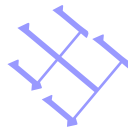




沉积学报
Acta Sedimentologica Sinica
ISSN 1000-0550, CN 62-1038/P

《沉积学报》网络首发论文

题目：三叠纪末大灭绝与中大西洋岩浆省的时空关联
作者：张薇，刘金超，丁美琪，孙嘉欣，梁瑞泽，王王，李嫚，何天辰
DOI：10.14027/j.issn.1000-0550.2026.022
收稿日期：2026-01-12
网络首发日期：2026-05-20
引用格式：张薇，刘金超，丁美琪，孙嘉欣，梁瑞泽，王王，李嫚，何天辰. 三叠纪末大灭绝与中大西洋岩浆省的时空关联[J/OL]. 沉积学报.
<https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2026.022>



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。

引用格式：张薇, 刘金超, 丁美琪, 等. 2026. 三叠纪末大灭绝与中大西洋岩浆省的时空关联[J/OL]. 沉积学报, DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.022
Zhang Wei, Liu Jinchao, Ding Meiqi, et al. 2026. Spatiotemporal Correlation Between the End-Triassic Mass Extinction and the Central Atlantic Magmatic Province[J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica, DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.022
DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.022 CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2026.022

三叠纪末大灭绝与中大西洋岩浆省的时空关联

张薇¹, 刘金超¹, 丁美琪², 孙嘉欣¹, 梁瑞泽¹, 王王¹, 李嫚¹, 何天辰^{1,3}

1. 河海大学海洋学院, 南京 210098

2. 同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092

3. 中国地球物理学会水域地球物理探测技术重点实验室, 南京 210098

摘要 【目的】三叠纪末大灭绝 (~201.5 Ma) 是显生宙五大灭绝事件之一, 期间海洋生物呈现两幕式灭绝特征。中大西洋火成岩省 (Central Atlantic Magmatic Province, CAMP) 活动及其引发的快速碳排放被认为是主要驱动机制。然而, 目前 CAMP 活动与两幕灭绝的时空关联仍存在争议。【方法】基于英国克利夫兰盆地 Dove's Nest 岩心的沉积汞 (Hg) 记录, 结合汞—碳排放模型定量评估 CAMP 火山活动的脱气过程, 并利用 K/Al 比值作为风化作用指标, 探讨火山活动与幕式生物灭绝的耦合关系。【结果】Dove's Nest 岩心中出现两期汞富集, 其中第一期出现在瑞替阶 Cotham 段底部, 是区域信号; 另一期则从瑞替阶 Cotham 段顶部持续到 Langport 段, 与第一幕灭绝同步, 略早于第二幕灭绝, 该期富集在全球其他经典海陆剖面均有记录。【结论】瑞替期晚期全球海陆剖面普遍出现的沉积汞富集暗示了 CAMP 的大规模活动, 且首先通过促进海表升温或释放有毒物质直接导致区域生物多样性下降, 触发海洋生物第一幕灭绝; 随后持续释放 CO₂ 引发全球快速增温并增强大陆风化, 间接驱动海洋生物第二幕灭绝。该研究揭示了深时地球大火成岩省分阶段驱动生态环境崩溃与生物灭绝的现象, 为理解现代全球变暖背景下海洋生态系统的复合响应提供了深时类比。

关键词 三叠纪末大灭绝; 大火成岩省; 沉积汞记录; 幕式火山活动; 时空关系

第一作者 张薇, 女, 2001 年出生, 硕士研究生, 海洋地质学, E-mail: zhangwei0044@163.com

通信作者 何天辰, 男, 教授, 海洋地球化学, E-mail: tianchenhe@hhu.edu.cn

中图分类号: P512.2 文献标志码: A

0 引言

三叠纪末大灭绝事件 (End-Triassic Mass Extinction, ETME; ~201.5 Ma) 是显生宙五次重大生物危机之一 (Sepkoski, 1981; Kiessling *et al.*, 2007; Ruhl *et al.*, 2010), 导致了全球范围内至少 53% 的属和 80% 的种灭绝 (Schoene *et al.*, 2010; McGhee *et al.*, 2013)。目前普遍认为泛大陆 (Pangea) 裂解背景下, 中大西洋火成岩省 (Central Atlantic Magmatic Province, CAMP) 的大规模活动是 ETME 的重要触发机制 (Marzoli *et al.*, 1999)。CAMP

释放的巨量温室气体更引发了全球碳循环剧变、极热效应、海洋酸化和缺氧等一系列环境扰动 (Schoene *et al.*, 2010; Blackburn *et al.*, 2013; Davies *et al.*, 2017; Lindström *et al.*, 2021; 张新智等, 2022), 对当时的生态系统造成了毁灭性影响。

除温室气体外, CAMP 的大规模活动还向地球表层系统输入大量的汞 (Hg) (Pyle and Mather, 2003)。这些汞以气态单质汞 (Hg^0) 的形式存在, 在大气中滞留时间较长 (0.5~1 年), 可在全球快速扩散, 期间经历复杂的循环过程 (如形态转换、沉降、再排放) (Rudnick and Gao, 2003), 最终埋藏于各地的沉积物中 (图 1)。因此, 沉积物中的汞富集成为示踪地质历史时期大火成岩省活动的可靠地球化学指标 (Schroeder and Munthe, 1998; Bagnato *et al.*, 2007, 2011, 2015; 杨晨等, 2025)。为探讨 ETME 与 CAMP 活动的关联, 前人开展了一系列海陆沉积记录中汞富集程度的研究。例如, Shen *et al.* (2022) 通过分析日本胜山 (Katsuyama) 剖面的汞浓度与同位素特征, 发现 CAMP 侵入围岩, 加热有机质, 从而释放大量二氧化碳 (CO_2), 导致环境扰动和生物灭绝; Percival *et al.* (2017) 通过全球多个海陆剖面的汞富集程度分析, 揭示了 CAMP 火山活动以多期次脉冲的形式释放汞和二氧化碳, 引发间歇性的环境扰动, 加剧了生物灭绝并延缓了生态系统的恢复。全球多个海陆剖面在 ETME 灭绝层位中同步记录的汞异常, 为当时全球性汞通量的同步激增提供了有力证据。

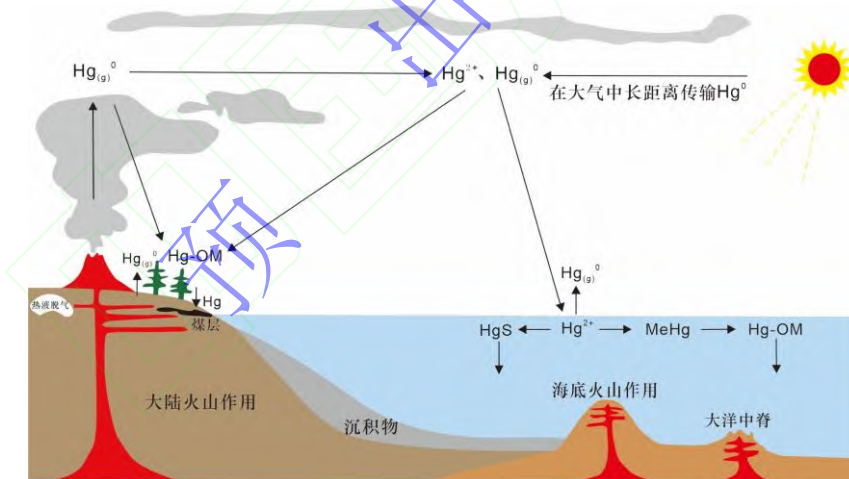


图 1 全球汞循环示意图 (据龚清等, 2024 修改)

火山来源的汞以气态 Hg^0 形式释放至大气, 经全球传输与沉降后, Hg^0 经光化学反应过程转化为水溶性的 Hg^{2+} 后, 通过干湿沉降进入陆地和海洋。 Hg^0 则可直接被植被和土壤直接吸收, 通过地表径流进入海洋。进入海洋后 Hg^0 最终以与有机质、硫化物或黏土矿物结合的形式埋藏于沉积物中。另外, 海洋中的 Hg^{2+} 可转化为具有生物毒性的甲基汞 (MeHg), 在食物链中累积

Fig.1 Schematic diagram of the global mercury cycle (modified after Gong *et al.*, 2024)

Mercury from volcanic sources is released into the atmosphere in the form of gaseous Hg^0 . After global transport and deposition, Hg^0 undergoes photochemical reactions to convert into water-soluble Hg^{2+} , which is then deposited on land and oceans via both dry and wet deposition. Hg^0 can also be directly absorbed by vegetation and soils, and is transported to the ocean through surface runoff. Once in the ocean, mercury is eventually buried in sediments in the form of complexes with organic matter, sulfides, or clay minerals. Additionally, Hg^{2+} in the ocean can be converted into the toxic methylmercury (MeHg), which accumulates in the food chain

值得注意的是, Wignall and Atkinson (2020) 基于欧洲陆缘海盆地中高精度的生物地层学研究, 首次提出了 ETME 在瑞替期至赫塘期的转折时期分别发生了两幕生物的灭绝。具体来讲, 第一幕灭绝发生于瑞替期, 导致约半数双壳类(如 *Rhaetavicula contorta*) 和介形虫多样性急剧下降; 经过短暂复苏后, 赫塘期发生了第二幕生物灭绝, 造成牙形刺灭绝及双壳类、放射虫和造礁珊瑚多样性显著降低 (McRoberts *et al.*, 2012)。尽管当前 CAMP 大规模活动与生物灭绝的关联已被证实, 但这些研究并未从高分辨率角度详细研究每幕灭绝与 CAMP 大规模活动的关系, 限制了对海洋生物幕式灭绝驱动机制的揭示。

为了深入揭示 CAMP 火山活动与三叠纪末生物灭绝的时空关系, 本研究以英国北约克郡克利夫兰盆地 Dove's Nest 岩心的海相沉积物为研究对象, 通过引入过量汞指标 (Hg_{ex}) 系统评估了其汞富集程度, 并在此基础上, 整合汇编了来自特提斯洋及陆相巨型湖泊等不同古地理环境的沉积汞含量数据, 以综合还原 CAMP 的全球记录。此外, 本研究应用 Hg-CO₂ 排放比值范围, 对 CAMP 活动期间的汞和二氧化碳排放总量进行定量估算, 旨在为理解三叠纪末 CAMP 幕式火山活动与两幕生物灭绝的时空关系进行定量约束。最后, 引入 K/Al 比值作为大陆风化作用强度指标, 以期揭示 ETME 时期海洋生物两幕式灭绝的诱发机制。

1 地质背景

Dove's Nest 岩心位于英国约克郡克利夫兰盆地(图 2), 其经纬度为 54°26'11.35" N, 0°37'29.21" E, 记录了晚三叠世至早侏罗世一个完整的海退—海侵沉积旋回 (Wignall and Atkinson, 2020)。自下而上, 该剖面分别为上三叠统瑞替阶 Bule Anchor 组、Westbury 组、Listock 组及下侏罗统赫塘阶 Redcar Mudstone 组(图 3; Wignall *et al.*, 2025)。其中, Bule Anchor 组为含磷结核的中灰色砂质微晶灰岩, 发育干裂构造及生物扰动遗迹。Westbury 组底部为生物扰动强烈的砂岩层, 包含多层层状砂岩, 可见浪成波纹、冲刷充填构造及 *Planolites* 遗迹化石。其顶部 2 m 富集双壳类 *Isocyprina* sp. 与 *Rhaetavicula contorta*。Listock 组自下而上又可分为 Cotham 段和 Langport 段。Cotham 段底部为 4 cm 侵蚀面砂岩, 上覆 70 cm 厚的浅灰色泥质细砂岩, 富含 *Rhaetavicula contorta* 化石群, 顶部突变为 1.24 m 棕色泥质砂岩, 发育水平潜穴及三层软沉积变形构造。Langport 段整合覆盖于 Cotham 段之上, 岩性为暗灰色泥岩与薄层细粒灰岩互层, 顶部普遍发育黑色页岩 (Wignall, 2001; Bond and Wignall, 2008)。Redcar 泥岩组的岩性为层状黑色页岩, 上覆薄层灰岩, 富含黄铁矿化双壳类壳屑, 随后过渡为以深灰色泥岩为主, 富含 *Pteromya* spp.、*Modiolus* sp. 及 cf. *Semuridia* sp. 等双壳类 (Hodges, 1994; Wignall *et al.*, 2025)。

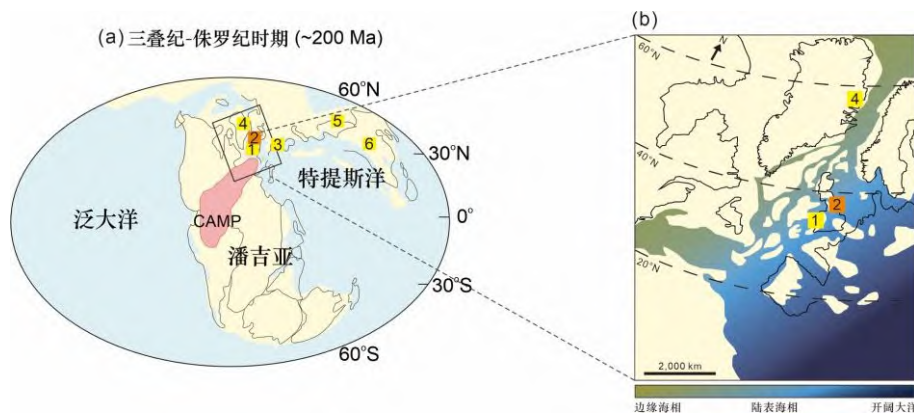


图2 三叠纪—侏罗纪时期(约 200 Ma)克利夫兰盆地 Dove's Nest 岩心(橙色正方形)的古地理位置图(据 He *et al.*, 2022 修改)

(a) 全球古地理图, 红色阴影为中大西洋岩浆省(CAMP), 数字 1~6 代表岩心或剖面位置: 1. 布里斯托尔海峡盆地 St. Audrie's Bay 剖面; 2. 英国克利夫兰盆地 Dove's Nest 岩心(本研究); 3. 奥地利 Eiberg 盆地 Kuhjoch 剖面; 4. 格陵兰 Jameson Land 盆地 Astartekloft 剖面; 5. 中国准噶尔盆地郝家沟剖面; 6. 中国四川盆地七里峡剖面 (b) 西特提斯地区古地理图

Fig.2 Paleogeographic map of the Cleveland Basin during the Triassic-Jurassic period (~200 Ma), showing the location of the Dove's Nest borehole (orange square) (modified from He *et al.*, 2022)

(a) global palaeogeographic map. The red shading indicates the Central Atlantic Magmatic Province (CAMP) Numbers 1–6 mark the locations of studied cores or sections: 1. St. Audrie's Bay section, Bristol Channel Basin; 2. Dove's Nest core, Cleveland Basin, UK (this study); 3. Kuhjoch section, Eiberg Basin, Austria; 4. Astartekloft section, Jameson Land Basin, Greenland; 5. Haojiagou section, Junggar Basin, China; 6. Qilixia section, Sichuan Basin, China (b) palaeogeographic map of the western Tethys region

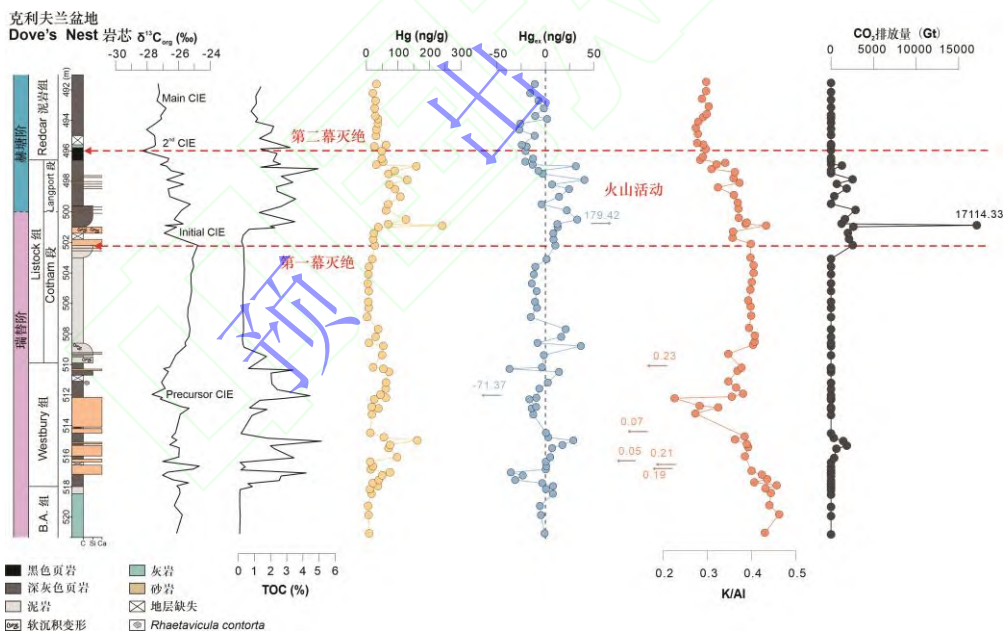


图3 三叠纪末大灭绝期间英国克利夫兰盆地 Dove's Nest 岩心地球化学特征 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、TOC、Hg、 Hg_{ex} 、K/Al 及 CO_2 排放量)

碳同位素引用自 Wignall *et al.* (2025), 红色虚线表示海洋生物的两幕灭绝层位, CIE 表示碳同位素漂移, TOC 表示总有机碳含量, Hg_{ex} 表示过量汞含量

Fig.3 Geochemical profiles of $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$, TOC, Hg, Hg/TOC , Hg_{ex} , K/Al, and CO_2 emissions across the end-Triassic mass extinction in the Dove's Nest borehole, Cleveland Basin, UK

Carbon isotope data are referred from Wignall *et al.* (2025). The red dashed line marks the two-phase extinction, TOC represents total organic carbon content, and Hg_{ex} represents excess mercury content

三叠纪末两幕生物灭绝分别发生于 Cotham 段和 Langport 段顶部(Wignall and Atkinson, 2020; Wignall *et al.*, 2025)。针对第一幕灭绝中海洋双壳类的消失, 虽有观点认为其仅是区域性盐度变化引起的暂时性群落更替(Mayall and Wright, 2015), 但在 Langport 段海相条件恢复后, Cotham 段底部消失的双壳类并未重新出现, 取而代之的是占据相同生态位的新属种, 表明在 Langport 段沉积之前已发生实质性灭绝(Wignall and Atkinson, 2020; Wignall *et al.*, 2025)。Wignall *et al.* (2025) 指出 Cotham 段底部沉积环境发生显著转变, 此时海洋动物群的消失可能反映海相沉积记录的缺失。另外, 考虑到显生宙多数重大生物灭绝事件均与显著碳同位素扰动同步发生, 本文将第一幕灭绝定位于“Initial CIE”开始负偏的层位(图 3)。

晚三叠世至早侏罗世西特提斯地区海相地层的记录四次明显的有机碳同位素负漂(Negative CIE, NCIE)序列, 依次为“Precursor CIE”“Initial CIE”“2nd CIE”及“Main CIE”(图 3; Wignall *et al.*, 2025)。该时期生物地层对比则主要基于菊石带划分, 奥地利 Kuhjoch 剖面被确定为三叠系—侏罗系的“金钉子”(GSSP)剖面, 以菊石 *Psiloceras spelae tirolicum* 的首次出现为界(Hillebrandt *et al.*, 2013)。晚三叠世瑞替阶以 *Choristoceras marshi* 为代表, 其菊石消失在第一幕灭绝期间; 紧随其后出现的赫塘阶侏罗纪菊石为特提斯地区的 *P. spelae tirolicum* 和泛大洋地区的 *P. tilmant* (Cope and Chaloner, 1980), 它们均早于英国传统的标志 *P. planorbis*。由于英国 Penarth 群沉积于广盐性环境, 缺乏菊石, 导致其序列中缺失最底部的侏罗纪菊石带。因此, 英国以 *P. planorbis* 出现之下的层位定义为“前-*Planorbis* 层”(Korte *et al.*, 2009), 该层位在时间上对应于 GSSP 剖面中首次灭绝后与 *P. planorbis* 出现之前的“间歇期”。Dove's Nest 岩心的对比即在此区域地层框架下, 通过识别关键的碳同位素漂移事件, 并将其与基于菊石的全球标准年代格架进行校准, 从而建立精确的年代地层约束。

2 样品与研究方法

Dove's Nest 岩心保存了完整的晚三叠世至早侏罗世沉积地层序列, 本次研究针对 491.6 m 至 521.1 m 之间的 74 件样品进行了高分辨率采样。样品去除风化面后, 粉碎至 200 目。随后, 对所有样品进行了总有机碳(TOC)与总硫(TS)含量、汞含量和主量元素含量的分析。

2.1 TOC 和 TS 含量测试

样品总有机碳含量测试在河海大学海洋科学实验中心的河海沉积地球化学实验室完成。

称取约 0.50 g 粉末样品于 15.00 mL 离心管中, 加入 2 M HCl 在室温下反应 48 h。随后用超纯水反复洗涤样品使其上清液达到中性, 放入烘箱使样品干燥。

称取去除碳酸盐的样品粉末约 10.00 mg 放入锡杯中, 将锡杯置放入 Thermo Fisher FlashSmart CHNS/O 元素分析仪中进行燃烧, 自动积分得出 4 个峰值, 分别对应 C、N、O、S 元素含量, 通过质量换算得出总有机碳含量。随后称取全岩样品粉末, 重复同样测试步骤, 测试样品总硫含量。测试过程中加入 Thermo Fisher CHNS/O 标准样品作为参考标准, 测定精度为 $\pm 0.10\%$ 。

2.2 汞含量分析

样品汞含量分析在河海大学海洋科学实验中心的河海沉积地球化学实验室完成, 测试仪器为 Lumex RA-915 汞分析仪。取约 50.00 mg 标准样品置于石英舟中, 将装有样品的石英舟插入热解室。在净化空气流中, 样品经高温热解释放出汞蒸气; 利用塞曼原子吸收光谱法, 测定汞原子在 253.7 nm 波长的特征吸收强度, 由软件自动计算吸收峰积分面积, 并根据标准曲线转化为汞质量分数。测试中每间隔 20 个样品插入 GBW07401a 标准样品进行校正。

2.3 主量元素测试

样品主微量元素含量测试在中国科学院南京地质古生物研究所实验室完成。准确称取 50 mg 粉末样品, 在马弗炉中以 550 °C 高温灰化 8 h, 去除有机质。随后将样品转入特氟龙罐中, 添加 HNO₃-HF 混合酸, 装入钢套, 于 190 °C 消解 72 h。主量元素含量使用安捷伦 710 型径向电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-OES) 测定。测试标样为中国地质调查局 Brush Creek 页岩。各元素重复测定的相对标准偏差 (RSD) 均小于 5%。

3 结果

Dove's Nest 岩心有机碳同位素含量范围为 -24.79‰~ -28.30‰, 平均值为 -26.30‰ (图 3)。从老到新, 该岩心记录了前人报道的 4 次碳同位素负偏事件, 其中 “Precursor CIE” 出现在第一幕灭绝事件之前的 Westbury 组中部的砂岩层, 幅度达 -3.00‰ (图 3)。“Initial CIE” 则出现在上覆 Cotham 段下部, 幅度约 -2.00‰, 其起始点与第一幕灭绝的层位对应 (图 3)。“2nd CIE” 和 “Main CIE” 则分别记录在赫塘阶 Redcar 泥岩组底部 (图 3)。

Dove's Nest 岩心的 TOC 含量范围为 0.08%~5.15%, 平均值为 1.57% (图 3)。其变化趋势与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 显示出良好的耦合关系。在 “Precursor CIE” 期间, TOC 的变化幅度较大 (约 4.00%)。随后在 Cotham 段底部, 该层位 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值回升而 TOC 相对降低, 揭示了环境转变

期的沉积记录（图 3）。第一幕灭绝起始于 Cotham 段的“Initial CIE”期间，TOC 再次呈现同步升高（图 3）。

Dove's Nest 岩心的汞浓度范围为 2.10~240.60 ng/g（图 3），在岩心中共出现两个主要峰值（图 3）。第一次峰值（161.50 ng/g）出现在 Westbury 组中部的砂岩层（图 3）。随后汞在 Cotham 段底部下降至约 50 ng/g（图 3）。Cotham 段顶部（第一幕灭绝层位）开始出现了第二次峰值（240.60 ng/g），与“Initial CIE”层位高度吻合，并持续到三叠纪—侏罗纪界线（Triassic–Jurassic Boundary, TJB）附近（图 3）。

4 讨论

4.1 Dove's Nest 岩心汞赋存相及汞富集程度评估

在应用海相沉积地层中 Hg 富集程度示踪火山活动之前，需要厘清样品中 Hg 的主要赋存相，以避免地层中的汞异常是由其赋存相变化所引起的干扰（Sanei *et al.*, 2012; Grasby *et al.*, 2019; Shen *et al.*, 2019, 2020, 2022）。实证研究表明，与有机质结合的汞被认为是 Hg 在沉积物中的主要赋存形式，因此在评判地层中汞富集程度要采用 Hg/TOC（Boszke *et al.*, 2003; Sanei *et al.*, 2012）。然而，近年来学界已认识到沉积物中汞的赋存相十分复杂，除有机质外，也可与硫化物和黏土矿物结合（Bower *et al.*, 2008; Grasby *et al.*, 2019），因此需综合分析 Hg 与 TOC、TS 的相关性，以评估沉积物中汞的主要赋存形式。通过分析 Dove's Nest 样品中汞含量分别与 TOC、TS、铝含量（Al）的相关性来约束样品中汞的赋存形式（图 4a~c）。结果表明，Dove's Nest 岩心的 Hg 含量与 TOC 和 TS 含量均呈现一定的相关性，其相关系数（ R^2 ）分别为 0.56 和 0.45（图 4a, b），相比之下，汞与铝含量未呈现明显的相关性（图 4c, $R^2=0.11$ ）。值得注意的是，Dove's Nest 样品 TOC 含量与 TS 含量具有明显的正相关性（图 4d, $R^2=0.49$ ），因此，Hg 与 TS 的相关性难以说明是否为赋存相的转变所致。鉴于此，本文引用过量汞判识地层中汞的富集程度。过量汞（ Hg_{ex} ）是指样品中的汞含量超出基于该样品地球化学特性所预测水平的程度（Fendley *et al.*, 2024）。此处，地球化学特性是指样品中汞的赋存相，即 TOC、TS 或 Al 含量。本研究中 Hg_{ex} 计算流程严格遵循 Fendley *et al.*（2024）的流程。前人在早侏罗世托阿尔期大洋缺氧事件（T-OAE）的研究中发现岩石中的碳酸盐组分会严重干扰样品中其他组分的含量，从而影响对全球汞富集程度的评估（Fendley *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2025）。为排除此干扰，在计算 Hg_{ex} 前首先校正了碳酸盐对 Hg 及其他元素含量（TOC、TS 及 Al）的影响：

$$X_{cf} = \frac{X}{1 - \frac{CaCO_3}{100}} \quad (1)$$

式中： X 表示样品中 Hg、TOC、TS 或 Al 的含量， CaCO_3 表示样品中碳酸钙的含量。汞背景值 (Hg_{bkg}) 是 Hg_{ex} 计算过程中至关重要的参数，Fendley *et al.* (2024) 通过拟合样品汞含量与其赋存相的最佳拟合曲线完成。最佳拟合曲线通常为对数函数或双曲正切函数 (Fendley *et al.*, 2024)。鉴于 Dove's Nest 岩心 Hg 含量与 TOC 含量的相关性最为显著，因此，利用 MATLAB R2023b 自带的 Curve Fitting 工具，分别对 Dove's Nest 岩心的 Hg_{cf} 和 TOC_{cf} 进行了对数和双曲正切函数的拟合 (图 5a, b)，结果表明最佳拟合曲线为双曲正切函数。基于拟合得到的函数关系，可计算每个样品对应的 Hg_{bkg} ：

$$\text{Hg}_{\text{bkg}} = 899.91 \times \tanh\left(\frac{\text{TOC}_{\text{cf}}}{37.37}\right) + 9.50 \quad (2)$$

随后，每个样品对应的 Hg_{ex} 可由公式 (3) 计算：

$$\text{Hg}_{\text{ex}} = [\text{Hg}] - \text{Hg}_{\text{bkg}} \quad (3)$$

式中： $[\text{Hg}]$ 为样品实测汞含量。Dove's Nest 样品的 Hg_{ex} 与 TS 及 Al 含量无显著相关性 (图 5c~f)，说明其未受其他赋存相干扰。另外， Hg_{ex} 与风化作用指标 (K/Al) 并未呈现明显正相关关系 (图 5f)，表明尽管 Dove's Nest 岩心位于距岸近的边缘海地区，但并未受到陆源汞输入的影响，可反映当时 CAMP 的大规模活动。Dove's Nest 岩心中共出现两次主要的 Hg_{ex} 富集段 (图 3)，分别在 Cotham 段底部和 Cotham 段顶部至 Langport 段顶部。其中 Cotham 段底部 Hg_{ex} 比值升高至约 36.76 ng/g (图 3)，反映地层中汞的富集，表明 Dove's Nest 岩心可能记录了 CAMP 的一幕活动。随后，Cotham 段顶部 Hg_{ex} 高达 179.42 ng/g (图 3)，反映地层中汞的另一富集，记录了 CAMP 的另一幕活动，该幕活动的启动与海洋生物第一幕灭绝的发生具有良好的时间一致性，并早于海洋生物的第二幕灭绝的发生。

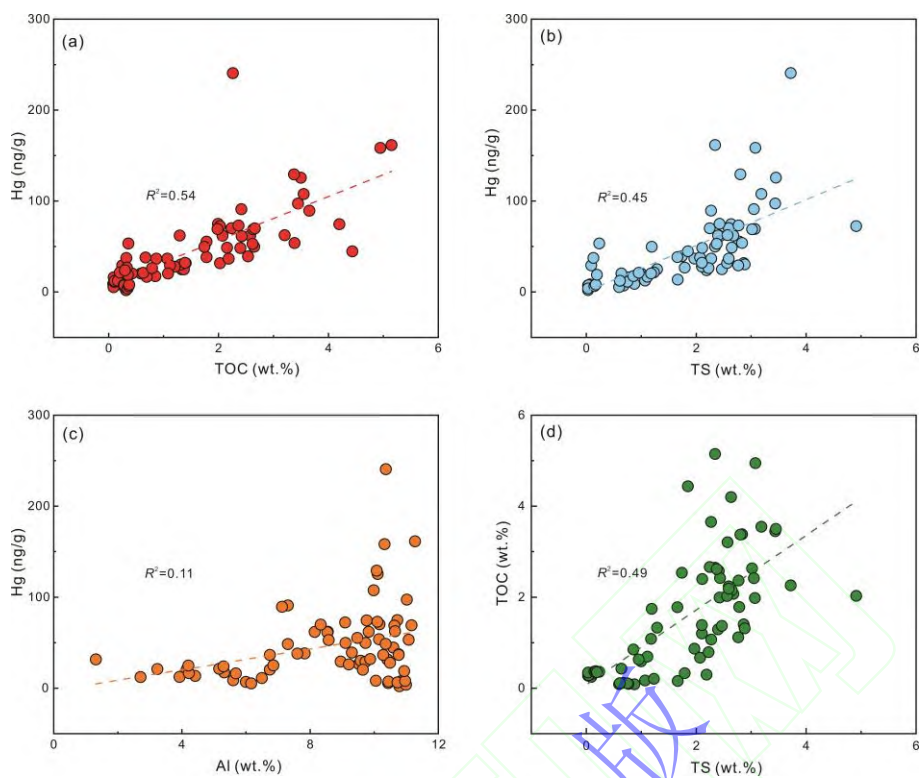


图 4 克利夫兰盆地沉积汞赋存形式判识图解

(a) 汞 (Hg) — 有机碳 (TOC) 关系图; (b) 汞 (Hg) — 总硫 (TS) 关系图; (c) 汞 (Hg) — 铝 (Al) 关系图 (铝作为黏土含量的指标); (d) 总有机碳 (TOC) — 总硫 (TS) 关系图

Fig.4 Crossplots for identifying the hosting phases of sedimentary mercury in the Cleveland Basin
(a) Hg-TOC cross-plot; (b) Hg-TS cross-plot; (c) Hg-Al cross-plot (Al as a proxy for clay content); (d) TOC-TS cross-plot

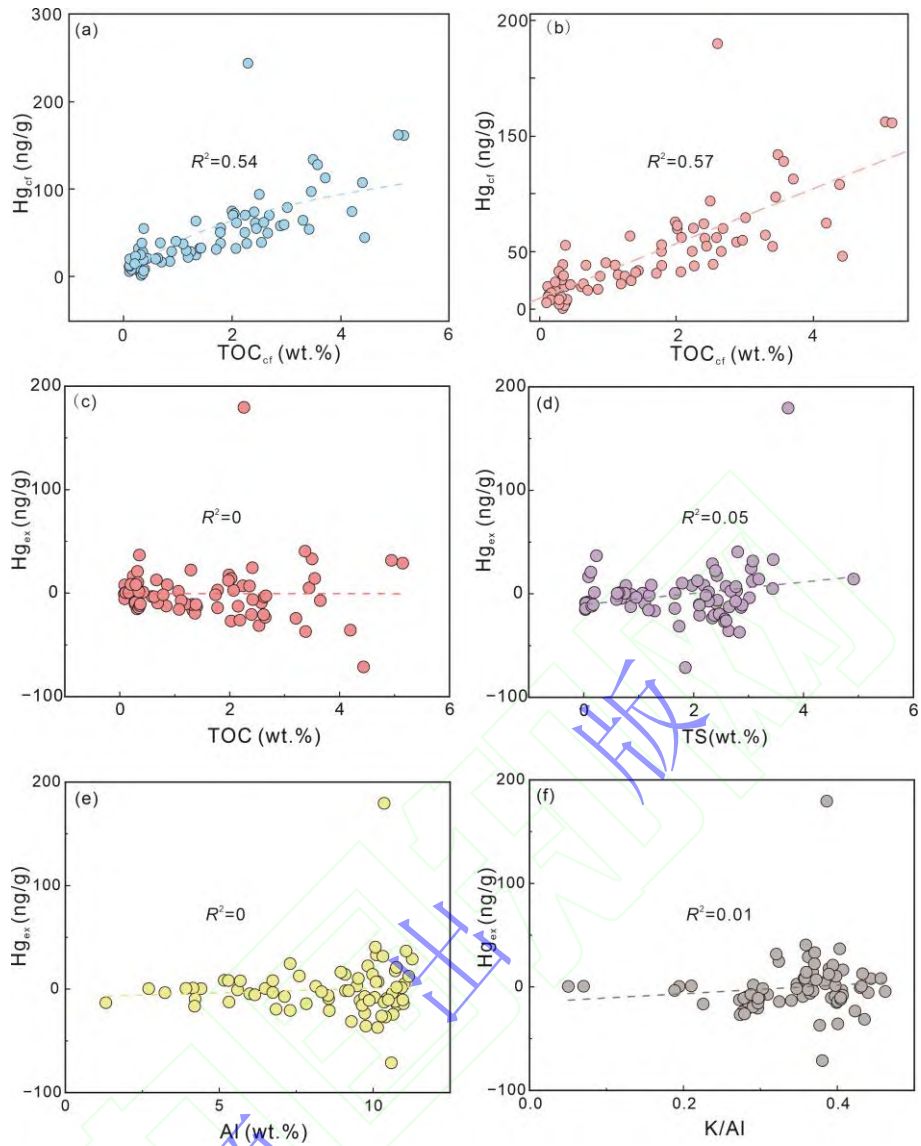


图5 克利夫兰盆地样品剔除碳酸盐组分的汞含量 (Hg_{cf}) 与有机碳含量 (TOC_{cf}) 拟合及过量汞控制因素分析图解

(a) Hg_{cf} - TOC_{cf} 对数函数拟合图; (b) Hg_{cf} - TOC_{cf} 双曲正切函数拟合图; (c) 过量汞—有机碳关系图; (d) 过量汞—总硫关系图; (e) 过量汞—铝关系图; (f) 过量汞—过量汞—比值关系图

Fig.5 Crossplots showing the correlations of carbonate-free mercury (Hg_{cf}) versus TOC_{cf} , and the controlling factors of excess mercury (Hg_{ex}).

(a) logarithmic function fit of Hg_{cf} versus TOC_{cf} ; (b) hyperbolic tangent function fit of Hg_{cf} versus TOC_{cf} ; (c) Hg_{ex} - TOC cross-plot; (d) Hg_{ex} -total sulfur cross-plot; (e) Hg_{ex} -Al cross-plot (Al as a proxy for clay content); (f) Hg_{ex} -K/Al cross-plot

4.2 ETME 时期全球海陆沉积汞记录对比

为了更全面地揭示 ETME 与 CAMP 活动的关系, 本研究汇编了全球 5 个不同沉积环境剖面/岩心已发表的碳同位素及汞浓度数据 (图 2, 6), 具体包括: 西特提斯洋欧洲陆缘海地区的英国 St. Audrie's Bay 剖面 and 奥地利 Kuhioch 剖面 (Hesselbo *et al.*, 2002; Ruhl *et al.*, 2009; Percival *et al.*, 2017; Hua *et al.*, 2023)、格陵兰 Jameson Land 盆地 Astartekløft 剖面

(Mander *et al.*, 2013; Percival *et al.*, 2017) 以及我国准噶尔盆地郝家沟剖面 and 四川盆地七里峡剖面 (Shen *et al.*, 2022)。前两者为海相剖面, 后三者为陆相剖面。

上述剖面的海洋生物灭绝或陆相生态危机层位均出现了汞富集的现象 (图 6), 且与英国 Dove's Nest 岩心存在高度相似性。“Initial CIE”发生之前的层位 (即, 英国地层 Westbury 组中上部) Hg 浓度与 Hg/TOC 在相对较低值振荡, 反映 CAMP 尚未发生大规模活动, 大气汞浓度较低 (图 6)。随后, 至 “Initial CIE” 段 (即, 英国地层 Cotham 段上部), Hg/TOC 出现明显峰值, 表明记录了 CAMP 的大规模活动 (图 6)。该期活动的开始伴随海洋生物的第一幕灭绝, 在持续活动后, 至 “2nd CIE” (即, 英国地层 Blue Lias 组底部) 段, 海洋生物第二幕灭绝发生 (图 6)。西特提斯洋从西向东三个不同沉积盆地高度一致的沉积汞富集特征 (图 6), 表明 “Initial CIE” 段的汞富集并非受区域因素 (如, 陆源汞输入) 控制。陆相剖面的汞富集特征与西特提斯洋海相剖面整体较为相似, 均在 “Initial CIE” 段出现 Hg 含量和 Hg/TOC 的同步升高。海相和陆相地层统一的汞富集特征, 表明 “Initial CIE” 段出现的汞富集是全球性特征, 极有可能是当时全球范围内出现了汞的富集, 暗示了 CAMP 的大规模活动。尽管该时期全球汞富集是全球性现象, 但海陆对比发现其富集特征仍然受到了区域因素的控制, 3 个陆相剖面的 Hg/TOC 比值显著高于西特提斯洋陆缘海的 3 个海相剖面 (图 6)。相比于海洋, 陆相盆地易于接收陆源物质的输入, 从而可能接收更多陆源汞的输入, 使得沉积物中汞更加富集。

另外值得注意的是, 与 “Initial CIE” 段汞富集特征不同, 英国 Dove's Nest 岩心 Cotham 段底部记录的第一期沉积汞富集在英国 St Audrie's Bay 盆地、格陵兰岛 Jameson Land 盆地及我国准噶尔盆地中均未被记录 (图 6), 因此极有可能是区域性信号, 而非 CAMP 活动的直接证据。Wignall *et al.* (2025) 通过系统的沉积相分析认为该时期全球海平面下降, 英国克利夫兰盆地可能已经转变为陆相湖盆。沉积相的转变可能干扰了该时期汞地球化学证据的应用。

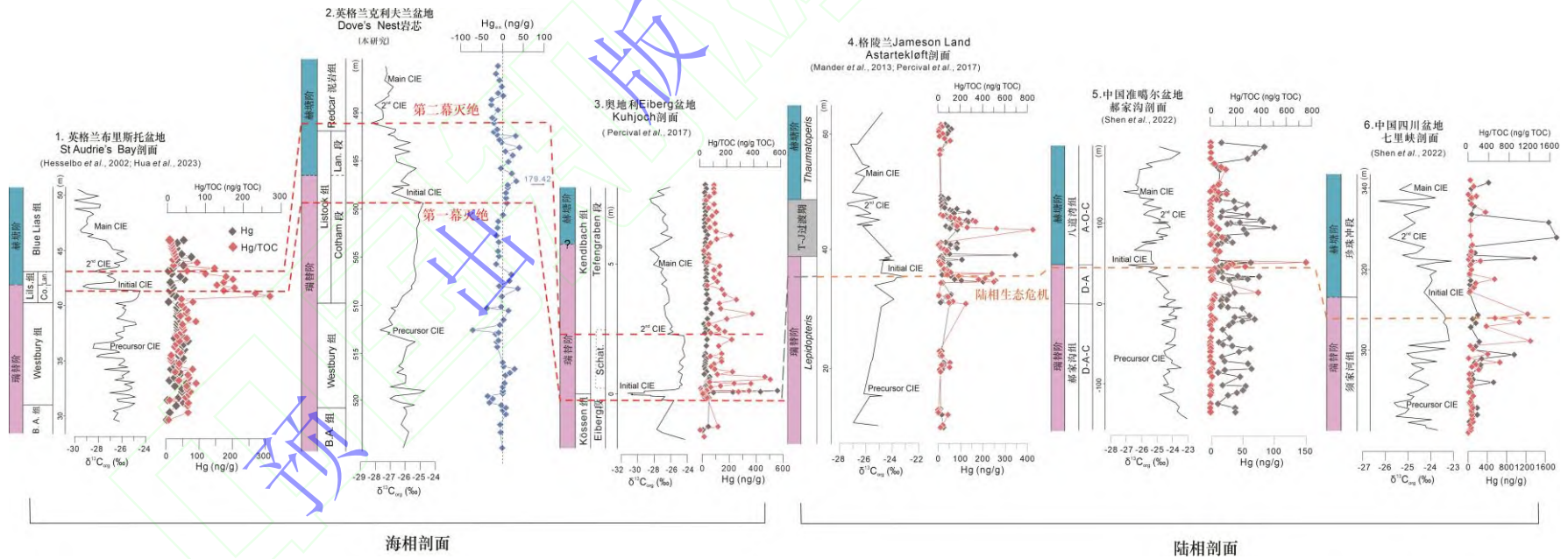


图6 ETME期间海相与陆相剖面碳同位素与汞记录对比图

图中编号1~6岩心或剖面位置见图2, 红色虚线表示海洋生物两幕灭绝层位, 橙色虚线表示陆相生态危机启动, B.A.组代表 Blue Anchor 组, Lils.组代表 Lilstock 组, Co.段代表 Cotham 段, Lan.段代表 Langport 段

Fig.6 Comparison of carbon isotope and mercury (Hg) records from marine and terrestrial sections during the end-Triassic mass extinction (ETME)

The locations of the numbered boreholes or sections 1–6 are shown in Fig.2. Red dashed line marks the marine extinction horizon, and the orange dashed line indicates the terrestrial ecological crisis, B.A. Fm. stands for the Blue Anchor Formation, Lils. Fm. stands for the Lilstock Formation, Co. Mbr. stands for the Cotham member, and Lan. Mbr. stands for the Langport member

4.3 ETME 时期两幕次灭绝的触发机制

前人认为 CAMP 释放大量 CO₂ 进入大气, 可造成全球变暖, 进而触发生态危机 (Svensen *et al.*, 2007; Clapham and Renne, 2019)。可见 CO₂ 在生物灭绝触发机制中的作用至关重要。基于过量汞和汞循环箱式模型可定量估计 CAMP 活动的 CO₂ 释放量 (Fendley *et al.*, 2024), 计算过程首先需要通过 Hg_{ex} 计算汞富集系数 (Hg_{EF}, 公式 4) :

$$\text{Hg}_{\text{EF}} = \frac{\text{Hg}_{\text{ex}}}{\text{Hg}_{\text{bkg}}} + 1 \quad (4)$$

基于前人汞循环箱式模型模拟的汞富集系数与汞排放量对应关系 (Amos *et al.*, 2014; Gustin *et al.*, 2015), 参照火山作用与热成因作用的汞排放量和 CO₂ 排放量比值 (1×10^{-7} ; Edwards *et al.*, 2021), 可定量重建 ETME 与 CAMP 相关的 CO₂ 排放量 (详细计算过程参照 Fendley *et al.*, 2024), 该计算过程已成功应用于其在 T-OAE 的研究。本研究计算表明, 三叠纪末海洋生物两幕灭绝期间 CAMP 的 CO₂ 释放量约 3.90×10^4 Gt, 远高于工业革命以来人类活动排放的 CO₂ 总量 (~2 500 Gt) (Capriolo *et al.*, 2020)。这一数值与前人通过 CAMP 岩体中流体包裹体估计的 10.00×10^4 Gt CO₂ 的最高释放量及前人估计的 T-OAE 期间卡鲁—费拉尔大火成岩省 6.20×10^4 Gt CO₂ 的释放量在数量级上保持一致 (Capriolo *et al.*, 2020; Fendley *et al.*, 2024), 一定程度上支持了结果的可靠性。

ETME 期间 CAMP 向大气中如此大规模释放 CO₂ 势必会造成大陆风化作用的增强, 而增强的大陆风化作用将大量陆源营养物质输入海洋, 并引发后续一系列的环境和生态危机 (Bernier, 2003)。因此, 大陆风化作用是沟通 CAMP 活动和海洋生态危机的重要环节 (Shen *et al.*, 2022)。本研究利用 K/Al 作为风化强度指标, 进一步厘清 CAMP 活动和 ETME 的关联。数据显示, 海洋生物第一幕灭绝期间 K/Al 比值稳定 (~0.40) (图 3), 反映化学风化程度未发生剧烈变化, 维持在较低状态。因此, 岩心中记录的 CAMP 大规模活动可能直接诱发了第一幕生物灭绝。剧烈的火山活动可能导致海表温度增加并形成海洋热浪, 加剧海表升温, 表层海水密度降低, 阻碍水体垂向交换, 导致底部水体逐渐缺氧 (Woolway *et al.*, 2021; He *et al.*, 2022)。加之, 第一幕灭绝期间全球海平面上升, 进一步支撑海洋缺氧的发生。除此之外, 西特提斯洋空间上接近 CAMP, 因此 CAMP 的活动可能直接向海洋输送有毒元素, 也可能是造成区域上生物灭绝的重要原因。例如, 汞本身的环境毒性就不容忽视。在缺氧水体中, 无机汞 (Hg²⁺) 可转化为甲基汞 (MeHg) (Fitzgerald *et al.*, 2007)。在生物富集的作用下, 其毒性沿食物链不断放大 (Gray, 2002; Gray *et al.*, 2004), 可能最终导致海洋生物第一幕灭绝的发生。

与第一幕灭绝不同的是,第二幕灭绝时期 K/Al 比值显著降低(图 3),从 0.36 (497.5 m 处)降低至 0.27 (494.6 m 处),表明大陆风化作用明显增强(Wan *et al.*, 2025)。与陆相剖面的研究对比发现陆相生态危机的启动早于风化作用的增强和海洋生物第二幕灭绝的发生。因此,陆相植物危机可能是除 CAMP 促进的全球温度和 $p\text{CO}_2$ 升高外,驱动风化作用增强的不可忽视的又一机制。有意义的是,格陵兰岛、波兰及我国四川盆地该时期地层中发现的多环芳烃和炭屑表明当时全球存在大规模的野火事件(Marynowski and Simoneit, 2009; Williford *et al.*, 2014; Song *et al.*, 2020)。因此, CAMP 活动释放大量 CO_2 后,可能迅速加剧陆地的高温与干旱条件,从而导致野火事件频发,造成了陆地生态系统崩溃(Marynowski and Simoneit, 2009)。而陆地生态系统的崩溃加剧岩石的剥蚀,促进风化作用的增强。增强的风化作用将导致大量陆源营养物质(如磷、氮和铁)输入海洋中,从而造成海洋表层初级生产力的升高(He *et al.*, 2020, 2022; Shen *et al.*, 2022)。最终,在高生产力背景下,大量有机质沉降导致耗氧量增加,最终引发海洋缺氧,触发 ETME 的第二幕灭绝。He *et al.* (2022) 在西特提斯地区开展的铁组分分析和氧化还原敏感元素的研究表明,第一幕灭绝期海水从氧化条件转变为缺氧条件,而第二幕海水缺氧程度和范围显著加剧,进一步支持了两幕灭绝的触发机制可能存在差异。

综上,晚三叠世 CAMP 大规模活动,触发了两幕生物灭绝,第一幕海洋生物灭绝与陆地生态危机同步,可能主要受火山活动直接排放的有害物质及快速气候效应驱动;第二幕灭绝发生滞后于 CAMP 大规模活动和陆相生态危机的启动,主要受 CAMP 脱气作用触发的大陆风化作用增强驱动。

5 结论

(1) 英国陆缘海 Dove's Nest 岩心的汞含量在 Cotham 段底部和顶部呈现两次显著富集,其中 Cotham 段顶部的汞富集与全球不同沉积环境的沉积盆地具有良好的一致性,共同揭示了 ETME 期间 CAMP 的大规模活动。基于汞—碳排放模型的定量估算表明, CAMP 在海洋生物两幕灭绝期间释放的 CO_2 总量约为 3.9×10^4 Gt。

(2) CAMP 活动与 ETME 两幕海洋生物灭绝在时间上存在时间耦合关系,但两幕灭绝的驱动机制显著不同:第一幕生物灭绝与陆相生态系统危机同步发生,主要由 CAMP 活动直接排放的有毒物质(如汞)及快速气候效应(海表升温)所诱发;第二幕生物灭绝则滞后于 CAMP 活动的启动,其核心驱动机制为 CAMP 持续脱气引发的大陆风化作用增强,进而

向海洋输入大量陆源营养物质，导致水体缺氧。这一短时间延滞现象有力地支持了第二幕生物灭绝由“火山活动→大陆风化增强→海洋缺氧”的正反馈效应驱动。

数据可用性声明

支撑本研究的科学数据已在中国科学院科学数据银行 (Science Data Bank, ScienceDB) 平台公开发布, 访问地址为 <https://www.doi.org/10.57760/sciencedb.cjxb.00015> 和 <https://cstr.cn/10.57760/sciencedb.cjxb.00015>。

致谢 感谢三位评审专家提出的宝贵意见以及编辑部老师的认真编校。何天辰亦感谢江苏省特聘教授计划及淮海大学高层次人才平台发展计划的支持。

参考文献 (References)

- 龚清, 凌明星, 郑旺. 2024. 汞稳定同位素示踪地质记录中火山活动的应用[J]. 中国科学: 地球科学, 54(5): 1459-1483. [Gong Qing, Ling Mingxing, Zheng Wang. 2024. Applications of mercury stable isotopes for tracing volcanism in the geologic record[J]. Science China Earth Sciences, 54(5): 1459-1483.]
- 杨晨, 林雯洁, 金思敏, 等. 2025. 汞示踪古新世—始新世极热事件火山沉积记录研究进展[J]. 沉积学报, 43(6): 1935-1951. [Yang Chen, Lin Wenjie, Jin Simin, et al. 2025. A review of mercury as proxy for volcanism during the Paleocene-Eocene thermal maximum[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 43(6): 1935-1951.]
- 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[J]. 沉积学报, 40(2): 473-483. [Zhang Xinzhi, Lü Peizong, Fang Linhao, et al. 2022. Wildfire records across the Triassic-Jurassic boundary in the southern margin of the Junggar Basin, and global correlations[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 40(2): 473-483.]
- Amos H M, Jacob D J, Kocman D, et al. 2014. Global biogeochemical implications of mercury discharges from rivers and sediment burial[J]. Environmental Science & Technology, 48(16): 9514-9522.
- Bagnato E, Aiuppa A, Parello F, et al. 2007. Degassing of gaseous (elemental and reactive) and particulate mercury from Mount Etna Volcano (southern Italy)[J]. Atmospheric Environment, 41(35): 7377-7388.
- Bagnato E, Aiuppa A, Parello F, et al. 2011. New clues on the contribution of earth's volcanism to the global mercury cycle[J]. Bulletin of Volcanology, 73(5): 497-510.
- Bagnato E, Tamburello G, Avarod G, et al. 2015. Mercury fluxes from volcanic and geothermal sources: An update[J]. Geological Society, London, Special Publications, 410(1): 263-285.
- Berner R A, 2003. The long-term carbon cycle, fossil fuels and atmospheric composition[J]. Nature, 426: 323-326.
- Blackburn T J, Olsen P E, Bowring S A, et al. 2013. Zircon U-Pb geochronology links the end-Triassic extinction with the central Atlantic magmatic province[J]. Science, 340(6135): 941-945.
- Bond D P G, Wignall P B. 2008. The role of sea-level change and marine anoxia in the Frasnian-Famennian (Late Devonian) mass extinction[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 263(3/4): 107-118.
- Boszke L, Kowalski A, Głosińska G, et al. 2003. Environmental factors affecting speciation of mercury in the bottom sediments; an overview[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 12(1): 5-13.
- Bower J, Savage K S, Weinman B, et al. 2008. Immobilization of mercury by pyrite (FeS₂)[J]. Environmental Pollution, 156(2): 504-514.
- Capriolo M, Marzoli A, Aradi L E, et al. 2020. Deep CO₂ in the end-Triassic central Atlantic magmatic province[J]. Nature communications, 11(1): 1670.
- Clapham M E, Renne P R. 2019. Flood basalts and mass extinctions[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 47: 275-303.
- Cope M J, Chaloner W G. 1980. Fossil charcoal as evidence of past atmospheric composition[J]. Nature, 283(5748): 647-649.
- Davies J H F L, Marzoli A, Bertrand H, et al. 2017. End-Triassic mass extinction started by intrusive CAMP activity[J]. Nature

- Communications, 8: 15596.
- Edwards B A, Kushner D S, Outridge P M, et al. 2021. Fifty years of volcanic mercury emission research: Knowledge gaps and future directions[J]. *Science of the Total Environment*, 757: 143800.
- Fendley I M, Frieling J, Mather T A, et al. 2024. Early Jurassic large igneous province carbon emissions constrained by sedimentary mercury[J]. *Nature Geoscience*, 17(3): 241-248.
- Fitzgerald W F, Lamborg C H, Hammerschmidt C R. 2007. Marine biogeochemical cycling of mercury[J]. *Chemical Reviews*, 107(2): 641-662.
- Grasby S E, Them II T R, Chen Z H, et al. 2019. Mercury as a proxy for volcanic emissions in the geologic record[J]. *Earth-Science Reviews*, 196: 102880.
- Gray J E, Hines M E, Higuera P L, et al. 2004. Mercury speciation and microbial transformations in mine wastes, stream sediments, and surface waters at the Almadén mining district, Spain[J]. *Environmental Science & Technology*, 38(16): 4285-4292.
- Gray J S. 2002. Biomagnification in marine systems: The perspective of an ecologist[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 45(1/2/3/4/5/6/7/8/9/10/11/12): 46-52.
- Gustin M S, Amos H M, Huang J, et al. 2015. Measuring and modeling mercury in the atmosphere: A critical review[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(10): 5697-5713.
- He T C, Dal Corso J, Newton R J, et al. 2020. An enormous sulfur isotope excursion indicates marine anoxia during the end-Triassic mass extinction[J]. *Science Advances*, 6(37): eabb6704.
- He T C, Wignall P B, Newton R J, et al. 2022. Extensive marine anoxia in the European epicontinental sea during the end-Triassic mass extinction[J]. *Global and Planetary Change*, 210: 103771.
- 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?[J]. *Geology*, 30(3): 251-254.
- Hillebrandt A V, Krystyn L, Kürschner W M, et al. 2013. 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*, 36(3): 162-198.
- Hodges K I. 1994. A general method for tracking analysis and its application to meteorological data[J]. *Monthly Weather Review*, 122(11): 2573-2586.
- Hua X, Yin R S, Kemp D B, et al. 2023. Mercury isotope constraints on the timing and pattern of magmatism during the end-Triassic mass extinction[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 624: 118438.
- Kiessling W, Aberhan M, Brenneis B, et al. 2007. Extinction trajectories of benthic organisms across the Triassic-Jurassic boundary[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 244(1/2/3/4): 201-222.
- Korte C, Hesselbo S P, Jenkyns H C, et al. 2009. Palaeoenvironmental significance of carbon-and oxygen-isotope stratigraphy of marine Triassic-Jurassic boundary sections in SW Britain[J]. *Journal of the Geological Society*, 166(3): 431-445.
- Lindström S, Callegaro S, Davies J, et al. 2021. Tracing volcanic emissions from the central Atlantic magmatic province in the sedimentary record[J]. *Earth-Science Reviews*, 212: 103444.
- Liu J C, Cao J, Poulton S W, et al. 2025. Resolving mercury cycling and the role of volcanism during the Toarcian Oceanic Anoxic Event[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 658: 119323.
- Mander L, Kürschner W M, McElwain J C. 2013. Palynostratigraphy and vegetation history of the Triassic-Jurassic transition in east Greenland[J]. *Journal of the Geological Society*, 170(1): 37-46.
- Marynowski L, Simoneit B R T. 2009. Widespread Upper Triassic to Lower Jurassic wildfire records from Poland: Evidence from charcoal and pyrolytic polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. *Palaio*, 24(12): 785-798.
- Marzoli A, Renne P R, Piccirillo E M, et al. 1999. Extensive 200-million-year-old continental flood basalts of the central Atlantic magmatic province[J]. *Science*, 284(5414): 616-618.
- Mayall M J, Wright V P. 2015. Comment to Ibarra et al. Microfacies of the Cotham marble: A tubestone microbialite from the Upper Triassic, southwestern UK[J]. *Palaio*, 30(11): 802-805.
- McGhee G R, Jr, Clapham M E, Sheehan P M, et al. 2013. A new ecological-severity ranking of major Phanerozoic biodiversity crises[J].

- Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 370: 260-270.
- McRoberts C A, Krystyn L, Hautmann M. 2012. Macrofaunal response to the end-Triassic mass extinction in the west-Tethyan Kössen Basin, Austria[J]. *Palaios*, 27(9/10): 608-617.
- Percival L M E, Ruhl M, Hesselbo S P, et al. 2017. 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*, 114(30): 7929-7934.
- Pyle D M, Mather T A. 2003. The importance of volcanic emissions for the global atmospheric mercury cycle[J]. *Atmospheric Environment*, 37(36): 5115-5124.
- Rudnick R L, Gao S. 2014. Composition of the continental crust[M]//Holland H D, Turekian K K. *Treatise on Geochemistry*. 2nd ed. Oxford: Elsevier: 1-51.
- 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)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 295(1/2): 262-276.
- R
- u
- Sanchez H, Grasby S E, Beauchamp B. 2012. Latest Permian mercury anomalies[J]. *Geology*, 40(1): 63-66.
- Schoene B, Guex J, Bartolini A, et al. 2010. Correlating the end-Triassic mass extinction and flood basalt volcanism at the 100 ka level[J]. *Geology*, 38(5): 387-390.
- Schröder W H, Munthe J. 1998. Atmospheric mercury—an overview[J]. *Atmospheric Environment*, 32(5): 809-822.
- Sepkoski J J Jr. 1981. A factor analytic description of the Phanerozoic marine fossil record[J]. *Paleobiology*, 7(1): 36-53.
- Shen J, Yin R S, Zhang S, et al. 2022. Intensified continental weathering and carbon-cycle perturbations linked to volcanism during the Triassic–Jurassic transition[J]. *Nature Communications*, 13(1): 299.
- Shen M C, Zhang Y X, Zhu Y, et al. 2019. Recent advances in toxicological research of nanoplastics in the environment: A review[J]. *Environmental Pollution*, 252: 511-521.
- 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[J]. *Earth-Science Reviews*, 201: 102970.
- Svensen H, Planke S, Chevillier L, et al. 2007. Hydrothermal venting of greenhouse gases triggering Early Jurassic global warming[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 256(3/4): 554-566.
- Wan R Q, Yuan C S, Liu S A, et al. 2025. Intensified continental weathering and reductive surface runoff during the Triassic-Jurassic transition[J]. *Geology*, 53(1): 13-17.
- Wignall P B. 2001. Large igneous provinces and mass extinctions[J]. *Earth-Science Reviews*, 53(1/2): 1-33.
- Wignall P B, Atkinson J W. 2020. A two-phase end-Triassic mass extinction[J]. *Earth-Science Reviews*, 208: 103282.
- Wignall P B, He T C, Bond D P G, et al. 2025. The Triassic-Jurassic boundary beds of eastern and northeastern England: Facies, environments and carbon isotopes[J]. *Proceedings of the Yorkshire Geological Society*, 65(3/4): pygs2024-005.
- 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[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 127: 251-263.
- Woolway R I, Sharma S, Weyhenmeyer G A, et al. 2021. Phenological shifts in lake stratification under climate change[J]. *Nature Communications*, 12(1): 2318.

Spatiotemporal Relationship Between CAMP Volcanism and the End-Triassic Mass Extinction

ZHANG Wei¹, LIU JinChao¹, DING MeiQi², SUN JiaXin¹, LIANG RuiZe¹, WANG Wang¹, LI Man¹, HE TianChen^{1,3}

1. College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, China

2. School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China

3. Key Laboratory of Aquatic Geophysical Exploration Technologies, Chinese Geophysical Society, Nanjing 210098, China

Abstract: **[Objective]** The End-Triassic Mass Extinction (~201.5 Ma) is one of the “Big Five” mass extinction events of the Phanerozoic and is characterized by a two-pulsed extinction pattern in marine ecosystems. While widespread volcanism associated with the Central Atlantic Magmatic Province (CAMP) and subsequent massive carbon emissions are widely regarded as the principal driving mechanism, the precise spatiotemporal relationship between specific CAMP magmatic phases and the two discrete extinction pulses remains a subject of intense debate. This study aims to clarify whether these pulses were driven by immediate volcanic toxicity or by delayed environmental feedback triggered by sustained igneous activity. **[Methods]** To address this, we present high-resolution sedimentary mercury (Hg) records from the Dove’s Nest drilling cores located in the Cleveland Basin (UK). Mercury is utilized here as a sensitive proxy for large-scale volcanic outgassing. To move beyond qualitative descriptions, we employed a coupled mercury-carbon emission model to quantitatively evaluate the degassing processes and the scale of CAMP activity. Furthermore, we utilized potassium/aluminum (K/Al) ratios as a robust proxy for continental weathering intensity. By integrating these geochemical datasets with previous high-resolution biostratigraphy and paleontological records, we investigated the dynamic coupling between volcanic pulses, continental weathering rates, and the stepwise collapses of marine biodiversity. **[Results]** Our analysis identifies two distinct phases of Hg enrichment within the Dove’s Nest drilling core. The first enrichment phase occurs at the base of the Cotham Member in the Rhaetian; however, its distribution is restricted to specific local profiles, suggesting it represents a regional signal rather than a global volcanic event. In contrast, the second Hg enrichment phase spans from the top of the Cotham Member to the Langport Member. This latter phase is characterized by a significant, sustained increase in Hg concentrations that coincides precisely with the first marine extinction pulse and slightly predates the onset of the second pulse. Crucially, this second Hg anomaly exhibits a globally correlative, appearing in both marine and terrestrial sections across diverse paleolatitudes, thereby confirming its origin from large-scale CAMP activity. **[Conclusions]** The widespread distribution of sedimentary Hg enrichment across global marine and terrestrial profiles during the late Rhaetian provides strong evidence for massive, episodic CAMP activity. We propose a staggered causal mechanism for the ETME: the initial phase of volcanism triggered the first extinction pulse through direct, short-term mechanisms. These likely included rapid sea-surface temperature spikes and the fallout of toxic substances (e.g., Hg and SO₂), leading to an immediate decline in regional and global biodiversity. Subsequently, the sustained and cumulative release of CO₂ drove

Foundation: National Key Research and Development Program, No. 2023YFF0804000; National Natural Science Foundation of China, No. 42372130, 42488201

Corresponding author: HE TianChen, E-mail: tianchenhe@hhu.edu.cn

prolonged global warming and a significant intensification of the hydrological cycle, as evidenced by elevated K/Al ratios. This intensified continental weathering accelerated the flux of terrestrial nutrients (such as phosphorus) into the oceans, fueling primary productivity and expanding and intensifying marine anoxia, indirectly triggering the second extinction pulse. This study highlights the staged nature of environmental collapse and biological extinction driven by large igneous provinces in deep time, providing an important deep-time analogue for understanding the complex responses of marine ecosystems to ongoing global warming.

Key words: end-Triassic mass extinction; large igneous provinces; sedimentary mercury records; pulsed volcanism; spatiotemporal relationship

