

文章编号:1673-5005(2023)06-0001-12 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2023.06.001

扬子地区奥陶纪—志留纪转折期多事件 耦合关系及有机质富集

梁超^{1,2}, 刘雨迪^{1,2}, 操应长^{1,2}, 吴靖³, 韩豫^{1,2}, 谢浩然^{1,2}, 籍士超^{1,2}

(1. 深层油气全国重点实验室(中国石油大学(华东)), 山东青岛 266580; 2. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 3. 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东青岛 266590)

摘要:从地质事件的影响角度出发,讨论扬子地区奥陶纪—志留纪转折期多地质事件的耦合关系、地质事件的环境响应以及对富有机质页岩发育的影响。结果表明:构造运动增强的大陆硅酸盐风化作用以及火山事件增加的碳埋藏都导致大气CO₂浓度的下降,当达到阈值以下便引发赫南特冰期事件;火山喷发出的硫会在平流层形成硫酸盐气溶胶,增加反射率,促进冰期的发展;冰期增大纬度温度梯度,促进上升流的形成;冰期降温的突发性、水体硫化缺氧环境的扩张以及火山事件所输入的汞和砷等有毒重金属是导致晚奥陶世生物大灭绝事件(LOME)的主要机制;火山事件输入的火山灰和上升流给海洋表层带来大量营养元素,以及冰期海平面迅速下降期间导致溶解性无机磷酸盐(DIP)浓度的增加,增强海洋初级生产力,促进有机质的生产;大量有机质在沉降过程中消耗氧气导致深层形成最小含氧带(OMZ),火山灰快速吸收溶解氧以及冰期结束海平面快速上升都会导致水体缺氧条件的扩张,从而有利于有机质的保存;主要的沉积作用是悬浮沉积,但局部也因构造运动、水体变浅以及陆源输入增强等因素发育部分重力滑塌、浊流、碎屑流、风暴流沉积。

关键词:奥陶纪—志留纪转折期;地质事件;耦合关系;环境响应;有机质富集;页岩发育

中图分类号:TE 122 **文献标志码:**A

引用格式:梁超,刘雨迪,操应长,等.扬子地区奥陶纪—志留纪转折期多事件耦合关系及有机质富集[J].中国石油大学学报(自然科学版),2023,47(6):1-12.

LIANG Chao, LIU Yudi, CAO Yingchang, et al. Coupling relationship of multiple events and enrichment of organic matter during Ordovician-Silurian transition period in Yangtze region [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2023, 47(6): 1-12.

Coupling relationship of multiple events and enrichment of organic matter during Ordovician-Silurian transition period in Yangtze region

LIANG Chao^{1,2}, LIU Yudi^{1,2}, CAO Yingchang^{1,2}, WU Jing³, HAN Yu^{1,2}, XIE Haoran^{1,2}, JI Shichao^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Deep Oil and Gas, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;
2. School of Geosciences in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;
3. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: From the perspective of geologic events, this study explores the interconnections between various geological occurrences, their environmental repercussions, and their influence on the development of organic-rich shale during the Ordovician-Silurian transition period in the Yangtze area. The findings indicate that continental silicate weathering intensified by tectonic movements and increased carbon burial due to volcanic events both contributed to a decline in atmospheric CO₂ concentration. This decrease in CO₂ concentration triggered the Hirnantian glaciation when it fell below a certain threshold. Sulfur released from volcanic eruptions formed sulfate aerosols in the stratosphere, increasing albedo and promoting the Hir-

收稿日期:2023-06-04

基金项目:国家自然科学基金项目(41902134, 42172165);中央高校基本科研业务费专项资金项目(22CX06001A);泰山学者工程项目(TSQN201812030)

第一作者及通信作者:梁超(1986-),男,教授,博士,博士生导师,研究方向为细粒沉积学。E-mail: liangchao0318@163.com。

nantian glaciation. The Hirnantian glaciation amplified the latitudinal temperature gradient, fostering upwelling. The abrupt cooling during the Hirnantian glaciation, the expansion of euxinia environments in the water column, and the introduction of toxic heavy metals like mercury and arsenic from volcanic events were the primary mechanisms leading to the Late Ordovician Mass Extinction (LOME). Volcanic ash input and upwelling from volcanic events brought substantial nutrients to the ocean surface. The rapid decline in sea level during the Hirnantian glaciation increased the concentration of dissolved inorganic phosphate (DIP), boosting oceanic primary productivity and organic matter production. The consumption of oxygen by abundant organic matter during subsidence resulted in the formation of an oxygen minimum zone (OMZ) in deeper layers. The swift uptake of dissolved oxygen by volcanic ash and the rapid rise in sea level at the end of the Hirnantian glaciation expanded anoxic conditions in the water column, aiding organic matter preservation. The primary sedimentation process was suspended sedimentation, although locally, gravity slumping, turbidity currents, clastic flows and storm surge deposits were also developed due to tectonic movement, shallow water columns, and increased terrigenous input.

Keywords: Ordovician-Silurian transition period; geological events; coupling relationship; environmental response; enrichment of organic matter; development of shale

奥陶纪—志留纪过渡期是地质历史关键转折期,该时期发生了一系列的地质事件,包括火山活动^[1-2]、冰期^[3]、上升流^[4-5]以及生物大灭绝事件^[6-7]。这些事件之间相互作用、相互影响,对古气候、海平面变化以及古海洋环境产生重大影响。这一特殊时期,全球广泛沉积富有机质页岩,扬子地区五峰组—龙马溪组富有机质页岩是中国页岩气勘探的主要目标,为缺氧深水环境中沉积的黑色页岩,总有机碳 TOC 含量高、成熟度和有机质类型适宜,有良好的烃源岩,具有可观的页岩气资源潜力^[8-9]。控制有机质富集的 3 个主要因素包括初级生产力、古氧化还原条件以及沉积速率,这 3 个因素均受气候与环境的影响。多种地质事件控制着页岩的沉积环境,导致不同环境下发育的页岩的有机质含量、含气量等储层性质存在显著差异。因此笔者依据前人研究成果,力图从地质事件的影响角度出发,讨论奥陶纪—志留纪转折期的多地质事件的耦合关系、地质事件的环境响应以及对富有机质页岩发育的影响,不仅可以为奥陶纪—志留纪转折期的气候变化以及地质事件的耦合关系提供重要认识,也对此时期有机质的富集和页岩沉积作用加深理解,为油气勘探的有利层段预测提供理论依据。

1 区域地质背景

在奥陶纪—志留纪转折期,由东南的华夏地块和东北的扬子地块组成的华南板块位于冈瓦纳大陆边缘的古赤道附近^[10](图 1(a))。扬子地块被广阔的陆缘海—扬子海覆盖,被华夏大陆、黔隆起和成都隆起围限形成一个局限海盆(图 1(b)),扬子海被九江海峡分为两部分:西部的上扬子海以及东部的下扬子海^[11]。震旦纪—志留纪,受加里东运动影

响,扬子地区经历寒武纪末的郁南运动、奥陶纪末的都匀运动和志留纪末的广西运动 3 次成盆阶段,形成裂谷盆地—裂陷盆地、坳陷盆地的成盆演化阶段(图 1(c))。从晚奥陶世到早志留世,加里东运动达到最高强度,华南地块经历强烈的造山活动,从被动边缘盆地演变为扬子地块东南边缘的前陆盆地^[12]。

受海侵以及构造活动的影响,奥陶纪—志留纪转折期沉积五峰组—龙马溪组富有机质黑色页岩。上奥陶统五峰组主要由黑色硅质页岩组成,并含有丰富的笔石、放射虫和海绵骨针等化石。晚奥陶世,观音桥段主要沉积介壳灰岩,被认为是冰期海平面短暂下降的结果^[13]。在志留纪早期,海平面快速上升,导致龙马溪组主要沉积黑色硅质页岩、灰色泥质粉砂岩以及灰色黏土质泥岩。

2 地质事件及耦合关系

2.1 火山事件

在奥陶纪—志留纪转折期,全球范围内都发生强烈的火山活动。在扬子地区的火山活动由斑脱岩记录下来。斑脱岩在岩心中呈浅灰色—深灰色,部分与黄铁矿伴生,有时也呈浅黄色,厚度大多数在 0.5~2 cm,其含大量黏土矿物,硬度较低,手感细腻而光滑。光学显微镜以及电镜下观察到其由黏土矿物、黄铁矿、棱角状石英、椭球状长石晶屑、水白云母、黑云母晶屑等组成。对斑脱岩的分布与厚度分析发现,其层数与厚度在垂向上具明显的分段性(图 2),集中分布在凯迪阶中上部 and 鲁丹阶下部,主要分为两个阶段,多数学者认为第一阶段开始的范围在 449.3~447.62 Ma,第二阶段开始的范围在 443.83~430.7 Ma^[16]。

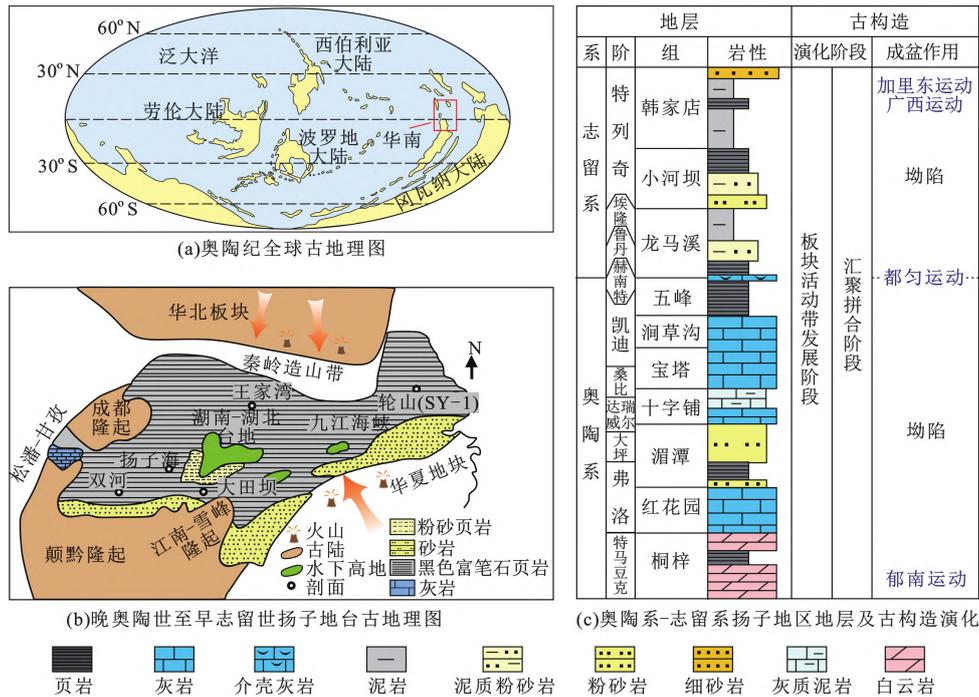


图 1 研究区古地理图、地层及古构造演化图(据文献[10]、[14]、[15],有修改)

Fig.1 Paleogeography, stratigraphic and paleotectonic evolution map of the research area

(After citation[10]、[14]、[15], modified)

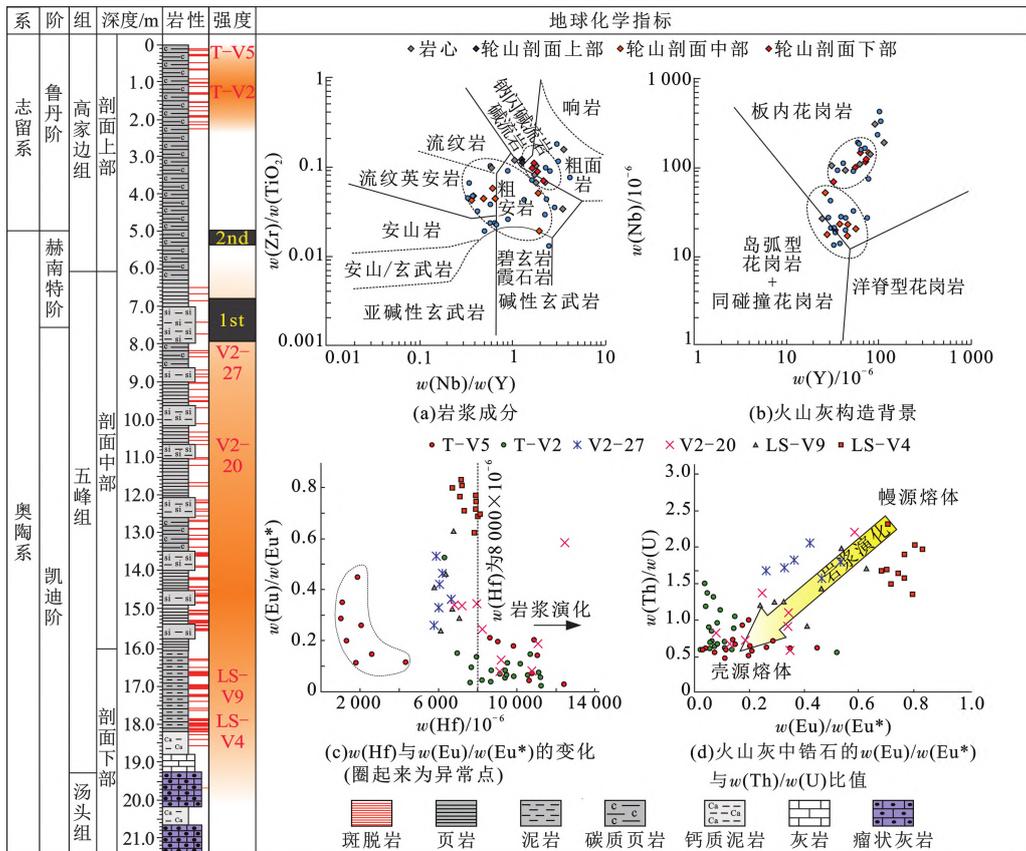


图 2 下扬子区轮山剖面地层及地球化学指标(据文献[2],有修改)

Fig.2 Integrated histograms of stratigraphy in Lun-shan section and geochemical indicators from Lower Yangtze region(After citation [2], modified)

Yang等^[2]根据斑脱岩的微量元素特征以及构造环境判别图解指示,其源岩主要为中酸性火山岩,其分布在粗面岩到流纹英安岩范围内,并有少量流纹岩和安山岩(图2(a)),其产出的主要构造背景为板内花岗岩(图2(b))。 $w(\text{Eu})/w(\text{Eu}^*)$ 和Hf含量的比值表明,火山灰中的锆石经历不同程度的岩浆演化(图2(c)),母岩浆经历2个阶段的明显分异和结晶温度,早期阶段,五峰组的样品形成于洋壳,来自于分异程度较弱的岩浆,结晶温度较高;晚期阶段,龙马溪组的样品形成于陆壳,来自分异程度较高的岩浆,结晶温度较低^[2]。 $w(\text{Eu})/w(\text{Eu}^*)$ 与 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 呈正相关(图2(d)),这表明地壳熔体的贡献大于幔源熔体,因为岩浆演化的过程中发生斜长石和含Th矿物的分馏^[2]。关于火山灰的来源,一种观点认为这些火山灰来源于南面,可能与华夏地块与扬子地块之间的汇聚相关(图1(b))^[17],华夏地块中存在大量同生火成岩,包括长英质和镁铁质岩石,这与火山灰的母岩浆一致,且下扬子地区的火山灰层比中—上扬子地区同期的火山灰层多,因此相关的火山口可能更靠近下扬子地区^[2]。另一种观点认为火山灰起源于秦岭造山带,扬子地台北面的北秦岭地区广泛发育早古生代的岛弧岩浆活动^[17](图1(b))。

2.2 赫南特冰期事件

发生在晚奥陶世赫南特期的冰川事件,持续约为1 Ma,导致热带表层海水温度下降约5℃^[3]。期间全球海平面经历大范围的波动,在冰期开始时下降约70~100 m^[14]。同时全球碳循环也经历强烈的波动, $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 存在显著正漂(约+3‰~+7‰)^[11]。对于碳同位素正漂原因的解释有2种观点:①碳埋藏增强或生产力增强所致;②是冰期海平面降低,碳酸盐台地增加风化的结果^[18-19]。赫南特期 $\delta^{34}\text{S}_{\text{pyrite}}$ 也发生显著的正漂(约+10‰),有学者认为扩大的硫化条件增加黄铁矿的埋藏比例,降低海洋中的硫酸盐浓度,进而导致海水和黄铁矿中的 $\delta^{34}\text{S}$ 更加富集^[20]。而Jones等^[19]通过模拟发现增加黄铁矿的埋藏量并不能达到实际的偏移量,有机质埋藏量的增加导致csSRR(细胞特异性硫酸盐还原率)增强,从而进一步导致 ϵ_{pyr} (微生物分馏指数)下降才是 $\delta^{34}\text{S}_{\text{pyrite}}$ 正漂的真正原因^[19]。

大气 CO_2 浓度的快速下降是导致气候变冷的直接原因^[18]。晚奥陶世,大气 CO_2 浓度迅速下降,

从当前大气浓度的14~22倍下降到8倍^[21]。全球构造体系向碰撞和造山运动转变,造山区域的化学侵蚀速率因地形起伏的增强而加快。硅酸盐风化导致大气 CO_2 浓度下降。有研究表明陆生维管植物的出现对加速硅酸盐矿物风化方面有重要作用^[22]。Kump等^[18]利用数值模拟证实风化作用对于大气 CO_2 浓度的影响。火山作用也可以降低大气中的 CO_2 浓度,方式主要有2种:①火山灰携带的大量营养元素进入海水中,使海洋浮游植物大量繁衍^[23],在光合作用的过程中, CO_2 被消耗并转化为有机碳,在浮游植物死后,有机碳被固定在沉积岩中;②火山喷发时形成许多新鲜岩石,很容易被风化,释放出钙离子和镁离子,在水中与碳酸根离子结合形成碳酸盐沉淀,将溶解在水中的 CO_2 固定在沉积地层中^[21]。相对于大气 CO_2 的巨大规模,火山喷发所排出的 CO_2 体量较小,对于温室效应的贡献有限。在赫南特早期大气 CO_2 分压就已经降低至阈值以下,出现全球降温,大陆冰盖开始形成并迅速增长,同时冰川反射率正反馈加速了这一过程^[18]。

2.3 上升流事件

上升流是海洋水体循环的重要过程,对气候变化和海洋生产力有极大的影响。气候变化和信风通常是上升流的主要原因,风和表层洋流之间的相互作用将富含营养的亚温跃层水和 CO_2 输送到海洋表层^[5]。上升流主要发生在现代海洋的狭窄区域,沿低纬度或中纬度大陆的西海岸垂直于赤道,与海岸平行的表层风通过埃克曼运输将水从海岸带走,随后下层温度较低的、营养丰富的水被补充到表层。在冰期,纬度温度梯度更大,结合信风能增强温盐环流的强度,产生更强烈的上升流^[4]。

受持续上升流影响的地区比受短暂/季节性上升流影响的地区通常具更高的 $w(\text{Cd})/w(\text{Mo})$ 比值、更低的 $w(\text{Co})\times w(\text{Mn})$ 和 $w(\text{Co}_{\text{EF}})\times w(\text{Mn}_{\text{EF}})$ 值。扬子地区从晚凯迪阶开始直到早鲁丹阶 $w(\text{Co})\times w(\text{Mn})$ 和 $w(\text{Co}_{\text{EF}})\times w(\text{Mn}_{\text{EF}})$ 下降至上升流阈值以下,指示上升流主要发生在晚凯迪阶到赫南特阶^[5](图3)。横向上,上升流的强度在地理位置上具有差异,且一般在扬子地区相对较深的水域更为强烈^[5]。研究世界范围内包含奥陶纪的硅质页岩,发现上升流是晚奥陶世生物硅质页岩沉积的重要因素,并在晚凯迪阶到赫南特阶之后硅质页岩丰度开始下降,这与华南发育的上升流一致。

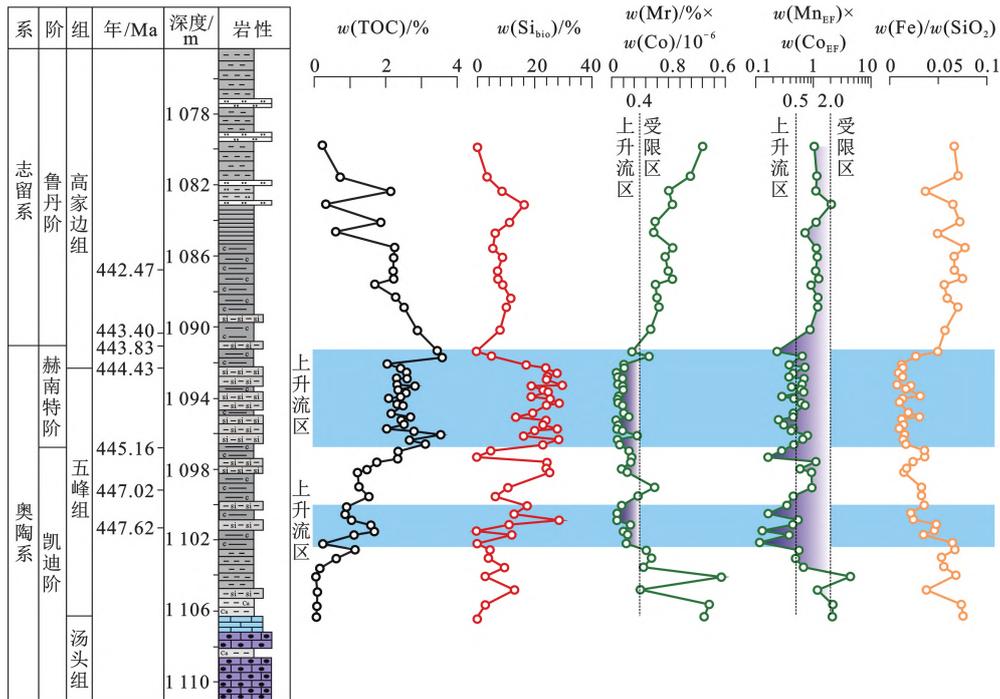


图 3 扬子地区 SY-1 井上升流指数及生产力变化指标(据文献[5],有修改)

Fig.3 Upwelling index and productivity change index of well SY-1 in Yangtze area(After citation [5], modified)

2.4 生物大灭绝事件

晚奥陶世生物大灭绝(LOME)是显生宙“五大”生物灭绝事件中的第一次,发生在 445~443 Ma。学界普遍认为,LOME 分为两幕,第一幕发生在冰期的起始阶段,全球海平面下降,随着海水的降温以及缺氧硫化的扩张,大量暖水动物群灭绝^[7];随后冰盖融化,海平面迅速上升,伴随着全球变暖和海洋缺氧硫化的扩张,引发第二幕生物灭绝^[7]。LOME 期间大多数造礁动物、腕足动物、棘皮动物、软体动物、介形虫和三叶虫等约 22%~26%的科、49%~61%的属以及 86%的物种在此次事件中遭到灭绝^[6]。

由于奥陶纪—志留纪转折期间环境发生剧变,所以 LOME 可能是多因素共同作用的结果。赫南

特早期是冰期的最大值,其持续时间仅为 0.2 Ma,因此有学者认为赫南特冰期的突发性以及严重性是 LOME 的重要机制^[11]。但冰川作用所引起的温度下降幅度能否引发生物灭绝事件是一个值得探讨的问题,在赫南特冰期热带地区,表层海水温度下降约 5 °C^[3],这与更新世冰期热带表层海水温度变化相当,然而更新世冰期并没有造成大规模的生物灭绝^[20]。也有学者认为,硫化缺氧环境的扩张可能才是晚奥陶世生物灭绝的主要灭绝机制^[20]。在灭绝第一幕,硫化缺氧环境在海洋混合层以下扩张,加上海平面快速下降,使得中上层的物种的栖息地严重丧失并且增大物种之间的竞争,当超过其生态的承载能力时就可导致物种灭绝(图 4)。在冰期结束

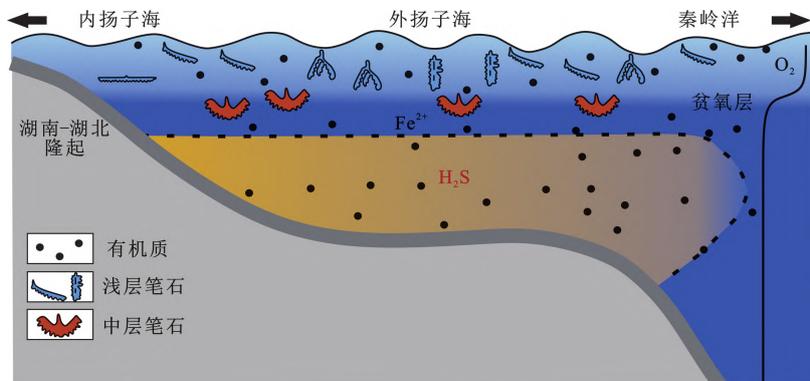


图 4 扬子地区缺氧硫化压缩生物栖息地的灭绝机制模型(据文献[24])

Fig.4 Extinction model of euxinia compressed habitat in Yangtze region(After citation[24])

后全球快速变暖冈瓦纳冰盖融化,导致海洋化学梯度的快速上升和增强,这意味着缺氧硫化环境的扩张也是生物灭绝第二幕的重要机制^[24-25]。火山喷发会向海水输入大量的汞、砷等有毒重金属元素,是导致 LOME 的重要因素之一(图 5)^[26]。也有学者认为强烈的火山活动将大量 CO₂ 释放大气中,约 30%的 CO₂ 可被海洋吸收造成海洋酸化^[6],这可以解释钙化海洋生物的灭绝和生态系统的失衡^[16]。

2.5 耦合关系

地质事件并非相互孤立,而是相互作用、相互影响,有着复杂的耦合关系(图 5)。

(1)构造运动和冰期:中晚奥陶世强烈的造山运动增强大陆硅酸盐的风化作用,导致大气 CO₂ 浓度下降^[18]。

(2)火山事件和冰期:一方面火山活动向海洋输入丰富的铁、磷、氮等营养元素,增加初级生产力,从而增加有机碳的埋藏^[23];另一方面火山灰风化后释放出丰富的钙镁离子,碳酸根离子结合后形成碳酸盐沉积物,进一步降低大气 CO₂ 的浓度,当大气

CO₂ 浓度降低到阈值以下时便引发冰期^[21]。同时火山喷发出的 SO₂ 和 H₂S 在平流层形成硫酸盐气溶胶,增加反射率,导致地表降温^[1]。同时冰期在冈瓦纳大陆形成大面积的冰盖,增强的反射率是冰期的良好正反馈^[18]。

(3)冰期和上升流:冰期表层海水温度的下降增大纬度温度梯度,促进上升流的形成。上升流将深水的营养物质输送到表层,增强初级生产力,从而增加有机碳的埋藏,降低大气 CO₂ 的浓度。

(4)冰期和生物灭绝:冰期海水迅速降温,因此认为赫南特冰期的突发性以及严重性是 LOME-1 的重要机制^[11],同时迅速下降的海平面增加 DIP 的浓度,使生产力得到增强,有机质的增加导致耗氧量的提升,从而导致缺氧硫化环境的扩张,这也是引发 LOME-1 的机制之一^[20]。冰期结束海平面上升导致的海洋缺氧硫化扩张,是引发 LOME-2 的机制^[25]。

(5)火山事件和生物灭绝:火山喷发时向海洋输入的汞和砷等有毒重金属是引发生物大灭绝的另一重要机制^[26]。

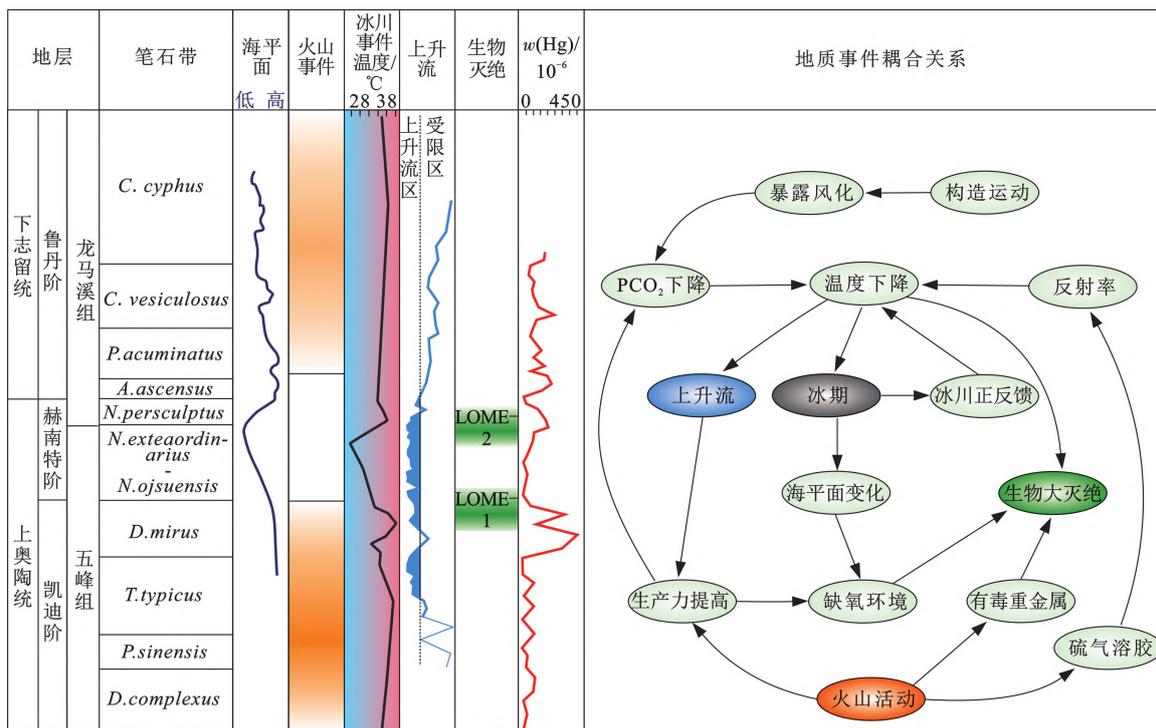


图 5 奥陶纪—志留纪转折期多地质事件及耦合关系(据文献[2],[3],[5],[25-27],有修改)

Fig.5 Multiple geological events and their coupling relationship during Ordovician Silurian transition period(After citation[2],[3],[5],[25-27], modified)

3 地质事件的环境响应

3.1 古气候

化学蚀变指数 CIA 值已经被广泛的作为化学

风化强度以及指示气候的指标,上扬子地区,奥陶纪—志留纪转折期细粒沉积物 CIA 值大多在 70~75,指示当时气候较为温暖湿润;而赫南特阶沉积物的 CIA 值大多在 60~70,表明当时处于寒冷干旱的

气候^[28](图 6)。气候的频繁变化主要受大气 CO₂ 浓度的控制(见 2.2 中的描述)。火山喷发的火山灰会遮挡部分阳光,可能会产生强烈的局部效应,但由于固体成分沉降速度较快,因此这种效应是短暂的。火山喷发的 SO₂ 或 H₂S 被氧化为 SO₄²⁻,在对流层 SO₄²⁻ 被降雨迅速移除,但在平流层中,硫酸盐气溶

胶的半衰期可能大于 1 a,硫酸盐气溶胶吸收太阳辐射,从而增加太阳辐射反射率,导致平流层升温以及地表降温^[1]。1991 年皮纳图博火山喷发向平流层注入 2 000 万 t SO₂,导致全球气温在 3 a 内连续下降 0.5 °C^[6]。

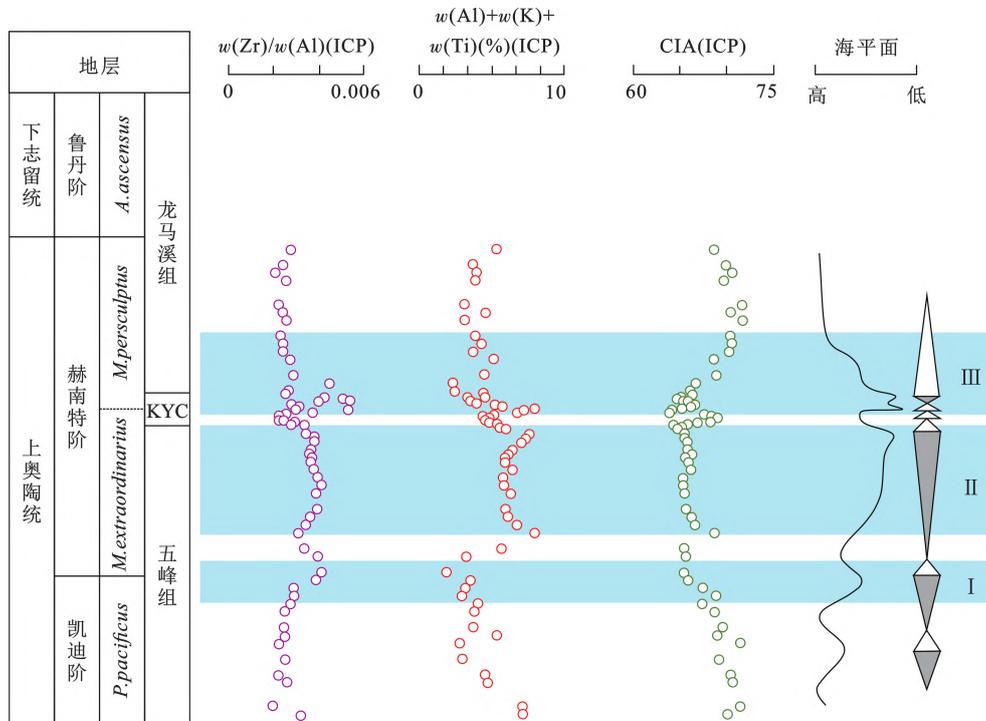


图 6 奥陶纪—志留纪转折期双河剖面气候及海平面变化(据文献[28],有修改)

(I、II、III 分别表示第一次、第二次、第三次海平面旋回)

Fig.6 Climate and sea level changes in Shuanghe section during the Ordovician-Silurian transition period

(After citation [28], modified) (I, II and III represent the first, second and third sea level cycles respectively)

3.2 海平面变化

Li 等^[28]通过高分辨率地球化学数据以及沉积证据揭示早凯迪阶到晚鲁丹阶的多个海平面旋回(图 6)。第一次海平面旋回在凯迪阶—赫南特阶边界,陆源碎屑指标 $w(Zr)/w(Al)$ 以及 $w(Al)+w(K)+w(Ti)$ 的值增加, CIA 值同期下降表明,冰川作用导致硅酸盐风化强度降低,解释冰盖扩张导致海平面下降的开始。随后的海侵可能是由于高纬度大陆上的冰盖消退,从而导致海平面上升, $w(Zr)/w(Al)$ 以及 $w(Al)+w(K)+w(Ti)$ 的值也从峰值回落。第二次海平面旋回开始于赫南特中期,海平面下降期间碎屑输入增加, $w(Zr)/w(Al)$ 以及 $w(Al)+w(K)+w(Ti)$ 的值也相应增加。随后 CIA 值出现峰值,海平面也在短时间内上升,表明存在间冰期。最后一次海平面旋回开始于观音桥地层内 *M. persculptus* 带底界面附近,沉积层中密集的贝壳碎片与分选较差

的颗粒可能是由于海平面下降期间的风暴事件造成,海退最低点代表最后一次冰川作用的最大值,与温度和硅酸盐风化的转折点的时间上一致^[3,18,28]。

3.3 海洋水体性质

Hammarlund 等^[20]的模型显示,海平面下降 100 m 可导致海洋溶解性无机磷酸盐(DIP)浓度增加 50%以上,因此更多的磷可增加海洋初级生产力,有机质的增加导致氧气消耗量的增加,从而导致缺氧环境的扩张。火山活动向海洋输入大量火山灰,所促进的浮游植物的大量繁殖会消耗水中过多的溶解氧^[16],并且大量沉积到海底的火山灰会通过耦合电子转移反应氧化与硅酸盐结合的 Fe^{II},快速吸收溶解氧^[29],造成缺氧条件。Liu 等^[30]对大田坝、双河以及王家湾地区的研究发现,大田坝以硫化环境为主,双河大部分以铁化环境为主,有短暂的硫化环境,王家湾则以铁化环境为主(图 7)。最明显的差

异在赫南特早期至中期的冰川低海平面期,王家湾地区属于氧化环境,而大田坝和双河地区属于缺氧环境。这表明在奥陶纪—志留纪转折期间,海洋环境具有很强的空间差异性,这可能与古地理的控制有关^[30]。除此之外,上升流对海洋元素的循环具有重要影响,如Si、C、N、P和Fe的循环^[4]。一般来说,Si

在海水中是不饱和的,大部分Si的沉积可能发生在大陆边缘、上升流区或由于大陆物源不足而限制Fe浓度的开阔海域。Fe/Si值与上升流指数较强的相关性表明扬子地区局部的缺铁环境可能是上升流活动和间歇性火山活动造成^[5](图3)。

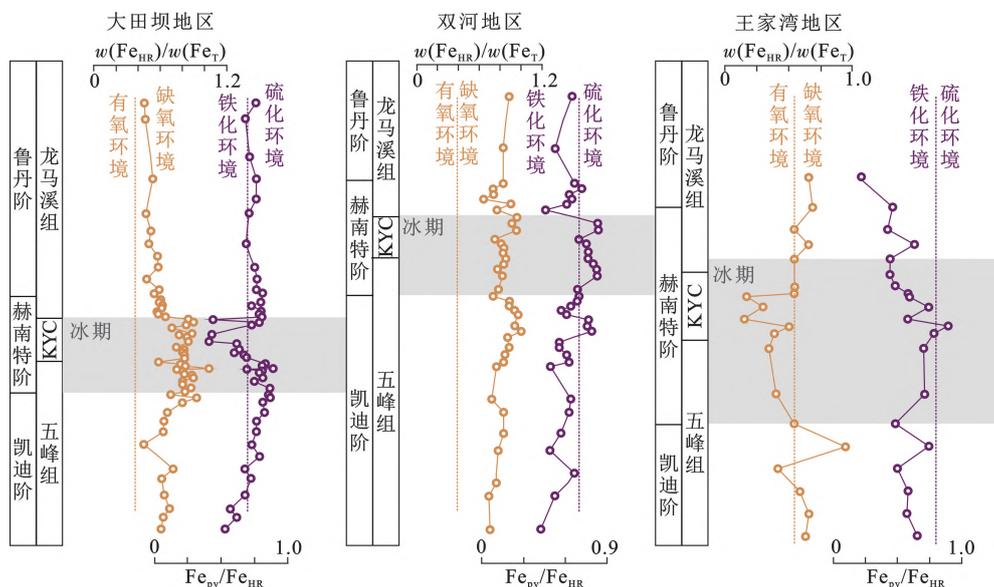


图7 大田坝地区、双河地区以及王家湾地区氧化还原条件地球化学指标(据文献[30],有修改)

Fig.7 Geochemical indexes of redox conditions in Datianba area, Shuanghe area and Wangjiawan area (After citation [30], modified)

4 地质事件与富有机质页岩发育

4.1 有机质富集

4.1.1 对生产力的影响

Cu与Ni常常与有机物一起保存在沉积物中,是良好的古生产力指标^[31]。Wu等^[32]研究发现,火山作用越强,非碎屑Cu和Ni的质量分数越高,指示古生产力越高。研究证实火山灰是表层海水的营养元素的重要来源,当火山灰落入海水中时,释放出大量的微量营养物质,有利于浮游植物的大量繁殖^[23]。随后以浮游植物为食的放射虫也开始繁衍,在短时间内积累大量有机质。但并不明确的是火山活动对初级生产力是否有长期的影响^[13]。现代火山环境记录表明,火山灰沉降区引发大规模的浮游植物繁殖,一般只能持续数周到数月,这与百万年的地质时间尺度相比差别较大。也有研究表明,当火山灰落入海水中时,大量的铁离子在短时间内被释放到海水中并形成铁络合物,这些络合物可以吸附磷^[33],海水中磷浓度的下降可能会抑制浮游生物的生长^[21]。海洋酸化、释放有毒物质并破坏海洋环境,也会进一步导致海洋浮游生物以及底栖生物快

速死亡。因此火山活动对生产力的促进或减弱目前仍没有明确的结论。

赫南特冰期期间,海平面的迅速下降可能会导致DIP浓度的增加,因此更多的磷可增加初级生产力^[20](图8)。冰期结束后发生大规模海侵, $w(\text{Mo})/w(\text{TOC})$ 比值升高,指示此时局限封闭的水体系统变得更加开放(图8),温暖且富氧的表层海水促进海绵骨针及笔石等成烃生物的大量繁殖^[32]。上升流也是提高生产力的重要驱动因素,富含营养的深水可在上升流的作用下被带到表层海水,从而提高表层海水的初级生产力,溶解硅也由深层带到表层,为硅质生物繁盛提供物质基础。

4.1.2 对保存条件的影响

火山活动、上升流以及在冰期海平面快速下降期间均能促进生产力的发展,大量有机质在沉降的过程中,降解所消耗氧气的速率超过表层含氧水向深层水体输送氧气的速率,从而导致深层形成最小含氧带(OMZ),促进有机质的保存^[13,34]。且大量沉积到海底的火山灰也会快速吸收溶解氧形成缺氧硫化条件^[29],降低有机质的分解速度,给有机质的快速埋藏和高保存率提供保证。在赫南特阶海平面处

于低位时,水体富氧,不利于有机质的保存,虽然生源 Ba 和 P 含量较高,但 TOC 含量较低(图 8)。而在凯迪阶上部,海平面较高,Mo_{EF} 值较高,底层水体

缺氧,以及鲁丹阶气候回暖,发生大规模海侵,海平面迅速上升,导致底层水体转变为缺氧条件,Mo_{EF} 和 U_{EF} 值升高(图 8),促进有机质的保存^[32]。

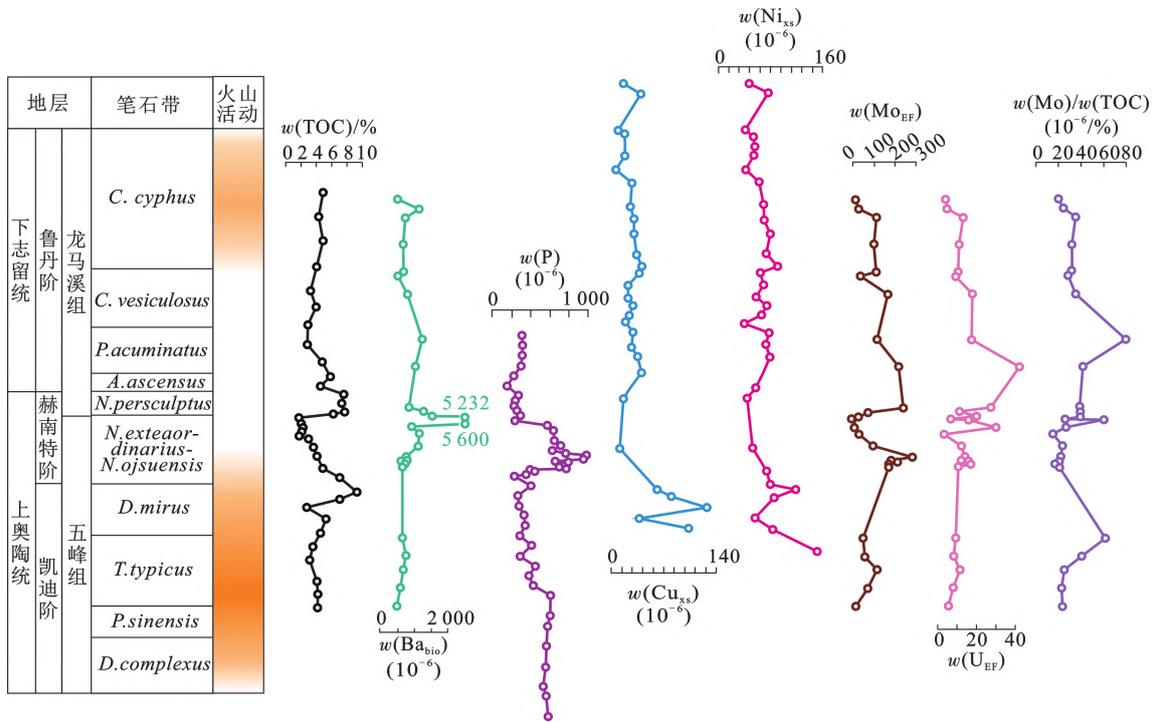


图 8 扬子地区有机质富集的“生产”与“保存”地球化学指标(据文献[14]、[32]、[34],有修改)

Fig.8 Geochemical indicators of "production" and "preservation" of organic matter enrichment in Yangtze area(After citation[14]、[32]、[34],modified)

4.2 页岩沉积作用

扬子地区页岩沉积作用类型多样,包括悬浮沉积、浊流、碎屑流、风暴流和重力滑塌。综合地质事件、沉积环境演化、岩相及沉积作用类型,建立奥陶纪—志留纪转折期间的沉积模式(图 9)。在五峰组沉积期间,上扬子海是一个半局限盆地,受古地块以及古隆起限制,与秦岭洋隔绝。沉积水体较为安静、局限且缺氧,陆源输入影响较少,因此有利于有机质的保存^[16]。在上升流的作用下海水中的放射虫、海绵等生物比较繁盛,主要是在悬浮沉积的作用下发育富含有机质的生物硅质页岩以及黏土质页岩,生物硅质页岩镜下可见放射虫化石丰富(图 10(a)),硅质主要是微晶自生石英,其主要来源于硅质生物碎屑的部分溶解^[5,35]。黏土质页岩岩心黑色—灰黑色(图 10(b)),部分镜下可见黏土透镜体(图 10(c))。悬浮沉积是五峰组—龙马溪组页岩主要的沉积过程,其沉积时水体较深,水动力条件较弱,沉积速率较慢,粗碎屑颗粒较少(图 10(c))。

随后赫南特冰期全球气温显著下降,风化速度明显降低,冈瓦纳大陆形成大量冰盖,全球海平面快

速下降,气候变得寒冷干旱^[11]。发育少量风暴流沉积,常具底冲刷面结构,夹有疑似生物逃逸的粉砂夹层(图 10(d)),可见丘状交错层理、平行层理以及水平层理等层理构造,指示其为风暴成因。

冰期结束后,全球海平面快速上升,生物也在富氧表层水体大量复苏^[32]。低频的火山活动以及缺氧的水体为有机质提供有利的保存条件,主要沉积生物硅质页岩。随后盆地周缘古陆进一步抬升,陆源物质的供给速率加快,可见浊流、重力滑塌以及碎屑流沉积。黑色页岩中可见粉砂岩夹层,往往与页岩有明显的突变接触,具槽模构造和正粒序结构(图 10(e)),底部发育的波状层理和水平层理,到顶部发育的块状层理,这一沉积序列符合鲍玛序列的 C、D、E 段,为浊流沉积。碎屑流沉积岩相之间突变接触,可见高角度的侵蚀面及悬浮的泥岩撕裂屑(图 10(f))。重力滑塌一般是水下发生滑坡,沉积层内发生变形、揉皱、岩性混杂(图 10(g)),由于水体变浅以及陆源碎屑输入使得粉砂质含量增多。底流作用的增强以及大量陆源物质稀释有机质,再加上此时沉积环境演变为弱氧化—氧化为主^[32],不利

于有机质的保存,沉积贫有机质的粉砂质页岩。粉砂质含量较高,可见粉砂质与泥质纹层相间(图10(i))。

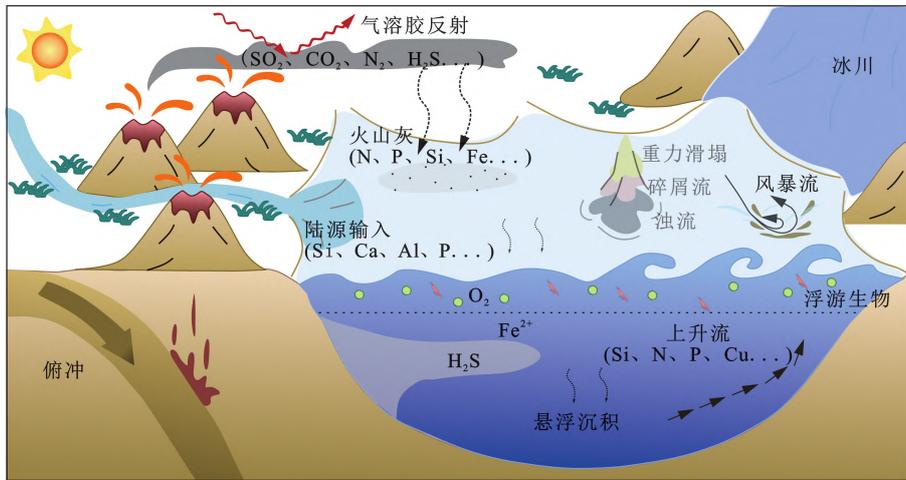


图9 奥陶纪—志留纪转折期扬子地区沉积模式

Fig.9 Depositional model of Yangtze area during Ordovician-Silurian transition period

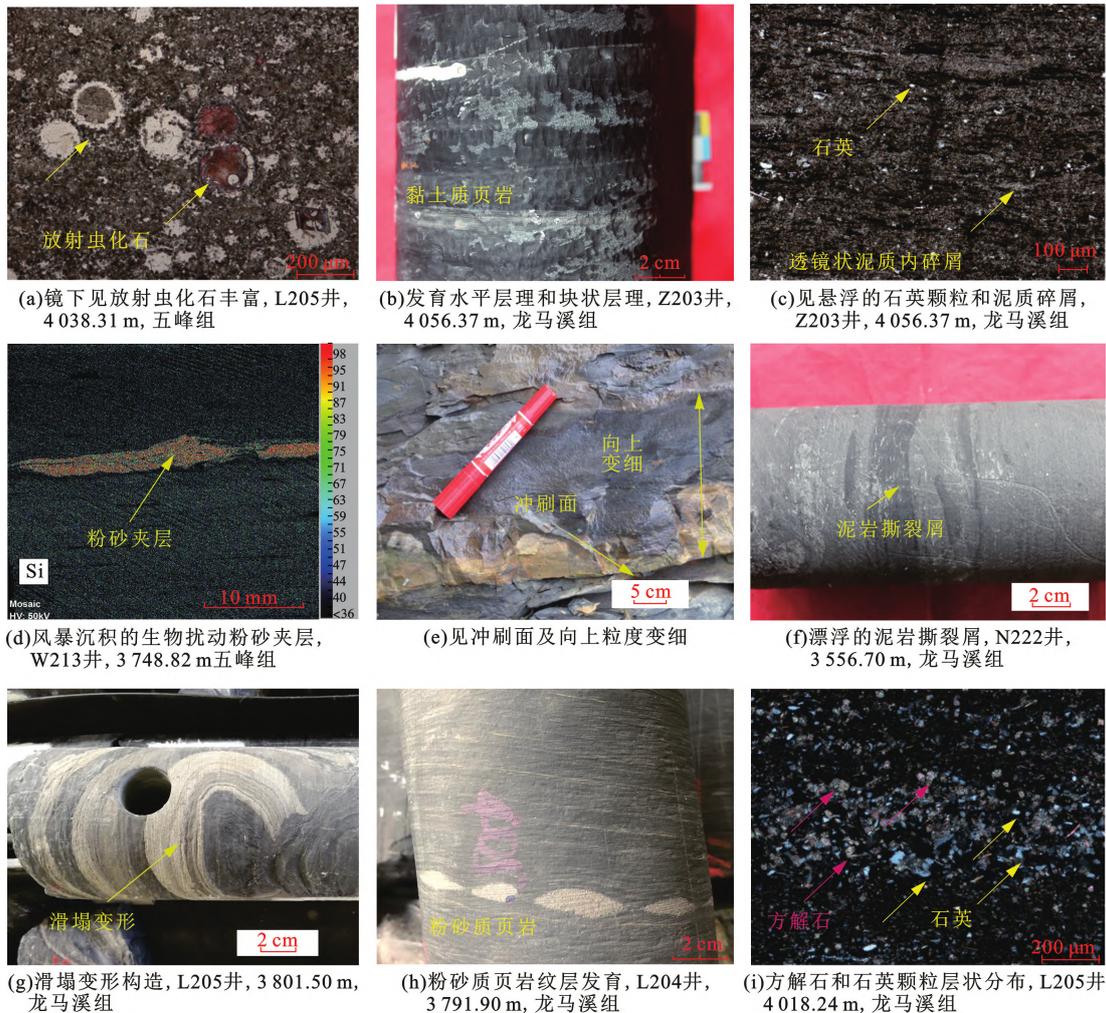


图10 晚奥陶世—早志留世扬子地区不同沉积作用形成页岩岩相差异及沉积构造

Fig.10 Difference of shale lithofacies and sedimentary structure formed by different sedimentation processes in Yangtze region during the late Ordovician-Early Silurian

5 结 论

(1) 奥陶纪—志留纪转折期发生包括火山活动、赫南特冰期、上升流事件以及生物大灭绝等多个地质事件,有着复杂的耦合关系。构造运动增强的大陆硅酸盐风化作用和火山活动促进海洋初级生产力增加有机碳的埋藏都导致大气 CO₂ 浓度的下降,当大气 CO₂ 浓度到达阈值便引发赫南特冰期事件。火山喷发的硫所形成的硫酸盐气溶胶与冰川作用形成的冰盖增强反射率,促进冰川作用的发展。冰川作用增大纬度温度梯度,促进上升流的形成。冰期导致的海水降温、水体缺氧环境的扩张以及火山喷发输入的大量有毒重金属是生物大灭绝事件的主要机制。

(2) 晚奥陶世—早志留世有机质的富集很大程度上受地质事件的影响。火山活动输入的火山灰以及上升流给海洋表层带来大量营养元素,增强海洋初级生产力的繁荣,促进有机质的生产。火山灰快速吸收溶解氧、冰川作用控制的海平面升降以及有机质分解对于溶解氧的消耗都会造成海洋缺氧环境的扩张,从而有利于有机质的保存。

(3) 五峰组—龙马溪组页岩主要是在低能条件下悬浮沉积,在五峰组受上升流影响,主要发育生物硅质页岩以及富有机质的黏土质页岩;顶部由于水体变浅,沉积介壳灰岩以及泥质灰岩,发育少量风暴流沉积;龙马溪组下部海侵主要沉积生物硅质页岩;上部由于构造运动以及陆源输入的增加,沉积贫有机质的粉砂质页岩,发育重力滑塌、碎屑流以及浊流。

参考文献:

[1] BUGGISCH W, JOACHIMSKI M, LEHNERT O, et al. Did intense volcanism trigger the first Late Ordovician icehouse? [J]. *Geology*, 2010,38:327-330.

[2] YANG S, HU W, WANG X, et al. Duration, evolution, and implications of volcanic activity across the Ordovician-Silurian transition in the Lower Yangtze region, South China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019,518:13-25.

[3] FINNEGAN S, BERGMANN K, EILER J M, et al. The Magnitude and Duration of Late Ordovician-Early Silurian Glaciation [J]. *Science*, 2011,331(6019):903-906.

[4] POPE M C, STEFFEN J B. Widespread, prolonged late Middle to Late Ordovician upwelling in North America: a proxy record of glaciation? [J]. *Geology*, 2003,31(1):

63-66.

[5] YANG S, HU W, WANG X. Mechanism and implications of upwelling from the Late Ordovician to early Silurian in the Yangtze region, South China [J]. *Chemical Geology*, 2021,565:1-13.

[6] BOND D, GRASBY S E. On the causes of mass extinctions [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2017,478:3-29.

[7] HARPER D. Late ordovician extinctions [M]. Netherlands: Elsevier, 2020:1-11.

[8] 梁超,姜在兴,杨懿婷,等.四川盆地五峰组—龙马溪组页岩岩相及储集空间特征 [J]. *石油勘探与开发*, 2012,39(6):691-698.

LIANG Chao, JIANG Zaixing, YANG Yiting, et al. Characteristics of shale lithofacies and reservoir space of the Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012,39(6):691-698.

[9] LIANG C, JIANG Z, ZHANG C, et al. The shale characteristics and shale gas exploration prospects of the Lower Silurian Longmaxi shale, Sichuan Basin, South China [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2014,21:636-648.

[10] LI Y, ZHANG T, ELLIS G S, et al. Depositional environment and organic matter accumulation of Upper Ordovician-Lower Silurian marine shale in the Upper Yangtze Platform, South China [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2017,466:252-264.

[11] YAN D, CHEN D, WANG Q, et al. Carbon and sulfur isotopic anomalies across the Ordovician-Silurian boundary on the Yangtze Platform, South China [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2009,274(1/2):32-39.

[12] WU J, LIANG C, YANG R C, et al. The genetic relationship between paleoenvironment, mineral compositions and lithofacies in the Ordovician-Silurian Wufeng-Longmaxi sedimentary succession in the Sichuan Basin, SW China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2022,236:1-16.

[13] LU Y, HAO F, LU Y, et al. Lithofacies and depositional mechanisms of the Ordovician-Silurian Wufeng-Longmaxi organic-rich shales in the Upper Yangtze area, southern China [J]. *Aapg Bulletin*, 2020,104(1):97-129.

[14] ZHOU L, ALGEO T J, SHEN J, et al. Changes in marine productivity and redox conditions during the Late Ordovician Hirnantian glaciation [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2015,420:223-234.

- [15] 陆扬博. 上扬子五峰组和龙马溪组富有机质页岩岩相定量表征及沉积过程恢复[D]. 武汉: 中国地质大学, 2020.
- LU Yangbo. Quantitative characterization of lithofacies and reconstruction of the sedimentary process for Upper Yangtze Wufeng and Longmaxi organic-rich shales[D]. Wu Han: China University of Geosciences, 2020.
- [16] WU L, LU Y, JIANG S, et al. Effects of volcanic activities in Ordovician Wufeng-Silurian Longmaxi period on organic-rich shale in the Upper Yangtze area, South China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(5): 862-872.
- [17] SU W, HUFF W D, ETTENSOHN F R, et al. 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[J]. *Gondwana Research*, 2009, 15(1): 111-130.
- [18] KUMP L R, ARTHUR M A, PATZKOWSKY M E, et al. A weathering hypothesis for glaciation at high atmospheric $p\text{CO}_2$ during the Late Ordovician[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1999, 152(1/2): 1-187.
- [19] JONES D S, FIKE D A. Dynamic sulfur and carbon cycling through the end-Ordovician extinction revealed by paired sulfate-pyrite $\delta^{34}\text{S}$ [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2013, 363: 144-155.
- [20] HAMMARLUND E U, DAHL T W, HARPER D A T, et al. A sulfidic driver for the end-Ordovician mass extinction[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 331: 128-139.
- [21] TAO H, QIU Z, LU B, et al. Volcanic activities triggered the first global cooling event in the Phanerozoic[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2020, 194: 1-9.
- [22] MOULTON K L, BERNER R A. Quantification of the effect of plants on weathering: studies in Iceland[J]. *Geology*, 1998, 26(10): 895-898.
- [23] LANGMANN B, ZAKSEK K, HORT M, et al. Volcanic ash as fertiliser for the surface ocean[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(8): 3891-3899.
- [24] LI N, LI C, ALGEO T J, et al. Redox changes in the outer Yangtze Sea (South China) through the Hirnantian Glaciation and their implications for the end-Ordovician biocrisis[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 212: 1-14.
- [25] LIU M, CHEN D, JIANG L, et al. Oceanic anoxia and extinction in the latest Ordovician[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2022, 588: 1-12.
- [26] GONG Q, WANG X, ZHAO L, et al. Mercury spikes suggest volcanic driver of the Ordovician-Silurian mass extinction[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 1-7.
- [27] LIU Z, ALGEO T J, GUO X, et al. Paleoenvironmental cyclicity in the Early Silurian Yangtze Sea (South China): tectonic or glacio-eustatic control? [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2017, 466: 59-76.
- [28] LI C, ZHANG J, LI W, et al. Multiple glacio-eustatic cycles and associated environmental changes through the Hirnantian (Late Ordovician) in South China [J]. *Global and Planetary Change*, 2021, 207: 1-14.
- [29] HEMBURY D J, PALMER M R, FONES G R, et al. Uptake of dissolved oxygen during marine diagenesis of fresh volcanic material [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2012, 84: 353-368.
- [30] LIU Y, LI C, ALGEO T J, et al. Global and regional controls on marine redox changes across the Ordovician-Silurian boundary in South China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 463: 180-191.
- [31] ALGEO T J, ROWE H. Paleooceanographic applications of trace-metal concentration data[J]. *Chemical Geology*, 2012, 324: 6-18.
- [32] WU L, LU Y, JIANG S, et al. Relationship between the origin of organic-rich shale and geological events of the Upper Ordovician-Lower Silurian in the Upper Yangtze [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 102: 74-85.
- [33] SCHOEPFER S D, SHEN J, WEI H, et al. Total organic carbon, organic phosphorus, and biogenic barium fluxes as proxies for paleomarine productivity[J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 149: 23-52.
- [34] WANG D, LIU Y, ZHANG J, et al. Controls on marine primary productivity variation and organic matter accumulation during the Late Ordovician-Early Silurian transition[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 142: 1-15.
- [35] LIANG C, JIANG Z, CAO Y, et al. Sedimentary characteristics and paleoenvironment of shale in the Wufeng-Longmaxi Formation, North Guizhou Province, and its shale gas potential[J]. *Journal of Earth Science*, 2017, 28(6): 1020-1031.

(编辑 李娟)