

沉积学报
Acta Sedimentologica Sinica
ISSN 1000-0550, CN 62-1038/P

《沉积学报》网络首发论文

题目: 塔里木盆地库车河剖面有机碳同位素地层学及三叠系—侏罗系界线
作者: 方琳浩, 彭博, 邓胜徽, 卢远征, 张新智, 邱若原, 彭佳里, 张小宇, 鲜本忠, 师生宝
DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2022.123
收稿日期: 2022-08-29
网络首发日期: 2022-11-01
引用格式: 方琳浩, 彭博, 邓胜徽, 卢远征, 张新智, 邱若原, 彭佳里, 张小宇, 鲜本忠, 师生宝. 塔里木盆地库车河剖面有机碳同位素地层学及三叠系—侏罗系界线[J/OL]. 沉积学报. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.123>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

塔里木盆地库车河剖面有机碳同位素地层学及三叠系—侏罗系界线

方琳浩^{1,2}, 彭博³, 邓胜徽⁴, 卢远征⁴, 张新智⁵, 邱若原^{1,2}, 彭佳里^{1,2}, 张小宇^{1,2}, 鲜本忠^{1,2}, 师生宝^{1,2}

1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

2. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

3. 中国石油杭州地质研究院, 浙江杭州 310023

4. 中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院, 北京 100083

5. 中国地质调查局自然资源实物地质资料中心, 河北三河 065201

摘要 三叠纪—侏罗纪之交发生了地史上五次最大规模之一的生物灭绝事件、中大西洋大火成岩省喷发、泛大陆进一步裂解导致的中大西洋开启以及大气 CO₂ 浓度急剧升高等。然而该时期中国各板块主要发育陆相沉积, 其三叠系—侏罗系界线(TJB)很难与定义于海相地层的全球层型剖面 and 点(GSSP)进行精细对比。本文应用基于 C3 植物的碳同位素地层学, 进行了两次独立地、系统地以高等植物木质部为研究对象的采样和测试, 获得了可以指示同期大气 CO₂ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 演化和进行全球等时对比的碳同位素地层曲线。并在植物大化石和孢粉的生物地层约束基础上, 首次完成了库车河剖面与海相三叠纪末期生物大灭绝事件(ETE)底界和 TJB 的精细对比; 推测与全球其他剖面 ETE 等时的地层界线位于 38 层底部附近, 与 TJB 的 GSSP 等时地层界线位于 41 层底部附近。海相与陆相的 ETE 和 TJB 层位附近均出现了 $\delta^{13}\text{C}$ 负偏, 指示全球性的碳同位素的波动, 推论该时期发生了全球规模的、地表圈层的碳储库扰动。

关键词 三叠系—侏罗系界线; 生物大灭绝; 地层对比; 碳同位素地层学; 塔里木盆地

第一作者简介 方琳浩, 男, 1982 年出生, 博士, 副教授, 碳同位素地层学、事件地层学和沉积学, E-mail: linhao.fang@cup.edu.cn

文献标志码 A

0 引言

距今约 201 Ma 的三叠纪—侏罗纪之交(Triassic-Jurassic boundary, TJB)发生了显生宙以来五次最大规模之一的生物集群灭绝事件, 在属一级别上至少有 50% 的海洋生物和陆地生物灭绝^[1-2], 被称为三叠纪末期生物大灭绝(end-Triassic mass extinction, ETE)^[3-6]。同期, 中大西洋火成岩省(Central Atlantic Magmatic Province, CAMP)爆发和泛大陆(Pangea)进一步裂解致使中大西洋开启^[7], 深刻地影响了其后约 2 亿年全球板块构造格局。根据植物叶片化石的外表皮细胞上的气孔密度(stomatal density, SD)和气孔指数(stomatal index, SI), 推断早侏罗世初大气中的 CO₂ 浓度升高到了晚三叠世末的 2~4 倍, 浓度高达 2 500 ppm 以上^[8-11]。

根据升高的CO₂浓度,推测对应的全球平均温度升高3 °C~4 °C^[8]。在随着泛大陆裂解的构造作用和温室效应主导的气候共同作用下,早侏罗世全球海平面总体呈上升趋势,但有相对短时的海平面下降^[12-13];有研究认为海平面变化引起大洋缺氧,对ETE起到了关键作用^[14-17],但也有学者报道了不同的证据和推论^[18]。同期,无论热带和非热带的海洋中碳酸盐岩相或硅质岩相环境中,海绵类、双壳类、珊瑚、腕足类都发生显著的灭绝^[19];海洋中的初级生产者,由钙质超微类转换成有机质壳类的鞭毛藻和疑源类为主^[20],暗示海洋酸化的发生。陆地上出现与白垩纪末蕨类植物爆发类似的现象,有些地区记录到短暂的蕨类植物孢粉含量激增(持续小于400 kyr)^[21-23]。由地层中丝炭含量对岩石质量做归一化的统计数据显示,森林火灾发生的频率显著增加^[24]。地球表层系统可交换的无机碳库和有机碳库中碳同位素强烈波动(carbon isotope excursion, CIE)^[4,15,18,25-29],显著波动的CIE与ETE和TJB密切关联^[4,30-36],并在全球范围内被广泛地记录^[4,8,15,37]。具体地,在地层中从下至上包括初始负偏(I-CIE)和主负偏(M-CIE)两次,它们可与CAMP三个主要的喷发期次中两次相关联;I-CIE可能对应CAMP最初的侵位和喷发,M-ICE可能对应CAMP喷发最剧烈期次之后(第三期之前)的生态系统开始恢复时期^[38-43]。

目前,在奥地利 Kuhjoch 的三叠系—侏罗系 GSSP (“金钉子”)剖面 and 同盆地内邻近剖面,取得了若干条厘米级分辨率有机碳同位素地层曲线^[35]。另外,基于 C3 植物的有机碳同位素地层学取得了多方面进展,包括:植物从大气中固碳过程中的同位素分馏的植物生理学研究^[44-45]、正演的植物培育实验^[46-47]、微生物作用和成岩作用过程对于样品记录原始值改变的影响^[48-51]以及地质实证数据^[52-54]和地质实证数据的回归分析^[55]方面的成果,且大气均一周期远小于百年尺度^[56]。以上成果为利用有机碳同位素地层学恢复地史时期大气中 CO₂ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 演化以及进行全球等时地层对比夯实了基础。从地球系统科学的角度对重大地质事件深入的、全球性的研究,依赖于不同剖面之间的精细等时对比,进而区分不同剖面记录的地质事件的先后次序,推断其因果关系和第一驱动力。但通常由于缺乏跨海陆的、全球性可对比的化石,使得海陆间地层对比存在巨大挑战。在中国晚三叠世末—早侏罗世主要发育陆相沉积,生物地层很难与 TJB 的 GSSP 海相地层有效地对比^[57]。本文尝试以新疆塔里木盆地库车河剖面为例,利用陆相有机碳同位素地层学进行跨海陆地层的精细对比。

1 地质背景和地层(年代)框架

库车河剖面位于中国新疆阿克苏地区库车市北约 50 km (图 1),处塔里木盆地北缘,属库车坳陷构造单元。在三叠纪,古特提斯洋俯冲向北,使得盆地内中北部发育多个隆升和

拗陷带，总体上呈现为规模巨大的前陆盆地^[60]。至侏罗纪，塔里木盆地的构造演化由新特提斯洋控制，以伸展构造、正断层为特征，形成断陷盆地^[61]。在三叠纪—侏罗纪，库车河剖面位于北纬 30°~40° 附近（图 1a）^[62-63]。本研究目的层包括三叠系塔里奇克组以及侏罗系阿合组，13~49 层（层号据王招明等^[59]），厚度约 270 m。地层呈单斜状产出，沉积连续无明显间断。其中 13~31 层属塔里奇克组下段顶部至中段，为灰色、褐灰色中厚层状含砾粗砂岩和砂岩、灰色中厚层状粉砂岩和泥质粉砂岩、黑灰色粉砂质泥岩和泥岩夹煤层组成的正韵律层。32~37 层属塔里奇克组上段，为灰、褐灰色细—中砂岩和粉砂岩与深灰、灰黑色粉砂质泥岩和泥岩组成正向韵律层。38~49 层属阿合组底部，为灰白色、褐灰色含砾粗砂岩、含砾中砂岩的正韵律互层，部分夹细—中砾岩^[59]（图 1c）。

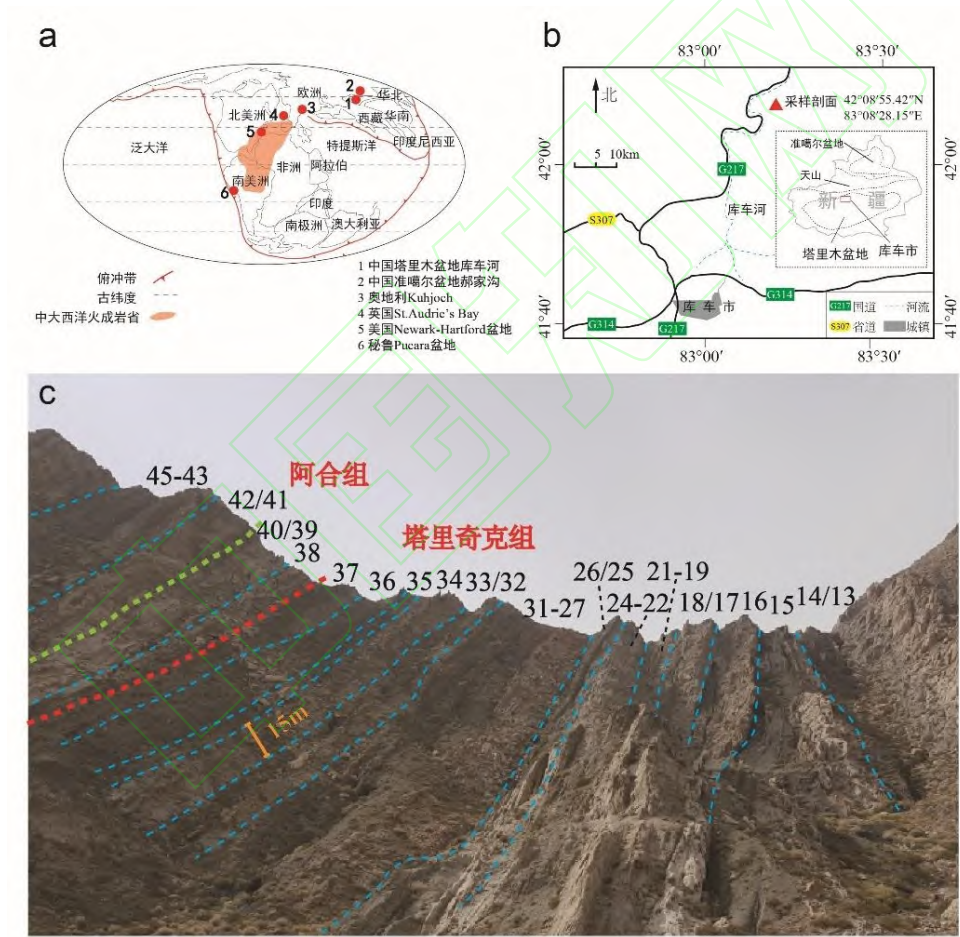


图 1 研究剖面的位置和露头照片

(a) 晚三叠世全球古地理图，据 Scotese^[58]修改；(b) 库车河剖面位置交通图；(c) 库车河剖面露头照片，层号据王招明等^[59]

Fig.1 Paleogeographic and modern location maps, and photo of an outcrop in the Kuqa section, Tarim Basin

(a) Late Triassic global paleogeographic map (modified from Scotese^[58]); (b) modern location of the Kuqa section; (c) outcrop in the Kuqa, Tarim Basin (bed No. after Wang *et al.* ^[59])

综合岩性地层对比、宏体植物化石与孢粉组合，阿合组—塔里奇克组的岩性地层界线被前人厘定为该剖面的三叠系—侏罗系界线^[64-66]。塔里奇克组发育 *Dictyophyllidites* -

Aratrisporites - *Parataeniaesporites* 孢粉组合 (DAP组合) 的上亚组合; 阿合组发育 *Disacciatrileti-Cyathidites* 孢粉组合 (DC组合)。塔里奇克组上部和阿合组下部的孢粉组合显示了从三叠纪向侏罗纪逐步过渡的特征^[59,65]。汇总的孢粉数据显示, 在38层以下孢粉种属有突变发生, *Alisporites auritus*, *Minutossaccus fusiformis*, *Osmuntacidites alpinus*, *O. elagans*, *O. wellmanii* 等种属在仍存在, 至38层阿合组再未出现。同时, *Asseretospora* sp., *Piceites podocarpoides*, *Quadraeculina enigmata*, *Q. anellaeformis*, *Q. minor* 在37层首现。在38层开始出现孢粉 *Abietinaepollenites* sp., *Alisporites* sp., *Podocarpidites* sp., *Piceaepollenites complanatifomis*, *P. sp.*, *Pinuspollenites* sp.^[59]。以上孢粉种属数据表明, 在37层与38层之间存在重要的生物时限带的界线, 并与塔里奇克组和阿合组的岩性地层界线吻合, 被前人厘定为三叠系—侏罗系界线^[59,65], 但未对ETE底界和TJB进行区分。

2 样品采集与实验方法

在库车河剖面, 三叠系—侏罗系发育丰富的有机质碎屑, 为进行陆相碳同位素地层学研究提供了宝贵的材料。本研究在库车河剖面进行了两次独立地采样工作。2010 年第一批, 采样从塔里奇克组 13 层至阿合组 49 层。主要采集两类样品: 丝炭和煤质木化石 (或其碎屑); 当这两种样品不发育时, 以黑色碳质页岩或者碳质泥岩作为补充。2017 年第二批, 采样从塔里奇克组 16 层至阿合组 45 层, 采样方法与 2010 年相同, 但第二批样品中的 41~45 层整体发育砂岩, 所以此层样品以粉砂和细砂岩为主。两次共取得 69 份样品, 均采集于未明显风化的岩层中。选取具有代表性的丝炭和煤质木化石样品, 进行光学显微镜观察和扫描电镜 (SEM) 观察。KQ14(04) 为丝炭样品, 采自塔里奇克组顶部 (图 2a1~a3)。KQ18(04) 为煤质木化石样品, 采于塔里奇克组顶部 (图 2b1~b3)。

对于有机碳同位素测试的样品, 将丝炭或煤质木化石约 1 g 装入 50 mL 离心管内, 加入容积三分之二的去离子水, 用超声波清洗表面杂质, 重复该步骤直至去离子水不再浑浊。之后在样品的离心管内加入 3 mol/L 的盐酸, 55 °C 水浴中加热并震荡持续约 3 h。倒掉盐酸, 重复前一步实验直至加入的盐酸与样品在水浴条件下充分反应后, 盐酸仍保持无色为止。之后再用去离子水在离心管内漂洗样品至 pH 为中性, 然后在烘箱中以 55 °C 放置 48~72 h, 至完全烘干。对于黑色碳质页岩、碳质泥岩、粉砂和细砂岩样品, 用去离子水超声波清洗后烘干, 粉碎至 200 目, 称量样品 4~5 g 放入 50 mL 离心管中, 加入 3 mol/L 的盐酸在 55 °C 水浴中加热并震荡, 持续约 3 h。后面的步骤与丝炭和煤质木化石类样品的前处理步骤相同。以上步骤除去潜在的无机碳酸根和可能破坏实验设备的硫化物。最后, 用电子天平称取约 50

mg 样品，放入 5 mm×8 mm 锡杯中封装，在 MAT-253 稳定同位素质谱仪上进行碳同位素测试，每 10 个样品中加入一个平行样品和两个标样。最终获得有机碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 的数据结果采用 PDB 标准，绝对误差 $\leq 0.2\%$ 。第一批样品在英国牛津大学地球科学系地球化学实验室完成前处理，在英国牛津大学地理系和环境系、古人类和历史艺术实验室完成测试；第二批样品在中国石油大学（北京）油气资源与探测国家重点实验室完成前处理和测试。

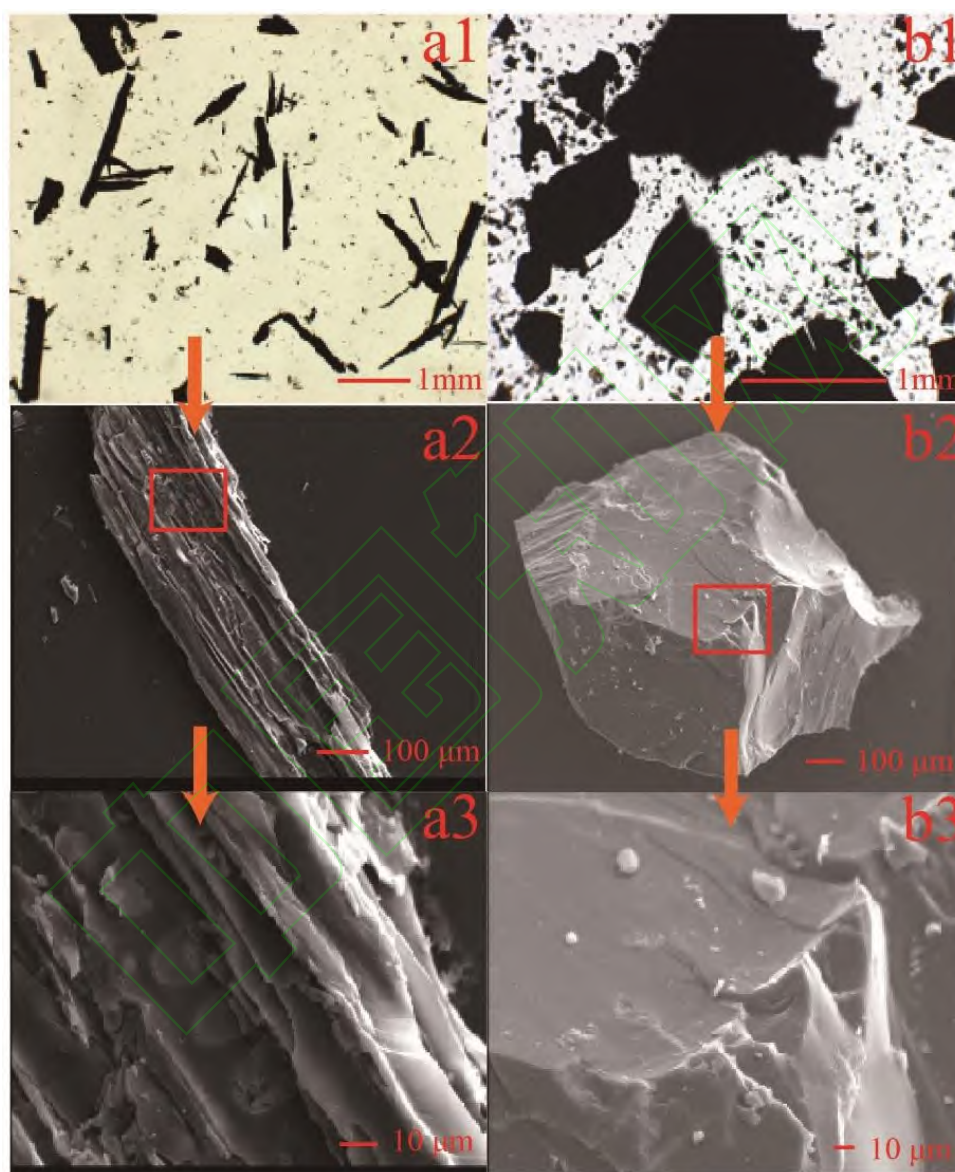


图2 木化石有机碳同位素样品在光学显微镜下和扫描电镜下的显微特征观察

(a1) 透射光显微镜下丝炭特征性长宽比的形态；(a2, a3) 扫描电镜下丝炭样品保存了细胞壁生物结构；(b1) 透射光显微镜下煤质木化石的形态特征；(b2, b3) 扫描电镜下煤质木化石受相等静岩压力下的形态特征

Fig.2 The observation of wood fossil samples under a light microscope and scanning electron microscope (SEM)
(a1) characteristic length to width ratio of charcoal using a transmitted light microscope, (a2, a3) preserved biological structures of a cell wall using SEM; (b1) morphological characteristics of coalified wood fossils using a transmitted light microscope, (b2, b3) morphological characteristics of coalified wood fossils due to equal static rock pressure using SEM)

3 结果

3.1 丝炭和煤化木化石显微观察

丝炭在透射光显微镜下, 黑色不透明, 有较高的反光度, 一般长宽比大于 5, 呈特征性的“长条状”(图 2a1)。因为丝炭在沉积埋藏前, 由野火的作用下经历了无氧或缺氧条的高温烘烤, 其主体高分子成分的纤维素和木质素脱氢脱氧, 同时部分支链脱落。纤维素的结构在 380 °C~400 °C 之间几乎全部遭到破坏^[67], 变得容易破碎, 但木质素分子的维管束的支撑结构得以保留, 呈现特征性长宽比的宏观以及显微结构。丝炭在扫描电镜下, 可观察到原始植物细胞膜遭到破坏, 但细胞壁得以保存, 并且在野火缺氧烘烤的裂解作用下, 其结构得以固化, 在后期的压实成岩过程容易完整保存(图 2a2, a3, SEM 照片)。

煤质木化石在透射光显微镜下, 不透明为暗黑色, 一般长宽比小于 3, 棱角较为清晰(图 2b1)。当沉积埋藏深度小于 4 m, 一般为有氧条件埋藏, 微生物会参与纤维素和木质素分解^[68], 深于 4 m 之后地层氧含量接近零, 降解纤维素和木质素的微生物因需氧无法继续起主导作用, 压实成岩作用成为主导; 有机质成熟度随着地温逐渐增高, 进入成煤(煤化)阶段, 经历泥煤、褐煤、烟煤、无烟煤的递进过程, 化学上以聚缩作用为主。煤质木化石在扫描电镜下, 可见原始的微观木质结构基本被均一化压实破坏, 局部偶尔保留(图 2b2, b3, SEM 照片)。原因是煤化成岩过程中静围岩压各方向上近似, 最终形成长宽比近似的显微和宏观结构。在中生代, 可以形成丝炭和煤化木化石的沉积有机物均为 C3 植物来源(此时 C4 植物还未繁盛)。根据对多块代表性样品的显微观察, 显示全岩有机物中主体为保存良好的、没有强烈生物降解作用的 C3 植物成分。

3.2 有机碳同位素地层曲线结果

2010 年和 2017 年两次分别独立采样测试, 得到库车河剖面有机碳同位素地层曲线(图 3), 数据见表 1。根据有机碳同位素地层曲线的变化特征, 从下至上划分为三段(图 3)。第一段(塔里奇克组 13~33 层): 约 170 m 厚, 属塔里奇克组中上部。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{wood}}$ 主要分布范围 -24.5‰至 -26.5‰, 总体上较稳定。第二段(塔里奇克组 34~37 层): 约 20 m 厚, 是塔里奇克组顶部。在此段内 $\delta^{13}\text{C}_{\text{wood}}$ 出现了两次强烈的波动。第一次在 35 层底部达 2.1‰; 第二次位于 37 层近顶部, 负偏至 -26.2‰后, 在 1 m 的地层厚度内正向偏移至 -22.5‰, 随后急剧负偏至 -26.6‰, 本段内达到了 4.1‰的波动幅度。第三段(阿合组 38~49 层): 约 80 m 厚, 为阿合组的下部。本段总体呈较轻的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{wood}}$ 特征, 约 -25.5‰至 -27.4‰。并在 43 层底部处出现了整个剖面上的碳同位素最低值 -27.4‰; 在 38 层顶部也记录到了一次快速负偏, 幅度

达 1.4‰，在 1 m 厚范围内由-25.8‰负偏至-27.2‰。

表 1 有机碳同位素数据

Table 1 Organic carbon isotopic data of the Kuqa section

样品编号	层号	厚度/m	$\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ / (‰, PDB)	样品编号	层号	厚度/m	$\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ / (‰, PDB)
KQ10-23	46-49	81.63	-27.0	KQ2(04)	13-14	-172.10	-25.5
KQ10-22	46-49	75.32	-26.7	KQ17-y01	43-45	61.48	-25.4
KQ10-21	46-49	75.02	-26.0	KQ17-y02	43-45	57.21	-25.9
KQ10-20	46-49	71.38	-26.8	KQ17-y03	43-45	55.01	-25.7
KQ10-17	41-42	33.17	-27.4	KQ17-y04	43-45	52.71	-25.3
KQ10-16	41-42	32.17	-26.7	KQ17-y05	43-45	50.89	-26.0
KQ10-15	39-40	22.30	-26.6	KQ17-y06	43-45	43.81	-26.2
KQ10-14	39-40	21.50	-25.7	KQ17-y07	43-45	39.96	-25.4
KQ10-13	39-40	20.70	-26.0	KQ17-y08	43-45	37.14	-27.1
KQ10-12	39-40	15.90	-26.7	KQ17-y09	41-42	32.55	-26.2
KQ10-11	39-40	12.69	-26.3	KQ17-y10	41-42	31.78	-26.4
KQ10-10	39-40	12.54	-27.2	KQ17-34	41-42	29.14	-25.6
KQ10-9	39-40	12.19	-25.8	KQ17-32	39-40	22.10	-26.5
KQ17(04)	38	8.08	-25.6	KQ17-f16	38	3.00	-25.6
KQ10-7	38	6.84	-26.1	KQ17-x42(2)	38	0.30	-25.4
KQ10-6	38	4.73	-25.7	KQ17-x42	38	0.25	-24.4
KQ10-5	38	1.43	-26.1	KQ17-x41	38	0.15	-25.0
KQ10-4	38	1.03	-26.6	KQ17-x40	37	-0.35	-25.2
KQ10-3	38	0.98	-22.5	KQ17-f12	36	-8.29	-24.8
KQ10-2	38	0.78	-26.3	KQ17-f04	34	-19.92	-25.9
KQ10-1	36	-9.55	-25.1	KQ17-x39	34	-20.40	-23.6
KQ10-162	35	-18.55	-25.1	KQ17-x38	34	-22.40	-26.0
KQ10-164	34	-20.75	-24.3	KQ17-x37-1	34	-22.80	-22.5
KQ10-165	34	-22.40	-23.7	KQ17-x31	25-31	-44.54	-24.9
KQ17(04)	34	-23.28	-25.8	KQ17-x32	25-31	-45.33	-24.2
KQ10-168	32-33	-34.95	-25.8	KQ17-x29	25-31	-51.6	-25.6
KQ10-171(31-1)	25-31	-40.52	-26.0	KQ17-x25	22-24	-88.60	-26.4
KQ10-172(30-1)	25-31	-43.11	-24.7	KQ17-x18-2	19-21	-99.72	-24.0
KQ10-173(29-1)	25-31	-46.47	-26.5	KQ17-x17	17-18	-101.46	-25.7
KQ15(04)	25-31	-79.8	-25.4	KQ17-x16	17-18	-102.33	-25.5
KQ14(04)	19-21	-93.34	-25.1	KQ17-x13	17-18	-104.94	-25.8
KQ12(04)	19-21	-97.89	-25.6	KQ17-x11	17-18	-107.03	-25.2
KQ8(04)	15-16	-111.07	-26.5	KQ17-x08	15-16	-114.09	-25.3
KQ7(04)	15-16	-118.93	-25.7	KQ17-c6	13-14	-143.31	-25.7
KQ4(04)	15-16	-142.80	-25.2				

2017 年采样结果显示（图 3），在 35 层内、39 层下部、43 层底部发生了较显著的碳同位素偏移。其中，在 35 层的碳同位素波动幅度达 3.5‰，可与第一次采样中 35 层底部的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{wood}}$ 波动相对比；在 39 层下部的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{wood}}$ 负偏至-26.3‰，波动幅度达 2.0‰，与第一次

结果有较好可重复性；43 底部的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{wood}}$ 负偏至 -27.2‰，特征同样可以与第一次结果对比，为本剖面的负偏极值。两次独立地采样的数据结果有较好的可重复性。从碳同位素曲线中可以看出，以 38 层底为界线，之上的碳同位素整体呈现显著的负偏，平均幅度为 2‰左右；38 层底界恰好与地层记录中多种植物孢粉灭绝界面和首现的界面吻合（图 3）。

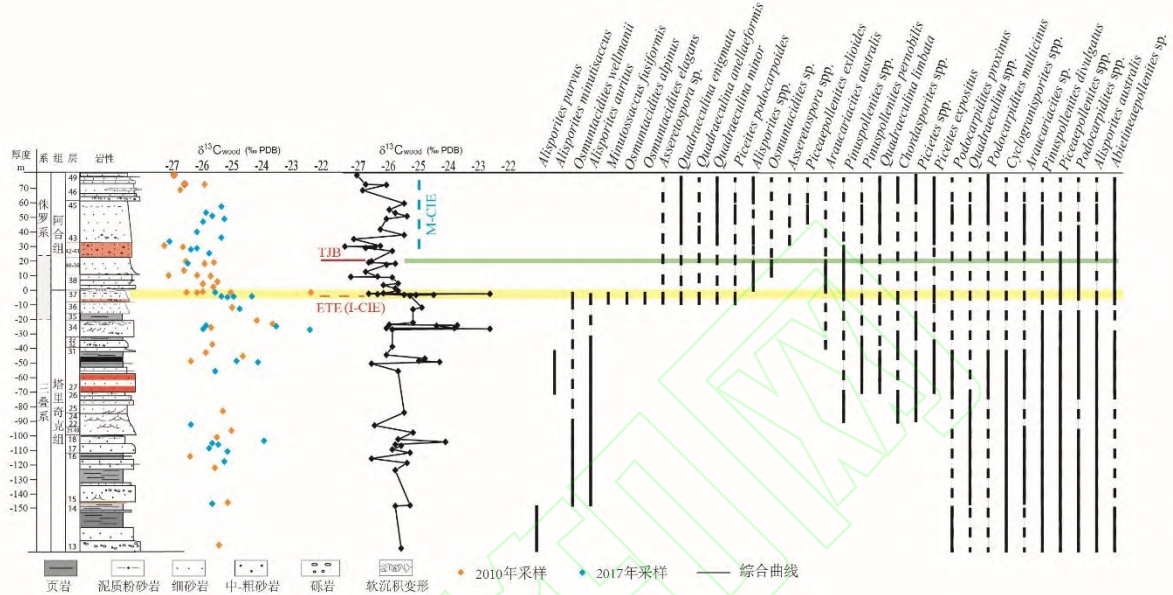


图 3 库车河剖面三叠系—侏罗系界线地层岩性地层、有机碳同位素地层曲线和孢粉分布（孢粉数据汇总自王招明等^[59]）

Fig.3 Lithostratigraphy, organic carbon-isotope curves, and spore-pollen occurrence across the Triassic-Jurassic boundary, Kuqa River section (data of spore-pollen occurrence combined from Wang *et al.*^[59])

4 讨论

4.1 库车河剖面与 GSSP 及全球经典 TJB 剖面的对比约束

TJB 的 GSSP 以菊石 *Psiloceras spelae tirolicum* 首现面定义，即赫塘阶的底界^[35]，定义于奥地利 Kuhjoch 的海相地层剖面。该界线之下约 0.5 m 是孢粉组合 *Trachysporites-Heliosporites* (TH)的内部两个地方性亚组带 D1 和 D2 的界线；另外菊石界线层之下 3.2 m 是孢粉 *Cerebropollenites thiergartii* 的首现面。TJB 向下约 6 m 以三叠纪菊石 *Choristoceras marshi* 的末现面代表 ETE 底界，也恰是孢粉组合 *Rhaetipollis-Limbosporites* (RL) 与 *Rhaetipollis-Porcellispora* (RP)的界线（图 4）。

英国 St.Audrie's Bay 也曾是侏罗系底界 GSSP 候选剖面之一，是在欧洲研究较深入的海相 TJB 剖面。该剖面 TJB 位于菊石 *Psiloceras planorbis* 的首现面之下约 5 m 处。而牙形石灭绝带位于菊石 *Psilocera planorbis* 的首现面下 7 m 处，推断该层为 ETE 底界层位^[4,77]；也与蕨类植物孢子的含量“脉冲式峰值（fern spike）”的出现同步（图 4）。

在美洲西部的泛大洋周缘, 秘鲁的 Pucara 海相盆地中含有菊石 *Psiloceras spelae* 可以与 TJB 的 GSSP 剖面直接对比^[30,75]。其下约 5 m 处为晚三叠世末菊石 *Choristoceras crickmayi* 的末现层, 为 ETE 底界(图 4)。由邻近的 3 个火山灰层中锆石同位素定年给出菊石 *Psiloceras spelae* 的首现面(即 TJB)的绝对年龄为 $201.31 \pm 0.18/0.38/0.43$ Ma^[76](图 4)。其他美洲西部的海相剖面, 如美国内华达的 Muller Canyon 剖面的 TJB 由相同的菊石 *Psiloceras spelae* 首现面标定^[78]。

在美洲东部的 Newark 裂谷盆地是 TJB 的经典陆相研究区, 其古地理位置位于 CAMP 作用区内, 发育了三期晚三叠世—早侏罗世的玄武岩岩浆。在该区对于湖相鱼类化石和爬行动物足迹化石研究较多, 但较缺乏与海相地层对比^[73-74]。依据陆相动物、孢粉化石以及铍元素异常数据, 起初 TJB 被定为盆地内 Orange Mountain (OM) 玄武岩层之下^[74]。北美东部陆相盆地的 TJB 与特提斯洋周缘海相剖面之间, 前人进行了旋回地层学和磁性地层学对比工作。在 Newark 盆地与英国 St. Audrie's Bay 的地磁极性地层序列对比的约束下, 由天文周期旋回的短偏心率周期建立浮动天文标尺进行矫正, 得到两个地区的 TJB 较精细的对比; 表明 Newark 盆地的 TJB 应位于 OM 玄武岩层之上^[72,79]。地层中 Hg 浓度峰值的对比结果也显示 TJB 位于 OM 玄武岩层之上^[80], 这表明 TJB 晚于早、中期的 CAMP 喷发。结合美国 Newark 盆地和秘鲁 Pucara 盆地的锆石 U-Pb 定年结果和英国 St. Audrie's Bay/East Quantoxhead 旋回地层学浮动天文标尺的推算, ETE 底界发生于 201.58 Ma, 持续约 160~270 kyr 至 TJB^[23,75-76]; 综合磁性地层学数据推断, ETE 底界与 TJB 的间隔时长为约 200~300 kyr^[81]。

值得注意的是, 无论是在 CAMP 区域的陆相盆地中(如美国 Newark 盆地)还是在特提斯洋西岸的海相地层中(如英国 St. Audrie's Bay 地区), 均在 ETE 底界之上紧邻 TJB 之下, 出现了蕨类孢子含量“脉冲式”激增, 指示该时段内蕨类植物迅速地、短期内主导了陆地生态系统, 但随后裸子植物快速复苏并再次占据主导(图 4)。在美国 Newark 盆地 OM 玄武岩之下的 ETE 层处, 三缝孢子含量在地层中占比从不足 10%激增到超过 80%; 而在英国 St. Audrie's Bay 地区, 晚三叠世—早侏罗世孢粉产出以裸子植物孢粉为主, 但是在 TJB 之下牙形石灭绝带之上约 0.5 m 处, 其 *Selaginellales* 属孢子含量激增占比超过 80%^[77]。该现象与白垩纪末界线的蕨类爆发非常相似^[73]。在 GSSP 的奥地利 Kuhjoch 剖晚三叠世末菊石 *Choristoceras marshi* 的最后出现层位(即 ETE 底界), 主要产出少量 *Ovalipollis pseudoalatus*, *Classopollis meyeriana* 和 *Classopollis torosus* 孢粉组合, 孢子丰度较少, 属于 *Rhaetipollis*-

Limbosporites 组合带。向上转变为 *Rhaetipollis-Porcellispora* 组合带, 孢子数量和种类迅速增加, 蕨类和苔藓类的孢子含量达 60%~80%左右, 此组合特征持续到了赫塘期早期^[77]。

三叠系—侏罗系在新疆北部的准噶尔盆地南缘发育非常连续, 郝家沟剖面是典型的陆相 TJB 剖面^[82-83]。郝家沟剖面植物组合和孢粉组合在郝家沟组和八道湾组之间变化明显, 在郝家沟组内 *Danaeopsis* 植物及 *Aratrisporites* 和 *Chordasporites* 等孢粉指示晚三叠世, 八道湾组内发育 *Coniopteris gaojiatianensis* 等指示早侏罗世^[84], 因此 TJB 位于郝家沟组顶部与八道湾组底部之间^[82,84]。另外, 在郝家沟组上部 43 层开始也有类似的蕨类孢子含量激增现象^[85], 可与奥地利 Kuhjoch、英国 St. Audrie's Bay 和美国 Newark 盆地的三个典型剖面的 ETE 事件层对比 (图 4)。

在库车河剖面尚未有孢粉丰度数据, 但塔里奇克组 37 层内出现了多种蕨类孢子和裸子植物花粉的首现, 如 *Asseretospora* sp., *Piceites podocarpoides*, *Quadraeculina anellaeformis*, *Q. enigmata*, *Q. minor*, 等^[59], 暗示较大规模的、陆相植被生态系统的波动; 推测可对比于郝家沟剖面 43~45 层, 并可对比于奥地利 Kuhjoch、英国 St. Audrie's Bay 和美国 Newark 盆地的剖面 (图 4)。综合库车河剖面生物地层及孢粉统计资料, 图 4 中汇总了与经典剖面的 ETE 底界和 TJB 层位的对比。综上, 综合的地层学研究成果为库车河剖面进行跨海、陆精细的地层厘定和对比提供了良好的约束。

4.2 碳同位素地层学对比

在 4.1 部分讨论的地层框架约束基础上, 对库车河剖面与 GSSP 剖面及其他经典剖面进行了碳同位素地层学精细对比。在奥地利 Kuhjoch 的 GSSP 剖面, 全岩有机质碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$) 曲线显示出 I-CIE 和 M-CIE 的显著特征^[25]。在剖面约 0 m 处出现了一次短暂的-7‰CIE, 即为 I-CIE, 与晚三叠世末菊石 *Choristoceras marshi* 末现面一致, 即 ETE 底界。在 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 迅速恢复之后, 在剖面约 6 m 处呈现幅度达-3‰的负偏, 其在 M-ICE 之下与侏罗纪菊石 *Psiloceras spelae tirolicum* 首现面一致, 即 TJB (图 4)。可以指示陆源高等植物碳源的长链正构烷烃的碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$) 地层曲线与全岩有机碳结果相似, I-CIE 幅度为-6‰^[26]。在英国 St. Audrie's Bay 剖面, I-CIE 位于 Cotham 组与 Langport 组交界, 牙形石带顶部, 呈现约 4‰的短暂负偏; I-CIE 上方约 5 m 处为 M-CIE, 幅度约为 2‰, 保持相对轻的碳同位素值, 一直持续至辛涅缪尔期, 菊石 *Psiloceras planorbis* 的首现面在此附近^[4]。美国的 Newark 盆地的湖相地层中记录了单体正构烷烃、陆源木质碎屑以及全岩有机质碳组分^[27], 在该剖面三叠系顶部的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$ 负偏幅度达约 4‰; 随后 $\delta^{13}\text{C}_{\text{alk}}$ 正偏幅度达 5‰。在郝家沟剖面, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 地层曲线在 42 层、43 层与 45 层之间呈现约 1.5‰~2‰的 CIE; 结合孢子激增层位、晕苯和

汞元素峰值出现的层位，推断 I-CIE 位于 43 层底部附近；49~51 层底部附近出现约 2‰的 M-CIE，此后地层向上为相对长期的、稳定的正向偏移趋势^[69,85-86]。

在库车河剖面，塔里奇克组 38 层底部附近（约 0 m 处）、39 层底部附近（约 10 m 处）和 43 层底部（约 30 m 处），分别出现了三次碳同位素负偏，幅度约 1.7‰~2.5‰（图 3）。碳同位素地层曲线负偏特征显著，推断 I-CIE 位于 38 层底部附近。另外，宏观的沉积环境在 38 层附近有较大转变，从沼泽和河流为主的沉积环境变为以较大规模的河流相沉积为主，以煤线或薄煤层为特征的沼泽相沉积在 38 层之上不再出现（图 3）。38 层也开始记录到新孢子种属的出现，暗示可与地层中蕨类孢子激增事件对比；结合其他生物年代地层约束（图 4），本研究认为 ETE 底界位于塔里奇克组与阿合组之间的岩性地层界线，即 38 层底部附近。从 43 层底部附近出现的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{wood}}$ 约 2.5‰负偏，以及此层位之上开始的相对长期的、稳定的正向偏移趋势，可以推定此为 M-CIE 起始层位；而全球海陆地层对比的结果明确显示，以海相菊石首现面定义的 TJB 位于 M-CIE 之下的次一级碳同位素负偏层位（图 4），综合孢粉记录 *Piceapollenites exlioides*, *Asseretospora* spp.和 *Osmuntacidites* sp.等种属在 39~43 层附近的首现（图 3），暗示生态系的逐步恢复，推论本剖面的 TJB 位于 41 层底部附近。

4.3 三叠纪—侏罗纪之交地表圈层碳储库波动的潜在成因

在美国内华达州的海相 TJB，在准噶尔盆地和四川盆地的陆相 TJB 附近，均观测到了异常高的、幔源的汞元素丰度^[80,86-87]，表明 CAMP 虽然直接作用区集中在现今非洲西北部、北美洲东部和南美洲北部，其影响的规模可达全球。在南美洲秘鲁的 Pucara 盆地，三叠纪系—侏罗系发现多层火山灰层，取得了锆石年代学结果^[76]。在摩洛哥 Argana 盆地最早的 CAMP 玄武岩年龄老于 Newark 盆地的^[88]，由于 Newark 盆地的玄武岩层是直接覆盖于该盆地的 ETE 事件层之上，可认为与灭绝事件近同期，因此表明 ETE 的发生在 CAMP 的大规模喷发之后^[81,88]。

晚三叠世末全球多处海相和陆相地层中，同期都记录了碳同位素地层曲线正、负偏的显著波动，根据基于 C3 植物的碳同位素地层学理论，推论该时期大气中 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 亦发生显著波动，指示全球性的、地表圈层的碳储库的波动。CAMP 大火成岩省的岩浆作用，导致大量幔源碳释放到大气中，迅速地使大气 CO_2 浓度增加 2~4 倍^[8,10-11,89-90]。但 CAMP 爆发释放的幔源 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-5‰左右，与大气 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 长期稳定值-5‰~-7‰相近（或略偏重），无法引起负向约 2‰的偏移；2‰的负偏仅可能源于外来轻碳同位素源注入到大气中，或者海、陆初级生产者遭遇毁灭性打击的结果——初级生产者优先固定轻碳同位素的生物泵作用

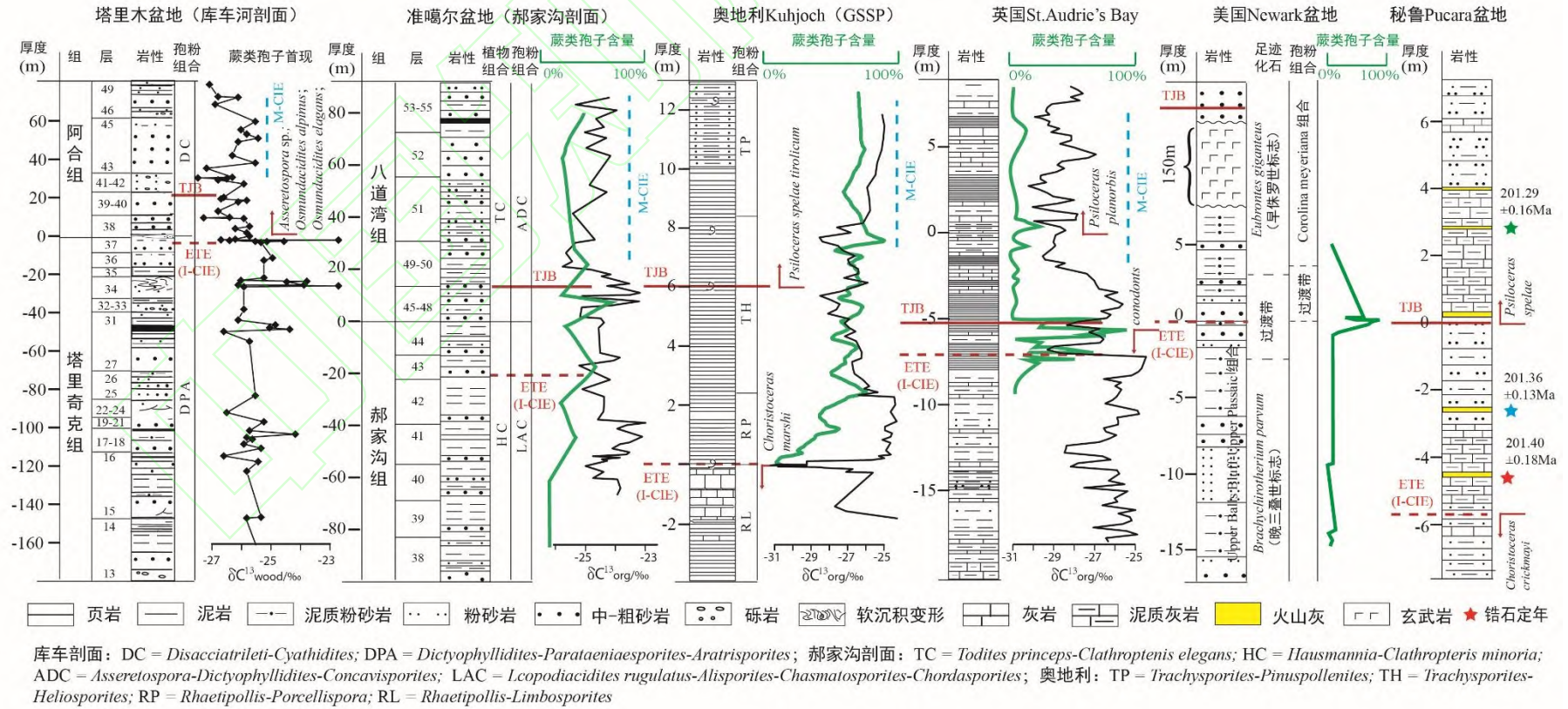


图4 库车河剖面的生物地层、碳同位素地层与全球三叠系—侏罗系界线典型剖面对比

郝家沟剖面引自文献[69,70-71], GSSP 剖面引自文献[25-26], St.Audrie's 剖面引自文献[4,72], Newark 盆地剖面引自文献[27,73-74], Pucara 盆地剖面引自文献[75-76]

Fig.4 Biostratigraphic and carbon-isotope stratigraphic correlation between the Kuqa River section and global classic sections across the Triassic-Jurassic Boundary

Haojiagou section cited from references [69,70-71], Global Stratotype Section and Point (GSSP) cited from references [25-26], St. Audrie's section cited from references [4,72], Newark section cited from references [27,73-74], and Pucara section cited from references[75-76]

全球规模地停摆；或者此两种原因混合。

轻碳同位素主要来源有潜在的三种情况之一，或其不同比例组合：第一，因板块构造裂解，造成的大陆架上失稳的生物成因 CH_4 气水合物释放（特征 $\delta^{13}\text{C}$ 值约-60‰）到大气中，其温室效应约是 CO_2 的 25 倍，约 30 年内 CH_4 全部转化成 CO_2 ^[4,54]；第二，全球性的森林火灾，植被（特征 $\delta^{13}\text{C}$ 值约-26‰）燃烧释放到大气中的 CO_2 ^[24]；第三，因全球升温，导致的南北极高纬度地区的或高海拔地区的永久冻土带中封存的生物成因甲烷气水合物（特征 $\delta^{13}\text{C}$ 值约-60‰）释放入到大气中^[91-92]。以上一种或多种轻碳源注入大气圈后，使得在海水中的碳酸盐岩中和 C3 植物中的碳同位素值呈现 2‰左右负偏的记录，呈现全球性的地球表层系统碳库的波动。未来对 CAMP 的玄武岩中挥发性物质的定量研究，以及其如何影响的全球生态系统并导致海陆生态系统的崩溃，可能是解开三叠纪末期一系列关键地质事件的钥匙。该事件的定量研究成果，对于当代全球碳库波动模型的建立和验证参数的优化，具有实证数据的借鉴意义。

5 结论

（1）在新疆塔里木盆地北缘的库车河剖面，两次独立地有机碳同位素地层学样品采集和测试，其结果具有较好地可重复性。

（2）在库车河剖面完成了跨海、陆的 TJB 碳同位素地层学对比。推断与全球性的 ETE 事件等时底界，位于 38 层底部附近；与 GSSP 等时的 TJB 地层界线，位于 41 层底部附近；ETE 底界与 TJB 的间隔时长为约 200~300 kyr。

（3）在 ETE 底界和 TJB 附近，陆相和海相的碳同位素地层曲线都有 2‰~7‰幅度不等的负偏。I-CIE（即 ETE 底界）与地层中孢粉含量“脉冲式”爆发事件的起始层位同期，表明蕨类植物响应于 ETE，其短暂地占据陆地生态系统优势生态位，暗示生态系统快速剧烈波动。M-CIE 的起始临近层位对应海相菊石首现定义的 TJB，此时的首现物种暗示着全球生态系统复苏的开始。

（4）全球多处海相和陆相地层中，同期都记录了碳同位素地层曲线正、负偏的显著波动，推论该地质时期大气中可能有轻碳源注入或者初级生产者遭遇毁灭性打击，或此两者共同作用，导致了全球性的、地表圈层的碳储库的波动。

致谢 感谢国家自然科学基金青年基金（编号：41502024）和中国石油大学（北京）青年拔尖人才项目（编号：2462014YJRC027）对本研究的资助；感谢英国牛津大学地理系和环境系，古人类和历史艺术实验室的 Peter W. Ditchfield 博士，对于本研究中第一批采集的

样品测试的协助与支持；感谢中国石油大学（北京）油气资源与探测国家重点实验室朱雷，对于本研究中第二批采集的样品测试的协助与支持。

参考文献 (References)

- [1] Sepkoski J J Jr. Patterns of Phanerozoic extinction: A perspective from global data bases[M]//Walliser O H. Global events and event stratigraphy in the Phanerozoic. Berlin, Heidelberg: Springer, 1996: 53-80.
- [2] McGhee G R Jr, Clapham M E, Sheehan P M, et al. A new ecological-severity ranking of major Phanerozoic biodiversity crises[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2013, 370: 260-270.
- [3] Pálffy J, Smith P L. Synchrony between Early Jurassic extinction, oceanic anoxic event, and the Karoo-Ferrar flood basalt volcanism[J]. *Geology*, 2000, 28(8): 747-750.
- [4] Hesselbo S P, Robinson S A, Surlyk F, et al. Terrestrial and marine extinction at the Triassic-Jurassic boundary synchronized with major carbon-cycle perturbation: A link to initiation of massive volcanism?[J]. *Geology*, 2002, 30(3): 251-254.
- [5] Lucas S G, Tanner L H. Tetrapod biostratigraphy and biochronology of the Triassic-Jurassic transition on the southern Colorado Plateau, USA[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 244(1/2/3/4): 242-256.
- [6] Akikuni K, Hori R S, Vajda V, et al. Stratigraphy of Triassic-Jurassic boundary sequences from the Kawhia coast and Awakino gorge, Murihiku Terrane, New Zealand[J]. *Stratigraphy*, 2010, 7(1): 7-24.
- [7] de Lamotte D F, Fourdan B, Leleu S, et al. Style of rifting and the stages of Pangea breakup[J]. *Tectonics*, 2015, 34(5): 1009-1029.
- [8] McElwain J C, Beerling D J, Woodward F I. Fossil plants and global warming at the Triassic-Jurassic boundary[J]. *Science*, 1999, 285(5432): 1386-1390.
- [9] Retallack G J. A 300-million-year record of atmospheric carbon dioxide from fossil plant cuticles[J]. *Nature*, 2001, 411(6835): 287-290.
- [10] Beerling D J, Berner R A. Biogeochemical constraints on the Triassic-Jurassic boundary carbon cycle event[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(3): 1036.
- [11] Steinthorsdottir M, Jeram A J, McElwain J C. Extremely elevated CO₂ concentrations at the Triassic/Jurassic boundary[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, 308(3/4): 418-432.
- [12] Hallam A. A review of the broad pattern of Jurassic sea-level changes and their possible causes in the light of current knowledge[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2001, 167(1/2): 23-37.
- [13] Lindström S, Erlström M. The Late Rhaetian transgression in southern Sweden: Regional (and global) recognition and relation to the Triassic-Jurassic boundary[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 241(3/4): 339-372.
- [14] Hallam A, Wignall P B. Mass extinctions and sea-level changes[J]. *Earth-Science Reviews*, 1999, 48(4): 217-250.
- [15] Pálffy J, Demény A, Hass J, et al. Carbon isotope anomaly and other geochemical changes at the Triassic-Jurassic boundary from a marine section in Hungary[J]. *Geology*, 2001, 29(11): 1047-1050.
- [16] Greene S E, Martindale R C, Ritterbush K A, et al. Recognising ocean acidification in deep time: An evaluation of the evidence for acidification across the Triassic-Jurassic boundary[J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 113(1/2): 72-93.
- [17] Jaraula C M B, Grice K, Twitchett R J, et al. Elevated pCO₂ leading to Late Triassic extinction, persistent photic zone euxinia, and rising sea levels[J]. *Geology*, 2013, 41(9): 955-958.
- [18] Hesselbo S P, Robinson S A, Surlyk F. Sea-level change and facies development across potential Triassic-Jurassic boundary horizons, SW Britain[J]. *Journal of the Geological Society*, 2004, 161(3): 365-379.
- [19] Kiessling W, Aberhan M, Brenneis B, et al. Extinction trajectories of benthic organisms across the Triassic-Jurassic boundary[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 244(1/2/3/4): 201-222.
- [20] van de Schootbrugge B, Tremolada F, Rosenthal Y, et al. End-Triassic calcification crisis and blooms of organic-walled 'disaster species'[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 244(1/2/3/4): 126-141.
- [21] van de Schootbrugge B, Quan T M, Lindström S, et al. Floral changes across the Triassic/Jurassic boundary linked to flood basalt volcanism[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(8): 589-594.
- [22] Bonis N R, Ruhl M, Kürschner W M. Climate change driven black shale deposition during the end-Triassic in the western Tethys[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 290(1/2/3/4): 151-159.
- [23] Ruhl M, Deenen M H L, Abels H A, et al. Astronomical constraints on the duration of the early Jurassic Hettangian stage and recovery rates following the end-Triassic mass extinction (St Audrie's Bay/East Quantoxhead, UK)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 295(1/2): 262-276.
- [24] Belcher C M, Mander L, Rein G, et al. Increased fire activity at the Triassic/Jurassic boundary in Greenland due to climate-driven floral change[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(6): 426-429.
- [25] Ruhl M, Kürschner W M, Krystyn L. Triassic-Jurassic organic carbon isotope stratigraphy of key sections in the western Tethys realm (Austria)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 281(3/4): 169-187.
- [26] Ruhl M, Bonis N R, Reichert G J, et al. Atmospheric carbon injection linked to end-Triassic mass extinction[J]. *Science*, 2011, 333(6041): 430-434.
- [27] Whiteside J H, Olsen P E, Eglinton T, et al. Compound-specific carbon isotopes from Earth's largest flood basalt eruptions directly linked to the end-Triassic mass extinction[J]. *Proceedings of the National Academy*

- of Sciences of the United States of America, 2010, 107(15): 6721-6725.
- [28] Bachan A, van de Schootbrugge B, Fiebig J, et al. Carbon cycle dynamics following the end-Triassic mass extinction: Constraints from paired $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ records[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2012, 13(9): Q09008.
- [29] van de Schootbrugge B, Wignall P B. A tale of two extinctions: Converging end-Permian and end-Triassic scenarios[J]. *Geological Magazine*, 2016, 153(2): 332-354.
- [30] Guex J, Bartolini A, Atudorei V, et al. High-resolution ammonite and carbon isotope stratigraphy across the Triassic–Jurassic boundary at New York Canyon (Nevada)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 225(1/2): 29-41.
- [31] Ward P D, Garrison G H, Haggart J W, et al. Isotopic evidence bearing on Late Triassic extinction events, Queen Charlotte Islands, British Columbia, and implications for the duration and cause of the Triassic/Jurassic mass extinction[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 224(3/4): 589-600.
- [32] van de Schootbrugge B, Payne J L, Tomasovych A, et al. Carbon cycle perturbation and stabilization in the wake of the Triassic-Jurassic boundary mass-extinction event[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, 9(4): Q04028.
- [33] Tanner L H. Cyclostratigraphic record of the Triassic: A critical examination[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2010, 334: 119-137.
- [34] Whiteside J H, Grogan D S, Olsen P E, et al. Climatically driven biogeographic provinces of Late Triassic tropical pangea[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(22): 8972-8977.
- [35] Hillebrandt A V, Krystyn L, Kürschner W M, et al. The global stratotype sections and point (GSSP) for the base of the Jurassic system at Kuhjoch (Karwendel Mountains, northern Calcareous Alps, Tyrol, Austria)[J]. *Episodes*, 2013, 36(3): 162-198.
- [36] Tanner L H. The Late Triassic world: Earth in a time of transition[M]. Cham: Springer, 2018: 91-125.
- [37] Williford K H, Ward P D, Garrison G H, et al. An extended organic carbon-isotope record across the Triassic–Jurassic boundary in the Queen Charlotte Islands, British Columbia, Canada[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 244(1/2/3/4): 290-296.
- [38] Marzoli A, Bertrand H, Knight K B, et al. Synchrony of the central Atlantic magmatic province and the Triassic-Jurassic boundary climatic and biotic crisis[J]. *Geology*, 2004, 32(11): 973-976.
- [39] Hesselbo S P, Jenkyns H C, Duarte L V, et al. Carbon-isotope record of the Early Jurassic (Toarcian) Oceanic Anoxic Event from fossil wood and marine carbonate (Lusitanian Basin, Portugal)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 253(3/4): 455-470.
- [40] Deenen M H L, Ruhl M, Bonis N R, et al. A new chronology for the end-Triassic mass extinction[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 291(1/2/3/4): 113-125.
- [41] Dal Corso J, Mietto P, Newton R J, et al. Discovery of a major negative $\delta^{13}\text{C}$ spike in the Carnian (Late Triassic) linked to the eruption of Wrangellia flood basalts[J]. *Geology*, 2012, 40(1): 79-82.
- [42] Davies J H F L, Marzoli A, Bertrand H, et al. End-Triassic mass extinction started by intrusive CAMP activity[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15596.
- [43] Zaffani M, Jadoul F, Rigo M. A new Rhaetian $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ record: Carbon cycle disturbances, volcanism, End-Triassic mass Extinction (ETE)[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 178: 92-104.
- [44] Farquhar G D, O'Leary M H, Berry J A. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves[J]. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1982, 9(2): 121-137.
- [45] Farquhar G D, Hubrick K T, Condon A G, et al. Carbon isotope fractionation and plant water-use efficiency[M]//Rundel P W, Ehleringer J R, Nagy K A. *Stable isotopes in ecological research*. New York: Springer-Verlag, 1989: 21-40.
- [46] Jahren A H, Arens N C, Harbeson S A. Prediction of atmospheric $\delta^{13}\text{CO}_2$ using fossil plant tissues[J]. *Reviews of Geophysics*, 2008, 46(1): RG1002.
- [47] Lomax B H, Knight C A, Lake J A. An experimental evaluation of the use of $\text{C}_3\delta^{13}\text{C}$ plant tissue as a proxy for the paleoatmospheric $\delta^{13}\text{CO}_2$ signature of air[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2012, 13(9): Q0A103.
- [48] Benner R, Fogel M L, Sprague E K, et al. Depletion of ^{13}C in lignin and its implications for stable carbon isotope studies[J]. *Nature*, 1987, 329(6141): 708-710.
- [49] Spiker E C, Hatcher P G. The effects of early diagenesis on the chemical and stable carbon isotopic composition of wood[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, 51(6): 1385-1391.
- [50] Mazeas L, Budzinski H, Raymond N. Absence of stable carbon isotope fractionation of saturated and polycyclic aromatic hydrocarbons during aerobic bacterial biodegradation[J]. *Organic Geochemistry*, 2002, 33(11): 1259-1272.
- [51] Morasch B, Richnow H H, Vieth A, et al. Stable isotope fractionation caused by glycol radical enzymes during bacterial degradation of aromatic compounds[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2004, 70(5): 2935-2940.
- [52] Hasegawa T. Cenomanian-Turonian carbon isotope events recorded in terrestrial organic matter from northern Japan[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1997, 130(1/2/3/4): 251-273.
- [53] Hasegawa T, Pratt L M, Maeda H, et al. Upper Cretaceous stable carbon isotope stratigraphy of terrestrial organic matter from Sakhalin, Russian Far East: A proxy for the isotopic composition of paleoatmospheric CO_2 [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2003, 189(1/2): 97-115.
- [54] Hesselbo S P, Gröcke D R, Jenkyns H C, et al. Massive dissociation of gas hydrate during a Jurassic oceanic

- anoxic event[J]. *Nature*, 2000, 406(6794): 392-395.
- [55] Arens N C, Jahren A H, Amundson R. Can C3 plants faithfully record the carbon isotopic composition of atmospheric carbon dioxide?[J]. *Paleobiology*, 2000, 26(1): 137-164.
- [56] Madden R A, Julian P R. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day Period[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1972, 29(6): 1109-1123.
- [57] 沙金庚. 中国侏罗纪年代地层学研究的现状[J]. *地层学杂志*, 2005, 29(2): 124-129. (Sha Jingeng. Current situation of the Jurassic chronostratigraphic studies in China[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2005, 29(2): 124-129.)
- [58] Scotese C R. Paleogeographic map archive[J]. Paleomap Project, 2001.
- [59] 王招明, 钟瑞, 赵培荣, 等. 库车前陆盆地露头区油气地质[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004. (Wang Zhaoming, Zhong Rui, Zhao Peirong, et al. *Petroleum geology of outcrops areas in Kuche foreland Basin*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.)
- [60] 贾承造. 塔里木盆地构造特征与油气聚集规律[J]. *新疆石油地质*, 1999, 20(3): 177-183. (Jia Chengzao. Structural characteristics and oil/gas accumulative regularity in Tarim Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 1999, 20(3): 177-183.)
- [61] 何登发, 贾承造, 李德生, 等. 塔里木多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(1): 64-77. (He Dengfa, Jia Chengzao, Li Desheng, et al. Formation and evolution of polycyclic superimposed Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(1): 64-77.)
- [62] 李永安, 孙东江, 郑洁. 新疆及周边古地磁研究与构造演化[J]. *新疆地质*, 1999, 17(3): 193-235. (Li Yongan, Sun Dongjiang, Zheng Jie. Paleomagnetic study and tectonic evolution of Xinjiang and its neighboring regions[J]. *Xinjiang Geology*, 1999, 17(3): 193-235.)
- [63] 方大钧, 沈忠悦, 王朋岩. 塔里木地块古地磁数据表[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2001, 28(1): 92-99. (Fang Dajun, Shen Zhongyue, Wang Pengyan. Paleomagnetic data of Tarim block[J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2001, 28(1): 92-99.)
- [64] 邓胜徽, 姚益民, 叶得泉, 等. 中国北方侏罗系(I)地层总述[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003. (Deng Shenghui, Yao Yimin, Ye Dequan, et al. *Jurassic system in the North of China (I)*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.)
- [65] 刘兆生. 塔里木盆地北缘三叠纪孢粉组合[J]. *古生物学报*, 1999, 38(4): 474-504. (Liu Zhaosheng. Triassic palynological assemblages from the northern margin in Tarim Basin of Xinjiang, NW China[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 1999, 38(4): 474-504.)
- [66] 刘兆生. 塔里木盆地北缘晚三叠世孢粉组合及三叠系-侏罗系界线[J]. *地层学杂志*, 1999, 23(2): 96-106. (Liu Zhaosheng. Palynological assemblage of the Late Triassic Tariqike Fm. and Triassic-Jurassic boundary on the northern Margin of the Tarim Basin, Xinjiang[J]. *Journal of Stratigraphy*, 1999, 23(2): 96-106.)
- [67] Yang H P, Yan R, Chen H P, et al. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis[J]. *Fuel*, 2007, 86(12/13): 1781-1788.
- [68] Harmon M E, Krankina O N, Sexton J. Decomposition vectors: A new approach to estimating woody detritus decomposition dynamics[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, 30(1): 76-84.
- [69] Fang Y N, Fang L H, Deng S H, et al. Carbon isotope stratigraphy across the Triassic-Jurassic boundary in the high-latitude terrestrial Junggar Basin, NW China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2021, 577: 110559.
- [70] 张新智, 方琳浩, 吴涛, 等. 准噶尔盆地郝家沟剖面三叠纪—侏罗纪之交孢粉组合与古气候[J]. *地质科学*, 2022, 57(4): 1-16. (Zhang Xinzhi, Fang Linhao, Wu Tao, et al. Palynological assemblages and palaeoclimate across the Triassic-Jurassic boundary in the Haojiagou section, southern Junggar Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2022, 57(4): 1-16.)
- [71] Zhang X Y, Lü P Z, Fang L H, et al. Biomarker evidence for deforestation across the Triassic-Jurassic boundary in the high palaeolatitude Junggar Basin, northwest China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2022, 600: 111074.
- [72] Hüsing S K, Beniest A, van der Boon A, et al. Astronomically-calibrated magnetostratigraphy of the Lower Jurassic marine successions at St. Audrie's Bay and East Quantoxhead (Hettangian-Sinemurian; Somerset, UK)[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 403: 43-56.
- [73] Fowell S J, Cornet B, Olsen P E. Geologically rapid Late Triassic extinctions: Palynological evidence from the Newark Supergroup[M]//Klein G O. *Pangea: Paleoclimate, tectonics, and sedimentation during accretion, zenith, and breakup of a supercontinent*. Geological Society of America, 1994: 197-206.
- [74] Olsen P E, Kent D V, Sues H D, et al. Ascent of dinosaurs linked to an iridium anomaly at the Triassic-Jurassic boundary[J]. *Science*, 2002, 296(5571): 1305-1307.
- [75] Schaltegger U, Guex J, Bartolini A, et al. Precise U-Pb Age Constraints for end-Triassic mass extinction, its correlation to volcanism and Hettangian post-extinction recovery[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 267(1/2): 266-275.
- [76] Schoene B, Guex J, Bartolini A, et al. Correlating the end-Triassic mass extinction and flood basalt volcanism at the 100 ka level[J]. *Geology*, 2010, 38(5): 387-390.
- [77] Bonis N R, Kürschner W M. Vegetation history, diversity patterns, and climate change across the Triassic/Jurassic boundary[J]. *Paleobiology*, 2012, 38(2): 240-264.
- [78] Ward P D, Garrison G H, Williford K H, et al. The organic carbon isotopic and paleontological record across the Triassic-Jurassic boundary at the candidate GSSP section at Ferguson Hill, Muller Canyon, Nevada,

- USA[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 244(1/2/3/4): 281-289.
- [79] Hüsing S K, Deenen M H L, Koopmans J G, et al. Magnetostratigraphic dating of the proposed Rhaetian GSSP at Steinbergkogel (Upper Triassic, Austria): Implications for the Late Triassic time scale[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 302(1/2): 203-216.
- [80] Percival L M E, Ruhl M, Hesselbo S P, et al. Mercury evidence for pulsed volcanism during the end-Triassic mass extinction[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(30): 7929-7934.
- [81] Kent D V, Olsen P E, Muttoni G. Astrochronostratigraphic polarity time scale (APTS) for the Late Triassic and Early Jurassic from continental sediments and correlation with standard marine stages[J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 166: 153-180.
- [82] Sha J G, Vajda V, Pan Y H, et al. Stratigraphy of the Triassic-Jurassic boundary successions of the southern margin of the Junggar Basin, northwestern China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2011, 85(2): 421-436.
- [83] Sha J G, Olsen P E, Pan Y H, et al. Triassic-Jurassic climate in continental high-latitude Asia was dominated by obliquity-paced variations (Junggar Basin, Ürümqi, China)[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(12): 3624-3629.
- [84] 卢远征, 邓胜徽. 新疆准噶尔盆地南缘郝家沟组和八道湾组底部孢粉组合及三叠系—侏罗系界线[J]. *地质学报*, 2005, 79(1): 15-27. (Lu Yuanzheng, Deng Shenghui. Triassic—Jurassic sporopollen assemblages on the southern margin of the Junggar Basin, Xinjiang and the T—J boundary[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(1): 15-27.)
- [85] 卢远征, 邓胜徽. 准噶尔盆地南缘三叠纪—侏罗纪之交的古气候[J]. *古地理学报*, 2009, 11(6): 652-660. (Lu Yuanzheng, Deng Shenghui. Palaeoclimate around the Triassic—Jurassic Boundary in southern margin of Junggar Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2009, 11(6): 652-660.)
- [86] Shen J, Yin R S, Zhang S, et al. Intensified continental chemical weathering and carbon-cycle perturbations linked to volcanism during the Triassic–Jurassic transition[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 299.
- [87] Thibodeau A M, Ritterbush K, Yager J A, et al. Mercury anomalies and the timing of biotic recovery following the end-Triassic mass extinction[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11147.
- [88] Blackburn T J, Olsen P E, Bowring S A, et al. Zircon U-Pb geochronology links the end-Triassic extinction with the central Atlantic magmatic province[J]. *Science*, 2013, 340(6135): 941-945.
- [89] Schaller M F, Wright J D, Kent D V. Atmospheric P_{CO_2} associated with the central Atlantic magmatic province[J]. *Science*, 2011, 331(6023): 1404-1409.
- [90] Schaller M F, Wright J D, Kent D V, et al. Rapid Emplacement of the Central Atlantic Magmatic province as a net sink for CO_2 [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 323-324: 27-39.
- [91] Schaefer K, Zhang T J, Bruhwiler L, et al. Amount and timing of permafrost carbon release in response to climate warming[J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2011, 63(2): 165-180.
- [92] Ciais P, Tagliabue A, Cuntz M, et al. Large inert carbon pool in the terrestrial biosphere during the Last Glacial Maximum[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(1): 74-79.

Organic Carbon Isotope Stratigraphy in the Kuqa Section, Tarim Basin, and the Corresponding Triassic-Jurassic Boundary

FANG LinHao^{1,2}, PENG Bo³, DENG ShengHui⁴, LU YuanZheng⁴, ZHANG XinZhi⁵,
QIU RuoYuan^{1,2}, PENG JiaLi^{1,2}, ZHANG XiaoYu^{1,2}, XIAN BenZhong^{1,2},
SHI ShengBao^{1,2}

1. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

2. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

3. PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, Hangzhou 310023, China

4. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

5. Cores and Samples Center of Natural Resources, CGS, Sanhe, Hebei 065201, China

Abstract: The boundary between the Triassic and Jurassic periods is a key moment in Earth history, which is distinguished by one of the five biggest mass extinctions, Pangea progressively breaking apart with the opening of the central Atlantic Ocean, eruption of Central Atlantic Magma Province, and a dramatic increase in the CO₂ concentration. However, the major occurrence of terrestrial sediments in China has been difficult to biostratigraphically correlate with the Global Stratotype Section and Point (GSSP) defined in marine strata from the Triassic-Jurassic boundary (TJB). Two new $\delta^{13}\text{C}$ wood stratigraphic curves in the Kuqa section were generated from two independent samplings, focusing on the materials within the charcoal and coalified fossil wood and representing the synchronous evolution of $\delta^{13}\text{C}$ in atmospheric CO₂. The consistency of the two results proves the repeatability of this study, verifying the method of carbon-isotope stratigraphic sampling. The terrestrial Kuqa section in the Tarim Basin is well correlated with the TJB of GSSP in Austria and other typical global sections, as constrained by the biostratigraphy of spore-pollen assemblages and mega-plant fossils. The end-Triassic mass extinction (ETE) beginning horizon and synchronous TJB of GSSP are located near the bottom of Beds 38 and 41, respectively. The obvious negative carbon isotope excursion took place at the of the ETE beginning horizon and TJB. The significant fluctuations of carbon-isotope records in both marine and terrestrial strata across the ETE and TJB have been discovered globally, suggesting a global perturbation of carbon reservoirs within Earth surface cycles during this period.

Key words: Triassic-Jurassic boundary; mass extinction; stratigraphic correlation; carbon isotope stratigraphy; Tarim Basin