

文章编号:1000-0550(2022)02-0473-11

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2020.103

三叠纪—侏罗纪之交准噶尔盆地南缘野火记录及全球对比

张新智^{1,2}, 吕沛宗^{1,2}, 方琳浩^{1,2}, 杨涵^{1,2}, 邓胜徽³, 卢远征³, 房亚男⁴, 张小宇^{1,2},
黄汝婷^{1,2}, 梁佳宝^{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. 中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院, 北京 100083

4. 中国科学院南京地质古生物研究所, 南京 210008

摘要 三叠纪—侏罗纪之交(距今约 201 Ma)是地球历史上的关键时期, 中大西洋火成岩省(Central Atlantic magmatic province, CAMP)快速地侵位和喷发, 给全球的表生系统带来巨大的环境压力, 其中之一是被广泛报道的同期野火事件。但此前的报道多集中在 CAMP 直接作用范围内, 对其是否具有全球性, 以及是否是受 CAMP 的因果影响还存有争论。在新疆准噶尔盆地南缘的陆相三叠系—侏罗系界线的郝家沟剖面, 进行系统地采样和测试分析发现: 该剖面三叠系—侏罗系界线附近地层存在燃烧成因的多环芳烃(PAHs)含量的异常高值, 并且与地层中指示 CAMP 侵位或喷发的 Hg/TOC 高峰值具有很好的对应关系, 为全球首个对 CAMP 活动区外的高纬度陆相地层中三叠纪—侏罗纪之交野火记录的报道。通过与全球其他三叠系—侏罗系典型剖面的综合对比, 推论 CAMP 活动与野火事件频率急剧地升高具有因果关系, 但并非直接火源点燃的关系; 推断野火频率激增可能是全球性事件, 并预测在全球更广的范围内相应地层中也可观测到类似现象。

关键词 三叠纪—侏罗纪; 准噶尔盆地; 汞浓度异常; 多环芳烃; 野火

第一作者简介 张新智, 男, 1996 年出生, 硕士研究生, 沉积学与化学地层学, E-mail: 1966597289@qq.com

通信作者 方琳浩, 男, 副教授, E-mail: linhao.fang@cup.edu.cn

中图分类号 P532 **文献标志码** A

0 引言

三叠纪—侏罗纪之交(Triassic-Jurassic Boundary, TJB)是显生宙以来地球历史上一个关键时期, 海洋和陆地生态系统崩溃, 发生了五次生物集群绝灭事件之一的生物大绝灭(end-Triassic mass extinction, ETE)^[1], 在属的级别上至少有 50% 的海洋生物和陆地生物绝灭^[2]。中大西洋火成岩省(Central Atlantic Magmatic Province, CAMP)爆发和中大西洋开启^[3], 深刻地影响并塑造了其约 2 亿年全球的板块构造格局^[1]。同期或准同期地, 还相伴发生了一系列重大的地质事件, 包括: 大气 CO₂ 浓度升高 2~4 倍^[4]、全球平均气温升高 3 °C~4 °C^[5]、全球海平面波动^[6]、海水酸化

和缺氧^[7]、无机碳同位素和有机碳同位素储库波动与 CAMP 在该时期不同的喷发期次相关联^[8]、陆相生态系统显示紧邻 ETE 层之上的“蕨类植物脉冲式(fern spike)”地短暂爆发, 持续时间 <400 kyr, 可能仅为 50~60 kyr^[9]、野火事件频率显著增加^[10-11]等。

但是野火事件频率增加的原因尚不清晰。目前主要有两种假说: 一种是 CAMP 喷发直接引燃作用区内的表生植被或者烃类储库^[12]; 另一种是因为 CAMP 作用影响全球的气候变化, 进而引起森林火灾频率增加^[11]。然而, 以往研究集中在受 CAMP 影响最为强烈的特提斯洋周围地区, 多为海相地层, 缺少陆相地层研究报道。对三叠纪—侏罗纪内陆高纬地区的研究是空白, 致使该时期的古气候演化研究缺乏

收稿日期: 2020-09-08; 收修改稿日期: 2020-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(41502024); 中国石油大学(北京)青年拔尖人才项目(2462014YJRC027) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41502024; Top Young Talents Program of China University of Petroleum (Beijing), No. 2462014YJRC027]

全球性的系统证据^[13]。不但影响了TJB时期野火事件起因的研究,也更因为缺乏来自陆地生态系统的实证数据,使得全球性地、系统性地理解同期海、陆系统的耦合作用无法深入。

作者在中国西北部的准噶尔盆南缘郝家沟剖面进行了系统的样品采集和测试分析。发现燃烧成因的多环芳烃类化合物(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)的浓度在TJB之交地层中急剧升高,达背景值的5~6倍,这是首次在CAMP活动区外的高纬度陆相地层中报道TJB之交的野火事件证据。进一步分析,发现燃烧成因的PAHs峰值与指示着CAMP岩浆活动同期的Hg元素浓度异常峰值具有明确的相关性。通过与全球多处TJB剖面的对比,本文对于TJB之交广泛发生的、野火事件频率急剧地升高的成因,进行了详细地探讨。

1 区域地质概况和地层年代格架

1.1 区域地质概况

准噶尔盆地位于中亚造山带西南缘、天山北缘(图1)^[14]。在石炭纪—早二叠世准噶尔盆地类型为陆缘裂陷盆地,中二叠世—侏罗纪为陆内拗陷盆地,白垩纪—新近纪为前陆盆地。依次经历海西、印支、燕山和喜马拉雅多期构造运动,发育多期沉积旋回,是典型的叠合盆地^[15]。在早—中三叠世,统一的准噶尔湖盆形成;到晚三叠世,湖盆空前扩大湖域普遍变深,半深湖区域辽阔,盆地边缘为浅湖相沉积。准噶尔盆地南缘的三叠系以辫状河—辫状河三角洲相的砂砾岩沉积为主,其下三叠统一中三叠统以含较多的砾岩沉积为特征^[16];下侏罗统八道湾组沉积相以河流相、辫状河三角洲和湖泊相为主^[17]。

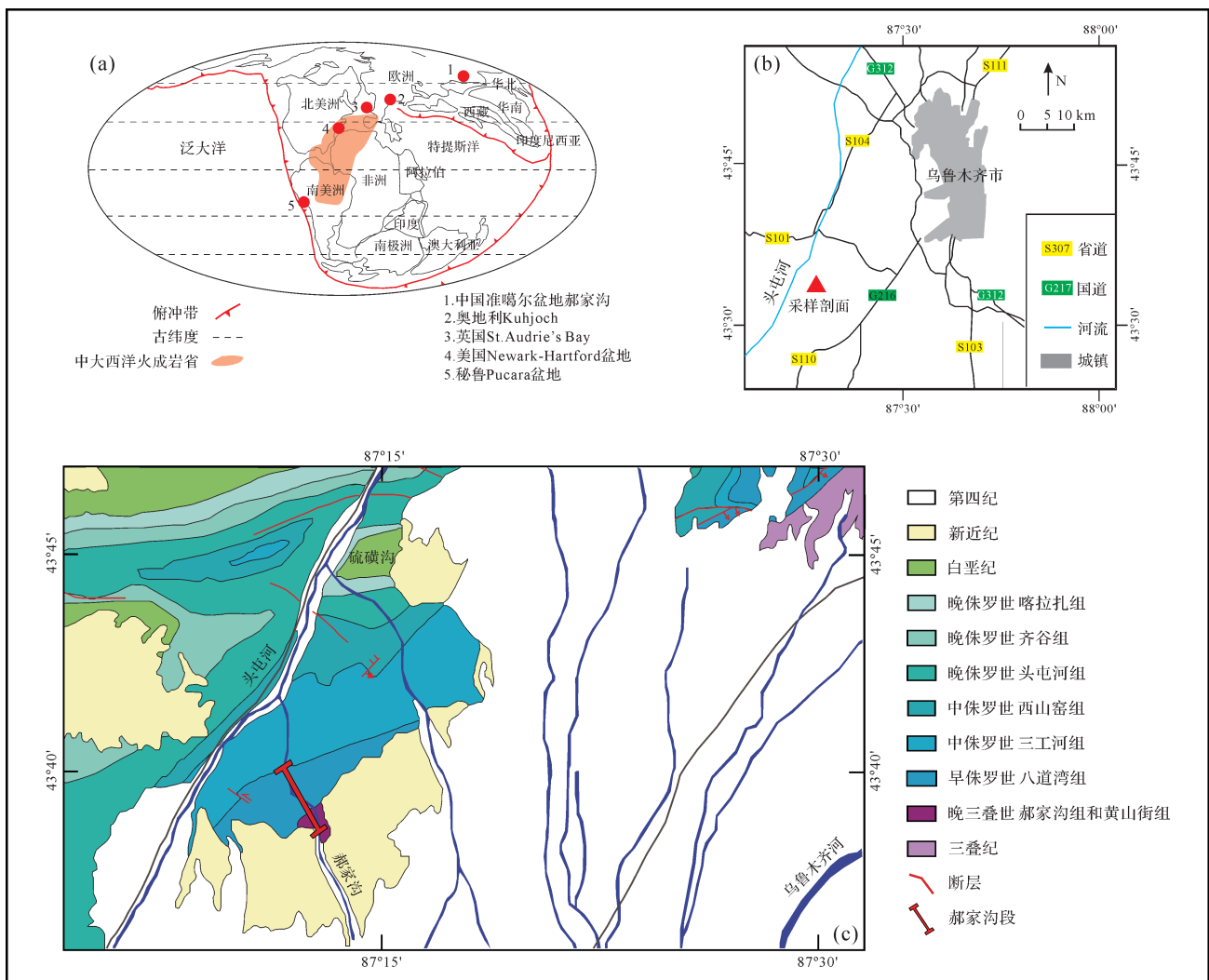


图1 准噶尔盆地古地理(a)、剖面位置(b)及地层出露图(c)(据Sha *et al.*^[14]修改)

Fig.1 Palaeogeography (a), section location (b) and stratigraphic outcrop (c) of the Junggar Basin (modified from Sha *et al.*^[14])

研究区郝家沟剖面位于准噶尔盆地南缘,地处新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市西南约50 km(图1b)。其古地理位置如图1a所示,三叠纪—侏罗纪之交的古纬度约为 60°N ^[14]。郝家沟剖面出露有良好的三叠系和侏罗系(图1c),研究的目的层包括上三叠统郝家沟组上段42~44层,以及下侏罗统八道湾组下段45~52层,总厚度约90 m(图2)。岩层呈单斜状连续产出,无明显沉积间断。郝家沟组上段主要发育黄绿、灰绿色砾岩,灰、灰绿色粗砂岩、细砂岩、粉砂岩,灰、深灰色粉砂质泥岩、泥岩、碳质泥岩呈多套旋回,砂砾岩层薄,泥岩层厚,局部夹煤层,向上碳质泥岩和煤层增多。八道湾组下段主要发育灰白、浅灰绿色砾岩,浅黄绿、灰绿色中粗砂岩与灰绿色细砂岩、粉砂岩,夹灰色泥岩、局部夹薄煤层^[18]。

1.2 地层年代格架

前人对郝家沟剖面陆相的三叠系—侏罗系界线有系统的研究^[19-22]。根据孢粉组合中优势分子的显著差异以及蕨类孢子突发性增加^[19]和孢粉种属在地层中延续范围^[22],将郝家沟剖面的TJB确定在郝家沟组顶部和八道湾组底部的岩性界面处,即44层与45层之间(层号据邓胜徽等^[18])。其他门类的化石证据也支持该结论^[18-23]。

郝家沟组包含两个植物组合,下部为 *Danaeopsis-Cladophlebis ichunensis* 组合,上部为 *Hausmannia-Chlathropteris minoria* 组合。前者大部分属种为晚三叠世常见分子,特别是有晚三叠世的标准分子 *Danaeopsis*。八道湾组有上、下两个植物组合,下部为 *Clathropteris elegans-Todites princeps* 组合,因含格陵兰地区早侏罗世早期 *Thaumatopteris* 带的重要分子,属早侏罗世;上部为 *Coniopteris gaojiatianensis* 和众多早侏罗世常见的形态属 *Cladophlebis*,属于早侏罗世^[21]。植物化石证据说明侏罗系底置于八道湾组之底(即45层底,图2)。

郝家沟组含典型三叠纪分子 *Arathrisporites* 和 *Chordasporites*,及部分时代更老的分子,如 *Hamiapollenites buliaeformis*, *Endosporites ornatus* 等,时代为晚三叠世。八道湾组底部以上,蕨类植物孢子激增,出现以侏罗纪常见分子,如 *Cyathidites*, *Densosporites scanicus*, *Densosporites crassus* 等为主的蕨类孢子含量高峰,裸子植物丰度受到暂时压制,反映植物界一次大的演替事件^[19-22]。孢粉证据指示三叠系—侏罗系界线置于八道湾组底部(即45层底,图2)。

有机碳同位素曲线在42~51层整体呈现显著的负偏异常,均值达2‰左右^[20]。其特征与奥地利三叠系—侏罗系界线的层型剖面(GSSP)^[24]、美国内华达州的辅助层型(ASSP)^[25]和英国南部及格陵兰东部TJB附近的有机碳同位素曲线^[26]均可对比。结合孢粉组合及“蕨类孢子激增”出现的层位约束^[20],郝家沟剖面有机碳同位素曲线与GSSP和国际经典剖面的对比,在该剖面上可精细地识别出与以上经典研究剖面可对比的“首次碳同位素负偏”(initial CIE,即ETE层位)对应于45层底附近,“主碳同位素负偏”(main CIE,即TJB相当层位)对应于51层底部附近(图2)^[24]。

在岩性地层特征方面,郝家沟组上段则以灰黄、黄绿色色调为主;而八道湾组下段岩性总体以灰白、浅灰绿色色调为主,底部为一套灰白色砾岩或含砾粗砂岩。在宏观上区分明显,反映了三叠纪与侏罗纪的整体沉积环境的巨大变化^[21]。

2 采样和实验方法

2.1 野外样品采集

本研究在新疆准噶尔盆地南缘郝家沟剖面系统地采集化学地层学样品。野外采集的全部为剥去风化层的新鲜样品,采样间隔根据岩性确定,其中泥岩的采样间隔为20 cm、砂岩为30~40 cm、砾岩为40~60 cm、煤线层位10 cm。

2.2 TOC、TS、Hg的实验方法

称取0.1 g左右粉碎后样品,用LECO CS230碳硫分析仪进行TOC和TS测试分析。称取0.1 g左右粉碎后样品,OGE-VI油气评价工作站进行岩石热解分析。Hg元素浓度测试的实验方法采用原子荧光光谱法(AFS)。具体分析步骤如下:称取0.25 g试样(粒径小于0.075 mm,经室温干燥),置于25 mL聚乙烯试管中,用水润湿试样,加入10 mL(1+1)王水,摇散试样,置于沸水浴中保持1小时,期间摇动一次。取出冷却后,加入1 mL KMnO_4 溶液,摇匀后放置30 min,用草酸溶液稀释至刻度,摇匀,放置沉淀至液体清澈备用。移取2.0 mL试液,按照校准线分析步骤操作,采用汞高强度空心阴极灯,以氯化亚锡作还原剂,使溶液中的 Hg^{2+} 还原成 Hg 蒸汽后,由载气导入预加热200 $^{\circ}\text{C}$ 的石英原子化器中进行冷蒸汽—原子荧光光谱法测定,测得汞含量。方法检出限:0.000 3 $\mu\text{g/g}$,测定范围:0.001~6 $\mu\text{g/g}$ 。以上实验在河北省区域地质调查院测试完成。

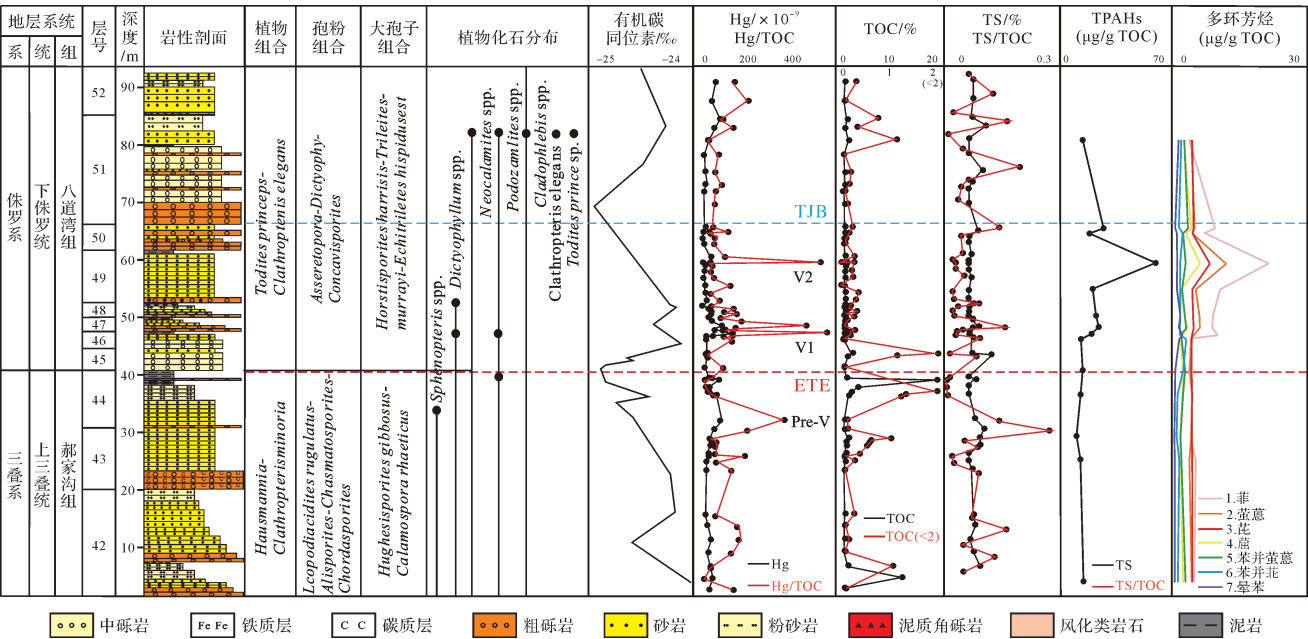


图2 郝家沟剖面TJB附近地层生物地层、碳同位素地层和地球化学地层曲线综合对比图
Fig.2 Comprehensive chart of biostratigraphy, carbon-isotope stratigraphy and geochemical stratigraphic curves across the TJB at the Haojiagou section

2.3 生物标志化合物的实验方法

称取 100 g 左右粉碎后样品,以二氯甲烷为溶剂,使用索氏抽提器在 60 ℃ 水浴条件下抽提至少 8 h。用石油醚溶解沉淀滤去抽提物中的沥青质,然后用硅胶/氧化铝(3:2)且底部填充少量脱脂棉的层析柱,依次用石油醚和石油醚加二氯甲烷(2:1)淋洗得到饱和烃和芳烃。族组分分离后将饱和烃及芳烃转移到进样瓶中。饱和烃样品采用氘代正构二十四烷作为内标,芳烃样品采用氘代菲作为内标。

所用仪器为 Agilent 6890GC-5975iMS 和 Agilent 7890BGC-5977MS 色谱质谱联用仪。进样口温度 300 ℃,载气为 He 气,载气流速为 1.0 mL/min。进样方式为不分流进样。饱和烃色谱柱为 HP-5 ms 石英弹性毛细柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm)。芳烃色谱柱为 HP-5 ms 石英弹性毛细柱(60 m×0.25 mm×0.25 μm)。饱和烃程序升温:初温为 50 ℃,保留 1 min,然后以 20 ℃/min 的速度升至 120 ℃,再以 3 ℃/min 升至 310 ℃,保留 20 min。扫描范围为 m/z 50~570,检测方式为全扫描。芳烃程序升温:初温为 80 ℃,保留 1 min,然后以 3 ℃/min 的速度升至 310 ℃,保留 16 min。扫描范围为 m/z 50~450,检测方式为全扫描。质谱离子源采用电子轰击,电离电压为 70 eV,获取数据方式为全扫描与选择离子同时进行。以上实验在中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室测试完成。

3 实验结果

3.1 TOC 和 TS 的地层数据

在郝家沟剖面 42~52 层中 TOC 含量值出现了 2 个显著的峰值,分别位于 42 层下部和 44 层顶部(图 2)。临近 44~45 层界线(即郝家沟组和八道湾组界线)处,TOC 值快速升高,并随后迅速降低,呈脉冲样式。在紧邻郝家沟组和八道湾组岩性地层界线的 44 层上部,发育较厚碳质泥岩沉积,并且在顶部夹约 20~30 cm 厚的泥岩角砾层(图 2),砾石为桔红色。而 45 层顶部 TOC 曲线略有宽缓升高约为背景值 2 倍;再向上直到 52 层顶部呈现平缓低值。

在郝家沟剖面 42~52 层中 TS 地层数据曲线在 43 层顶部、44 层顶部和 45 层顶部,以及 51 层中上部有相应高值,大于 0.1%。其中,TS/TOC 数据在 44 层、45 层和 51 层三处比较高的峰值,达到 0.2% 至 0.4%,其中 51 层整段有三个高值(图 2)。

3.2 Hg 元素浓度地层数据

Hg 元素浓度地层曲线(图 2)呈现 3 个主要的脉冲高值段,由下至上出现波峰信号的分别位于 44 层, 47~48 层以及 51 层顶部。在 44 层与 45 层界线之上含量曲线突然趋于平缓,仅 Hg 含量在 46 层顶至 47 层出现了极其短暂的高峰值,除此之外各项指标的含量也基本处于较低的水平。整体来说,Hg 元素浓

度值与TOC和TS的对应关系明显,在Hg出现高峰值的层位,另外两者在同一层位或者略有滞后,也出现了一定的波动。

3.3 Hg/TOC值的地层数据

因为地层中Hg元素浓度对于沉积有机物有富集效应,因此将其对TOC做归一化,结果得到Hg/TOC数值的地层曲线,能有效地反映大火成岩省侵位或者喷发活动^[27]。

Hg/TOC曲线有多个明显的峰值,第1个出现在42层中上部;第2个在43层上部;第3个峰值(命名为Pre-V)在44层非常明显,可达背景值的10倍以上,同时对应着显著的TS/TOC的峰值(暗示着有一期强烈的幔源岩浆活动);前三个峰值总体上波峰都较为宽缓。第4个在峰值(命名为V1)出现在46~48层,其特点是具有两个高而窄的峰组成,其中下窄峰极值略高于上窄峰,整个剖面中Hg/TOC的最高值出现在此处(图2)。再往上到49层上部第5个峰值(命名为V2),仅由1个窄峰组成,其特点与第4个峰值信号相似,为短暂脉冲,且是整个剖面次高的峰值。仔细观察不难发现,V1和V2之间还有约为背景值2倍的小峰值。第6个峰值出现在51层上部延续到52层。在第5与第6峰值之间,Hg/TOC含量低且变化平缓。

3.4 PAHs的数据

全部样品中均检测到了菲、萤蒎、芘、苯并萤蒎、蒽、苯并萤蒎、苯并芘、茚并芘、苯并芘和晕苯(图3)。本文主要选取了菲、萤蒎、芘、蒽、苯并萤蒎、苯并芘和晕苯七种标志性化合物,它们的分子量从178至300依次递增,苯环数也由三个增加到七个(图3,4)。

该七种多环芳烃在剖面的地层中,呈现出相同的变化趋势。即42~44层呈稳定低值,在45~50层相对含量明显升高,在51层之上又有明显下降(图4)。就均值来说,菲由0.82 $\mu\text{g/gTOC}$ 上升至4.73 $\mu\text{g/gTOC}$,萤蒎由0.65 $\mu\text{g/gTOC}$ 上升至2.19 $\mu\text{g/gTOC}$,芘由0.65 $\mu\text{g/gTOC}$ 上升至2.34 $\mu\text{g/gTOC}$,蒽由0.33 $\mu\text{g/gTOC}$ 上升至1.14 $\mu\text{g/gTOC}$,苯并萤蒎由0.59 $\mu\text{g/gTOC}$ 上升至1.26 $\mu\text{g/gTOC}$,苯并芘由0.22 $\mu\text{g/gTOC}$ 上升至0.85 $\mu\text{g/gTOC}$,苯并芘由0.10 $\mu\text{g/gTOC}$ 上升至0.41 $\mu\text{g/gTOC}$,晕苯由0.02 $\mu\text{g/gTOC}$ 上升至0.17 $\mu\text{g/gTOC}$ 。

将高于检出限的12种PAHs(三至七个苯环)相对含量相加之后,其地层中浓度含量变化趋势与单一化合物的相似。在42~44层含量较低,到44~45层交界处PAHs含量值迅速上升,并保持相对稳定的状态,直到50层底部达峰值后,急剧下降(图2)。

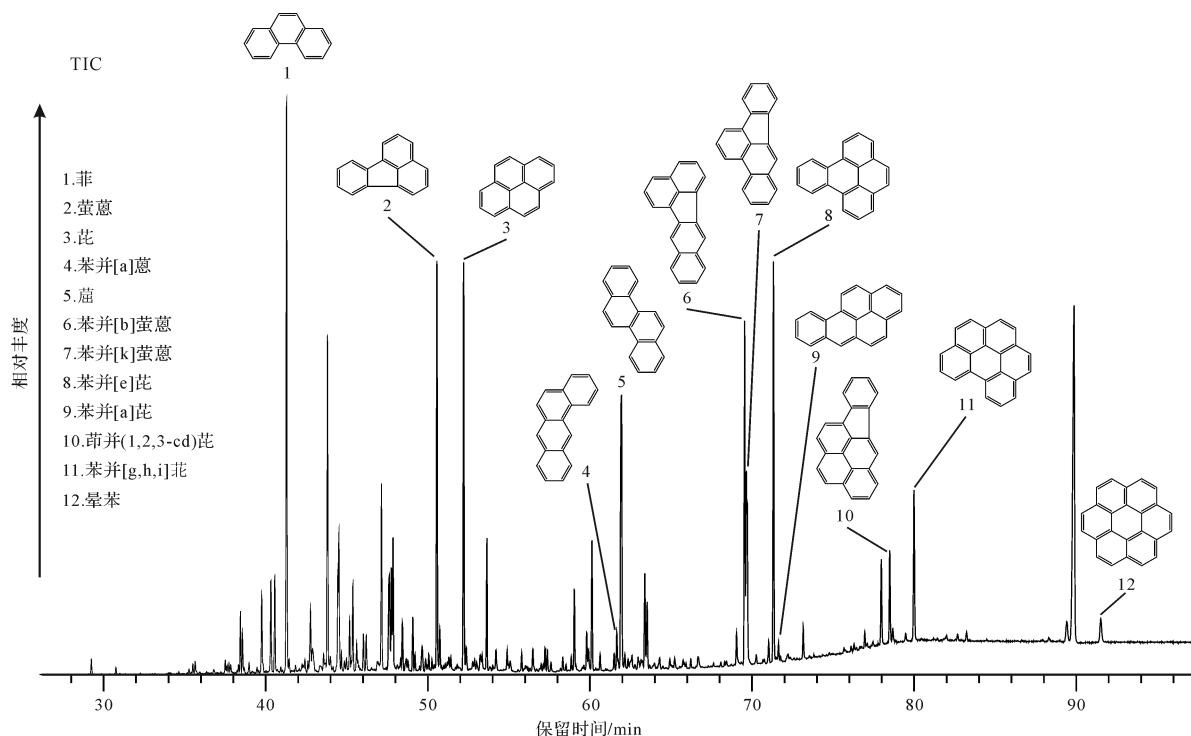


图3 郝家沟剖面PAHs的总离子流图

Fig.3 The total ion current of PAHs at the Haojiagou section

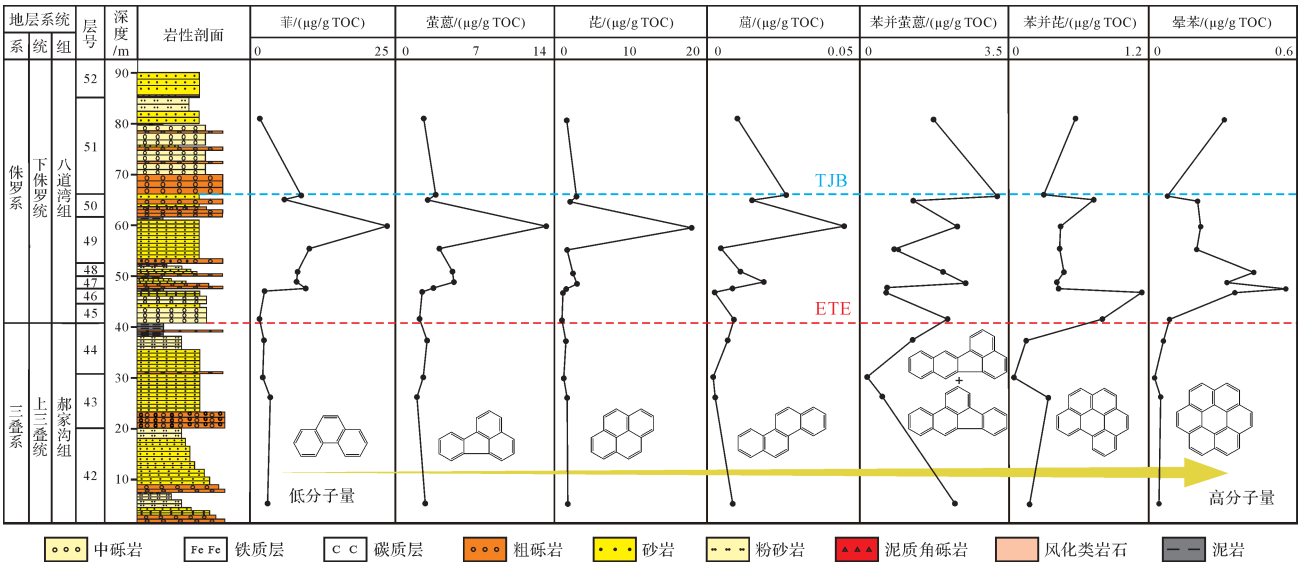


图4 郝家沟剖面TJB附近地层中燃烧来源的PAHs含量分布图

Fig.4 Combustive-derived PAHs content distribution across the TJB at the Haojiagou section

4 讨论

4.1 野火事件频率增加的证据

PAHs的成因已经受到了比较广泛的研究,既可以由自然野火中植被的不完全燃烧产生^[28-29],也可由成岩过程中的热作用形成^[30-32]。本剖面地层厚度约90 m,所以该段地层从底部到顶部,在成岩埋藏过程中遭受的热作用相同,因此其地层中多环芳烃含量的显著差异,主要反映地史时期中野火事件的记录。

值得注意的是,这些PAHs相对含量的峰值层位不同,三环及四环的相对含量峰值出现在49~50层,而五到七环的相对含量高值则出现在45~48层,呈现错峰现象(图4)。环数更高的多环芳烃指示着更高的燃烧温度,可知在45~48层比49~50层的野火温度更高;另外,由Hg/TOC曲线最高值指示的大火成岩省喷发活动的峰值(V1)层位也在45~48层(图2),即大火成岩省活动最剧烈时期,相应地与距离大于4 000 km^[33]外的、高纬度的准噶尔盆地南缘,野火事件燃烧温度达较高值相一致。

前人在郝家沟地区的研究表明^[20],植被类型在44~45层处,即ETE层附近,发生了巨大的突变,其所指示的气候类型也发生转变。根据现代大气观察数据,地表气温升高会导致对流层水分含量增加,云量增多;年平均气温每升高1℃,会导致雷电频率增加约40%^[34-35],而雷电是野火的主要火源之一,综合多环芳烃的含量变化,推断在45~50层之间野火事件频率显著增加。

4.2 郝家沟剖面地球化学地层数据综合对比

纵观整个剖面(图2),会发现一个特别的现象,45~50层岩性的沉积正旋回变化速率明显高于该剖面的其他层位。尤其在46层、47层和48层不到10米厚的地层中,出现了三个砾岩—砂岩—泥岩的正旋回,而此层位与Hg/TOC峰值层位V1峰相吻合。另外,整个研究剖面中Hg/TOC最高的3个值都出现在45~50层的地层内,而且有2个在46~48层范围内。在紧邻V1峰值之上地层,多环芳烃的含量明显升高,且分别在47层和49层出现两个峰值(图4)。推测CAMP活动通过大气循环带来的Hg/TOC峰值,与环境改变造成的野火频率增加事件,两者具有明显的相关性。综合对比,可以看出地层中Hg含量较高的层位和PAHs含量较高的层位具有一定的对应关系。但是,在45层之下Hg的峰值较为宽缓,在地层中呈现比45~50层中持续时间长,推测该地层对应的时期,大火成岩省侵位或者活动持续时间长,但是可能强度低。而对野火事件有指示作用的多环芳烃的高含量,在45层之下,显示却不明显,虽然在45层之下的地层中,野外工作时肉眼可以识别的丝炭含量比在45~50层中丰富许多。在51层及其以上地层各地球化学指标都快速地恢复到45层之下的背景值水平。

45层和51层底部,有两处该剖面上有机碳 $\delta^{13}C$ 同位素地层曲线的负偏极值,与全球多处经典剖面都可以进行对比,例如奥地利Kuhjoch的GSSP和英国的St. Audrie's Bay的剖面,可知郝家沟剖面的

45层应对比于ETE,而51层应对比于TJB(图2,5),该对比在后文将详细讨论。

4.3 准噶尔盆地三叠纪—侏罗纪之交事件的全球对比

4.3.1 郝家沟剖面与GSSP的对比

三叠系—侏罗系的GSSP位于奥地利Kuhjoch的海相地层剖面,以菊石*Psiloceras spelae* Guex的*trolicum* Hillebrandt & Krystyn亚种的首现面来定义侏罗系底界^[24,36],即TJB。在菊石界线之下约0.5 m处则是孢粉组合*Trachysporites-Heliosporites*的两个亚组的界线。在Kuhjoch剖面侏罗系底界向下约6 m处,是以三叠纪菊石*Choristoceras marshi*的绝灭为代表的ETE界线(图5),也是该剖面的地层中孢粉组合*Rhaetipollis-Limbosporites*与*Rhaetipollis-Porcellispora*的界线。

根据有机碳同位素和孢粉组合约束,郝家沟剖面ETE和TJB都可以与GSSP海相地层剖面上的进行对比。在“首次碳同位素负偏”(initial CIE)和“主碳同位素负偏”(main CIE)之间,即ETE与TJB之间的层段,两个对比剖面都可见到显著的Hg/TOC的异常高值(图2,5)。郝家沟剖面在45层底部和51层底部的两个碳同位素负偏峰,即为可分别与GSSP海相地层的“首次碳同位素负偏”和“主碳同位素负偏”对比。从而可以约束郝家沟剖面 and 奥地利GSSP剖面的地层对比。

4.3.2 郝家沟剖面与其他国际典型TJB剖面的对比

英国St.Audrie's Bay剖面是欧洲另一个研究较为深入的海相TJB剖面,也曾是侏罗系底界GSSP候选剖面之一。该剖面TJB定义于菊石*Psiloceras planorbis*的首现面,与菊石*Psiloceras spelae trolicum*出现时间近同期(图5)。而牙形石绝灭带位于菊石*Psilocera planorbis*的首现面下7 m处,推断该层为ETE层位^[26];值得注意的是,该层位也与蕨类植物孢子的含量出现“脉冲式峰值(fern spike)”同步,该现象与郝家沟剖面上45层开始有蕨类植物含量激增相一致^[20]。郝家沟剖面TJB可以与该海相地层剖面进行对比,在首次碳同位素负偏和主负偏之间,即ETE与TJB之间的层段,两个对比剖面都可见到显著的Hg/TOC的异常高值(图5)。

早在上世纪五十年代,关于TJB附近地层中野火事件的记录,在格陵兰、英格兰和威尔士^[37-38]就有相关报道,以地层中保存大量良好的丝炭为证据。近年来,在波兰的南部^[39]、瑞典和丹麦的煤系地层^[40]和中国四川盆地^[11]的TJB地层中,都有PAHs丰度异常高值的报道;而在东格陵兰^[41]和波兰南部下侏罗统底部^[39,42],有相应地层中丝炭记录的报道。

国际上其他几个典型的TJB剖面(例如,丹麦的Stenlille-1岩心数据、美国New York Canyon剖面、格陵兰Astartekloft剖面)也有类似现象,郝家沟剖面可以与之在ETE和TJB之间的层段都有很好的对比

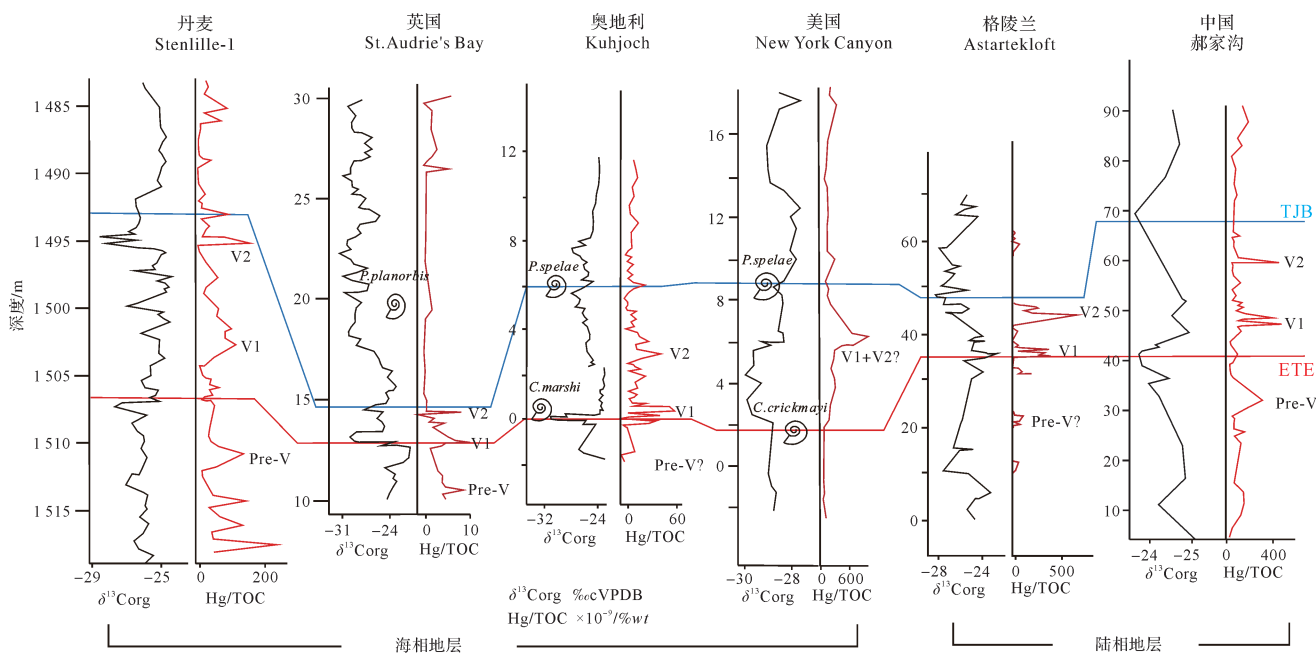


图5 郝家沟剖面TJB地层与GSSP及全球其他典型剖面对比图

Fig.5 Stratigraphic correlation of the TJB at the Haojiagou section with those of GSSP and other typical sections globally

(图5)。非常有趣地是,在来自丹麦的研究剖面,浅海相夹局限的潟湖相沉积,其TJB以特征孢粉为约束(岩心中未发现菊石化石)。如 *Cerebropollenites thiergartii* 的首现附近的野火记录有燃烧温度较高的特征,但是在过了TJB之上,以至于延续到上Sinemurian阶,野火发生的频率似乎增加了,发生野火的最高温度却低了,仅仅为地面火(约300℃)或者地表火(约600℃),不再发生冠层火($\geq 800^\circ\text{C}$)^[40],这种现象与郝家沟剖面看到现象一致(图2,5)。总之,ETE发生后的初期,野火温度较高;后期接近TJB以及其上地层的野火温度相对之前降低。除ETE与TJB之间层段外,其下、上的地层中也有由PAHs记录的野火事件^[11,37-40]。另外,有个看似矛盾,但相当普遍的现象值得未来工作留意,即如果野火多,该有丝炭和PAHs。但似乎是PAHs高值处,并未有很多丝炭的记录^[10-12],郝家沟剖面也有类似现象。

从全球的视角看,除了中国四川以外,以上地区都接近CAMP爆发的区域。由地层中丝炭含量对岩石质量做归一化的统计数据显示格陵兰等地区也发现了古火灾的证据,TJB界线上野火发生的频率显著增加^[10]。在TJB临近地层中Hg/TOC值升高,且其峰值与CAMP玄武岩大量喷发的时期相对应^[27],并与古野火频率的增加相关。

5 CAMP对陆地生态系统的影响及同期野火事件全球性的探讨

CAMP如何深刻地影响陆地生态系统研究还比较初步,尚不充分。例如,蕨类植物的脉冲式峰值(fern spike)和蕨类孢子的暗黑带(dark zone)现象,目前的研究解释为酸雨腐蚀导致^[43];陆地植被面貌的变迁,可能不仅是CO₂升高能造成的,SO₂气溶胶和有毒的PAHs可能起到了关键性作用,并与动物的绝灭关系密切。该时期的野火记录表明ETE-TJB期间大气中氧气浓度大于野火燃烧下限15%^[39]。郝家沟剖面ETE至TJB地层的野火记录,也印证了当时大气中氧气浓度在15%以上。野火事件持续地发生,表明大气未发生明显的缺氧现象,因此同期海洋沉积中的缺氧记录,推断不是由大气缺氧所导致。根据目前的数据推断CAMP喷发,对于全球气候和环境产生了直接影响,在环境的压力下使得野火发生频率增高。但是野火事件频率增加过程是否也叠合了天文周期旋回对气候的影响因素,需要未来进一步工作

验证。

在郝家沟剖面的44层上部,早于ETE层位有Hg/TOC异常高值(即Pre-V),可能对应CAMP的早期侵位,并且也可与全球多个剖面对比^[33]。文献报道很多剖面上,也同样有该Hg/TOC异常峰值(即Pre-V)(图5)。中大西洋火成岩省的直接作用区集中在现今南美洲北部、非洲西北部和北美洲东部地区,但其影响可达全球规模。在南美洲西北部秘鲁的Pucara盆地的三叠纪系—侏罗系,有多层中大西洋火成岩省的火山灰层的记录^[44]。在美国内华达洲的海相TJB附近,观测到了异常高浓度的地幔来源的汞元素丰度^[27],表明中大西洋火成岩省影响的规模可达泛大洋西岸地区。

总之,在准噶尔盆地南缘郝家沟剖面,同一个剖面上高分辨率的、综合性的地球化学地层曲线,有力地说明了CAMP喷发的主期次与野火事件频率的增加、陆相有机碳同位素的负向偏移、以及植被突然地由裸子替换为蕨类植物,四者在时间上具有同期性。因此,ETE到TJB持续的时间段,全球性的气候、陆地植物生态系统和大气中的碳同位素都有强烈地波动,也为未来进一步探索全球性的海、陆耦合作用提供了独一无二的地质窗口。

6 结论

(1) 与三叠系—侏罗系GSSP等时的地层界线进行了对比,确定在新疆准噶尔盆地南缘郝家沟剖面上,与全球性的ETE事件等时的地层界线应位于45层底部附近,TJB界线应位于51层底部附近。

(2) 在新疆准噶尔盆地南缘郝家沟剖面上,在ETE与TJB之间的地层存在燃烧成因的PAHs含量的异常高值,并且与地层中指示CAMP侵位或喷发的Hg/TOC高峰值很好地对应,两者同期或准同期发生。

(3) 推断CAMP的侵位或喷发,与野火事件频率快速地升高具有因果关系,但并非火源直接点燃关系,而是CAMP的侵位或喷发直接影响到全球的气候导致,其影响范围远超出CAMP活动区以外;因此ETE与TJB之间时段短暂地野火频率增高事件,可能为全球性事件。

致谢 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、张剑锋和李天天,在样品测试过程中的帮助与支持。

参考文献(References)

- [1] Akikuni K, Hori R, 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.
- [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] 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.
- [4] Beerling D J, Berner R A. Biogeochemical constraints on the Triassic-Jurassic boundary carbon cycle event [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(3): 10-1-10-13.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Song Y, Algeo T J, Wu W J, et al. Distribution of pyrolytic PAHs across the Triassic-Jurassic boundary in the Sichuan Basin, southwestern China: Evidence of wildfire outside the Central Atlantic Magmatic province [J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 201: 102970.
- [12] Belcher C M, Finch P, Collinson M E, et al. Geochemical evidence for combustion of hydrocarbons during the K-T impact event [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(11): 4112-4117.
- [13] Preto N, Kustatscher E, Wignall P B. Triassic climates-state of the art and perspectives [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 290(1/2/3/4): 1-10.
- [14] 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.
- [15] 辜延容. 准噶尔盆地南缘构造特征与油气分布 [D]. 成都: 成都理工大学, 2015. [Gu Yanrong. The structure feature and oil-gas distribution in southern margin of the Junggar Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.]
- [16] 方世虎. 准噶尔盆地南缘中生代构造演化及盆地关系研究 [D]. 北京: 北京大学, 2004. [Fang Shihu. Mesozoic Cenozoic tectonic evolution and basin mountain relationship in the southern margin of Junggar Basin [D]. Beijing: Peking University, 2004.]
- [17] 张芮. 准噶尔盆地西北缘下侏罗统八道湾组层序地层及沉积相研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2016. [Zhang Rui. Study on sequence stratigraphy and sedimentary facies of the Lower Jurassic Badaowan Formation in the northwest of the Junggar Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.]
- [18] 邓胜徽, 卢远征, 樊茹, 等. 新疆北部的侏罗系 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010: 17-44, 187-192, 197-200. [Deng Shenghui, Lu Yuanzheng, Fan Ru, et al. The Jurassic system of northern Xinjiang, China [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2010: 17-44, 187-192, 197-200.]
- [19] 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.]
- [20] 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.]
- [21] 邓胜徽, 卢远征, 樊茹, 等. 中国陆相三叠系—侏罗系界线 [J]. *地层学杂志*, 2013, 37(4): 582-584. [Deng Shenghui, Lu Yuanzheng, Fan Ru, et al. Terrestrial Triassic-Jurassic boundary in China [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2013, 37(4): 582-584.]
- [22] 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.
- [23] 邓胜徽, 姚益民, 叶得泉, 等. 中国北方侏罗系(I)地层总论 [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) Introduction to Stratigraphy [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.]
- [24] 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.
- [25] McRoberts C A, Ward P D, Hesselbo S. A proposal for the base Hettangian Stage (= base Jurassic System) GSSP at New York Canyon (Nevada, USA) using carbon isotopes [J]. *ISJS Newsletter*, 2007, 34(1): 43-49.
- [26] 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.
- [27] 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(1): 11147.
- [28] Yunker M B, Macdonald R W, Vingarzan R, et al. PAHs in the Fraser River basin: A critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition [J]. *Organic Geochemistry*, 2002, 33(4): 489-515.
- [29] Choi S D. Time trends in the levels and patterns of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in pine bark, litter, and soil after a forest fire [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 470-471: 1441-1449.
- [30] Blumer M, Youngblood W W. Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils and recent sediments [J]. *Science*, 1975, 188(4183): 53-55.
- [31] Laflamme R E, Hites R A. The global distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in recent sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1978, 42(3): 289-303.
- [32] 朱扬明. 生油岩五环烃的热演化及成熟度参数 [J]. *地质地球化学*, 1998(1): 75-80. [Zhu Yangming. Thermal evolution and maturity parameters of pentacyclic aromatic hydrocarbons in source rocks [J]. *Geology-Geochemistry*, 1998(1): 75-80.]
- [33] Ruhl M, Hesselbo S P, Al-Suwaidi A, et al. On the onset of Central Atlantic Magmatic Province (CAMP) volcanism and environmental and carbon-cycle change at the Triassic-Jurassic transition (Neuquén Basin, Argentina) [J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 208: 103-229.
- [34] 张筱青, 张国权, 席书娜, 等. 三叠系-侏罗系界线古火灾事件研究: 方法、进展及展望 [J]. *古生物学报*, 2016, 55(3): 331-345. [Zhang Xiaoqing, Zhang Guoquan, Xi Shuna, et al. Wildfire event at the Triassic/Jurassic boundary: Approaches, progress, and perspective [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2016, 55(3): 331-345.]
- [35] Reeve N, Toumi R. Lightning activity as an indicator of climate change [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1999, 125(555): 893-903.
- [36] 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.
- [37] Petersen H I, Lindström S. Synchronous wildfire activity rise and mire deforestation at the Triassic-Jurassic boundary [J]. *PLoS One*, 2012, 7(10): e47236.
- [38] Harris T M. A liasso-rhaetic flora in South Wales [J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 1957, 147(928): 289-308.
- [39] Harris T M. Forest fire in the Mesozoic [J]. *Journal of Ecology*, 1958, 46(2): 447-453.
- [40] Marynowski L, Simoneit B R T. Widespread Upper Triassic to Lower Jurassic wildfire records from Poland: Evidence from charcoal and pyrolytic polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *Palaaios*, 2009, 24(11/12): 785-798.
- [41] Belcher C M, McElwain J C. Limits for combustion in low O₂ redefine paleoatmospheric predictions for the Mesozoic [J]. *Science*, 2008, 321(5893): 1197-1200.
- [42] Pieńkowski G, Niedźwiedzki G, Waksmundzka M. Sedimentological, palynological and geochemical studies of the terrestrial Triassic-Jurassic boundary in northwestern Poland [J]. *Geological Magazine*, 2012, 149(2): 308-332.
- [43] 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.
- [44] 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.

Wildfire Records Across the Triassic - Jurassic Boundary in the Southern Margin of the Junggar Basin, and Global Correlations

ZHANG XinZhi^{1,2}, LÜ PeiZong^{1,2}, FANG LinHao^{1,2}, YANG Han^{1,2}, DENG ShengHui³, LU YuanZheng³, FANG YaNan⁴, ZHANG XiaoYu^{1,2}, HUANG RuTing^{1,2}, LIANG JiaBao^{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. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

4. Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

Abstract: The Triassic-Jurassic transition (~201 Ma) was a critical period in the Earth's history. The rapid emplacement and eruption of the Central Atlantic Magmatic Province (CAMP) put huge environmental pressure on the global surface ecosystem. One example was the synchronous wildfire events reported widely. However, previous reports have commonly focused on the area directly influenced by the CAMP. It is debatable whether the wildfire events were a global or a regional phenomenon. This study systematically collected samples across the Triassic-Jurassic boundary (TJB) in the Haojiagou section at the southern margin of the Junggar Basin, Xinjiang. Abnormally high values of combustive-derived polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) were found around the TJB. The anomalies correspond well with the Hg/TOC peaks, indicating the CAMP emplacement or eruptions. This is the first report on wildfire records across the Triassic-Jurassic transition in high-latitude terrestrial strata outside the CAMP region. It is concluded from integrated global TJB correlations that the sharply rising wildfire frequency was triggered by the CAMP effect, but CAMP volcanism itself was not the direct igniting source. Increased wildfire frequency is inferred as a global event beyond the regions of CAMP activity, and similar wildfire records across the TJB could be observed on a global scale.

Key words: Triassic-Jurassic; Junggar Basin; abnormal mercury concentration; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); wildfire