

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.073>



二叠纪-三叠纪之交火山活动沉积示踪综述

张志华, 欧阳庆龙, 林雯洁, 王心乾, 何倩, 沈俊*

中国地质大学(武汉)地质微生物与环境全国重点实验室, 湖北武汉 430078

摘要: 二叠纪-三叠纪之交发生了剧烈的气候环境扰动,并伴随着显生宙以来最大的一次生物大灭绝事件.该时期发生了剧烈的火山活动,被认为是引起此次生态系统危机的主要触发机制.由于环境和生物信息保存丰富的沉积岩中缺乏有效的火山活动记录,开展该时期高精度的火山活动-环境扰动-生物危机的因果关系研究一直是学术界的难点.破解该难点的关键在于如何在保存丰富的沉积岩中示踪古火山活动记录.以二叠纪-三叠纪之交强烈火山活动为典型案例,综述古火山沉积记录示踪指标在地层中的记录,包括火山熔岩和火山灰凝灰岩、挥发组分(碳、汞、硫等)及非挥发组分(铜、锌、镍、钼、锶、钼族等元素)等.结果表明,各项指标在该时期地层中均有显著的记录,指示火山喷发对地表元素循环产生剧烈的影响.同时,探讨了各项指标的优势性与局限性,为进一步开展深时火山示踪研究提供借鉴,并展望了该领域未来研究方向.

关键词: 火山活动;地球化学指标;二叠纪-三叠纪之交;生物大灭绝;金属同位素;汞记录;黑色页岩;地球化学.

中图分类号: P595;P597;P532

文章编号: 1000-2383(2026)07-2894-21

收稿日期: 2025-12-15

Sedimentary Proxies of Volcanism across Permian-Triassic Transition: A Review

Zhang Zhihua, Ouyang Qinglong, Lin Wenjie, Wang Xinqian, He Qian, Shen Jun*

State Key Laboratory of Geomicrobiology and Environmental Changes, China University of Geosciences (Wuhan),
Wuhan 430078, China

Abstract: The Permian-Triassic transition was characterized by severe climatic and environmental perturbations, accompanied by the largest mass extinction event in the Phanerozoic. The Siberian Traps Large Igneous Province, the largest continental large igneous province in Earth history, is widely considered to be the ultimate trigger of this ecological crisis. However, although sedimentary rocks preserve abundant environmental and biological signals, they generally lack direct records of volcanic activity, which has long hindered high-resolution investigations of the causal relationships among volcanism, environmental perturbations, and biotic crises during this interval. A critical challenge, therefore, lies in tracing signals of ancient volcanic activity within sedimentary successions. Taking the intense volcanism at the Permian-Triassic boundary as a representative case, this study reviews volcanic proxies preserved in stratigraphic records, including volcanic lava and ash (tuff) layers, volatile components (e.g., carbon, mercury, and sulfur), and non-volatile components (e.g., metallic elements such as copper, zinc, and nickel). The results indicate that these proxies exhibit pronounced signals saddle the Permian-Triassic boundary strata, suggesting that volcanic eruptions exerted significant impacts on surface elemental cycles. Furthermore, the advantages and limitations of different proxies are evaluated,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos.U25D9024, 92479203).

作者简介: 张志华(1999-),男,博士研究生,从事西伯利亚大火成岩省玄武岩风化沉积响应及其气候环境意义的研究. ORCID: 0009-0004-3136-2239. E-mail: zhangzhihua0221@cug.edu.cn

* **通讯作者:** 沈俊, ORCID: 0000-0003-3759-6533. E-mail: shenjun@cug.edu.cn

引用格式: 张志华, 欧阳庆龙, 林雯洁, 王心乾, 何倩, 沈俊, 2026. 二叠纪-三叠纪之交火山活动沉积示踪综述. 地球科学, 51(7): 2894-2914.

Citation: Zhang Zhihua, Ouyang Qinglong, Lin Wenjie, Wang Xinqian, He Qian, Shen Jun, 2026. Sedimentary Proxies of Volcanism across Permian-Triassic Transition: A Review. *Earth Science*, 51(7): 2894-2914.

providing a reference for future deep-time volcanic tracing studies and offering perspectives on future research directions.

Key words: volcanism; geochemical proxies; Permian-Triassic; mass extinction; metal isotope; mercury record; black shale; geochemistry.

0 引言

二叠纪-三叠纪 (Permian-Triassic, P-T) 之交发生了地球历史上最严重的生物灭绝事件,在短短数万年内导致了 90% 以上的海洋生物和 70% 以上的陆地脊椎动物快速灭亡,海陆生态系统近乎全面崩溃,持续 2 亿多年的“古生代演化动物群”被“现代演化动物群”所取代(图 1; Raup and Sepkoski, 1982; Jin *et al.*, 2000; Shen *et al.*, 2011a; 戎嘉余和黄冰, 2014; 沈树忠和张华, 2017; Fan *et al.*, 2020; Algeo and Shen, 2024). 同时,该时期地表系统还发生了强烈的气候环境扰动(图 1),比如,全球范围内陆地和海洋中(无机和有机)碳同位素的快速负偏(幅度可达 5‰~8‰),指示该时期发生了剧烈的碳循环波动(Xie *et al.*, 2007; Korte and Kozur, 2010; Shen *et al.*, 2012); 牙形石氧同位素记录该时期海水表层温度升高了 8~10 °C (Joachimski *et al.*, 2012; Sun *et al.*, 2012); 海洋碳酸盐岩铀同位素负漂移和多硫同位素的快速波动指示海洋发生了大

范围的缺氧事件(Shen *et al.*, 2011b; Zhang *et al.*, 2018; 何卫红等, 2025); 碳酸盐岩硼同位素的强烈波动指示海洋酸化现象(Clarkson *et al.*, 2015).

随着研究的深入,越来越多的证据表明大规模火山活动是引起 P-T 之交海陆环境波动和生物灭绝的主要机制(Burgess and Bowring, 2015; Clapham and Renne, 2019; Shen *et al.*, 2023). 该转折期发生了强烈的火山活动,当时地表有多处火山喷发,主要包括西伯利亚板内和环特提斯洋构造域两大火山活动等(Svensen *et al.*, 2009; Black *et al.*, 2012; 朱江和张招崇, 2013; 殷鸿福和宋海军, 2013; 陈军和徐义刚, 2017; Zhao *et al.*, 2019; 图 1). 当前,判断火山活动的生态效应主要依赖两者时间上的耦合关系. 然而,大火成岩省的喷发(时间尺度常为 $10^5\sim10^6$ a, Burgess *et al.*, 2017)与生态系统波动(如生物灭绝、海洋缺氧等,时间尺度常为 $10^1\sim10^4$ a, Shen *et al.*, 2011a)在时间分辨率上存在显著差异,严重制约了两者因果关系的确立. 如何在生物与环境事件记录完整、研究程度高的沉积岩中,实现火

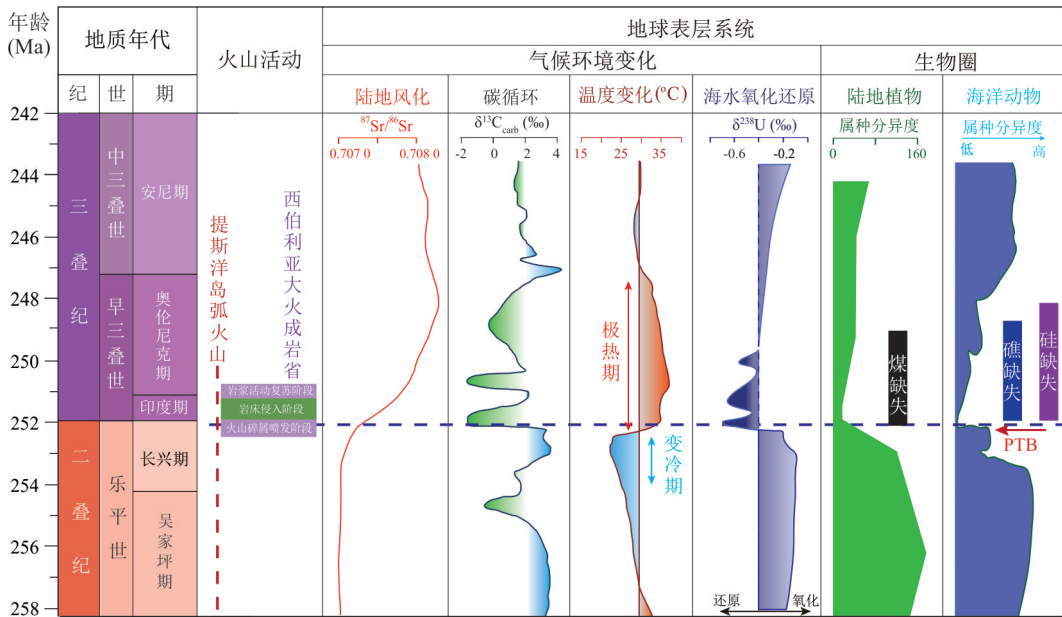


图 1 二叠纪-三叠纪之交火山-环境-时间研究

Fig.1 Integrated volcanism-environment-time framework across the Permian-Triassic boundary
火山活动修改自殷鸿福等(1989)、Burgess *et al.* (2014); 陆地风化 Sr 同位素数据来自 Song *et al.* (2015); 碳循环数据来自 Payne *et al.* (2004)、Xie *et al.* (2007)、Shen *et al.* (2011a); 温度变化数据来自 Sun *et al.* (2012); 海水氧化还原数据来自 Zhang *et al.* (2018); 陆地植物数据来自 Yu *et al.* (2015)、Xu *et al.* (2022); 海洋动物数据来自 Chen *et al.* (2012)

山活动与生物演变、环境变化的高精度对比,是长期困扰学界的难题.其核心瓶颈在于火山岩地质记录的不完整性:基性熔岩和火山灰(黏土岩)多分布于喷发口附近区域,而在远离火山喷发口的区域则缺乏直接的火山活动记录.

因此,在保存丰富气候与生物信息的沉积物中寻找有效的火山活动示踪指标,是破解该难点的关键.目前,国内外科学家对P-T之交火山作用的研究已取得重要进展,但多集中于西伯利亚大火成岩省(Siberian Traps Large Igneous Province, STLIP)与环特提斯构造域火山岩本身,如喷发规模(Fedorenko *et al.*, 2000)、释放物质(Retallack and Jahren, 2008; Svensen *et al.*, 2009; Black *et al.*, 2018; Broadley *et al.*, 2018)、放射性同位素定年(Shen *et al.*, 2011a; Burgess *et al.*, 2017)以及灭绝界线附近火山灰黏土岩的性质与年代学等方面(Gao *et al.*, 2013; Burgess *et al.*, 2014; He *et al.*, 2014; Baresel *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2019).火山喷发可以释放巨量的挥发组分(碳、硫、汞等挥发性元素)和非挥发组分(熔岩、火山灰和金属元素),这些组分通过

大气传输、水循环及沉积过程,最终保存于沉积岩中.因此,沉积岩中这些岩石、矿物和元素记录可用于示踪古火山活动.虽然,有研究对汞等单一地球化学指标的示踪机理与应用进行了系统综述(Grasby *et al.*, 2019; Shen *et al.*, 2020),但是,单一指标存在多解性,难以全面约束火山活动的时空特征(见下文).因此,本文聚焦于P-T之交(地球历史上火山活动频发的时期),系统梳理古火山活动沉积(地球化学)指标示踪的研究进展,重点阐述各类指标的应用原理,并讨论其优势与局限,以期为深入开展古火山示踪研究提供参考,同时指出目前研究中存在的问题与未来研究的可能方向.

1 火山活动火山岩记录

二叠纪-三叠纪之交是火山活动喷发的频繁时期,主要发生了西伯利亚板内基性火山(STLIP)和特提斯洋构造域的中酸性火山活动(图 2a).火山岩是火山活动最直接的地质记录,但是,该时期两类火山岩性质存在明显的差异,STLIP 主

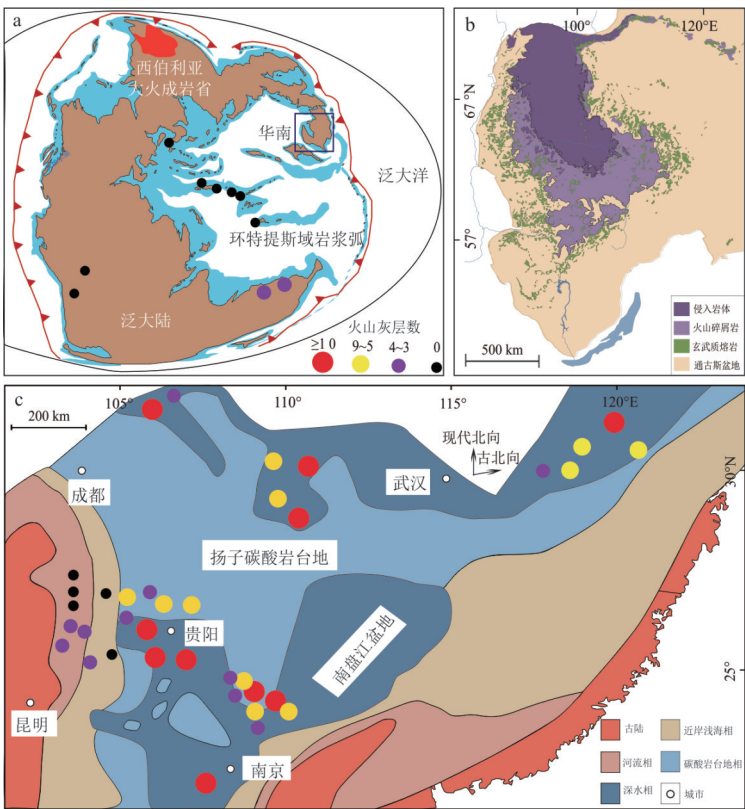


图2 二叠纪-三叠纪之交火山岩分布

Fig.2 Distribution of volcanic rocks across the Permian-Triassic transition

a. 二叠纪-三叠纪之交环特提斯域酸性岛弧火山空间分布,修改自 Chapman *et al.* (2022); b. 西伯利亚大火成岩省空间分布,修改自 Burgess *et al.* (2017); c. 二叠纪-三叠纪之交华南酸性火山灰空间分布,修改自 Xie *et al.* (2010)和 Shen *et al.* (2021)

要保存了大量的玄武岩,而环特提斯洋构造域火山却保存了大量的火山灰黏土岩记录(图2)。

1.1 西伯利亚大火成岩省玄武岩记录

西伯利亚大火成岩省是显生宙以来规模最大的大陆溢流型玄武岩喷发活动的产物,其岩浆展布面积可达 $7 \times 10^6 \text{ km}^2$,岩浆体积高达 $4 \times 10^6 \text{ km}^3$,其熔岩体积相当于能覆盖整个中国陆地版图300~400 m厚度(图2b)(Fedorenko *et al.*, 2000; Reichow *et al.*, 2009; Burgess and Bowring, 2015)。岩浆岩主要由拉斑玄武岩组成,同时还包括苦橄岩、碱性橄榄玄武岩、粗面玄武岩以及粗安岩等(Fedorenko *et al.*, 1996)。矿物学和地球化学特征表明,这些火山岩具有大量地幔衍生成分,主要为镁铁质低钛($\text{TiO}_2 < 2$)玄武岩,且富含MgO和FeO(12%~15%),轻稀土(LREE)中等富集,Eu异常不明显,与上地壳(强烈富集LREE,Eu负异常显著)存在明显差异,亏损高场强元素,具有低 ϵ_{Nd} (0.2~2.5)和低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (约0.704 5)的特征,指示幔源岩浆特征(Sobolev *et al.*, 2011; Callegaro *et al.*, 2021)。

按照喷发时间、活动特征、喷发物质类型可将STLIP岩浆活动分为3个阶段(Burgess *et al.*, 2017)。阶段一为溢流玄武岩喷发阶段((252.24±0.1)~(251.907±0.067) Ma),初始为火山碎屑喷发,随后转变为大规模熔岩溢流,喷发出整个火山熔岩总量的2/3,岩浆通道多为垂直的岩墙运移,与围岩发生小面积热接触,此时生物圈和碳循环暂未表现出显著波动,为大灭绝发生之前。阶段二为岩床侵入阶段((251.907±0.067)~(251.483±0.088) Ma),此时熔岩喷发渐弱,转变为大规模岩床侵入,通过侵入富含挥发物的通古斯盆地沉积物受热发生接触变质,释放了巨量温室气体(CO_2 、 CH_4 等)。该阶段起始点与P-T生物大灭绝开始时间精确对应,同期碳同位素出现显著负偏。阶段三为岩浆活动复苏阶段((251.483±0.088)~(250.2±0.3) Ma),该阶段岩床侵入持续,但规模减小,熔岩在局部区域重新开始喷发。该时期全球温度维持一个高位,生物复苏缓慢,碳同位素从负偏低点回升,仍未恢复至二叠纪末期生物大灭绝前的背景(图1)。目前关于STLIP的火山灰黏土岩仅在西伯利亚盆地周缘有少量的报道,缺乏对西伯利亚地区火山岩风化沉积响应以及火山活动对古气候环境影响的定量研究。

1.2 环特提斯构造域中酸性火山活动火山灰黏土岩记录

二叠纪-三叠纪之交处于泛大陆聚合的全盛时

期,该时期全球许多地区发生了一系列岛弧火山活动。最直接的证据是在环特提斯构造域上二叠统至下三叠统地层中广泛发育了多层火山灰黏土岩(殷鸿福等, 1989; Shen *et al.*, 2012; Chapman *et al.*, 2022)。最典型的记录位于古特提斯洋东缘的华南板块,其发育多层火山灰黏土岩。通过对华南地区火山灰黏土岩的火山凝灰结构和火山玻璃进行研究,识别出华南中酸性火山活动的记录,并推测中酸性火山活动是华南P-T之交生物大灭绝的重要驱动原因(殷鸿福等, 1989)。随着后续研究的深入,华南P-T之交的火山灰黏土岩在不同地区显示出一定的变化,在下扬子地区煤山剖面仅有三层火山灰黏土岩,其中25层及28层火山灰黏土岩正好卡定了P-T生物大灭绝的时限(Yin *et al.*, 2001)。在上扬子地区上寺剖面则分布有6层火山灰黏土岩,而南盘江盆地的东攀剖面和新民剖面火山灰更是多达十几层(Shen *et al.*, 2012, 2013)。空间分布上,火山灰黏土岩表现为向扬子西南缘层数增多、灰层变厚、火山碎屑变粗以及同沉积锆石尺寸增大的趋势(图2),推测华南地区P-T之交的火山物质来源于华南板块西南缘的环特提斯域岛弧火山的产物(He *et al.*, 2014; 王曼等, 2018)。

通过对P-T之交火山灰黏土岩成分研究发现,全岩主微量数据在Nb/Y vs. Zr/TiO₂和Al₂O₃ vs. TiO₂二元判别图中大部分数据点都位于英安岩到流纹岩等酸性火山岩范围内(He *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2019)。Zhao *et al.* (2019)通过对华南地区多个剖面火山灰黏土岩中的重矿物进行挑选,发现继承锆石(岩浆中未熔融的古老锆石核)的U-Pb年龄范围为250~3 521 Ma,该年龄谱与华南和印支地块的碎屑锆石年龄高度一致,与西伯利亚克拉通锆石年龄谱显著不同,表明火山灰源区为华南-印支克拉通地壳物质,排除了西伯利亚来源。火山灰黏土岩中同沉积锆石微量元素与同位素特征显示的高Hf含量(>7 500 ppm)也指示源自高度分异的酸性岩浆(如英安岩-流纹岩)。Nb/Yb vs. U/Yb、Th/U vs. Nb/Hf图解大多数数据点也落入大陆弧/造山带区域,与俯冲带岩浆作用相符。锆石Hf-O同位素记录也反映其物质来源为古老地壳物质重熔,而非幔源岩浆(如西伯利亚地幔柱)。以上均证明华南地区火山灰黏土岩明显区别于STLIP的基性玄武岩,而显示出与特提斯洋区域岛弧火山一致的地球化学特征。目前,对环特提斯构造域火山活动的喷出岩还没有

系统的报道,其可能在特提斯洋俯冲过程中被破坏.华南地区火山灰黏土岩与生物灭绝在时间上高度一致,但岛弧火山的规模是否足够引发全球性灭绝,还存在很大的不确定性.这一现象更可能反映了华南地区火山活动加剧了区域性的环境压力,而非主要驱动因素.

2 火山活动挥发性组分沉积记录

2.1 碳同位素记录

自然界中碳的两种稳定同位素为¹²C(丰度 98.89%)和¹³C(丰度 1.11%),而大规模的火山活动会释放出巨量的二氧化碳(CO₂)从而导致表层系统的碳循环波动.火山活动主要以两种形式对地表输入碳源:(1)火山喷发作用直接释放大量地幔源 CO₂ (δ¹³C: -6‰) (Sobolev *et al.*, 2011; Gales *et al.*, 2020);(2)岩浆侵入作用与富有机质围岩发生接触热变质释放出大量的 CO₂ 和 CH₄

(δ¹³C: -25‰~-40‰) (Svensen *et al.*, 2009). 巨量火山释放的富含¹²C的轻碳注入大气和海洋系统,影响了二者的平衡,导致海洋溶解无机碳库的 δ¹³C 整体降低,从而导致碳酸盐岩中 δ¹³C_{carb} 出现负偏移.海洋溶解无机碳库的 δ¹³C 降低后,浮游植物利用的 CO₂ 同位素组成也发生负偏,导致其合成的有机质 δ¹³C_{org} 也发生了负偏移现象.火山作用释放的碳以气态 CO₂/CH₄ 形式通过大气环流全球传输,通过“海洋溶解泵”和“生物泵”影响碳循环 (Hollander and Mckenzie, 1991),并伴随着不同储库的碳同位素分馏过程,使其成为示踪大规模火山活动的有效指标 (Shen *et al.*, 2012).

二叠纪-三叠纪之交发生了全球碳循环的剧烈扰动,最明显的特征就是全球范围内碳同位素出现了显著的负偏(图 3).但是,由于地表系统碳循环的复杂性,关于该转折期碳同位素的负偏机制还存在很大的争议.早期学者主要聚焦于海洋内部碳循环过程(生产力崩溃、海水翻转).学者提出的“Strange

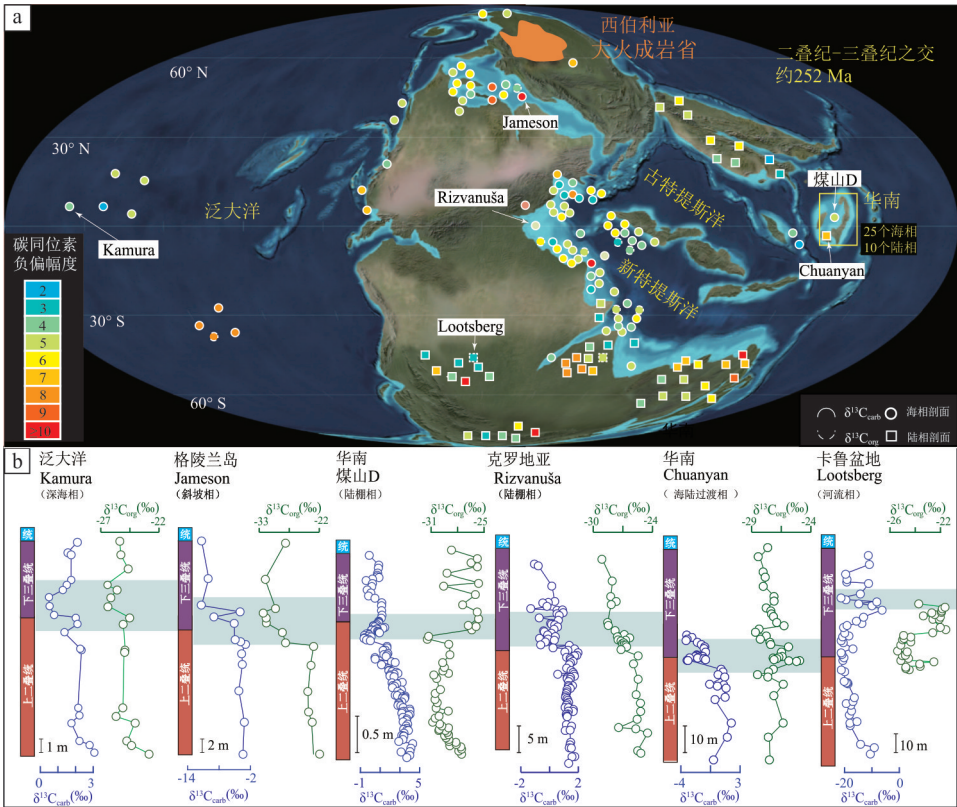


图 3 全球二叠纪-三叠纪之交碳同位素研究剖面古地理分布以及典型盆地数据

Fig.3 Global paleogeographic distribution and trends of carbon isotope across the Permian-Triassic boundary

a. 全球二叠纪-三叠纪之交碳同位素研究剖面古地理分布图,其中剖面投点颜色代表碳同位素负偏幅度,实线描边代表测试无机碳同位素数据,虚线描边代表测试有机碳同位素数据,图中研究剖面参考文献见附件;二叠纪-三叠纪之交古地理图据 <http://jan.ucc.nau.edu/~rcb7/>, © 2016 Colorado Plateau Geosystems Inc. b. 选取的 6 个经典二叠纪-三叠纪之交研究剖面的碳同位素数据投图,其中蓝色阴影代表的无机、有机碳同位素负偏区间

love Ocean”假说认为P-T之交生物大灭绝导致了全球海洋初级生产力剧减,造成了海洋“生物泵”停止工作,海洋有机碳埋藏量大幅下降.有机碳埋藏是移除海洋中轻碳(^{12}C)的主要过程,该过程的停止导致海水溶解无机碳库中的碳同位素变轻从而发生负偏(Kump, 1991).随着越来越多的高分辨率碳同位素记录被重建,发现碳同位素负偏的起始层位略早于生物大灭绝层位,这与“灭绝导致生产力崩溃造成碳同位素负偏”的逻辑不符,导致该假说受到不少质疑(Korte and Kozur, 2010; Shen *et al.*, 2011a).随后海水翻转模型被提出,表示快速的海洋翻转循环导致富集轻碳的深层水上涌到表层海洋,深源轻碳被释放到大气中,同时导致海水溶解无机碳库和大气 CO_2 库的碳同位素发生负偏,并被海相碳酸盐岩($\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$)和陆相有机质($\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$)沉积记录下来(Kump *et al.*, 2005).而随着研究的深入发现该假说的模拟结果与实测剖面地球化学数据相矛盾,如地质记录显示P-T之交钙同位素($\delta^{44}/^{40}\text{Ca}$)显著负偏,但该模型的模拟结果却预测了钙同位素的正偏(Payne *et al.*, 2010).

近年来,通过研究STLIP岩浆喷发阶段,发现岩浆侵入富有机质沉积岩层阶段(约251.907 Ma)正好在时间上对应煤山25层火山灰(约251.94 Ma),同时25层沉积物中的无机碳同位素表现为最大负偏移(Burgess *et al.*, 2014).这一发现为热成因气体如何触发大气-海洋系统中碳同位素变化提供了时间上的支持.因此,STLIP的火山排气和相关热释放过程被认为是导致该时期碳同位素负漂移的主要原因(Burgess *et al.*, 2014, 2017).通过模拟STLIP的侵入岩热释放过程估计西伯利亚地区富有机质沉积层与玄武质岩浆接触热变质作用会释放出超过 1×10^5 亿吨 CO_2 (Svensen *et al.*, 2009).因此,大量温室气体和有毒气体等挥发组分的释放被认为是导致P-T之交全球范围内极端气候频发、环境恶化和生物灭绝的主要原因.因此碳同位素在该时期被广泛作为一种化学地层学工具来进行全球P-T之交不同沉积相之间的地层对比(Korte and Kozur, 2010),更为识别P-T之交生物大灭绝以及不同地区的生物和环境变化的联系提供了有力的佐证.

目前大部分的工作主要强调STLIP对碳同位素负偏的影响.P-T之交时期环特提斯域频繁的岛弧火山喷发也会向海洋-大气系统持续输入火山气体,导致相对背景沉积的碳同位素的负偏移(Shen

et al., 2012).根据华南地区峡口与新民两个海相剖面碳同位素记录,晚二叠世多期岛弧火山对应着显著的 $\delta^{13}\text{C}$ 负偏,这类变化多表现为渐进式、幅度相对较小的负偏,反映出区域性火山活动可能引发的温室气体释放及对海洋无机碳库的扰动(Shen *et al.*, 2012).然而,这并不足以解释全球范围内在P-T之交生物大灭绝附近出现的快速且大幅度碳同位素负异常.相比之下,STLIP的大规模岩浆活动被认为是造成P-T之交全球碳循环剧变的主要驱动机制(Cui *et al.*, 2021).大量玄武岩喷发、煤层侵入以及相关热释放造成巨量轻碳(^{12}C)释放到表层系统,从而引发全球范围内的剖面记录到急速、同步且幅度巨大的碳同位素负偏事件.与华南岛弧火山作用相比,STLIP的规模更大、喷发时序更集中,其对碳循环的扰动呈现全球一致性,并与P-T之交生物大灭绝的时间框架高度吻合(Wu *et al.*, 2021; 吴玉样等, 2025).因此,P-T之交碳同位素的剧烈负偏通常被视为STLIP驱动的全球碳扰动事件的地球化学证据(Algeo and Shen, 2024).

2.2 汞浓度及其同位素记录

汞是唯一可以在大气中以气态单质形式存在并可进行长距离传输的有毒重金属.在地质历史时期,火山作用是地质历史时期地表汞循环的主要来源,主要包括:(1)火山爆发释放出深部地幔的汞气体(Canil *et al.*, 2015);(2)火山岩床侵入阶段通过加热周围的沉积地层(比如煤层)释放出大量的汞;(3)火山活动引起的陆地大面积野火频发及大陆风化加剧从而释放出大量的汞(Pyle and Mather, 2003; 迟清华, 2004; Selin, 2009; Grasby *et al.*, 2019).汞元素以气态形式通过大气快速、长距离传输,并且在水圈和生物圈快速迁移和沉积等特征决定了其可以用来示踪全球区域内沉积物中高分辨率(百年或千年尺度)的火山活动沉积记录(Grasby *et al.*, 2019; Shen *et al.*, 2020).

同时,汞同位素已成为示踪自然界汞元素来源的最新手段.汞在自然界存在7种稳定同位素,其平均丰度分别为 ^{196}Hg (0.15%)、 ^{198}Hg (9.97%)、 ^{199}Hg (16.87%)、 ^{200}Hg (23.10%)、 ^{201}Hg (13.18%)、 ^{202}Hg (29.86%)和 ^{204}Hg (6.87%).汞是自然界唯一同时存在同位素质量分馏和非质量分馏的金属元素(冯新斌等, 2015; 郑旺等, 2021).较其他同位素体系而言,汞同位素“质量分馏-非质量分馏”二维示踪体系可以反映汞来源及其生物地球化学过程的更多信息

(Blum *et al.*, 2014; 冯新斌等, 2015). 尤其汞同位素的奇数非质量分馏($\Delta^{199}\text{Hg}$)主要与光化学过程有关, 可以更精准反映汞在表生环境中地球化学迁移转化的过程. 汞的奇数非质量分馏特征参数 $\Delta^{199}\text{Hg}$ 在现代地球系统不同储库记录中具有明显的差异(Blum *et al.*, 2014; Yin *et al.*, 2016): 在海洋体系(海洋生物体和水体沉降物)中主要偏正; 在陆地体系(土壤、植物和沉积物)中以负值为主; 火山来源主要接近零($+0.02\text{‰} \pm 0.06\text{‰}$; 冯新斌等, 2015; Yin *et al.*, 2016; Shen *et al.*, 2019a). 汞作为地球历史中古火山活动的初始来源元素, 虽然在表生环境中也存在早期沉积 Hg 的再循环过程, 包括风化、流体作用、生物分馏富集、缺氧环境硫化物吸附等, 但 $\Delta^{199}\text{Hg}$ 在这些过程产生的分馏非常小, 可以良好区分火山来源汞记录. 因此, 汞元素含量及其同位素数据联合使用可以有效地指示沉积物中汞元素的沉积异常和示踪汞异常的来源(Grasby *et al.*, 2017). 近几年, 沉积物中汞元素浓度和汞同位素联合使用更是被广泛用来指示地球历史上多次关键转折期的古火山记录(Grasby *et al.*, 2019; Shen *et al.*, 2020; Wei *et al.*, 2026).

沉积物中汞元素浓度及其同位素记录已被广泛运用于 P-T 之交火山活动示踪. 全球范围内的经典海相剖面在生物灭绝界线附近都有汞峰值, 指示火山作用产生了全球性的巨大影响(Grasby *et al.*, 2016; Shen *et al.*, 2019b, 2023). 加拿大 Stephen E. Grasby 教授课题组最早报道了 P-T 之交加拿大 Buchanan Lake 剖面的汞浓度异常, 并与 STLIP 进行联系(Sanei *et al.*, 2012). Grasby *et al.* (2017) 通过对比 Buchanan Lake 深水剖面和煤山 D 浅水剖面的汞浓度及同位素特征, 结果显示 Buchanan Lake 剖面在 P-T 之交灭绝期间记录的汞富集及同位素负偏, 主要反映了火山释放的汞通过大气长距离传输并沉降的特征; 而煤山 D 剖面则因为靠近陆源的沉积环境, 其汞同位素信号则记录了火山与陆地的混合输入. Wang *et al.* (2018) 通过研究华南地区 3 个不同深度的海相剖面(煤山、上寺和大峡口)也发现 P-T 之交灭绝层位附近均存在显著的 Hg 与 Hg/TOC 的异常富集, 并伴随汞同位素组成的变化. 深水环境(大峡口、上寺剖面)显示出持续正的 $\Delta^{199}\text{Hg}$ 值, 而相对浅水环境的煤山剖面则表现出负的 $\Delta^{199}\text{Hg}$ 值, 表明深海沉积相比近岸沉积相更能直接记录到火山活动的大气汞特征. 在近岸浅水环境中, 汞沉

积信号更大程度上会受到陆源输入的影响, 深海环境在地质记录中则能更好地记录火山喷发的时间和强度, 因为它们记录大气汞的沉积. Shen *et al.* (2019a) 通过研究 P-T 之交全球典型地区不同深水相区进一步提出, 生物灭绝界线出现的时间比汞峰值要晚约 $(5\sim 10) \times 10^4$ a, 这一发现为理解生物灭绝模式提供了一个新的视角: 深水环境中的灭绝比浅水环境滞后约 $(5\sim 10) \times 10^4$ a, 这可能与开阔海域环境恶化的滞后性有关.

相比之下, P-T 之交陆相沉积物中的汞记录和火山活动之间的联系还存在一定的争议. 华南和新疆地区陆相地层最先开展了汞浓度及其同位素研究(Shen *et al.*, 2019c; Chu *et al.*, 2020). Shen *et al.* (2019c) 对华南鲁贝和新疆大龙口两个陆相剖面的汞浓度和同位素进行了详细分析, 结果显示两个剖面生物灭绝界线附近汞浓度明显富集, 鲁贝剖面汞同位素数据进一步表明, 灭绝界线附近高浓度汞主要为西伯利亚火山活动释放的汞和陆源汞的混合输入. 随后, Chu *et al.* (2020) 使用华南地区两个剖面(ZK4703 钻孔和赤那河剖面)汞元素含量峰值作为等时指标, 对陆相地层与海相地层进行对比, 发现华南地区陆地系统生物灭绝要早于海洋系统. Zhang *et al.* (2021) 通过研究华南地区 4 个 P-T 陆相剖面的 Hg 和 Hg 同位素特征, 则认为这是由于华南长英质火山活动导致 Hg 富集和 Hg 同位素的异常波动. Shen *et al.* (2023) 报道了距离 STLIP 最远的陆相剖面汞记录, 研究结果显示在距离 STLIP 数千公里的南半球两个独立盆地(南非卡鲁盆地和澳大利亚悉尼盆地)中, Hg 和 Hg/TOC 的值在靠近灭绝界线附近均出现了显著升高, 这与同时期北半球和赤道地区的 Hg 记录一致, 同时来自悉尼盆地 Bunnerong 剖面和卡鲁盆地 Ripplemead 剖面的 $\Delta^{199}\text{Hg}$ 记录显示靠近灭绝区间的正偏(约 0.3‰), 反映了来自大气长距离传输的火山释放 Hg 的增加. 近期, Chen *et al.* (2023) 对华南滇东黔西地区的沉积地层研究结果显示, P-T 之交的 Hg 记录存在海-陆相分异的特征, 在滨海低地沉积地层中的 Hg 富集特征明显, 结合 $\Delta^{199}\text{Hg}$ 特征, 认为是由于陆地野火频发、土壤侵蚀加剧导致的陆源 Hg 输入增加造成了该地的 Hg 富集现象, 相反陆相冲积高地主要反映背景沉积, 无明显汞富集现象. 这一差异提示, Hg 异常作为火山活动示踪指标时需严格排除陆源干扰及沉积环境影响(Chen *et al.*, 2023).

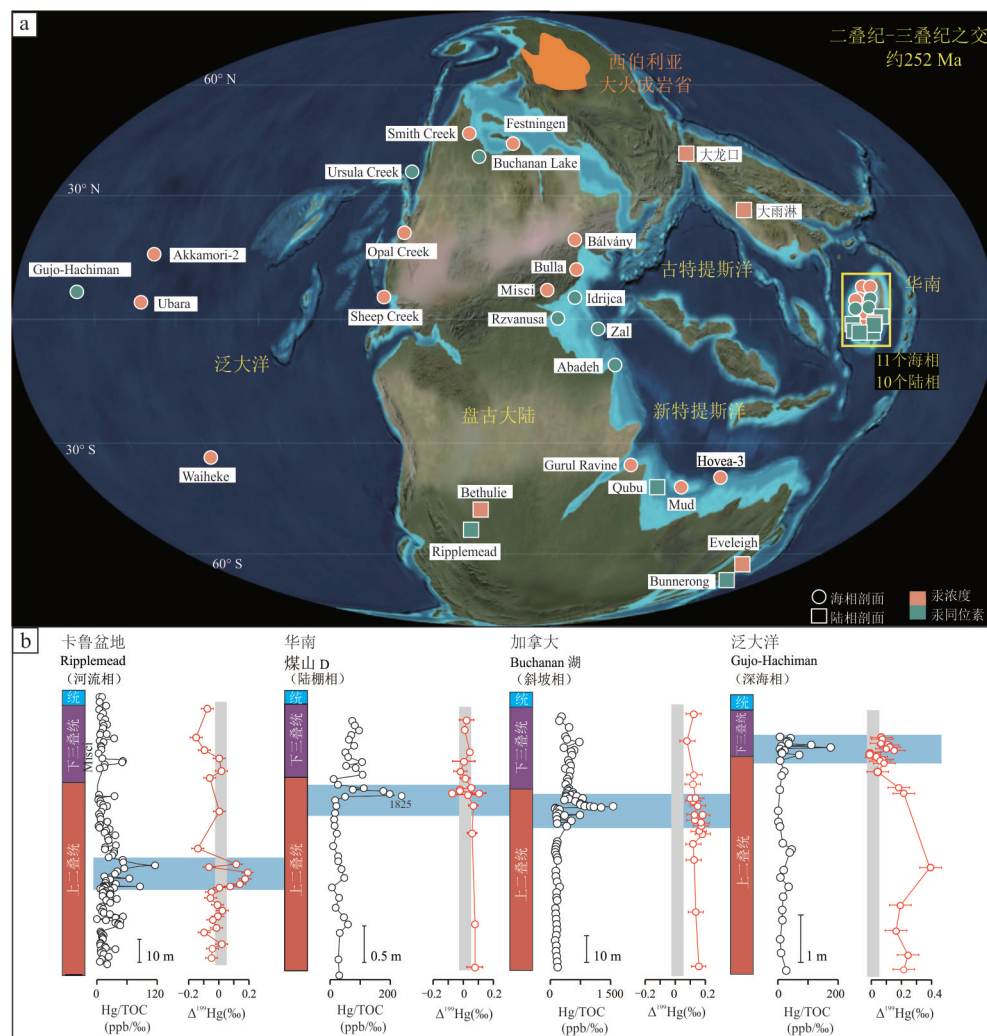


图 4 全球二叠纪-三叠纪之交汞和汞同位素研究剖面古地理分布以及典型盆地数据

Fig. 4 Global paleogeographic distribution and trends of Hg and Hg isotope across the Permian-Triassic boundary

a. 全球二叠纪-三叠纪之交汞和汞同位素研究剖面古地理分布图, 研究剖面参考文献见附件, 古地理图据 <http://jan.ucc.nau.edu/~rcb7/>, © 2016 Colorado Plateau Geosystems Inc. b. 选取的 4 个经典二叠纪-三叠纪之交研究剖面的汞及其同位素数据投图, 其中蓝色阴影代表的汞富集以及 $\Delta^{199}\text{Hg}$ 波动区间, 4 个剖面的数据来源于 Shen *et al.* (2023)

Chu *et al.* (2025) 通过汞异常与锆石 U-Pb 定年数据的结合, 证实了华北陆相生态系统崩溃 (约 252.21 Ma) 比华南早约 30×10^4 a (华南危机始于 251.88 Ma), 揭示了 P-T 陆地生物灭绝的穿时性特征。

汞同位素还可以有效区分 STLIP 和环特提斯洋中酸性火山活动汞来源. 其关键原理在于不同构造背景下火山汞的来源存在本质差异, 从而导致 $\Delta^{199}\text{Hg}$ 的系统性差别. 俯冲带相关的中酸性火山活动中, 可受到再循环洋壳沉积物及板片流体输入的影响, 导致其释放的汞产生正的 $\Delta^{199}\text{Hg}$ 信号; 而幔源溢流型火山活动中, 汞主要来源于地幔和岩浆侵入加热有机质沉积物所释放的汞, 其 $\Delta^{199}\text{Hg}$ 值通常接近 0‰ (Shen *et al.*, 2021; Deng *et al.*, 2022). 在华南地区的 3 套上二叠统至下三叠统海相沉积剖面中

识别出 4 个显著的汞富集事件 (ME1-ME4), 其中前 3 个汞富集事件 (ME1-ME3) 具有区域一致性, 仅 ME4 事件表现为全球性峰值. 在 P-T 生物大灭绝之前, 环特提斯洋俯冲带沿线已发生了频繁且强烈的区域性火山活动, 对华南地区海洋环境与生态系统产生了持续扰动, 全球性汞峰值则反映出 STLIP 大规模喷发及其对有机质沉积物的加热过程. 汞同位素结果进一步揭示了不同事件的汞来源: 背景期 $\Delta^{199}\text{Hg}$ 值较高 (+0.3‰ 至 +0.4‰), 而在汞富集期则下降, ME1-ME3 为 +0.1‰ 至 +0.3‰, ME4 接近 0‰. 这种变化表明, ME1-ME3 汞富集主要来自环特提斯构造域俯冲相关的中酸

性火山排放($\Delta^{199}\text{Hg}$ 偏正, $+0.1\text{‰}$ 至 $+0.3\text{‰}$), 而 ME4 汞富集事件主要源于 STLIP 岩浆侵入有机质沉积物释放的热解汞($\Delta^{199}\text{Hg}$ 接近 0‰). 由此, 汞同位素体系能够有效区分俯冲带火山活动与幔源溢流型玄武岩活动的汞来源, 汞富集记录则清晰反映了从区域性俯冲带火山到全球性大火成岩省喷发的地质演化过程(Shen *et al.*, 2021).

综上, 全球范围内 P-T 之交海-陆沉积物的 Hg 富集记录, 反映了全球尺度的巨量汞释放事件并通过大气传输至全球范围. 而 Hg 浓度及同位素在华南地区 P-T 之交陆相地层的记录目前存在争议, 导致 Hg 富集的原因有多种不同的观点, 沉积 Hg 富集可能是多因素(陆源输入、沉积环境、后期改造等)共同作用的结果, 不能简单归因于火山活动.

2.3 硫和卤族等其他挥发性元素记录

早期的硫同位素研究主要用于示踪古海洋环境的氧化还原状态变化, 例如通过黄铁矿的多硫同位素组成($\delta^{34}\text{S}$ 、 $\Delta^{33}\text{S}$)来识别缺氧或硫化物富集事件, 从而重建 P-T 之交海洋水体氧化还原条件演化历史(Shen *et al.*, 2011b; Zhang *et al.*, 2017). 这些研究表明, 在 P-T 灭绝事件中, 海洋中多次发生了缺氧水体上涌和 H_2S 富集事件(Euxinia), 其硫同位素特征(如负 $\delta^{34}\text{S}$ 伴随负 $\Delta^{33}\text{S}$)反映了硫酸盐供应受限与微生物硫酸盐还原作用的增强.

随着研究的深入, 硫同位素不仅被用于示踪海洋氧化还原状态, 也逐渐成为示踪火山活动及其气候环境效应的重要工具. Li *et al.* (2022) 对澳大利亚悉尼盆地 P-T 之交钻孔样品中黄铁矿的硫同位素组成进行系统分析, 结果显示, 陆地生物灭绝层位相对应的 $\delta^{34}\text{S}$ 也出现显著负偏(由 0.04‰ 降至 -21.5‰), 并将这一 $\delta^{34}\text{S}$ 异常事件归因于 STLIP 喷发释放的 SO_2 气体, 其在大气中形成硫酸盐气溶胶并沉降到陆地. 火山喷发释放的含硫气体(主要为 SO_2)具有特定的初始硫同位素组成($\delta^{34}\text{S}$ 通常接近 0‰ ; Black *et al.*, 2014), 在大气氧化过程中可能伴随同位素分馏, 并通过干湿沉降进入地表系统, 最终被沉积物中的黄铁矿等矿物捕获, 形成可识别的同位素异常. 悉尼盆地的 $\delta^{34}\text{S}$ 值反映了局部湖泊系统的硫酸盐输入, 与海洋不同, 淡水环境硫酸盐背景浓度低($<1 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$), 火山气溶胶输入可迅速改变其同位素组成. 例如, 现代湖泊(如 Fayetteville Green Lake, $\text{SO}_4^{2-} = 12 \times 10^{-3} \sim 16 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$)中黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 可低至 -27.5‰ (Suits and Wilkin,

1998), 印证了局域水体对火山硫输入的敏感性. 因此, 火山喷发释放的硫经大气氧化后形成具有特征性硫同位素组成的硫酸盐气溶胶, 其在沉积物或黄铁矿中留下的异常硫同位素信号可作为火山排放事件及其环境效应的记录. 该研究不仅证实了 STLIP 气体释放与 P-T 之交陆地生物灭绝的时间对应关系, 也强调了硫同位素在识别大规模火山作用及其全球气候-生态反馈机制中的重要作用.

卤素(F、Cl、Br、I)因其在岩浆过程中的独特地球化学行为, 也有成为示踪火山活动的潜力(Edmonds *et al.*, 2022). 卤素元素在岩浆演化过程中表现出不同的相容性和挥发性, 在部分熔融和结晶分异过程中高度不相容, 倾向于富集在熔体中; 而 F 则因离子半径较小, 可部分替代 OH^- 进入矿物晶格, 表现为中等不相容(Pyle and Mather, 2009). 这些特性使得卤素能够记录从地幔源区到岩浆上升、脱气乃至喷发全过程的信息. 由于卤族的熔沸点很低, 所以释放的卤族可以随着大气传输, 从而在全球范围内沉积.

Black *et al.* (2012) 通过分析 STLIP 包括玄武岩岩墙、熔岩流和凝灰岩等多类火山岩样品中的熔融包裹体的硫、氯和氟的浓度, 估算其大约释放出 $(6 \sim 9) \times 10^3$ 亿吨硫、 $(3 \sim 9) \times 10^3$ 亿吨氯和 $(7 \sim 14) \times 10^3$ 亿吨氟. Broadley *et al.* (2018) 通过分析西伯利亚金伯利岩中的橄榄岩捕虏体卤素(Cl、Br、I)数据, 研究发现西伯利亚岩石圈地幔因俯冲流体交代作用高度富集卤素, 在 P-T 之交地幔柱与岩石圈相互作用时同化了高达 70% 的岩石圈卤素, 最终卤素通过 STLIP 喷发释放到大气中, 可能引发强烈臭氧层破坏, 导致最终地球史上最严重的生物大灭绝. Benca *et al.* (2018) 通过模拟 P-T 之交的高 UV-B 辐射环境发现, 现代针叶树虽能在这种条件下存活, 但繁殖能力明显下降, 且花粉孢子畸形率升高, 从而导致严重的“森林不育”现象. 这一现象与 STLIP 喷发期间大量卤代烃(如 CH_3Cl 、 CH_3Br)释放、破坏臭氧层并增强地表 UV-B 辐射的机制相呼应. Liu *et al.* (2023) 通过分析花粉壁中紫外线吸收化合物(UACs)的丰度, 重建了 P-T 之交的地表 UV-B 强度变化, 并将其与火山活动引发的臭氧层破坏联系起来, 进一步揭示了卤素释放、臭氧损耗与生态危机之间的潜在因果链. 综上所述, 卤素不仅是火山脱气过程的有效示踪指标, 也为理解火山活动对古气候和生态系统的影响提供了关键证据. 虽然 P-T 之交卤族元素的沉积记录目前还没有报道, 但是卤族大量释放被认为是导

致当时气候环境变化的重要原因之一。

3 火山活动非挥发性组分沉积记录

大规模的火山活动过程不仅会释放大量挥发分物质,还会释放大量如镍(Ni)、锌(Zn)、铜(Cu)等金属元素。Ni、Cu、Zn等金属元素为相容性元素,在幔源玄武岩和相关硫化物中会异常富集,这些喷出地表的火山岩经风化-搬运-沉积迅速覆盖同时代沉积地层的地球化学记录,从而造成相对背景沉积的元素异常富集(图5)。同时,Ni、Cu易与挥发性S、C化合物结合形成气溶胶或络合物,易于长距离输送。且P-T之交多个沉积地层已报道了Cu、Zn、Ni等金属元素的同步富集(Grasby *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2017; Rampino *et al.*, 2017; Chu *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2021),这为利用沉积岩中非挥发性组分化学指标示踪火山活动提供了重要依据。

3.1 镍浓度及其同位素记录

镍(Ni)作为一种生物必需微量金属,其在海水中的浓度与同位素组成对生物吸收、海水化学状态及外源输入极为敏感,因此可作为重建古海洋环境的重要指标。在古海洋镍(Ni)循环中,河流输入、火山气溶胶沉降和海底热液活动构成了海洋镍的主要来源。大规模火山活动,尤其是类似STLIP的大型火成岩省喷发,会向大气中释放大量火山气体及

富Ni气溶胶(Rothman *et al.*, 2014; Le Vaillant *et al.*, 2017)。富Ni气溶胶在大气环流作用下可以进行远距离传输,最终沉降到海洋和陆地环境中。因此沉积物中若出现异常升高的Ni含量以及相对较轻的 $\delta^{60}\text{Ni}$ 组成,通常指示显著的外源镍输入,尤其与来自火山喷发的富Ni气溶胶相关(Li *et al.*, 2021)。

Rampino *et al.* (2017)通过综合分析以色列、东欧、斯皮茨卑尔根和奥地利卡尔尼克阿尔卑斯山P-T之交沉积地层的微量元素数据,发现在灭绝界线附近普遍存在Ni浓度峰值。推断P-T之交镍异常的来源可能来自STLIP释放的富镍气溶胶。Li *et al.* (2021)报道了加拿大北极地区P-T之交沉积物的Ni同位素数据, $\delta^{60}\text{Ni}$ 的值范围为 $-1.09\text{‰} \sim 0.35\text{‰}$,在灭绝界线附近,出现迄今为止沉积岩中最轻的 $\delta^{60}\text{Ni}$ (-1.07‰)。该研究认为,硫化镍在岩浆侵入与脱气过程中的熔融、分异及挥发作用,能够产生显著轻的Ni同位素信号;这些Ni被携带至大气并形成富镍气溶胶,最终扩散至泛大洋并沉积于远离火山源区的海盆中。剖面中显著偏轻的 $\delta^{60}\text{Ni}$ 值及高镍含量被解释为STLIP早期喷发阶段的全球性大气输送产物,这些结果为富Ni气溶胶在全球扩散并装载到泛大洋提供了有力的证据。

3.2 锌浓度及其同位素记录

锌(Zn)是海洋中的关键微量营养元素,其同位素组成($\delta^{66}\text{Zn}$)更是逐渐成为示踪海洋Zn循环以及外源输入过程的有力地球化学指标(Liu *et al.*,

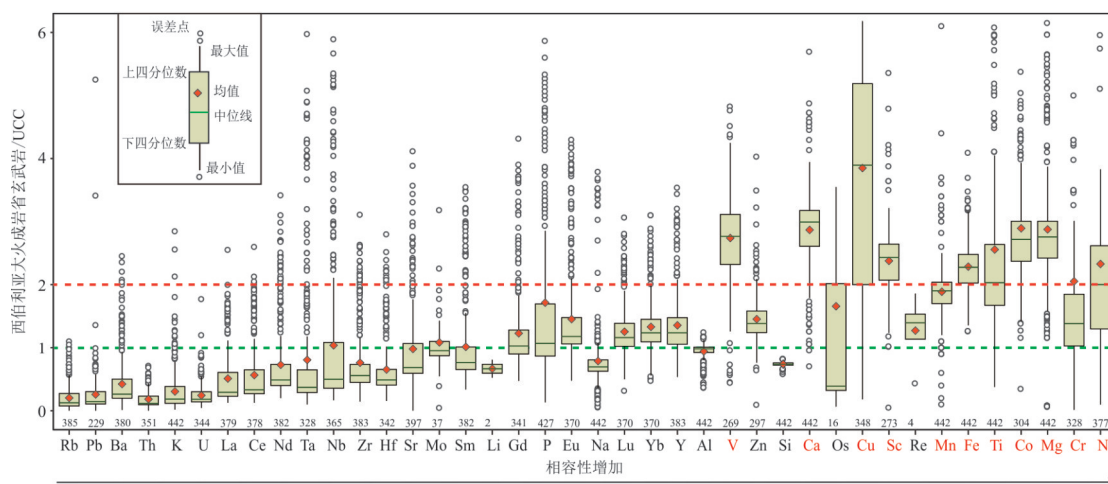


图5 西伯利亚大火成岩省玄武岩元素丰度

Fig.5 Element abundances of the Siberia Trap large igneous province basalt

图中所用西伯利亚大火成岩省玄武岩地球化学数据来自GeoRock数据库,上地壳值(Upper Continental Crust, UCC)值来自Taylor and McLennan(1985),横坐标元素按从左到右相容性增加排序,纵坐标代表西伯利亚大火成岩省与UCC的元素比值,每个箱线图下面的数字代表所用数据个数。其中蓝色虚线代表西伯利亚大火成岩省玄武岩元素接近UCC值,红色虚线代表西伯利亚大火成岩省元素相对UCC出现两倍富集,其中V、Ca、Cu、Sc、Mn、Fe、Ti、Co、Mg、Cr和Ni等元素为红色字体,代表其在西伯利亚大火成岩省玄武岩中显著富集于UCC值。

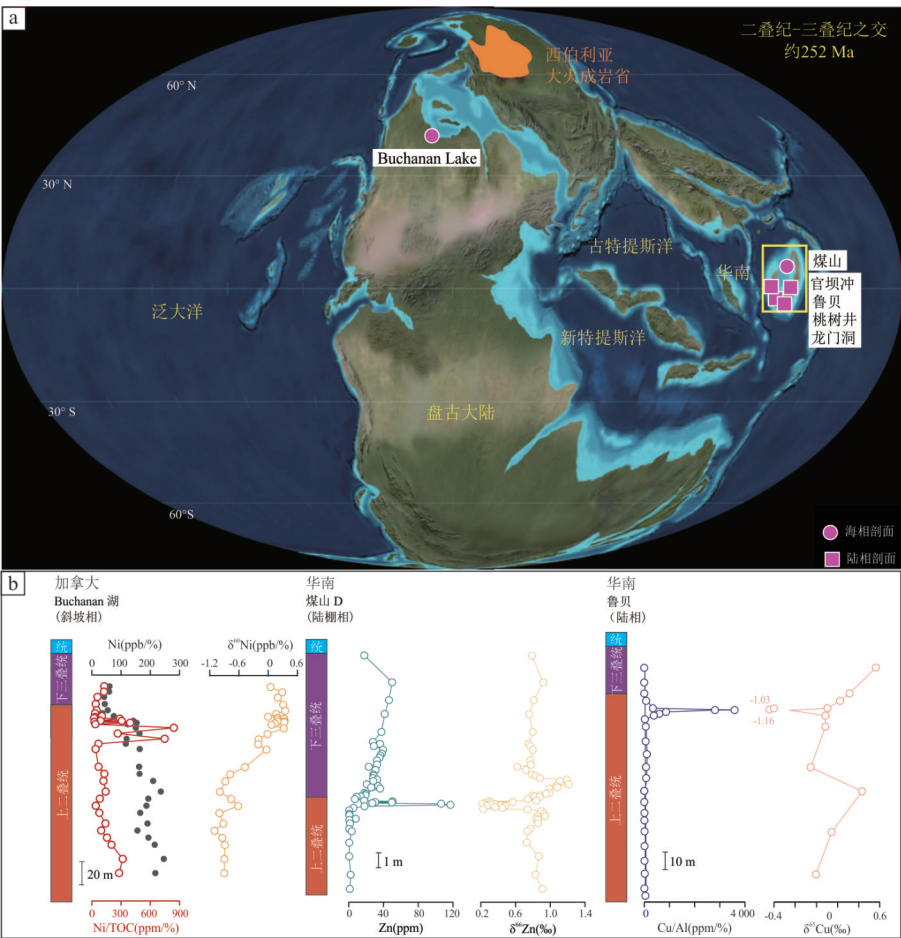


图 6 全球二叠纪-三叠纪之交镍、铜、锌及其同位素研究剖面古地理分布与典型盆地数据

Fig.6 Global paleogeographic distribution and trends of Ni, Cu, Zn and isotopes across the Permian-Triassic boundary
a. 二叠纪-三叠纪之交镍、铜、锌及其同位素研究剖面古地理分布图,研究剖面参考文献见附件,古地理图据 <http://jan.ucc.nau.edu/~rcb7/>, © 2016 Colorado Plateau Geosystems Inc. b. 选取的 3 个经典二叠纪-三叠纪之交研究剖面的金属元素及其同位素数据投图,其中蓝色阴影代表的金属元素富集及其同位素异常变动区间,其中加拿大剖面 Ni 及其同位素数据来源 Li *et al.* (2021); 华南煤山剖面 Zn 及其同位素数据来源 Liu *et al.* (2017); 华南鲁贝剖面 Cu 及其同位素数据来源 Zhang *et al.* (2021)

2017; Sweere *et al.*, 2018; Duan *et al.*, 2025). 现代海水的 Zn 同位素组成具有显著分馏特征, 深层海水 $\delta^{66}\text{Zn}$ 均值约为 0.5‰, 而表层海水因生物对轻同位素 (^{64}Zn) 的优先吸收而富集重同位素, $\delta^{66}\text{Zn}$ 可高达 0.9‰ (Conway and John, 2014). 在全球海洋中, 锌的主要来源包括河流输入、热液流体以及火山活动相关的外源输入, 海水中 $\delta^{66}\text{Zn}$ 则主要由生物吸收、沉积物埋藏以及外源输入 (河流、风尘、热液、火山灰) 等过程共同控制 (Moynier *et al.*, 2017). 各储库的 Zn 同位素特征也存在明显差异, 火成岩通常具有相对较轻的 Zn 同位素组成 ($\delta^{66}\text{Zn} \approx 0.28\text{‰}$; Chen *et al.*, 2013), 热液与河流输入以轻 Zn 同位素为主, 而铁锰氧化物则倾向富集重 Zn 同位素 (Little *et al.*, 2014). 与此同时, 生物过程通过选择性吸收并埋藏轻同位素 Zn, 使剩余海水呈现更高的 $\delta^{66}\text{Zn}$. 火山喷

发、相关热液排放以及触发的大陆风化增强, 均可将大量轻 Zn 快速输入海洋, 从而引起海水 Zn 浓度的显著升高, 并驱动海水 $\delta^{66}\text{Zn}$ 向负方向偏移. Liu *et al.* (2017) 通过研究华南煤山剖面的 Zn 以及同位素, 认为是 STLIP 的强烈风化输入导致灭绝界限附近的海水 Zn 含量升高及 Zn 同位素出现负偏. 通过对碳酸盐岩中 Zn 含量以及同位素的研究, 发现在生物灭绝事件发生前的 $(3\sim4) \times 10^4$ a 内, Zn 含量相较于背景发生了近百倍的升高, 同时 $\delta^{66}\text{Zn}$ 也出现了 0.5‰ 的显著负偏. 根据物质平衡计算, 笔者推测, 火山灰、热液或 STLIP 的强烈风化输入导致大量轻 Zn 同位素进入海洋, 造成海水 Zn 同位素组成降低和 Zn 浓度升高, 这也进一步证明了大规模的火山活动是 P-T 之交生物灭绝事件的主要原因 (图 6). 中元古代华北克拉通夏马岭组的沉积地层

中,火山活动活跃期间, $\delta^{66}\text{Zn}$ 也出现了强烈负偏,最低可达0.23‰,并伴随Zn元素的强烈富集,指示火山驱动的大陆风化将大量轻Zn输入海洋;随后 $\delta^{66}\text{Zn}$ 正偏(最高0.62‰)则反映营养输入促进初级生产力与有机碳埋藏增加(Wang *et al.*, 2025).

3.3 铜浓度及其同位素记录

目前关于P-T之交沉积物中铜(Cu)异常研究较少,目前仅在华南以及北半球高纬度地区的沉积地层报道了Cu元素富集的记录.Grasyby *et al.*(2015)研究了挪威斯匹次卑尔根地区Festningen剖面的元素地球化学记录,灭绝界线附近的沉积物中记录了碳同位素的负偏以及Hg、Cu金属元素的富集,推测STLIP的喷发导致了过量Hg、Cu沉积通量的输入.

华南地区ZK4703的记录显示,P-T之交生物灭绝区间内出现了石松孢子四分体的显著峰值,并伴随着同层位Hg、Cu元素浓度的增加,表明陆地生态系统崩溃后金属输入增强可能诱导了孢子畸形(Chu *et al.*, 2021).进一步的研究表明,华南多个陆相剖面在相同层段均记录到极端的Cu富集和显著的 $\delta^{65}\text{Cu}$ 负偏,这些信号与Hg异常及火山碎屑物的出现密切对应,揭示了区域性酸性火山活动在P-T之交气候环境巨变中扮演了重要角色(Zhang *et al.*, 2021).这些酸性火山喷发释放了富Cu、S的气溶胶和硫化物颗粒,导致沉积物中的金属富集,并可能引发短暂的“火山冬天”与随后快速增温的气候波动,从而共同加剧了全球范围的生物灭绝过程.

3.4 钨(Os)、锶(Sr)同位素和铂族元素等其他非挥发性元素记录

海水中钨同位素组成($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$)主要受到大陆风化、幔源物质以及地外来源输入的影响,其 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值反映了大陆风化产生的放射性成因输入($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}\approx 1.4$)、地幔(火山活动)和地外物质输入($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}\approx 0.126$)对全球海洋的贡献(Meisel *et al.*, 1996; Peucker-Ehrenbrink and Ravizza, 2000; Rooney *et al.*, 2014).这些不同外源输入具有独特的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 信号,且在海洋中的停留时间相对较短(约数万年),使其能够敏感记录全球尺度的快速地球化学扰动,因此被众多学者应用于示踪火山活动以及大陆风化事件.

基于华南地区P-T之交煤山剖面的Os同位素分析,有学者在P-T之交灭绝界线附近识别出一次非放射性成因的Os同位素负漂移($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 由0.6降至0.3),揭示当时发生了强烈的火山活动,导致大

量幔源Os输入,为STLIP喷发及其产生的气候环境效应提供了新的同位素证据(Liu *et al.*, 2020).随后Liu *et al.*(2021)又开展了不同沉积相剖面的Os同位素研究,进一步发现深水沉积记录的Os同位素异常略滞后于P-T之交灭绝时限,这表明深水海洋对幔源输入的响应存在延迟,证实了深水Os同位素记录能提供不同于浅水环境的火山输入信息,为重建火山活动与环境响应的时序提供独特视角.

海水中锶(Sr)同位素的居留时间约为 10^5 a,也能较好反映海洋物质输入的变化.大陆地壳(尤其是长石)富含不相容元素Rb, ^{87}Sr 由 ^{87}Rb 衰变产生,因此随着地壳的不断演化, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值会不断升高(>0.710),幔源物质(如玄武岩)Rb/Sr较低,其比值相应偏低(0.703~0.705)(Gernon *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2022).火山活动输入幔源Sr会使 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 下降,增强的古老地壳风化则会推动比值升高(Weizer *et al.*, 1999).晚二叠世的Sr同位素明显降低,被解释为受到幔源火山物质风化输入的影响(Allègre *et al.*, 2010; Sun *et al.*, 2018; Cao *et al.*, 2022).

此外,铂族元素(PGEs: Ir、Ru、Rh、Pt、Pd)及铼(Re)的地球化学行为差异明显,其在火山岩中的分布模式与非火山源(如陨石撞击)显著不同,钯族铂族元素(Palladium-group Platinum-group Elements, 简称PPGEs)包含Pt和Pd元素,在熔体中表现为不相容性,具有较低熔点和较高挥发性,更多溶解在岩浆中并易释放至地表;铱族铂族元素(ridium-group Platinum-group Elements, 简称IPGEs; 包含Ir、Ru、Os等元素,在熔体中表现为亲硫性,具有高熔点、低挥发性,主要富集于地幔岩石和硫化物矿物中(Park *et al.*, 2012).大陆溢流型玄武岩通常表现出PPGEs相对IPGEs的富集,且Ir/Pt比值一般低于0.03(Lee *et al.*, 2003).撞击事件则通常伴随高Ir浓度和平坦的球粒陨石标准化PGE模式(Alvarez *et al.*, 1980).同时,Re作为高挥发性元素,在火山喷发过程中易形成气态(如 ReO_3)释放,并通过大气扩散广泛沉积于海洋及陆相沉积物中,形成显著的地球化学异常也使它们成为示踪火山活动,尤其是大陆溢流玄武岩喷发的有效工具(Miller *et al.*, 2011).Misztela *et al.*(2025)通过分析华南地区(煤山、中寨、新民)和日本地区(Ubara)4个P-T之交剖面沉积物中的PGEs和Re含量及特征比值,揭示了这些元素的异常富集与STLIP溢流玄武岩喷发的成因联系.结果显示,所有剖面在生物灭绝层位均

表 1 不同火山示踪指标的综合比较与适用性
Table 1 Comparative evaluation and applicability of different volcanic proxies

指标类型	优势	局限性	适用沉积环境
火山灰(黏土岩)、熔岩	直接记录、可定年	保存不连续,主要分布在火山喷发口附近	海陆相
碳同位素	高分辨率、全球对比性强	成因多解	海陆相
Hg 浓度及其同位素	高分辨率、全球对比性强	来源多样	海陆相
S、卤族元素	大气传输,全球对比性强	海水缓冲作用强,信号不敏感	陆相
Ni、Cu、Zn 等浓度及同位素	响应明显	火山喷发口附近记录明显,受地表过程影响显著	海陆相
$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	全球对比性强	时间尺度长、端元假设依赖	海相

表现出 Pt、Pd、Ru 等 PGEs 及 Re 相对 UCC 的显著富集,且 $\text{Ir}/\text{Pt}<0.03$ 、 $\text{Re}/\text{Ir}>0$ 等指标排除了地外成因,指示 STLIP 火山物质输入。

3.5 不同示踪指标的综合比较与局限性

目前,用于示踪二叠纪–三叠纪之交火山活动的地球化学指标种类较多。这些指标在记录载体、响应过程和环境敏感性方面存在明显差异,不同指标所反映的火山信息并不完全一致(表 1、图 7)。

火山灰黏土岩与火山熔岩是识别古火山活动最直接的地质记录,能够提供明确的火山喷发事件证据并约束火山活动的时间。然而,火山灰层与熔岩的保存具有不均一性,大部分沉积区缺乏连续或完整的火山沉积序列。此外,火山灰主要记录爆发式喷发事件,难以记录持续性或溢流式的岩浆活动(如大火成岩省)。

碳同位素是研究 P-T 之交火山活动与气候环境演变最广泛的指标之一,全球尺度的碳同位素负偏移通常被解释为火山活动引发的大规模碳输入,从而扰动全球碳循环,并与生物灭绝事件存在良好的时间耦合。然而,碳同位素负偏并非火山活动的唯一响应结果。有机碳埋藏效率变化、甲烷释放以及海洋生产力变化也可能导致相似的同位素信号。因此,单独依赖碳同位素难以对火山活动进行约束,其解释需结合同步出现的其他火山示踪证据。

汞浓度及其同位素是近年来示踪火山活动的常用指标,沉积岩中汞的富集被认为是火山成因汞的输入导致。汞同位素组成,尤其是汞的奇数非质量分馏 $\Delta^{199}\text{Hg}$,可用于限定汞的来源,对识别火山成因汞具有重要意义。然而,在陆相及近岸沉积环境中,汞同位素容易受到陆源输入和表生过程的影响,其原始火山信号可能被削弱或重塑(导致火山汞的 $\Delta^{199}\text{Hg}$ 偏负)。因此,在利用汞指标示踪火山活动时,需结合同位素特征与沉积环境信息进行综合判断。

硫及卤族元素在沉积地层中示踪火山活动的

应用相对有限,目前主要集中于陆相记录。火山活动释放的含硫气体经大气化学反应形成硫酸盐气溶胶,其硫同位素组成(负 $\delta^{34}\text{S}$ 值)通过沉降进入陆相环境并被沉积物中的黄铁矿捕获,从而记录火山活动与环境变化的关联。然而,海洋中硫酸盐具有极大的储库规模(现代约 1.3×10^{18} mol; Crockford *et al.*, 2019),使其同位素组成对短时间尺度的火山输入具有显著缓冲能力。即使 STLIP 在高强度喷发阶段每年释放约 $2\,000\times 10^6$ t SO_2 (Black *et al.*, 2018),并假设其全部转化为硫酸盐进入海洋,仍需约 10^5 a 才能使全球海水 $\delta^{34}\text{S}$ 降低 1‰,该时间尺度明显长于 P-T 生物灭绝事件的持续时间(约 60 000 a; Burgess *et al.*, 2014)。因此,硫同位素在海相沉积中的火山示踪能力相对有限。

火山喷发的幔源岩浆富含镍、铜、锌等金属元素,这使得金属元素富集特征常被用于示踪火山活动。相应的金属同位素(如 Ni、Cu、Zn 同位素)在区分不同物质来源方面具有潜力。然而,目前对 STLIP 地幔端元同位素组成的直接约束仍然有限,多依赖于类比研究或假定端元。同时,这类金属主要通过火山岩风化后经大陆径流输入沉积体系,其信号易受海水循环和生物过程影响,且空间适用范围相对受限,难以做到像碳、汞等挥发性气体一样进行全球时空尺度的示踪。钨同位素($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$)与锶同位素($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)是识别幔源物质输入的重要指标。大规模火山活动可通过向海洋输入低比值的幔源钨和锶,导致海水同位素组成发生明显偏移。这类指标具有较好的全球可对比性,但是其一般代表构造尺度的信息,同时,其记录高度依赖于对海水混合时间、背景端元组成及输入通量的合理约束,端元假设的不确定性仍是其主要限制因素。

综合来看,不同火山示踪指标记录的是火山活动影响的不同环节(图 7)。挥发性组分相关指标(如碳同位素、汞浓度及其同位素)更适合用于识别大

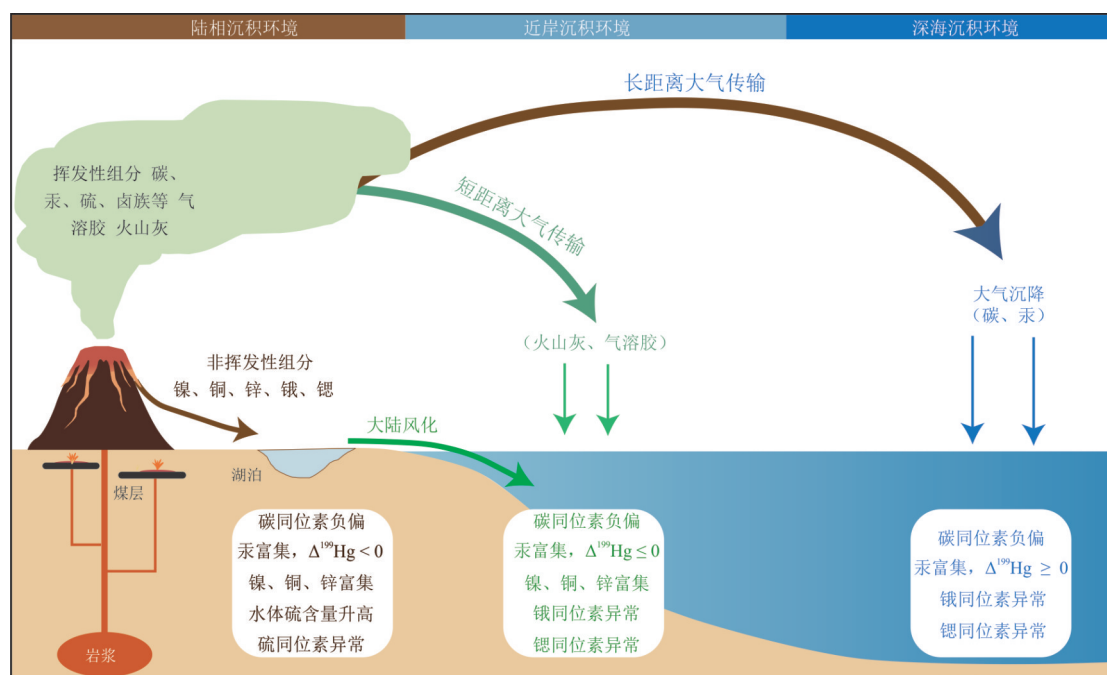


图7 火山活动释放组分沉积记录模式

Fig. 7 Conceptual diagram of sedimentary recording patterns for volcanically released components

气传输控制下的火山活动信号,因而在海相沉积中具有较好的区域乃至全球对比潜力.相对而言,非挥发性金属元素及其同位素更适合约束陆相或靠近火山喷发口沉积体系中的火山-风化过程.多指标联合应用,特别是在明确沉积环境和时间框架的前提下,将有助于降低单一指标的多解性,提高对古火山活动及其环境效应的整体约束能力.

4 总结与展望

通过对二叠纪-三叠纪之交火山活动沉积记录的替代指标进行了系统的梳理并发现:多种指标在沉积地层中均有显著的异常记录,指示了该时期剧烈的元素循环扰动,为揭示火山活动如何影响地表宜居性演变的因果关系发挥了重要作用.同时,该时期多指标的联合示踪,为探究沉积替代指标示踪深时火山活动提供了典型的研究案例.

虽然多种地球化学指标被用来示踪沉积物中的古火山记录,但是目前还存在很多问题,需要突破:(1)目前仍缺乏对西伯利亚大火成岩省与特提斯构造域火山活动贡献的定量区分.单一指标难以同时约束火山源区属性、释放强度及其时序变化.(2)沉积物中的汞、金属元素及其同位素组成容易受到陆源输入和成岩作用影响,原生火山信号在不同沉积相中的保存程度存在显著差异,增加了火山

信号判别与跨剖面对比的不确定性.(3)不同沉积环境对火山活动的地球化学指标响应并不一致,如何在统一的地球化学与沉积学框架下解释陆相、浅海与深海沉积记录之间的差异,仍是亟待解决的问题.

未来的研究应在多尺度、多圈层耦合的框架下推动方法与技术突破.一方面,应加强跨地区对比研究,探索不同地理位置沉积示踪信号的差异性与时空传播模式,整合挥发性和非挥发性示踪体系,以降低单一指标的多解性,并提高对不同火山源区贡献的定量识别能力.另一方面,高分辨率分析技术与精确定年方法的发展,将有助于提升时间分辨率,从而高精度重建火山活动的喷发特征.此外,多指标耦合与地球系统模拟,并结合大数据与机器学习手段,整合全球界线剖面指标记录进行综合分析,有望实现二叠纪-三叠纪之交不同类型火山活动强度及其环境效应的定量评估.加强深部地球过程与表层环境响应方面的研究,为认识地球宜居性演化和预测未来环境提供地质历史参照.

附件见 <https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.073>.

References

- Algeo, T. J., Shen, J., 2024. Theory and Classification of Mass Extinction Causation. *National Science Review*, 11 (1): 1–21. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwad237>
- Allègre, C. J., Louvat, P., Gaillardet, J., et al., 2010. The

- Fundamental Role of Island Arc Weathering in the Oceanic Sr Isotope Budget. *Earth and Planetary Science Letters*, 292(1–2): 51–56. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.01.019>
- Alvarez, L. W., Alvarez, W., Asaro, F., et al., 1980. Extraterrestrial Cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction. *Science*, 208(4448): 1095–1108. <https://doi.org/10.1126/science.208.4448.1095>
- Baresel, B., Bucher, H., Brosse, M., et al., 2017. Precise Age for the Permian-Triassic Boundary in South China from High-Precision U-Pb Geochronology and Bayesian Age-Depth Modeling. *Solid Earth*, 8(2): 361–378. <https://doi.org/10.5194/se-8-361-2017>
- Benca, J. P., Duijnste, I. A. P., Looy, C. V., 2018. UV-B-Induced Forest Sterility: Implications of Ozone Shield Failure in Earth's Largest Extinction. *Science Advances*, 4(2): e1700618. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700618>
- Black, B. A., Elkins-Tanton, L. T., Rowe, M. C., et al., 2012. Magnitude and Consequences of Volatile Release from the Siberian Traps. *Earth and Planetary Science Letters*, 317–318: 363–373. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.12.001>
- Black, B. A., Hauri, E. H., Elkins-Tanton, L. T., et al., 2014. Sulfur Isotopic Evidence for Sources of Volatiles in Siberian Traps Magmas. *Earth and Planetary Science Letters*, 394: 58–69. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.02.057>
- Black, B. A., Neely, R. R., Lamarque, J. F., et al., 2018. Systemic Swings in End-Permian Climate from Siberian Traps Carbon and Sulfur Outgassing. *Nature Geoscience*, 11(12): 949–954. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0261-y>
- Blum, J. D., Sherman, L. S., Johnson, M. W., 2014. Mercury Isotopes in Earth and Environmental Sciences. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 42: 249–269. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-050212-124107>
- Broadley, M. W., Barry, P. H., Ballentine, C. J., et al., 2018. End-Permian Extinction Amplified by Plume-Induced Release of Recycled Lithospheric Volatiles. *Nature Geoscience*, 11(9): 682–687. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0215-4>
- Burgess, S. D., Bowring, S. A., 2015. High-Precision Geochronology Confirms Voluminous Magmatism before, during, and after Earth's Most Severe Extinction. *Science Advances*, 1(7): e1500470. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500470>
- Burgess, S. D., Bowring, S., Shen, S. Z., 2014. High-Precision Timeline for Earth's Most Severe Extinction. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(9): 3316–3321. <https://doi.org/10.1073/pnas.1317692111>
- Burgess, S. D., Muirhead, J. D., Bowring, S. A., 2017. Initial Pulse of Siberian Traps Sills as the Trigger of the End-Permian Mass Extinction. *Nature Communications*, 8: 164. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00083-9>
- Callegaro, S., Svensen, H. H., Neumann, E. R., et al., 2021. Geochemistry of Deep Tunguska Basin Sills, Siberian Traps: Correlations and Potential Implications for the End-Permian Environmental Crisis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 176(7): 49. <https://doi.org/10.1007/s00410-021-01807-3>
- Canil, D., Crockford, P. W., Rossin, R., et al., 2015. Mercury in Some Arc Crustal Rocks and Mantle Peridotites and Relevance to the Moderately Volatile Element Budget of the Earth. *Chemical Geology*, 396: 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.12.029>
- Cao, C., Bataille, C. P., Song, H. J., et al., 2022. Persistent Late Permian to Early Triassic Warmth Linked to Enhanced Reverse Weathering. *Nature Geoscience*, 15(10): 832–838. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-01009-x>
- Chapman, T., Milan, L. A., Metcalfe, I., et al., 2022. Pulses in Silicic Arc Magmatism Initiate End-Permian Climate Instability and Extinction. *Nature Geoscience*, 15(5): 411–416. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-00934-1>
- Chen, H., Savage, P. S., Teng, F. Z., et al., 2013. Zinc Isotope Fractionation during Magmatic Differentiation and the Isotopic Composition of the Bulk Earth. *Earth and Planetary Science Letters*, 369–370: 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.02.037>
- Chen, J. B., Sun, G. Y., Lu, B. J., et al., 2023. Inconsistent Mercury Records from Terrestrial Upland to Coastal Lowland across the Permian-Triassic Transition. *Earth and Planetary Science Letters*, 614: 118195. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2023.118195>
- Chen, J., Xu, Y. G., 2017. Permian Large Igneous Provinces and Their Impact on Paleoenvironment and Biodiversity: Progresses and Perspectives. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 36(3): 374–393 (in Chinese with English abstract).
- Chen, X., Zhou, Y., Shields, G. A., 2022. Progress towards an Improved Precambrian Seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Curve. *Earth-Science Reviews*, 224: 103869. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.103869>

- org/10.1016/j.earscirev.2021.103869
- Chen, Z. Q., Benton, M. J., 2012. The Timing and Pattern of Biotic Recovery Following the End-Permian Mass Extinction. *Nature Geoscience*, 5(6): 375–383. <https://doi.org/10.1038/ngeo1475>
- Chi, Q. H., 2004. Abundance of Mercury in Crust, Rocks and Loose Sediments. *Geochimica*, 33(6): 641–648 (in Chinese with English abstract).
- Chu, D. L., Corso, J. D., Shu, W. C., et al., 2021. Metal-Induced Stress in Survivor Plants Following the End-Permian Collapse of Land Ecosystems. *Geology*, 49(6): 657–661. <https://doi.org/10.1130/g48333.1>
- Chu, D. L., Grasby, S. E., Song, H. J., et al., 2020. Ecological Disturbance in Tropical Peatlands Prior to Marine Permian-Triassic Mass Extinction. *Geology*, 48(3): 288–292. <https://doi.org/10.1130/g46631.1>
- Chu, D. L., Song, H. J., Dal Corso, J., et al., 2025. Diachronous End-Permian Terrestrial Crises in North and South China. *Geology*, 53(1): 55–60. <https://doi.org/10.1130/g52655.1>
- Clapham, M. E., Renne, P. R., 2019. Flood Basalts and Mass Extinctions. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 47: 275–303. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-053018-060136>
- Clarkson, M. O., Kasemann, S. A., Wood, R. A., et al., 2015. Ocean Acidification and the Permo-Triassic Mass Extinction. *Science*, 348(6231): 229–232. <https://doi.org/10.1126/science.aaa0193>
- Conway, T. M., John, S. G., 2014. The Biogeochemical Cycling of Zinc and Zinc Isotopes in the North Atlantic Ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, 28(10): 1111–1128. <https://doi.org/10.1002/2014gb004862>
- Crockford, P. W., Kunzmann, M., Bekker, A., et al., 2019. Claypool Continued: Extending the Isotopic Record of Sedimentary Sulfate. *Chemical Geology*, 513: 200–225. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.02.030>
- Cui, Y., Li, M. S., van Soelen, E. E., et al., 2021. Massive and Rapid Predominantly Volcanic CO₂ Emission during the End-Permian Mass Extinction. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(37): e2014701118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2014701118>
- Deng, C. Z., Gou, J., Sun, D. Y., et al., 2022. Mercury Isotopic Composition of Igneous Rocks from an Accretionary Orogen: Implications for Lithospheric Recycling. *Geology*, 50(9): 1001–1006. <https://doi.org/10.1130/g50131.1>
- Duan, Y. R., Wang, Z. R., Gou, W. X., et al., 2025. Stable Zinc Isotopes as Tracers in Environmental Geochemistry. *Earth-Science Reviews*, 269: 105185. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2025.105185>
- Edmonds, M., Mason, E., Hogg, O., 2022. Volcanic Outgassing of Volatile Trace Metals. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 50: 79–98. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-070921-062047>
- Fan, J. X., Shen, S. Z., Erwin, D. H., et al., 2020. A High-Resolution Summary of Cambrian to Early Triassic Marine Invertebrate Biodiversity. *Science*, 367(6475): 272–277. <https://doi.org/10.1126/science.aax4953>
- Fedorenko, V. A., Lightfoot, P. C., Naldrett, A. J., et al., 1996. Petrogenesis of the Flood-Basalt Sequence at Noril'sk, North Central Siberia. *International Geology Review*, 38(2): 99–135. <https://doi.org/10.1080/00206819709465327>
- Fedorenko, V., Czamanske, G., Zen'ko, T., et al., 2000. Field and Geochemical Studies of the Melilite-Bearing Ayrdzhangsky Suite, and an Overall Perspective on the Siberian Alkaline-Ultramafic Flood-Volcanic Rocks. *International Geology Review*, 42(9): 769–804. <https://doi.org/10.1080/00206810009465111>
- Feng, X. B., Yin, R. S., Yu, B., et al., 2015. A Review of Hg Isotope Geochemistry. *Earth Science Frontiers*, 22(5): 124–135 (in Chinese with English abstract).
- Gales, E., Black, B., Elkins-Tanton, L. T., 2020. Carbonates as a Record of the Carbon Isotope Composition of Large Igneous Province Outgassing. *Earth and Planetary Science Letters*, 535: 116076. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116076>
- Gao, J. F., Zhou, M. F., Lightfoot, P. C., et al., 2013. Sulfide Saturation and Magma Emplacement in the Formation of the Permian Huangshandong Ni-Cu Sulfide Deposit, Xinjiang, Northwestern China. *Economic Geology*, 108(8): 1833–1848. <https://doi.org/10.2113/econgeo.108.8.1833>
- Gernon, T. M., Hincks, T. K., Merdith, A. S., et al., 2021. Global Chemical Weathering Dominated by Continental Arcs since the Mid-Palaeozoic. *Nature Geoscience*, 14(9): 690–696. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00806-0>
- Grasby, S. E., Beauchamp, B., Bond, D. P. G., et al., 2015. Progressive Environmental Deterioration in Northwestern Pangea Leading to the Latest Permian Extinction. *Geological Society of America Bulletin*, 127(9–10): 1331–1347. <https://doi.org/10.1130/b31197.1>
- Grasby, S. E., Beauchamp, B., Bond, D. P. G., et al.,

2016. Mercury Anomalies Associated with Three Extinction Events (Capitanian Crisis, Latest Permian Extinction and the Smithian/Spathian Extinction) in NW Pangea. *Geological Magazine*, 153(2): 285–297. <https://doi.org/10.1017/s0016756815000436>
- Grasby, S. E., Shen, W. J., Yin, R. S., et al., 2017. Isotopic Signatures of Mercury Contamination in Latest Permian Oceans. *Geology*, 45(1): 55–58. <https://doi.org/10.1130/g38487.1>
- Grasby, S. E., Them, T. R., Chen, Z. H., et al., 2019. Mercury as a Proxy for Volcanic Emissions in the Geologic Record. *Earth - Science Reviews*, 196: 102880. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102880>
- He, B., Zhong, Y. T., Xu, Y. G., et al., 2014. Triggers of Permian-Triassic Boundary Mass Extinction in South China: The Siberian Traps or Paleo-Tethys Ignimbrite Flare-up? *Lithos*, 204: 258–267. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.05.011>
- He, W. H., Wu, Y. Y., Zhang, K. X., et al., 2025. Gradual Collapse of Global Marine Ecosystem in the Late Permian and Its Link to the Anoxia. *Earth Science*, 50(3): 983–999 (in Chinese with English abstract).
- Hollander, D. J., McKenzie, J. A., 1991. CO₂ Control on Carbon-Isotope Fractionation during Aqueous Photosynthesis: A Paleo-pCO₂ Barometer. *Geology*, 19(9): 929–932. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1991\)019<0929:ccocif>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1991)019<0929:ccocif>2.3.co;2)
- Jin, Y. G., Wang, Y., Wang, W., et al., 2000. Pattern of Marine Mass Extinction near the Permian-Triassic Boundary in South China. *Science*, 289(5478): 432–436. <https://doi.org/10.1126/science.289.5478.432>
- Joachimski, M. M., Lai, X., Shen, S., et al., 2012. Climate Warming in the Latest Permian and the Permian-Triassic Mass Extinction. *Geology*, 40(3): 195–198. <https://doi.org/10.1130/g32707.1>
- Korte, C., Kozur, H. W., 2010. Carbon-Isotope Stratigraphy across the Permian-Triassic Boundary: A Review. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(4): 215–235. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.01.005>
- Kump, L. R., 1991. Interpreting Carbon-Isotope Excursions: Strange Love Oceans. *Geology*, 19(4): 299–302. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1991\)019<0299:icieso>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1991)019<0299:icieso>2.3.co;2)
- Kump, L. R., Pavlov, A., Arthur, M. A., 2005. Massive Release of Hydrogen Sulfide to the Surface Ocean and Atmosphere during Intervals of Oceanic Anoxia. *Geology*, 33(5): 397–400. <https://doi.org/10.1130/g21295.1>
- Le Vaillant, M., Barnes, S. J., Mungall, J. E., et al., 2017. Role of Degassing of the Noril'sk Nickel Deposits in the Permian-Triassic Mass Extinction Event. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(10): 2485–2490. <https://doi.org/10.1073/pnas.1611086114>
- Lee, C. A., Wasserburg, G. J., Kyte, F. T., 2003. Platinum-Group Elements (PGE) and Rhenium in Marine Sediments across the Cretaceous-Tertiary Boundary: Constraints on Re-PGE Transport in the Marine Environment. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(4): 655–670. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(02\)01135-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(02)01135-3)
- Li, M. H., Frank, T. D., Xu, Y. L., et al., 2022. Sulfur Isotopes Link Atmospheric Sulfate Aerosols from the Siberian Traps Outgassing to the End-Permian Extinction on Land. *Earth and Planetary Science Letters*, 592: 117634. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117634>
- Li, M. H., Grasby, S. E., Wang, S. J., et al., 2021. Nickel Isotopes Link Siberian Traps Aerosol Particles to the End-Permian Mass Extinction. *Nature Communications*, 12: 2024. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22066-7>
- Little, S. H., Vance, D., Walker-Brown, C., et al., 2014. The Oceanic Mass Balance of Copper and Zinc Isotopes, Investigated by Analysis of Their Inputs, and Outputs to Ferromanganese Oxide Sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 125: 673–693. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.07.046>
- Liu, F., Peng, H. P., Marshall, J. E. A., et al., 2023. Dying in the Sun: Direct Evidence for Elevated UV-B Radiation at the End-Permian Mass Extinction. *Science Advances*, 9: eabo6102. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abo6102>
- Liu, S. A., Wu, H. C., Shen, S. Z., et al., 2017. Zinc Isotope Evidence for Intensive Magmatism Immediately before the End-Permian Mass Extinction. *Geology*, 45(4): 343–346. <https://doi.org/10.1130/g38644.1>
- Liu, Z. Y., Selby, D., 2021. Deep-Water Osmium Isotope Record of the Permian-Triassic Interval from Niushan, China Reveals Potential Delayed Volcanic Signal Post the Mass Extinction. *Global and Planetary Change*, 200: 103473. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103473>
- Liu, Z. Y., Selby, D., Zhang, H., et al., 2020. Evidence for Volcanism and Weathering during the Permian-Triassic Mass Extinction from Meishan (South China) Osmium Isotope Record. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 553: 109790. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2020.109790>

- Meisel, T., Walker, R. J., Morgan, J. W., 1996. The Osmium Isotopic Composition of the Earth's Primitive Upper Mantle. *Nature*, 383(6600): 517—520. <https://doi.org/10.1038/383517a0>
- Miller, C. A., Peucker-Ehrenbrink, B., Walker, B. D., et al., 2011. Re-Assessing the Surface Cycling of Molybdenum and Rhenium. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(22): 7146—7179.
- Misztela, M. A., Rampino, M. R., Campbell, I. H., 2025. Platinum - Group Elements (PGEs) and Rhenium in Permian - Triassic Boundary Sediments from Southern China and Japan Linked to Concurrent Eruptions of the Siberian Traps. *Chemical Geology*, 681: 122715. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2025.122715>
- Moynier, F., Vance, D., Fujii, T., et al., 2017. The Isotope Geochemistry of Zinc and Copper. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 82(1): 543—600. <https://doi.org/10.2138/rmg.2017.82.13>
- Park, J. W., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2012. Platinum Group Element Abundances in the Upper Continental Crust Revisited—New Constraints from Analyses of Chinese Loess. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 93: 63—76. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.06.026>
- Payne, J. L., Lehrmann, D. J., Wei, J. Y., et al., 2004. Large Perturbations of the Carbon Cycle during Recovery from the End-Permian Extinction. *Science*, 305(5683): 506—509. <https://doi.org/10.1126/science.1097023>
- Payne J.L., Turchyn A.V., Paytan A., et al., 2010. Calcium Isotope Constraints on the End-Permian Mass Extinction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107: 8543—8548. <https://doi.org/10.1073/pnas.0914065107>
- Peucker-Ehrenbrink, B., Ravizza, G., 2000. The Marine Osmium Isotope Record. *Terra Nova*, 12(5): 205—219. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2000.00295.x>
- Pyle, D. M., Mather, T. A., 2003. The Importance of Volcanic Emissions for the Global Atmospheric Mercury Cycle. *Atmospheric Environment*, 37(36): 5115—5124. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.07.011>
- Pyle, D. M., Mather, T. A., 2009. Halogens in Igneous Processes and Their Fluxes to the Atmosphere and Oceans from Volcanic Activity: A Review. *Chemical Geology*, 263(1—4): 110—121. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.11.013>
- Rampino, M. R., Rodriguez, S., Baransky, E., et al., 2017. Global Nickel Anomaly Links Siberian Traps Eruptions and the Latest Permian Mass Extinction. *Scientific Reports*, 7: 12416. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12759-9>
- Raup, D. M., Jr Sepkoski, J. J., 1982. Mass Extinctions in the Marine Fossil Record. *Science*, 215(4539): 1501—1503. <https://doi.org/10.1126/science.215.4539.1501>
- Reichow, M. K., Pringle, M. S., Al' Mukhamedov, A. I., et al., 2009. The Timing and Extent of the Eruption of the Siberian Traps Large Igneous Province: Implications for the End-Permian Environmental Crisis. *Earth and Planetary Science Letters*, 277(1—2): 9—20. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.09.030>
- Retallack, G. J., Jahren, A. H., 2008. Methane Release from Igneous Intrusion of Coal during Late Permian Extinction Events. *The Journal of Geology*, 116(1): 1—20. <https://doi.org/10.1086/524120>
- Rong, J. Y., Huang, B., 2014. Study of Mass Extinction over the Past Thirty Years: A Synopsis. *Scientia Sinica Terrae*, 44(3): 377—404 (in Chinese).
- Rooney, A. D., MacDonald, F. A., Strauss, J. V., et al., 2014. Re-Os Geochronology and Coupled Os-Sr Isotope Constraints on the Sturtian Snowball Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(1): 51—56. <https://doi.org/10.1073/pnas.1317266110>
- Rothman, D. H., Fournier, G. P., French, K. L., et al., 2014. Methanogenic Burst in the End-Permian Carbon Cycle. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(15): 5462—5467. <https://doi.org/10.1073/pnas.1318106111>
- Sanei, H., Grasby, S. E., Beauchamp, B., 2012. Latest Permian Mercury Anomalies. *Geology*, 40(1): 63—66. <https://doi.org/10.1130/g32596.1>
- Selin, N. E., 2009. Global Biogeochemical Cycling of Mercury: A Review. *Annual Review of Environment and Resources*, 34: 43—63. <https://doi.org/10.1146/annurev.environ.051308.084314>
- Shen, J., Algeo, T. J., Feng, Q. L., et al., 2013. Volcanically Induced Environmental Change at the Permian - Triassic Boundary (Xiakou, Hubei Province, South China): Related to West Siberian Coal-Field Methane Releases? *Journal of Asian Earth Sciences*, 75: 95—109. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.07.013>
- Shen, J., Algeo, T. J., Hu, Q., et al., 2012. Negative C-Isotope Excursions at the Permian-Triassic Boundary Linked to Volcanism. *Geology*, 40(11): 963—966. <https://doi.org/10.1130/g33329.1>
- Shen, J., Algeo, T. J., Planavsky, N. J., et al., 2019a. Mercury Enrichments Provide Evidence of Early Trias-

- sic Volcanism Following the End-Permian Mass Extinction. *Earth-Science Reviews*, 195: 191–212. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.05.010>
- Shen, J., Chen, J. B., Algeo, T. J., et al., 2019b. Evidence for a Prolonged Permian-Triassic Extinction Interval from Global Marine Mercury Records. *Nature Communications*, 10: 1563. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09620-0>
- Shen, J., Yu, J. X., Chen, J. B., et al., 2019c. Mercury Evidence of Intense Volcanic Effects on Land during the Permian-Triassic Transition. *Geology*, 47(12): 1117–1121. <https://doi.org/10.1130/g46679.1>
- Shen, J., Chen, J. B., Algeo, T. J., et al., 2021. Mercury Fluxes Record Regional Volcanism in the South China Craton Prior to the End-Permian Mass Extinction. *Geology*, 49(4): 452–456. <https://doi.org/10.1130/g48501.1>
- Shen, J., Chen, J. B., Yu, J. X., et al., 2023. Mercury Evidence from Southern Pangea Terrestrial Sections for End-Permian Global Volcanic Effects. *Nature Communications*, 14: 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-35272-8>
- Shen, J., Feng, Q. L., Algeo, T. J., et al., 2020. Sedimentary Host Phases of Mercury (Hg) and Implications for Use of Hg as a Volcanic Proxy. *Earth and Planetary Science Letters*, 543: 116333. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116333>
- Shen, S. Z., Crowley, J. L., Wang, Y., et al., 2011a. Calibrating the End-Permian Mass Extinction. *Science*, 334(6061): 1367–1372. <https://doi.org/10.1126/science.1213454>
- Shen, Y. N., Farquhar, J., Zhang, H., et al., 2011b. Multiple S-Isotopic Evidence for Episodic Shoaling of Anoxic Water during Late Permian Mass Extinction. *Nature Communications*, 2: 1–5. <https://doi.org/10.1038/ncomms1217>
- Shen, S. Z., Zhang, H., 2017. What Caused the Five Mass Extinctions? *Chinese Science Bulletin*, 62(11): 1119–1135 (in Chinese).
- Sobolev, S. V., Sobolev, A. V., Kuzmin, D. V., et al., 2011. Linking Mantle Plumes, Large Igneous Provinces and Environmental Catastrophes. *Nature*, 477(7364): 312–316. <https://doi.org/10.1038/nature10385>
- Song, H. J., Wignall, P. B., Tong, J. N., et al., 2015. Integrated Sr Isotope Variations and Global Environmental Changes through the Late Permian to Early Late Triassic. *Earth and Planetary Science Letters*, 424: 140–147. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.05.035>
- Suits, N. S., Wilkin, R. T., 1998. Pyrite Formation in the Water Column and Sediments of a Meromictic Lake. *Geology*, 26(12): 1099–1102. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1998\)026<1099:pfitwc>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1998)026<1099:pfitwc>2.3.co;2)
- Sun, H., Xiao, Y. L., Gao, Y. J., et al., 2018. Rapid Enhancement of Chemical Weathering Recorded by Extremely Light Seawater Lithium Isotopes at the Permian-Triassic Boundary. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(15): 3782–3787. <https://doi.org/10.1073/pnas.1711862115>
- Sun, Y. D., Joachimski, M. M., Wignall, P. B., et al., 2012. Lethally Hot Temperatures during the Early Triassic Greenhouse. *Science*, 338(6105): 366–370. <https://doi.org/10.1126/science.1224126>
- Svensen, H., Planke, S., Polozov, A. G., et al., 2009. Siberian Gas Venting and the End-Permian Environmental Crisis. *Earth and Planetary Science Letters*, 277(3–4): 490–500. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.11.015>
- Sweere, T. C., Dickson, A. J., Jenkyns, H. C., et al., 2018. Isotopic Evidence for Changes in the Zinc Cycle during Oceanic Anoxic Event 2 (Late Cretaceous). *Geology*, 46(5): 463–466. <https://doi.org/10.1130/g40226.1>
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell, Oxford, 312.
- Veizer, J., Ala, D., Azmy, K., et al., 1999. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater. *Chemical Geology*, 161(1–3): 59–88. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00081-9](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00081-9)
- Wang, M., Zhong, Y. T., Hou, Y. L., et al., 2018. Source and Extent of the Felsic Volcanic Ashes at the Permian-Triassic Boundary in South China. *Acta Petrologica Sinica*, 34(1): 36–48 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. D., Cawood, P. A., Zhao, H., et al., 2018. Mercury Anomalies across the End Permian Mass Extinction in South China from Shallow and Deep Water Depositional Environments. *Earth and Planetary Science Letters*, 496: 159–167. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.05.044>
- Wang, X. D., Cawood, P. A., Zhao, H., et al., 2019. Global Mercury Cycle during the End-Permian Mass Extinction and Subsequent Early Triassic Recovery. *Earth and Planetary Science Letters*, 513: 144–155. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.02.026>
- Wang, X. M., Yuan, C. S., Liu, S. A., et al., 2025. Volcanically Modulated Micronutrient Cycles in the Mid-Proterozoic Ocean. *Geology*, 53(7): 567–571. <https://doi.org/10.1130/g52953.1>

- Wei, H. Y., Zhang, X., Qiu, Z., 2026. Pulsed Volcanism of the Emeishan Large Igneous Province Caused the Guadalupian (Middle Permian) Mass Extinction. *Geological Society of America Bulletin*, 1–14. <https://doi.org/10.1130/b38771.1>
- Wu, Y. Y., Chu, D. L., Tong, J. N., et al., 2021. Six-Fold Increase of Atmospheric pCO₂ during the Permian–Triassic Mass Extinction. *Nature Communications*, 12: 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22298-7>
- Wu, Y. Y., Song, H. J., Chu, D. L., et al., 2025. Environmental Impacts and Biotic Responses to Volcanism during the Permian–Triassic Transition. *Earth Science*, 50(3): 964–982 (in Chinese with English abstract).
- Xie, S. C., Pancost, R. D., Huang, J. H., et al., 2007. Changes in the Global Carbon Cycle Occurred as Two Episodes during the Permian–Triassic Crisis. *Geology*, 35(12): 1083–1086. <https://doi.org/10.1130/g24224a.1>
- Xie, S. C., Pancost, R. D., Wang, Y. B., et al., 2010. Cyanobacterial Blooms Tied to Volcanism during the 5 M.y. Permo–Triassic Biotic Crisis. *Geology*, 38(5): 447–450. <https://doi.org/10.1130/g30769.1>
- Xu, Z., Hilton, J., Yu, J. X., et al., 2022. End Permian to Middle Triassic Plant Species Richness and Abundance Patterns in South China: Coevolution of Plants and the Environment through the Permian–Triassic Transition. *Earth–Science Reviews*, 232: 104136. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104136>
- Yin, H. F., Huang, S. J., Zhang, K. X., et al., 1989. Volcanism at the Permian–Triassic Boundary in South China and Its Effects on Mass Extinction. *Acta Geologica Sinica*, 63(2): 169–180 (in Chinese with English abstract).
- Yin, H. F., Song, H. J., 2013. Mass Extinction and Pangea Integration during the Paleozoic–Mesozoic Transition. *Scientia Sinica Terrae*, 56(11): 1791–1803 (in Chinese).
- Yin, H. F., Zhang, K. X., Tong, J. N., et al., 2001. The Global Stratotype Section and Point (GSSP) of the Permian–Triassic Boundary. *Episodes*, 24(2): 102–114. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2001/v24i2/004>
- Yin, R. S., Feng, X. B., Hurley, J. P., et al., 2016. Mercury Isotopes as Proxies to Identify Sources and Environmental Impacts of Mercury in Sphalerites. *Scientific Reports*, 6: 18686. <https://doi.org/10.1038/srep18686>
- Yu, J. X., Broutin, J., Chen, Z. Q., et al., 2015. Vegetation Changeover across the Permian–Triassic Boundary in Southwest China Extinction, Survival, Recovery and Palaeoclimate: A Critical Review. *Earth–Science Reviews*, 149: 203–224. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.04.005>
- Zhang, F. F., Romaniello, S. J., Algeo, T. J., et al., 2018. Multiple Episodes of Extensive Marine Anoxia Linked to Global Warming and Continental Weathering Following the Latest Permian Mass Extinction. *Science Advances*, 4(4): e1602921. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1602921>
- Zhang, G. J., Zhang, X. L., Hu, D. P., et al., 2017. Redox Chemistry Changes in the Panthalassic Ocean Linked to the End-Permian Mass Extinction and Delayed Early Triassic Biotic Recovery. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(8): 1806–1810. <https://doi.org/10.1073/pnas.1610931114>
- Zhang, H., Zhang, F. F., Chen, J. B., et al., 2021. Felsic Volcanism as a Factor Driving the End-Permian Mass Extinction. *Science Advances*, 7(47): eabh1390. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abh1390>
- Zhao, T. Y., Algeo, T. J., Feng, Q. L., et al., 2019. Tracing the Provenance of Volcanic Ash in Permian–Triassic Boundary Strata, South China: Constraints from Inherited and Syn-Depositional Magmatic Zircons. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 516: 190–202. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2018.12.002>
- Zheng, W., Zhao, Y. Q., Sun, R. Y., et al., 2021. The Mechanism of Mercury Stable Isotope Fractionation: A Review. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 40(5): 1087–1106 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, J., Zhang, Z. C., 2013. The Link between Large Igneous Provinces and the Two Mass Extinctions in Permian: Review of Recent Progress. *Geological Review*, 59(1): 137–148 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 陈军, 徐义刚, 2017. 二叠纪大火成岩省的环境与生物效应: 进展与前瞻. *矿物岩石地球化学通报*, 36(3): 374–393.
- 迟清华, 2004. 汞在地壳、岩石和疏松沉积物中的分布. *地球化学*, 33(6): 641–648.
- 冯新斌, 尹润生, 俞奔, 等, 2015. 汞同位素地球化学概述. *地球科学前沿*, 22(5): 124–135.
- 何卫红, 吴攸攸, 张克信, 等, 2025. 晚二叠世全球海洋生态系统逐步坍塌与缺氧的可能联系. *地球科学*, 50(3): 983–999.
- 戎嘉余, 黄冰, 2014. 生物大灭绝研究三十年. *中国科学: 地球科学*, 44(3): 377–404.
- 沈树忠, 张华, 2017. 什么引起五次生物大灭绝? *科学通报*, 62(11): 1119–1135.

- 王曼,钟玉婷,侯莹玲,等,2018. 华南地区二叠纪-三叠纪界线酸性火山灰的源区与规模. 岩石学报,34(1):36-48.
- 吴玉样,宋海军,楚道亮,等,2025. 二叠纪-三叠纪之交火山活动及其环境效应和生物响应. 地球科学,50(3):964-982.
- 殷鸿福,黄思骥,张克信,等,1989. 华南二叠纪-三叠纪之交的火山活动及其对生物绝灭的影响. 地质学报,63(2):169-180.
- 殷鸿福,宋海军,2013. 古、中生代之交生物大灭绝与泛大陆聚合. 中国科学: 地球科学,43(10):1539-1552.
- 郑旺,赵亚秋,孙若愚,等,2021. 汞的稳定同位素分馏机理. 矿物岩石地球化学通报,40(5):1087-1106.
- 朱江,张招崇,2013. 大火成岩省与二叠纪两次生物灭绝关系研究进展. 地质论评,59(1):137-148.