

DOI:10.12017/dzgx.2022.066

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^{*}

张新智^{1,2} 方琳浩^{1,2} 吴 涛³ 苗运法⁴ 张明震⁴王雪莲⁴ 吕沛宗^{1,2} 何秀娟^{1,2} 邱若原⁵ 杨 涵⁶ 任嘉豪⁷

(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. 中国石油新疆油田公司勘探开发研究院 新疆克拉玛依 834000; 4. 中国科学院西北生态环境资源院 兰州 730000; 5. 中国科学院地质与地球物理研究所新生代地质与环境重点实验室 北京 100029; 6. 中国地震局地震大地测量重点实验室 武汉 430071; 7. 北京大学地球与空间科学学院 北京 100871)

摘要 三叠纪—侏罗纪之交(Triassic-Jurassic boundary, TJB)发生了三叠纪末的生物大灭绝(end-Triassic mass extinction, ETE), 海洋和陆地生态系统都发生了不同程度的崩溃。而在陆地生态系统中, 植物群首当其冲, 但是该时段的植物群变化的详细数据还相对缺乏。本文在新疆准噶尔盆地南缘郝家沟剖面TJB地层系统采样研究, 来揭示该过程的植物群响应。根据孢粉属种组成及含量变化划分了3个孢粉组合, 对古气候进行了重建。结果表明, 准噶尔盆地南缘TJB的气候演变经历了湿热—湿冷—干热的转换过程。同时对ETE和TJB两个重要界线及灭绝发生的期次关系进行了讨论, 由孢粉数据结合前人植物大化石、有机碳同位素地层曲线、生物标志化合物和Hg/TOC全球对比的结果, 指示ETE和TJB可能分别位于郝家沟组43层底附近和八道湾组49层底附近; 并推测三叠纪末陆地植被的灭绝在高纬度的准噶尔盆地记录到3个期次。在ETE与TJB之间地层中发现了与全球多处记录到的孢子含量激增一致的现象, 推测该时期陆地生态系统的波动具有全球性。

关键词 准噶尔盆地 三叠系—侏罗系 孢粉 三叠纪末生物灭绝 古气候

中图分类号: P532, Q944.571 **文献标识码:** A **文章编号:** 0563-5020(2022)04-1161-16

三叠纪—侏罗纪之交(Triassic-Jurassic boundary, TJB)是地史上一个重要的时期。在构造方面, 中大西洋火成岩省(Central Atlantic Magmatic Province, CAMP)剧烈侵位和爆发, 对后来的构造演化产生了深远影响(Lamotte et al., 2015)。在生物方面, 三叠纪末生物大灭绝(end-Triassic mass extinction, ETE)发生, 海洋和陆地生态系统都遭到了严重的打击(Akikuni et al., 2010), 尤其是陆地植物群发生了显著变化(卢远征等, 2005; McElwain et al., 2007; Turner et al., 2009; 王永栋等, 2010); ETE持续约270~160 kyr(Ruhl et al., 2010; Fang et al., 2021), 直到TJB时期环境逐渐趋于稳定, 海陆

* 国家自然科学基金项目(编号: 41502024)和中国石油大学(北京)青年拔尖人才项目(编号: 2462014YJRC027)资助。

张新智, 男, 1996年生, 硕士研究生, 孢粉学专业。E-mail: 1966597289@qq.com

方琳浩, 男, 1982年生, 副教授, 碳同位素地层学专业。本文通讯作者。E-mail: linhao.fang@cup.edu.cn

2022-04-17收稿, 2022-08-12改回。

生物开始迅速恢复。在气候方面, 大气 CO₂浓度升高(Beerling and Berner, 2002)、平均气温上升(Mcelwain et al., 1999)、全球海平面波动(Lindström and Erlström, 2006)、蕨类植物在生态系统中占比骤增(Ruhl et al., 2010)和野火事件频率显著增加(Harris, 1957, 1958; Belcher et al., 2010; Song et al., 2020; 张新智等, 2022)等。

对陆地植被灭绝事件响应的研究, 前人做过多种尝试, 包括从宏观植物化石证据、孢粉证据和分子生物标志物(Williford et al., 2014), 都指示了该时期陆地生态系统遭受了严重的打击, 区域气候以及植被群落显著改变。全球多处典型剖面都曾有该时期地层中蕨类孢子含量骤增的报道(Schootbrugge et al., 2009; Li et al., 2020), 其中也包括本文所研究的郝家沟剖面(卢远征等, 2009)。后来邓胜徽等(2013)对该剖面植物化石做过研究, 发现了该区域植物的一定规模的灭绝现象。近年来有学者根据对海相生物化石的统计, 提出了该时期的海洋生物灭绝可分为两个期次(Wignall and Atkinson, 2020), 而该现象在陆相地层的研究中却鲜有人报道相关证据。本研究获取了较高密度的孢粉含量变化数据, 尝试从孢粉层面将 ETE 和 TJB 两个重要界线进行厘定, 并在此基础上对三叠纪末生物灭绝的期次在陆相盆地中的响应进行研究。

该时期气候变化也是研究的焦点, 有学者通过对植物叶片化石气孔密度与 CO₂浓度进行研究, 指出三叠纪—侏罗纪之交出现了明显的升温(Mcelwain et al., 1999); 还有人通过对丝炭与植物叶型等条件进行统计分析, 推断该时期全球变暖驱动植被叶型发生变化, 导致火灾频率升高(Belcher et al., 2010)。卢远征等(2009)对郝家沟剖面该时期的孢粉进行统计, 显示郝家沟组裸子植物花粉占优势, 而八道湾组下部适应湿润气候的蕨类植物孢子含量显著增加, 结合有机碳同位素与现代湖泊变化规律, 推论该时期气候具有向炎热潮湿变化的趋势。但此前在郝家沟剖面的孢粉研究时间跨度都较大, 分辨率相对低。本次研究进行了系统的样品采集和测试分析, 获得了高密度的孢粉数据, 对古气候和生物灭绝事件进行了分析, 同时将该时期孢粉变化与 CAMP 活动和野火事件进行了对比, 并尝试对潜在的因果联系进行讨论。

1 地质背景

1.1 区域地质概况

准噶尔盆地位于天山北缘(图 1)。经历了海西、印支、燕山和喜马拉雅多期构造运动, 是发育多期沉积旋回的典型叠合盆地(辜延容, 2015)。准噶尔盆地形成于晚二叠世, 发育三叠系和下侏罗统地层厚约 3 600 m (Carroll et al., 2010; Sha et al., 2015)。在早-中三叠世, 统一的准噶尔湖盆形成; 到晚三叠世, 湖盆扩大, 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(方世虎, 2004); 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(张芮, 2016)。

研究区郝家沟剖面位于准噶尔盆地南缘, 距新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市西南约为 50 km (图 1b)。其三叠纪—侏罗纪之交的古纬度约为 60°N (Sha et al., 2015) (图 1a)。郝家沟剖面出露有良好的三叠系和侏罗系(图 1c), 本次研究层位总厚度约

160 m，无明显沉积间断。包括上三叠统郝家沟组上段39~44层，以及下侏罗统八道湾组下段45~54层。郝家沟组上段主要发育黄绿、灰绿色砾岩，灰、灰绿色砂岩，灰、深灰色粉砂质泥岩、泥岩、碳质泥岩呈多套旋回，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(邓胜徽等，2010)。

1.2 生物(年代)地层框架

邓胜徽等(2013)曾对郝家沟剖面中郝家沟组和八道湾组中植物化石做过鉴定统计。结果显示，郝家沟组中各含有两个植物组合，分别为下部的 *Danaeopsis-Cladophlebis ichunensis* 组合(含有晚三叠世标志分子 *Danaeopsis*)和上部的 *Hausmannia-Clathropteris minoria* 组合(含晚三叠世常见的 *Cycadocarpidium* sp., *Cladophlebis kaoiana* 等属种)。八道湾组也含有两个植物组合，下部的 *Clathropteris elegans-Todites princeps* 组合中含有大量的 *Todites princeps* 和 *Clathropteris elegans* 等早侏罗世早期分子；上部组合则含有 *Coniopteris gaojitianensis* 和众多早侏罗世常见植物化石。因此邓胜徽等(2013)将TJB厘

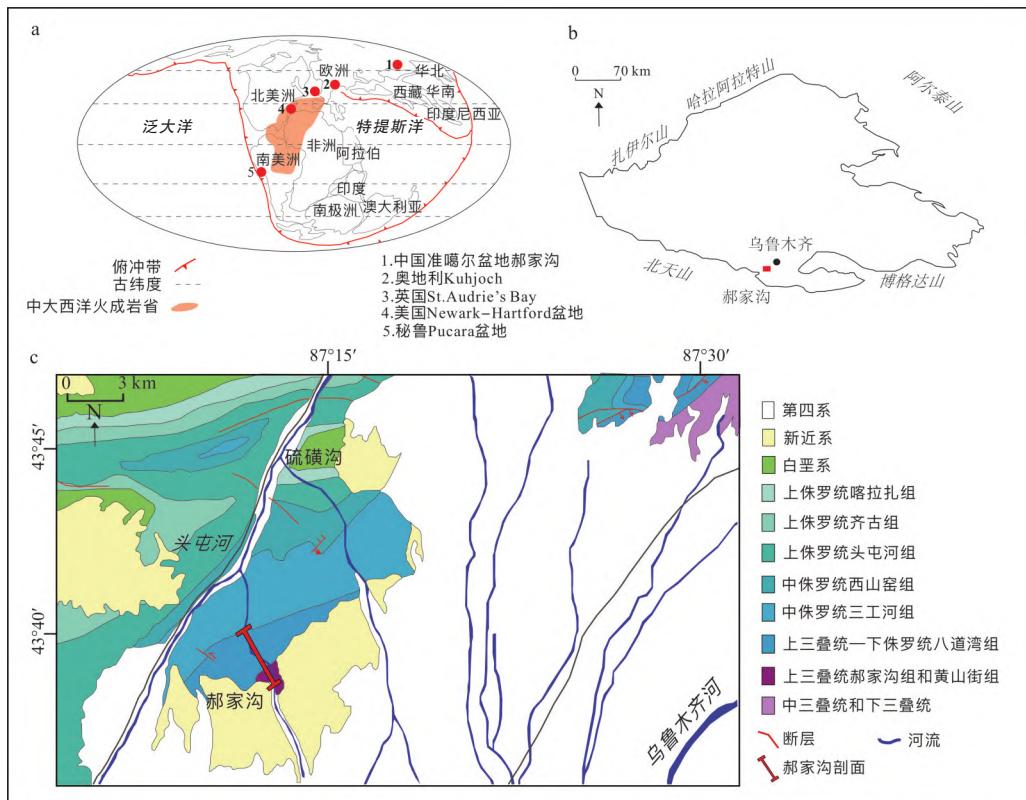


图 1 三叠纪—侏罗纪之交古地理及准噶尔盆地位置(a)、剖面位置(b)及地层出露图(c)

(据 Sha et al., 2015 修改)

Fig. 1 Paleogeography and location of the Junggar Basin during the Triassic-Jurassic transition (a), section location (b) and stratigraphic outcrop (c) of the Junggar Basin (modified from Sha et al., 2015)

定在八道湾组与郝家沟组交界处，即 44 层与 45 层界线处。

卢远征等(2009)在该剖面所进行的孢粉统计研究发现，郝家沟组中可以识别出两个孢粉组合，八道湾组下部有 3 个孢粉组合，自下而上依次为：1) *Aratrusporites-Chordasporites-Nonstriate bisaccate*，2) *Lycopodiacidites rugulatus-Nonstriate bisaccate*，3) *Asseretospora-Dictyophyllidites*，4) *Densoisporites-Nonstriate*，5) *bisaccate Cyathidites-Nonstriate bisaccate*。郝家沟组的两个组合中都是以无肋纹的双囊花粉和单沟花粉为主，晚三叠世分子常见，如 *Aratrisporites*，*Limatasporites* 等。而从位于八道湾组底部的第 3 组开始，蕨类植物孢子迅速占据优势地位，在郝家沟组与八道湾组界线附近(即 44 层与 45 层界线处)出现了蕨类孢子骤增的现象，并发现了一些侏罗纪常见分子，如 *Cyathidites* 和 *Densoisporites* 等。因此，TJB 也置于该层位定在了八道湾组与郝家沟组交界处。孢粉学证据表明郝家沟组与八道湾组界线处环境发生了突变，植物类型发生了重大变化，指示气候由温暖湿润向炎热潮湿转变。

黄嫔(2006)依据孢粉鉴定统计的结果提出不同的划分方案，将郝家沟剖面郝家沟组和八道湾组 9~90 层划分为 5 个孢粉组合，分别为：1) *Concavisporites-Dictyophyllidites-Chasmatosporites-Cycadopites* (9~20 层，晚三叠世)，2) *Cyathidites-Deltoidospora-Chasmatosporites-Cycadopites* (22~23 层，早侏罗世早期)，3) *Cyathidites-Brevilaeraspora-Chasmatosp orites-Cycadopites-Perinopol-lenites* (24~44 层，早侏罗世早期)，4) *Cyathidites-Osmundacidites-Pinuspollenites-Piceites-Perinopollenites* (45~79 层，早侏罗世早期)，5) *Cyathidites-Contignisporites* (90 层，早侏罗世晚期)。最终，其根据所获得孢粉组合数据，并参考《西北地区区域地层表新疆维吾尔自治区分册》(1981)对界线的界定方案和张义杰(2003)的地层分层方案，将 TJB 界线放在了 22 层底。Ashraf et al.(1999, 2010)根据孢粉数据，将 TJB 定在了 24 层底界。Sha et al.(2015)根据孢粉中的侏罗纪分子 *Retritriletes austroclavatidits* 和 *Retritriletes semimuris*，以及三叠纪分子 *Lutisporites rhaeticus* (可与欧洲、北美洲和格陵兰剖面进行对比)和 *Limbosporites spp.*，将 TJB 定在了 53 层底。

对奥地利三叠系—侏罗系金钉子剖面碳同位素曲线和菊石首现面的综合对比，在 TJB 发现的两次碳同位素负偏可以被定义 TJB 界面的菊石 *Psiloceras spelae* 首现面所约束(Ruhl et al., 2009, 2010)。在丹麦、英国、格陵兰、美国等地的三叠系—侏罗系剖面也都报道了地层记录中两次碳同位素负偏现象(Hesselbo et al., 2002; Thibodeau et al., 2016; Percival et al., 2017; Lindström et al., 2019)。通过全球 TJB 剖面有机碳同位素地层曲线、Hg/TOC、孢粉与郝家沟剖面进行对比，郝家沟剖面的 ETE 初步判定在 45 层附近；而 TJB 位于有机碳同位素地层曲线主要负偏起始的 51 层附近(Fang et al., 2021; 张新智等, 2022)。

2 材料与方法

本文样品采自准噶尔盆地南缘郝家沟剖面 39~54 层，共采集 284 块样品，采样间距为泥岩、粉砂岩 0.2 m，砂岩 0.4 m，砾岩 0.6~1.0 m。本次研究共选取 21 个样品进行孢粉提取，有效样品共 16 个，其中郝家沟组 6 个，八道湾组 10 个，对剖面的 16 层实现了全覆盖。所有样品的孢粉提取工作均在中国科学院西北生态环境资源研究院沙漠与

沙漠化重点实验室的孢粉学实验室完成，孢粉鉴定统计工作在中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室的显微实验室完成，并在 OLYMPUS BX51 显微镜下进行观察和拍照。

孢粉的提取采用盐酸—氢氟酸法，首先称量样品 30 g (煤取 5 g)，将样品碎至颗粒状(约 2 mm)，并加入石松孢子片(约含 27 600 粒石松孢子)；其次加盐酸处理 3~4 天后用蒸馏水洗至中性，再用氢氟酸进行相同的处理步骤，过筛得到 10~150 μm 之间的颗粒，用表面皿通过摇晃吸出悬浮物；最后离心并倒入浓盐酸 60 °C 水浴加热，通过再次离心将沉淀物制片进行鉴定统计。每个样品原则上鉴定不少于 150 粒孢粉，对于孢粉含量非常低的样品则以统计所加入的石松孢子不少于 1 000 粒为标准。本文孢粉鉴定主要参考宋之琛等(2000)所编著的《中国孢粉化石(第二卷)：中生代孢粉》。

3 孢粉组合

在 16 个样品中共鉴定出 84 属 256 种及若干未定种。其中蕨类及苔藓植物孢子 49 属 131 种，裸子植物 35 属 125 种。其中在 39 层(44 属 99 种)、53 层(43 属 96 种)、54 层(45 属 99 种)3 个层位孢粉的属种丰富度最为丰富；46 层(10 属 19 种)与 48 层(9 属 17 种)的孢粉种类丰富度最低。在整个剖面上孢粉种类丰富度整体呈现，由下往上先降低后增加的趋势。

孢子和花粉的相对含量在研究地层中也有明显的变化(图 2)。孢子含量在 41 层顶至 47 层平均含量(51.21%)明显高于其他层位，出现了 3 个较明显的峰值，最高值达到 70.83% (图 5)，且此时恰为孢粉属种丰富度最低的层位之一(含量最低层位为 45 层~48 层)。在 43 层~48 层部分裸子植物花粉含量占比迅速下降或灭绝；而蕨类植物孢子占比骤增，

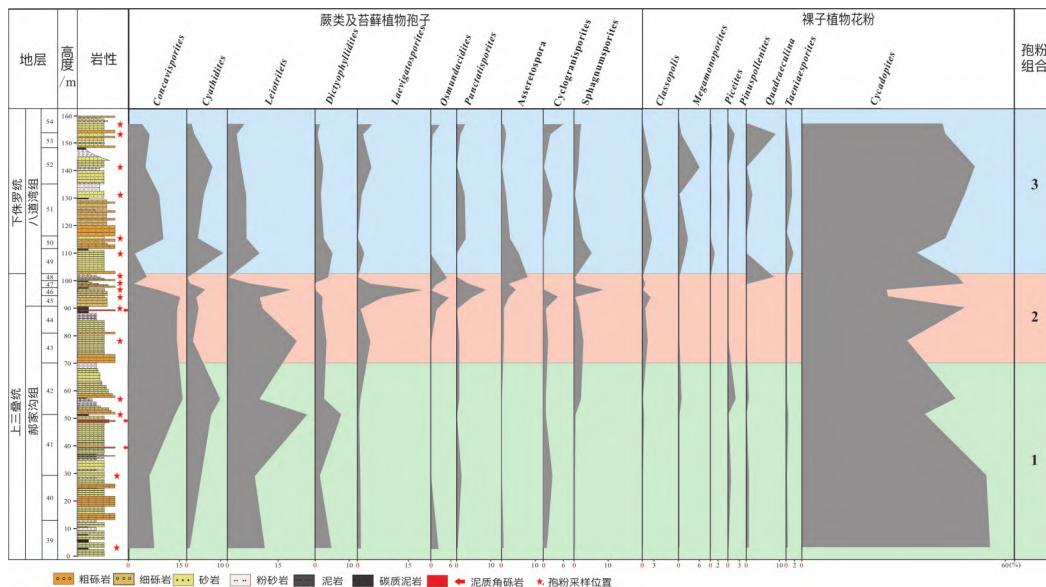


图 2 郝家沟剖面孢粉化石百分含量图

Fig. 2 Percentage of pollen and spores at the Haojiagou section

Concavisporites (平均含量 9.46%)、*Laevigatosporites* (平均含量 5.05%)、*Osmundacidites* (平均含量 1.84%)、*Asseretospora* (平均含量 2.98%) 等相对含量迅速上升。

根据孢粉的相对含量及变化, 将其划分为 3 个孢粉组合, 自下而上依次为:
Cycadopites-Deltoidospera 组合 (组合 1, 39 层 ~ 42 层), *Cycadopites-Deltoidospera-Concavisporites-Laevigatosporites* 组合 (组合 2, 43 层 ~ 48 层), *Cycadopites-Concavisporites-Psophosphaera-Deltoidospera* 组合 (组合 3, 49 层 ~ 54 层)。

3.1 *Cycadopites-Deltoidospera* (组合 1)

本组合产自郝家沟组 39 层 ~ 42 层, 鉴定出孢粉 64 属 149 种, 其中含蕨类及苔藓植物孢子 37 属 74 种, 含裸子植物花粉 27 属 75 种, 为郝家沟剖面孢粉种属最丰富的组合。在本组合中裸子植物花粉平均含量达 58.12% (40.47% ~ 72.19%), 蕨类及苔藓植物孢子平均含量 41.88% (27.81% ~ 59.53%)。本组合除 41 层蕨类及苔藓植物孢子含量高于裸子植物花粉外, 整体上裸子植物花粉略占优势(图 3)。

蕨类植物及苔藓植物孢子以具三缝孢子为主 (26.49% ~ 56.19%, 平均 39.55%), 含有 32 属 64 种, 主要有 *Deltoidospora* (7.28% ~ 21.40%, 平均 11.79%)、*Concavisporites* (5.96% ~ 15.69%, 平均 10.60%)、*Cyathidites* (0.60% ~ 7.84%, 平均 4.36%)、*Dictyophyllidites* (1.32% ~ 7.69%, 平均 4.11%)、*Cyclogranisporites* (0.65% ~ 2.65%, 平均 1.24%)、*Biretisporites* (0 ~ 2.79%, 平均 1.03%)、*Annulispora* (0 ~ 3.34%, 平均 1.00%); 具单缝孢子较少 (1.32% ~ 3.34%, 平均 2.33%), 含有 5 属 10 种, 主要包含 *Aratrisporites* (0 ~ 2.01%, 平均 0.93%) 等。

裸子植物花粉以具沟类花粉为主 (38.80% ~ 60.48%, 平均 50.99%), 含有 10 属 42 种, 主要包括 *Cycadopites* (36.45% ~ 56.09%, 平均 48.32%)、*Chasmatosporites* (0 ~ 3.31%, 平均 1.58%) 等; 具囊花粉次之 (1.34% ~ 8.50%, 平均 5.29%), 含有 13 属 27 种, 主要有 *Podocarpidites* (0.33% ~ 1.96%, 平均 1.05%) 等; 无口器花粉含量较少 (0.33% ~ 5.96%, 平均 1.84%), 含有 4 属 6 种, 主要有 *Psophosphaera* (0 ~ 4.64%, 平均 1.16%) 等。

本组合所含有的 *Concavisporites* 和 *Dictyophyllidites* 广泛分布于晚三叠世—早侏罗世的亚洲、欧洲和大洋洲等地(黄嫔等, 1993); *Cycadopites* 始现于古生代晚期, 在三叠纪后迅速增加, 并繁盛于侏罗纪(黄嫔, 2006); *Chasmatosporites* 在中生代各地均有分布, 所以仅靠这些分子还无法确定本组合的时代(黄嫔等, 2000; 刘兆生, 2003; 卢远征等, 2005)。然而 *Lunzisporites* sp.、*Kraeuselisporites apiculatus*、*Aratrisporites exiguous*、*A. wollariensis*、*A. xiangxiensis*、*A. minimus*、*Taeniaesporites hexagonalis*、*Taeniaesporites* spp. 等典型三叠纪分子(刘兆生, 2003; 卢远征等, 2005)的出现是将本组合归于三叠纪的有力证据。而在本组合中也发现了一些其他分子, 如中生代和新生代均有分布, 但主要分布于侏罗纪的 *Deltoidospora*(黄嫔等, 2006); 分布于侏罗纪—早白垩世, 并在侏罗纪达到繁盛的 *Cyathidites*(刘兆生, 2003), 这些分子的少量出现都让本组合又有了一些侏罗纪的色彩。综合上述分析, 本文认为本组合时代应归于晚三叠世晚期。

3.2 *Cycadopites-Deltoidospera-Concavisporites-Laevigatosporites* (组合 2)

本组合产自郝家沟组 43 层 ~ 48 层, 鉴定出孢粉 45 属 103 种, 其中含蕨类及苔藓植

物孢子 26 属 52 种，含裸子植物花粉 19 属 21 种。在本组合中裸子植物花粉平均含量 52.72% (29.17% ~ 75.48%)，蕨类及苔藓植物孢子平均含量 47.28% (24.52% ~ 70.83%)。本组合孢粉含量比例波动频繁，孢子含量最高可达 70.83%，而最低却仅有 24.52%，然而平均含量明显高于其他组合；具囊花粉在本组合中属种数量及花粉含量均值均小于另外两个组合，甚至在 43 层、45 层、46 层和 48 层中均未鉴定出具囊花粉；另外具沟花粉的平均含量也明显低于另外两个组合，仅有 42.89% (图 3, 图 4)。

蕨类植物及苔藓植物孢子以具三缝孢子为主 (17.42% ~ 54.67%，平均 40.08%)，含有 22 属 45 种，主要有 *Deltoidospora* (0 ~ 18.67%，平均 11.79%)、*Concavisporites* (1.29% ~ 14.89%，平均 10.60%)、*Asseretospora* (0.67% ~ 8.33%，平均 2.98%)、*Punctatisporites* (0 ~

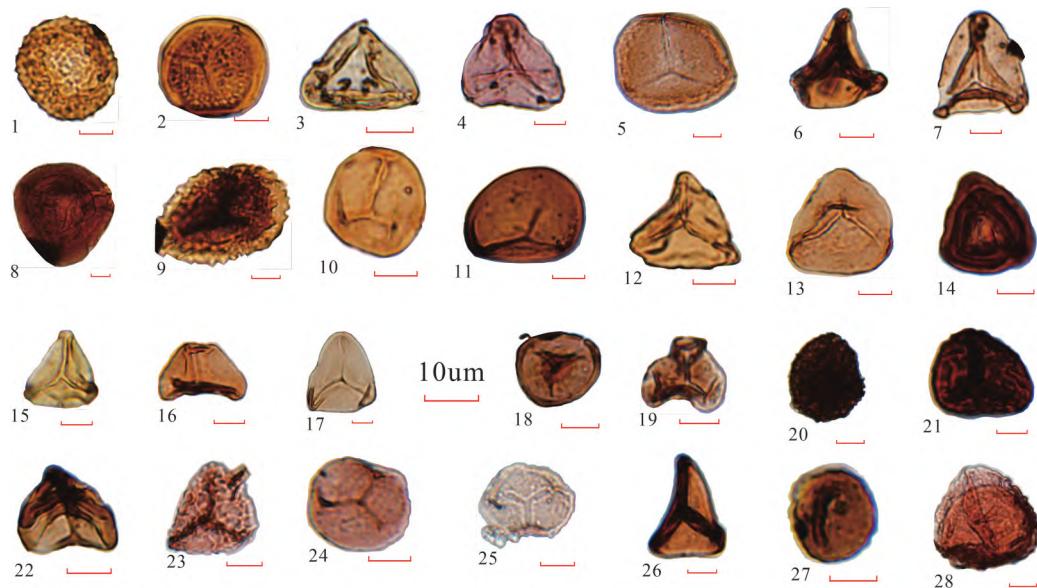


图 3 郝家沟剖面郝家沟组与八道湾组代表性孢子

1. *Baculatisporites cf. gemmatus* Krutzsch, 1959; HJG-B39-9. 2. *Cyclogranisporites multigranus* Smith et Butterworth, 1967; HJG-B39-9. 3, 4. *Cyathidites minor* Couper, 1953; HJG-B40-57; HJG-B49-202. 5. *Cyclogranisporites arenosus* Madler, 1964; HJG-B53-270. 6-7. *Concavisporites toralis* (Leschik, 1955) Nilsson, 1958; 6, 7. HJG-B42-104. 8. *Limatulasporites haojiagouensis* Zhang, 1990; HJG-B39-9. 9. *Kraeuselisporites apiculatus* Jansonius, 1962; HJG-B39-9. 10. *Punctatisporites qingyangensis* Li, 1981; HJG-B39-9. 11. *Punctatisporites shensiensis* Qu, 1980; HJG-B53-270. 12. *Deltoidospora microlepioides* (Krutzsch) Wang, 1981; HJG-B39-9. 13. *Deltoidospora hallii* Miner, 1935; HJG-B41-97. 14. *Asseretospora parva* (Li et Shang) Pu et Wu, 1985; HJG-B51-236. 15. *Dictyophyllidites junggarensis* Zhang, 1990; HJG-B40-57. 16. *Dictyophyllidites mortoni* (De Jersey) Playford et Dettmann, 1965; HJG-B41-97. 17. *Dictyophyllidites harrisii* Couper, 1958; HJG-B50-218. 18. *Annulispora minima* Zhang, 1990; HJG-B51-236. 19. *Cibotiumspora jurienensis* (Balme) Filatoff, 1975; HJG-B41-97. 20. *Osmundacidites parvus* De Jersey, 1962; HJG-B48-184. 21. *Lycopodiacidites minus* Lu et Wang, 1980; HJG-B54-279. 22. *Leiotriletes hypeneiformis* Zhang, 1984; HJG-B50-218. 23. *Lycopodiumsporites semimuris* Danze-Corsin et Laveine, 1963; HJG-B54-279. 24. *Retusotriletes arcticus* Qu et Wang, 1986; HJG-B54-279. 25. *Sphagnumsporites antiquasporites* (Wilson et Webster) Pocock, 1962; HJG-B53-270. 26. *Auritulinaspores scanicus* Nilsson, 1958; HJG-B53-270. 27. *Punctatosporites minutus* Ibrahim, 1933; HJG-B53-270. 28. *Aratrisporites coryliseiminis* Klaus, 1960; HJG-B54-279

Fig. 3 Representative spores of the Haojiagou and Badaowan formations at the Haojiagou section

8.33%，平均 2.75%）、*Sphagnumsporites*（0~8.33%，平均 2.16%）、*Dictyophyllidites*（0~4.17%，平均 1.94%）、*Osmundacidites*（0~4.26%，平均 1.84%）、*Cyathidites*（0~4.17%，平均 1.83%）、*Todisporites*（0~8.33%，平均 1.50%）、*Annulispera*（0~2.58%，平均 1.12%）、*Cyclogranisporites*（0~4.26%，平均 1.04%）、*Leiotriletes*（0~4.67%，平均 1.00%）；具单缝孢子较少（0~16.67%，平均 7.20%），含有 4 属 7 种，主要包含 *Laevigatosporites*（0~16.67%，平均 5.05%）等。

裸子植物花粉以具沟类花粉为主（25.00%~58.33%，平均 42.89%），含有 7 属 32 种，主要包括 *Cycadopites*（25.00%~50.00%，平均 37.99%）、*Chasmatosporites*（0~8.33%，平均 3.66%）等；无口器花粉次之（0~14.48%，平均 7.34%），含有 4 属 8 种，主要有 *Psophosphaera*（0~12.50%，平均 2.88%）、*Granasporites*（0~5.81%，平均 1.55%）、*Inaperturopollenites*（0~4.17%，平均 1.48%）、*Spheripollenties*（0~5.16%，平均 1.44%）等；具囊花粉含量较少（0~12.26%，平均 2.49%），含有 8 属 11 种，主要有 *Quadraeculina*（0~8.33%，平均 1.39%）、*Caytonipollenites*（0~7.74%，平均 1.29%）等。

本组合中主要分布于三叠纪的分子 *Punctatisporites*（刘兆生，2003；黄嫔，2006）含量较高（0~8.33%，平均 2.75%），其中以 *P. minutus* 和 *P. weiyuanensis* 为主；另外本组合 45 层 *Aratrisporites minimus* 含量高达 2.13%（高于组合 1 中所有层位），所以本组合依然归为三叠纪。然而本组合的孢粉种类丰度远低于另外两组合（仅 45 属 103 种），具囊花粉的变化尤为明显，所占比例低（2.49%）。在组合 1 中出现的 *Podocarpidites* 中的 5 个种在本组合中仅余 *Podocarpidites multicinus* 一种，*P. tricoccus*、*P. decorus*、*P. arquatus*、*P. minisculus* 均已灭绝；另外 *Alisporites rotundus*、*A. aequalis*、*Quadraeculina enigmata*、*Q. limbata* 等分子也均未在本组合与上覆的组合 3 中出现。因此推断本组合可能为晚三叠世末期生物大灭绝时期。

3.3 *Cycadopites-Concavispores-Psophosphaera-Deltoidospera* (组合 3)

本组合产自八道湾组 49~54 层，鉴定出孢粉 67 属 183 种，其中蕨类及苔藓植物孢子 37 属 89 种，裸子植物花粉 30 属 94 种。本组合蕨类及苔藓植物孢子平均含量 34.22%（26.19%~43.29%），裸子植物花粉平均含量 65.78%（56.71%~73.81%）。本组合裸子植物花粉含量高于蕨类及苔藓植物孢子含量，裸子植物占据了明显优势，且具囊花粉种类相较于另外两组合有明显增加。

蕨类植物及苔藓植物孢子以具三缝孢子为主（22.62%~37.25%，平均 29.70%），含有 32 属 74 种，主要有 *Concavispores*（1.69%~10.00%，平均 5.94%）、*Deltoidospora*（2.54%~8.47%，平均 4.82%）、*Cyathidites*（1.01%~8.47%，平均 3.95%）、*Dictyophyllidites*（0.72%~5.08%，平均 2.28%）、*Sphagnumsporites*（0~5.08%，平均 2.10%）、*Asseretospora*（0~5.08%，平均 1.84%）、*Cyclogranisporites*（0~5.70%，平均 1.75%）、*Punctatisporites*（0~2.50%，平均 1.38%）等；具单缝孢子相对较少（1.32%~6.88%，平均 4.52%），含有 5 属 15 种，主要包含 *Laevigatosporites*（0~3.69%，平均 1.90%）、*Aratrisporites*（0~5.08%，平均 1.61%）等。

裸子植物花粉以具沟类花粉为主（38.98%~60.71%，平均 51.56%），含有 10 属 47 种，

主要包括 *Cycadopites* (33.90% ~ 51.19%，平均 44.15%)、*Chasmatosporites* (0 ~ 7.95%，平均 3.44%)、*Megamonoporites* (0 ~ 5.95%，平均 1.81%)、*Classopollis* (0 ~ 2.50%，平均 1.15%) 等；无口器花粉次之 (4.71% ~ 15.00%，平均 8.65%)，含有 4 属 11 种，主要有 *Psophosphaera* (1.09% ~ 15.00%，平均 5.36%)、*Inaperturopollenites* (0 ~ 3.26%，平均 1.71%) 等；具囊花粉较少 (2.35% ~ 10.17%，平均 5.57%)，含有 16 属 36 种，主要有 *Quadraeculina* (0 ~ 9.06%，平均 1.90%) 等。

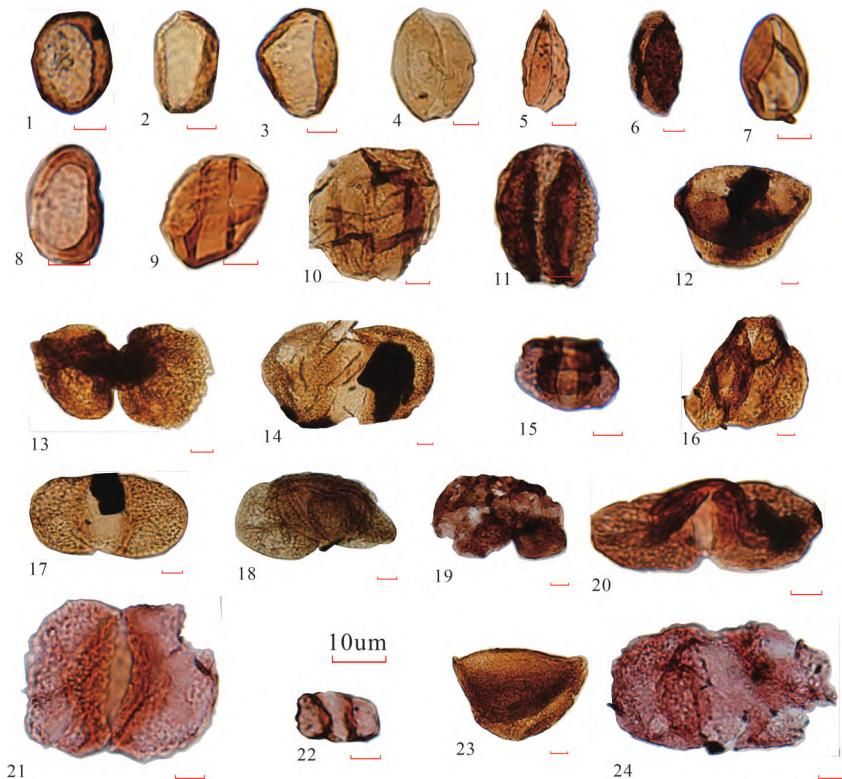


图 4 郝家沟剖面郝家沟组与八道湾组代表性花粉

1. *Chasmatosporites elegans* Nilsson, 1958; HJG-B43-128.
2. *Chasmatosporites yaoertouensis* Qu, 1984; HJG-B39-9.
3. *Chasmatosporites triangularis* Li, Duan et Du, 1982; HJG-B39-9.
4. *Cycadopites formosus* Singh, 1964; HJG-B39-9.
5. *Cycadopites striatus* Quyang et Norris, 1988; HJG-B41-97.
6. *Cycadopites excrescens* Qian, Zhao et Wu, 1983; HJG-B53-270.
7. *Cycadopites pyriformis* (Nilsson) Zhang, 1984; HJG-B42-104.
8. *Classopollis classoides* Pflug, 1953; HJG-B41-97.
9. *Haojiagoupollenites xinjiangensis* Huang, 2006; HJG-B41-97.
10. *Psophosphaera bullulinaeformis* (Maljatkina) Zhang, 1978; HJG-B39-9.
11. *Quadraeculina anellaeformis* Maljatkina, 1949; HJG-B53-270.
12. *Erlianpollis mediocris* Zhao, 1987; HJG-B44-153.
13. *Platysaccus oculus* Li, 1984; HJG-B39-9.
14. *Pseudopinus pectinella* Bolkhovitina, 1956; HJG-B39-9.
15. *Taeniaesporites kraeuseli* Leschik, 1955; HJG-B51-236.
16. *Piceapollenites* sp.; HJG-B42-104.
17. *Alisporites aequalis* Madler, 1964; HJG-B39-9.
18. *Pinuspollenites globosaccus* Filatoff, 1975; HJG-B40-57.
19. *Cedripites permirrus* (Bolkh.) Hua, 1986; HJG-B47-176.
20. *Podocarpidites transversus* Qu et Wang, 1986; HJG-B41-97.
21. *Podocarpidites paulus* (Bolkh.) Xu et Zhang, 1980; HJG-B51-236.
22. *Caytonipollenites pallidus* (Reissinger) Couper, 1958; HJG-B47-176.
23. *Piceapollenites singularae* (Bolkh.) Zhang, 1986; HJG-B39-9.
24. *Piceites expositus* Bolkhovitina, 1956; HJG-B49-202

Fig. 4 Representative pollen of the Haojiagu and Badaowan formations at the Haojiagou section

广泛分布于世界各地侏罗纪—古近纪的 *Divisisporites* sp. (黄嫔, 2006) 在本组合中首次出现; 分布于侏罗纪及以后的 *Lycopodiumsporites* (黄嫔, 2006) 中 *Lycopodiumsporites semimuris*、*L. austroclavatidites*、*L. laevigatus*、*L. pseudoannotinus*、*Lycopodiumsporites* sp. 等分子也在本组合中被鉴定出; 分布于侏罗纪—白垩纪的 *Callialasporites turbatus* (黄嫔, 2006) 等分子也出现在了本组合中; 繁盛于侏罗纪的 *Cyathidites* (3.95%)、*Cycadopites* (44.15%)、*Classopollis* (1.15%) 和 *Quadraeculina* (1.90%) 含量在本组合中也明显上升, 指示本组合已具有了侏罗纪的特点。另外本组合中出现了大量的新属种, 可能为三叠纪末生物大灭绝后的迅速恢复阶段, 因此本组合时代应归于早侏罗世早期。

4 讨 论

4.1 古气候变化

本文根据钟筱春等(2002) (表1)对孢粉所对应生态环境的划分, 将地层中所提取到的孢粉以属为单位寻找其母体植物与现代植物的亲缘关系, 然后将这些植物的生态特征及所对应生存环境(尤其是温湿条件)进行划分。最终将不同生态特征的植物进行分类后, 进行定量统计, 并对三叠纪—侏罗纪之交温度和湿度的相对变化进行古气候重建。

在本研究中, 共识别出 *Cibotiumspora*、*Klukisporites*、*Cyathidites*、*Undulatisporites*、*Cycadopites*、*Callialasporites* 和 *Podocarpidites* 共7属典型热带分子, 将其百分含量进行相加, 用热带分子总含量进行准噶尔盆地南缘的古气温模拟, 得到古气温相对变化曲线。

表 1 孢粉对应植物生存环境(据钟筱春等, 2002)

Table 1 Living environments of plants corresponding to spores and pollen (modified from Zhong et al., 2002)

孢粉	母体植物	植物类型	生态特征	气候特征
<i>Cibotiumspora</i>	蚌壳蕨科	阔叶树	湿生	热带
<i>Klukisporites</i>	海金沙科	灌木	湿生	热带
<i>Cyathidites</i>	桫椤科	阔叶树	湿生	热带
<i>Deltoidospora</i>	桫椤科	阔叶树	湿生	热带、亚热带
<i>Undulatisporites</i>	瓶尔小草科	灌木	湿生	热带
<i>Cycadopites</i>	苏铁科	阔叶树	中生	热带
<i>Callialasporites</i>	南美杉科	针叶树	旱生	热带
<i>Podocarpidites</i>	罗汉松科	针叶树	湿生	热带
<i>Densoisporites</i>	卷柏科	灌木	湿生	热带、亚热带、温带
<i>Calamospora</i>	芦木科	灌木	湿生	热带、亚热带
<i>Dictyophyllidites</i>	双扇蕨科	灌木	湿生	热带、亚热带
<i>Concavisporites</i>	双扇蕨科	灌木	湿生	热带、亚热带
<i>Gleicheniidites</i>	里白科	灌木	湿生	热带、亚热带
<i>Osmundacidites</i>	紫萁科	灌木	湿生	热带、亚热带、温带
<i>Baculatisporites</i>	紫萁科	灌木	湿生	热带、亚热带、温带
<i>Laevigatosporites</i>	水龙骨科	灌木	湿生	热带、亚热带、温带
<i>Piceaepollenites</i>	松科	针叶树	湿生	温带

数据指示在39层~40层沉积时期古气温一直处于较高水平，而在41层顶部突然开始剧烈降温，而后古气温持续波浪式地渐次下降，直到45层~46层沉积时期下降到最低值。在古气温波动下降过程中，郝家沟剖面共记录到了3个明显的降温期次，分别位于41层顶部、43层、45层~46层，其中第三期降温幅度最大、最迅速、持续时间最短，根据前人旋回地层学获得的浮动天文标尺持续了约70 kyr (Sha et al., 2015)。此后古气温在47层沉积时期迅速回升，并在47层~52层总体上处于平缓升温阶段，并在52层恢复到降温前水平，随后在53层~54层略有降低。总体来看，准噶尔盆地南缘在三叠纪—侏罗纪之交41层顶部至46层沉积时期为一个波动下降的低温期，随后迅速回升并在后来的一段时期内保持了相对较高温的气候。

将 *Densoisporites*、*Calamospora*、*Cibotiumspora*、*Dictyophyllidites*、*Concavisporites*、*Gleicheniidites*、*Osmundacidites*、*Baculatisporites*、*Klukisporites*、*Laevigatosporites*、*Cyathidites*、*Deltoidospora*、*Undulatisporites*、*Podocarpidites* 和 *Piceaepollenites* 共15属典型湿生分子，采用与古气温模拟相同的方法进行古湿度模拟，获得古湿度相对变化曲线。数据显示在40层湿度迅速开始上升，并在41层顶部至46层整体处湿度较高水平，且在46层出现了该剖面中相对湿度的最高峰值；随后湿度急剧下降，在47层~48层下降到了最低值并持续了约70 kyr(Sha et al., 2015)；湿度下降至最低值以后在49层出现了短暂而迅速的回升，然而本次湿度增加过程仅持续了约77 kyr(Sha et al., 2015)，在50层又下降到了较低水平，并在此后基本保持了相对稳定的状态，湿度不再出现较大波动，47层~54层整体上处于相对干燥的状态。综合来看，郝家沟剖面地层中记录了由晚三叠世相对湿润气候条件向早侏罗世相对干燥气候条件演变的过程。

孢粉对古气候重建结果显示三叠纪—侏罗纪之交准噶尔盆地南缘的气候演变经历了相对湿热—湿冷—干热的变化过程(图5)。另外，根据郝家沟剖面地层中 Hg/TOC、S/TOC 和生物标志化合物数据推断 CAMP 的剧烈喷发和侵位与野火事件频率升高同期(张新智等, 2022)，且在当时处于其活动区和直接作用区之外(距离大于4 000 km)的准噶尔盆地南缘也受到了其影响，在42层底部至51层上部沉积时期对应着 CAMP 活动阶段。值得注意的是，CAMP 活动时期与准噶尔盆地南缘降温及重新升温至较干热气候的过程同期。因此推断准噶尔盆地南缘三叠纪—侏罗纪之交的古气候变化，受到了 CAMP 剧烈侵位和喷发造成的影响。

4.2 生物灭绝与地层界线

前人在该剖面植物化石的研究显示3个期次的生物灭绝(邓胜徽等, 2013)，而本次较高密度的孢粉统计数据也在对应层位发现了3个孢子含量迅速升高现象的层位，分别在41层顶部至42层底部、43层底部和45层底部。此外，有机碳同位素地层曲线也分别在这3个层位出现了明显负偏。植物大化石、孢粉及有机碳同位素地层曲线突变的层位恰好与上文中所提到的 Hg/TOC、S/TOC 明显升高的层位相吻合。综合植物化石、孢粉及有机碳同位素数据综合分析，推断在准噶尔盆地三叠纪末植被记录到了3个期次的灭绝。

对3个孢粉组合所做的种属丰度统计结果显示，组合1和组合3孢粉种属丰富度最高，分别为64属149种和67属183种；组合2孢粉种属丰度最低，仅有45属103种，本

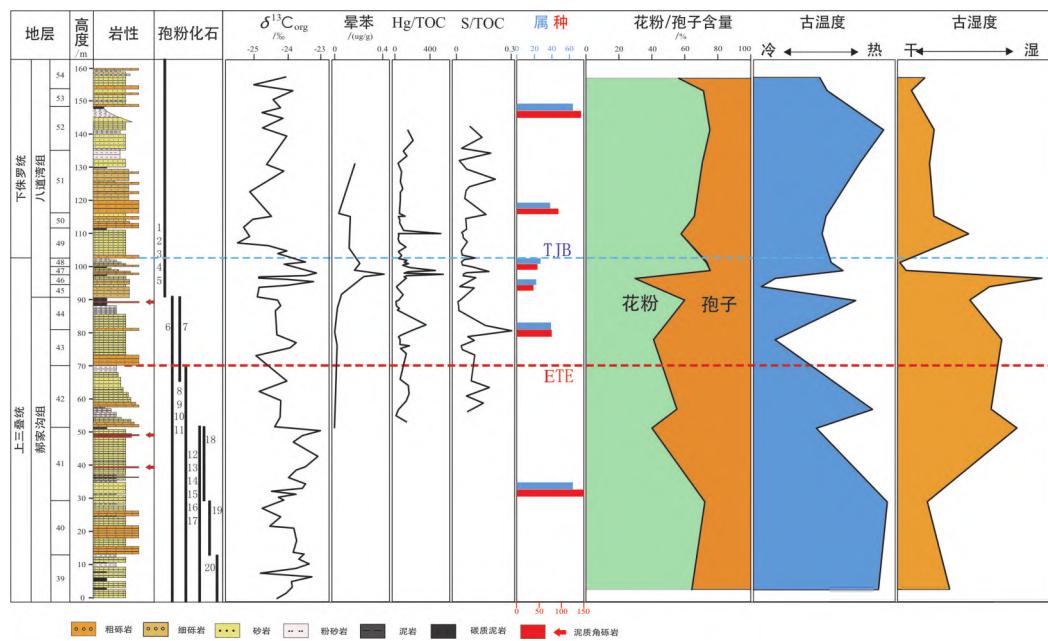


图 5 郝家沟剖面孢粉与地球化学数据综合对比图(植物化石据邓胜徽等, 2013; 有机碳同位素地层曲线据 Fang et al., 2021; 晕苯、Hg/TOC、S/TOC 据张新智等, 2022)

孢粉化石: 1. *Annulispora* sp.; 2. *Biretisporites lavigatus* Zhang, 1990 ex Huang nom. Nov.; 3. *Calamospora* sp.; 4. *Crassitudisporites* sp.; 5. *Plicifera* sp.; 6. *Aratrisporites* sp.; 7. *Lueckisporites tatoensis* Jensonius, 1962; 8. *Kraeuselisporites* sp.; 9. *Verrucosisporites* sp.; 10. *Bharadwajapollenites* sp.; 11. *Pseudowarchia* sp.; 12. *Punctatisporites* sp.; 13. *Todisporites* sp.; 14. *Eridospollenites* sp.; 15. *Inaperturopollenites* sp.; 16. *Taeniaesporites* sp.; 17. *Vesicaspora* sp.; 18. *Protohaplexypinus* sp.; 19. *Granasporites magnus* Qian, Zhao et Wu, 1983; 20. *Laevigatosporites* sp.

Fig. 5 Comprehensive comparison of palynological and geochemical data of the Haojiagou section (fossils of plants after Deng et al., 2013; $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ after Fang et al., 2021; coronene, Hg/TOC, S/TOC after Zhang et al., 2020)

组合的植物物种丰度明显低于其他组合。某些孢粉的百分含量变化也指示了生态系统显著波动的现象, *Megamonoporites*、*Piceites*、*Pinuspollenites*、*Quadraeculina*、*Taeniaesporites* 等裸子植物花粉在 43 层底至 49 层底含量迅速降低或暂时消失, 而从 49 层底开始含量明显升高; 而 *Asseretospora*、*Concavisporites*、*Deltoidospora*、*Laevigatosporites*、*Osmundacidites*、*Punctatisporites* 等蕨类及苔藓植物花粉在该层位的变化趋势与裸子植物花粉相反, 在短时间内百分含量迅速增加, 随后又迅速下降。在欧洲也有类似的报道, Schootbrugge et al.(2009)曾对德国三叠系—侏罗系进行孢粉研究, 发现在 ETE 之上裸子植物花粉相对含量骤降, 而蕨类及苔藓植物花粉相对含量迅速上升, 直到 TJB 裸子植物花粉才重新占据优势, 与郝家沟剖面的现象一致。国内学者在对准噶尔盆地(卢远征等, 2009)和四川盆地(Li et al., 2020)的研究中也发现了类似的孢粉含量剧烈变化的现象, 推测该时期陆地生态系统的波动具有全球性。

另一值得注意的现象是, 火灾成因的晕苯含量相对 42 层而言在 43 层略有增加, 而

到45层以上增长速度急剧增加，并达到峰值(0.41×10^{-6})；随后开始下降，但于48层出现了一个相对较小的次峰(0.21×10^{-6})，此后再无明显的高值(张新智等，2022)。Lindström et al.(2019, 2020)曾报道在欧洲多处地层中存在Hg及Hg/TOC含量在生物灭绝期间明显升高的现象，且野火频率也有显著上升趋势，该现象与郝家沟剖面十分吻合；海相地层中菊石*Choristoceras marshi*与*Choristoceras crickmayi*灭绝层位所对应的碳同位素负偏(Marshy CIE)标志着ETE的开始(Lindström et al., 2021)，与位于郝家沟剖面43层底部的首次碳同位素负偏相对应，通过Hg/TOC曲线可进行辅助对比。综上，孢粉数据结合前人植物大化石、有机碳同位素地层曲线、生物标志化合物和Hg/TOC全球对比的结果指示ETE可能在43层底附近，TJB在49层底附近。

5 结 论

(1) 综合植物大化石、全球各典型剖面的有机碳同位素地层曲线、孢粉、Hg/TOC和生物标志化合物的对比，厘定了郝家沟剖面ETE界线位于43层底部附近，TJB界线位于49层底部附近。

(2) 通过孢粉数据对准噶尔盆地南缘三叠纪—侏罗纪之交的古气候进行了重建，指示该区域经历了由晚三叠世晚期的湿热变为晚三叠世末期湿冷，再到早侏罗世早期干热的气候变化过程。此过程与CAMP的剧烈活动同期或准同期，推测两者可能存在成因联系。

(3) 根据准噶尔盆地南缘三叠纪—侏罗纪之交的植物化石灭绝记录、孢子含量峰值和有机碳同位素地层曲线负偏，在3个层位(42层、43层和45层底部)都有同期异常波动，推断在准噶尔盆地三叠纪末陆地植被记录到了3个期次的灭绝。

(4) 在郝家沟剖面ETE与TJB之间的地层(尤其45层之上)，蕨类孢子含量显著高于其他层位，该现象与全球其他典型TJB剖面一致，推测在ETE与TJB之间的时段蕨类“脉冲式”繁盛可能具有全球性。

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、李天天和温顺久对本研究中样品测试与分析给予的帮助与支持，感谢中国科学院西北生态环境资源研究院沙漠与沙漠化重点实验室孢粉学实验室的段引弟对本研究中孢粉提取给予的帮助与支持。

参 考 文 献

- 邓胜徽, 卢远征, 樊茹等. 2010. 新疆北部的侏罗系. 合肥: 中国科学技术大学出版社. 17-200.
Deng Shenghui, Lu Yuanzheng, Fan Ru et al. 2010. The Jurassic System of Northern Xinjiang, China. Hefei: Press of University of Science and Technology of China. 17-200.
- 邓胜徽, 卢远征, 樊茹等. 2013. 中国陆相三叠系-侏罗系界线. 地层学杂志, 37(4), 582-584.
Deng Shenghui, Lu Yuanzheng, Fan Ru et al. 2013. Terrestrial Triassic-Jurassic boundary in China. *Journal of Stratigraphy*, 37(4): 582-584.
- 新疆维吾尔自治区区域地层表编写组. 1981. 西北地区区域地层表——新疆维吾尔自治区分册. 北京: 地质出版社. 1-496.

- Editorial Committee of Regional Stratigraphic of Xinjiang Uygur Autonomous. 1981. Stratigraphic Scheme of Northwestern Region, China: Division on the Xinjiang Uygur Autonomous Region. Beijing: Geological Publishing House. 1-496.
- 方世虎. 2004. 准噶尔盆地南缘中新生代构造演化及盆山关系研究(博士学位论文). 北京: 北京大学. 1-90.
- Fang Shihu. 2004. Mesozoic Cenozoic Tectonic Evolution and Basin Mountain Relationship in the Southern Margin of Junggar Basin (PhD Thesis). Beijing: Peking University. 1-90.
- 辜延容. 2015. 准噶尔盆地南缘构造特征与油气分布(硕士学位论文). 成都: 成都理工大学. 1-71.
- Gu Yanrong. 2015. The Structure Feature and Oil-Gas Distribution in Southern Margin of the Junggar Basin (Master's Thesis). Chengdu: Chengdu University of Technology. 1-71.
- 黄 婕. 1993. 新疆准噶尔盆地西北缘三叠纪孢粉组合. 微体古生物学报, 10(4), 363-395.
- Huang Pin. 1993. Triassic sporopollen assemblages from northwestern margin of Junggar Basin, Xinjiang. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 10(4), 363-395.
- 黄 婕, 管永明, 杨晓清. 2000. 江苏句容深层早侏罗世孢粉植物群的发现. 微体古生物学报, 17(1): 85-98.
- Huang Pin, Guan Yongming and Yang Xiaoqing. 2000. The Early Jurassic palynoflora from a drilling section of Jurong, Jiangsu Province. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 17(1): 85-98.
- 黄 婕. 2006. 新疆乌鲁木齐郝家沟剖面郝家沟组和八道湾组孢粉组合及地层意义. 微体古生物学报. 23(3): 235-274.
- Huang Pin. 2006. Sporopollen assemblages from the Haojiagou and Badaowan formation at the Haojiagou section of Ürümqi, Xinjiang and their stratigraphical significance. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 23(3): 235-274.
- 刘兆生. 2003. 中国古生物志·新甲种第14号: 塔里木盆地库车凹陷三叠纪和侏罗纪孢粉组合. 北京: 科学出版社. 1-229.
- Liu Zhaosheng. 2003. Paleontologia Sinica No. 14: The Triassic and Jurassic Pollen and Spores Assemblages in the Kuqa Depression, Tarim Basin. Beijing: Science Press. 1-229.
- 卢远征, 邓胜徽. 2005. 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. 地质学报, 79(1): 15-27.
- Lu Yuanzheng and Deng Shenghui. 2005. Triassic-Jurassic sporopollen assemblages on the southern margin of the Junggar Basin, Xinjiang and the T-J boundary. *Acta Geologica Sinica*, 79(1): 15-27.
- 卢远征, 邓胜徽. 2009. 准噶尔盆地南缘三叠纪—侏罗纪之交的古气候. 古地理学报, 11(6): 652-660.
- Lu Yuanzheng and Deng Shenghui. 2009. Palaeoclimate around the Triassic-Jurassic boundary in southern margin of Junggar Basin. *Journal of Palaeogeography*, 11(6): 652-660.
- 宋之琛, 尚玉珂. 2000. 中国孢粉化石(第二卷): 中生代孢粉. 北京: 科学出版社. 1-710.
- Song Zhichen and Shang Yuke. 2000. China Fossil Pollen and Spores (Volume II): Mesozoic Pollen and Spores. Beijing: Science Press. 1-710.
- 王永栋, 付碧宏, 谢小平等. 2010. 四川盆地陆相三叠系与侏罗系. 合肥: 中国科学技术大学出版社. 1-394.
- Wang Yongdong, Fu Bihong, Xie Xiaoping et al. 2010. The Terrestrial Triassic and Jurassic Systems in the Sichuan Basin, China. Hefei: Press of University of Science and Technology of China. 1-394.
- 张 薇. 2016. 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(硕士学位论文). 成都: 成都理工大学. 1-76.
- Zhang Rui. 2016. Study on Sequence Stratigraphy and Sedimentary Facies of the Lower Jurassic Badaowan Formation in the Northwest of the Junggar Basin (Master's Thesis). Chengdu: Chengdu University of Technology. 1-76.
- 张新智, 吕沛宗, 方琳浩等. 2022. 三叠纪—侏罗纪之交准噶尔盆地南缘野火记录及全球对比. 沉积学报, 40(2): 473-483.
- Zhang Xinzhi, Lü Peizong, Fang Linhao et al. 2020. Wildfire records across the Triassic-Jurassic boundary in the southern margin of the Junggar Basin, and global correlations. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(2): 473-483.
- 张义杰, 齐雪峰, 程显胜等. 2003. 中国北方侏罗系(VII)新疆地区. 北京: 石油工业出版社. 1-339.
- Zhang Yijie, Qi Xuefeng, Chen Xiansheng et al. 2003. Jurassic System in the North of China (VII)-Xinjiang. Beijing: Petroleum Industry Press. 1-339.
- 钟筱春, 赵传本, 杨时中等. 2002. 中国北方侏罗系(II). 北京: 石油工业出版社. 1-201.
- Zhong Xiaochun, Zhao Chuanben, Yang Shizhong et al. 2002. Jurassic System in the North of China (II). Petroleum Industry Press. 1-201.
- Akikuni K, Vajda V, Hori R S et al. 2010. Stratigraphy of Triassic-Jurassic boundary sequences from the Kawhia coast and Awakino gorge, Murihiku terrane, New Zealand. *Stratigraphy*, 7(1): 7-24.

- Ashraf A R, Ge S, Wang X et al. 1999. The Triassic-Jurassic boundary in the Junggar Basin (NW-China): Preliminary palynostratigraphic results. *Acta Palaeobotanica*, (Suppl.2): 85-91.
- Ashraf A R, Sun Y, Sun G et al. 2010. Triassic and Jurassic palaeoclimate development in the Junggar Basin, Xinjiang, Northwest China: A review and additional lithological data. *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments*, 90 (3): 187-201.
- Beerling D J and Berner R A. 2002. Biogeochemical constraints on the Triassic-Jurassic boundary carbon cycle event. *Global Biogeochemical Cycles*, 16(3): 1-13.
- Belcher C M, Mander L, Rein G et al. 2010. Increased fire activity at the Triassic/Jurassic boundary in Greenland due to climate-driven floral change. *Nature Geoscience*, 3(6): 426-429.
- Carroll A R, Graham S A and Smith M E. 2010. Walled sedimentary basins of China. *Basin Research*, 22(1): 17-32.
- Fang Y N, Fang L H, Deng S H et al. 2021. Carbon isotope stratigraphy across the Triassic-Jurassic boundary in the high-latitude terrestrial Junggar Basin, NW China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 577: 110559.
- Harris T M. 1957. A Liasso-Rhaetic flora in South Wales. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 147 (928): 289-308.
- Harris T M. 1958. Forest fire in the Mesozoic. *Journal of Ecology*, 46(2): 447-453.
- Hesselbo S P, Robinson S A, Surlyk F et al. 2002. Terrestrial and marine extinction at the Triassic-Jurassic boundary synchronized with major carbon-cycle perturbation: A link to initiation of massive volcanism?. *Geology*, 30 (3): 251-254.
- Lamotte F D, Fourdan B, Leleu S et al. 2015. Style of rifting and the stages of Pangea breakup. *Tectonics*, 34(5): 1009-1029.
- Li L Q, Wang Y D, Kürschner W M et al. 2020. Palaeovegetation and palaeoclimate changes across the Triassic-Jurassic transition in the Sichuan Basin, China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 556: 109891.
- Lindström S, Erlström M. 2006. The Late Rhaetian transgression in southern Sweden: Regional (and global) recognition and relation to the Triassic-Jurassic boundary. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 241(3/4): 339-372.
- Lindström S, Sanei H, Schootbrugge B et al. 2019. Volcanic mercury and mutagenesis in land plants during the end-Triassic mass extinction. *Science Advances*, 5(10): aaw4018.
- Lindström S, Callegarob S, Davies J et al. 2021. Tracing volcanic emissions from the central Atlantic magmatic province in the sedimentary record. *Earth-Science Reviews*, 212: 103444.
- McElwain J C, Beerling D J and Woodward F I. 1999. Fossil plants and global warming at the Triassic-Jurassic boundary. *Science*, 285(5432): 1386-1390.
- McElwain J C, Popa M E, Hesselbo S P et al. 2007. Macroecological responses of terrestrial vegetation to climatic and atmospheric change across the Triassic/Jurassic boundary in East Greenland. *Paleobiology*, 33: 547-573.
- Percival L M E, Ruhl M, Hesselbo S P et al. 2017. Mercury evidence for pulsed volcanism during the end-Triassic mass extinction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114 (30): 7929-7934.
- Ruhl M, Kürschner W M and Krystyn L. 2009. Triassic-Jurassic organic carbon isotope stratigraphy of key sections in the western Tethys Realm (Austria). *Earth and Planetary Science Letters*, 281(3/4): 169-187.
- Ruhl M, Deenen M H L, Abels H A et al. 2010. 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). *Earth and Planetary Science Letters*, 295(1/2): 262-276.
- Schootbrugge V, Quan B, Lindström T M et al. 2009. Floral changes across the Triassic/Jurassic boundary linked to flood basalt volcanism. *Nature Geoscience*, 2(8): 589-594.
- Sha J G, Olsen P E, Pan Y H et al. 2015. Triassic-Jurassic climate in continental high-latitude Asia was dominated by obliquity-paced variations (Junggar Basin, Ürümqi, China). *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(12): 3624-3629.
- Song Y, Algeo T J, Wu W J et al. 2020. Distribution of pyrolytic PAHs across the Triassic-Jurassic boundary in the Sichuan Basin, southwestern China: Evidence of wildfire outside the central Atlantic magmatic province. *Earth-Science Reviews*, 201: 102970.

- Thibodeau A M, Ritterbush K, Yager J A et al. 2016. Mercury anomalies and the timing of biotic recovery following the end-Triassic mass extinction. *Nature Communications*, 7: 11147.
- Turner S, Bean L B, Dettmann M et al. 2009. Australian Jurassic sedimentary and fossil successions: Current work and future prospects for marine and non-marine correlation. *GFF*, 131: 49-70.
- Wignall P B and Atkinson J W. 2020. A two-phased end-Triassic mass extinction. *Earth Science Review*, 208: 103282.
- Williford K H, Grice K, Holman A et al. 2014. An organic record of terrestrial ecosystem collapse and recovery at the Triassic-Jurassic boundary in East Greenland. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 127: 251-263.

Palynological assemblages and palaeoclimate across the Triassic-Jurassic boundary in the Haojiagou section, southern Junggar Basin

Zhang Xinzhi^{1,2} Fang Linhao^{1,2} Wu Tao³ Miao Yunfa⁴ Zhang Mingzhen⁴

Wang Xuelian⁴ Lü Peizong^{1,2} He Xiujuan^{1,2} Qiu Ruoyuan⁵ Yang Han⁶ Ren Jiahao⁷

(1. College of Geoscience, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249; 3. Research Institute of Exploration and Development, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 843000; 4. Northwest Institute of Ecology and Environmental Resources, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000; 5. Key Laboratory of Cenozoic Geology and Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029; 6. Key Laboratory of Earthquake Geodesy, CEA, Wuhan 430071; 7. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871)

Abstract

The end-Triassic mass extinction (ETE) occurred at the Triassic-Jurassic boundary (TJB), and both marine and terrestrial ecosystems have collapsed. The floras are the first to collapse in the terrestrial ecosystems. However, detailed data on the changes of floras during this period are relatively rare. In order to reveal the response of floras, we systematically sampled and studied the TJB formation in the Haojiagou section in the southern Junggar Basin, Xinjiang. In this study, three palynological assemblages are divided according to the species composition and content variation of palynological genus, and the paleoclimate is reconstructed. We found that the paleoclimate in the southern Junggar Basin during the TJB fluctuated from wet-hot to wet-cold, and then to dry-hot characters. Meanwhile, the two important boundaries of ETE and TJB, and stages of the extinction were discussed. The palynological evidence and previous studies of global comparison of carbon isotope stratigraphy, Hg/TOC, the biomarker and plants fossils suggest that ETE may be at around the bottom of bed 43 in the Haojiagou Formation and TJB at around the bottom of bed 49 in the Badaowan Formation. It is inferred that there are three stages of the terrestrial flora extinctions around ETE in the high-latitude Junggar Basin. Because the “spores spike” in beds between ETE and TJB is consistent with the records in several classic sections across the world, it is speculated that the collapse of terrestrial ecosystem was on a global scale.

Keywords Junggar Basin, Triassic-Jurassic boundary, Pollen records, End-Triassic mass extinction, Paleoclimate