中国科学：地球科学 SCIENTIA SINICA Terrae 2026 年 第 56 卷 第 6 期： 1993–2002
评 述
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

火山活动对烃源岩形成的影响

沈俊[1*]，谢树成[1*]，徐义刚[2]

1. 中国地质大学(武汉)地质微生物与环境全国重点实验室，武汉 430074
2. 中国科学院广州地球化学研究所深地过程与战略矿产资源全国重点实验室，广州 510640
* 通讯作者，E-mail：shenjun@cug.edu.cn(沈俊)，xiecug@163.com(谢树成)

2025-12-22收稿，2026-03-04修回，2026-03-25接受，2026-05-25网络版发表
国家自然科学基金项目(92479203、U25D9024)资助

摘要 有机质富集的烃源岩是油气资源的重要物质来源和载体，探究其形成的过程和机制，对保障国民经济发展的能源安全具有重要意义。然而目前关于大规模烃源岩形成的过程和控制机制仍存在很大的争议。近年来，火山活动被认为是地史时期多套优质烃源岩形成的重要触发机制，目前研究主要集中在火山活动释放大量营养元素(如磷、铁、硅等)，通过促进水体表层生产者繁盛，增加水体底部和沉积物有机碳输入，从而提高有机质埋藏。但是，火山活动对烃源岩的影响过程非常复杂，火山活动通过改变地球宜居因子，可以在不同时空尺度上显著影响烃源岩的形成与演化。本文通过总结火山活动对有机质形成、沉积和保存等多维度影响的过程和机制，不仅有助于理解火山活动对烃源岩形成的系统影响，还利于指导油气资源的勘探和开发。

关键词 黑色页岩，玄武岩风化，火山灰，初级生产力，黏土矿物，碳中和，页岩气

1 引言

烃源岩是富含有机质的沉积岩(又称黑色泥岩、黑色页岩等)，是油气资源的重要来源，因此其形成与分布一直是油气界关注的焦点(张金川等，2004；Zou等，2019)。同时，由于烃源岩的形成常伴随着异常的气候、环境条件演变(例如，高温、缺氧、酸化等)和剧烈的生物演变扰动(例如，后生动物的灭绝)，所以它还是古气候学、古海洋学及古生物学等研究的焦点(Ernst和Youbi，2017；Jin等，2023；徐义刚等，2024)。然而，关于烃源岩形成的过程和机制还存在很大争议，一直是科研界的研究热点课题(朱日祥等，2025)。烃源岩的形成主要由有机质形成与保存两个参数控制，在此基础上，提出了烃源岩有机质富集的“生产力主控”和“保存条件主控”两种经典模式(Tyson，2005)。“生产力主控”模式强调有机质富集主要依赖水体中高生产力的持续供应；“保存条件主控”模式认为缺氧、快速沉积等有利于有机质保存的环境条件是有机质保存和富集的决定性因素。然而，这两种模式在不同地质背景和沉积环境下的适用性和解释力仍存在争议，制约了烃源岩形成的过程和机制探究。例如，在特定关键地质转折期(如早侏罗世)海洋和陆地环境同时广泛发育有机质沉积(Kemp等，2024；Qiu等，2025)，其触发机制不能简单地用上述两种模式来解释，其更可能是能够引起陆地和海洋系统同时发生扰动的全球重大地质事件，甚至是地球多圈层联合驱动所致(朱日祥等，2025)。

近年来，火山活动被认为是深时烃源岩形成的重要触发因素，其主要依据是地史时期多套大规模黑色页岩沉积(全球大规模海洋缺氧条件下)与大规模火山活动(如大火成岩省)有很好的时间对应性(图1)，从而推测火山活动对有机质富集的黑色页岩(烃源岩)沉积具有重要影响。尤为直接的是，在国内外多套海相/湖相烃源岩中含伴生多层火山凝灰岩层(也称作斑脱岩等，Bentonite)，代表火山喷发的直接沉积记录。如扬子地区多个盆地上奥陶统五峰组-兰多维列统龙马溪组(Su等，2009)，美国Appalachian盆地中泥盆统(Ver Straeten，2004)，准噶尔

中文引用格式：沈俊, 谢树成, 徐义刚. 2026. 火山活动对烃源岩形成的影响. 中国科学: 地球科学, 56(6): 1993–2002, doi: 10.1360/SSTe-2025-0450
英文引用格式：Shen J, Xie S, Xu Y. 2026. Volcanic effects on the formation of hydrocarbon source rocks. Science China Earth Sciences, 69(6): 1951–1960, https://doi.org/10.1007/s11430-025-1913-4

© 2026《中国科学》杂志社

盆地的二叠系风城组和芦草沟组(Cao等，2020；Wu等，2025)，四川盆地上二叠统大隆组(沈俊等，2014)，鄂尔多斯盆地上三叠统延长组7段(Liu Q Y等，2025)等黑色页岩中发育数十层火山凝灰岩，暗示火山活动和烃源岩形成的密切联系(图1)。火山喷发释放的火山灰，通过大气循环进行广泛传播，沉降水体接触后释放大量营养元素(如磷、铁、硅等)，从而有利于水体表层生产力的爆发(Lee等，2018)。

然而，火山活动对烃源岩形成的影响远不止营养元素供给这一单一维度。作为一种强烈的地球深部物质和能量释放活动，火山作用能够通过改变大气成分、调控全球气候、加速陆地风化、改造沉积环境以及触发生态系统结构改变等多重途径，对有机质的形成、沉积和保存产生复杂且深远的影响(图2；Ernst和Youbi，2017；徐义刚等，2024)。本文拟从火山活动影响有机质生产、沉积和保存等多维机制入手，揭示火山活动在深时烃源岩形成和地球碳循环过程中的重要地位(图2)。这不仅有助于深化对非常规油气(如页岩油气)资源形成机理的认识，也为理解关键地质转折期地表环境宜居性的演变提供新视角。

2　火山活动对有机质形成的影响

有机质的生成是烃源岩形成的基础，其规模和效率直接决定了沉积物中有机质含量的潜力。水体表层生产力的高低取决于营养元素供应、光合作用效率以及初级生产者的群落结构等。火山活动通过营养元素供给、气候环境因子调控和生态系统结构改变，在有机质生成过程中扮演了重要角色(谢树成等，2024)。

2.1　火山活动提高营养元素输入，促使水体表层生产者繁盛

火山灰是火山喷发过程中最主要的产物之一。其颗粒通常富含可溶性磷、铁、硅等元素，进入水体后可作为浮游植物的重要营养来源。火山灰根据其沉积途径可

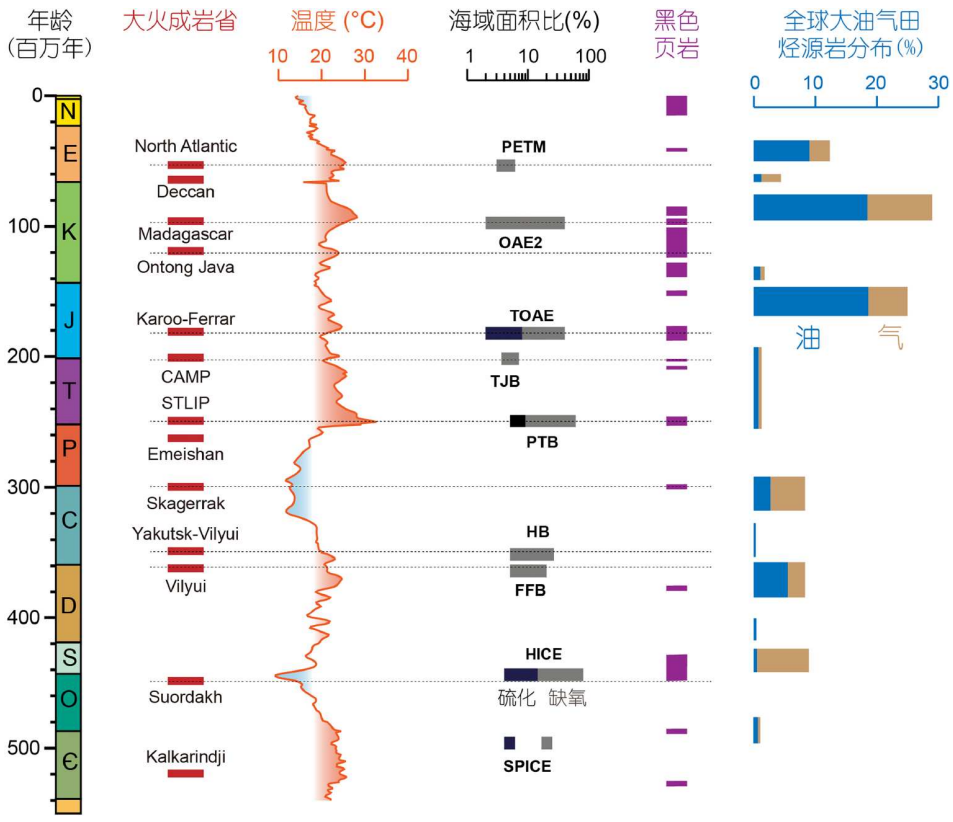


图 1　显生宙大火成岩省(Ernst和Youbi，2017)、温度(Scotese等，2021)、海域缺氧面积比(Reershemius和Planavsky，2021)、黑色页岩以及全球大油气田烃源岩(Klemme和Ulmishek，1991)地层分布图。缩写：CAMP，Central Atlantic Magmatic Province；STLIP，Siberian Traps Large Igneous Province；PETM，Paleocene-Eocene Thermal Maximum，古新世-始新世极热事件；OAE2，Oceanic Anoxic Event 2，大洋缺氧事件2；TOAE，Toarcian Oceanic Anoxic Event，托阿尔期大洋缺氧事件；TJB，Triassic–Jurassic Boundary，三叠纪-侏罗纪界线；PTB，Permian-Triassic Boundary，二叠纪-三叠纪界线；HB，Hangenberg Event；FFB，Frasnian-Famennian Boundary，弗拉斯阶-法门阶界线；HICE，Hirnantian Isotopic Carbon Excursion，赫南特期碳同位素漂移事件；SPICE，Steptoean Positive Carbon Isotope Excursion

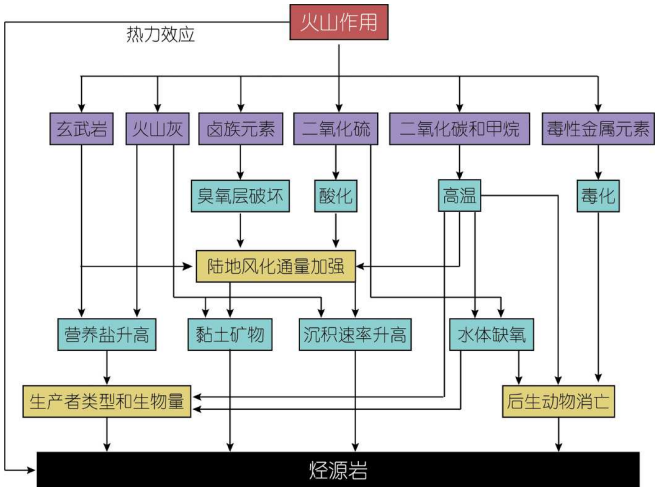


图2 火山活动对烃源岩形成的综合影响图

以分为空降型和水携型，前者指火山灰经大气传输直接沉降至沉积盆地；后者是指火山灰先沉降至地表，经历地表风化，而后通过陆源输入进入沉积盆地(Liu等，2024)。通过对现代火山的观测发现，火山喷发的细粒物质(火山灰)和水接触之后，会释放大量营养元素(如磷、铁、硅等)，对贫营养水体的生产者有显著促进作用(Duggen等，2007)。例如，2010年冰岛Eyjafjallajökull火山喷发向北大西洋注入大量火山灰(体积达到(270±70)×10^6 m^3)，使得火山喷发口周边57万km^2的表层海水的溶解铁浓度出现了明显的升高(最高可以达到10.2 nmol/L)。卫星遥感监测显示，喷发后数日内，海洋表层叶绿素a浓度升高数倍，表明浮游植物显著爆发(Achterberg等，2013)。陆地和海洋系统初级生产力升高的现象在其他多次近代火山喷发也有报道(Pickarski等，2023)。这些观测证据为(空降)火山灰输入促进短时间尺度(天-年)海洋水体表层生产力提升提供了现代类比。在地质历史记录中，火山灰层与富有机质页岩的共生现象非常普遍(如上所述，图3)。例如，国内多套典型油气资源层位的黑色页岩中，比如，五峰组-龙马溪组(Su等，2009)、上二叠统大隆组(沈俊等，2014)、上三叠统延长组(Liu Q Y等，2025)等，均可见多层火山凝灰岩夹层，这些火山凝灰岩层与高总有机碳含量(TOC)层段高度对应(图3)，表明火山灰在地史时期同样起到了营养物质补给的作用，从而促进了有机质的生成。

火山活动还可以在地表形成大面积的喷出岩和火山灰，特别是基性火山喷发，可以喷出大量的玄武岩，其比重可达喷发总量的90%以上(Sobolev等，2011)。玄武岩元素组成和上地壳存在明显差异，其显著富集磷、铁等营养元素(Humphris和Thompson，1978)；并且，玄武岩作为典型的基性岩石，其在地表环境下风化速率远高于中酸性岩和上地壳(Dessert等，2003；Ma等，2007)。风化过程中，玄武岩释放大量磷、铁等营养元素进入水体，为浮游植物提供持续的营养来源(图2；Dessert等，2003)。例如，玄武岩化学风化通过释放关键营养元素磷，控制海洋有机碳埋藏，从而在地史时期地表碳循环过程中发挥了重要作用(Horton，2015；Cox等，2016)。比如，约7亿年前的Franklin大火成岩省玄武岩风化释放的磷通量可以达到1×10^9–5×10^9 mol/yr，引起海洋有机碳埋葬速率增加0.1×10^{12}–0.9×10^{12} mol CO_2/yr，对当时海洋生态系统产生了重要影响(Horton，2015)。但是，与(空降)火山灰的短期效应(天-年)相比，玄武岩和火山灰等风化释放营养元素对有机质生成的影响具有构造尺度(十万年至百万年)影响的特征。

火山活动对地球圈层的影响过程非常复杂，常伴随着大气、陆地和海洋多系统的连锁反应(图2)。比如，火



图3 上寺剖面上二叠统大隆组火山凝灰岩和黑色页岩中疑源类化石分布图，据Shen等(2013)。正常泥灰岩中发育球形疑源类化石*Leiosphaeridia microgranifera*(A、B、E、F)；火山灰上面黑色泥岩发育带刺疑源类化石*Veryhachium hyalodermum*(C)和*Micrhystridium breve*(D)。化石比例尺为10 μm

山喷发释放的CO_2等温室气体，会引起地表系统的升温；同时，通过硫、卤族等酸性气体的释放，可以引起酸雨的形成(Ernst和Youbi，2017)。高温和酸雨等气候环境变化会引起陆地风化加强，引起陆源物质输入通量的提高，可以引起水体环境的富营养化，从而促使生产者的繁盛(Ernst和Youbi，2017；Xu等，2023)。比如，西伯利亚大火成岩省的喷发，引起的气候环境巨变(包括高温、酸雨等；Algeo和Shen，2024)，导致了陆地风化的加强，从而引起了大量陆源碎屑物质的输入，促使了海洋生产力的提高和泛大洋海域广泛沉积黑色泥岩(Shen等，2015；Xu等，2023)。地质历史时期其他大火成岩省的喷发和陆地化学风化加强也有很好的对应性(Pogge von Strandmann等，2021；Shen等，2022)。

2.2　火山活动引起二氧化碳浓度和温度升高，影响光合作用效率

浮游植物光合作用速率和效率主要受大气(水体)CO_2和温度的双重调控(图4)。大规模火山活动通过喷发向大气和海洋释放大量CO_2，不仅直接导致大气CO_2浓度的快速升高，还可能通过增强温室效应引起全球或区域气候变暖(Scotese等，2021)。在短时间尺度上，这种CO_2供给的增加为浮游植物提供了丰富的无机碳来源，从而可能促进其光合作用速率的提升(Evans，2013)。同时，适度的温度升高(小于35 °C；Poudel和Dunn，2017)能够加快浮游植物体内酶促反应的效率，从而增强植物固定碳的速率和效率(Evans，2013)。另外，高CO_2浓度和温度可以延长陆地植物的生长季节和生长区域，特别是温度升高背景下，高纬度陆地区域的升温幅度和速率比其他区域更快，会使其变得更加适宜植物生长，从而可以提高生产力和碳埋藏(Cohen等，2014)。

然而，这种促进作用存在明显的阈值效应。一旦温度上升超过浮游植物适应的最优范围(25–35 °C；Poudel和Dunn，2017)，蛋白质失稳、光合作用关键酶活性抑制以及微生物呼吸消耗(有机质矿化)增强等将降低有机质的保存(图4；Gudasz等，2010；Bressac等，2024)。此外，火山喷发导致的大气CO_2增加还会加剧海洋酸化，降低碳酸盐饱和度，对某些依赖碳酸盐外壳的浮游生物(如有孔虫、部分甲藻)造成胁迫，间接影响整个浮游植物群落结构与光合作用效率(Hofmann和Schellnhuber，2009)。不同类群的浮游植物在对CO_2浓度和温度响应上存在差异，例如蓝细菌可能在高温条件下表现出更强的耐受性(Huisman等，2018)，而硅藻则可能对酸化更为敏感(Andrén和Jarlman，2009)。这意味着火山活动对光合作用效率的影响并非单一的“促进”或“抑制”，而是取决于环境条件、物种组成和生态系统反馈的复杂耦合。同时，温度升高还可能会改变碳在生态系统的代谢和流动效率，从而影响有机质的沉积和埋葬通量(Barneche等，2021)。

目前，关于温度和CO_2浓度在浮游植物光合作用速率上的最优阈值研究仍然不足。既有的实验和模拟多集中于现代环境条件，而对地史时期火山事件背景下浮游植物的生态响应探讨较少。这一领域有待进一步结合古生态学证据、现代培养实验以及数值模拟研究，从而揭示不同火山事件对地表碳循环和生物生产力的长期影响。

2.3　火山活动引起的极端气候环境，可能会引起生态结构改变，从而影响有机质形成

火山活动导致的水体缺氧、酸化与毒化等极端环境，可能改变水体表层初级生产者的群落结构，从而影响输出生产力和初级生产力的比例(图5；Dai等，2025)。在正常条件下，真核浮游植物(个体相对较大，如甲藻和硅藻)是主要的初级生产者，由于其可以形成较大的有机质团块，从而可以快速沉降到深海和沉积物表层，所以具备较高的固碳和能量传递效率。然而，在火山诱发的极端环境中，部分真核浮游植物对缺氧、酸化和重金属毒

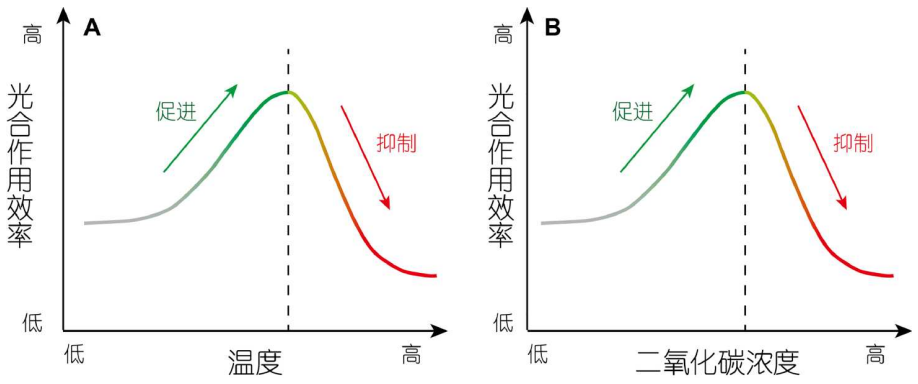


图 4　光合作用效率与温度(A)和二氧化碳浓度(B)关系图，据Poudel和Dunn(2017)和Bressac等(2024)

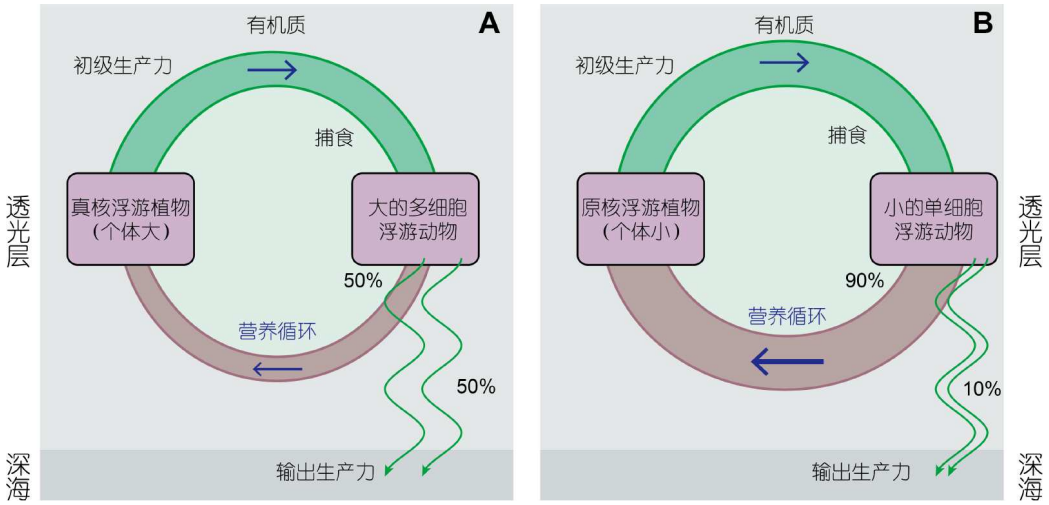


图5 水体表层生态结构改变对输出生产力的影响(据Sigman和Hain，2012)。(A)为正常环境条件，输出生产力占总初级生产力的比例高；(B)为火山喷发引起的生产者和浮游动物类型改变条件，输出生产力占总初级生产力的比例低

性的敏感性较强，往往导致群落数量锐减甚至局部灭绝。与之相对，原核浮游植物(个体相对较小，如蓝细菌和部分古细菌)在极端环境中表现出更强的生存优势，尤其是在高CO_2浓度、低氧或贫营养条件下更容易繁盛(Xie等，2005)。个体较小的原核生物由于形成的有机质颗粒体积较小，从而延长了有机质从海洋表层移除的时间，降低了有机质进入深海和沉积物的比例(图5)。这种“由真核向原核”的群落转变，不仅改变了古海洋初级生产的能量结构，也直接影响有机质的质量与烃源岩的生烃潜力。因此，火山诱发的生态结构重组，可能在宏观上导致烃源岩的成分和性质差异，从而影响后期的油气资源。

这一过程在地质历史中也有案例支持。例如，二叠纪-三叠纪之交的火山喷发伴随严重的环境危机，在火山黏土岩之上的黑色页岩中，浮游植物群落出现了由真核类群向固氮蓝细菌的转变(Xie等，2005)，浮游植物疑源类由球形(*Leiosphaeridia microgranifera*)转变为带刺(*Veryhachium hyalodermum*和*Micrhystridium breve*)类型(图3；Shen等，2013)，反映出火山作用对群落演替的深远影响。火山喷发之后浮游植物群落重组的记录在龙马溪组(Lu等，2022)和延长组地层中也有报道(刘全有等，2022；Liu Q Y等，2025)，表明这一生态响应机制可能具有一定的普遍性。准噶尔盆地晚古生代风城组湖相烃源岩的成烃生物类型演变也被认为是受盐度及酸碱度等环境因子主控(曹剑等，2025)。所以，火山活动通过塑造极端环境，能够显著改变古海洋初级生产者的群落组成和有机质沉积特征(谢树成等，2024)。这一机制不仅是理解古环境与有机质形成关系的关键环节，也是解释不同地层中烃源岩有机质的类型和含量差异的重要因素。

3 火山活动对有机质沉积过程影响

有机质的沉积过程是烃源岩形成的关键环节。即使水体表层初级(或者输出)生产力再高，如果有机质在进入沉积物之前被大量分解或氧化，最终沉积物中有机质的丰度仍可能不足。沉积阶段的核心问题在于水体表层生产出来的有机质能否有效沉降并埋藏在沉积物中。火山活动通过改变海洋环境和沉积动力学过程，在有机质沉积中发挥了多重作用，主要体现在深层水体缺氧环境形成、改变食物网结构、生物扰动以及颗粒沉降效应等四个方面(图2)。

3.1 火山活动引起水体环境因子变化，影响有机质沉积过程

大规模火山事件往往伴随显著的气候异常(如全球升温)，这种气候效应会进一步影响水体的分层与循环。温度升高导致水体密度分层增强，抑制表层与深层的混合，从而降低水体中氧的再供给能力，使中-深层水体更易形成缺氧甚至无氧环境(Jane等，2021)。同时，火山活动释放的硫会影响水体的硫酸盐浓度，从而通过影响硫酸盐还原作用改变水体的氧化还原条件(Adams等，2010)。值得注意的是，由于开阔海域和湖相沉积环境背景硫酸盐浓度具有显著差异(海洋开阔水体具有高的硫酸盐浓度，而湖泊局限水体硫酸盐浓度低)，火山活动对两种环境水体因子的影响有明显差异(Liu等，2021)。在这一条件下，有机质难以被充分氧化分解，从而具备较高的埋藏和长期保存潜力。这种机制在地质历史上屡有体现，例如，某些时期的黑色页岩沉积事件，均与火山活动诱

发的硫酸盐还原作用加强导致的缺氧水体环境密切相关(图1)。但是温度的升高也有不利的影响，火山活动引起的大气温度升高，会引起湖泊和海洋表层水体温度的升高，从而加速有机质的降解，不利于有机质的沉积和保存。

3.2　火山活动引起沉积速率升高，提升有机质的沉降速率

火山喷发不仅通过改变水体化学环境影响有机质的沉降，还通过向沉积体系中输入大量颗粒物，直接改变沉积速率与有机质的沉降过程。如上所述，火山喷发过程中释放的火山灰以及陆地风化产物，能够在不同时间尺度内进入海洋或湖泊水体。这些输入事件通常属于极端沉积事件，其沉积速率远高于背景沉积速率(Algeo和Twitchett，2010；Shen等，2015)，从而显著缩短有机质在水体中的停留时间。由于有机质在水体中悬浮时间越长，其被氧化和分解的可能性越大，因此火山喷发导致的高沉积速率对有机质保存具有重要意义(Freundt等，2023)。现代观测结果亦为这一机制提供了直接证据。例如，Mount Pinatubo火山喷发释放之后，火山喷发口附近37万km^2海域内颗粒沉降速率比其他海域高出数十倍(Wiesner等，1995)。在地史火山事件中，这一效应更为显著，例如西伯利亚大火成岩省喷发期间，全球范围内沉积速率相比正常背景水平提高了7–10倍(Algeo和Twitchett，2010；Shen等，2015)，造成泛大洋广泛的富有机质黑色页岩沉积(Isozaki，1997)；其他火山喷发事件前后也普遍记录到沉积速率的明显升高，比如早侏罗世欧洲地区的沉积速率升高了数倍，并伴随着大量黑色页岩的沉积(Kemp等，2024)，反映了该过程的普遍性和重要性。但是，当沉积速率过大，会稀释有机质的沉积，从而不利于有机质的保存(Tyson，2005)。

3.3　火山活动引起后生动物的死亡，减少食物链的捕食，提高有机质沉积效率

火山活动导致的缺氧、酸化和毒化事件会影响浮游动物和高营养级捕食者。后生动物丰度和分异度的急剧下降，会引起生态系统的能量流动和营养传递链条严重受损(Chen和Benton，2012)。食物网结构的崩溃直接减少了浮游植物所面临的捕食压力。在正常生态条件下，浮游植物固定的碳大部分通过浮游动物和更高营养级消费者向上传递，只有较小比例的有机质能够逃逸分解与摄食，最终进入沉积物。而在后生动物锐减甚至局部灭绝的情况下，大量浮游植物残骸可以绕过捕食环节直接沉降，显著提高有机质的埋藏效率。这一过程类似于现代富营养化湖泊或海湾中藻华暴发后的情景：当浮游动物种群不足以控制浮游植物数量时，藻类残骸会大量沉降至湖底或海底，形成富有机质沉积(Anderson等，2002)。然而，在地质历史中的火山作用背景下，这一机制的作用规模和持续时间更为巨大，能够在广阔区域内造成高有机质沉积，最终促进黑色页岩等有机质富集岩层的形成(Isozaki，1997)。

值得注意的是，火山活动引起的后生动物死亡对有机质沉积的促进作用，往往与前述缺氧、酸化及沉积速率升高等机制叠加，共同作用于有机质保存的综合环境效应(图2)。例如，在二叠纪-三叠纪之交的西伯利亚大火成岩省喷发事件中，生物多样性大灭绝与黑色页岩沉积的耦合关系，很可能部分归因于食物网崩塌所带来的有机质保存效率提升。目前，对于“火山事件-后生动物死亡-有机质沉积”这一机制的研究仍处于初步探索阶段。已有工作多集中于后生动物灭绝与黑色页岩的时空对比，但在食物网层面的量化分析和耦合机制研究仍显不足。结合分子生物标志物、稳定同位素与食物网建模的方法，可能为揭示火山事件中食物链崩溃对有机质保存的贡献提供更直接的证据。

4　火山活动对有机质保存的影响

有机质能否在沉积物中长期保存，是决定烃源岩形成潜力的核心因素之一。即使生产力高、沉积速率快，如果有机质在成岩或成藏过程中被完全降解，也不利于形成优质烃源岩。火山活动可以通过改变矿物学、地球化学生物链结构和热演化条件等，对有机质保存起到重要作用(图2)。

4.1　火山活动引起的矿物学转变有利于有机质的保存

矿物学在有机质保存过程中扮演了关键角色(Kennedy等，2002；Liu B等，2025)。尤其重要的是，矿物比表面积对有机质的保存具有重要作用(Kennedy等，2002；Freundt等，2023)。火山灰颗粒本身具有较大的比表面积和高活性表面，在沉降过程中可与有机质结合，促进絮凝和快速沉降；同时，有机质附着在颗粒表面后，其下沉速度加快，被包裹的有机质也更不易受到氧化分解。火山灰和火山玻璃在早期成岩过程中易转化为蒙脱石等黏土矿物，蒙脱石具有大的比表面积(图6)，故比其他黏土矿物对有机质具有更好的吸附能力(图6；Kennedy等，2002)。与此同时，火山活动诱发的气候变暖和强烈陆地风化、剥蚀会加速陆源物质输入，河流将大量黏土矿物输送至沉积盆地(Xu等，2023)。这些黏土矿物因其较大

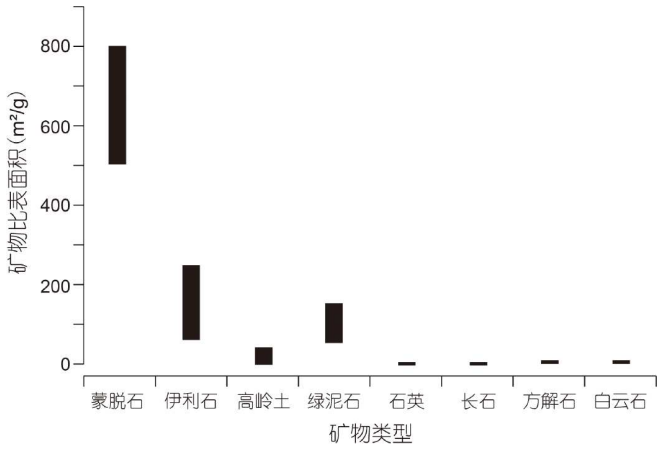


图 6 沉积岩中不同矿物的矿物比表面积数值图

的比表面积和带负电荷的矿物表面，能够与有机质发生强烈吸附和络合作用，形成稳定有机-矿物复合体(图6；Liu B等，2025)。这种复合体结构能够显著降低有机质在沉积和成岩过程中被微生物分解和氧化的速度，从而大幅度提高有机质的埋藏效率。

4.2 火山活动引起的水体环境变化影响有机质早期矿化作用

火山活动通过释放卤族、硫、氮和碳等元素及火山灰中的可溶性成分，引起水体环境变化(如酸碱度、硫酸盐、硝酸盐和碳酸盐浓度等)，尤其是在封闭性较强的湖泊和半海湾环境中表现更为显著。水体环境参数的变化会通过调控微生物群落活性、营养盐形态和金属离子行为等途径，显著影响有机质的分解与保存(Rousk等，2009，2010)。比如，酸性条件下，大多数好氧细菌和部分兼性厌氧菌的活性受到抑制，导致有机质的降解速率显著降低，更易积累形成泥炭、腐殖质等稳定有机质沉积(Rousk等，2009)。酸性条件可促进金属离子(如铝、铁、锰等)与有机质的络合，生成难降解的有机-无机复合物，从而增加有机质的稳定性与保存潜力(Lalonde等，2012)。酸碱度还决定了溶解性有机碳在水体中的存在状态及其与胶体、颗粒物的相互作用。在偏酸性环境下，溶解有机质更易吸附在颗粒表面并沉降保存，而在偏碱性条件下，溶解有机质的稳定性较低，更易发生再矿化或释放(Kupka和Gruba，2022)。另外，硝酸盐和硫酸盐浓度的改变，可以调控早期成岩作用下微生物的类型及其功能。比如，硫酸盐浓度的改变，会影响硫酸盐还原作用的强度，从而影响有机质早期矿化作用的速率(Piper和Calvert，2009)。火山活动通过调控水体关键环境因子，可以在多重机制下共同影响有机质的(沉积与)保存。这一作用对于理解火山事件与黑色页岩沉积事件、古湖泊烃源岩形成之间的关系具有重要意义。但是，目前对该方面的研究还处于初步阶段，需要加强相关研究。

4.3 火山活动引起底栖后生动物的死亡，生物扰动作用减少有利于有机质保存

火山活动导致的环境巨变不仅对浮游生物和高营养级生物造成冲击，对底栖生物群落同样具有深远影响。底栖动物(如双壳类和节肢动物)在沉积环境中通常扮演着重要的生态工程师角色，其摄食、掘穴和生物扰动作用能够不断翻动沉积物，促进有机质的再矿化和氧气的渗透，从而降低有机质的长期保存潜力(Meysman等，2006)。然而，在火山活动背景下，这一机制可能被明显削弱甚至完全终止。首先，火山喷发所产生的大量火山灰快速沉降，常以极高的速率覆盖沉积表面，直接造成底栖生物窒息埋藏(Freundt等，2023)。由于火山灰层往往较厚且沉积突发，底栖动物难以及时迁移或逃逸，从而导致群落大规模灭绝(Freundt等，2023)。其次，火山喷发释放的硫、卤族及其他酸性气体在进入水体后可转化为酸性物质，并伴随火山灰和火山流体中的金属离子(如汞、铜、铅等)一同造成水体毒化，尤其是底层水体更容易出现高浓度的有毒环境，直接抑制底栖动物的存活(图2)。再次，火山诱发的全球变暖和水体分层增强会加剧缺氧乃至无氧状态，这对依赖充足溶解氧的底栖动物更为致命。

在上述多重胁迫下，底栖动物往往大规模死亡甚至局部灭绝，导致生物扰动作用急剧减弱或完全缺失。底栖动物死亡后，沉积物不再被频繁扰动，有机质不易重新暴露于含氧环境，避免了进一步分解。缺少生物扰动带来的孔隙扩散，沉积物内部更易维持还原性环境，从而延长有机质的保存时间。火山灰快速覆盖不仅消除了底栖动物活动区，还为有机质形成了“物理隔离层”，显著提高了保存效率。这一机制在地质历史中已有多方面证据支持。例如，二叠-三叠纪之交的后生动物灭绝中，遗迹化石的降低和全球范围内黑色页岩高度一致，反映了火山活动通过削弱生物扰动促进有机质保存的作用(Twitchett和Barras，2004)。

综上，火山活动通过掩埋、毒化与缺氧等多重效应导致底栖动物大规模死亡，从而抑制生物扰动和再矿化过程，为有机质的长期保存提供了独特的生态与环境背景。这一机制与火山活动所引起的沉积速率升高、矿物学转变等因素共同作用，构成了火山作用促进有机质富集的重要环节。

4.4　火山岩浆侵入与热演化影响有机质的保存

除了喷发作用，岩浆侵入也是火山活动影响烃源岩发育的重要形式。与喷发不同，岩浆侵入发生在地表之下，作用于岩浆形成之前已沉积的地层中，其对有机质成岩后期保存和油气生成的影响具有独特性。当岩浆体(如岩墙、岩床或岩株)侵入富有机质沉积岩时，由于其温度高达数百度，会在接触带形成强烈的热效应(图7；Svensen等，2009)。这种高温作用能够显著改变有机质的组成、结构和热演化路径。首先，在岩浆热作用下，烃源岩中的有机质会发生热裂解反应。在高温条件下，大分子有机质(如腐殖质)会分解为低分子量的烃类，从而在短时间内大幅提升生烃效率。这一过程相当于“加速”了热演化，使烃源岩的成熟度加速升高，缩短了生油窗口周期并提前生气峰值(Zhu等，2025)。但是，局部靠近岩墙的区域甚至可能在短时间内达到过成熟阶段，导致有机质碳质化，失去进一步生烃潜力(图7)。其次，岩浆侵入的热效应会形成一个明显的接触变质带，其厚度取决于岩浆体规模、侵入温度、围岩热导率及冷却时间。接触带内的有机质往往表现为从低熟-高熟-过熟的梯度变化(图7；Svensen等，2009)：靠近岩浆边缘的区域可能出现油气异常富集，而更近距离的岩石则表现为有机质彻底碳质化(图7)。由此，岩浆侵入不仅影响有机质保存，还可能对油气成藏造成“正负”两方面的效应。第三，岩浆侵入过程还可能导致储层改造与次生效应。一方面，岩浆释放的流体和高温热液可能促使矿物重结晶或交代作用，从而封闭孔隙、不利于油气保存；另一方面，热液活动亦可能在围岩中形成新的裂隙与孔洞，为油气运移提供通道。在某些情况下，岩浆侵入甚至可能诱发油气的瞬时释放和二次运移，重塑区域性的油气富集格局(Zhu等，2025)。

例如，在西伯利亚大火成岩省、卡鲁大火成岩省等大规模火山活动区，广泛分布的岩墙和岩床与黑色页岩烃源岩密切接触，普遍形成接触带烃类异常带，反映出岩浆侵入对有机质热演化的显著影响(Svensen等，2009)。国内四川盆地，也发现了峨眉山大火成岩省岩浆侵入导致的局部有机质过成熟，对页岩油气勘探具有重要启示意义(Chen等，2022；Zhu等，2025)。综上，岩浆侵入作为火山活动的重要形式，通过热效应加速有机质的裂解和演化，既可能破坏有机质保存条件，又可能促进局部油气生成与成藏。因此，在研究火山活动与有机质富集关系时，喷发作用与侵入作用应当同时考虑，以全面揭示火山活动对地球表层碳循环和油气地质过程的双重影响。

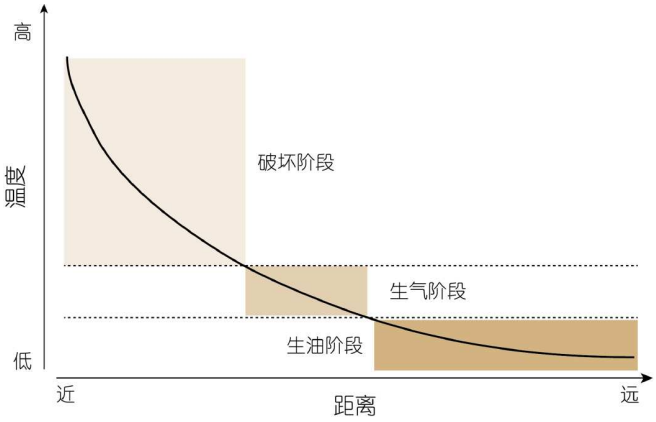


图 7　岩墙侵入沉积地层温度(纵坐标)随接触带距离(横坐标)变化示意图，据Ganino和Arndt(2009)

5　结论与展望

本文通过系统综述火山活动对有机质形成、沉积和保存的多维度影响(图2)，探讨了火山作用在烃源岩形成与演化过程中的潜在机制及其地质意义。主要结论如下：(1)火山活动通过短期火山灰沉降和长期玄武岩与大陆风化输入，显著提高了水体的营养水平与初级生产力，是有机质形成的重要驱动机制；(2)火山诱发的缺氧、酸化和毒化等环境变化，通过改变生态系统结构，降低有机质分解速率，减少捕食压力，利于有机质的沉积与保存；(3)火山活动导致的黏土矿物输入及火山喷发产物的矿物学转变(如火山玻璃转化为蒙脱石、沸石形成、铁氧化物沉淀等)，在物理吸附和化学络合等层面增强了有机质的保存；(4)岩浆侵入则通过热演化作用，加速有机质成烃过程。综上，火山活动在有机质生成、沉积与保存等不同维度均发挥重要作用，但其效应具有明显的时间与空间差异性，是控制烃源岩形成的重要地质过程。火山活动不仅是控制地区烃源岩形成的重要因素，更可能是驱动全球性海、陆烃源岩富集事件和油气资源分布格局的关键机制。

目前关于火山活动与烃源岩发育的研究仍存在以下不足。(1)定量约束不足：不同类型火山对烃源岩形成的影响机理需要开展深入研究，比如酸性喷发的火山灰一般是短时间尺度效应，但是基性喷发的玄武岩风化可以在更长时间尺度影响烃源岩的发育。对火山灰和玄武岩风化物质输入的通量、营养盐释放速率及其对古生产力提升的贡献仍缺乏量化数据。(2)影响效应过程复杂：火山活动对烃源岩形成具有“正面”和“负面”两方面效应，需结合多学科方法探究其阈值。(3)古今对比不足：现代火山灰沉积区的观测与实验结果能为古环境提供重要参照，但地史火山事件的环境规模和持续时间往往远超现

代，需要通过地球化学示踪、数值模拟和盆地分析相结合的方法来提高解释力。未来研究应加强地球化学指标、古生态学证据、大数据分析与数值模拟的综合应用，从“输入-响应-保存-转化”全链条定量角度揭示火山作用与有机质富集之间的耦合机制。这不仅有助于深化对地球表层碳循环演化的理解，也为油气勘探和资源评价提供了新的理论支撑。

致谢 成文过程中得到了冯庆来、喻建新、陆永潮等的帮助，在此表示感谢。

参考文献

曹剑, 张瑞杰, 支东明, 等. 2025. 碱湖烃源岩有机-无机相互作用与控烃机理. 中国科学: 地球科学, 55: 1619–1641
刘全有, 李鹏, 金之钧, 等. 2022. 湖相泥页岩层系富有机质形成与烃类富集——以长7为例. 中国科学: 地球科学, 52: 270–290
沈俊, 周炼, 冯庆来, 等. 2014. 华南二叠纪-三叠纪之交初级生产力的演化以及大隆组黑色岩系初级生产力的定量估算. 中国科学: 地球科学 44: 132–145
谢树成, 朱宗敏, 张宏斌, 等. 2024. 小小地质微生物演绎跨圈层的相互作用. 地学前缘, 31: 446–454
徐义刚, 黄小龙, 王强, 等. 2024. 地球宜居性的深部驱动机制. 科学通报, 69: 169–183
张金川, 金之钧, 袁明生. 2004. 页岩气成藏机理和分布. 天然气工业, 24: 15–18
朱日祥, 张旺, 王华建, 等. 2025. 多圈层驱动的油气形成与富集理论. 中国科学: 地球科学, 55: 2603–2620
Achterberg E P, Moore C M, Henson S A, et al. 2013. Natural iron fertilization by the Eyjafjallajökull volcanic eruption. Geophys Res Lett, 40: 921–926
Adams D D, Hurtgen M T, Sageman B B. 2010. Volcanic triggering of a biogeochemical cascade during Oceanic Anoxic Event 2. Nat Geosci, 3: 201–204
Algeo T J, Twitchett R J. 2010. Anomalous Early Triassic sediment fluxes due to elevated weathering rates and their biological consequences. Geology, 38: 1023–1026
Algeo T J, Shen J. 2024. Theory and classification of mass extinction causation. Natl Sci Rev, 11: nwad237
Anderson D M, Glibert P M, Burkholder J M. 2002. Harmful algal blooms and eutrophication: Nutrient sources, composition, and consequences. Estuar Coast, 25: 704–726
Andrén C, Jarlman A. 2009. Benthic diatoms as indicators of acidity in streams. Fund Appl Limnol, 173: 237–253
Barneche D R, Hulatt C J, Dossena M, et al. 2021. Warming impairs trophic transfer efficiency in a long-term field experiment. Nature, 592: 76–79
Bressac M, Laurenceau-Cornec E C, Kennedy F, et al. 2024. Decoding drivers of carbon flux attenuation in the oceanic biological pump. Nature, 633: 587–593
Cao J, Xia L, Wang T, et al. 2020. An alkaline lake in the Late Paleozoic Ice Age (LPIA): A review and new insights into paleoenvironment and petroleum geology. Earth-Sci Rev, 202: 103091
Chen C S, Qin S F, Wang Y P, et al. 2022. High temperature methane emissions from Large Igneous Provinces as contributors to late Permian mass extinctions. Nat Commun, 13: 6893
Chen Z Q, Benton M J. 2012. The timing and pattern of biotic recovery following the end-Permian mass extinction. Nat Geosci, 5: 375–383
Cohen J, Screen J A, Furtado J C, et al. 2014. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. Nat Geosci, 7: 627–637
Cox G M, Halverson G P, Stevenson R K, et al. 2016. Continental flood basalt weathering as a trigger for Neoproterozoic Snowball Earth. Earth Planet Sci Lett, 446: 89–99
Dai R B, Wen Z Z, Hong H Z, et al. 2025. Eukaryotic phytoplankton drive a decrease in primary production in response to elevated CO_2 in the tropical and subtropical oceans. Proc Natl Acad Sci USA, 122: e2423680122
Dessert C, Dupré B, Gaillardet J, et al. 2003. Basalt weathering laws and the impact of basalt weathering on the global carbon cycle. Chem Geol, 202: 257–273
Duggen S, Croot P, Schacht U, et al. 2007. Subduction zone volcanic ash can fertilize the surface ocean and stimulate phytoplankton growth: Evidence from biogeochemical experiments and satellite data. Geophys Res Lett, 34: L01612
Ernst R E, Youbi N. 2017. How Large Igneous Provinces affect global climate, sometimes cause mass extinctions, and represent natural markers in the geological record. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 478: 30–52
Evans J R. 2013. Improving photosynthesis. Plant Physiol, 162: 1780–1793
Freundt A, Schindlbeck-Belo J C, Kutterolf S, et al. 2023. Tephra layers in the marine environment: A review of properties and emplacement processes. Geol Soc Spec Publ, 520: 595–637
Ganino C, Arndt N T. 2009. Climate changes caused by degassing of sediments during the emplacement of large igneous provinces. Geology, 37: 323–326
Gudasz C, Bastviken D, Steger K, et al. 2010. Temperature-controlled organic carbon mineralization in lake sediments. Nature, 466: 478–481
Hofmann M, Schellnhuber H J. 2009. Oceanic acidification affects marine carbon pump and triggers extended marine oxygen holes. Proc Natl Acad Sci USA, 106: 3017–3022
Horton F. 2015. Did phosphorus derived from the weathering of large igneous provinces fertilize the Neoproterozoic ocean? Geochem Geophys Geosyst, 16: 1723–1738
Huisman J, Codd G A, Paerl H W, et al. 2018. Cyanobacterial blooms. Nat Rev Microbiol, 16: 471–483
Humphris S E, Thompson G J. 1978. Trace element mobility during hydrothermal alteration of oceanic basalts. Geochim Cosmochim Acta, 42: 127–136
Isozaki Y. 1997. Permo-Triassic boundary superanoxia and stratified superocean: Records from lost deep sea. Science, 276: 235–238
Jane S F, Hansen G J A, Kraemer B M, et al. 2021. Widespread deoxygenation of temperate lakes. Nature, 594: 66–70
Jin Z J, Wang X M, Wang H J, et al. 2023. Organic carbon cycling and black shale deposition: An Earth System Science perspective. Natl Sci Rev, 10: nwad243
Kemp D B, Han Z, Hu X, et al. 2024. Global hydroclimate perturbations during the Toarcian oceanic anoxic event. Earth-Sci Rev, 258: 104946
Kennedy M J, Pevear D R, Hill R J. 2002. Mineral surface control of organic carbon in black shale. Science, 295: 657–660
Klemme H D, Ulmishek G F. 1991. Effective petroleum source rocks of the world: Stratigraphic distribution and controlling depositional factors. AAPG Bull, 75: 1809–1851
Kupka D, Gruba P. 2022. Effect of pH on the sorption of dissolved organic carbon derived from six tree species in forest soils. Ecol Indic, 140: 108975
Lalonde K, Mucci A, Ouellet A, et al. 2012. Preservation of organic matter in sediments promoted by iron. Nature, 483: 198–200
Lee C T A, Jiang H, Ronay E, et al. 2018. Volcanic ash as a driver of enhanced organic carbon burial in the Cretaceous. Sci Rep, 8: 4197
Liu B, Mastalerz M, Schieber J, et al. 2025. Organic matter enrichment in

black shales: How important are clay minerals? Org Geochem, 210: 105058
Liu Q, Li P, Jin Z, et al. 2021. Preservation of organic matter in shale linked to bacterial sulfate reduction (BSR) and volcanic activity under marine and lacustrine depositional environments. Mar Pet Geol, 127: 104950
Liu Q, Li P, Jiang L, et al. 2024. Distinctive volcanic ash-rich lacustrine shale deposition related to chemical weathering intensity during the Late Triassic: Evidence from lithium contents and isotopes. Sci Adv, 10: eadi6594
Liu Q Y, Pang Q, Shen J, et al. 2025. Volcanic fertilization of Late Triassic lacustrine algal blooms. Commun Earth Environ, 6: 201
Longman J, Mills B J W, Manners H R, et al. 2021. Late Ordovician climate change and extinctions driven by elevated volcanic nutrient supply. Nat Geosci, 14: 924–929
Lu Y B, Hao F, Shen J, et al. 2022. High-resolution volcanism-induced oceanic environmental change and its impact on organic matter accumulation in the Late Ordovician Upper Yangtze Sea. Mar Pet Geol, 136: 105482
Ma J L, Wei G J, Xu Y G, et al. 2007. Mobilization and re-distribution of major and trace elements during extreme weathering of basalt in Hainan Island, South China. Geochim Cosmochim Acta, 71: 3223–3237
Meysman F J R, Middelburg J J, Heip C H R. 2006. Bioturbation: A fresh look at Darwin's last idea. Trends Ecol Evol, 21: 688–695
Pickarski N, Kwiecien O, Litt T. 2023. Volcanic impact on terrestrial and aquatic ecosystems in the Eastern Mediterranean. Commun Earth Environ, 4: 167
Piper D Z, Calvert S E. 2009. A marine biogeochemical perspective on black shale deposition. Earth-Sci Rev, 95: 63–96
Pogge von Strandmann P A E, Jones M T, West A J, et al. 2021. Lithium isotope evidence for enhanced weathering and erosion during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum. Sci Adv, 7: eabh4224
Poudel M, Dunn B. 2017. Greenhouse carbon dioxide supplementation. Oklahoma Cooperative Extension Service, HLA–6723
Qiu R Y, Bao X J, Kemp D B, et al. 2025. Elevated atmospheric CO_2 drove spatial variability in terrestrial organic carbon burial during the Toarcian hyperthermal. Commun Earth Environ, 6: 700
Reershemius T, Planavsky N J. 2021. What controls the duration and intensity of ocean anoxic events in the Paleozoic and the Mesozoic? Earth-Sci Rev, 221: 103787
Rousk J, Brookes P C, Bååth E. 2009. Contrasting soil pH effects on fungal and bacterial growth suggest functional redundancy in carbon mineralization. Appl Environ Microbiol, 75: 1589–1596
Rousk J, Bååth E, Brookes P C, et al. 2010. Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil. ISME J, 4: 1340–1351
Scotese C R, Song H, Mills B J W, et al. 2021. Phanerozoic paleotemperatures: The Earth's changing climate during the last 540 million years. Earth-Sci Rev, 215: 103503
Shen J, Lei Y, Algeo T J, et al. 2013. Volcanic effects on microplankton during the Permian-Triassic transition (Shangsi and Xinmin, South China). Palaios, 28: 552–567
Shen J, Schoepfer S D, Feng Q, et al. 2015. Marine productivity changes during the end-Permian crisis and Early Triassic recovery. Earth-Sci Rev, 149: 136–162
Shen J, Yin R S, Zhang S, et al. 2022. Intensified continental chemical weathering and carbon-cycle perturbations linked to volcanism during the Triassic–Jurassic transition. Nat Commun, 13: 299
Sigman D M, Hain M P. 2012. The biological productivity of the ocean. Nat Educ Knowl, 3: 1–4
Sobolev S V, Sobolev A V, Kuzmin D V, et al. 2011. Linking mantle plumes, large igneous provinces and environmental catastrophes. Nature, 477: 312–316
Su W B, Huff W D, Ettensohn F R, et al. 2009. K-bentonite, black-shale and flysch successions at the Ordovician-Silurian transition, South China: Possible sedimentary responses to the accretion of Cathaysia to the Yangtze Block and its implications for the evolution of Gondwana. Gondwana Res, 15: 111–130
Svensen H, Planke S, Polozov A G, et al. 2009. Siberian gas venting and the end-Permian environmental crisis. Earth Planet Sci Lett, 277: 490–500
Twitchett R J, Barras C G. 2004. Trace fossils in the aftermath of mass extinction events. Geol Soc Lond Spec Publ, 228: 397–418
Tyson R V. 2005. The "productivity versus preservation" controversy: Cause, flaws, and resolution. SEPM Spec Publ, 82: 17–33
Ver Straeten C A. 2004. K-bentonites, volcanic ash preservation, and implications for Early to Middle Devonian volcanism in the Acadian orogen, eastern North America. Geo Soc Am Bull, 116: 474–489
Wiesner M G, Wang Y B, Zheng L F. 1995. Fallout of volcanic ash to the deep South China Sea induced by the 1991 eruption of Mount Pinatubo (Philippines). Geology, 23: 885–888
Wu A, Cao J, Zhang J, et al. 2025. Volcanically driven Hg–C–S cycling and climate change across the Early Permian Artinskian warming. Commun Earth Environ, 6: 887
Xie S C, Pancost R D, Yin H F, et al. 2005. Two episodes of microbial change coupled with Permo/Triassic faunal mass extinction. Nature, 434: 494–497
Xu G Z, Shen J, Algeo T J, et al. 2023. Limited change in silicate chemical weathering intensity during the Permian-Triassic transition indicates ineffective climate regulation by weathering feedbacks. Earth Planet Sci Lett, 616: 118235
Zhu G Y, Huang H P, Larter S. 2025. Impact of Permian Tarim and Emeishan large igneous provinces on petroleum systems and gas emissions in Tarim and Sichuan basins. Earth-Sci Rev, 263: 105072
Zou C N, Zhu R K, Chen Z Q, et al. 2019. Organic-matter-rich shales of China. Earth-Sci Rev, 189: 51–78

（责任编委：刘全有）