

# 准噶尔盆地及周缘石炭-二叠纪烃源岩高精度年代地层格架与时空演化

侯章帅<sup>1</sup>, 王向东<sup>1</sup>, 支东明<sup>2,3</sup>, 唐勇<sup>2,3</sup>, 吴琮<sup>4</sup>, 张华<sup>5</sup>, 曹剑<sup>1</sup>, 肖冬生<sup>6</sup>, 付国斌<sup>6</sup>, 郑孟林<sup>3</sup>, 齐雪峰<sup>7</sup>, 蔡焱峰<sup>5</sup>, 冯卓<sup>8</sup>, 张斌<sup>7</sup>, 周川闽<sup>7</sup>, 李莹<sup>1</sup>, 叶训焱<sup>1</sup>, 黄兴<sup>5</sup>, 张书涵<sup>1</sup>, 申博恒<sup>5</sup>, Jahandar RAMEZANI<sup>9</sup>, 张水昌<sup>7</sup>, 沈树忠<sup>1\*</sup>

1. 关键地球物质循环与成矿全国重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院, 关键地球物质循环前沿科学中心, 南京 210023

2. 怀柔实验室新疆研究院, 乌鲁木齐 830000

3. 中国石油新疆油田分公司, 克拉玛依 834000

4. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458

5. 古生物学与油气地层应用重点实验室, 中国科学院南京地质古生物研究所, 南京 210008

6. 中国石油吐哈油田公司, 哈密 839009

7. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

8. 云南大学古生物研究院, 昆明 650500

9. Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, Boston, MA 02139 USA

\* 通讯作者, E-mail: szshen@nju.edu.cn

2025-08-26收稿, 2025-10-28修回, 2025-11-03接受, 2025-12-10网络版发表

国家重点研发计划项目(2024YFF0808100)和国家自然科学基金项目(42293280、42230808)资助

**摘要** 准噶尔盆地及周缘石炭-二叠系发育优质烃源岩, 记录了古亚洲洋闭合的关键信息。因处于海陆转折期, 海相标准化石稀少, 这个时期的年代地层对比存在诸多不确定性, 含油气地层精确对比和盆地演化历史重建面临很大难题。本文对准噶尔盆地西北缘、南缘、东缘, 以及周缘吐哈、三塘湖、伊犁盆地的石炭-二叠系关键剖面 and 钻井岩芯开展了系统的火山灰锆石U-Pb年代学研究。综合运用高精度CA-ID-TIMS、LA-ICPMS和SIMS方法, 获得了53个高质量的同位素绝对年龄数据。精确厘定了多套烃源岩层位的沉积时代: (1) 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组主体沉积于晚石炭世卡西莫夫期(Kasimovian)-二叠纪乌拉尔世早期阿瑟尔期(Asselian); (2) 准噶尔盆地南缘、吐哈盆地和三塘湖盆地的主力烃源岩芦草沟组时代为萨克马尔期(Sakmarian)-亚丁斯克期(Artinskian); (3) 伊犁盆地伊宁凹陷主力烃源岩塔姆其萨依组时代为乌拉尔世空谷期(Kungurian)早期; (4) 准噶尔盆地东部平地泉组的时代可能为乐平世(晚二叠世)吴家坪期(Wuchiapingian)。据此提出晚石炭世卡西莫夫期-乌拉尔世早期阿瑟尔期、萨克马尔期-空谷期和乐平世吴家坪期三个关键烃源岩发育期。新的格架揭示了各区块海陆转换的穿时性, 从西北部(卡西莫夫期)向东部(格舍尔期)逐渐变晚, 为古亚洲洋的“剪刀式”闭合提供了新的年代学证据。本研究建立的研究区新的石炭-二叠纪地层框架, 基本解决了长期存在的地层时代和对比问题, 为中国北疆地区油气勘探部署提供了关键的年代学科学依据。

**关键词** 准噶尔盆地, 石炭纪-二叠纪, 年代地层, 烃源岩, 古亚洲洋

**中文引用格式:** 侯章帅, 王向东, 支东明, 唐勇, 吴琮, 张华, 曹剑, 肖冬生, 付国斌, 郑孟林, 齐雪峰, 蔡焱峰, 冯卓, 张斌, 周川闽, 李莹, 叶训焱, 黄兴, 张书涵, 申博恒, Ramezani J, 张水昌, 沈树忠. 2026. 准噶尔盆地及周缘石炭-二叠纪烃源岩高精度年代地层格架与时空演化. 中国科学: 地球科学, 56(1): 304–328, doi: 10.1360/SSTe-2025-0260

**英文引用格式:** Hou Z, Wang X, Zhi D, Tang Y, Wu Q, Zhang H, Cao J, Xiao D, Fu G, Zheng M, Qi X, Cai Y, Feng Z, Zhang B, Zhou C, Li Y, Ye X, Huang X, Zhang S, Shen B, Ramezani J, Zhang S, Shen S. 2026. High-resolution chronostratigraphic framework and spatiotemporal evolution of Carboniferous-Permian source rocks in the Junggar Basin and its periphery. Science China Earth Sciences, 69(1): 288–312, <https://doi.org/10.1007/s11430-025-1748-3>

# 1 引言

石炭-二叠纪全球发生了一系列重大的地质事件，是古环境、古气候和生物圈演变的关键时期。伴随着全球古大陆格局的重塑，即泛大陆(Pangea)的最终聚合(Torsvik和Cocks, 2016; Scotese, 2021)，区域性重大构造事件频发，如瑞亚克洋的关闭、乌拉尔海槽的闭合、古亚洲洋的关闭、新特提斯洋的开启以及多个地幔柱驱动的大火成岩省(如：塔里木大火成岩省)喷发等(Vai, 2003; Nance等, 2010; 杨树锋等, 2014; Shellnutt, 2014; Han和Zhao, 2018; Song等, 2024)。石炭-二叠纪全球经历了晚古生代大冰期的发育、鼎盛到衰退的完整过程(Montañez等, 2007; Fielding等, 2008, 2023)，古气候的阶段式波动在该时期的沉积物中留下了丰富的地质记录，如气候敏感沉积物以及韵律性沉积等(Rankey, 1997; Tabor和Poulsen, 2008; Richey等, 2020; Marchetti等, 2022)。晚古生代大冰期的演化是地质历史中唯一可与晚新生代大冰期背景下的气候变化进行类比的事件，其深入研究对理解当今气候的波动及预测未来发展趋势具有至关重要的借鉴意义(Frank等, 2015; Richey等, 2020)。

中国北方地区的石炭-二叠系完整记录了古亚洲洋的闭合过程，从哈萨克斯坦到中国西北部、华北北部、东北等广大地区，保存了一系列从海到陆的关键转折期沉积地层(Xiao等, 2008; Wilde, 2015; Niu等, 2018; Zhang等, 2021)，是探讨晚古生代北半球中纬度地区古环境、古气候与生物演化的天然实验室，具有重要的科学研究意义。此外，石炭-二叠系是全球重要的含油气层系之一，广泛发育多套优质烃源岩(Ward等, 1986; Carroll等, 1992; Zou等, 2019; Bastos等, 2021; Mishra等, 2022)，因此，相关研究对解决中国油气资源紧缺的问题具有重要的实际意义。在中国，近年来针对这套层系的勘探连获重大突破，特别是在西北地区，使其成为中国能源勘探与开发的重大战略区域(Zhang等, 2018; Yu等, 2019; 何海清等, 2021; Hu等, 2023; 龚德瑜等, 2024)。

其中，准噶尔盆地已形成石炭-二叠系“全油气系统”的勘探开发新格局(何登发等, 2010; Jia, 2017; 何海清等, 2021; 支东明等, 2021; 贾承造等, 2024; 宋永等, 2024; Tang等, 2024; 朱日祥等, 2025)，其主力烃源岩如风城组、芦草沟组、平地泉组等均产于此时代。盆地东南缘的吉木萨尔凹陷芦草沟组目前是中国西北地区页岩油勘探和开发程度最高的层位，资源量约 $15.8 \times 10^8$ 吨，已建成中国首个百万吨级国家页岩油示范

区；盆地西北部玛湖凹陷的风城组页岩油资源量仅玛北地区已发现 $8.25 \times 10^8$ 吨；盆地东部的五彩湾-石树沟凹陷平地泉组的页岩油资源量约 $3.20 \times 10^8$ 吨(支东明等, 2019)。此外，周缘的吐哈盆地塔尔朗组(Tian等, 2017; 支东明等, 2023)、三塘湖盆地芦草沟组(Hackley等, 2016; 支东明等, 2024)和伊犁盆地塔姆其萨依组(郝继鹏等, 2003; 张林和杜小弟, 2017)等也相继取得重要勘探进展，展现出良好的资源前景。

然而，在重要的科学价值和经济潜力背后，一个基础性的地质难题长期制约着准噶尔地区的理论深入研究和勘探部署：即缺乏一套精确、可靠的高精度年代地层格架。究其原因，由于石炭纪末期该区大规模海退，二叠纪陆相地层中普遍缺乏可用于国际对比的海相标准化石。因此，区域地层时代的确定和对比很大程度依赖于间接方法。其中，应用最广的是孢粉生物地层学，但孢粉组合面貌极易受局部生态环境和气候的影响，大部分时间时限长，穿时现象已被广泛证实(Stephenson, 2018; Wu Q等, 2021)，这极大地限制了其作为精确年代标尺的可应用性。而古地磁学研究同样受限，目前仅在部分地区的局部层段，如准噶尔盆地南缘芦草沟组、东缘将军庙组有零星的地磁极性带报道(Sharps等, 1992; 邓云山等, 1996)，既无法建立连续的极性序列，也难以进行全球对比。这些方法的内在局限性，导致区域地层对比方案存在极大的不确定性。例如，准噶尔盆地内部不同凹陷的主力烃源岩之间，以及准噶尔盆地与其周缘地区的烃源岩层位之间的精确对比关系和时代归属，至今悬而未决。这一问题不解决，就难以准确恢复盆地演化历史，将成为油气勘探的一个瓶颈。

高精度同位素地质年代学，特别是火山灰锆石的化学蚀刻-同位素稀释-热电离质谱法(CA-ID-TIMS)，为直接限定陆相地层的绝对年龄提供了最精确的“时间刻度”。近年来报道的高精度绝对年龄不仅彻底改变了一些区域的地层年代框架，更极大地提升了对深时陆地生态系统和气候演变的理解(Day等, 2015; Gastaldo等, 2015; Griffiths等, 2019; Wu Q等, 2021, 2024)。在研究区，尽管前人已在个别地点获得了零星的高精度年龄，并初步揭示了传统地层划分方案可能存在的显著偏差(Yang等, 2010; Sun等, 2022)，但系统的、涵盖整个北疆地区主要盆地的综合年代学框架至今尚未建立。

本文旨在通过对准噶尔盆地及周缘地区的石炭-二叠纪关键烃源岩和沉积地层，开展系统的火山灰锆石原位(LA-ICPMS, SIMS)与高精度(CA-ID-TIMS)U-Pb年代学研究，致力于实现以下目标：(1) 系统建立古亚洲洋西段石炭-二叠纪高精度综合年代地层对比格架；(2) 基

于此格架,精确厘定各主力烃源岩的沉积时代和时空分布规律;(3)探讨区域构造-沉积演化特征,为解决长期的地层争议和指导油气勘探提供关键的年代学证据。

## 2 地质背景与研究现状

中国新疆地区(主要包括准噶尔、塔里木、吐哈、三塘湖和伊犁盆地)大地构造上位于中亚造山带(CAOB)的西段核心区域,其石炭-二叠纪的构造-沉积记录是解剖古亚洲洋西段最终闭合过程的独特档案(Xiao等, 2008; Fang等, 2019)(图1)。在区域上,石炭纪普遍以大规模的火山活动和海相沉积为特征,为理解古亚洲洋西段的俯冲、碰撞、洋盆关闭以及后碰撞期的地壳伸展和盆地转型提供了关键信息(Carroll等, 1995; Han等, 2010; Wali等, 2018)。该时期形成的双峰式火山岩,如准噶尔盆地南缘的柳树沟组、东缘的巴塔玛依内山组以及伊犁盆地的火山岩层系,其年代学和地球化学研究已被广泛应用于探讨后碰撞伸展期的动力学背景(Chen等, 2011; Yin等, 2013; Zhang等, 2013; Luo等, 2017; Han等, 2019; Wang等, 2020)。尽管大量研究将这些火山活动

的时代大致约束在宾夕法尼亚亚纪早期(晚石炭世早期)(Luo等, 2017; Du等, 2018; He等, 2018; 唐勇等, 2022),但由于缺乏高精度的年代学数据链,关于古亚洲洋西段的最终闭合模式(如“剪刀式”闭合还是东西部同时闭合)至今存在较大争议(Han和Zhao, 2018; Song等, 2024)。

进入二叠纪,随着海退和陆内伸展作用的持续,研究区形成了一系列相对独立的陆相生烃凹陷(唐勇等, 2022),发育多套优质烃源岩(曹剑等, 2015; 邱振等, 2017; 支东明等, 2019; 王越等, 2021; 崔炳富等, 2024; 曾治平等, 2024),也是当前重要的全油气系统勘探目的层(贾承造等, 2024; Tang等, 2024)。

### 2.1 准噶尔盆地

准噶尔盆地是研究区内规模最大、勘探开发程度最高的叠合盆地。其石炭纪地层以海相沉积夹多期次火山岩为主,部分层位因产出蜓、珊瑚、有孔虫等海相化石(赵治信等, 1986; 朱荣, 1986; 朱荣和林甲兴, 1987; 王成文和杨式溥, 1998; Alexeiev等, 2019)或发育可测

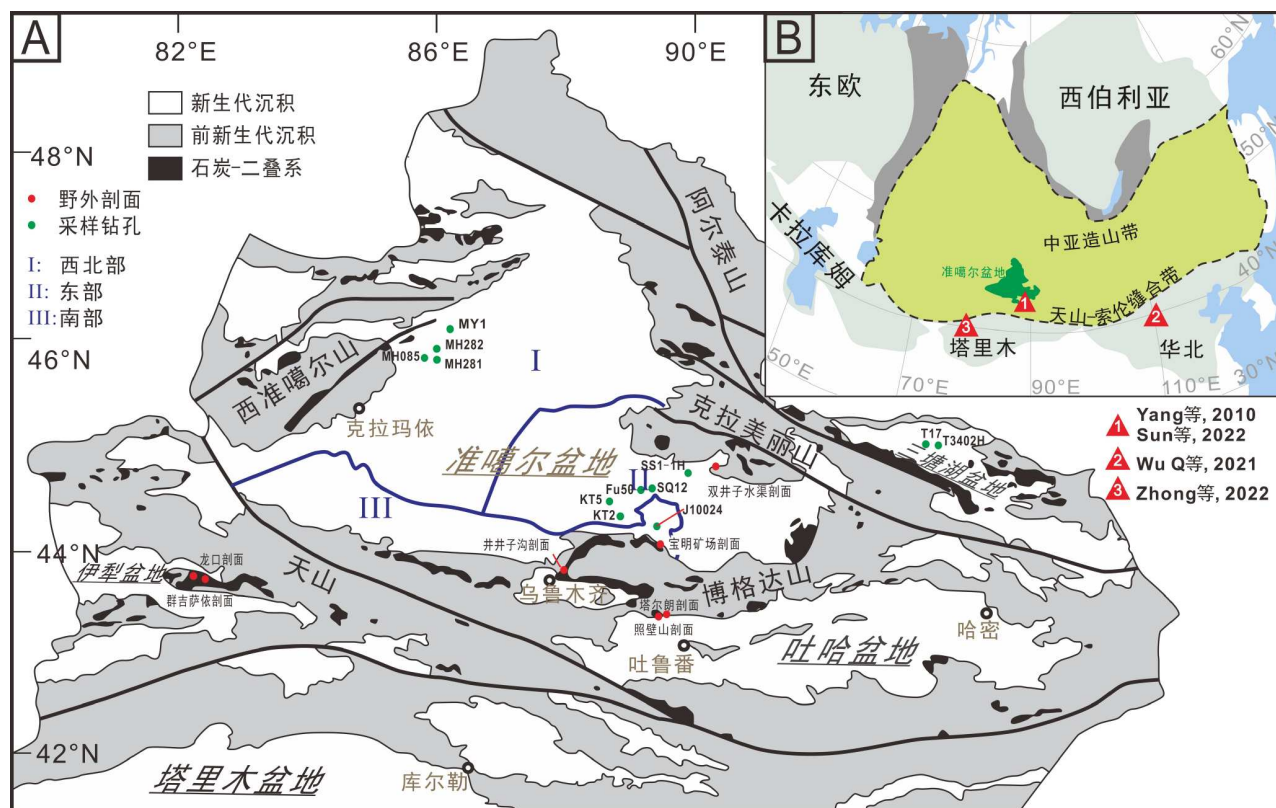


图1 研究区地质简图与采样点分布。(A) 准噶尔盆地及周缘盆地(吐哈、伊犁、三塘湖)地质简图,展示了本文研究的所有野外剖面 and 钻井岩芯的位置。准噶尔盆地内部根据沉积特征划分为西北缘、南缘和东缘三个地层分区(唐勇等, 2022)。(B) 中亚造山带(CAOB)大地构造简图,展示了研究区相对于塔里木和华北克拉通的构造位置。图中数字指示了近年来已发表石炭-二叠纪高精度年龄的关键地区,为本文研究提供了区域对比背景。1. 博格达山周缘地区(Yang等, 2010; Sun等, 2022); 2. 华北北缘(Wu Q等, 2021); 3. 塔里木盆地(Zhong等, 2022)

年的火山岩(Su等, 2010; Geng等, 2011; Xiao等, 2011; Xie等, 2016; Wali等, 2018), 其时代归属有一定的依据(如祁家沟组、巴塔玛依内山组等), 可以大致约束各岩石地层单元的形成时代(唐勇等, 2022; Tang等, 2023)。然而, 到二叠纪全面进入陆相沉积环境, 用于精确地层对比的海相标准化石缺失, 地层对比难题凸显。

在过去的几十年中, 准噶尔盆地二叠纪地层的划分与对比主要依赖于零星的植物大化石(窦亚伟和孙喆华, 1984)和一套基于孢粉化石建立的生物组合带序列(欧阳舒等, 2004)。然而, 孢粉组合极易受区域生态环境和气候的控制, 时间延限长, 在不同地区间的穿时是学界共识(Stephenson, 2018), 难以进行远距离、高精度地层对比。与此同时, 其他定年方法也未能提供有效支撑。例如, 古地磁研究在该区十分薄弱, 仅在南缘和东缘的部分层位有零星的极性带报道, 而且也缺乏精确的时间锚点(Sharps等, 1992; Nie等, 1993; Choulet等, 2011)。这些古地磁报道大多是碎片化数据, 目前还无法建立连续的区域磁性地层框架, 难以与国际标准地磁极性年表(GPTS)进行有效对比。目前, 正是高精度定年方法和数据的缺失, 导致盆地内部不同构造单元之间的地层对比存在多种方案且缺乏共识。

### 2.1.1 盆地南缘(博格达山周缘)

准噶尔盆地南缘(博格达山北麓)因露头良好, 被视为区域石炭-二叠系研究的“经典地区”。传统观点基于陆相生物化石组合(双壳类、介形类、植物以及孢粉组合等)长期将该区的芦草沟组归为瓜德鲁普统(Guadalupian, 中二叠统)(金玉环等, 2000; 欧阳舒等, 2004), 被广泛沿用至今(Qiu等, 2016; Luo等, 2018; 张奎华等, 2020; 王越等, 2022; 甄宇等, 2024)(图2)。然而, 这一归属与近年来高精度年代学的结果不符。Yang等(2010)报道了吐哈盆地(博格达山南麓)红雁池组顶部的高精度火山灰锆石年龄( $281.39 \pm 0.10$  Ma), 间接指示其下伏的芦草沟组时代早于空谷期(早二叠世)。近期, Sun等(2022)直接获得了南缘芦草沟组顶部附近的高精度火山灰年龄( $286.39 \pm 0.25$  Ma)。这两个精确的时间锚点, 将芦草沟组上段的时代限定于乌拉尔世亚丁斯克期, 比传统认识早了近15–20个百万年。但因新数据相对较少, 这一时代归属新认识仍未被广泛接受, 有待于其他剖面研究结果证实, 导致了区域地层认识的显著不确定性。

### 2.1.2 盆地西北缘(玛湖凹陷)

西北缘是准噶尔盆地当前油气勘探的主要区域, 其

中风城组是目前中石油新疆油田公司在玛湖凹陷、盆1井西凹陷和沙湾凹陷的主力烃源岩层位(张元元等, 2021; 钱永新等, 2022; 殷树铮等, 2024), 下乌尔禾组也展现出较好的烃源岩潜力(曾治平等, 2024), 是未来潜在的勘探突破方向。由于露头剖面的稀缺, 该区的石炭-二叠系研究主要基于大量的石油勘探钻孔、岩芯材料, 根据孢粉生物组合研究(王蕙, 1984; 张璐瑾, 2003; 师天明等, 2022)与盆地南缘建立的经典序列(欧阳舒等, 2004)进行对比, 将佳木河组和风城组归为乌拉尔统(Cisuralian, 下二叠统), 夏子街组和下乌尔禾组归为瓜德鲁普统, 上乌尔禾组归为乐平统(Lopingian, 上二叠统)(图2)(殷树铮等, 2024)。这种对比方案将研究区地层框架主要依托在南缘的孢粉组合之上。然而, 博格达山地区的芦草沟组和红雁池组的高精度年龄已经证实了它们的时代实际上要比传统方案更早。因此, 如果孢粉生物组合的横向对比可靠, 准噶尔盆地西北缘的石炭-二叠系时代归属也需要大幅修改。然而, 一方面准噶尔盆地西北缘的石炭-二叠系目前还没有高精度的绝对年龄约束; 另一方面, 盆地南缘的高精度年龄数据目前尚未得到广泛应用。因此, 目前学界仍沿用长期以来的传统地层划分与对比框架, 这给该区万亿方级油气资源的精细勘探带来了明显的不确定性。

### 2.1.3 盆地东缘(石钱滩凹陷)

准噶尔盆地东缘的石炭-二叠系研究主要集中于克拉美丽山南缘露头区及石钱滩凹陷的井下岩芯, 包括以火山岩为主的巴塔玛依内山组和转变为浅海相沉积的石钱滩组, 之后转变为陆地沉积环境的六棵树组, 形成了将军庙组、平地泉组和梧桐沟组的河流-湖泊沉积体系(唐勇等, 2022)。石钱滩凹陷的石钱滩组和平地泉组目前均认为有较大的烃源岩潜力(王越等, 2021; Chen等, 2024; 崔炳富等, 2024), 特别是平地泉组已经开展了大量油气勘探、开发工作(关键等, 2011; 王越等, 2021; 张志杰等, 2021), 并被广泛认为可以和南缘的芦草沟组、红雁池组进行对比(张义杰等, 1992)(图2)。对比主要依据岩性特征和孢粉组合, 除了时代较早的火山岩外, 真正关键的二叠纪陆相烃源岩层位(平地泉组)迄今没有高精度年龄数据约束。

## 2.2 准噶尔盆地周缘地区

相较于准噶尔盆地, 周缘的吐哈、三塘湖、伊犁等盆地的石炭-二叠纪地层研究更为薄弱, 年代框架的不确定性也更大。吐哈盆地的烃源岩主要集中于盆地北缘的博格达型沉积区, 沿博格达山脉出露较好的石炭-二叠纪

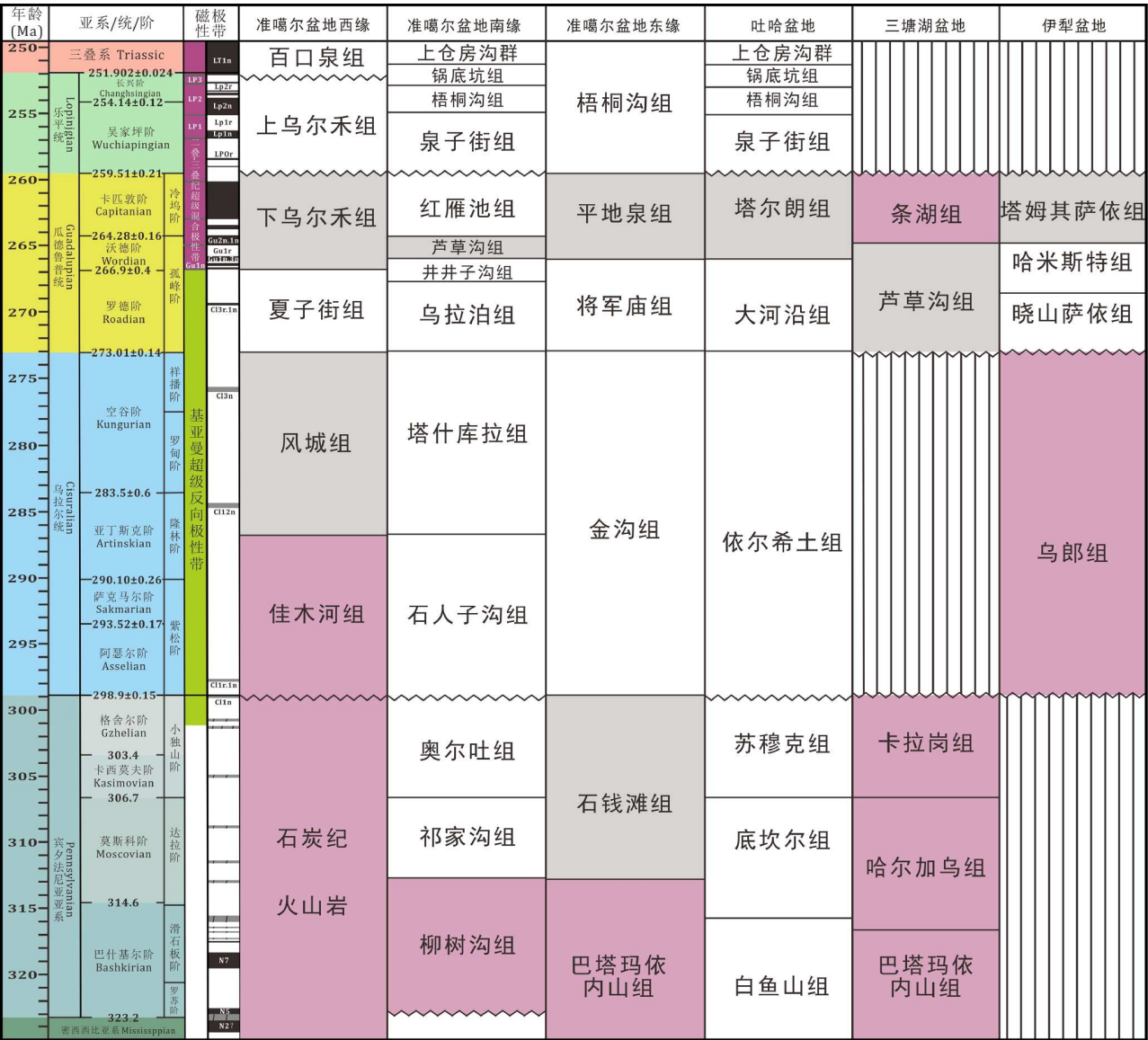


图2 准噶尔盆地及周缘地区目前广泛采用的石炭-二叠纪年代地层对比框架。左侧国际石炭-二叠纪年代地层框架据沈树忠等(2019)和王向东等(2019)。各地区年代地层划分据宋博等(2018)、殷树铮等(2024)和甄宇等(2024)修改。粉紫色背景指示火山岩为主的地层单元,浅灰色代表烃源岩层系

地层,如照壁山剖面、桃东沟剖面、塔尔朗沟剖面等(Yang等,2010,2021)。目前在这些剖面中开展了大量关于二叠纪末生物大灭绝期间陆地生态系统响应的研究(Angielczyk等,2022;Peng等,2025),并且在乐平世-早三叠世过渡期建立了高精度同位素年代地层学框架(Yang等,2021)。吐哈盆地的主力烃源岩层位塔尔朗组(亦有学者称其为芦草沟组)因沉积序列和岩性特征与准噶尔盆地南缘的芦草沟组相似,被认为可与之对比(Tian等,2017),但仍缺少直接的高精度年龄证据。

三塘湖盆地的石炭-二叠系包括以火山岩为主的石炭系哈尔加乌组、卡拉岗组和以陆相为主的二叠系芦草沟

组以及条湖组玄武岩(支东明等,2024),其中火山岩和陆相地层之间发育一个较大的不整合面,但这些层位的年代目前尚不清楚。尹凤娟等(2002)报道了三塘湖盆地钻井岩芯中的芦草沟组孢粉化石,认为与准噶尔盆地南缘的芦草沟组相似,特别是也发现了典型的陆生脊椎动物吐鲁番鳕鱼化石(*Turfania taoshuyuanensis*)。这种对比方案主要依据生物群和岩石学的相似性,尚缺乏关键的绝对年龄约束。

伊犁盆地的石炭-二叠系记录了从火山岩到陆相沉积的转变,大量关于石炭纪火山岩的研究揭示了古亚洲洋关闭过程中的构造-岩浆作用(Wang等,2007;Li等,

2015; Zhao等, 2023)。沉积地层的时代归属主要依靠孢粉化石组合研究(崔智林等, 1996)。其中, 主力烃源岩层位塔姆其萨依组的孢粉组合*Cordaitina-Crucisaccites-Protohaploxypinus*与准噶尔盆地的芦苇沟组相似, 暗示了两者相似的时代归属(郝继鹏等, 2003; 谢其锋等, 2014; 张林和杜小弟, 2017)。然而, 这种基于孢粉组合的远距离对比需要其他证据验证, 至今未得到绝对年代学的支持, 与准噶尔、吐哈盆地主力烃源岩的真实关系实际也并不清楚。

### 3 样品与实验方法

#### 3.1 样品采集与筛选

为精确限定中国西北地区准噶尔盆地及其周缘石炭-二叠纪关键烃源岩层位的沉积时代, 并建立区域高精度陆相年代地层对比框架, 笔者团队过去五年开展了系统的野外地质勘察与钻井岩芯观察取样工作。野外工作共计调查剖面25条, 结合岩芯观察22口井(总长逾3000米), 系统采集了火山灰及凝灰质岩石样品300余件(图1, 图3)。采样范围覆盖了准噶尔盆地西北缘、东缘和南缘的石炭-二叠纪主要沉积序列, 以及吐哈盆地北缘、三塘湖盆地和伊犁盆地的同期关键烃源岩层系(图1)。

在确保关键层位烃源岩定年精度的同时, 兼顾考虑了区域样品的覆盖广度与测试成本, 据此采取了多方法、分层次的分析策略。首先对全部样品进行锆石单矿物分选, 筛选出锆石自形程度最高的优质火山灰样品。在此基础上, 结合样品在地层序列中的重要性, 最终选取53件样品开展了系统的锆石U-Pb年代学研究, 其中包括39件样品采用LA-ICPMS方法进行快速筛选与对比, 6件样品采用SIMS方法进行高精度原位分析, 8件关键层位的样品采用最高精度的CA-ID-TIMS方法进行测试, 以期在整个年代地层框架提供关键的年龄锚点。

#### 3.2 实验流程与分析方法

##### 3.2.1 锆石分选与制靶

所有样品经过标准的重、磁选方法进行单矿物分离, 获得样品中的锆石颗粒。随后, 在双目体视显微镜下, 依据晶型、颜色、透明度和磨圆度等特征, 挑选出可能代表火山爆发成因的锆石颗粒。对于原位分析(LA-ICPMS和SIMS), 优先挑选晶型完好(呈双锥状、棱角锐利)、无色透明、无裂隙和包裹体的锆石颗粒, 将其固定于环氧树脂靶上并抛光至露出锆石截面。分析前, 对所有锆石靶进行了详细的透、反射光和阴极发光

(CL)图像分析, 以揭示锆石的内部结构(如岩浆成因的振荡环带、继承性核等), 为选择最佳的测试点位提供依据。

##### 3.2.2 U-Pb同位素年代学分析

CA-ID-TIMS分析: 用于CA-ID-TIMS分析的锆石样品预处理采用了标准的化学溶蚀(CA)流程, 该流程包括高温退火和部分溶蚀, 之后加入ET535稀释剂(Condon等, 2015; McLean等, 2015)并使样品完全溶解。在进行同位素测量之前, 采用阴离子交换柱化学法对U和Pb进行分离纯化。同位素比值测量在美国麻省理工学院(MIT)同位素实验室(Isotope Laboratory)的Isotopx X62多接收热电离质谱仪(TIMs)上进行, 该仪器配备了Daly光电倍增离子计数系统。详细的实验流程与Ramezani等(2022)中描述的一致。

LA-ICPMS分析: 在南京宏创的Agilent 7900型ICP-MS及与之配套的Resolution SE型193 nm激光剥蚀系统上完成。激光束斑直径为30  $\mu\text{m}$ 。详细仪器参数和操作流程见Thompson等(2018)。实验采用锆石标样91500进行同位素分馏校正, 并使用锆石GJ-1作为监控标样。测试过程中获得的GJ-1的加权平均年龄为 $601.8 \pm 0.4 \text{ Ma}$  ( $2\sigma$ ,  $n=284$ ,  $\text{MSWD}=1.5$ ), 与推荐值在误差范围内一致(Schoene等, 2006; Horstwood等, 2016)。

SIMS分析: 在南京大学关键地球物质循环与成矿全国重点实验室的Cameca IMS-1300 HR<sup>3</sup>型二次离子质谱仪(SIMS)上进行。详细分析流程参考Li等(2009)。U-Pb同位素比值利用锆石标样Plesovice( $\sim 337 \text{ Ma}$ )进行校正, 并使用标准锆石Qinghu作为监控标样。实验过程中测定的Qinghu加权平均年龄为 $159.5 \pm 0.8 \text{ Ma}$  ( $2\sigma$ ,  $n=21$ ,  $\text{MSWD}=0.5$ ), 与推荐值(李献华等, 2013)吻合。普通Pb用测量的<sup>204</sup>Pb进行校正。

##### 3.2.3 数据处理与年龄解释

CA-ID-TIMS测试数据采用Tripoli和U-Pb\_Redux软件(Bowring等, 2011; McLean等, 2011)进行数据处理、年龄计算和误差传递。采用最年轻年龄组的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U加权平均年龄作为火山灰的沉积年龄, 以 $\pm X/Y/Z(2\sigma)$ 的形式表述, 其中X仅包含内部分析误差, Y包括X和稀释剂的误差, Z则是在Y的基础上包含了铀衰变常数不确定性(Jaffey等, 1971)的最终误差。

LA-ICPMS测试结果采用Iolite程序(Paton等, 2010)进行原始数据处理, SIMS测试结果使用设备内置的数据处理软件进行原始数据处理, 两者均使用Vermeesch(2018)提供的IsoplotR在线工具成图并计算样品的谐和年

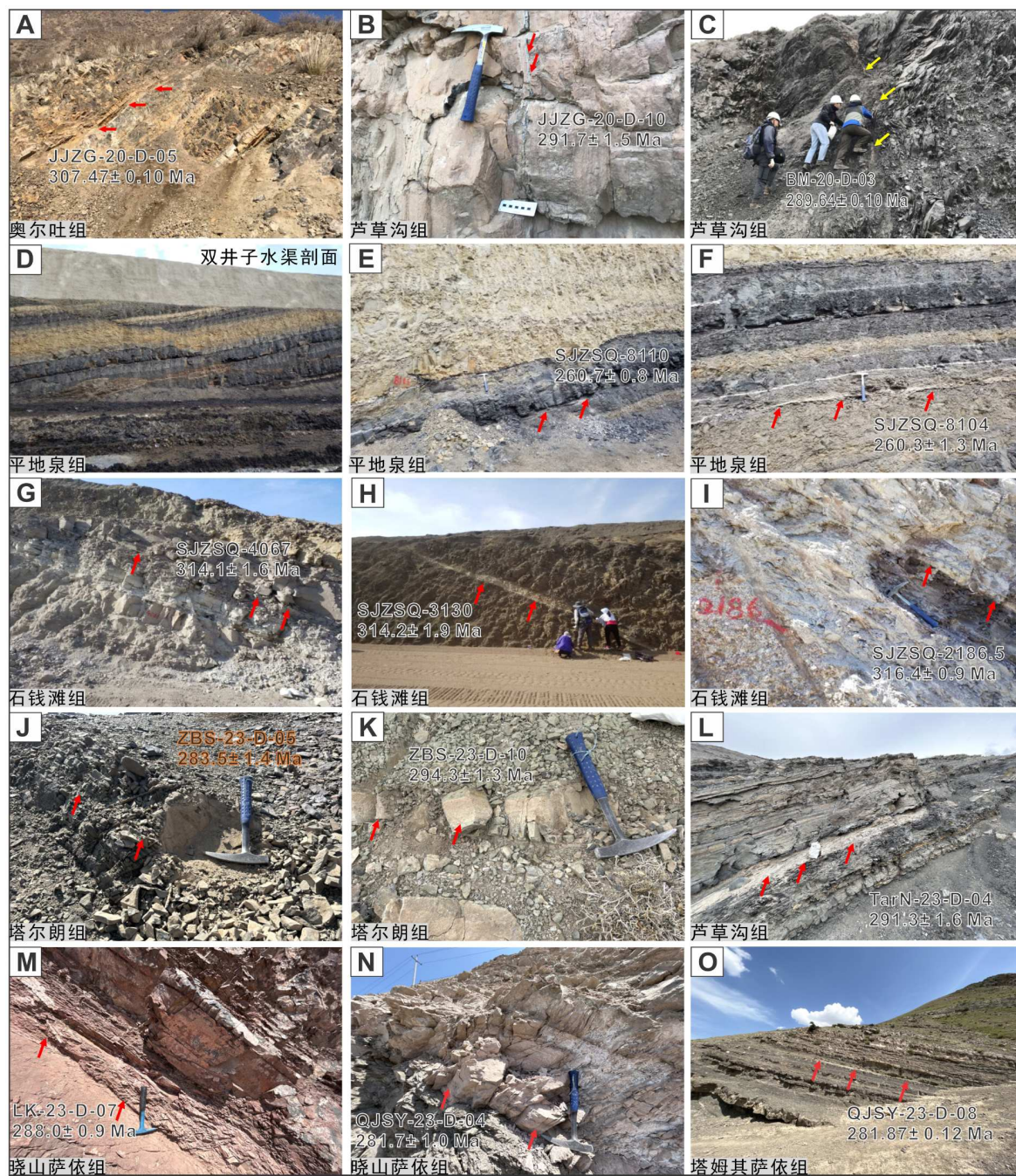


图3 准噶尔盆地及周缘石炭-二叠纪典型火山灰样品野外照片。(A) 井井子沟剖面奥尔吐组下部;(B) 井井子沟剖面芦草沟组;(C) 宝明矿场剖面芦草沟组;(D, F) 双井子水渠剖面平地泉组;(G-I) 双井子水渠剖面石钱滩组;(J, K) 照壁山剖面塔朗组;(L) 塔朗剖面芦草沟组;(M) 龙口剖面晓山萨依组;(N) 群吉萨依剖面晓山萨依组;(O) 群吉萨依剖面塔姆其萨依组

龄值以及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄值(误差统一为 $2\sigma$ 绝对值)。对于测试结果包含多个年龄组的样品,可能存在早期再沉积的碎屑锆石颗粒,每个样品的年龄报道中采用最年轻的误差范围内一致的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值作为其最大沉积年龄,并报道95%置信度的绝对误差。对于锆石形态一致、CL图像特征相似的样品,尽管有时

测得的年龄比较离散,本文仍计算所有测试结果的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均年龄值,过度离散的分析结果可能是测试方法的不准确性导致,仍采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值作为其沉积年龄,并报道95%置信度的绝对误差(包括仅计算的误差和过度离散误差,以 $\pm A/B(2\sigma)$ 的形式表述)。

## 4 年代学结果

本研究共获得53个高质量的U-Pb同位素年龄数据, 其中LA-ICPMS年龄39个, SIMS年龄6个, CA-ID-TIMS高精度年龄8个, 详细的样品描述与年龄解释见网络版补充材料(图4-8)。

### 4.1 准噶尔盆地南缘(博格达山周缘及凹陷内部)

本区样品采自博格达山北麓的露头剖面(井井子沟剖面、宝明矿场剖面)以及阜康凹陷(Fu50井、KT2井和KT5井)、吉木萨尔凹陷(J10024井)的钻井岩芯(图1), 主要目标层位为芦苇沟组, 同时在奥尔吐组、塔什库拉组和井井子沟组中也获得了高质量的年龄数据。

奥尔吐组: 井井子沟剖面奥尔吐组下部的火山灰样品(JJZG-20-D-05), 经CA-ID-TIMS法测试, 获得其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $307.47\pm0.10/0.17/0.37\text{ Ma}$  ( $n=4$ , MSWD=0.74)(图8, 表1)。

塔什库拉组: 井井子沟剖面塔什库拉组的火山灰样品(JJZG-24-D-04), 经LA-ICPMS法测试, 获得年龄为 $302.9\pm0.8\text{ Ma}$  ( $n=21$ , MSWD=0.54)(图4K)。

井井子沟组: 井井子沟剖面井井子沟组下部的样品(JJZG-24-D-2887m), 经LA-ICPMS法测试, 获得年龄为 $298.4\pm1.2\text{ Ma}$  ( $n=16$ , MSWD=0.73)(图4L)。

芦苇沟组: 井井子沟剖面芦苇沟组上段下部的火山灰样品(JJZG-2020-D-10)的LA-ICPMS年龄测试结果为 $291.7\pm1.5/3.7\text{ Ma}$  ( $n=7$ , MSWD=5.9)(图4I); 宝明矿场剖面芦苇沟组上甜点段下部的样品(BM-2020-D-03)的LA-ICPMS年龄测试结果为 $290.7\pm0.9/2.1\text{ Ma}$  ( $n=23$ , MSWD=5)(图4J), 该样品经进一步CA-ID-TIMS法测试, 获得高精度年龄为 $289.64\pm0.10/0.16/0.35\text{ Ma}$  ( $n=6$ , MSWD=0.40)(图8, 表1)。阜康凹陷Fu50井芦苇沟组上部两个样品的SIMS年龄分别为 $290.6\pm1.5\text{ Ma}$  ( $n=19$ , MSWD=1.5)和 $293.2\pm2.2\text{ Ma}$  ( $n=18$ , MSWD=2)(图4C, 4D)。吉木萨尔凹陷J10024井中, 芦苇沟组一段中下部和二段中部的SIMS年龄分别为 $292.3\pm1.9\text{ Ma}$  ( $n=13$ , MSWD=1.5)和 $286.8\pm1.9\text{ Ma}$  ( $n=13$ , MSWD=0.84)(图4A, 4B)。阜康凹陷KT2井被划为“芦苇沟组”的岩芯中, 两个样品的LA-ICPMS年龄分别为 $305.4\pm2.3/3.7\text{ Ma}$  ( $n=10$ , MSWD=2.9)和 $305.7\pm2.2\text{ Ma}$  ( $n=11$ , MSWD=1.4)(图4E, 4F)。阜康凹陷KT5井被划为“芦苇沟组”的岩芯中, 两个样品的SIMS年龄分别为 $317.0\pm1.5\text{ Ma}$  ( $n=25$ , MSWD=0.8)和 $315.4\pm1.5\text{ Ma}$  ( $n=28$ , MSWD=1.3)(图4G, 4H)。

### 4.2 准噶尔盆地西北缘(玛湖凹陷)

本区样品全部来自玛湖凹陷的钻井岩芯(图1), 主要

目标层位为风城组。

MY1井风城组一段中下部的2个火山灰样品(MY1-20-122-127、MY1-21-47-175)的LA-ICPMS年龄结果分别是 $298.1\pm1.0/1.7\text{ Ma}$  ( $n=22$ , MSWD=2.8),  $303.0\pm2.8\text{ Ma}$  ( $n=24$ , MSWD=11, 离散度 $2.2\pm0.7\%$ )(图5A, 5B), 其中前者经进一步的CA-ID-TIMS法测试, 获得高精度年龄为 $306.85\pm0.15/0.21/0.39\text{ Ma}$  ( $n=3$ , MSWD=1.9), 两者之间巨大的差异可能反映了后期铅丢失和原位测试方法准确性的共同影响(图8, 表1)。MH085井风城组一段自下而上3个样品的LA-ICPMS年龄分别为 $307.0\pm3.1\text{ Ma}$  ( $n=6$ , MSWD=1.2)、 $307.2\pm2.1\text{ Ma}$  ( $n=10$ , MSWD=1.1)和 $308.1\pm1.8\text{ Ma}$  ( $n=14$ , MSWD=0.8)(图5C-5E); 其风城组二段中部的年龄为 $304.3\pm1.1\text{ Ma}$  ( $n=14$ , MSWD=1.1)(图5F)。MH281井和MH282井风城组二段的三个样品, 按层位由下至上获得的LA-ICPMS年龄分别为 $312.2\pm2.6\text{ Ma}$  ( $n=10$ , MSWD=0.87)、 $313.8\pm3.2\text{ Ma}$  ( $n=7$ , MSWD=0.64)和 $311.3\pm2.2\text{ Ma}$  ( $n=13$ , MSWD=1.1)(图5G-5I)。

### 4.3 准噶尔盆地东缘(克拉美丽山南麓)

本区样品主要采自双井子水渠剖面(图9)和石树沟凹陷的钻井岩芯(图1)。

巴塔玛依内山组: SQ12井巴塔玛依内山组顶部火山岩样品(SQ-12-2019-D-BS)的LA-ICPMS年龄为 $321.8\pm1.1/2.2\text{ Ma}$  ( $n=44$ , MSWD=4.1)(图6K)。

石钱滩组: 双井子水渠剖面中自下而上获得的6个LA-ICPMS年龄分别为 $316.4\pm0.9\text{ Ma}$  ( $n=21$ , MSWD=0.1)、 $314.7\pm3.4\text{ Ma}$  ( $n=10$ , MSWD=7.9, 离散度 $1.59\pm0.83\%$ )、 $314.2\pm1.9\text{ Ma}$  ( $n=9$ , MSWD=1.9)、 $314.1\pm1.6\text{ Ma}$  ( $n=10$ , MSWD=0.93)、 $314.0\pm2.0\text{ Ma}$  ( $n=15$ , MSWD=1.2)和 $313.4\pm1.4\text{ Ma}$  ( $n=12$ , MSWD=0.71)(图6A-6F, 图9)。

六棵树组: 中部样品的LA-ICPMS年龄为 $304.7\pm1.7\text{ Ma}$  ( $n=7$ , MSWD=0.71)(图6G, 图9)。层位稍低的火山灰样品(SJZSQ-2021-D-6434)的高精度CA-ID-TIMS年龄为 $301.96\pm0.20/0.24/0.40\text{ Ma}$  ( $n=3$ , MSWD=0.49)(图8, 图9, 表1)。

平地泉组: 在双井子水渠剖面中, 被传统划分为平地泉组或梧桐沟组下部的富煤岩性段内, 获得了5个高度一致的年龄(图9), 包括3个LA-ICPMS年龄 $260.3\pm1.3\text{ Ma}$  ( $n=8$ , MSWD=0.11)、 $260.7\pm0.8\text{ Ma}$  ( $n=34$ , MSWD=0.7)和 $259.5\pm0.8\text{ Ma}$  ( $n=30$ , MSWD=1)(图6H-6J); 两个CA-ID-TIMS高精度年龄 $258.01\pm0.13/$

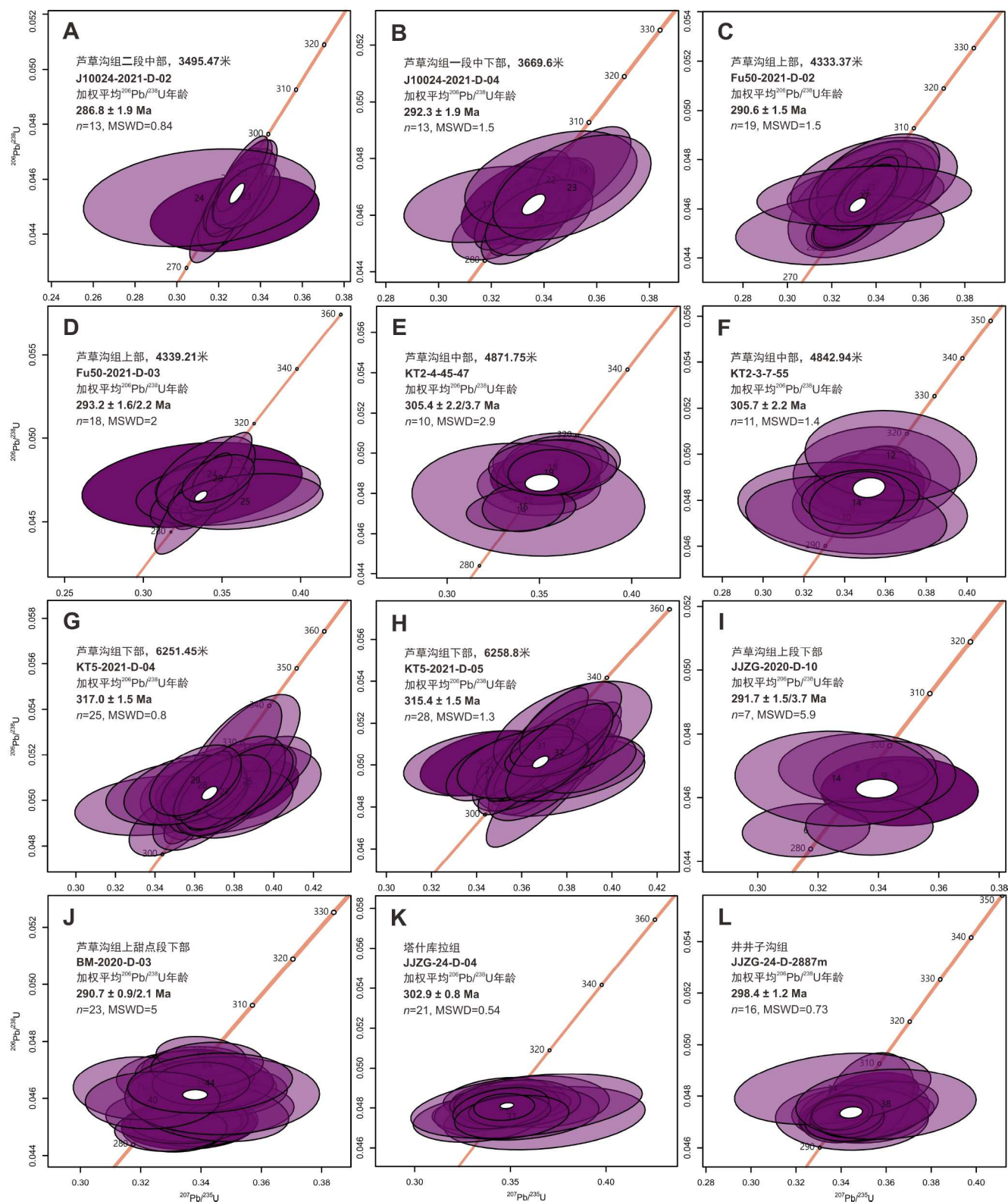


图4 准噶尔盆地南缘石炭-二叠系代表性定年样品铅石U-Pb年龄谱和图和加权平均年龄。J10024、Fu50和KT5井样品采用SIMS方法测试, 其他样品采用LA-ICPMS方法测试。每个样品最年轻峰值年龄群的加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄被解释为对应样品的沉积年龄。所有数据点的误差椭圆均为 $2\sigma$

0.18/0.33 Ma和 $255.906 \pm 0.082/0.11/0.29 \text{ Ma}$ (图8, 表1), 时代均指向乐平世吴家坪期。石树沟凹陷SH1-1H井平地

泉组二段下部的火山灰, 其LA-ICPMS年龄为 $261.0 \pm 1.6 \text{ Ma}$ ( $n=6$ , MSWD=0.92)(图6L)。

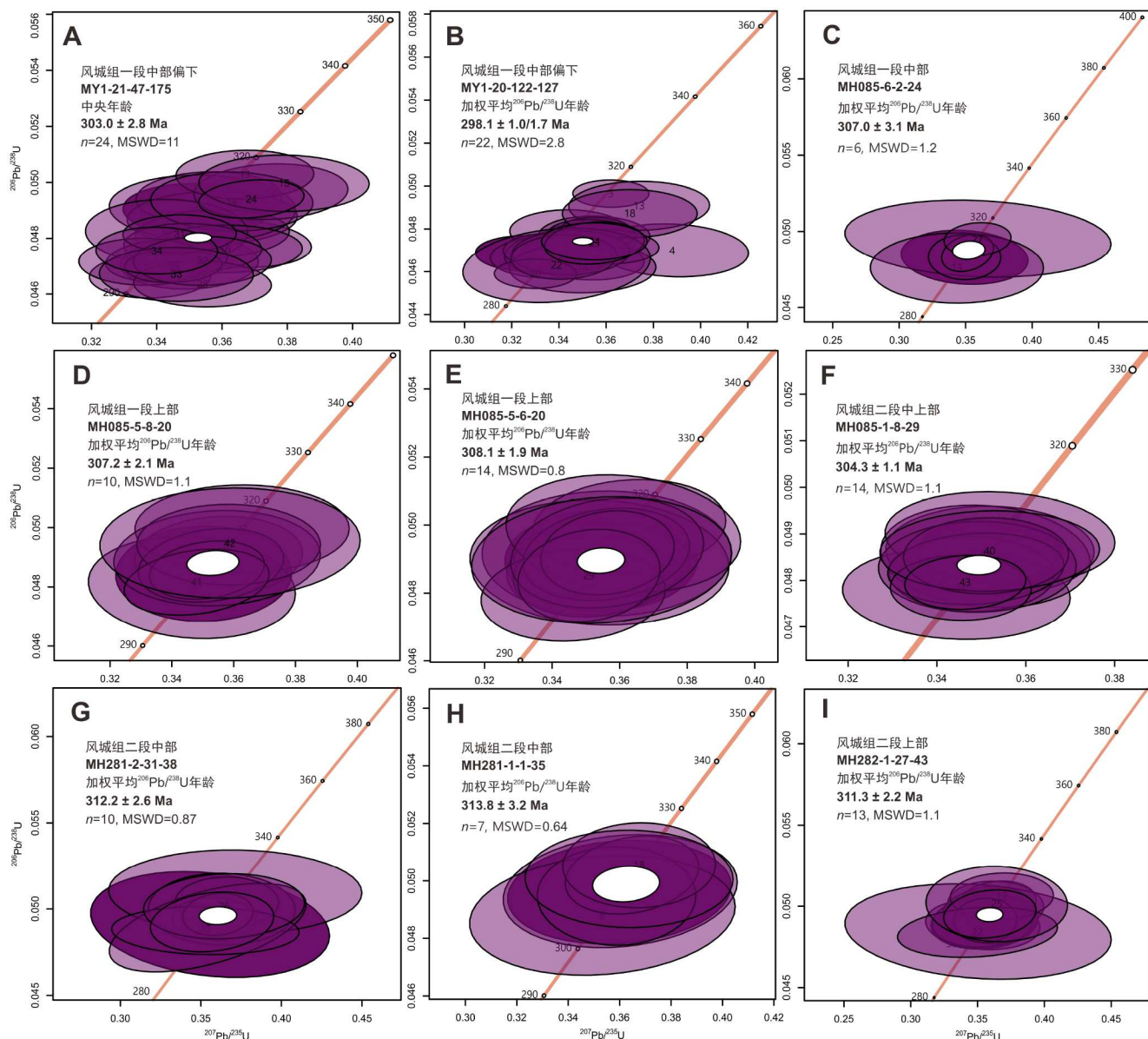


图5 准噶尔盆地西北缘风城组代表性火山灰样品铅铀-Pb年龄谐和图和加权平均年龄。所有样品采用LA-ICPMS方法测试。每个样品最年轻峰值年龄群的加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄被解释为对应样品的沉积年龄。所有数据点的误差椭圆均为 $2\sigma$

#### 4.4 盆地边缘地区

吐哈盆地：照壁山剖面(图10)依尔希土组底部的LA-ICPMS年龄为 $308.5 \pm 1.3$  Ma ( $n=9$ , MSWD=0.5)(图7G)；塔尔朗组底部和顶部的LA-ICPMS年龄分别为 $294.3 \pm 1.3$  Ma ( $n=9$ , MSWD=1.5)和 $283.5 \pm 1.4/2.2$  Ma ( $n=6$ , MSWD=2.5)(图7H, 7I)。塔尔朗沟剖面(图10)大河沿组玄武岩内夹层凝灰岩的高精度CA-ID-TIMS年龄为 $301.29 \pm 0.15$  Ma ( $n=2$ )(图8, 表1)，芦苇沟组中部的LA-ICPMS年龄为 $291.3 \pm 1.6$  Ma ( $n=10$ , MSWD=1.5)(图7J)。

三塘湖盆地：样品主要来自岩芯，其中T17井的卡拉岗组火山岩样品的LA-ICPMS年龄为 $320.3 \pm 1.0/1.5$  Ma ( $n=17$ , MSWD=2.2)(图7K)；T3402H井的芦苇沟组火山灰样品的LA-ICPMS年龄为 $288.8 \pm 0.9$  Ma ( $n=17$ , MSWD=1)(图7L)。

伊犁盆地：该区样品主要来自龙口剖面 and 群吉萨依剖面(图1)，自下而上获得6个LA-ICPMS年龄和1个高精度CA-ID-TIMS年龄(图10)。乌郎组中上部火山岩年龄为 $299.9 \pm 0.9/1.3$  Ma ( $n=20$ , MSWD=2)(图7A)；晓山萨依组自下而上获得的3个LA-ICPMS年龄分别为 $296.8 \pm 1.7$  Ma ( $n=5$ , MSWD=0.94)、 $288.0 \pm 0.9$  Ma ( $n=13$ ,

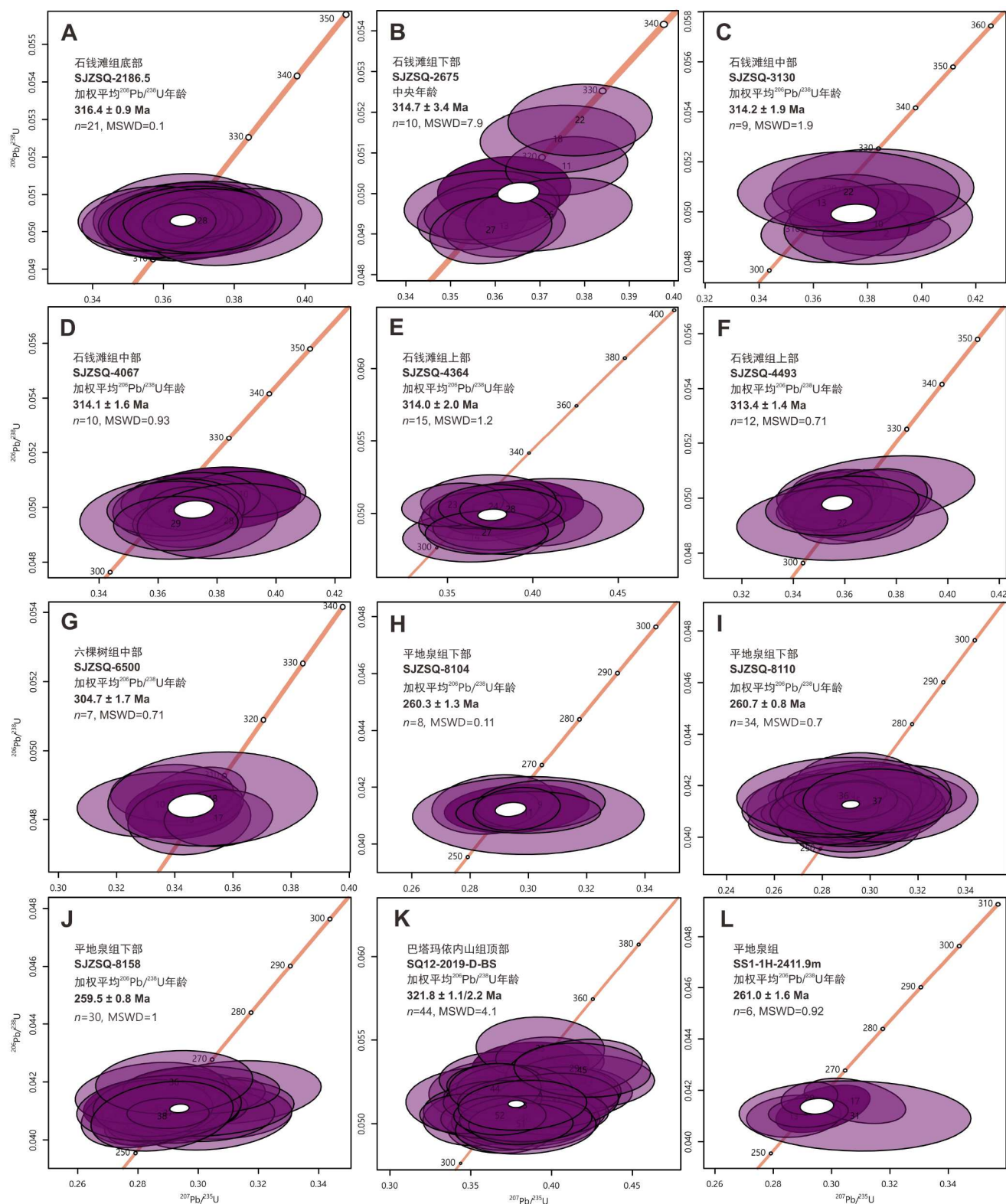


图6 准噶尔盆地东缘石炭-二叠系代表性火山灰样品锆石U-Pb年龄谱和加权平均年龄。所有样品采用LA-ICPMS方法测试。每个样品最年轻峰值年龄群的加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄被解释为对应样品的沉积年龄。所有数据点的误差椭圆均为 $2\sigma$

MSWD=2)和 $281.7 \pm 1.0 \text{ Ma}$  ( $n=15$ , MSWD=1.3)(图7B-7D); 哈米斯特组中上部的火山岩年龄为 $280.8 \pm 0.8 \text{ Ma}$

( $n=15$ , MSWD=0.8)(图7E); 塔姆其萨依组底部火山灰样品的LA-ICPMS年龄为 $279.0 \pm 0.6 \text{ Ma}$  ( $n=30$ ,

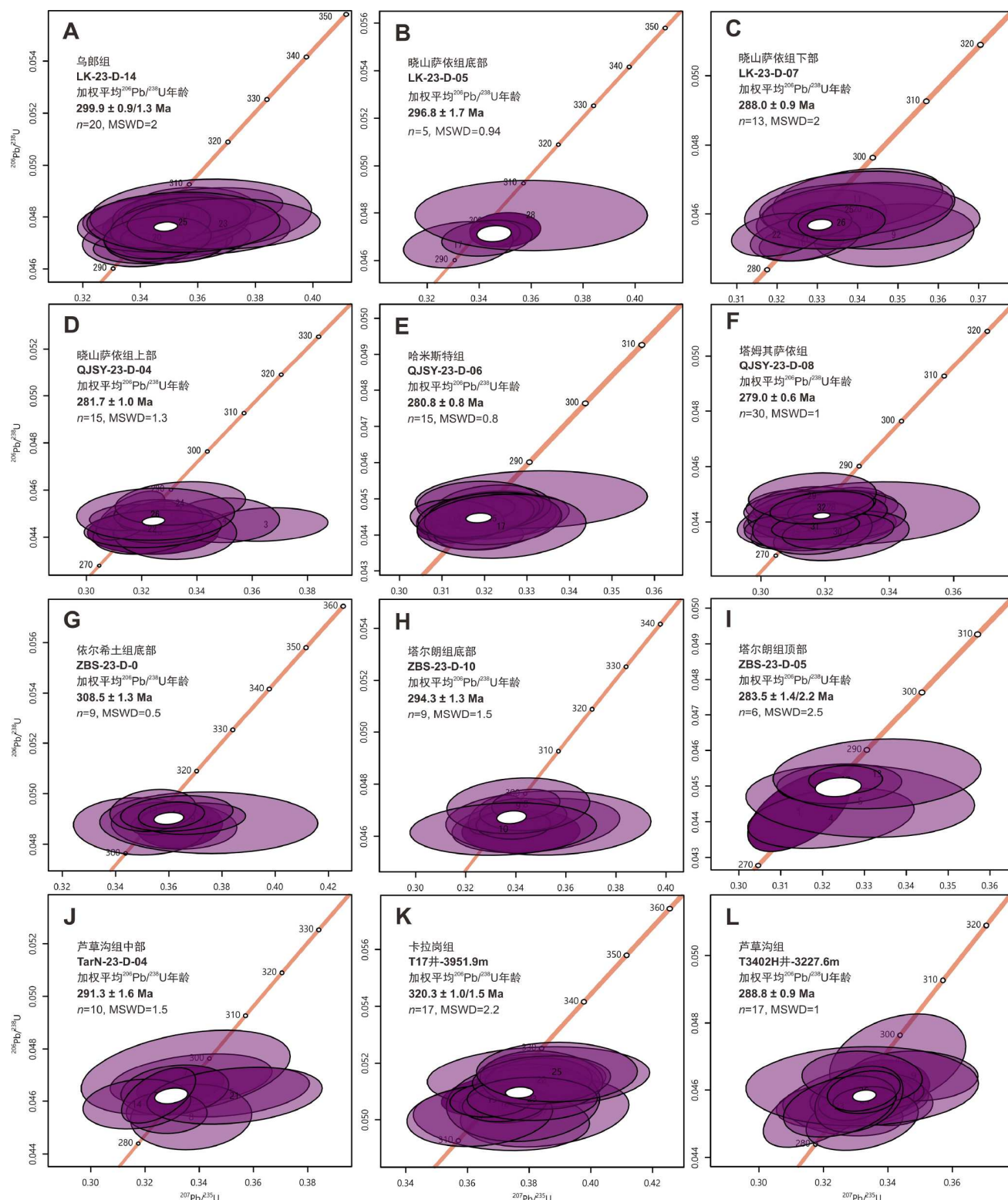


图7 准噶尔盆地周缘(吐哈盆地、伊犁盆地和三塘湖盆地)石炭-二叠系代表性火山灰样品锆石U-Pb年龄谱和图和加权平均年龄。所有样品采用LA-ICPMS方法测试。每个样品最年轻峰值年龄群的加权平均 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄被解释为对应样品的沉积年龄。所有数据点的误差椭圆均为 $2\sigma$

MSWD=1)(图7F)。作为关键烃源岩的塔姆其萨依组底部火山灰样品(QJSY-23-D-08)开展了进一步的CA-ID-

TIMS高精度年龄测试, 获得的结果为 $281.87 \pm 0.12/0.18/0.35 \text{ Ma}$ ( $n=5$ , MSWD=0.88)(图8, 表1)。

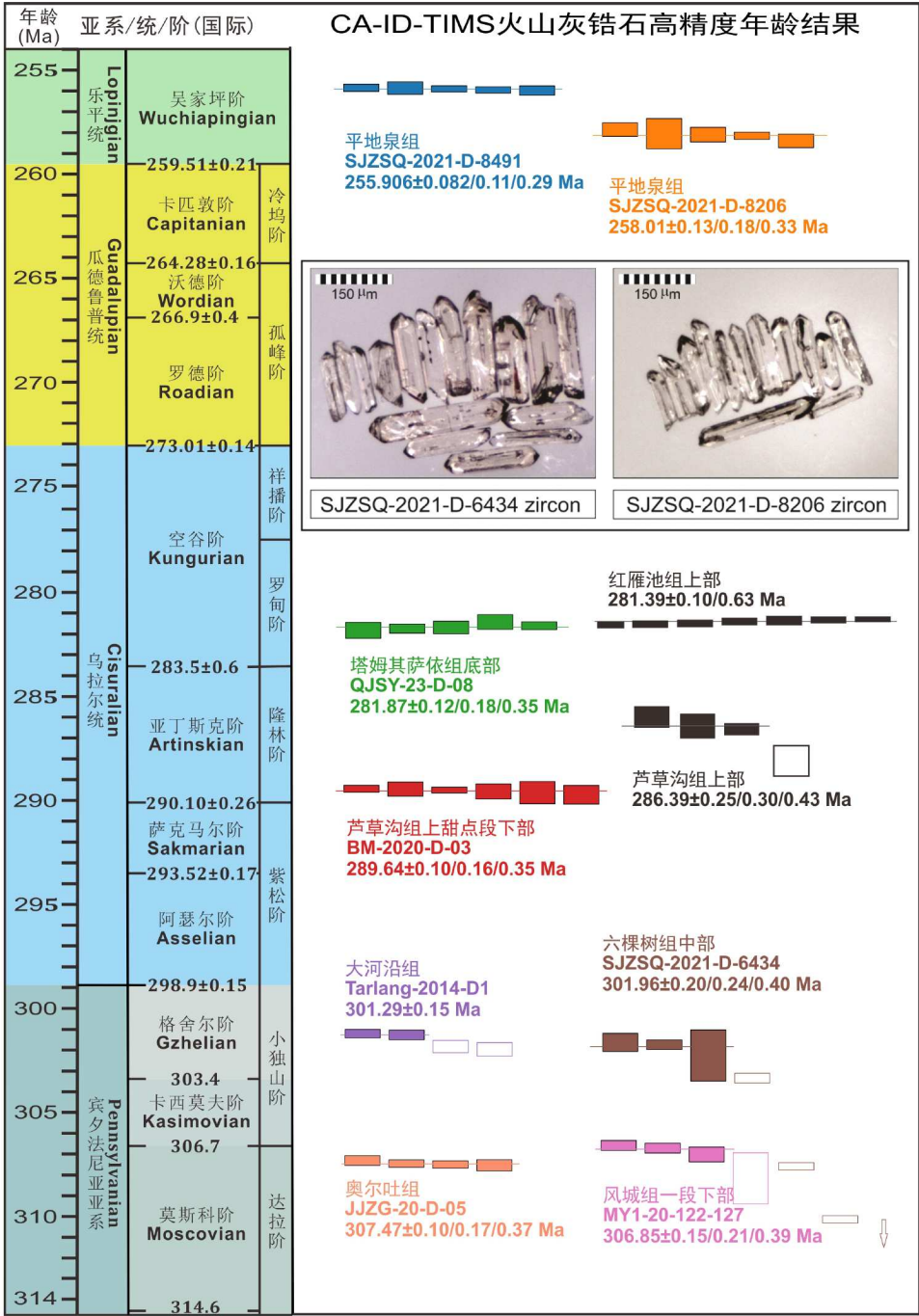


图8 关键火山灰样品的高精度CA-ID-TIMS锆石U-Pb年龄。该图展示了本研究获得的8个关键火山灰样品的高精度CA-ID-TIMS年龄结果，并将其锚定在国际年代地层表上(沈树忠等, 2019; 王向东等, 2019)。图中竖直条带为单颗粒锆石<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U年龄, 高度表示2σ内部分析误差, 空心条带表示未参加计算的年龄。横线为加权平均年龄。黑色为已发表年龄, 来自Yang等(2010)和Sun等(2022)。插图展示了代表性火山灰锆石照片

5 讨论

根据以上新数据, 我们首先讨论准噶尔盆地及其周缘地区三个关键的烃源层即风城组、芦草沟组和平地泉组的时代归属问题, 进而构建区域年代地层框架, 并探讨对区域构造演化和油气勘探的启示。

5.1 关键烃源岩地层单元时代归属的再厘定与区域对比修正

5.1.1 风城组时代精确厘定: 来自高精度年龄的证据  
风城组是准噶尔盆地西北缘玛湖凹陷的主力烃源岩,

表1 高精度CA-ID-TIMS年龄结果<sup>a)</sup>

| 样品号             | 剖面    | 地层单元   | <sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U<br>年龄(Ma) | 误差(2σ) |      |      | MSWD | n | N |
|-----------------|-------|--------|-----------------------------------------------|--------|------|------|------|---|---|
|                 |       |        |                                               | X      | Y    | Z    |      |   |   |
| JJZG-20-D-05    | 井井子沟  | 奥尔吐组   | 307.47                                        | 0.10   | 0.17 | 0.37 | 0.74 | 4 | 4 |
| MY1-20-122-127  | MY1井  | 风城组    | 306.85                                        | 0.15   | 0.21 | 0.39 | 2.2  | 3 | 4 |
| SJZSQ-21-D-6434 | 双井子水渠 | 六棵组    | 301.96                                        | 0.2    | 0.24 | 0.4  | 0.49 | 3 | 7 |
| Tarlang-2014-D1 | 塔尔朗   | 大河沿组   | ≤301.29                                       | 0.15   | N/A  | N/A  | N/A  | 2 | 4 |
| BM-23-D-03      | 宝明    | 芦草沟组   | 289.64                                        | 0.1    | 0.16 | 0.35 | 0.4  | 6 | 6 |
| QJSY-23-D08     | 群吉萨依  | 塔姆其萨依组 | 281.87                                        | 0.12   | 0.18 | 0.35 | 0.88 | 5 | 5 |
| SJZSQ-21-D-8206 | 双井子水渠 | 平地泉组   | 258.01                                        | 0.13   | 0.18 | 0.33 | 1.4  | 5 | 5 |
| SJZSQ-21-D-8491 | 双井子水渠 | 平地泉组   | 255.906                                       | 0.082  | 0.11 | 0.29 | 0.29 | 5 | 5 |

a) X, 内部(测试)误差; Y, 包含X和U-Pb稀释剂误差; Z, 包含X、Y和U衰变常数误差。MSWD, 平均标准权重偏差。n, 总测试数量(N)中参与加权平均年龄计算的测试数量。

其精确时代是限定该区十亿吨级大油气区形成与分布的基础,也是长期以来学界争论的焦点(Tang W等, 2022; Wang等, 2022; Gong等, 2024)。前人的研究总体分为四类:(1) 生物地层学: 师天明等(2022)对MY1井的风城组全取芯井开展了系统孢粉化石分析,建立了*Prototrapoxypinus perfectus-Lunatisporites tersus*组合带(PT组合带),并将其与准噶尔盆地南缘的塔什库拉组上部到乌拉泊组孢粉生物面貌进行对比。(2) 碎屑锆石年代学: 路玉(2018)和Tang W等(2022)通过碎屑锆石分析,获得了~277–284 Ma的最年轻碎屑锆石年龄值,时代指示为乌拉尔世晚期。然而,最年轻的单颗粒锆石年龄可能因后期铅丢失而“假性”变年轻,不代表物源区最晚期的火山活动,其作为最大沉积年龄的约束力需要谨慎应用。(3) 火山岩U-Pb定年/富有机质页岩Re-Os定年: Wang等(2021, 2022)和Gong等(2024)分别对风城组中的火山岩夹层和黑色页岩进行原位U-Pb及Re-Os定年,获得了一系列集中在~297–305 Ma的年龄,从绝对年代学角度将风城组的主体置于石炭纪-二叠纪之交。这些工作是较大的进步,但原位微区分析的准确度仍可能受微量铅丢失或基体效应的影响,从而导致误差。(4) 旋回地层学: Huang等(2021)和Tang Y等(2022)通过天文旋回调谐,分别计算出风城组的沉积时限约为5 Ma和3.5 Ma,但由于缺乏高精度的绝对年龄锚点,这些浮动的天文年代标尺无法被精确定位在地质年代表上。

本次研究在MY1井风城组一段中下部获得的CA-ID-TIMS高精度年龄为306.85±0.15 Ma(图8),为解决上述纷争提供了决定性锚点。这一年龄是目前风城组获得的首个、也是精度和准确度最高的同位素绝对年龄值,它精确地将风城组一段的沉积时代锚定在晚石炭世卡西莫夫期早期。同一个样品的LA-ICPMS分析则获得了298.1±1.7 Ma(图5B)的结果,与前人报道的风城组同层位原位

分析结果基本一致(Wang等, 2021, 2022),与CA-ID-TIMS高精度年龄相差大。这也从侧面说明了原位锆石年龄分析的准确度存在较大的不确定性(李献华等, 2015)以及铅丢失的可能影响。MH085井风一段的三个样品年龄集中在307–308 Ma,这三个样品在层位上非常接近(图11),它们的年龄结果在误差范围内也十分一致,且与MY1井的火山灰高精度CA-ID-TIMS锆石U-Pb年龄结果吻合,联合反映了风城组风一段在MY1井和MH085井应该基本为同时沉积,可以对比。MH085井风城组二段中部的年龄结果为304.3 Ma(图11),指示沉积时代仍为晚石炭世卡西莫夫期。这些证据清晰地表明,风城组的主体沉积时代为晚石炭世卡西莫夫期至阿瑟尔期,这一认识为该套重要烃源岩提供了可靠的年代学基准。

然而,在邻近的MH281井和MH282井中,被同样样划分为“风城组二段”的层位却获得~311–314 Ma的更老年龄,存在明显的时代矛盾,与地震资料所揭示的横向对比存在较大差异。同时,结合这些样品中存在大量年龄异常老的碎屑锆石,本文认为MH281井和MH282井中获得的~311–314 Ma年龄,可能仅能反映这些层位的最大沉积年龄或原位测试方法准确性的问题(李献华等, 2015),这些层位的实际时代需要做进一步的研究工作。

综上,本研究将风城组的沉积时代约束在晚石炭世卡西莫夫期至阿瑟尔期,这一结果不仅澄清了其年代学框架,也揭示了区域岩石地层单元对比中存在的问题,为后续高精度地层对比和盆地演化分析提供了基础。

5.1.2 芦草沟组显著的穿时与地层划分问题

芦草沟组也是准噶尔盆地重要的烃源岩层(Cao等, 2017; Wu H等, 2021; Qiao等, 2023),其时代归属长期以来是区域地质研究的焦点。传统观点基于陆相生物化石组合(双壳类、介形类、植物以及孢粉组合等)将其

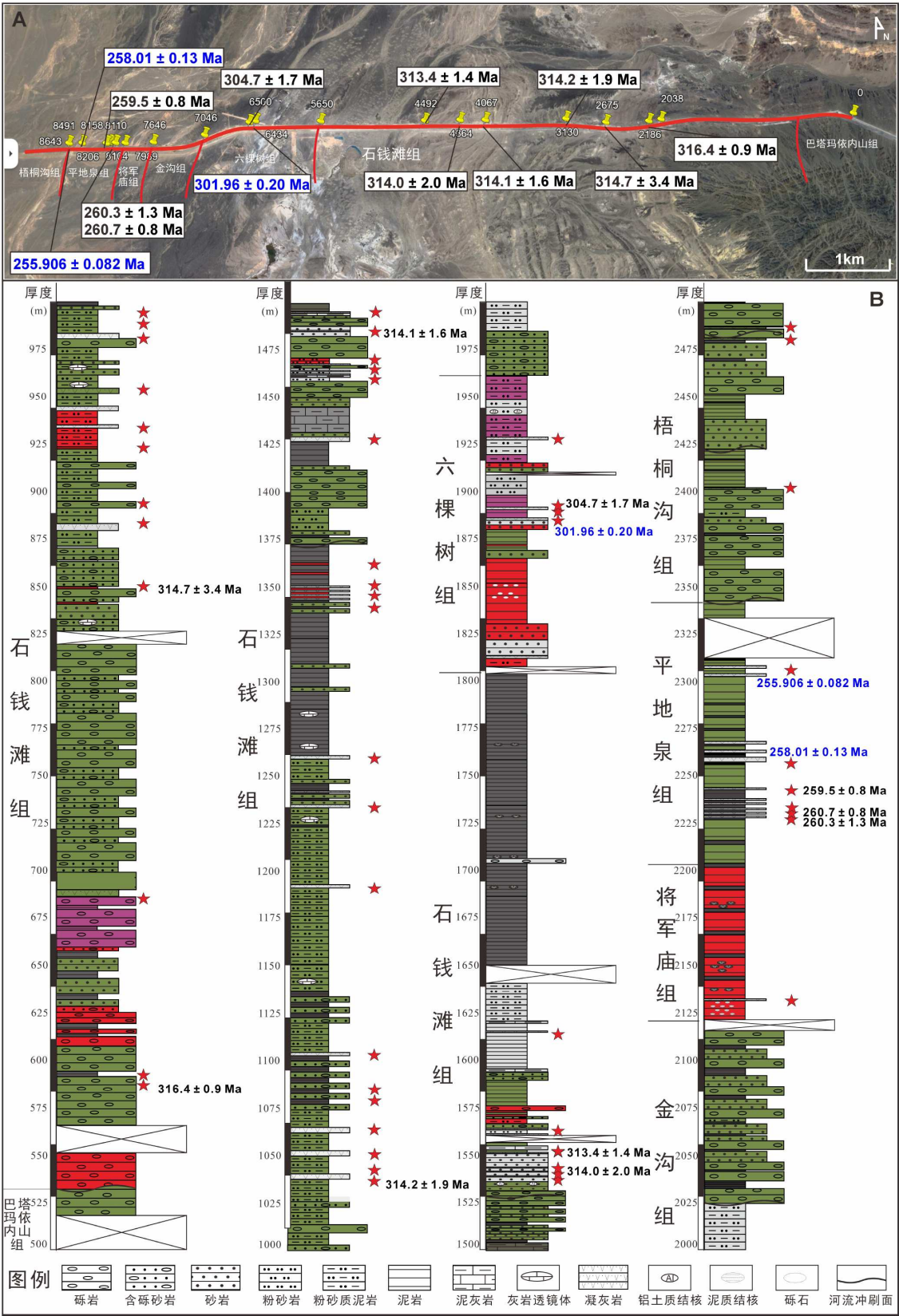


图9 准噶尔盆地东缘双井子水渠剖面平面位置、综合地层柱状图及U-Pb年龄。红色五角星指示定年样品的采集层位。图中从石钱滩组顶部黑色岩系到将军庙组的岩石地层界线划分位置存在不同看法,地层对比依据实际年龄位置为准。原位分析(LA-ICPMS/SIMS)获得的年龄数据以黑色字体表示,高精度CA-ID-TIMS年龄结果以蓝色加粗字体表示

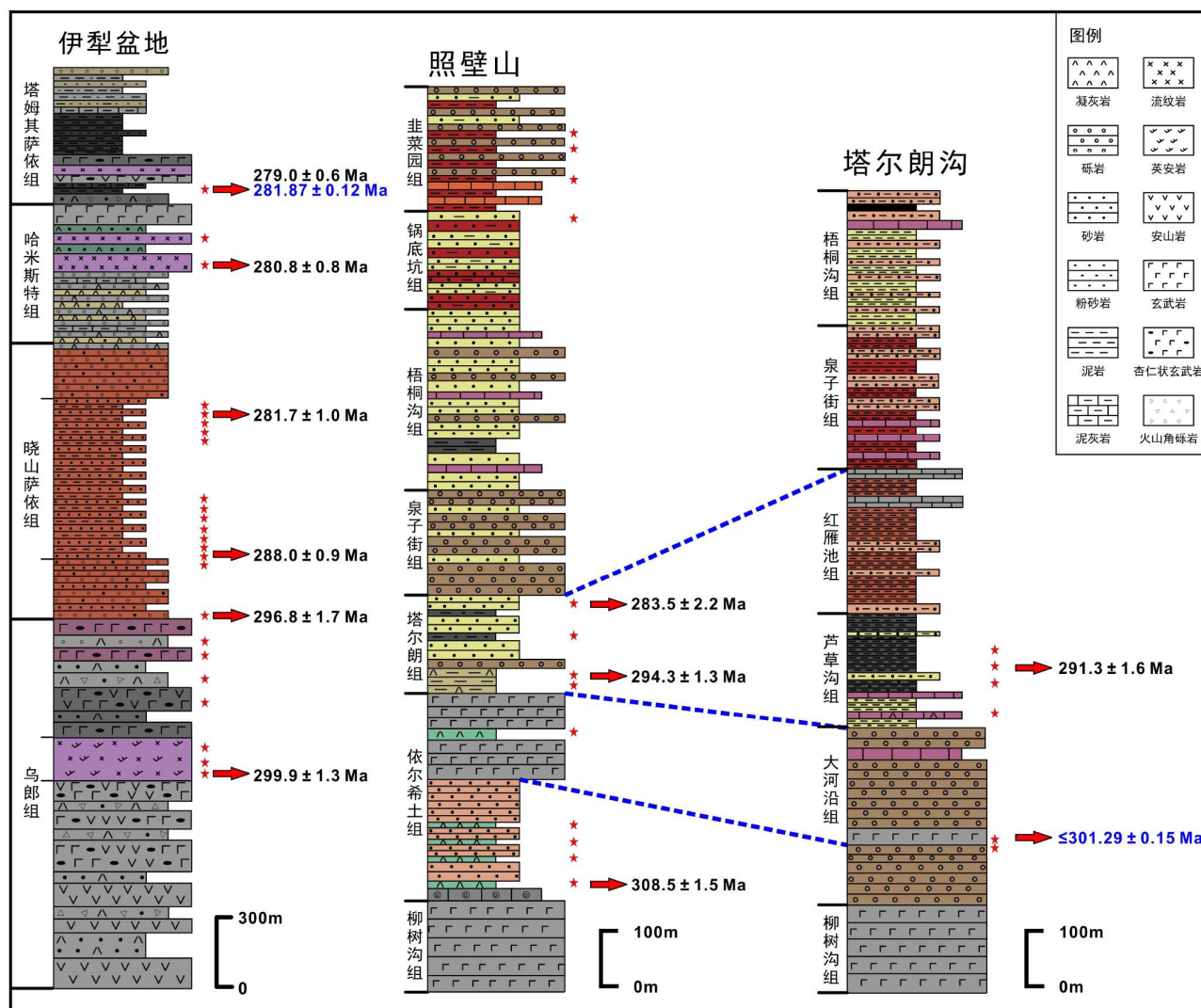


图10 准噶尔盆地周缘地区(吐哈、伊犁盆地)代表性剖面综合地层柱状图和锆石U-Pb年龄。红色五角星指示火山灰样品的采集层位。原位分析(LA-ICPMS)获得的年龄数据以黑色字体表示,高精度CA-ID-TIMS年龄结果则以蓝色加粗字体突出显示

笼统地归为瓜德鲁普统(金玉环等, 2000; 欧阳舒等, 2004)。本研究获得的系统性年龄数据, 不仅修正了这一传统认识, 更揭示出“芦草沟组”这一岩石地层单元的异常复杂性。

首先, 我们确立了准噶尔盆地南缘和东部芦草沟组的精确年代。本研究在南缘经典露头区(井井子沟、宝明矿场)和吉木萨尔凹陷的核心井(如J10024井)以及邻近的Fu50井中, 获得的多个高质量U-Pb年龄, 均一致将芦草沟组的沉积时代指向了乌拉尔世的萨克马尔期-亚丁斯克期(~293–287 Ma)(4.1节)。这些数据与Sun等(2022)在井井子沟剖面获得的高精度年龄(~286 Ma)在误差范围内高度一致, 共同构成了一系列相互支持的证据链, 指示准噶尔盆地主力勘探区块的芦草沟组, 主体是乌拉尔世早中期的沉积, 而非瓜德鲁普世。

然而, 来自凹陷更深处的KT2井和KT5井, 得到了异常古老的年龄。KT2井的两个样品年龄集中在晚石炭世卡西莫夫期(~305 Ma), 而KT5井的年龄则更为古老, 直指晚石炭世巴什基尔期(~315–317 Ma)(图12)。这些年龄比南缘的“真”芦草沟组要早了15至30个百万年, 非测试误差可以解释, 显然这套地层可能不属于芦草沟组。第一, “老”锆石为再沉积碎屑锆石的可能性可以排除, 因为所有样品中测得的锆石年龄都表现出高度的一致性, 形成了集中的年龄峰, 这是典型同期火山喷发物质的特征, 而非来源混杂的碎屑锆石。特别是KT5井的锆石, 多具有清晰的棱角, 锆石CL特征高度一致, 没有搬运、磨圆的特征, 代表了典型的原生火山灰锆石。第二, 这些年龄应该是可靠的, 因为在每口井内部, 垂向上相隔一定距离的两个样品的年龄(图4), 其新老关系与地层上

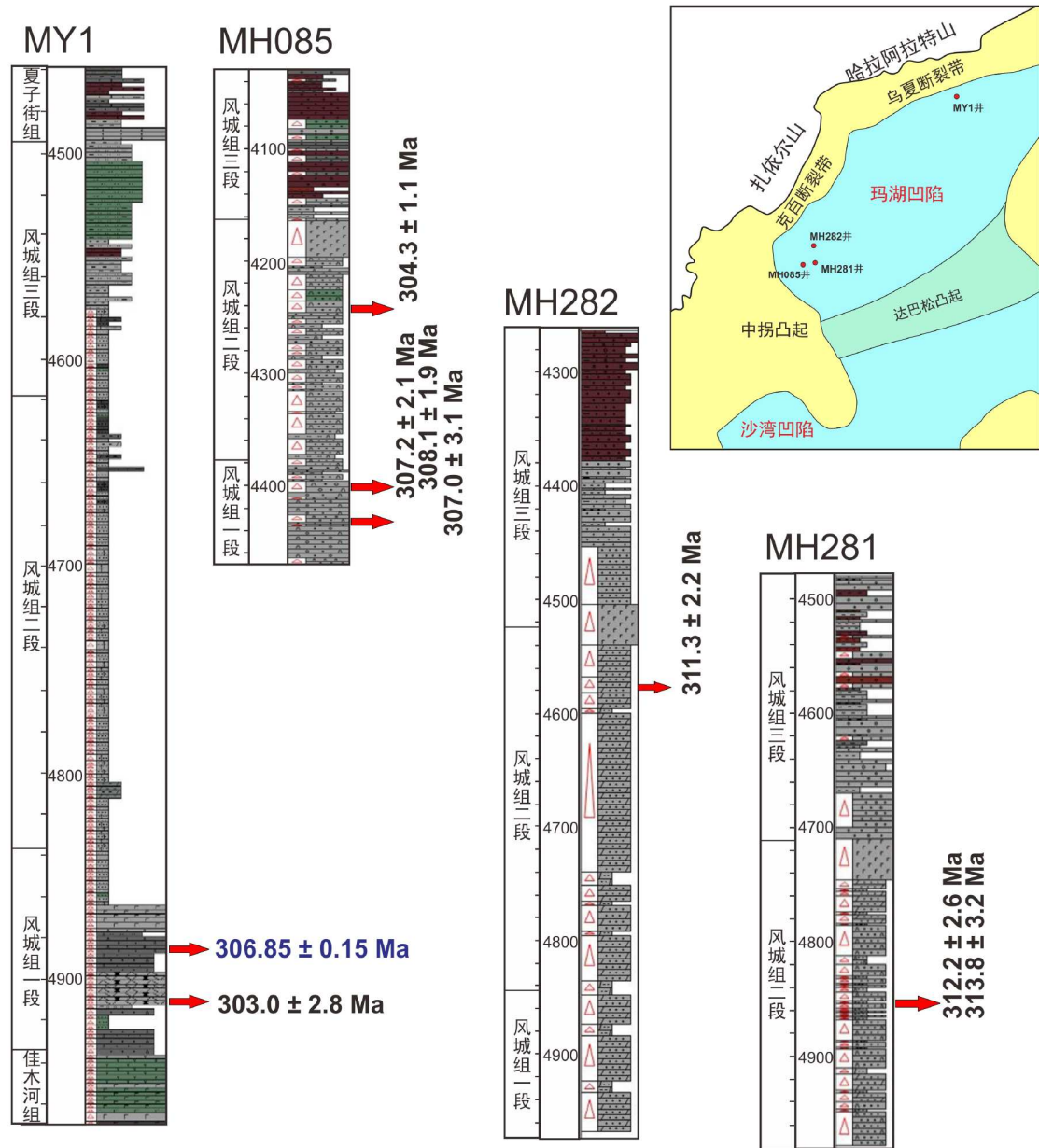


图 11 准噶尔盆地西北缘风城组代表性钻井岩芯柱状图及U-Pb年龄。插图展示了各钻井的相对地理位置，并示意了其钻遇地层的深度差异。原位分析(LA-ICPMS)获得的年龄数据以黑色字体表示，高精度CA-ID-TIMS年龄结果则以蓝色加粗字体突出显示

新下老的层序完全吻合，可相互校验准确性。第三，从构造位置上看，Fu50井位于凸起边缘，而KT2井和KT5井位于凹陷内部(图12)，其钻遇的“芦草沟组”埋深依次增大(4300 m→4700 m→6100 m)，与之对应，测得的年龄也系统性变老，指示凹陷内部的KT2井和KT5井的“芦草沟组”很可能是老地层，这些年龄需要后期CA-ID-TIMS高精度分析的进一步验证。

据此，准噶尔盆地的岩石地层单位“芦草沟组”很可能是穿时的，本次研究的凹陷深部KT2井和KT5井、时代为晚石炭世的“芦草沟组”，实际上很可能是西北缘玛

湖凹陷风城组的同期异相沉积，它们代表了晚石炭世分布于不同次级凹陷的独立或半独立湖盆的产物。芦草沟组很可能不是“一个统一的大湖”(Carroll和Wartes, 2003)，勘探实践中需要注意在不同时代、不同凹陷中寻找各自独立的烃源岩发育中心。

### 5.1.3 “平地泉组”与芦草沟组很可能不是一个时代

在准噶尔盆地的传统地层框架中(基于相似的沉积特征和生物组合)，东缘的平地泉组一直被视为南缘芦草沟组同一时期、不同区域的湖相沉积产物(张义杰等，

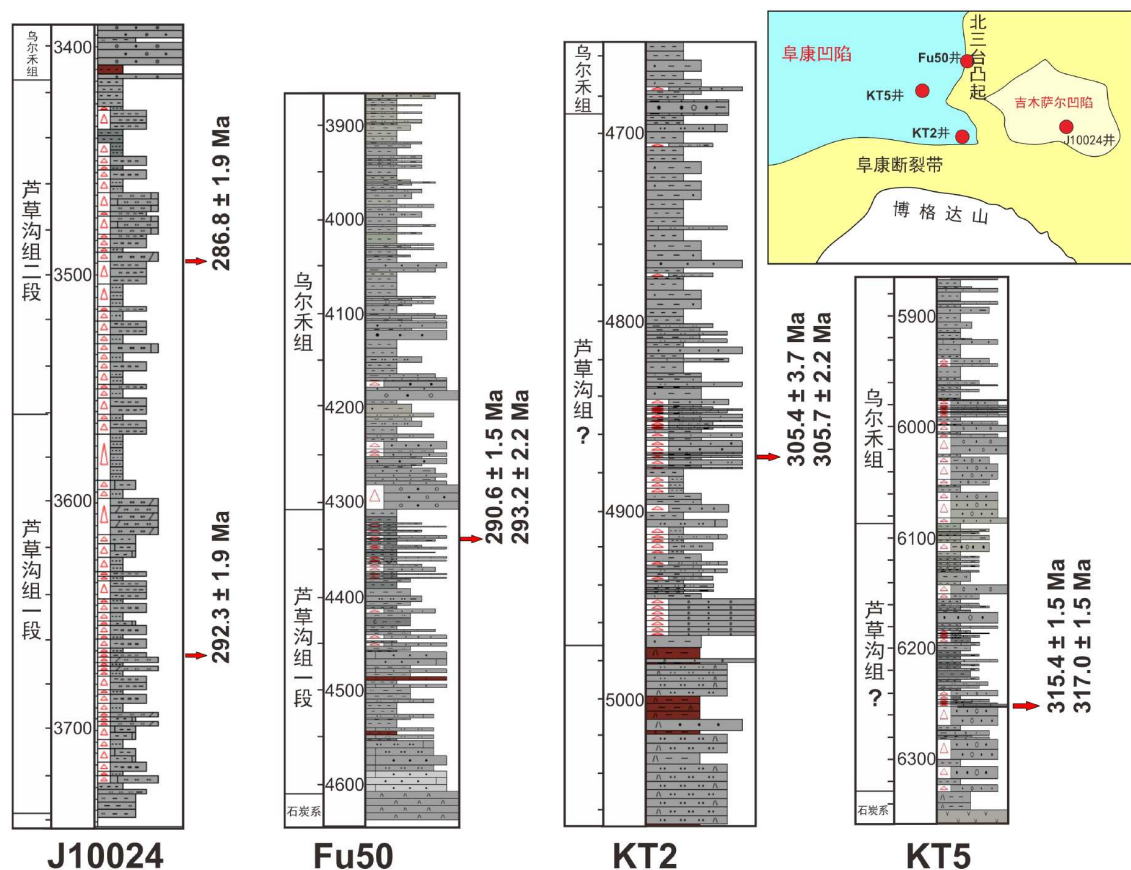


图12 准噶尔盆地南缘芦草沟组代表性钻井岩芯柱状图及U-Pb年龄。插图展示了各钻井的相对地理位置，并示意了KT2井和KT5井芦草沟组显著大于其他钻井的钻遇深度

1992)。这一等时对比的方案，是指导准东地区古地理恢复和油气勘探的基础，本文获得的高精度年代数据对此进行了新的约束。

在双井子水渠剖面的野外工作中，根据沉积特征，将平地泉组和上覆梧桐沟组的界线划在地层真厚度的2330 m左右(图9)，依据是该层位以下主要为灰黑色细粒沉积岩，包括泥页岩和煤层(图3D–3F)，而从2330 m开始出现大套砾岩，砾石磨圆度好，在地层序列上应该对应于准噶尔盆地南缘的泉子街组，包含在准东的广义梧桐沟组之内。在这一地层划分框架下，平地泉组的真厚度约为280 m，在其下部(即产出大量煤层的岩性段)保存了多层高质量的火山灰(图3D–3F)。如果平地泉组和芦草沟组的对应关系成立，这些样品的年龄测试结果应该是乌拉尔世。然而，这段富煤沉积中的火山灰年龄测试结果非常一致，全都是乐平世吴家坪期的年龄(图6H–6J，图9)。乐平世的年龄结果与传统的乌拉尔世划分方案存在明显矛盾。这种矛盾可能源于几个方面：第一，野外地层单元的识别可能存在偏差；第二，平地泉组本身时代就是乐平世；第三，双井子水渠剖面的“平地

泉组”与井下的平地泉组不是一套地层。

为了解决这一关键疑问，我们分析了井下数据。在石树沟凹陷的SH1-1H井岩芯中，在被油田单位明确划分为“平地泉组二段下部”的典型湖相泥页岩层位中，再次发现了一层高质量的火山灰。对该样品的锆石LA-ICPMS定年，获得了 $261.0 \pm 1.6$  Ma的年龄，仍然指示为其为瓜德鲁普世与乐平世之交的沉积。尽管这个样品中同时也测得了许多老锆石，结合锆石特征和年龄数据，我们认为这个年龄是可靠的。因此，从井下的典型平地泉组中再次获得了乐平世的年龄结果，这是否能证实平地泉组的时代确实应当归属于乐平世，或者至少上部已经进入了乐平世？进而准东的平地泉组实际上与南缘的芦草沟组和红雁池组不是一套地层，它们的时代相差约25百万年，无法进行对比，也需要进一步研究。

## 5.2 新疆北部石炭-二叠纪高精度年代地层框架

在重新厘定了上述关键烃源岩地层单元的时代归属、并澄清了区域地层对比核心争议之后，本文建立了一套覆盖古亚洲洋西段主要盆地、以高精度同位素年龄为绝

对时间标尺的石炭-二叠纪综合年代地层框架(图13)。这一新格架不仅大幅修正了过去的地层划分方案,更清晰地揭示了各地区在石炭-二叠纪期间的详细演化历史和彼此间的内在联系。

在准噶尔盆地西北缘,其演化序列被精确限定为:晚石炭世巴什基尔期-莫斯科期,发育以佳木河组为代表的火山岩;紧接着在卡西莫夫期-乌拉尔世早期阿瑟尔期,形成了风城组这一套独特的碱湖相优质烃源岩;之后,沉积环境转变为河流-三角洲体系,形成夏子街组;到萨克马尔期-亚丁斯克期,再次转变为湖泊相,沉积了下乌尔禾组的富有机质泥页岩;在经历瓜德鲁普世的长期沉积缺失后,于乐平世吴家坪期开始再次接受上乌尔禾组的河流相碎屑岩沉积。

在准噶尔盆地东缘,石炭纪火山作用(巴塔玛依内山组)持续至巴什基尔期末,随后在莫斯科期被浅海相的石钱滩组所覆盖。海陆转换发生于格舍尔期晚期,以六棵树的红色粗碎屑岩出现为标志。与传统认识不同,本区在乌拉尔世可能并无大规模湖盆发育,而是经历了长期的沉积间断或剥蚀,直到乐平世吴家坪期,才在新的构造背景下沉积了以平地泉组/梧桐沟组下部为代表的湖沼相烃源岩。

在准噶尔盆地南缘,演化历史最为复杂:巴什基尔期柳树沟组火山作用之后,莫斯科期发育了祁家沟组碳酸盐岩台地;卡西莫夫期至格舍尔期早期,构造快速沉降,堆积了奥尔吐组、石人子沟组和塔什库拉组等巨厚的海相碎屑岩;格舍尔期晚期,乌拉泊组标志着该区转入陆相环境;乌拉尔世阿瑟尔期,井子沟组记录了一次强烈的火山活动;紧随其后的萨克马尔期-亚丁斯克期,则进入构造相对平静期,发育了广布的芦草沟组和红雁池组湖相烃源岩;之后,该区同样经历了瓜德鲁普世的抬升与剥蚀,直到乐平世才开始接受泉子街组砾岩及之上的河流-三角洲相沉积。

在周缘盆地中,吐哈盆地北缘的演化与淮南地区高度相似,反映两者可能属于同一古湖盆。同样在乌拉尔世萨克马尔期-亚丁斯克期发育了与芦草沟组可精确对比的塔尔朗组烃源岩。三塘湖盆地的芦草沟组时代亦与之一致。而伊犁盆地的演化则略显独特,其陆相沉积环境的开启时间最晚(不早于乌拉尔世阿瑟尔期),主力烃源岩(塔姆其萨依组)的沉积时代可能相对偏晚,主要在乌拉尔世空谷期早期。

综合来看,尽管各地区在具体演化细节和沉积层序上存在差异,但古亚洲洋西段在石炭-二叠纪的整体沉积演化过程,总体可以概括为四个主要阶段:

第一阶段:石炭纪火山-海相沉积阶段。这是区域的

共同基底,以广泛的岛弧/陆缘弧火山作用和海相(从深水到浅海台地)沉积为特征,反映了古亚洲洋向闭合阶段演化的构造背景。

第二阶段:晚石炭世末-早二叠世初海陆转换与差异化演化阶段。这是构造格局演变的关键期。各地区相继完成海陆转换,并进入彼此相对独立的前陆盆地演化期。不同的构造沉降速率和物源供给,导致了各地沉积体系的显著差异。

第三阶段:乌拉尔世湖相烃源岩广泛发育的主要时代。在乌拉尔世(特别是萨克马尔期-亚丁斯克期),除准东地区外,研究区统一同步发育了大范围的湖相优质烃源岩。这指示了在当时独特的区域构造背景和古气候条件的共同作用下,形成了一个或多个生产力极高的巨型古湖泊群,以芦草沟组为典型代表。

第四阶段:瓜德鲁普世区域隆升剥蚀与乐平世准平原化沉积阶段。乌拉尔世晚期,研究区整体进入构造抬升和剥蚀期,导致了瓜德鲁普世地层的普遍缺失,形成了一个区域性的大规模不整合面。直到乐平世,地壳活动趋于稳定,古地形经长期剥蚀夷平后,才在更广阔的范围内开始接受新的沉积,这些沉积物(如泉子街组、上乌尔禾组和梧桐沟组)覆盖在不同时代的下伏地层之上,标志着区域构造-沉积演化进入了新的轮回。

### 5.3 对区域构造演化和烃源岩发育的启示

本研究建立的高精度年代地层框架,不仅是对区域地质年代学的重塑,也使我们能够以全新的视角,审视新疆北部地区石炭-二叠纪烃源岩的时空分布规律,并为古亚洲洋的闭合过程这一重大科学问题提供新的约束。

#### 5.3.1 烃源岩发育的阶段性与时空分布新模式

过去,对准噶尔盆地及其周缘烃源岩的认识往往围绕着“寻找风城组、芦草沟组/平地泉组及其相当层位”的思路,本次研究的精确年代数据揭示古亚洲洋西段的优质烃源岩主要形成于三个清晰、独立的阶段,每个阶段都有其独特的分布范围和沉积背景:

第一阶段:晚石炭世卡西莫夫期-乌拉尔世早期阿瑟尔期。这是最早的一期主力烃源岩发育期,典型代表为准噶尔盆地西北缘玛湖凹陷的风城组,主要形成于蒸发、咸化的碱湖环境中(Yu等, 2019; Cao等, 2020; 曹剑等, 2025)。我们推断,盆地腹部阜康凹陷深层(如本文研究的KT2井)所谓的“老芦草沟组”(~305 Ma),实际上也属于这一阶段的产物,代表了当时盆地内另一个独立的沉积中心。

第二阶段:乌拉尔世萨克马尔期-亚丁斯克期。这是

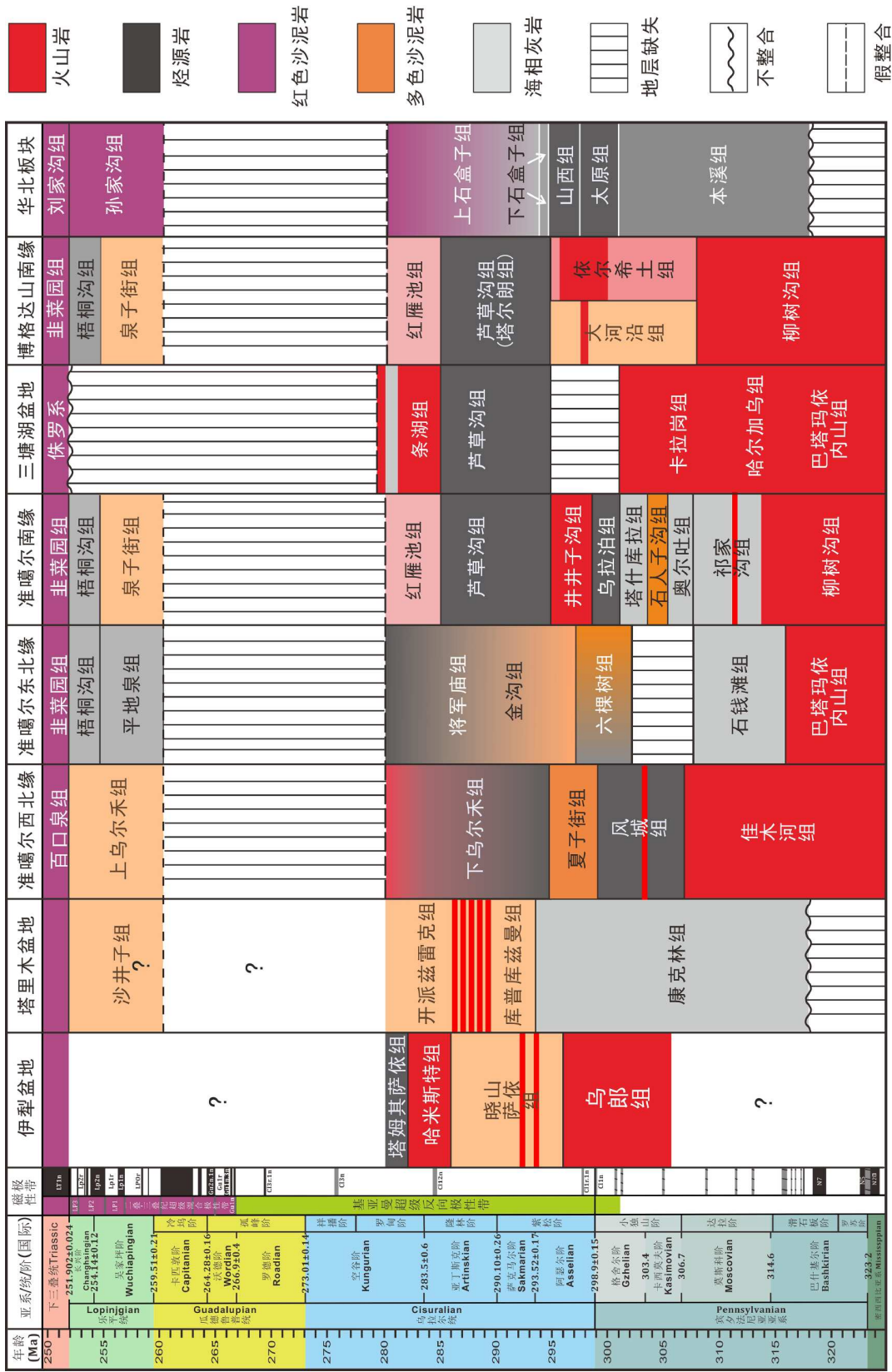


图 13 准噶尔盆地及周缘石炭-二叠纪年代地层格架与区域对比。左侧国际石炭-二叠纪年代地层格架数据沈树忠等(2019)和王向东等(2019)。为提供更广阔的区域对比背景, 图中同时展示了塔里木盆地(柯坪地区)和华北板块的地层序列及年龄数据Zhong等(2022); 华北板块的地层序列据Wu Q等(2021)

区域上分布最广、规模最大的“黄金成烃期”。在近一千万年的时间里,集中发育了多套烃源岩,包括准噶尔盆地南缘的芦草沟组、西北缘的下乌尔禾组、吐哈盆地的塔尔朗组、三塘湖盆地的芦草沟组以及伊犁盆地的塔姆其萨依组等。这一多样化的湖泊系统形成于适宜的古气候条件下的一系列前陆盆地中,代表了古亚洲洋西段在二叠纪最有利的成藏窗口。

第三阶段:乐平世吴家坪期早期。这一阶段的烃源岩发育规模相对局限,目前仅在准噶尔盆地东缘有明确发现,即平地泉组(或其相当的梧桐沟组下部煤系)。其富含有机质的煤系地层,指示了与前两个阶段深湖-半深湖环境截然不同的滨湖、沼泽相沉积背景。

这一“三阶段”时空分布新模式,为区域油气勘探提供了全新的、科学的指导框架。勘探部署应定位在三个不同的时间区间(晚石炭世末、乌拉尔世、乐平世)和不同的构造单元中,分别寻找与之对应的有利沉积相带,细化、拓展了勘探的思路和领域。

### 5.3.2 海陆转换的穿时性与古亚洲洋闭合过程

本次研究获得的精确年代学数据,提供了新的视角来约束古亚洲洋的最终闭合过程。通过对比各地区海相地层消失、陆相地层开始出现的时间,发现了一个清晰的新规律:

在准噶尔盆地,最终的海退时间表现出显著的自西向东逐渐变晚的穿时特征。在盆地西北缘,陆相或残留海相的风城组沉积始于晚石炭世卡西莫夫期早期(~307 Ma);在南缘,陆相乌拉泊组的沉积始于格舍尔期早期(~303 Ma);而到了东缘,陆相六棵树组的沉积开始时间则稍晚,为格舍尔期中期(~302 Ma)。虽然南缘和东缘的转换时间差距不大,但从整个盆地西、南、东的宏观趋势来看,海陆转换由西向东推进的特征十分明显,指示了古亚洲洋自西向东的逐渐关闭过程(张瑞杰等, 2024),这一趋势也与整个古亚洲洋的总体关闭过程一致(Xiao等, 2008; Han和Zhao, 2018; Song等, 2024)。同时,考虑所有地区的海陆转折时间,基本均发生在晚石炭世,指示古亚洲洋西段的沉积盆地在二叠纪之前已经基本转变为陆相沉积体系。因此,从沉积地层角度可以约束古亚洲洋西段的关闭时间应当早于二叠纪。

这一沉积学记录,为大地构造模型提供了新的约束。一个简单的、等时的、统一的板块碰撞或区域抬升事件,难以解释这种渐进式的海退过程。相反,这种海陆转折的穿时性特征,有力印证了古亚洲洋西段“剪刀式”的闭合模式(Han和Zhao, 2018)。即洋盆的闭合与碰撞造山可能始于西部,随板块的斜向汇聚,闭合线(或缝合带)

像拉链一样自西向东逐渐推进。海水被逐步挤出,导致了观测到的、清晰记录在沉积地层中的海陆转折时间的系统性延迟。这种剪刀式的关闭过程与整个特提斯域的宏观旋转拼合过程一致,主要体现在分隔古、中、新特提斯洋的多个条带从二叠纪早期开始逐渐由南向北逆时针方向分批差异北移,向劳亚大陆聚合的地球动力学机制一致(万博等, 2019; 吴福元等, 2020; 朱日祥等, 2023)。因此,本研究不仅部分阐明了区域地层划分与对比的难题,也利用高精度的地层“刻度尺”,为窥探深时板块构造的动力学过程提供了新的重要资料。

## 6 结论

本文通过对准噶尔盆地及周缘地区的吐哈、三塘湖和伊犁盆地,开展系统的、多方法的火山灰锆石U-Pb年代学研究,获得了53个高质量的同位素绝对年龄数据。基于这些精确的时间坐标,厘清了区域石炭-二叠纪地层框架中的多个关键科学问题,取得了三方面突破性认识:

(1) 精确厘定了三大主力烃源岩的时代,改变了传统的地层对比方案。准噶尔盆地西北缘的风城组,其主体并非完全属于早二叠世,而是沉积于晚石炭世卡西莫夫期-乌拉尔世阿瑟尔期早期。盆地南缘和周缘盆地(吐哈、三塘湖)的芦草沟组(或塔尔朗组),其时代被精确限定在乌拉尔世萨克马尔期-亚丁斯克期,并揭示出“芦草沟组”这一岩石地层名称在盆地内部可能存在被误用和具有显著穿时的现象。盆地东缘的平地泉组,其时代为乐平世。

(2) 建立了古亚洲洋西段石炭-二叠纪高精度年代地层格架,并总结出该区域四阶段的统一演化历史。新格架清晰地揭示了各地区从石炭纪火山-海相沉积,经晚石炭世末期的差异化海陆转换,到乌拉尔世湖相烃源岩的广泛发育,最终在瓜德鲁普世经历区域性抬升剥蚀、并于乐平世再次接受准平原化沉积的完整过程。

(3) 为古亚洲洋的最终闭合方式和时间提供了关键的沉积学约束。本研究精确地揭示了研究区海陆转换均完成于晚石炭世,且具有自西向东逐渐变晚的穿时规律。这一清晰的沉积响应模式,为古亚洲洋西段“剪刀式”的渐进闭合过程提供了强有力的证据,同时表明古亚洲洋的关闭过程是统一的特提斯动力学机制下的结果。

总之,本研究为解决古亚洲西段(北疆地区)长期存在的地质争议提供了关键证据,建立的年代学新格架必将为未来的油气资源评价、古地理重建和深部构造动力学等重大科学问题研究,提供坚实和可靠的基础。

**致谢** 感谢两位审稿人和责任编辑对本文的细致审阅,并提出宝贵的修改建议。

## 参考文献

- 曹剑, 雷德文, 李玉文, 等. 2015. 古老碱湖优质烃源岩: 准噶尔盆地二叠统风城组. 石油学报, 36: 19–28
- 曹剑, 张瑞杰, 支东明, 等. 2025. 碱湖烃源岩有机-无机相互作用与控烃机理. 中国科学: 地球科学, 55: 1619–1641
- 崔炳富, 孔令华, 陈军, 等. 2024. 准噶尔盆地东部石钱滩凹陷石炭系石钱滩组烃源岩特征及其生烃潜力分析. 西北地质, 57: 34–45
- 崔智林, 梅志超, 屈红军, 等. 1996. 新疆伊犁盆地上二叠统研究. 高校地质学报, 2: 332–338
- 邓云山, 吴志勇, 吉利民, 等. 1996. 准噶尔盆地东北缘二叠纪地层时代划分. 沉积学报, 14: 97–102
- 窦亚伟, 孙喆华. 1984. 新疆北部晚二叠世植物群特征. 地层学杂志, 8: 279–285
- 龚德瑜, 周川闽, 齐雪峰, 等. 2024. 准噶尔盆地东部多类型天然气的发现与勘探启示. 地质学报, 98: 1263–1278
- 关键, 曹锋, 陈勇. 2011. 准噶尔盆地卡拉麦里山前平地泉组勘探潜力. 新疆石油地质, 32: 115–118
- 郝继鹏, 杨志勇, 史建宏, 等. 2003. 伊犁盆地石炭系-二叠系含油气性特征. 沉积与特提斯地质, 23: 75–83
- 何登发, 陈新发, 况军, 等. 2010. 准噶尔盆地石炭系烃源岩分布与含油气系统. 石油勘探与开发, 37: 397–408
- 何海清, 支东明, 唐勇, 等. 2021. 准噶尔盆地阜康凹陷康探1井重大突破及意义. 中国石油勘探, 26: 1–11
- 贾承造, 庞雄奇, 宋岩. 2024. 全油气系统理论基本原理. 石油勘探与开发, 51: 679–691
- 金玉环, 尚庆华, 侯静鹏, 等. 2000. 中国地层典二叠系. 北京: 地质出版社. 149
- 李献华, 唐国强, 龚冰, 等. 2013. Qinghu (清湖) 锆石: 一个新的U-Pb年龄和O, Hf同位素微区分析工作标样. 科学通报, 58: 1954–1961
- 李献华, 柳小明, 刘勇胜, 等. 2015. LA-ICPMS锆石U-Pb定年的准确度: 多实验室对比分析. 中国科学: 地球科学, 45: 1294–1303
- 路玉. 2018. 玛湖-沙湾地区二叠系年代-地层格架与沉积充填演化. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京). 1–121
- 欧阳舒, 朱怀诚, 詹家桢, 等. 2004. 新疆准噶尔盆地和塔里木盆地二叠纪孢粉组合的比较及其植物区系和地层意义. 地层学杂志, 28: 193–207
- 钱永新, 邹阳, 赵辛楣, 等. 2022. 准噶尔盆地玛湖凹陷玛页1井二叠系风城组全井段岩心剖析与油气地质意义. 油气藏评价与开发, 12: 204–214
- 邱振, 姜琳, 陶辉飞. 2017. 吉木萨尔凹陷二叠统芦草沟组地层与沉积环境特征研究. 地质科学, 52: 964–979
- 沈树忠, 张华, 张以春, 等. 2019. 中国二叠纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49: 160–193
- 师天明, 张华, 肖继南, 等. 2022. 新疆准噶尔盆地玛湖凹陷玛页1井宾夕法尼亚亚系至乌拉尔统风城组孢粉地层学研究. 古生物学报, 61: 615–627
- 宋博, 卢进才, 牛亚卓, 等. 2018. 伊犁盆地尼勒克地区中二叠世陆相地层碎屑物源分析及其对西天山构造演化过程的约束. 岩石学报, 34: 2030–2048
- 宋永, 唐勇, 何文军, 等. 2024. 准噶尔盆地油气勘探新领域, 新类型及勘探潜力. 石油学报, 45: 52–68
- 唐勇, 侯章帅, 王霞田, 等. 2022. 准噶尔盆地石炭纪-二叠纪地层对比框架新进展. 地质论评, 68: 385–407
- 万博, 吴福元, 凌凌, 等. 2019. 重力驱动的特提斯单向裂解-聚合动力学. 中国科学: 地球科学, 49: 2004–2017
- 王成文, 杨式溥. 1998. 新疆中部晚石炭世-早二叠世腕足动物及生物地层研究. 北京: 地质出版社. 156
- 王蕙. 1984. 根据化石孢粉组合讨论克拉玛依油田井下地层时代问题. 新疆石油地质, (2): 6–10
- 王向东, 胡科毅, 郗文昆, 等. 2019. 中国石炭纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49: 139–159
- 王越, 于洪州, 熊伟, 等. 2021. 石钱滩凹陷二叠系平地泉组层序沉积特征及石油地质意义. 油气地质与采收率, 28: 35–45
- 王越, 张奎华, 张关龙, 等. 2022. 新疆博格达山北缘石炭纪-二叠纪地层与沉积相特征——以乌鲁木齐地区井子沟剖面为例. 地质通报, 41: 1550–1562
- 吴福元, 万博, 赵亮, 等. 2020. 特提斯地球动力学. 岩石学报, 36: 1627–1674
- 谢其锋, 周立发, 刘羽. 2014. 伊犁盆地二叠系烃源岩地球化学特征及其地质意义. 石油学报, 35: 50–57
- 杨树锋, 陈汉林, 厉子龙, 等. 2014. 塔里木早二叠世大火成岩省. 中国科学: 地球科学, 44: 187–199
- 殷树铮, 郭文建, 李新宁, 等. 2024. 准噶尔盆地西部坳陷带二叠系构造-地层层序与盆地演化. 古地理学报, 26: 132–149
- 尹凤娟, 刘洪福, 华洪. 2002. 三塘湖盆地晚二叠世芦草沟组孢粉组合. 石油与天然气地质, 23: 392–396
- 曾治平, 王金铨, 李超, 等. 2024. 准噶尔盆地沙湾凹陷二叠系下乌尔禾组烃源岩类型与热演化研究. 地质科学, 59: 330–34
- 张奎华, 曹忠祥, 王越, 等. 2020. 博格达地区中二叠统芦草沟组沉积相及沉积演化. 油气地质与采收率, 27: 1–12
- 张林, 杜小弟. 2017. 新疆伊犁盆地二叠系主力烃源岩与勘探方向新认识. 中国矿业, 26: 202–206
- 张璐瑾. 2003. 新疆克拉玛依地区佳木河组若干重要孢粉类型. 微体古生物学报, 20: 358–364
- 张瑞杰, 曹剑, 边立曾, 等. 2024. 古亚洲洋关闭期准噶尔湖发现“海退遗种”红藻及其成烃有效性. 中国科学: 地球科学, 54: 2898–2916
- 张义杰, 齐雪峰, 程显圣. 1992. 准噶尔盆地东部帐篷沟地区中二叠统平地泉组的沉积环境和对比问题. 新疆石油地质, 13: 217–226
- 张元元, 曾宇珂, 唐文斌. 2021. 准噶尔盆地西北缘二叠纪原型盆地分析. 石油科学通报, 6: 333–343
- 张志杰, 成大伟, 周川闽, 等. 2021. 准噶尔盆地石树沟凹陷平地泉组细粒岩特征及其对准东北地区页岩油勘探的指示意义. 天然气地球科学, 32: 562–576
- 赵治信, 杨河新, 朱希梅. 1986. 新疆克拉玛依山石钱滩组牙形石及其时代. 微体古生物学报, 3: 193–203
- 甄宇, 陈旋, 焦立新, 等. 2024. 东疆地区石炭纪-二叠纪构造古地理与原型盆地演化. 古地理学报, 26: 78–99
- 支东明, 宋永, 何文军, 等. 2019. 准噶尔盆地中-下二叠统页岩油地质特征, 资源潜力及勘探方向. 新疆石油地质, 40: 389–401
- 支东明, 唐勇, 何文军, 等. 2021. 玛湖凹陷下二叠统风城组常规-非常规油气有序共生与全油气系统成藏模式. 石油勘探与开发, 48: 1–14
- 支东明, 李建忠, 陈旋, 等. 2023. 吐哈盆地油气勘探新领域, 新类型及资源潜力. 石油学报, 44: 2122–2140
- 支东明, 李建忠, 周志超, 等. 2024. 三塘湖盆地油气勘探开发新领域, 新类型及资源潜力. 石油学报, 45: 115–132
- 朱日祥, 赵盼, 万博, 等. 2023. 新特提斯单向俯冲的动力学机制. 科学通报, 68: 1699–1708
- 朱日祥, 张旺, 王华建, 等. 2025. 多圈层驱动的油气形成与富集理论. 中国科学: 地球科学, 55: 2603–2620
- 朱荣. 1986. 新疆东准噶尔克拉美丽地区胜利沟剖面石钱滩组有孔虫化石. 新疆石油地质, 7: 53–59
- 朱荣, 林甲兴. 1987. 新疆准噶尔盆地南缘祁家沟组有孔虫化石及其地层意义. 石油实验地质, 9: 321–331
- Alexeev D V, Biske Y S, Djenchuraeva A V, et al. 2019. Lower Moscovian limestones of the Bogdashan Range (NW China) as an indicator of cessation of arc magmatism in the Junggar region. *Stratigr Geol Correl*, 27: 51–72
- Angielczyk K D, Liu J, Sidor C A, et al. 2022. The stratigraphic and geographic occurrences of Permo-Triassic tetrapods in the Bogda Mountains, NW China—Implications of a new cyclostratigraphic framework and Bayesian age model. *J African Earth Sci*, 195: 104655
- Bastos L P H, Rodrigues R, Pereira E, et al. 2021. The birth and demise of the vast epicontinental Permian Irati-Whitehill sea: Evidence from organic geochemistry, geochronology, and paleogeography. *Palaeogeogr*

- Palaeoclimatol Palaeoecol, 562: 110103
- Bowring J F, McLean N M, Bowring S A. 2011. Engineering cyber infrastructure for U-Pb geochronology: Tripoli and U-Pb\_Redux. *Geochem Geophys Geosyst*, 12: Q0AA19
- Cao J, Xia L, Wang T, et al. 2020. An alkaline lake in the Late Paleozoic Ice Age (LPIA): A review and new insights into paleoenvironment and petroleum geology. *Earth-Sci Rev*, 202: 103091
- Cao Z, Liu G D, Xiang B L, et al. 2017. Geochemical characteristics of crude oil from a tight oil reservoir in the Lucaogou Formation, Jimusar Sag, Junggar Basin. *AAPG Bull*, 101: 39–72
- Carroll A R, Wartes M A. 2003. Organic carbon burial by large Permian lakes, northwest China. In: Chan M A, Archer A W, eds. *Extreme depositional environments: Mega end members in geologic time*. Boulder, Colorado: Geol Soc Am Spec Pap, 370: 91–104
- Carroll A R, Brassell S C, Graham S A. 1992. Upper Permian lacustrine oil shales, southern Junggar basin, northwest China. *AAPG Bull*, 76: 1874–1902
- Carroll A R, Graham S A, Hendrix M S, et al. 1995. Late Paleozoic tectonic amalgamation of northwestern China: Sedimentary record of the northern Tarim, northwestern Turpan, and southern Junggar Basins. *GSA Bull*, 107: 571–594
- Chen X, Shu L, Santosh M. 2011. Late Paleozoic post-collisional magmatism in the Eastern Tianshan Belt, Northwest China: New insights from geochemistry, geochronology and petrology of bimodal volcanic rocks. *Lithos*, 127: 581–598
- Chen X, Jin X, Zhu X, et al. 2024. Geochemical characteristics of the upper carboniferous source rocks in a terrestrial-marine transitional environment from the shuangjingzi area, Junggar Basin: Insights into palaeoenvironment, palaeoclimate, and palaeovegetation. *Mar Pet Geol*, 167: 106996
- Choulet F, Chen Y, Wang B, et al. 2011. Late Paleozoic paleogeographic reconstruction of Western Central Asia based upon paleomagnetic data and its geodynamic implications. *J Asian Earth Sci*, 42: 867–884
- Condon D J, Schoene B, McLean N M, et al. 2015. Metrology and traceability of U-Pb isotope dilution geochronology (EARTHTIME Tracer Calibration Part I). *Geochim Cosmochim Acta*, 164: 464–480
- Day M O, Ramezani J, Bowring S A, et al. 2015. When and how did the terrestrial mid-Permian mass extinction occur? Evidence from the tetrapod record of the Karoo Basin, South Africa *Proc R Soc B*, 282: 20150834
- Du Q, Han Z, Shen X, et al. 2018. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the post-collisional volcanic rocks in eastern Xinjiang Province, NW China: Implications for the tectonic evolution of the Junggar terrane. *Int Geol Rev*, 60: 339–364
- Fang Y N, Wu C D, Wang Y Z, et al. 2019. Topographic evolution of the Tianshan Mountains and their relation to the Junggar and Turpan Basins, Central Asia, from the Permian to the Neogene. *Gondwana Res*, 75: 47–67
- Fielding C R, Frank T D, Isbell J L. 2008. The late Paleozoic ice age—A review of current understanding and synthesis of global climate patterns. In: Fielding C R, Frank T D, Isbell J L, eds. *Resolving the Late Paleozoic Ice Age in Time and Space*. Geol Soc Am Spec Pap, 441: 343–354
- Fielding C R, Frank T D, Birgenheier L P. 2023. A revised, late Palaeozoic glacial time-space framework for eastern Australia, and comparisons with other regions and events. *Earth-Sci Rev*, 236: 104263
- Frank T D, Shultis A I, Fielding C R. 2015. Acme and demise of the late Palaeozoic ice age: A view from the southeastern margin of Gondwana. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 418: 176–192
- Gastaldo R A, Kamo S L, Neveling J, et al. 2015. Is the vertebrate-defined Permian-Triassic boundary in the Karoo Basin, South Africa, the terrestrial expression of the end-Permian marine event? *Geology*, 43: 939–942
- Geng H Y, Sun M, Yuan C, et al. 2011. Geochemical and geochronological study of early Carboniferous volcanic rocks from the West Junggar: Petrogenesis and tectonic implications. *J Asian Earth Sci*, 42: 854–866
- Gong D, Liu Z, Zhou C, et al. 2024. Carboniferous-Permian interglacial warming and volcanism temporally linked to the world's oldest alkaline lake deposit of the Fengcheng Formation, NW China. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 654: 112441
- Griffis N P, Montañez I P, Mundil R, et al. 2019. Coupled stratigraphic and U-Pb zircon age constraints on the late Paleozoic icehouse-to-greenhouse turnover in south-central Gondwana. *Geology*, 47: 1146–1150
- Hackley P C, Fishman N, Wu T, et al. 2016. Organic petrology and geochemistry of mudrocks from the lacustrine Lucaogou Formation, Santanghu Basin, northwest China: Application to lake basin evolution. *Int J Coal Geol*, 168: 20–34
- Han B F, Guo Z J, Zhang Z C, et al. 2010. Age, geochemistry, and tectonic implications of a late Paleozoic stitching pluton in the North Tian Shan suture zone, western China. *GSA Bull*, 122: 627–640
- Han S, Sang S, Liang J, et al. 2019. Characteristics and genesis of diachronous Carboniferous volcano-sedimentary sequences: Insights from geochemistry, petrology and U-Pb dating in the North Junggar basin, China. *Int Geol Rev*, 61: 404–423
- Han Y, Zhao G. 2018. Final amalgamation of the Tianshan and Junggar orogenic collage in the southwestern Central Asian Orogenic Belt: Constraints on the closure of the Paleo-Asian Ocean. *Earth-Sci Rev*, 186: 129–152
- He J, Zhang Y, Wang Y, et al. 2018. Late Paleozoic post-collisional setting of the North Tianshan, NW China: New insights from geochronology, geochemistry and Sr-Nd isotopic compositions of the Permian Nileke volcanic rocks. *Lithos*, 318–319: 314–325
- Horstwood M S A, Košler J, Gehrels G, et al. 2016. Community-derived standards for LA-ICP-MS U-(Th)-Pb geochronology—Uncertainty propagation, age interpretation and data reporting. *Geostand Geoanal Res*, 40: 311–332
- Hu X, Zhang X, Xie J, et al. 2023. Sedimentary characteristics and hydrocarbon-generation potential of the Permian Pingdiquan formation in Dongdaohaizi Sag, Junggar Basin, Northwest China. *ACS Omega*, 8: 35653–35669
- Huang H, Gao Y, Ma C, et al. 2021. Astronomical constraints on the development of alkaline lake during the Carboniferous-Permian Period in North Pangea. *Glob Planet Change*, 207: 103681
- Jaffey A H, Flynn K F, Glendenin L E, et al. 1971. Precision measurement of half-lives and specific activities of  $^{235}\text{U}$  and  $^{238}\text{U}$ . *Phys Rev C*, 4: 1889–1906
- Jia C Z. 2017. Breakthrough and significance of unconventional oil and gas to classical petroleum geology theory. *Pet Explor Dev*, 44: 1–10
- Li N B, Niu H C, Shan Q, et al. 2015. Two episodes of Late Paleozoic A-type magmatism in the Qunjisayi area, western Tianshan: Petrogenesis and tectonic implications. *J Asian Earth Sci*, 113: 238–253
- Li X, Liu Y, Li Q, et al. 2009. Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multicollector SIMS without external standardization. *Geochem Geophys Geosyst*, 10: 2009GC002400
- Luo Q, Gong L, Qu Y, et al. 2018. The tight oil potential of the Lucaogou Formation from the southern Junggar Basin, China. *Fuel*, 234: 858–871
- Luo T, Liao Q, Chen J, et al. 2017. A record of post-collisional transition: Evidence from geochronology and geochemistry of Palaeozoic volcanic rocks in the eastern Junggar, Central Asia. *Int Geol Rev*, 59: 1256–1275
- Marchetti L, Forte G, Kustatscher E, et al. 2022. The Artinskian Warming Event: An Euramerican change in climate and the terrestrial biota during the early Permian. *Earth-Sci Rev*, 226: 103922
- McLean N M, Bowring J F, Bowring S A. 2011. An algorithm for U-Pb isotope dilution data reduction and uncertainty propagation. *Geochem*

- Geophys Geosyst, 12: Q0AA18
- McLean N M, Condon D J, Schoene B, et al. 2015. Evaluating uncertainties in the calibration of isotopic reference materials and multi-element isotopic tracers (EARTHTIME Tracer Calibration Part II). *Geochim Cosmochim Acta*, 164: 481–501
- Mishra D P, Singh V P, Saxena A, et al. 2022. Palaeoecology and depositional setting of an Early Permian (Artinskian) mire based on a multi-proxy study at the Jagannath coal mine (Talcher Coalfield), Mahanadi Basin, India. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 601: 111124
- Montañez I P, Tabor N J, Niemeier D, et al. 2007. CO<sub>2</sub>-forced climate and vegetation instability during Late Paleozoic deglaciation. *Science*, 315: 87–91
- Nance R D, Gutiérrez-Alonso G, Keppie J D, et al. 2010. Evolution of the Rheic ocean. *Gondwana Res*, 17: 194–222
- Nie S, Rowley D B, Van der Voo R, et al. 1993. Paleomagnetism of late Paleozoic rocks in the Tianshan, northwestern China. *Tectonics*, 12: 568–579
- Niu Y, Liu C, Shi G R, et al. 2018. Unconformity-bounded Upper Paleozoic megasequences in the Beishan Region (NW China) and implications for the timing of the Paleo-Asian Ocean closure. *J Asian Earth Sci*, 167: 11–32
- Paton C, Woodhead J D, Hellstrom J C, et al. 2010. Improved laser ablation U-Pb zircon geochronology through robust downhole fractionation correction. *Geochem Geophys Geosyst*, 11: Q0AA06
- Peng H, Yang W, Wan M, et al. 2025. Refugium amidst ruins: Unearthing the lost flora that escaped the end-Permian mass extinction. *Sci Adv*, 11: eads5614
- Qiao J, Luo Q, Zhang K, et al. 2023. Geochemistry and organic petrography of the Middle Permian Lucaogou alkaline lacustrine oil shale in the southern Junggar Basin, China: Implications for formation conditions and organic matter accumulation. *Int J Coal Geol*, 268: 104198
- Qiu Z, Tao H, Zou C, et al. 2016. Lithofacies and organic geochemistry of the Middle Permian Lucaogou Formation in the Jimusar Sag of the Junggar Basin, NW China. *J Pet Sci Eng*, 140: 97–107
- Ramezani J, Beveridge T L, Rogers R R, et al. 2022. Calibrating the zenith of dinosaur diversity in the Campanian of the Western Interior Basin by CA-ID-TIMS U-Pb geochronology. *Sci Rep*, 12: 16026
- Rankey E C. 1997. Relations between relative changes in sea level and climate shifts: Pennsylvanian–Permian mixed carbonate-siliciclastic strata, western United States. *GSA Bull*, 109: 1089–1100
- Richey J D, Montañez I P, Goddard Y, et al. 2020. Influence of temporally varying weatherability on CO<sub>2</sub>-climate coupling and ecosystem change in the late Paleozoic. *Clim Past*, 16: 1759–1775
- Schoene B, Crowley J L, Condon D J, et al. 2006. Reassessing the uranium decay constants for geochronology using ID-TIMS U-Pb data. *Geochim Cosmochim Acta*, 70: 426–445
- Scotese C R. 2021. An Atlas of Phanerozoic paleogeographic maps: The seas come in and the seas go out. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 49: 679–728
- Sharps R, Li Y, McWilliams M, et al. 1992. Paleomagnetic investigation of upper Permian sediments in the south Junggar Basin, China. *J Geophys Res*, 97: 1753–1765
- Shellnutt J G. 2014. The Emeishan large igneous province: A synthesis. *Geosci Front*, 5: 369–394
- Song D, Xiao W, Ao S, et al. 2024. Contemporaneous closure of the Paleo-Asian Ocean in the Middle-Late Triassic: A synthesis of new evidence and tectonic implications for the final assembly of Pangea. *Earth-Sci Rev*, 253: 104771
- Stephenson M H. 2018. Permian palynostratigraphy: A global overview. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 450: 321–347
- Su Y P, Zheng J P, Griffin W L, et al. 2010. Zircon U-Pb and Hf isotopes of volcanic rocks from the Batamayineishan Formation in the eastern Junggar Basin. *Chin Sci Bull*, 55: 4150–4161
- Sun F, Hu W, Cao J, et al. 2022. Sustained and intensified lacustrine methane cycling during Early Permian climate warming. *Nat Commun*, 13: 4856
- Tabor N J, Poulsen C J. 2008. Palaeoclimate across the Late Pennsylvanian–Early Permian tropical palaeolatitudes: A review of climate indicators, their distribution, and relation to palaeophysiographic climate factors. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 268: 293–310
- Tang W, Song Y, He W, et al. 2022. Source-to-sink evolution of syn-rift alkaline lake sediments in the Lower Permian Fengcheng Formation, Junggar Basin, NW China: Evidence from petrology, detrital zircon geochronology and geochemistry. *J Asian Earth Sci*, 232: 105049
- Tang Y, Zheng M, Wang X, et al. 2022. The floating astronomical time scale for the terrestrial Early Permian Fengcheng Formation from the Junggar Basin and its stratigraphic and palaeoclimate implications. *Geol J*, 57: 4842–4856
- Tang Y, Ye X, Wang X, et al. 2023. A synthesis of Carboniferous stratigraphy in Xinjiang, Northwest China with emphasis on regional and global correlations. *J Asian Earth Sci*, 241: 105476
- Tang Y, Cao J, He W J, et al. 2024. The whole petroleum system with ordered coexistence of conventional and unconventional hydrocarbons: Case from the Junggar Basin, China. *AAPG Bull*, 108: 1261–1290
- Thompson J M, Meffre S, Danyushevsky L. 2018. Impact of air, laser pulse width and fluence on U-Pb dating of zircons by LA-ICPMS. *J Anal At Spectrom*, 33: 221–230
- Tian J, Liu J, Zhang Z, et al. 2017. Hydrocarbon-generating potential, depositional environments, and organisms of the Middle Permian Tarlong Formation in the Turpan-Hami Basin, northwestern China. *GSA Bull*, 129: 1252–1265
- Torsvik T H, Cocks L R M. 2016. Earth History and Palaeogeography: Cambridge University Press. 317
- Vai G B. 2003. Development of the palaeogeography of Pangaea from Late Carboniferous to Early Permian. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 196: 125–155
- Vermeesch P. 2018. IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology. *Geosci Front*, 9: 1479–1493
- Wali G, Wang B, Cluzel D, et al. 2018. Carboniferous–Early Permian magmatic evolution of the Bogda Range (Xinjiang, NW China): Implications for the Late Paleozoic accretionary tectonics of the SW Central Asian Orogenic Belt. *J Asian Earth Sci*, 153: 238–251
- Wang B, Shu L S, Cluzel D, et al. 2007. Geochemical constraints on Carboniferous volcanic rocks of the Yili Block (Xinjiang, NW China): Implication for the tectonic evolution of Western Tianshan. *J Asian Earth Sci*, 29: 148–159
- Wang J, Wu C, Li Z, et al. 2020. The Pennsylvanian composite volcanism in the Bogda Mountains, NW China: Evidence for postcollisional rift basins. *Lithosphere*, 2020: 8852440
- Wang T, Cao J, Carroll A R, et al. 2021. Oldest preserved sodium carbonate evaporite: Late Paleozoic Fengcheng Formation, Junggar Basin, NW China. *GSA Bull*, 133: 1465–1482
- Wang T, Cao J, Xia L, et al. 2022. Revised age of the Fengcheng Formation, Junggar Basin, China: Global implications for the late Paleozoic ice age. *Glob Planet Change*, 208: 103725
- Ward R F, Kendall C G S C, Harris P M. 1986. Upper Permian (Guadalupian) facies and their association with hydrocarbons—Permian basin, west Texas and New Mexico. *AAPG Bull*, 70: 239–262
- Wilde S A. 2015. Final amalgamation of the Central Asian Orogenic Belt in NE China: Paleo-Asian Ocean closure versus Paleo-Pacific plate subduction—A review of the evidence. *Tectonophysics*, 662: 345–362
- Wu H, Hu W, Wang Y, et al. 2021. Depositional conditions and accumulation models of tight oils in the middle Permian Lucaogou

- Formation in Junggar Basin, northwestern China: New insights from geochemical analysis. *AAPG Bull*, 105: 2477–2518
- Wu Q, Ramezani J, Zhang H, et al. 2021. High-precision U-Pb age constraints on the Permian floral turnovers, paleoclimate change, and tectonics of the North China block. *Geology*, 49: 677–681
- Wu Q, Zhang H, Ramezani J, et al. 2024. The terrestrial end-Permian mass extinction in the paleotropics postdates the marine extinction. *Sci Adv*, 10: eadi7284
- Xiao W J, Han C M, Yuan C, et al. 2008. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of central Asia. *J Asian Earth Sci*, 32: 102–117
- Xiao Y, Zhang H, Shi J, et al. 2011. Late Paleozoic magmatic record of East Junggar, NW China and its significance: Implication from zircon U-Pb dating and Hf isotope. *Gondwana Res*, 20: 532–542
- Xie W, Luo Z Y, Xu Y G, et al. 2016. Petrogenesis and geochemistry of the Late Carboniferous rear-arc (or back-arc) pillow basaltic lava in the Bogda Mountains, Chinese North Tianshan. *Lithos*, 244: 30–42
- Yang W, Feng Q, Liu Y, et al. 2010. Depositional environments and cyclo- and chronostratigraphy of uppermost Carboniferous-Lower Triassic fluvial-lacustrine deposits, southern Bogda Mountains, NW China—A terrestrial paleoclimatic record of mid-latitude NE Pangea. *Glob Planet Change*, 73: 15–113
- Yang W, Wan M, Crowley J L, et al. 2021. Paleoenvironmental and paleoclimatic evolution and cyclo- and chrono-stratigraphy of upper Permian-Lower Triassic fluvial-lacustrine deposits in Bogda Mountains, NW China—Implications for diachronous plant evolution across the Permian-Triassic boundary. *Earth-Sci Rev*, 222: 103741
- Yin J, Long X, Yuan C, et al. 2013. A Late Carboniferous-Early Permian slab window in the West Junggar of NW China: Geochronological and geochemical evidence from mafic to intermediate dikes. *Lithos*, 175–176: 146–162
- Yu K, Cao Y, Qiu L, et al. 2019. Depositional environments in an arid, closed basin and their implications for oil and gas exploration: The lower Permian Fengcheng Formation in the Junggar Basin, China. *AAPG Bull*, 103: 2073–2115
- Zhang D, Huang B, Zhao G, et al. 2021. Quantifying the extent of the Paleozoic Asian Ocean during the Late Carboniferous to Early Permian. *Geophys Res Lett*, 48: e2021GL094498
- Zhang Y, Pe-Piper G, Piper D J W, et al. 2013. Early Carboniferous collision of the Kalamaili orogenic belt, North Xinjiang, and its implications: Evidence from molasse deposits. *GSA Bull*, 125: 932–944
- Zhang Z, Yuan X, Wang M, et al. 2018. Alkaline-lacustrine deposition and paleoenvironmental evolution in Permian Fengcheng Formation at the Mahu sag, Junggar Basin, NW China. *Pet Explor Dev*, 45: 1036–1049
- Zhao X, Seltnann R, Xue C, et al. 2023. Orogenic cyclicality and episodic tectono-magmatic processes in the formation of the Paleozoic northern Yili magmatic arc, Central Asian Orogenic Belt. *GSA Bull*, 136: 2137–2156
- Zhong Y T, Luo Z Y, Mundil R, et al. 2022. Constraining the duration of the Tarim flood basalts (northwestern China): CA-TIMS zircon U-Pb dating of tuffs. *GSA Bull*, 134: 325–334
- Zou C N, Zhu R K, Chen Z Q, et al. 2019. Organic-matter-rich shales of China. *Earth-Sci Rev*, 189: 51–78

(责任编辑: 朱茂炎)