.79	71.67	93.70
BW21-1-26	3.05	21.57	53.86	0.40	0.06	0.01	0.41	0.07	0.05	0	494.16	400.20	312.28	15.53	335.00	46.99	92.73
BW21-1-27	5.25	33.20	66.11	0.50	0.05	0.01	0.35	0.06	0.05	0	311.99	309.78	295.46	13.72	294.49	42.54	99.67
BW21-1-29	4.79	27.70	60.16	0.46	0.06	0.01	0.43	0.08	0.05	0	327.52	455.24	324.18	15.67	347.77	54.01	92.72
BW21-1-30	13.42	92.14	197.33	0.47	0.06	0.01	0.38	0.04	0.05	0	390.90	277.16	303.02	9.51	325.33	32.68	92.64
BW21-15-1	4.48	29.62	67.09	0.44	0.06	0.01	0.38	0.08	0.05	0	117.11	477.71	324.9	14.25	315.69	53.48	97.17
BW21-15-2	3.66	24.27	50.39	0.48	0.06	0.01	0.39	0.08	0.05	0	47.48	614.14	316.69	11.42	329.76	63.58	95.87
BW21-15-3	3.05	21.51	44.12	0.49	0.05	0.01	0.34	0.07	0.05	0	-380.69	625.52	294.34	15.13	279.09	54.84	94.82
BW21-15-6	12.47	83.31	172.91	0.48	0.05	0.01	0.35	0.04	0.05	0	86.12	301.61	309.94	8.23	301.94	30.35	97.42
BW21-15-7	3.6	20.85	39.93	0.52	0.05	0.01	0.36	0.09	0.05	0	56.45	598.72	316.73	17.55	291.04	63.49	91.89
BW21-15-8	19.81	119.12	132.39	0.90	0.05	0	0.35	0.04	0.05	0	97.44	223.4	331.77	10.42	311.61	23.26	93.92
BW21-15-12	1.90	11.77	32.55	0.36	0.05	0.01	0.36	0.09	0.05	0	296.63	522.36	316.15	16.84	292.52	67.95	92.52
BW21-15-13	34.27	230.17	394.03	0.58	0.05	0	0.36	0.03	0.05	0	234.68	190.92	310.67	6.89	311.06	23.09	99.87
BW21-15-14	1.98	13.14	38.32	0.34	0.06	0.01	0.4	0.1	0.05	0	208.37	521.96	308.25	15.33	313.51	69.27	98.29
BW21-15-17	5.13	33.16	57.62	0.58	0.06	0.01	0.38	0.06	0.05	0	526.88	290.83	305.88	15.53	329.65	47.69	92.23
BW21-15-18	7.13	47.48	125.93	0.38	0.06	0.01	0.39	0.04	0.05	0	409.04	248.36	309.6	10.28	332.06	31.08	92.75
BW21-15-19	22.86	178.43	283.11	0.63	0.06	0.01	0.37	0.04	0.05	0	327.3	266.23	298.88	7.21	314.39	28.96	94.81
BW21-15-20	7.92	47.24	93.18	0.51	0.06	0.01	0.39	0.06	0.05	0	153.8	413.98	326.8	12.95	322.5	44.56	98.68
BW21-15-21	3.48	25.66	54.72	0.47	0.06	0.02	0.4	0.09	0.05	0	115	578.42	302.6	14.09	323.4	62.67	93.13
BW21-15-22	9.72	62.77	148.95	0.42	0.05	0.01	0.35	0.06	0.05	0	-90.19	414.87	306.28	10.02	295.65	40.89	96.53
BW21-15-23	1.57	11.36	35.83	0.32	0.05	0.01	0.37	0.11	0.05	0	-69.7	646.1	318.69	18.82	290.47	74.55	91.15
BW21-15-24	8.59	59.96	118.39	0.51	0.05	0.01	0.36	0.05	0.05	0	93.35	431.61	303.1	8.69	307.64	40.35	98.5
BW21-15-25	85.09	593.75	371.95	1.60	0.06	0	0.4	0.02	0.05	0	442.98	144.44	323.05	7.24	343.7	16.85	93.61
BW21-15-26	13.83	95.37	184.71	0.52	0.05	0.01	0.37	0.05	0.05	0	116.42	297.99	311.79	9.95	312.55	32.5	99.76
BW21-15-27	2.24	17.79	46.89	0.38	0.06	0.02	0.37	0.1	0.05	0	-188.4	682.11	296.88	14.11	292.83	67.86	98.64
BW21-15-28	4.38	29.58	59.76	0.50	0.06	0.01	0.35	0.08	0.05	0	492.7	395.3	305.16	16.26	292.88	55.23	95.98
BW21-15-30	4.37	33.69	69.86	0.48	0.05	0.01	0.35	0.06	0.05	0	200.1	324.55	297.98	12.66	295.24	42.65	99.08

注:Pb. 铅;Th. 钍;U. 铀;^{232}Th. 钍-232;^{238}U. 铀-238;^{235}U. 铀-235;^{206}Pb. 铅-206;^{207}Pb. 铅-207;±%. 相对误差;σ. 相对标准偏差。

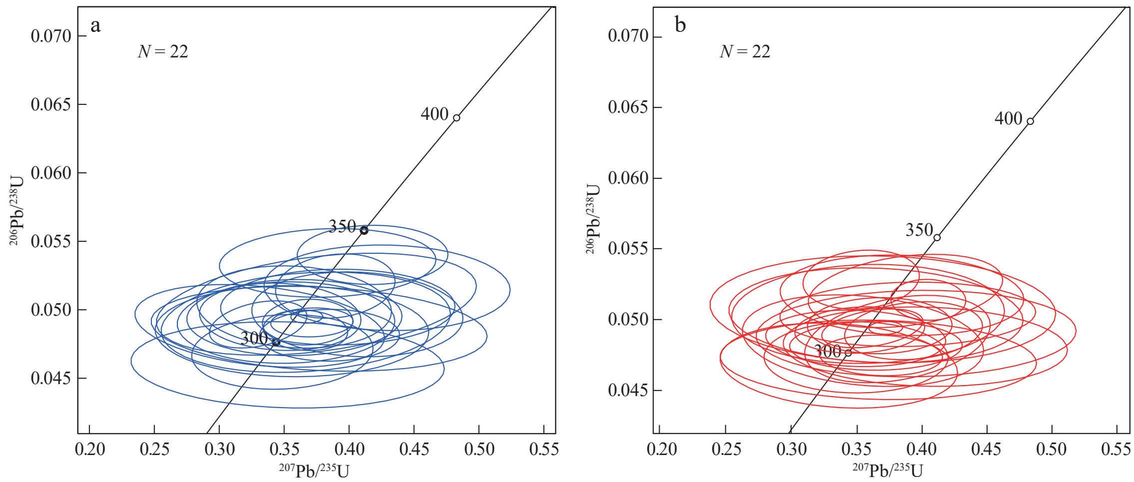

图3　准噶尔盆地西北缘克百断裂带百乌21井上石炭统成吉思汗山组凝灰质砂砾岩LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素协和年龄图版

Fig. 3　LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagram for the tuffaceous sandy conglomerate of the Upper Carboniferous C_2c in well Baiwu 21, Kebai fault zone, northwestern margin of the Junggar Basin

a. 样品BW21-1;b. 样品BW21-15

(^{206}Pb/^{238}U为铅-206同位素与铀-238同位素含量比值,^{207}Pb/^{235}U为铅-207同位素与铀-235同位素含量比值。)

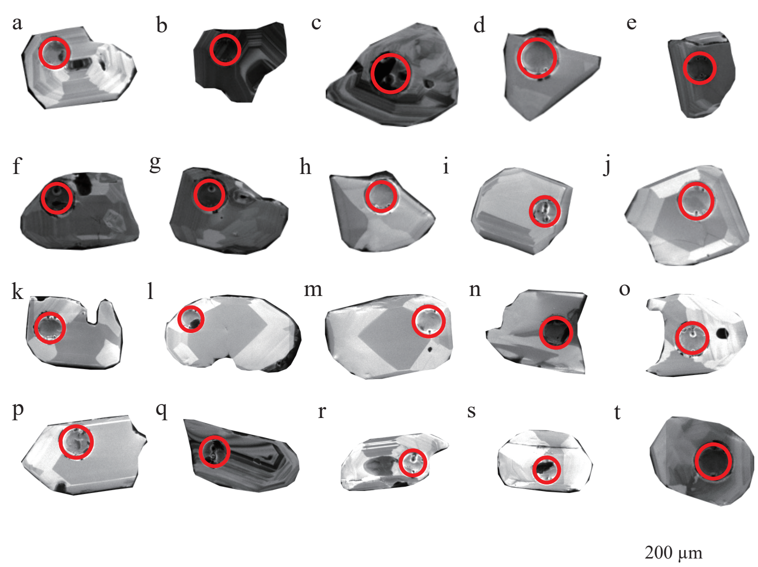

图4　准噶尔盆地西北缘克百断裂带百乌21井上石炭统成吉思汗山组代表性锆石阴极发光图像

Fig. 4　Cathodoluminescence (CL) images of representative zircons from the Upper Carboniferous Chengjisihanshan Formation (C_2c) in well Baiwu 21, Kebai fault zone, northwestern margin of the Junggar Basin

a—j. 样品BW21-1,埋深1 523. 3 m(a. BW21-1-1测点,年龄311. 26 Ma ; b. BW21-1-3测点,年龄315. 58 Ma; c. BW21-1-6测点,年龄325. 03 Ma; d. BW21-1-10测点,年龄308. 82 Ma; e. BW21-1-12测点,年龄315. 59 Ma; f. BW21-1-16测点,年龄308. 60 Ma; g. BW21-1-21测点,年龄310. 87 Ma; h. BW21-1-24测点,年龄316. 74 Ma; i. BW21-1-26测点,年龄312. 28 Ma; j. BW21-1-29测点,年龄324. 18 Ma); k—t. 样品BW21-15,埋深1 530. 1 m (k. BW21-15-2测点,年龄316. 69 Ma; l. BW21-15-6测点,年龄309. 94 Ma; m. BW21-15-7测点,年龄316. 73 Ma; n. BW21-15-12测点,年龄316. 15 Ma ; o. BW21-15-13测点,年龄310. 67 Ma; p. BW21-15-14测点,年龄308. 25 Ma; q. BW21-15-18测点,年龄309. 60 Ma; r. BW21-15-23测点,年龄318. 69 Ma; s. BW21-15-25测点,年龄323. 05 Ma; t. BW21-15-26测点,年龄311. 79 Ma)

(图中红色圆圈表示锆石U-Pb同位素年龄分析测点。)

组的已发表年龄(315 ~ 310 Ma)高度吻合,为地层时代的重新厘定提供了精准的年代学约束。

在同一套地层中,位于百乌21井西北方向的百乌28井内,Wang等在该井的凝灰岩中获得了316. 8 Ma ± 1. 7 Ma(*MSWD* = 1. 15)的年龄数据[52],该年龄代表了火山喷发年龄,并将其所在的火山岩夹层归属为成吉思汗山组。该年龄与本次研究在百乌21井凝灰质砂砾岩中获得的年龄一致。

3.3 地震剖面解释结果

通过合成记录完成井震标定后，对过百乌21井的两条连井剖面进行了系统解释(图5)。目标火山岩系在地震剖面上表现为中-弱振幅、中频、杂乱-断续反射的地震相特征，与上覆P_1f的中振幅、中频、中-高连续平行反射特征形成显著差异，二者之间为区域性的角度不整合面[28]。同时，目标层系与下伏包古图组(C_1b)之间呈清晰的削截不整合接触关系，下伏地层的反射同相轴在不整合面之下发生明显的终止与削截，与区域上成吉思汗山组底界的不整合接触特征完全吻合。区域上，佳木河组在地震剖面上表现为中-强振幅、中-高连续的层状反射特征，与下伏石炭系呈超覆不整合接触，与上覆风城组整合或平行不整合接触，与本次目标层系的地震相特征和叠置关系存在根本性差异。

通过连井地震剖面的层位追踪，证实百乌21井的目标火山岩系可与西北方向百乌28井已厘定的成吉思汗山组进行区域对比，二者具有一致的地震相特征与地层叠置关系，构成了区域性分布的晚石炭世火山岩地层单元，从而否定了其属佳木河组且局部分布的认识。

4 讨论

4.1 地层时代重新厘定

针对准噶尔盆地西北缘克百断裂带百乌21井原

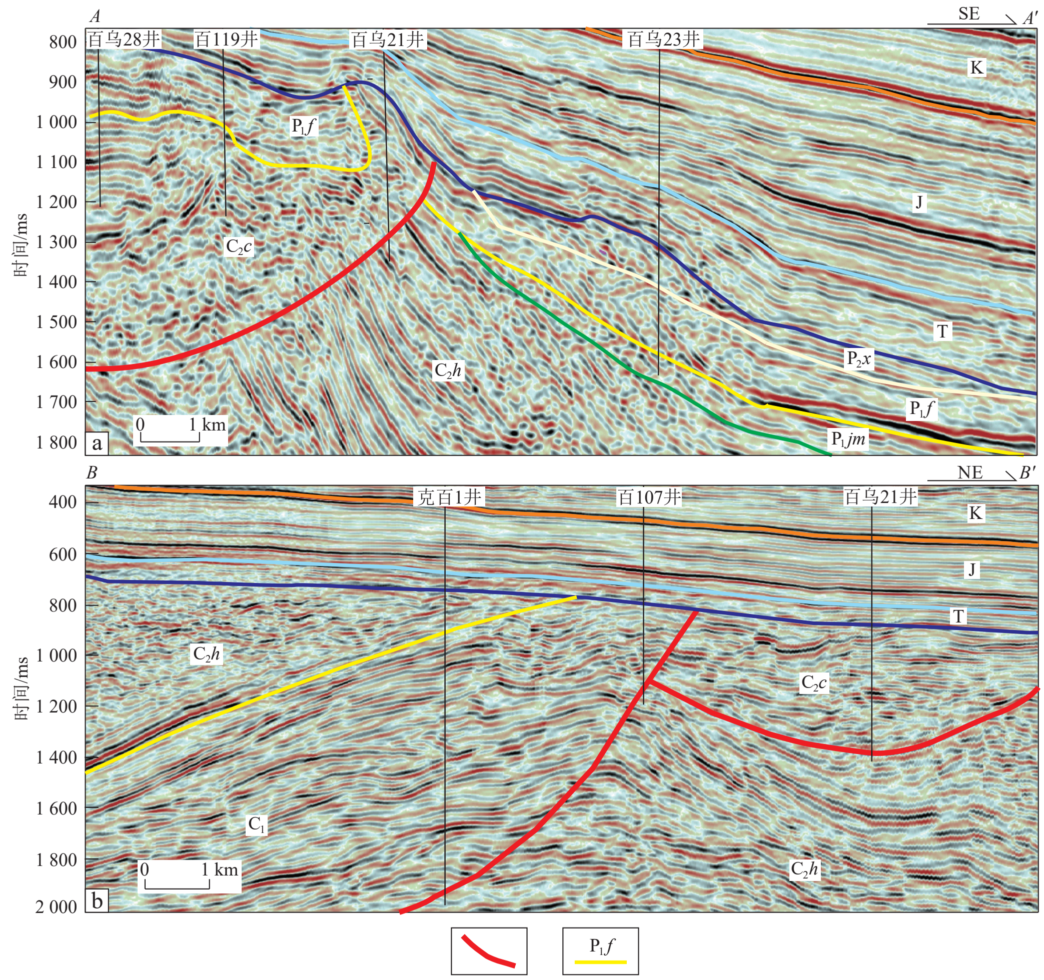

图5 准噶尔盆地西北缘克百断裂带成上石炭统吉思汗山组百乌28井—百119井—百乌21井—百乌23井(a)和克百1井—百107井—百乌21井连井地震解释剖面(b)(剖面位置见图1b)

Fig. 5 Cross-well seismic interpretation sections of the Upper Carboniferous C_2c in the Kebai fault zone, northwestern margin of the Junggar Basin: (a) across wells Baiwu 28, Bai 119, Baiwu 21, and Baiwu 23; (b) across wells Kebai 1, Bai 107, and Baiwu 21 (see Fig. 1 for the section location)

K. 白垩系；J. 侏罗系；T. 三叠系；P_2x. 上二叠统夏子街组；P_1f. 下二叠统风城组；P_1jm. 下二叠统佳木河组；C_2h. 上石炭统哈拉阿拉特组；C_2c. 上石炭统成吉思汗山组；C_1. 下石炭统

划归佳木河组的火山岩系,本次研究基于高精度年代学、岩相学与地震资料的多维度约束,对其地层时代与归属进行了系统厘定。

1）通过时代约束重新厘定研究区火山岩系为成吉思汗山组地层。国际年代地层表中,石炭纪—二叠纪界线年龄为299.0 Ma,早二叠世的时间范围为299.0～272.0 Ma,本次研究获得的两件样品加权平均年龄为311.9 Ma ± 2.2 Ma和311.6 Ma ± 2.2 Ma,属于晚石炭世晚期,远早于早二叠世的时间范围,本次研究倾向于对该地层归属于佳木河组的原有认识予以修改。同时,该年龄与区域上成吉思汗山组已发表的315～310 Ma的锆石U-Pb同位素年龄在误差范围内完全一致,时代上与成吉思汗山组高度吻合。

2）岩性-地球化学特征与成吉思汗山组高度匹配。在中拐地区佳木河组发育完整,与石炭系地层不整合接触,岩性为玄武岩、安山岩、凝灰岩、火山碎屑岩、流纹岩、砂砾岩、砂质泥岩等[51]。本次研究的火山岩以基性-中性的玄武安山岩和安山岩为主,具有亚碱性、富钠贫钾特征,与成吉思汗山组上段火山岩的岩性组合完全一致(图6)。Wang对位于百乌21井西北方向的百乌28井的安山岩和玄武岩进行了地球化学分析,研究区火山熔岩具有亚碱性、富钠贫钾的特点,来源于亏损地幔[65],与孙羽[66]报道的准噶尔盆地西北缘地区成吉思汗山组的岩石地球化学特征相似,可能形成于弧后伸展构造环境,而不同于佳木河组以中-酸性火山岩为主的特点[37]。

3）地层接触关系与区域地层格架一致。地震剖面证实,该套地层与下伏包古图组地层呈角度不整合接触,此系成吉思汗山组最核心的区域识别标志——成吉思汗山组以区域性角度不整合覆盖于早石炭世弧盆体系地层之上,为准噶尔盆地西北缘晚石炭世造山作用后的第一个沉积盖层[40]。而佳木河组作为早二叠世地层,其底界不整合于该套地层之上,二者分属两个不同的构造层序。

综合上述证据,本文将准噶尔盆地西北缘克百断裂带百乌21井原划归下二叠统佳木河组的火山岩系,重新厘定为上石炭统成吉思汗山组,解决了该区长期存在的地层划分争议,完善了准噶尔盆地西北缘覆盖区晚古生代地层格架。

4.2　对准噶尔盆地西北缘古生代构造演化的约束

准噶尔盆地西北缘南部地区晚古生代构造演化的核心争议,在于古亚洲洋西段的闭合时限与构造体制转换过程,目前主要存在"晚石炭世闭合"与"早二叠世闭合"两种观点。本次研究获得312 Ma高精度火山岩年龄,为这一科学问题提供了新的年代学约束。

区域岩浆事件序列显示,准噶尔盆地西北缘地区晚

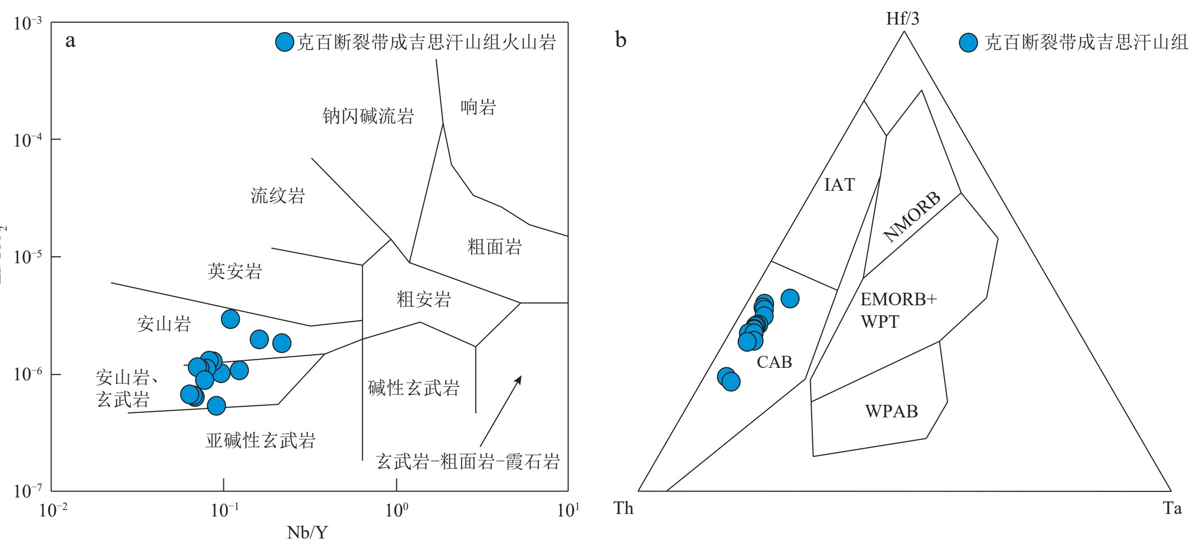

图6　准噶尔盆地西北缘克百断裂带上石炭统成吉思汗山组火山岩Nb/Y-Zr/TiO_2岩性判别图版(a)和Th-Hf-Ta火山岩构造背景判别图版(b)

Fig. 6　Nb/Y-Zr/TiO_2 lithology identification diagram (a) and Th-Hf-Ta volcanic tectonic setting discrimination diagram (b) for volcanic rocks of the Upper Carboniferous C_2c in the Kebai fault zone, northwestern margin of the Junggar Basin

Zr. 锆; TiO_2. 二氧化钛; Nb. 铌; Y. 钇; Hf. 铪; Th. 钍; Ta. 钽; IAT. 岛弧拉斑玄武岩; CAB. 岛弧钙碱性玄武岩; WPT. 板内拉斑玄武岩; WPAB. 板内碱性玄武岩; EMORB. 富集型洋中脊玄武岩; NMORB. 正常洋中脊玄武岩

(图中所有样本均为成吉思汗山组钻井岩心,数据引自文献[52];a图据文献[68]修改;b图据文献[69]修改;图中元素和化合物符号代表其含量。)

古生代岩浆活动可分为3期:早石炭世(346 ~ 321 Ma)俯冲相关的弧岩浆作用、晚石炭世(318 ~ 300 Ma)伸展背景下的岩浆活动[38]及早二叠世(295 ~ 270 Ma)后碰撞板内岩浆作用。本次研究的年龄为311.6 ~ 311.9 Ma的火山岩,属于晚石炭世伸展背景下的岩浆活动产物,其地球化学特征显示兼具岛弧火山岩与板内火山岩的双重属性,反映其形成于俯冲碰撞向后碰撞伸展转换的构造背景[52, 67]。

这一认识表明,准噶尔盆地西北缘地区古亚洲洋的俯冲作用在312 Ma之前已基本结束,区域构造已由俯冲相关的弧盆体系,转换为后碰撞伸展环境;软流圈地幔上涌引发了幔源岩浆的部分熔融,形成了成吉思汗山组的基性-中性火山岩。该结果支持了古亚洲洋西段于晚石炭世已完成闭合的观点,将准噶尔盆地西北缘地区板缘构造向板内构造的转换时限限定在312 Ma之前,为重建中亚造山带西南段的构造演化历史提供了新的关键依据[70]。

4.3 对区域油气勘探的启示

地层划分的修订对准噶尔盆地西北缘的油气勘探具有重要指导意义。长期以来,准噶尔盆地西北缘的油气勘探主要聚焦于佳木河组,风城组,而对成吉思汗山组的重视程度则相对较低。本次研究证实,准噶尔盆地西北缘克百断裂带成吉思汗山组发育区域性分布的火山岩,其中杏仁状安山岩和玄武安山岩的气孔、裂缝发育,具备良好的储集性能,是深层油气勘探的优质储层,实现了勘探层系从二叠系向石炭系的拓展。同时亦合理解释了该孤立油藏的成因(图7)。最新试油显示,成吉思汗山组是潜力巨大的优势层系,其孔隙发育,地层埋深较浅,加之风化淋滤作用可对储层进行强烈改造[71-73],使成吉思汗山组成为典型风化壳优质储层。

基于最新地层认识,成吉思汗山组地层的分布范围由百乌21井和百乌28井的年代约束结果予以圈定,并结合井震标定进行地层解释。克百断裂带发育多个断阶带,研究区地层呈现北部断阶带与中部断阶带拼接形成的典型不整合接触结构;研究区C_2c地层主要受断层控制,据此圈定本次研究所追溯的成吉思汗山组地层分布范围(图7)。

成吉思汗山组火山岩储层之上直接覆盖着佳木河组和风城组等烃源岩[74-76],形成了良好的源储组合;同时,克百断裂带多期活动的断裂体系为油气垂向运移提供了通道,易形成构造-岩性复合油气藏。

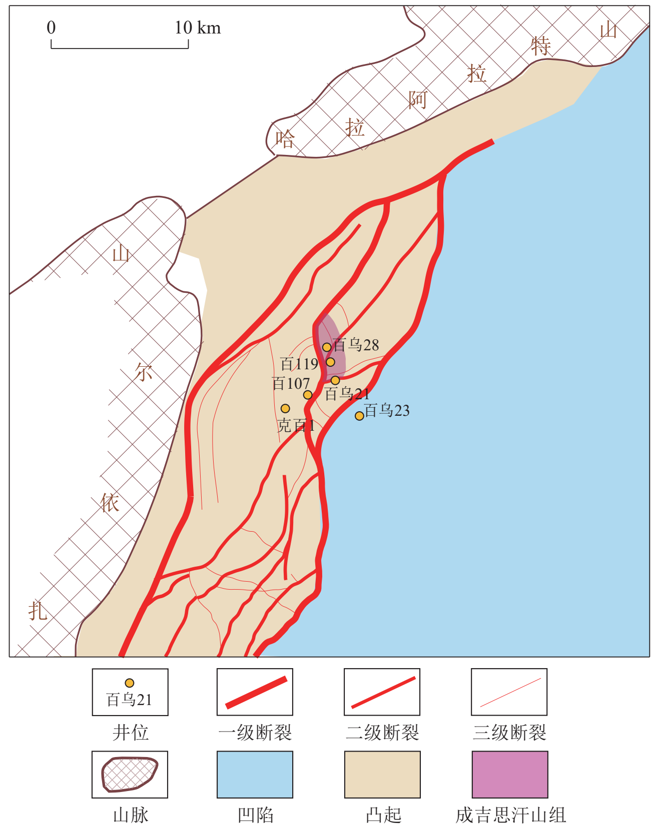

图7 新认识下本次研究划分的准噶尔盆地西北缘克百断裂带上石炭统成吉思汗山组平面分布(修改自文献[61])

Fig. 7 Planar distribution map of the Upper Carboniferous C_2c in the Kebai fault zone, northwestern margin of the Junggar Basin, delineated in this study based on new insights (modified after reference [61])

5 结论

1) 锆石U-Pb同位素定年结果显示,百乌21井原划归为佳木河组的火山岩碎屑锆石U-Pb同位素年龄分别为311.9 Ma ± 2.2 Ma和311.6 Ma ± 2.2 Ma,限定其形成时代为晚石炭世晚期,据此将其重新划归为成吉思汗山组。

2) 研究区火山岩以杏仁状安山岩、玄武安山岩为主,具有亚碱性、富钠贫钾的地球化学特征,与区域上成吉思汗山组的特征一致,而与佳木河组存在明显差异。地震剖面证实其与下伏包古图组地层呈角度不整合接触,与区域上成吉思汗山组构造特征一致。

3) 本研究将克百断裂带原划归佳木河组的火山岩厘定为成吉思汗山组的组成部分,解决了准噶尔地区地层划分争议。火山岩年龄为311.6 ~ 311.9 Ma,限定了准噶尔盆地西北缘地区古亚洲洋西段的闭合时

限应不晚于晚石炭世晚期,区域构造体制已于312 Ma以前从俯冲碰撞转换为后碰撞伸展,为中亚造山带西南段的构造演化提供了新约束。

参 考 文 献

[1] 周杰, 何小胡, 户景松, 等. 琼东南盆地松南-宝岛凹陷及其周缘新近系中新统火山岩储层发育特征及勘探前景[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(2): 623-637.
ZHOU Jie, HE Xiaohu, HU Jingsong, et al. Developmental characteristics and exploration prospects of the Neogene Miocene volcanic rock reservoirs in the Songnan-Baodao Sag and its periphery, Qiongdongnan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(2): 623-637.

[2] 何登发, 李德生, 童晓光, 等. 中国沉积盆地油气立体综合勘探论[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(2): 265-284.
HE Dengfa, LI Desheng, TONG Xiaoguang, et al. Integrated 3D hydrocarbon exploration in sedimentary basins of China[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(2): 265-284.

[3] 李建忠, 王小军, 杨帆, 等. 准噶尔盆地中央坳陷西部下组合油气成藏模式及勘探前景[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1059-1072.
LI Jianzhong, WANG Xiaojun, YANG Fan, et al. Hydrocarbon accumulation pattern and exploration prospect of the structural traps in lower play of the western Central Depression in the Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1059-1072.

[4] 张耀文, 崔岩, 杨思通, 等. 盆地埋藏火山机构原始形貌恢复与内部岩性组合预测——以渤海湾盆地渤东低凸起龙口7-A构造为例[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(3): 841-855.
ZHANG Yaowen, CUI Yan, YANG Sitong, et al. Original morphology reconstruction and lithologic assemblage prediction for buried volcanic edifices in a basin: A case study of the LK 7-A structure in the Bodong swell, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(3): 841-855.

[5] 李宁, 李瑞磊, 苗贺, 等. 松辽盆地深层中-基性火山岩有利相带及储层“甜点”逐级识别[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(3): 801-815.
LI Ning, LI Ruilei, MIAO He, et al. Stepwise identification of favorable facies belts and reservoir sweet spots of deep intermediate-basic volcanic rocks in the Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(3): 801-815.

[6] 刘汉青, 林承焰, 董春梅, 等. 准噶尔盆地盆1井西凹陷周缘石炭系火山岩优质储层特征及成因[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(1): 143-161.
LIU Hanqing, LIN Chengyan, DONG Chunmei, et al. Characteristics and genesis of the high-quality Carboniferous volcanic reservoirs in the periphery of the Western Well Pen-1 Sag, Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(1): 143-161.

[7] 蔡倩茹, 王金铎, 张关龙, 等. 准噶尔盆地东北缘上石炭统巴山组烃源岩沉积环境分析及物源示踪——来自泥岩地球化学的证据[J]. 石油实验地质, 2024, 46(1): 146-157.
CAI Qianru, WANG Jinduo, ZHANG Guanlong, et al. Research on sedimentary environment and provenance for hydrocarbon source rocks of Upper Carboniferous Batamayineishan Formation in northeastern Junggar Basin: Evidences from the geochemistry of mudstones[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(1): 146-157.

[8] 王晔磊, 慈兴华, 杜焕福, 等. 基于极度随机树算法的火山岩岩性识别——以长岭断陷查干花地区火石岭组为例[J]. 新疆石油地质, 2026, 47(2): 222-232.
WANG Yelei, CI Xinghua, DU Huanfu, et al. Lithology identification of volcanic rocks based on extra-trees classifier: A case study of the Huoshiling Formation in the Chaganhua subsag, Changling fault depression, Songliao Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2026, 47(2): 222-232.

[9] 许方哲, 朱建峰, 刘玉虎, 等. 长岭断陷查干花次凹火石岭组火山岩喷发模式新认识[J]. 新疆石油地质, 2024, 45(5): 533-540.
XU Fangzhe, ZHU Jianfeng, LIU Yuhu, et al. New insights into eruption model of Huoshiling Formation volcanic rocks in Chaganhua subsag of Changling fault depression [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2024, 45(5): 533-540.

[10] 支东明, 陈旋, 杨润泽, 等. 准噶尔盆地东部残留海相凹陷勘探实践及全油气系统[J]. 新疆石油地质, 2024, 45(2): 127-138.
ZHI Dongming, CHEN Xuan, YANG Runze, et al. Exploration practice and total petroleum system in residual marine sag, eastern Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2024, 45(2): 127-138.

[11] 朱博含, 单玄龙, 衣健, 等. 基于机器学习的火山岩识别方法及应用[J]. 特种油气藏, 2024, 31(5): 41-49.
ZHU Bohan, SHAN Xuanlong, YI Jian, et al. Volcanic rock identification method based on machine learning and its application [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2024, 31(5): 41-49.

[12] 高涛, 曹宝军, 纪学雁, 等. 松辽盆地北部深层火山岩气藏勘探开发关键技术[J]. 大庆石油地质与开发, 2024, 43(3): 172-182.
GAO Tao, CAO Baojun, JI Xueyan, et al. Key technologies for exploration and development of deep volcanic gas reservoirs in northern Songliao Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2024, 43(3): 172-182.

[13] 连丽霞, 刘汉青, 王剑, 等. 风化壳型火山岩储层特征及其主控因素——以准噶尔盆地盆1井西凹陷周缘石炭系为例[J]. 断块油气田, 2025, 32(4): 605-613.
LIAN Lixia, LIU Hanqing, WANG Jian, et al. Characteristics and main controlling factors of weathering crust volcanic reservoir: A case study of Carboniferous around west depression of Well Pen 1 in Junggar Basin as an example[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2025, 32(4): 605-613.

[14] 苏成鹏, 宋晓波, 孟宪武, 等. 川西地区二叠系火山岩喷发古地理环境及油气勘探意义[J]. 断块油气田, 2025, 32(5): 835-842.
SU Chengpeng, SONG Xiaobo, MENG Xianwu, et al. Paleogeographic environment of Permian volcanic eruption and significance for oil and gas exploration in western Sichuan Basin

[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2025, 32(5): 835-842.

[15] 王敏, 曹玥, 李万才, 等. 基于孔隙结构和核磁测井建立火山岩储层分类标准——以松南断陷查干花气田为例[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(2): 216-223, 236.
WANG Min, CAO Yue, LI Wancai, et al. Establishing classification standards for volcanic reservoirs based on pore structure and nuclear magnetic logging: A case study of Chaganhua Gas Field in Songnan Fault Depression[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(2): 216-223, 236.

[16] 任宪军, 石云倩, 靖伟. 陆相湖盆水下喷发火山岩储层特征及发育模式——以松辽盆地长岭断陷查干花次凹为例[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(2): 176-189.
REN Xianjun, SHI Yunqian, JING Wei. Characteristics and development model of underwater eruptive volcanic reservoirs in continental lacustrine basin: A case study of Chaganhua Subsag in Changling Fault Depression, Songliao Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(2): 176-189.

[17] 单玄龙, 徐长贵, 衣健, 等. 中国近海典型含油气盆地中生代岩浆活动与岩浆岩潜山油气藏[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(6): 1773-1787.
SHAN Xuanlong, XU Changgui, YI Jian, et al. Mesozoic magmatic activities and hydrocarbon accumulations in magmatic buried hills in typical offshore oil and gas basins of China[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(6): 1773-1787.

[18] 徐春强, 王晨杰, 王蔚. 渤中凹陷北部中生界火山岩储层发育特征及油气成藏条件[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(6): 1801-1814.
XU Chunqiang, WANG Chenjie, WANG Wei. Development characteristics and oil and gas accumulation conditions of Mesozoic volcanic reservoirs in the northern Bozhong Depression[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(6): 1801-1814.

[19] 孙耀庭, 张鹏飞, 刘菲菲, 等. 济阳坳陷桩西地区中生界火山岩成岩演化特征及有利储层分布[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2025, 49(6): 42-54.
SUN Yaoting, ZHANG Pengfei, LIU Feifei, et al. Evolutionary characteristics and favorable reservoir distribution of Mesozoic volcanic rocks in Zhuangxi area, Jiyang Depression[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2025, 49(6): 42-54.

[20] 陈悦, 陶士振, 杨怡青, 等. 壳幔混源氦气成因机制与富集因素: 以松辽盆地深层天然气中氦气为例[J]. 地学前缘, 2025, 32(6): 457-472.
CHEN Yue, TAO Shizhen, YANG Yiqing, et al. Genesis mechanisms and enrichment factors of crust-mantle mixed source helium: Taking helium in deep natural gas in the Songliao Basin as an example[J]. Earth Science Frontiers, 2025, 32(6): 457-472.

[21] LI Jijun, LUO Chenghong, YANG Tianhong, et al. Control of volcanic lithofacies on play fairways: A case study of the Huoshiling Formation in the Dehui faulted depression, southern Songliao Basin, China[J]. Energy Geoscience, 2025, 6(2): 100391.

[22] 吴孔友, 李云龙, 汪勇, 等. 准噶尔盆地车排子凸起东部走滑断裂对石炭系火山岩油气成藏的控制作用[J/OL]. 石油与天然气地质: 1-14[2026-05-15]. https://link.cnki.net/urlid/11.4820.te.20260123.1103.002.
WU Kongyou, LI Yunlong, WANG Yong, et al. Controlling effects of strike-slip faults on hydrocarbon accumulation within the Carboniferous volcanic rocks in the eastern Chepaizi Uplift, western Junggar Basin[J/OL]. Oil & Gas Geology: 1-14[2026-05-15]. https://link.cnki.net/urlid/11.4820.te.20260123.1103.002.

[23] 赵耀, 潘虹, 骆飞飞, 等. 准噶尔盆地红车断裂带石炭系火山岩储层特征及质量控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(5): 1129-1140.
ZHAO Yao, PAN Hong, LUO Feifei, et al. Characteristics and quality determinants of Carboniferous volcanic reservoirs in the Hongche Fault Zone, Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(5): 1129-1140.

[24] 潘虹, 于庆森, 李晓山, 等. 准噶尔盆地红车断裂带石炭系重新认识及油气成藏特征[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 215-230.
PAN Hong, YU Qingsen, LI Xiaoshan, et al. Recognition of the Carboniferous strata in the Hongche fault zone, Junggar Basin and its hydrocarbon accumulation characteristics[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 215-230.

[25] 桂诗琦, 罗群, 曾联波, 等. 走滑断裂内部结构差异特征及其多尺度交互识别模式——以准噶尔盆地车排子凸起石炭系火山岩为例[J]. 石油实验地质, 2025, 47(5): 1150-1162.
GUI Shiqi, LUO Qun, ZENG Lianbo, et al. Differential characteristics of internal structures of strike-slip faults and their multiscale interactive identification mode: A case study of Carboniferous volcanic rocks in Chepaizi Uplift, Junggar Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2025, 47(5): 1150-1162.

[26] 牛花朋, 刘姗, 焦小芹, 等. 准噶尔盆地西北缘石炭系火山岩地球化学特征及其成因机制[J]. 现代地质, 2025, 39(3): 588-597.
NIU Huapeng, LIU Shan, JIAO Xiaoqin, et al. Geochemical characteristics and petrogenesis of Carboniferous volcanic rocks in the northwestern margin of the Junggar Basin[J]. Geoscience, 2025, 39(3): 588-597.

[27] HUANG Dingling, WANG Xiaolei. Reviews of geochronology, geochemistry, and geodynamic processes of Ordovician-Devonian granitic rocks in southeast China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 184: 104001.

[28] MONTAGNA C P, PAPALE P, LONGO A. Timescales of mingling in shallow magmatic reservoirs[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2015, 422(1): 131-140.

[29] 曹玉召, 吴玉, 钟军, 等. 准噶尔盆地中北部蚀源区岩浆岩时空分布特征与铀源条件分析[J]. 地学前缘, 2026, 33(2): 290-310.
CAO Yuzhao, WU Yu, ZHONG Jun, et al. Analysis of the

spatiotemporal distribution characteristics of magmatic rocks and uranium source conditions in the erosion source area of the Central and Northern Junggar Basin, China[J]. Earth Science Frontiers, 2026, 33(2): 290-310.

[30] 杨伟，邱亮，木红旭，等. 西准噶尔谢米斯台辉绿岩锆石U-Pb年代学及其构造意义[J]. 现代地质，2025，39(6)：1461-1482.
YANG Wei, QIU Liang, MU Hongxu, et al. Zircon U-Pb geochronology and tectonic significance of diabase in the Xiemisitai area of western Junggar[J]. Geoscience, 2025, 39(6): 1461-1482.

[31] 尹继元，陈文，袁超，等. 新疆西准噶尔晚古生代侵入岩的年龄和构造意义：来自锆石LA-ICPMS定年的证据[J]. 地球化学，2013，42(5)：414-429.
YIN Jiyuan, CHEN Wen, YUAN Chao, et al. Ages and tectonic implication of Late Paleozoic plutons in the West Junggar, North Xinjiang: Evidence from LA-ICPMS zircon geochronology[J]. Geochimica, 2013, 42(5): 414-429.

[32] 赖世新，姚卫江，邹红亮，等. 准噶尔盆地西北缘界山石炭系——二叠系与玛湖凹陷地震地层的关系[J]. 地层学杂志，2021，45(2)：151-159.
LAI Shixin, YAO Weijiang, ZOU Hongliang, et al. The relationship between the Carboniferous Permian strata in the boundary mountains of the northwestern margin of the Junggar Basin and seismic stratigraphy in Mahu Depression[J]. Journal of Stratigraphy, 2021, 45(2): 151-159.

[33] PEDRETTI D, LUOMA S, RUSKEENIEMI T, et al. A geologically-based approach to map Arsenic risk in crystalline aquifers: Analysis of the Tampere region, Finland[J]. Geoscience Frontiers, 2019, 10(5): 1731-1741.

[34] GASTALDO R A, KNIGHT C L, NEVELING J, et al. Latest Permian paleosols from Wapadsberg Pass, South Africa: Implications for Changhsingian climate[J]. GSA Bulletin, 2014, 126(5/6): 665-679.

[35] 何登发，陈新发，况军，等. 准噶尔盆地石炭系油气成藏组合特征及勘探前景[J]. 石油学报，2010，31(1)：1-11.
HE Dengfa, CHEN Xinfa, KUANG Jun, et al. Characteristics and exploration potential of Carboniferous hydrocarbon plays in Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(1): 1-11.

[36] TANG Gongjian, WANG Qiang, WYMAN D A, et al. Recycling oceanic crust for continental crustal growth: Sr-Nd-Hf isotope evidence from granitoids in the western Junggar region, NW China[J]. Lithos, 2012, 128/131: 73-83.

[37] 李永军，徐倩，刘佳，等. 新疆西准噶尔哈山地区佳木河组的重新厘定及地质意义[J]. 地球科学，2016，41(9)：1479-1488.
LI Yongjun, XU Qian, LIU Jia, et al. Redefinition and geological significance of Jiamuhe Formation in Hala'alate Mountain of West Junggar, Xinjiang[J]. Earth Science, 2016, 41(9): 1479-1488.

[38] 王乐民，晁文迪，李永军，等. 西准噶尔乌尔禾早二叠世中基性岩墙群LA-ICP-MS锆石U-Pb测年及构造意义[J]. 新疆地质，2015，33(3)：297-304.
WANG Lemin, CHAO Wendi, LI Yongjun, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and tectonic settings implication of the Early Permian intermediate to mafic dyke swarms in Urho area, west Junggar[J]. Xinjiang Geology, 2015, 33(3): 297-304.

[39] 蒋志斌，黄家瑄，李永军，等. 克拉玛依油田424井2140~3551.63 m井段层序、年代学新证及“盆-山”地层对比[J]. 西北地质，2023，56(2)：1-9.
JIANG Zhibin, HUANG Jiaxuan, LI Yongjun, et al. New evidence on the stratigraphy and chronology of 2140 ~ 3551.63 m Well 424 section in Karamay Oilfield and “basin-mountain” stratigraphic comparison[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(2): 1-9.

[40] 王韬，郑孟林，任海姣，等. 准噶尔盆地玛湖凹陷及周缘佳木河组划分对比新认识与天然气勘探方向[J]. 中国石油勘探，2021，26(4)：99-112.
WANG Tao, ZHENG Menglin, REN Haijiao, et al. New understandings of stratigraphic division and correlation of Jiamuhe Formation and natural gas exploration target in Mahu Sag and its periphery, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4): 99-112.

[41] 鲍李银，庞雄奇，崔新璇，等. 准噶尔盆地金龙油田二叠系佳木河组火山岩岩相组合及产能差异[J]. 石油与天然气地质，2025，46(1)：136-150.
BAO Liyin, PANG Xiongqi, CUI Xinxuan, et al. Lithofacies assemblages and differential productivity of volcanic rocks in the Jiamuhe Formation, Jinlong Oilfield, Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(1): 136-150.

[42] 向坤鹏，李永军，徐磊，等. 西准噶尔包古图-哈图地区“太勒古拉组”使用商榷[J]. 新疆地质，2013，31(3)：148-152.
XIANG Kunpeng, LI Yongjun, XU Lei, et al. Discussing the application of “Tailegula Formation” in Baogutu-Hatu region, West Junggar, Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 2013, 31(3): 148-152.

[43] 吴浩若，潘正莆. “构造杂岩”及其地质意义——以西准噶尔为例[J]. 地质科学，1991，26(1)：1-8，101-102.
WU Haoruo, PAN Zhengpu. “Structural complex” and its geological significance——in the case of west Junggarian complexes[J]. Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica), 1991, 26(1): 1-8, 101-102.

[44] 张弛，黄萱. 新疆西准噶尔蛇绿岩形成时代和环境的探讨[J]. 地质论评，1992，38(6)：507-524.
ZHANG Chi, HUANG Xuan. The ages and tectonic settings of ophiolites in west Junggar, Xinjiang[J]. Geological Review, 1992, 38(6): 507-524.

[45] 李军，薛培华，张爱卿，等. 准噶尔盆地西北缘中段石炭系火山岩油藏储层特征及其控制因素[J]. 石油学报，2008，29(3)：329-335.
LI Jun, XUE Peihua, ZHANG Aiqing, et al. Characteristics and controlling factors of Carboniferous volcanic reservoir in the middle section of the northwestern margin of Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(3): 329-335.

[46] 邵雨，汪仁富，张越迁，等. 准噶尔盆地西北缘走滑构造与油气勘探[J]. 石油学报，2011，32(6)：976-984.
SHAO Yu, WANG Renfu, ZHANG Yueqian, et al. Strike-slip structures and oil-gas exploration in the NW margin of the Junggar

Basin, China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(6): 976-984.

[47] 廖卓庭，王玉净，王克良，等. 新疆北部石炭纪生物地层研究新进展[M]. 北京：科学出版社，1993：79-94.
LIAO Zhuoting, WANG Yujing, WANG Keliang, et al. Recent advances in the biostratigraphy of the Carboniferous in northern Xinjiang[M]. Beijing: Science Press, 1993: 79-94.

[48] 郭丽爽，刘玉琳，王政华，等. 西准噶尔包古图地区地层火山岩锆石LA-ICP-MSU-Pb年代学研究[J]. 岩石学报，2010，26(2)：471-477.
GUO Lishuang, LIU Yulin, WANG Zhenghua, et al. The zircon U-Pb LA-ICP-MS geochronology of volcanic rocks in Baogutu areas, western Junggar[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(2): 471-477.

[49] 李永军，佟丽莉，张兵，等. 论西准噶尔石炭系希贝库拉斯组与包古图组的新老关系[J]. 新疆地质，2010，28(2)：130-136.
LI Yongjun, TONG Lili, ZHANG Bing, et al. On the old and new relationship between Xibeikulasi Formation and Baogutu Formation of the Carboniferous system, west Jaggar[J]. Xinjiang Geology, 2010, 28(2): 130-136.

[50] 纵瑞文，龚一鸣，王国灿. 西准噶尔南部石炭纪地层层序及古地理演化[J]. 地学前缘，2014，21(2)：216-233.
ZONG Ruiwen, GONG Yiming, WANG Guocan. Carboniferous stratal sequence and its palaeogeographical evolution in southern western Junggar, NW China[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(2): 216-233.

[51] 毕力格. 准噶尔盆地西北缘佳木河组岩相古地理分析[D]. 北京：中国地质大学(北京)，2021.
BI Lige. Lithofacies and paleogeography analysis on the northwestern margin of the Junggar Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021.

[52] WANG Wei, TANG Chuanyi, YAO Zongquan, et al. Genesis of late Carboniferous volcanic rocks in the Kebai fault Zone, western Junggar, Xinjiang: constraints from zircon U-Pb age, whole rock geochemistry, and Sr-Nd-Pb isotopes[J]. Petroleum Science, 2026, 23(2): 712-729.

[53] 毛新军，段丰浩，郑孟林，等. 西准噶尔太勒古拉蛇绿构造混杂岩地质特征——兼论"太勒古拉组"的废弃[J]. 新疆地质，2021，39(3)：365-371.
MAO Xinjun, DUAN Fenghao, ZHENG Menglin, et al. Geological characteristics of the Tailegula ophiolitic tectonic melange in west Junggar-Concurrently discussion on the abandonment of "Tailegula Formation"[J]. Xinjiang Geology, 2021, 39(3): 365-371.

[54] 向坤鹏. 准噶尔盆地西北缘白碱滩一带成吉思汗山组的建立及地质意义[D]. 西安：长安大学，2013.
XIANG Kunpeng. The definition of Chengjisihanshan Formation and its significances in Baijiantan region, West Junggar[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.

[55] 董雪梅，李静，潘拓，等. 准噶尔盆地红车断裂带油气成藏条件及勘探潜力[J]. 石油学报，2023，44(5)：748-764.
DONG Xuemei, LI Jing, PAN Tuo, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential of Hongche fault zone in Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(5): 748-764.

[56] 李振明，熊伟，王斌，等. 准噶尔盆地哈山地区二叠系风城组细粒沉积特征与演化模式[J]. 石油实验地质，2023，45(4)：693-704.
LI Zhenming, XIONG Wei, WANG Bin, et al. Fine-grained sedimentary characteristics and evolution model of Permian Fengcheng Formation in Hashan area, Junggar Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(4): 693-704.

[57] 冯允献，唐勇，秦志军，等. 准噶尔盆地玛湖凹陷北斜坡带风城组沉积特征及古环境演化[J]. 石油学报，2025，46(7)：1308-1326.
FENG Yunxian, TANG Yong, QIN Zhijun, et al. Sedimentary characteristics and palaoenvironmental evolution of Fengcheng Formation in the northern slope zone of Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2025, 46(7): 1308-1326.

[58] HUANG Wenbiao, GUO Yibing, QIN Jun, et al. Fluid identification and tight oil layer classification for the southwestern Mahu Sag, Junggar Basin using NMR logging-based spectrum decomposition[J]. Energy Geoscience, 2024, 5(2): 100253.

[59] 郑孟林，王然，唐勇，等. 准噶尔盆地大型地层不整合形成演化与油气聚集[J/OL]. 地学前缘：1-14[2026-05-15]. https://doi. org/10. 13745/j. esf. sf. 2026. 2. 76.
ZHENG Menglin, WANG Ran, TANG Yong, et al. The formation and evolution of large-scale strata unconformity and oil and gas accumulation in the Junggar Basin[J/OL]. Earth Science Frontiers: 1-14[2026-05-15]. https://doi. org/10. 13745/j. esf. sf. 2026. 2. 76.

[60] 王韬，徐倩，李永军，等. 车排子油田南部火山岩地质时代及成因[J]. 新疆石油地质，2022，43(2)：160-168.
WANG Tao, XU Qian, LI Yongjun, et al. Geological age and petrogenesis of volcanic rocks in southern Chepaizi Oilfield[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2022, 43(2): 160-168.

[61] 新疆油田公司百口泉采油厂. 九区-百口泉地区石炭系油气成藏规律研究及有利目标优选[R]. 2015.
Oil Production Plant of Xinjiang Oilfield Company Baikouquan. Petroleum accumulation regularity and favorable target optimization of Carboniferous in Jiuqu-Baikouquan area[R]. 2015.

[62] LUDWIG K R. User's manual for ISOPLOT 3.00: A geochronological toolkit for microsoft excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 2003: 74-81.

[63] 高炎，姚宗全，汤传意，等. 克百断裂带上盘石炭系火山喷发期次划分与火山岩分布规律[J]. 东北石油大学学报，2026，50(1)：1-13.
GAO Yan, YAO Zongquan, TANG Chuanyi, et al. Division of volcanic eruption stages and distribution on the hanging wall of the Carboniferous volcanic rocks in Kebai Fault Zone[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2026, 50(1): 1-13.

[64] HOSKIN P W O, SCHALTEGGER U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003, 53(1): 27-62.

[65] WANG Yamei, YIN Jiyuan, XIAO Wenjiao, et al. Multi-stage differential exhumation of the West Junggar and adjacent regions, NW China, revealed by regional low-temperature thermochronology

[J]. Earth-Science Reviews, 2025, 267: 105154.

[66] 孙羽, 赵春环, 李永军, 等. 西准噶尔包古图地区石炭系希贝库拉斯组碎屑锆石 LA-ICP-MSU-Pb 年代学及其地质意义[J]. 地层学杂志, 2014, 38(1): 42-50.
SUN Yu, ZHAO Chunhuan, LI Yongjun, et al. Detrital zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of the carboniferous Xibeikulasi Formation sandstone in the Baogutu area, western Junggar, and its geological significance[J]. Journal of Stratigraphy, 2014, 38(1): 42-50.

[67] 向坤鹏, 李永军, 李钊, 等. 新疆西准噶尔哈拉阿拉特山火山岩 LA ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及意义[J]. 地质学报, 2015, 89(5): 843-855.
XIANG Kunpeng, LI Yongjun, LI Zhao, et al. LA ICP-MS zircon age and geochemistry of the Aladeyikesai formation volcanic rocks in the Halaalate Mountain of west Junggar, Xinjiang, and their tectonic significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(5): 843-855.

[68] WINCHESTER J A, FLOYD P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. Chemical Geology, 1977, 20: 325-343.

[69] WOOD D A. The application of a ThHfTa diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1980, 50(1): 11-30.

[70] 向坤鹏. 新疆准噶尔盆地西北缘包古图-哈拉阿拉特山一带石炭纪沉积盆地分析及构造意义[D]. 西安: 长安大学, 2015.
XIANG Kunpeng. Carboniferous sedimentary basin analysis and tectonic significance in the Baogutu-Halaalate Mountain, Western Junggar, Xinjiang[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.

[71] 赵昭, 胡志伟, 叶涛, 等. 渤南低凸起变质岩潜山风化壳储层发育特征及控制因素[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2025, 49(6): 30-41.
ZHAO Zhao, HU Zhiwei, YE Tao, et al. Development characteristics and controlling factors of weathering crust reservoirs in metamorphic rock buried hills of Bonan Low Uplift[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2025, 49(6): 30-41.

[72] 康凤新, 隋海波, 李常锁, 等. 岩溶热储古岩溶发育机制与地热水富集模式[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2024, 48(1): 13-24.
KANG Fengxin, SUI Haibo, LI Changsuo, et al. Mechanism and model of paleokarst development in karst geothermal reservoirs[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2024, 48(1): 13-24.

[73] 穆星, 孟涛, 石泉清, 等. 济阳坳陷太古宙基岩储层特征及油气成藏模式[J]. 现代地质, 2025, 39(3): 787-800.
MU Xing, MENG Tao, SHI Quanqing, et al. Archean basement rock reservoir characteristics and hydrocarbon accumulation model in Jiyang Depression[J]. Geoscience, 2025, 39(3): 787-800.

[74] 刘冠伯, 陈世加, 何文军, 等. 准噶尔盆地乌夏断裂带风城1井区油源对比及其地质意义[J]. 石油实验地质, 2025, 47(3): 621-633.
LIU Guanbo, CHEN Shijia, HE Wenjun, et al. Oil and source correlation and its geological significance of Fengcheng 1 well block in Wuxia fault zone, Junggar Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2025, 47(3): 621-633.

[75] 宋涛. 准噶尔盆地乌尔禾地区风城组页岩油成藏特征与"甜点"评价[J]. 特种油气藏, 2025, 32(2): 42-50.
SONG Tao. Accumulation characteristics and "sweet spot" evaluation of shale oil in Fengcheng Formation, Urho District, Junggar Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2025, 32(2): 42-50.

[76] 贾凡建, 王建伟, 郭瑞超, 等. 准噶尔盆地哈山地区风城组页岩含油性评价[J]. 大庆石油地质与开发, 2025, 44(1): 25-34.
JIA Fanjian, WANG Jianwei, GUO Ruichao, et al. Oil-bearing property evaluation of Fengcheng Formation shale in Hashan area of Junggar Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2025, 44(1): 25-34.

(编辑　王　迪)