

DOI: 10.12474/cdlgzrxx.2026042101



事件沉积学——发展历程、研究现状及未来趋势

田景春^{1,2*}, 张翔¹, 林小兵¹, 梁庆韶¹, 王峰¹,
孟万斌², 杨田^{1,2}

1. 成都理工大学沉积地质研究院, 成都 610059;

2. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室(成都理工大学), 成都 610059

[摘要] 事件沉积学作为沉积学的重要分支学科之一, 专注于研究地质历史时期各类突发性地质事件(如地震、洪水、风暴、浊流、火山喷发等)所形成的事件沉积层的特征、成因机制与分布规律, 为深刻认识沉积圈层演化、重建地球演化史提供关键证据。本文在系统梳理事件沉积学领域前人研究成果的基础上, 全面阐述了事件沉积学的发展历程, 主要包括: 思想萌芽、理论奠基、学科形成和快速发展 4 个阶段; 系统总结了中外对地震、洪水、冰川、风暴、海啸、碎屑流、浊流、缺氧及火山等 9 类事件沉积研究取得的进展, 分析了中外研究成果的异同, 明确了下一步研究的重点, 包括建立多指标判别标志、定量反演事件发生的周期及强度、厘定多事件耦合关系、阐明事件沉积的环境、资源意义等。深入探讨了事件沉积学未来深化发展的 4 个主要方向, 包括: 向高精度、多指标、定量化表征方向迈进; 强化多类型事件沉积的耦合与“事件链”系统研究; 深化多学科交叉融合, 催生新的理论生长点; 拓展学科应用领域, 服务国家重大战略。总之, 事件沉积学通过解码沉积圈中的“事件记忆”层, 有助于深化对地史时期与现代突发性地质事件的认知, 其发展必将成为预测未来地球系统行为、保障资源安全与防范灾害风险的关键基础学科之一。

[关键词] 事件沉积学; 发展历史; 研究现状; 发展趋势; 综述

[分类号] P539.6

[文献标志码] A

Event sedimentology: development history, research progress, and future perspectives

TIAN Jingchun^{1,2*}, ZHANG Xiang¹, LIN Xiaobing¹, LIANG Qingshao¹, WANG Feng¹,
MENG Wanbin², YANG Tian^{1,2}

1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. State Key Laboratory of Reservoir Geology and Development Engineering, Chengdu University of Technology,
Chengdu 610059, China

收稿日期: 2026-04-21; **改回日期:** 2026-05-25。

责任编辑: 魏 巍。

期刊主页: <https://xbzrxx.cdut.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(42372141, 42172135); 国家十三五科技重大专项(2016ZX05046-005-01); 国家十五五科技重大专项(2025ZD1400204)。

***通信作者:** 田景春(1963—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 沉积地质学, E-mail: tjc@cdut.edu.cn。

引用格式: 田景春, 张翔, 林小兵, 等, 2026. 事件沉积学——发展历程、研究现状及未来趋势[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 53(4): 891—914.

Tian J C, Zhang X, Lin X B, et al., 2026. Event sedimentology: development history, research progress, and future perspectives[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 53(4): 891—914.

Abstract: Event sedimentology, as one of the most important branches of sedimentology, focuses on the characteristics, genetic mechanisms, and distribution patterns of event deposits formed by various episodic geological events throughout Earth's history, such as earthquakes, floods, storms, turbidity currents, and volcanic eruptions. It provides critical evidence for understanding the evolution of sedimentary systems and reconstructing Earth's evolutionary history. Based on a comprehensive review of previous studies in the field, this paper systematically outlines the developmental history of event sedimentology, which can be divided into four major stages: conceptual emergence, theoretical foundation, disciplinary establishment, and rapid development. Furthermore, the research progress on nine major types of event deposits, including seismic, flood, glacial, storm, tsunami, debris-flow, turbidite, anoxic, and volcanic deposits, is comprehensively summarized. Similarities and differences between domestic and international studies are analyzed, and key future research priorities are identified, including the establishment of multi-proxy identification criteria, quantitative reconstruction of event periodicity and intensity, clarification of the coupling relationships among multiple events, and elucidation of the environmental and resource significance of event deposits. The paper also discusses four major directions for the future advancement of event sedimentology: (1) developing toward high-resolution, multi-proxy, and quantitative characterization; (2) strengthening research on the coupling of multiple event deposits and integrated “event-chain” systems; (3) promoting interdisciplinary integration to foster new theoretical breakthroughs; and (4) expanding application fields to support major national strategic needs. In summary, by decoding the “event memory” preserved within sedimentary records, event sedimentology enhances our understanding of both ancient and modern episodic geological events. Its continued development will undoubtedly establish it as a key foundational discipline for predicting future Earth system behavior, ensuring resource security, and mitigating geological hazards.

Key words: event sedimentology; development history; research progress; development trends; review

自 Hatch and Rastall(1913)的《沉积岩石学》一书出版至今(2026年),沉积学学科的发展经历了沉积岩石学→沉积学→沉积地质学→沉积圈科学4个阶段(图1),并逐步衍生出大地构造沉积学、实验沉积学、储层沉积学、矿床沉积学、事件沉积学等重要分支学科。其中,事件沉积学以突发性地质事件所形成的沉积记录为主要研究对象,自20世纪50年代兴起以来,研究内涵不

断拓展,理论体系日趋完善,创新成果持续涌现,已成为现代沉积学的重要发展方向之一。

当前,在沉积学向沉积圈科学转型的新阶段(王成善等,2025),系统梳理事件沉积学的发展历程、研究现状和未来趋势,对于重构地球圈层相互作用的临界过程与演化规律具有重要意义;同时,也有助于建立高精度时间框架,推动深时全球变化研究;有助于指导关键能源与矿产预

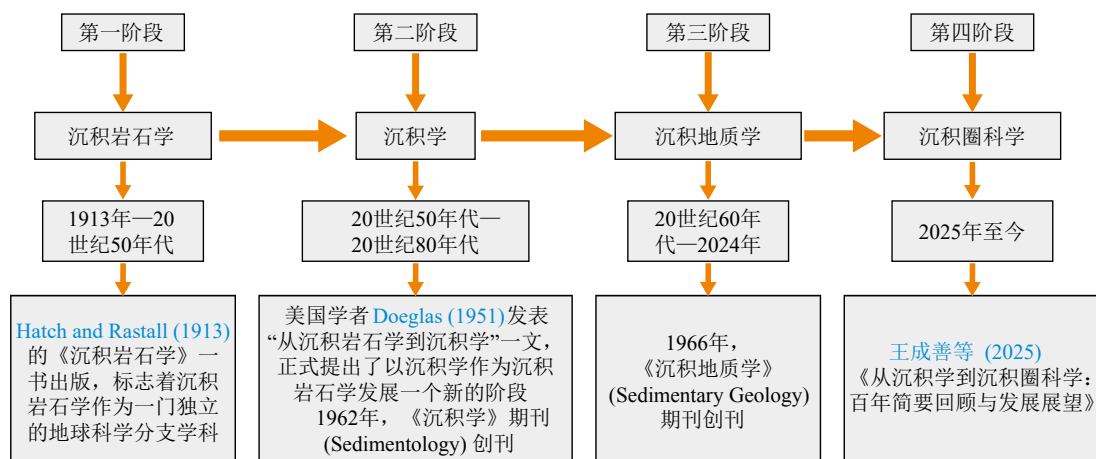


图 1 沉积学的发展阶段

Fig. 1 Developmental stages of sedimentology

测;有助于理解地质灾害发生机理,为现代地质灾害评价提供类比。

1 事件沉积学的发展历程

早在20世纪20年代地质学界就开始了事件沉积研究,但直到20世纪90年代才真正提出“事件沉积”的概念(Einsele, 1996),事件沉积学逐渐形成。本文通过系统梳理将事件沉积学的发展历程总结为“思想萌芽、理论奠基、学科形成与快速发展”4个阶段(图2)。

1.1 思想萌芽阶段(20世纪60年代以前)

20世纪60年代以前,地质学家通过观察,在沉积圈层中识别出许多不同于正常缓慢沉积的、特征独特的岩层。如难以用正常沉积或构造作用解释的软沉积变形构造、具有丘状/洼状交错层理的砂岩层等,以及出现在深海环境中的复理石建造等。

尽管这些地质观察是零散的,尚没有统一的理论知识体系解释其成因。但这些现象被视为正常沉积背景下“异常”或“灾变”作用的产物,是突发性地质事件造成的结果。这就为事件沉积学的形成提供了思想萌芽。

1.2 理论奠基阶段(20世纪60—70年代)

地质学界渐变论与灾变论长期并存,20世纪

70年代前渐变论主导,聚焦沉积韵律与旋回;70年代后,随着K-Pg、P-T等界线生物灭绝事件研究复兴,“新灾变论”成为解释突发地质过程的核心框架,并衍生出以事件层为对比依据的事件地层学,推动了生物地层学与岩石地层学的融合。

同期,沉积学经历了3次革命:50年代浊积岩(Kuenen and Migliorini, 1950)、70年代深海泥质浊积岩及风暴岩的发现,重塑了沉积动力学认知。此外,伴随震积岩、海啸岩及震浊积岩的发现与系统研究,以及K-T(Alvarez et al., 1980)、F-F(Kuenen and Migliorini, 1950)界线的生物绝灭事件、C-PrC(张勤文等, 1984; 许靖华等, 1986)、P-T(徐道一和卢演传, 1985; 柴之芳等, 1986)界线上铍含量的异常及 $\delta^{13}\text{C}$ 曲线的突变等地外事件沉积的证实,事件沉积学的理论与实证基础全面奠定。

1.3 学科形成阶段(20世纪80—90年代)

Einsele and Seilacher(1982)主编的文集《Cyclic and Event Stratification》问世具有里程碑意义。该著作以海相沉积物(岩)为例,首次系统区分了由缓慢过程形成的旋回沉积物(高频、难保存)和由突发性事件形成的事件沉积物(低频、易识别)。这一认识为事件沉积学学科最终形成起到了决定性作用。

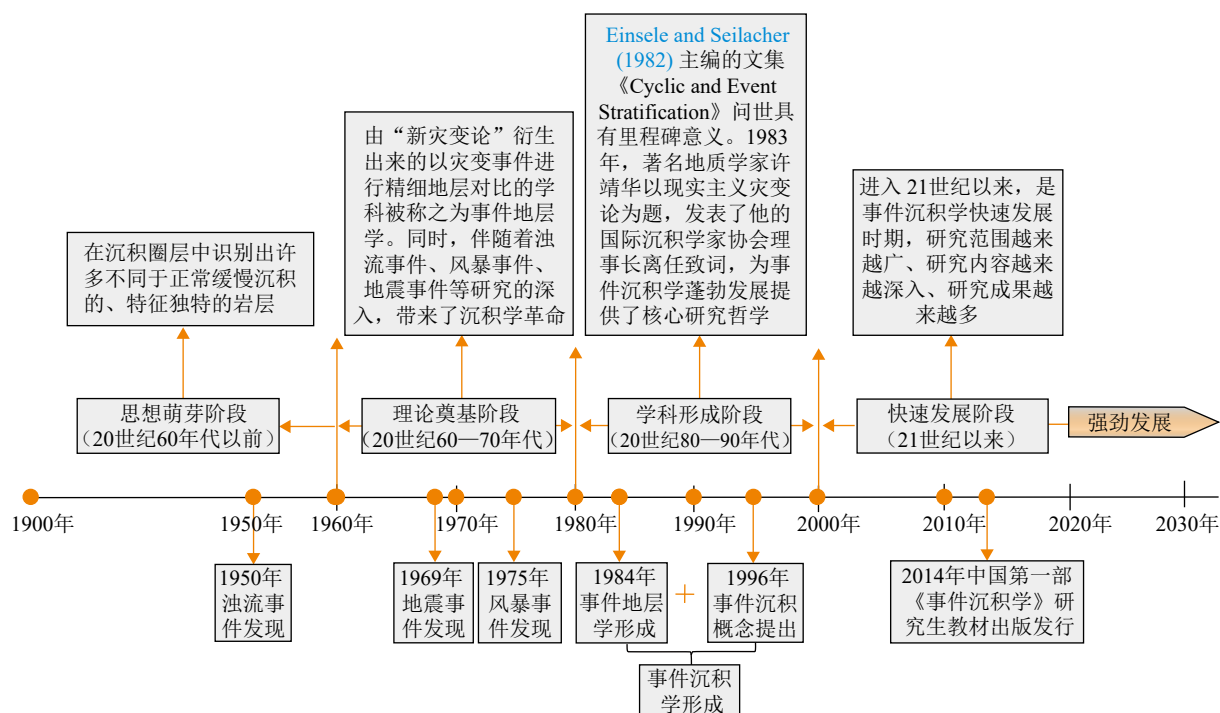


图2 事件沉积学的发展历程及发展过程中的重要事件

Fig. 2 Development history of event sedimentology and key events in its evolution

1983 年,著名地质学家许靖华在其离任国际沉积学家协会理事长时,以“现实主义灾变论”为题指出:稀罕事件之所以罕见,并不在于它们的性质,而在于其规模之大。它们庞大的规模必然会完全改变事情的面貌或引起灾变,而大的灾变必然将其记录遗留在沉积物中。因此,沉积学家必须接受现实主义的灾变论作为研究哲学(Hsü, 1983)。这一思想极大地推动了“新灾变论”在沉积学研究中的应用,为事件沉积学提供了核心研究哲学。

1.4 快速发展阶段(21 世纪以来)

进入 21 世纪以来,事件沉积学进入了快速发展阶段,高水平研究成果持续涌现,如中国首部《事件沉积学》研究生教材(田景春, 2014)及《鄂尔多斯盆地延长组事件沉积学研究》专著(田景春等, 2026)的出版,为进一步完善学科体系建设提供了重要支撑。

该阶段研究呈现出明显的精细化与量化趋势。借助岩心高精度扫描、地球化学分析及数值模拟等手段,研究者已能够对事件沉积开展毫米-元素级的高分辨率解析,实现对突发性地质事件强度、频率及物源特征的定量重建。同时,事件沉积层被视为关键的地质“计时标志层”与“事件记录仪”,如震积岩、洪积岩分别记录了地震与洪水事件,结合高精度年代学数据,可有效约束突发性地质事件发生的准确时间。在此基础上,事件沉积被广泛应用于古气候、古地理及古构造背景重建,显著提升了地质历史过程的解释能力(田景春等, 2024)。

总之,21 世纪以来事件沉积学在研究广度与深度上均取得显著进展。通过与现代事件对比及室内试验模拟,该学科正加速向事件沉积过程精细刻画、动力学机制定量揭示的方向发展。

2 事件沉积学的研究现状

20 世纪 80 年代以来,随着全球沉积地质计划、联合古陆计划等国际大科学研究计划的提出与实施,地球演化中频发的地震、洪水、火山及缺氧等突发地质事件所保存的记录成为事件沉积学重要的研究对象,也是解码地表系统演化与资源形成的关键载体。

虽然事件沉积概念于 20 世纪 90 年代才被正式提出(Einsele, 1996),但国外针对事件沉积的研

究可追溯至 20 世纪 50 年代。历经 70 余年发展,事件沉积研究已从单一的识别标志建立与成因解释,迈向高精度分析、物理/数值模拟及多事件耦合研究阶段,极大丰富了事件沉积学理论。因此,系统梳理该学科领域研究现状,对把握学科发展趋势、推动沉积圈科学发展具有重要的战略意义。

目前,关于事件沉积类型的划分主要包括:组分分类、环境分类、条件分类、成因分类等。本文依据事件成因机制,对中外关于地震、洪水、冰川、风暴、海啸、碎屑流、浊流、缺氧和火山等 9 类突发性地质事件所形成的特殊沉积岩类的研究现状进行综述。

2.1 地震事件沉积的震积岩研究现状

地震事件是地球系统演化过程中常见的突发性地质事件,其产物即为震积岩。震积岩作为古地震活动的重要沉积记录,长期以来是事件沉积学研究的重要内容。

2.1.1 国外研究进展

国外震积岩研究起步较早。Seilacher(1969)首次提出震积岩(seismites)概念之后,众多学者开展了大量研究,取得了丰硕成果;1984 年《Marine Geology》推出“地震与沉积作用”专题系统总结了震积岩研究成果;21 世纪以来,《Sedimentary Geology》《Journal of Palaeogeography》和《Tectonophysics》等期刊先后组织相关专题,展示震积岩成因机制、触发条件和软沉积物变形过程等方面研究成果(Seilacher, 1969)。具体成果包括:(1)建立了震积岩的识别标志和垂向序列,明确了其沉积特征及垂向相变规律(Bauerman, 1885);(2)探讨了不同层位、时代和地区的软沉积物变形成因机制,并提出了相应分类方案(Owen, 1996; Rodríguez-Pascua et al., 2000; Moretti et al., 2002; Montenat et al., 2007; Al-Saqarat et al., 2024);(3)明确了中新元古代至现代多层位、多环境(河流、湖泊、大陆架及远洋)震积岩特征(Moretti et al., 2002);(4)恢复了古地震复发周期、反演了古震级/震中距、重建了区域构造活动史,并结合湖泊岩心、滨岸砾质沉积和现代地震事件记录,进一步提升了震积岩对古地震强度、复发间隔及区域构造活动史的约束能力(Molenaar et al., 2024; Li et al., 2025a);(5)近年来,国外学者还通过对同震软沉积物变形构造的精细解剖和对比,进一步强化

了震积岩与活动构造、湖盆演化及其他地质事件之间的耦合关系研究(Al-Sagrat et al., 2024)。

2.1.2 中国研究进展

中国震积岩研究始于20世纪80年代末,主要围绕海相地层、陆相断陷湖盆和坳陷湖盆中的震积岩识别、沉积序列及成因机制展开。主要成果包括:(1)在海相地层方面,识别了不同构造背景下的震积岩特征,并建立了相应震积岩序列(宋天锐, 1988; 乔秀夫和李海兵, 2009);(2)在陆相断陷湖盆方面,明确了震积岩岩性组合、垂向序列、软沉积变形构造特征及形成机制(吴贤涛和尹国勋, 1992; 杨剑萍等, 2004);(3)在坳陷湖盆方面,识别了震积岩特征,建立了沉积序列(夏青松等, 2007; 田景春, 2014; 田景春等, 2022);(4)提出了系统的震积岩分类命名方案(乔秀夫和李海兵, 2009);(5)通过室内模拟实验,探讨了地震振动作用下沉积物液化、变形和再沉积过程(冯先岳, 1989; 鄢继华等, 2007)。

2.1.3 中外研究差异与展望

综上所述,中外震积岩研究成果呈现出显著的差异性。国外侧重于软沉积物变形研究,以成因机制判别为核心,强调机理揭示与定量分析;中国紧密结合实际,侧重于海相碳酸盐岩与陆相湖盆的震积序列构建、区域构造演化反演,而在定量模拟与现代验证方面相对薄弱。

未来研究的重点是:(1)融合露头、岩心、地球化学、地震等资料,建立多指标判识标志,提升震积岩识别可靠性;(2)联用CA-ID-TIMS U-Pb与OSL定年技术,精确限定古地震复发周期,建立震级反演模型;(3)结合现代观测与物理/数值模拟,厘清震积岩-海啸岩-碎屑流的耦合机制,重建多事件沉积链;(4)强化震积岩的油气地质意义研究。

2.2 洪水事件沉积的洪积岩研究现状

洪水事件沉积是指暴雨洪水、山洪暴发、溃决洪水等突发性高能水文事件在短时间内形成的产物,经成岩作用固结而形成的岩石即为洪积岩。洪积岩特征研究对于恢复古洪水规模、频率、水动力过程及古气候、古环境重建等方面具有重要的理论意义和实际价值。

2.2.1 国外研究进展

国外对洪水事件沉积的研究已有百余年历史,自1903年俄国地质学家A. D. Pavlov明确将洪

积物作为一种独立的成因类型提出至今,众多学者进行了大量研究,取得了一系列研究成果,主要包括:(1)建立了古洪水事件研究框架(Kochel and Baker, 1982);(2)推动了洪水事件沉积研究由单纯事件识别转向“沉积记录-水动力恢复-环境解释”综合研究(Baker, 1987, 2008);(3)建立了包括沉积学、地球化学、磁学和生物标志物等多指标综合的洪水事件沉积识别标志(Wilhelm et al., 2022);(4)明确了洪水事件侵蚀-堆积转换机制(Leenman et al., 2022),建立了“陆上洪水-异重流-深水沉积”耦合模式,揭示洪水事件对深水沉积体系的影响;(5)强化了深时地层中洪水事件记录研究,拓展了洪水沉积在地质历史环境重建中的应用(Zhao et al., 2025),且研究成果呈现数据库化、标准化和共享化特征。

2.2.2 中国研究进展

中国洪水事件沉积研究起步相对较晚,但在古洪水沉积识别标志、古洪水水文学恢复和洪水沉积过程解释方面形成了特色。研究成果主要包括:(1)建立了洪水事件沉积识别标志体系,重点关注沉积构造、粒度特征、岩性组合及空间分布规律(赵梅, 2012);(2)形成了“洪水-高含沙流-异重流”的研究链条,推动洪水事件沉积与深水沉积过程的联系研究(杨仁超等, 2023; 章诚诚等, 2024);(3)重建了不同流域和冲积平原尺度的古洪水事件(图3)(杨劲松等, 2022);(4)过程分析和数值模拟相结合揭示洪水沉积动力过程(马俊学, 2017; 杨劲松等, 2022)。

2.2.3 中外研究差异与展望

总之,中外洪水事件沉积研究成果丰硕,但差异明显。国外侧重于动力过程、流变机制与水槽模拟,强调成因机制与定量分析;中国则聚焦洪水事件沉积特征、沉积序列及发育期次研究,在水动力参数定量反演方面仍显不足。

未来洪积岩研究的重点是:(1)通过现代观测与古洪水事件沉积记录对比,建立多环境洪水识别标准;(2)集成粒度、地球化学、测年与模拟,定量反演洪水事件的规模与频率;(3)阐明洪水触发的异重流及深水重力流耦合机制,构建从源到汇的陆海统筹沉积动力学链条。

2.3 冰川事件沉积的冰碛岩研究现状

研究冰碛岩是解码地球古气候演化的关键钥匙,它为“雪球地球”等重大冰期事件提供核心地

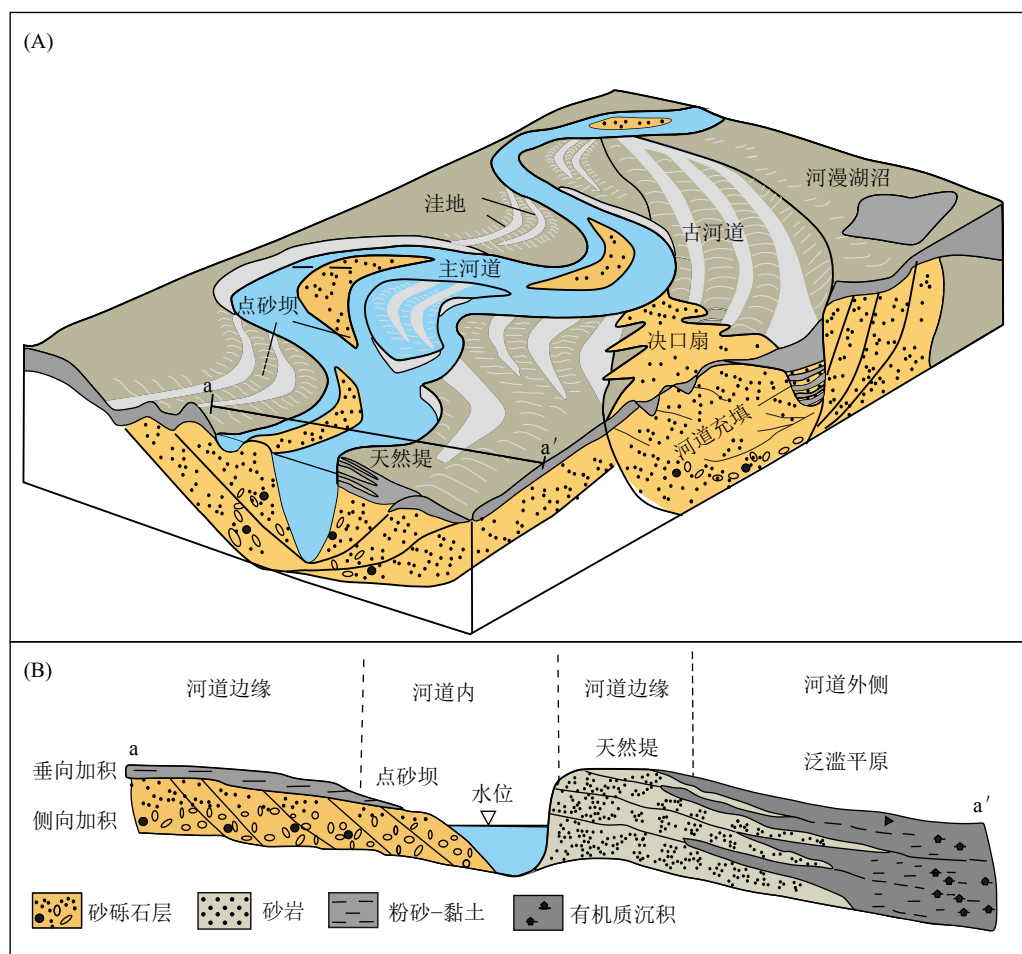


图 3 冲积平原不同沉积单元中洪水事件沉积的空间分布及剖面特征示意图(据杨劲松等, 2022 修改)

Fig. 3 Schematic diagram of the spatial distribution and profile characteristics of flood event deposits in different alluvial plain sedimentary units

(A) 冲积平原不同沉积单元中洪水事件沉积的空间分布示意图; (B) 洪水沉积事件沉积剖面示意图

层证据。因此, 开展冰碛岩特征研究意义重大。

2.3.1 国外研究进展

国外对冰碛岩的研究历史悠久。自 Agassiz (1838) 系统提出阿尔卑斯地区曾经历大冰期 (Ice Age), 到苏格兰地质学家 Geikie (1863) 最早识别并命名 “tillite” (冰碛岩), 在这近 200 年的研究历史中, 国外众多学者进行了大量研究, 取得了一系列研究成果。主要包括: (1) 厘定了地史时期全球性冰川事件发育的期次, 包括太古宙冰期 (4.0~2.5 Ga)、古元古代冰期 (~2.4 Ga)、新元古代冰期 (0.75 Ga~545 Ma)、晚古生代 Saharan 冰期 (~440 Ma)、晚泥盆世冰期 (~374 Ma)、晚古生代冈瓦纳冰期 (350~250 Ma) 和新生代冰期 (<55 Ma) (表 1); (2) 明确了不同冰期冰碛岩分布地区范围 (表 1); (3) 构建了冰碛岩成因分类方案 (Boulton, 1982); (4) 建立了冰川事件沉积模式 (Modie, 2002) (图 4);

(5) 冰碛岩高精度定年限定了雪球冰川持续时间 (Tasistro-Hart et al., 2025); (6) 三维宏-微组构定量分析验证了冰川成因 (Kettler et al., 2023), 为深时 “雪球地球” 冰碛岩鉴别提供客观微观判据; (7) 重塑了南方冈瓦纳冰盖中心位置与搬运路径 (Zurli et al., 2024)。

2.3.2 中国研究进展

中国对冰碛岩 (tillite / glacial diamictite) 的研究始于 20 世纪初, 1907 年美国地质学家 B. Willis 等在湖北宜昌南沱发现古老冰碛层, 命名为 “南沱冰碛岩 (Nantuo tillite)” ; 随后李四光和赵亚曾 (1924) 在长江峡东正式确立 “南沱冰碛层” 为岩石地层单位 (南沱组)。历经百年发展, 中国对冰川事件沉积研究取得了系统性成果, 主要包括: (1) 结合中国冰碛岩实际情况, 提出了冰碛岩的结构分类方案 (黄道全, 1988); (2) 建立了冰碛岩沉积序

表 1 地质历史时期各冰期冰川事件沉积的典型发育地			
Table 1 Typical occurrence areas of glacial event deposits in different glacial periods during geological history			
序号	冰期名称	地质年龄	冰川事件的产物发育地
1	太古宙冰期	4.0~2.5 Ga	南非Kaapvaal克拉通南部Mozaan群等(Young, 1991)
2	古元古代冰期	~2.4 Ga	加拿大Huronian超群、南非Kalahari克拉通、芬兰Karelia克拉通等
3	Kaigas冰期	0.75 Ga~545 Ma	赞比亚西北部Kundelungu群(Key et al., 2001)、纳米比亚北部、澳大利亚及劳伦西亚部分地区
	Sturtian冰期		纳米比亚北部、澳大利亚南部、加拿大西北部、中国南部、阿曼、蒙古等
	Marinoan冰期		全球广泛分布, 典型地区包括中国华南南沱组、皖南雷公坞组、加拿大Windermere超群、纳米比亚Ghaub组等
	Gaskiers冰期		纽芬兰东部、阿巴拉契亚地区、挪威北部、美国Boston盆地、澳大利亚Tasmania等
4	晚古生代Saharan冰期	~440 Ma	北非—冈瓦纳大陆边缘地区, 以晚奥陶世冰川沉积为代表
5	晚古生代冈瓦纳冰期	350~250 Ma	澳大利亚Cooper盆地、南美Tarija盆地和Parana盆地、非洲Karoo盆地及中非裂谷盆地等
6	新生代冰期	<55 Ma	南极地区、环北极地区及高纬度大陆边缘地区

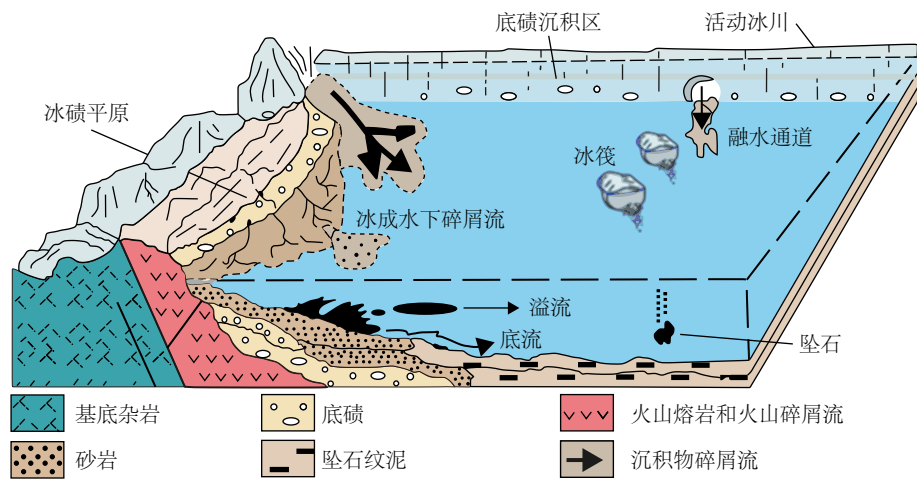


图 4 南非 Pongla 冰川沉积模式(据 Modie, 2002 修改)
Fig. 4 Sedimentary model of Ponogla glaciation in South Africa

列, 揭示中国各冰期(如前寒武纪及晚古生代冰期)冰碛岩的发育规律(吴瑞棠和杨玉卿, 1991); (3)明确了冰碛岩旋回, 构建了冰川演化新模式(Chen et al., 2021); (4)利用全球太古代以来冰碛岩样品高精度测定¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 和¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd, 首次确定了大陆上地壳的稳定 Nd 同位素基准组成(Yu et al., 2026); (5)利用原子阱痕量分析技术测定青藏高原冰碛样品的⁴¹Ca 同位素丰度, 实现约 1.3 万年和 3.3 万年前冰川活动事件的定年(Sun et al., 2026), 为第四纪冰碛测年提供新方法。

2.3.3 中外差异与展望

综上所述, 中外针对冰碛岩研究成果具有明

显差异。国外侧重成因机理、古气候重建与同位素定年, 强调冰川动力过程与全球对比; 中国则聚焦冰期地层格架、沉积序列及冰川活动过程反演。但在冰川沉积过程定量恢复和古气候响应机制方面仍需强化。

未来研究重点是: (1)融合大数据与高精度定年成果, 厘清“雪球地球”时空演化; (2)加强微观组构与地球化学分析, 定量反演古环境; (3)深化冰碛岩的油气地质意义研究。

2.4 风暴事件沉积的风暴岩研究现状

研究风暴岩(tempestite)的核心意义在于透过地质记录解码地球历史上的极端气候与海洋动

力学过程,为理解“深时”环境演变提供关键窗口。同时,风暴岩常构成优质油气储层,对其研究可指导油气勘探。因此,开展风暴岩研究意义重大。

2.4.1 国外研究进展

国外风暴沉积研究起步较早,19世纪末 Gilbert (1899)已注意到浅海风暴作用形成的丘状层理和滩槽层理;Kelling and Mullin (1975)正式提出“tempestite”概念之后,众多学者对风暴岩进行了系统、深入研究,取得了一系列成果,主要包括:(1)明确了风暴流成因性质,认为风暴流是由风暴驱动形成的混合牵引流或密度流(Kelling and Mullin, 1975);(2)构建了海相风暴沉积序列(图 5),建立了海相风暴沉积模式(Kelling and Mullin, 1975; Aigner, 1982, 1985);(3)划分了风暴事件沉积阶段,为古代风暴过程恢复提供了依据(Kreisa, 1981; Allen, 1982),用于恢复古风暴活动、古海洋环境变迁和全球气候变化;(4)首次提出了考古风暴岩概念(Jackson et al., 2024),通过佛罗里达海湾贝壳丘被风暴再搬运沉积的特征识别古风暴事件,拓展了风暴沉积在考古-古环境交叉领域的应用(Jackson et al., 2024)。

2.4.2 中国研究进展

中国风暴岩研究兴起于 20 世纪 80 年代,主要进展包括:(1)引入并完善了风暴岩识别标志,

总结了其野外特征、沉积构造及与浊积岩等相似类型的区别(刘宝珺等, 1986; 张继庆等, 1986);(2)积累了大量区域实例,在鄂尔多斯、塔里木、四川、南盘江等盆地识别出震旦系至三叠系风暴沉积(姜在兴等, 1990; 侯方浩等, 2003);(3)建立了风暴岩沉积序列、沉积模式和分类体系;(4)将研究由海相地层拓展到陆相湖盆,识别出湖相风暴沉积构造和垂向序列(张廷山等, 2017);(5)揭示了米兰科维奇轨道周期(偏心率、岁差)对古风暴活动频次的驱动控制(Li et al., 2025b);(6)加强了风暴岩在油气储层评价、磷块岩成矿预测和古环境恢复中的应用(胡明毅和贺萍, 2002; 曾建理等, 2024)。

2.4.3 中外研究差异与展望

总之,中外对风暴岩研究成果差异明显。国外侧重现代风暴沉积过程观测、流体动力学数值模拟及海平面变化响应,强调形成机理与定量预测;中国聚焦古代海相与陆相湖盆风暴岩的宏观序列建立,以定性描述为主。

未来研究的重点是:(1)融合现代观测、物理模拟与古代实例对比,构建多环境风暴岩的识别图谱;(2)运用高精度定年技术,定量反演古风暴周期、强度;(3)深化风暴流-重力流耦合机制研究,阐明多类型事件沉积的耦合关系;(4)强化风

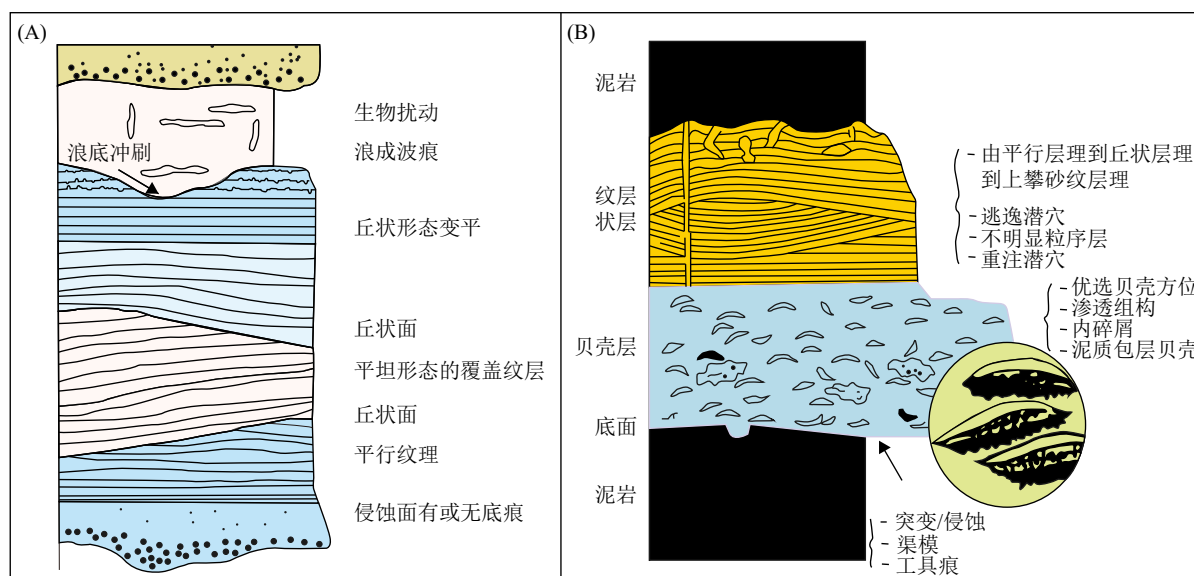


图 5 风暴岩的理想序列图(据 Brenchley et al., 1979; Kreisa, 1981 修改)

Fig. 5 Ideal sequence of tempestites

(A)不具介壳层;(B)具有介壳层

注:部分风暴岩可以完全由介壳层组成。

暴岩的油气地质意义研究。

2.5 海啸事件沉积的海啸岩研究现状

海啸岩(tsunamite)系地震、海底滑坡、火山喷发及天体撞击等触发海啸后,经波浪侵蚀、搬运、沉积形成的事件沉积。其研究既可为活动构造解析与古海啸复发周期判定提供深时地质依据,又能通过识别标志与古海啸参数重建,直接支撑现代沿海核电、港口及城市群的海啸灾害风险评估与防控。因此,开展海啸岩特征研究意义重大。

2.5.1 国外研究进展

国外海啸岩研究起步较早,20世纪80年代末逐渐形成独立研究方向。主要进展包括:(1)提出并确立了“tsunamite”概念,明确其为海啸事件形成的特殊沉积记录(Bourgeois et al., 1988);(2)建立了现代海啸沉积识别标志,包括海陆物质混杂、侵蚀底界、砂砾层、异常粒度和生物组合异常等(Goff et al., 2012);(3)识别出地震、火山、海底滑坡、天体撞击等多种成因类型,丰富了古海啸事件类型认识(Dawson and Stewart, 2007);(4)建立了不同构造背景和海岸地貌条件下的海啸沉积模式,揭示了构造活动、海岸地形与海啸岩发育之间的关系(Dawson, 1994);(5)应用粒度分析、地球化学、微体古生物和数值模拟等方法,推动古海啸波高、流速、淹没范围和发生频次的定量恢复(Goff et al., 2010);(6)环境DNA(eDNA)识别古海啸沉积,为海啸岩鉴别提供分子生物学新手段(Shinozaki et al., 2025);(7)应用深度神经网络处理中等规模古海啸沉积物的粒度与结构数据,反演古海啸流况与波高(Batubo et al., 2024),拓展了海啸岩定量重建方法;(8)通过现代地震引发的海啸沉积的软X射线/CT成像、粒度及硅藻组合特征研究,为古海啸岩解译提供现代标定(Shimada et al., 2025)。

2.5.2 中国研究进展

中国海啸岩研究起步略晚,早期主要集中于华南沿海风暴-海啸混杂沉积识别,随后研究区域不断扩展,并取得了一系列成果,主要包括:(1)在多地区识别出多期古海啸沉积层,建立了中国近海古海啸沉积记录;(2)建立了中国海啸沉积识别标志,包括海陆生物混杂、逆粒序、泥质撕裂屑、向陆延伸远和地球化学异常等(王喻鸣等, 2023);(3)在古老地层中(三峡东部泥盆

系、浙西下寒武统等)识别出可能的古海啸岩,拓展了古海啸岩研究的时代和区域范围(曾雄伟等, 2014; 严兆彬等, 2014)(图6);(4)引入光释光测年、CT扫描、元素地球化学、微体古生物和数值模拟等技术(王伟涛等, 2025),提高了海啸沉积过程和事件时间的精细刻画能力;(5)相关成果为海洋灾害风险评估、海啸预警和沿海重大工程设防提供了地质依据。

2.5.3 中外研究差异与展望

总之,中外对海啸岩的研究成果丰硕。国外侧重于多方法定量研究海啸事件的强度、规模和频次;中国以华南中新元古代—古生代海相地层中海啸岩序列识别、震-海啸序列及区域构造反演为主,定量模拟与现代验证薄弱。

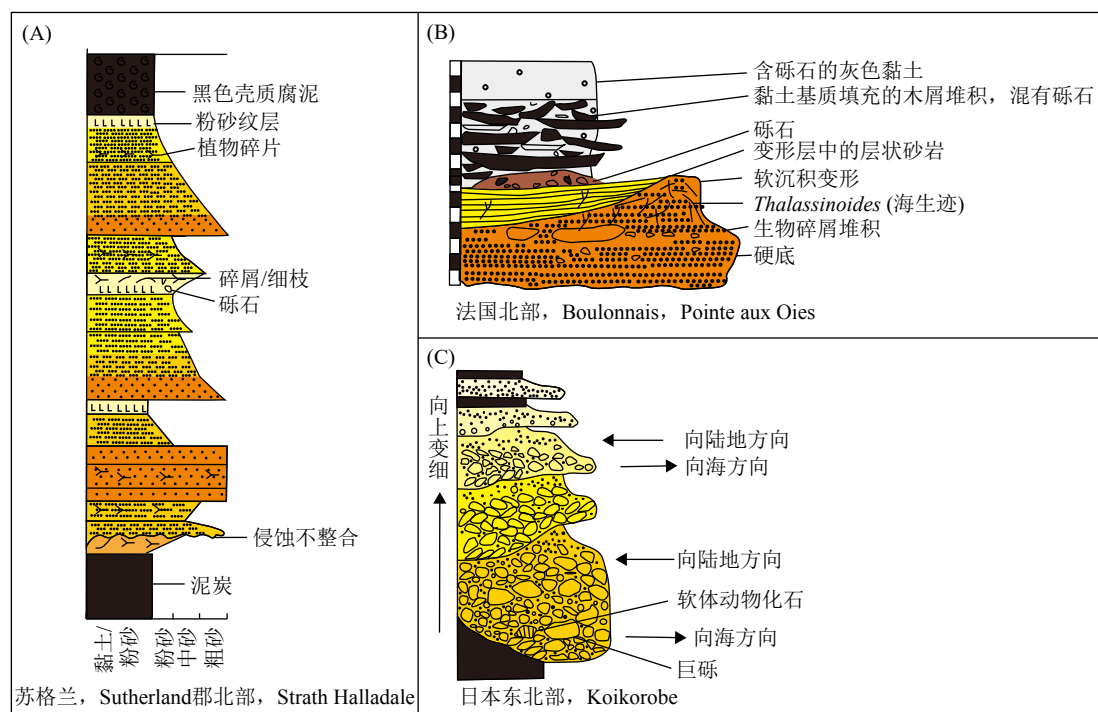
未来研究重点:(1)融合露头、岩心、地球化学等多类型指标,建立多环境海啸岩识别体系;(2)结合高精度定年与数值反演,定量重建古海啸强度、频度与爬高;(3)深化海啸回流触发的异重流-深水重力流耦合机制,揭示多类型事件沉积的耦合关系。

2.6 碎屑流事件形成的碎屑流岩研究现状

碎屑流是由砂、砾、泥、水及空气混合形成的重力驱动流体,可发育于火山、陆上洪水及水下重力流等环境,其沉积物成岩后即碎屑流岩。对碎屑流岩的研究既可丰富重力流理论体系,又可指导深水储集砂体的油气勘探(Heim, 1932; Talling, 2014)。

2.6.1 国外研究进展

国外碎屑流研究起步较早,Hampton(1972)通过水槽实验揭示了水下碎屑流是水下滑坡与浊流之间的过渡流体,Middleton and Hampton(1973)进一步提出“沉积物重力流”概念,将碎屑流、颗粒流、液化流和浊流纳入深水重力流沉积体系(Hampton, 1972; Middleton and Hampton, 1973)。近10年来,国外研究成果主要包括:(1)观测与模拟方面,结合现场监测、室内实验和数值建模,揭示碎屑流发育过程及水沙关系(Magirl et al., 2010);(2)特征与分类方面,划分块状砂、混沌泥、均质泥等典型岩相,完善碎屑流沉积识别标准(Talling et al., 2012; Shan et al., 2021);(3)机制与模式方面,明确低坡度远程搬运能力、坡度对侵蚀-沉积的控制作用及地震触发机制(Shanmugam, 2000; Bernhardt et al., 2012)(图7);(4)通过美国西部碎



2.7.1 国外研究进展

国外浊流研究起步较早,Forel(1881)最早发现

湖泊高密度重力流,到Daly(1936)正式提出“浊流”概念,接着到Bouma(1962)建立经典鲍马序列(图8),

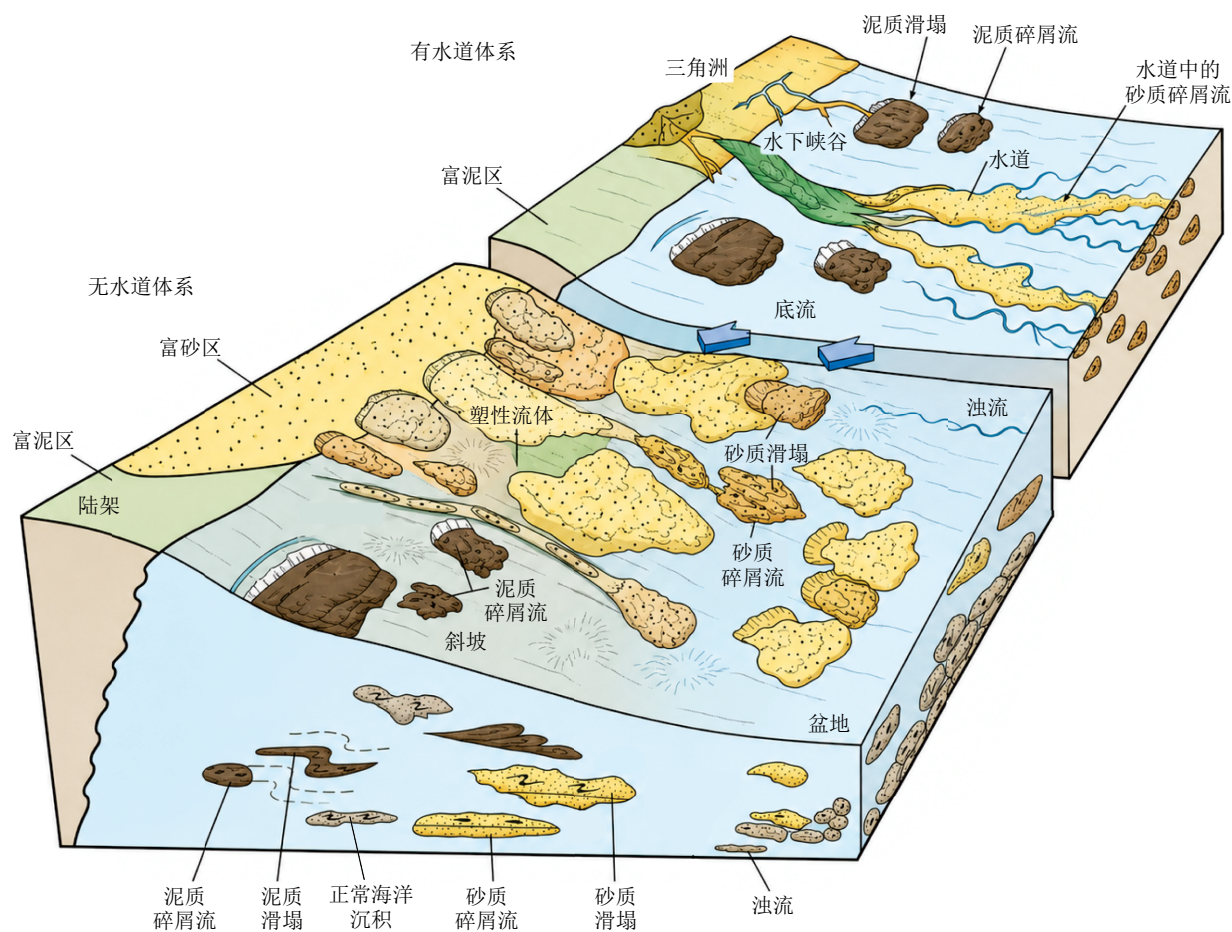


图 7 Shanmugam 砂质碎屑流沉积模式(据 Shanmugam, 2000 修改)

Fig. 7 Shanmugam's sandy debris flow sedimentary model

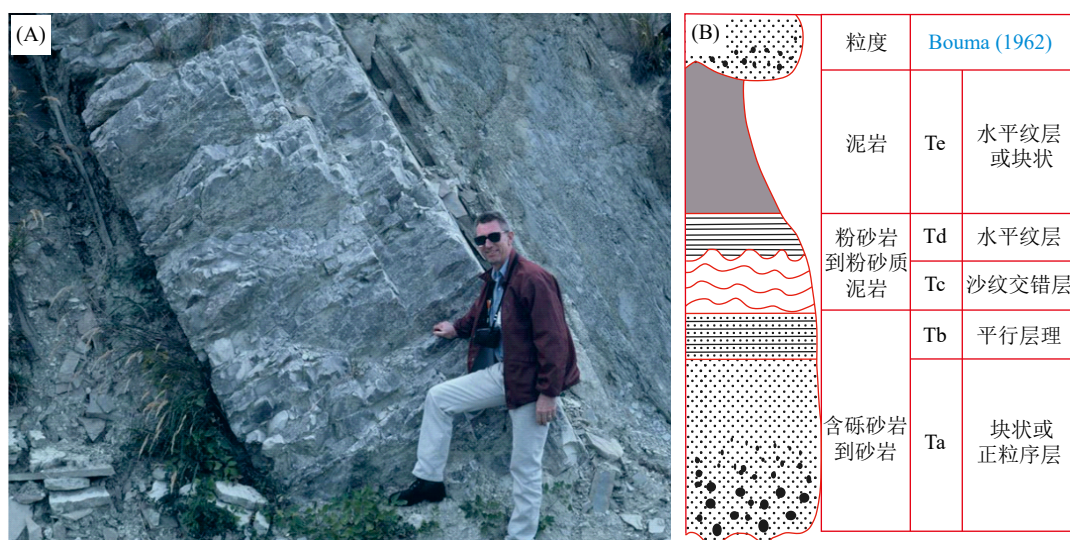


图 8 鲍马序列的提出者、发现露头(法国东南部阿尔卑斯山脉 Annot 砂岩)及经典模式

Fig. 8 Proposer, outcrop, and classic model of the Bouma sequence (annot sandstone, southeastern French Alps)

(A) 鲍马序列的提出者及发现露头; (B) 鲍马序列经典模式图 (据 Bouma, 1962 修改)

再到 Walker(1978)建立海底扇沉积模式,至今国外对浊积岩研究取得了一系列成果,主要包括:(1)通过水槽实验、数值模拟和地球物理探测揭示浊流流速、浓度、侵蚀-沉积过程及浊积体内部结构(Kneller and Buckee, 2000; Zhong et al., 2015);(2)阐明了浊积岩系的岩性组合、叠加样式、时空变化(Yang et al., 2019);(3)明确了成因机制与多事件沉积演化及耦合关系(Talling, 2014; Patacci et al., 2020);(4)修正了经典浊积岩成因解释,通过水槽实验结合野外露头,论证鲍玛 Tc 段(平行纹层)为密度-惯性过渡区而非单纯牵引流产物(Maier et al., 2024);(5)实现了深水浊积岩储层非均质性三维地质建模,通过浊积岩露头类比,构建了沉积相变与底形非均质性的三维储层属性模型,提升深水浊积岩油气藏数值模拟精度(Labourdette, 2007)。

2.7.2 中国研究进展

中国浊流事件沉积研究始于 20 世纪 70 年代末,李继亮等(1978)首次报道浊积岩,1983 年首届全国浊流沉积学大会后研究迅速发展并逐步接轨国际(李继亮等, 1978)。中国研究成果主要包括:(1)明确了不同盆地和层系中的浊积岩岩性组合、沉积构造和垂向序列(夏青松等, 2007; 傅强等, 2008);(2)建立了区域沉积模式,结合陆相湖盆和含油气盆地实例,构建深水扇、湖底扇及重力流沉积模式(吴崇筠, 1986; 姜在兴等, 1988; 李相博等, 2013);(3)揭示了浊积岩与深水砂体、优质储层及油气富集之间的关系(魏魁生等, 1996; 刘忠宝等, 2003; 杨华等, 2015; 付金华等, 2015);(4)推进现代浊流观测、沉积机制和储层地球物理预测研究,形成了从地质识别到勘探应用的研究链条(余斌等, 2005; 苑书金等, 2025)。

2.7.3 中外研究差异与展望

总之,中外对浊积事件沉积研究取得了丰硕成果,但差异明显。国外侧重浊流触发机制、动力过程及气候-构造耦合响应;中国聚焦陆相湖盆,形成了以沉积识别、模式构建及油气勘探应用为核心的特色体系。当前瓶颈在于现代过程观测匮乏,对浊流与地震、洪水、滑塌及碎屑流的多事件耦合机制认识不清。

未来研究重点:(1)强化现代海底与湖盆浊流原位监测,提升全过程定量解释能力;(2)构建岩心-

测井-地震-模拟多维度精细表征方法;(3)深化浊积岩在深水、致密及页岩油气优质储层预测中的勘探应用价值。

2.8 缺氧事件沉积研究现状

缺氧事件沉积是指水体长期或阶段性缺氧条件下形成的富有机质沉积记录,常表现为黑色页岩、富有机质泥岩及相关地球化学异常。对其研究有助于认识深时全球古海洋-古气候变化与生物灭绝/辐射事件,揭示地质历史时期富有机质烃源岩时空演化与分布,指导非常规油气(页岩气/油)资源勘探。

2.8.1 国外研究进展

国外缺氧事件研究起步较早, Schlanger and Jenkyns(1976)提出大洋缺氧事件(ocean anoxic events, OAE)概念,用于解释白垩纪深海黑色页岩成因,随后该概念被拓展至侏罗纪、二叠纪末、泥盆纪法门阶-弗拉斯阶界线、白垩纪-古近纪界线及古新世-始新世等关键地质转折期(Schlanger and Jenkyns, 1976; Talling et al., 2012; Liao et al., 2020)。国外研究成果包括:(1)建立了缺氧环境类型划分,将其分为大型缺氧湖盆、缺氧隔离盆地、上升流控制缺氧层和缺氧开阔海等类型(Demaison and Moore, 1980);(2)完善了缺氧事件识别指标,主要包括 $w(V)/w(V+Ni)$ 、 $w(V)/w(Cr)$ 、 $w(Ni)/w(Co)$ 、 $w(U)$ 、 $w(Mo)$ 等元素地球化学指标,黄铁矿化程度(degree of pyritization, DOP)、硫同位素、C/S 同位素漂移、总有机碳含量(total organic carbon, TOC)升高及磷结核富集等标志(Jones et al., 1994; Wignall and Twitchett, 1996);(3)深化了缺氧事件后果与响应研究,认为缺氧事件可导致生物灭绝,并伴随碳氧同位素漂移、Mo 同位素变化和全球 Mo 储量降低等现象(Bond and Wignall, 2010; Westermann et al., 2014; Goldberg et al., 2016);(4)强化了多指标判别和成因机制研究,主量元素、S/Os/Ca/Cd 同位素、铁硫氮循环代用指标及 Mo、Zn、U、Cr 等金属稳定同位素被广泛应用,并认为岩浆活动、温室气体释放、大陆风化增强、海洋环流变化和长期气候变暖是缺氧事件的重要驱动因素(图 9)(Rogov et al., 2020)。

2.8.2 中国研究进展

中国学者围绕缺氧事件识别、成因机制、年代对比和油气地质意义开展了大量研究,主要进

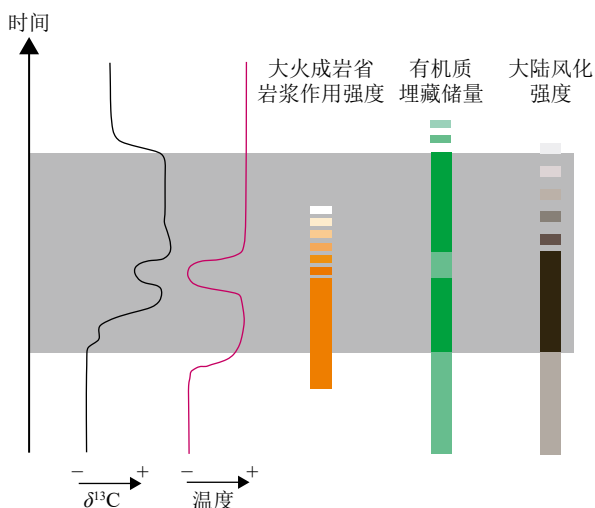


图9 第二次海洋缺氧事件(oceanic anoxic event 2, OAE2)期间 $\delta^{13}\text{C}$ 、温度、LIP岩浆作用、有机碳埋藏和大陆风化强度演化简图(据 Percival et al., 2020 修改)

Fig. 9 Schematic evolution of $\delta^{13}\text{C}$, temperature, LIP magmatism, organic carbon burial, and continental weathering intensity during OAE2

(颜色越深表示强度更强或通量更高)

展包括:(1)建立了缺氧事件判别标志,通过钼同位素($\delta^{98}\text{Mo}$)、微量元素、碳氧同位素、TOC值及草莓状黄铁矿等特征,识别缺氧事件发育期次及古环境意义(Zhang et al., 2000; 周炼等, 2011);(2)探讨了缺氧事件成因机制,认为深水沉积可受重力流、火山、地震事件叠加影响,并提出藻类暴发耗氧触发模式及缺氧-富氧事件耦合关系(傅强等, 2019; 朱日祥等, 2026);(3)开展了天文年代学和碳同位素序列对比,揭示T-OAE时期全球碳循环响应差异(成乐乐等, 2024);(4)明确了缺氧事件的油气地质意义,认为缺氧事件控制的富有机质烃源岩是致密油气和页岩油气的重要物质基础,并可为地层定年和区域对比提供依据(孙宁亮等, 2017);(5)拓展了陆相盆地缺氧事件响应研究,揭示大洋缺氧事件在陆相地层中的沉积表现和环境意义(陈兰等, 2025)。

2.8.3 中外研究差异与展望

总之,中外对缺氧事件沉积的研究呈互补态势。国外聚焦全球碳循环扰动、海洋氧化还原演化及天文轨道驱动机制;中国立足陆相湖盆与海相烃源岩区,侧重缺氧判别、有机质富集及油气地质意义。现存短板在于对缺氧与火山活动、气候变暖及重力流等多圈层耦合机制认识不清。

未来的发展方向应聚焦以下3个方面:(1)构

建微量元素及同位素地球化学-数值模拟多指标综合识别体系;(2)深化海-陆相缺氧事件成因机制与沉积响应的异同对比;(3)强化缺氧事件对优质烃源岩、页岩油气“甜点”发育及资源潜力评价的关键控制作用研究。

2.9 火山事件沉积的火山碎屑岩研究现状

火山事件是地质历史时期重要的突发性地质事件之一,其形成的火山碎屑岩(尤其是凝灰岩)不仅是识别火山活动的重要沉积记录,也可用于年代限定、物源示踪、构造背景恢复和沉积环境重建;同时,也是铀矿等矿产资源的重要宿主,又可构成油气与 CO_2 封存的优质盖层。因此,火山事件沉积研究意义重大。

2.9.1 国外研究进展

近10年来,国外火山事件沉积研究主要取得以下进展:(1)阐明了火山事件沉积特征及分类,系统总结了火山碎屑岩的岩石类型、沉积构造和成因特征(Dodd et al., 2020);(2)加强了火山事件年代限定,通过高精度年代学手段厘定火山活动时间,为地层对比和事件识别提供依据(Kataoka et al., 2019);(3)深化了火山事件与其他地质事件的耦合研究,揭示火山活动与沉积事件、气候变化及构造活动之间的联系(Savelyeva, 2019);(4)建立了火山碎屑沉积与板块构造之间的关系,通过火山-沉积岩石组合和沉积序列恢复火山活动的构造背景(图10)(Manville et al., 2009);(5)引入深度学习等新方法,利用神经网络和卷积模型自动识别火山地震-火山事件,提高了火山事件识别效率(Lara et al., 2021);(6)将火山灰绝对年龄嵌入沉积速率模型,实现无化石层段的高分辨率地层年龄标尺建立(Chen et al., 2016)。

2.9.2 中国研究进展

中国火山事件沉积研究近年来发展较快,主要围绕火山事件沉积特征、成因机制及资源环境效应展开,主要进展包括:(1)明确了火山事件沉积的成因机制,认为其主要受构造运动和岩浆活动控制(韩作振等, 2017);(2)揭示了火山事件沉积的多重效应,包括改变地貌形态与沉积格局、调控生物组合、促进优质烃源岩发育以及诱发重力流砂体形成等(孙宁亮等, 2017; 袁珍等, 2019);(3)利用岩浆活动与沉积作用的同生等时性,限定火山活动时期的地质背景,为沉积盆地构造-沉积演化研究提供依据(郭召杰等,

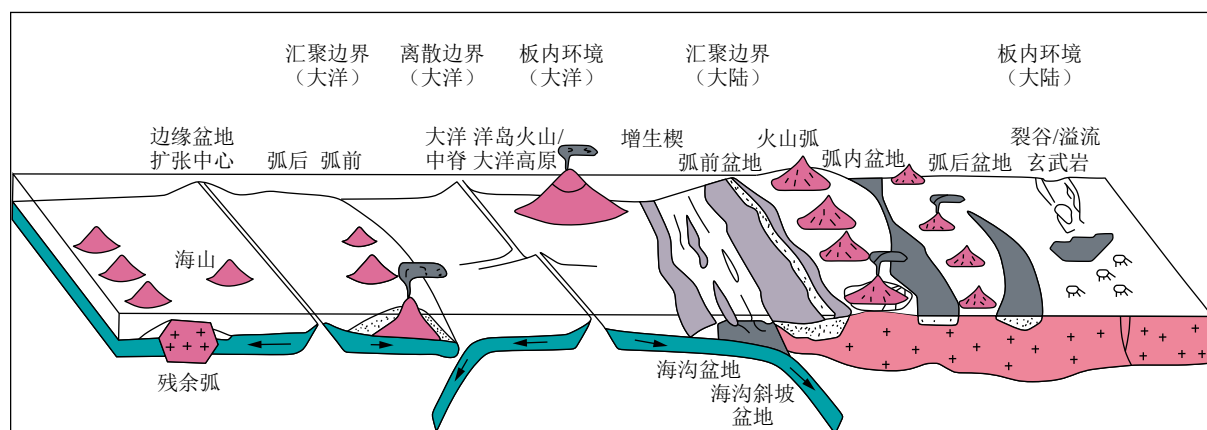


图 10 火山事件沉积的火山碎屑岩沉积与板块边界关系(据 Manville et al., 2009 修改)

Fig. 10 Relationship between volcanoclastic sediments of volcanic event deposits and plate boundaries

2015)。

2.9.3 中外研究差异与展望

总之,中外火山事件沉积研究各具优势:国外侧重火山碎屑岩分类、高精度定年及构造背景重建;中国聚焦火山事件沉积特征、成因机制、多重沉积效应及资源能源意义。当前不足在于对火山事件与跨圈层不同事件沉积的耦合机制认识不清,火山物质输入对沉积环境与资源效应的影响机理尚需深化。

未来研究重点:(1)融合锆石 U-Pb 定年、地球化学与同位素示踪,精确限定火山事件时空格架与物源属性;(2)引入人工智能与机器学习技术,提升火山事件沉积的高精度识别与对比能力;(3)揭示火山活动对水体有机质富集及储层改造的控制机理,更好地服务油气勘探。

总之,上述 9 类突发性地质事件所形成的特殊沉积岩,是重建古构造、古气候和古地理环境的关键载体。它们在成因机制、典型特征、发育环境等方面存在显著差异(表 2)。

中外众多机构、众多学者对于沉积圈层中不同类型地质事件所形成事件沉积层的研究成果,有力推动了事件沉积学学科理论体系的完善和发展。

3 事件沉积学的未来研究趋势

除地震、洪水、冰川、风暴、海啸、碎屑流、浊流、缺氧及火山等典型事件沉积外,沉积圈层还广泛发育热水、极热气候、陨石撞击等多类型事件记录。当前研究瓶颈在于:多类型事件的定量表征精度不足、时空耦合关系模糊、沉积动力

学过程不明,且缺乏系统的多事件耦合发育模式。技术挑战集中体现为:沉积记录的不完备性与多解性、空间分布的非连续性,以及地质事件精确定年与动力过程定量表征的困难。

未来,事件沉积学将向高精度表征、多圈层耦合、学科深度融合及资源能源应用方向发展,具体表现为以下 4 大趋势。

3.1 向高精度、多指标、量化表征方向迈进

随着分析测试技术与数据科学的迭代跃升,事件沉积学正经历由传统定性描述向量化表征、精细化解析及智能化研判的深刻转型。未来研究应充分应用高光谱成像、微区地球化学分析、岩石磁学、同位素年代学及显微组构分析等尖端技术,从事件沉积层中解译元素地球化学、同位素组成、矿物学、粒度及沉积组构等多维信息,构建标准化、系统化的多指标数据库。

在上述基础上,深度融合机器学习与人工智能算法,结合三维数字建模技术,实现事件沉积层的智能识别、高精度对比与定量评价。有效厘定突发性地质事件的发生频率、强度、规模、持续时间及空间展布规律,为高精度重建古环境突变过程与灾害演化历史提供强有力的数据支撑与方法论指导。

3.2 强化多类型事件沉积的耦合与“事件链”系统研究

众所周知,在地球形成演化过程中突发性地质事件并非孤立存在,而是表现出显著的连锁效应。如图 11 所示,强烈地震常可同步触发海底滑坡、碎屑流、浊流、海啸及软沉积物变形等一系列沉积响应;类似地,陨石撞击不仅能诱发地

表 2 9 类事件沉积的差异性对比
Table 2 Comparison of differences among nine types of event deposits

事件类型	触发因素	典型沉积序列	典型沉积构造/标志	分布环境	与其他事件区分的关键
地震事件沉积 (震积岩)	地震震动 (液化、滑塌)	震积岩震积序列	火焰构造、液化变形、液 化砂脉、震褶层、微断 层、负载球枕	河流、湖泊、 海洋	同沉积液化变形+微断层
洪水事件沉积 (洪积岩)	强降雨引发的 洪水	砾、砂、泥混杂 沉积层	大型板/槽状交错层理、 冲刷-充填、正粒序 (洪峰→退水)	河流、冲积 扇、洪积扇	河流共生, 季节性正粒 序+大型交错层理, 无深水 重力流特征
冰川事件沉积 (冰碛岩)	冰期引发的冰 川运动	冰川沉积序列(冰 碛岩、冰水砂/砾 互层、纹泥)	杂基支撑、棱角-次圆混 杂(冰碛)、无分选或弱分 选; 冰川擦痕; 冰坠石	冰碛台地、 冰水扇、 冰缘湖/海	分选极差+棱角混杂+擦痕 砾石+寒冷相组合
风暴事件沉积 (风暴岩)	强风暴 (飓风/台风)	风暴沉积序列	丘状交错层理、冲刷面、 生物逃逸迹、正粒序→ 平行纹层→泥披盖	浅海陆棚、 半深海	丘状交错层理+浅海生物组 合+上下为正常海相或湖相 泥岩
海啸事件沉积 (海啸岩)	海底地震/滑坡	海啸沉积序列	侵蚀底界、砂砾层、异常 粒度和生物组合异常	近岸至较深海 平原(异常深 水砂)	异常深水出现浅水组分+强 侵蚀+多向流痕, 区别于正 常风暴与浊流
碎屑流事件沉积 (碎屑流岩)	高坡度失稳	高浓度、塑性层 流, 基质强度/颗 粒摩擦支撑, “冻结式”沉积	块状/杂乱构造, 反粒序 少见, 整体无内部牵引 构造	洪冲积扇、湖 泊、海洋	杂基支撑+无内部层理+高 黏度塑性流标志
浊流事件沉积 (浊积岩)	地震、海啸、 火山	经典鲍马序列	正粒序、平行纹层、上攀 纹层、泥纹层	半深海- 深海; 半深海-深海	完整/不完整鲍马序列+正 粒序+内部牵引层理, 最典 型重力流
缺氧事件沉积 (富有机质泥 页岩)	水体停滞、 富营养	富有机质泥页 岩, 偶见薄凝灰 岩/硅质岩夹层	纹层极发育(季候/微生 物)、无底栖生物扰动、 含黄铁矿, 偶夹火山灰层	局限海盆、深 水陆棚、深海	极富有机碳+无生物扰 动+广覆性暗色泥岩, 非高 能事件但属事件层
火山事件沉积 (火山碎屑沉积)	火山喷发	凝灰岩、火山角 砾岩、火山灰再 沉积层	玻屑/晶屑/岩屑组合, 分 为空携型凝灰岩或水携型 凝灰岩	陆/海相均可	含火山玻璃/晶屑/岩屑+斑 状组合+常夹于其他沉积中

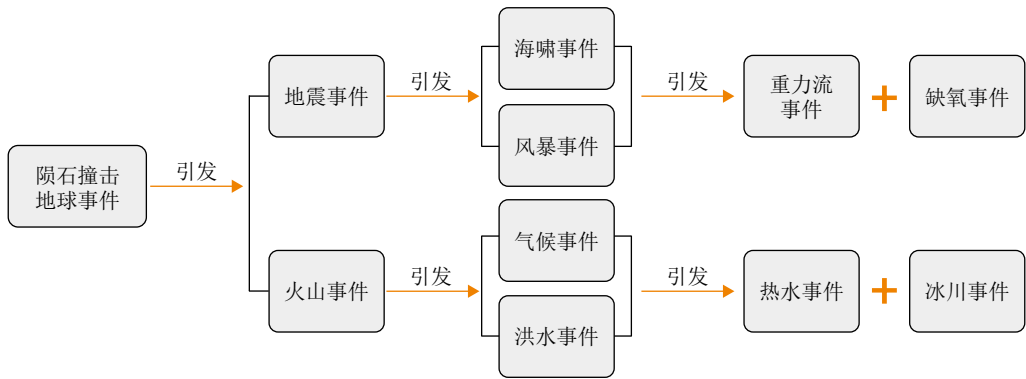


图 11 沉积圈多类型事件沉积耦合构成的“事件链”示意图
Fig. 11 Schematic diagram of an event chain formed by coupling various event deposits in a sedimentary sphere

震与火山活动, 还会导致全球尺度气候异常, 进而在同一沉积层系中留下多类型事件叠加的印记。鉴于此, 未来事件沉积学亟需突破单一事件的研究范式, 聚焦“事件链”的系统解构, 深入探讨多类型事件的相互触发、连续响应及叠加保存机制。

为实现上述目标, (1) 强化现代自然灾害(如地震、滑坡、泥石流、洪水等)的沉积过程监测与原型对比, 精准识别不同事件沉积的宏观微观特征及其空间配置规律; (2) 深化物理模拟与数

值模拟实验,量化事件发生的背景阈值、触发条件、搬运过程及沉积响应参数,构建多类型事件耦合发育模式,从而系统揭示事件链的形成过程、触发机理及时空演化规律。

3.3 深化多学科交叉融合,催生新的理论生长点

事件沉积学未来发展需进一步深化多学科交叉融合。通过与气候学、海洋学、水文学、地震学、生物学、地球化学、行星科学及数据科学等学科的结合,可更加系统地揭示不同类型突发性地质事件的触发机制、沉积响应及环境效应。在此过程中,将孕育出若干新兴学科生长点,如与地史时期重大生物演化或生物绝灭事件相结合形成生物事件沉积学;又如与事件沉积层的常量、微量、稀土、同位素地球化学异常响应特征相结合形成地球化学事件沉积学;再如与行星科学相结合,通过对地外天体的相关事件沉积记录的研究、解读形成行星事件沉积学。

总之,事件沉积学正进入以多学科融合、多过程耦合、多尺度建模和多方法应用为特征的新阶段。未来,新形成的学科理论体系不仅有助于解读地球及行星的“事件记忆”,也将在资源安全、环境演化和灾害风险防控等方面发挥更加重要的作用。

3.4 拓展学科应用领域,服务国家重大战略

事件沉积记录不仅是解码地球演化历史的重要载体,而且具有重要的资源、环境和灾害应用价值。在地球约 46 亿年的演化过程中,多类型事件沉积封存了地球表层系统突变、气候波动、生物演化和构造活动的重要信息;关键层位中铱(Ir)等元素的异常富集,可为识别地外撞击事件、揭示日地耦合机制提供确凿证据。随着深空探测的推进,事件沉积学理论与方法可拓展至行星科学领域,能够有效解读火星、土卫六等地外天体的洪水、风成及疑似地震沉积记录,服务于行星古环境与地质活动历史的重建。

同时,事件沉积学在地质历史时期环境突变、灾害机制及能源矿产形成研究中具有核心地位,因此,亟需强化事件沉积学研究与国家生态环境保护、地质灾害评价与防治、资源能源的勘探与开发等国家战略的对接。如事件沉积层常与重要资源富集密切相关,浊流事件形成的砂体是油气重要的储层,缺氧事件形成的黑色页岩是油气藏形成的烃源岩,也是页岩油气勘探的重

点,同时又是关键金属矿产资源的富集层等。所以,未来应强化“事件-环境-资源”三位一体耦合研究,通过解码事件沉积地质记录,服务油气勘探部署、关键矿产预测及资源潜力综合评价,实现从认识地球向服务国家的跨越。

此外,事件沉积记录也是恢复万年尺度地震、海啸、洪水等重大灾害复发周期和强度的重要依据,可为工程建设、城市规划、海岸带防灾减灾和韧性社会建设提供长期地质依据。

4 结论

(1)事件沉积学历经“思想萌芽、理论奠基、学科形成与快速发展”4个阶段的演变,现已成为地球科学体系中极具活力的核心分支学科之一。

(2)中外针对 9 类典型事件沉积的研究取得了丰硕的成果,但面对多事件叠加、多过程耦合、多尺度响应的复杂地质事件过程,今后需要构建多指标判识体系、定量反演事件周期与强度、厘定多事件耦合机制、阐明不同事件沉积的环境与资源效应。

(3)面向未来,事件沉积学学科将在 4 个维度深化发展:①推进高精度、多指标与定量化表征;②强化多事件耦合机制与“事件链”的系统研究;③深化多学科交叉融合,催生原创性理论生长点;④拓展应用领域,精准服务国家资源安全与防灾减灾战略。

利益冲突声明: 本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

作者贡献声明: 田景春负责论文构思;张翔、林小兵、梁庆韶负责资料统计和论文写作;张翔、林小兵、梁庆韶、王峰、孟万斌、杨田分别参与了相关事件沉积成果总结。所有作者均已阅读并同意提交和发表该稿件。

致谢: 4 位评审专家提出的宝贵建议和意见对于提升本文有很大帮助,在此一并表示衷心的感谢。

[参 考 文 献]

- 柴之芳,马淑兰,毛雪瑛,等,1986. 浙江长兴二叠系/三叠系界线剖面的元素地球化学特征[J]. 地质学报, (2): 139—150.
Chai Z F, Ma S L, Mao X Y, et al., 1986. Elemental geochemical

- characters at the Permian-Triassic boundary section in Changxing, Zhejiang, China[J]. *Acta Geological Sinica*, (2): 139—150. (in Chinese)
- 陈兰, 达雪娟, 朱章雄, 等, 2025. 托阿尔期大洋缺氧事件在中国陆相地层的碳循环扰动响应[J]. *古地理学报*, 27(2): 528—540.
- Chen L, Da X J, Zhu Z X, et al., 2025. Response to carbon cycle perturbation during the Toarcian oceanic anoxic event in terrestrial strata of China[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 27(2): 528—540. (in Chinese)
- 成乐乐, 金思丁, 韩中, 等, 2024. 早侏罗世托阿尔期大洋缺氧事件的天文年代学对比研究[J]. *第四纪研究*, 44(5): 1141—1162.
- Cheng L L, Jin S D, Han Z, et al., 2024. Astrochronological comparative study of the Early Jurassic Toarcian oceanic anoxic event[J]. *Quaternary Sciences*, 44(5): 1141—1162. (in Chinese)
- 冯先岳, 1989. 地震振动液化形变的研究[J]. *内陆地震*, (4): 299—307.
- Feng X Y, 1989. Study on the deformation caused by seismic vibrational liquefaction[J]. *Inland Earthquake*, (4): 299—307. (in Chinese)
- 付金华, 罗顺社, 牛小兵, 等, 2015. 鄂尔多斯盆地陇东地区长7段沟道型重力流沉积特征研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 34(1): 29—37.
- Fu J H, Luo S S, Niu X B, et al., 2015. Sedimentary characteristics of channel type gravity flow of the member 7 of Yanchang Formation in the Longdong area, Ordos Basin[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(1): 29—37. (in Chinese)
- 傅强, 李璟, 邓秀琴, 等, 2019. 沉积事件对深水沉积过程的影响——以鄂尔多斯盆地华庆地区长6油层组为例[J]. *岩性油气藏*, 31(1): 20—29.
- Fu Q, Li J, Deng X Q, et al., 2019. Influence of sedimentary events on deep water sedimentation process: a case of Chang 6 reservoir in Huaqing area, Ordos Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 31(1): 20—29. (in Chinese)
- 傅强, 吕苗苗, 刘永斗, 2008. 鄂尔多斯盆地晚三叠世湖盆浊积岩发育特征及地质意义[J]. *沉积学报*, 26(2): 186—192.
- Fu Q, Lü M M, Liu Y D, 2008. Developmental characteristics of turbidite and its implication on petroleum geology in Late-Triassic Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26(2): 186—192. (in Chinese)
- 郭召杰, 朱贝, 陈石, 2015. 熔积岩及其对中国几处关键构造事件的限定[J]. *地学前缘*, 22(2): 174—186.
- Guo Z J, Zhu B, Chen S, 2015. Peperite: constraints to a few key tectonic events in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(2): 174—186. (in Chinese)
- 韩作振, 宋志刚, 高丽华, 等, 2017. 吉林省“大黑山条垒带”晚古生代火山事件及其构造意义[J]. *地学前缘*, 24(2): 186—201.
- Han Z Z, Song Z G, Gao L H, et al., 2017. Late Paleozoic volcanic events in “Daheishan Horst” in Jilin, China and their tectonic significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(2): 186—201. (in Chinese)
- 何起祥, 2003. 沉积地球科学的历史回顾与展望[J]. *沉积学报*, (1): 10—18.
- He Q X, 2003. Sedimentary earth sciences: yesterday, today and tomorrow[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, (1): 10—18. (in Chinese)
- 侯方浩, 方少仙, 董兆雄, 等, 2003. 鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组沉积环境与岩相发育特征[J]. *沉积学报*, 21(1): 106—112.
- Hou F H, Fang S X, Dong Z X, et al., 2003. The developmental characters of sedimentary environments and lithofacies of Middle Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(1): 106—112. (in Chinese)
- 胡明毅, 贺萍, 2002. 潮坪风暴沉积特征及其研究意义[J]. *地球科学进展*, 17(3): 391—395.
- Hu M Y, He P, 2002. The study of tidal storm deposits and its research significance[J]. *Advances in Earth Science*, 17(3): 391—395. (in Chinese)
- 黄道全, 1988. 冰成岩分类命名的探讨[J]. *岩石学报*, 4(3): 54—62.
- Huang D Q, 1988. On the classification and nomenclature of glacial rocks[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 4(3): 54—62. (in Chinese)
- 姜在兴, 赵微林, 刘孟慧, 1988. 一种沿深水箕状谷纵向搬运的重力流沉积[J]. *石油实验地质*, 10(2): 106—116.
- Jiang Z X, Zhao Z L, Liu M H, 1988. Replaced deposition of gravity flows along moving a deep water dustpan thalweg[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 10(2): 106—116. (in Chinese)
- 姜在兴, 赵微林, 刘孟慧, 等, 1990. 东濮凹陷西部湖相风暴沉积的初步研究[J]. *沉积学报*, 8(1): 107—114.
- Jiang Z X, Zhao C L, Liu M H, et al., 1990. Preliminary research into lacustrine storm-current deposits: an example from the western Dongpu depression[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 8(1): 107—114. (in Chinese)
- 李继亮, 陈昌明, 高文学, 等, 1978. 我国几个地区浊积岩系的特征[J]. *地质科学*, 13(1): 26—44.
- Li J L, Chen C M, Gao W X, et al., 1978. On the features of turbidite sequences in some regions of China[J]. *Chinese Journal of Geology*, 13(1): 26—44. (in Chinese)
- 李四光, 赵亚曾, 1924. 长江峡东地质及峡之历史[J]. *中国地质*

- 学会志, 3(3/4): 351—392.
- 李相博, 卫平生, 刘化清, 等, 2013. 浅谈沉积物重力流分类与深水沉积模式[J]. 地质论评, 59(4): 607—614.
- Li X B, Wei P S, Liu H Q, et al., 2013. Discussion on the classification of sediment gravity flow and the deep-water sedimentary model[J]. Geological Review, 59(4): 607—614. (in Chinese)
- 刘宝珺, 张继庆, 许效松, 1986. 四川兴文四龙下二叠统碳酸盐风暴岩[J]. 地质学报, 60(1): 55—67.
- Liu B J, Zhang J Q, Xu X S, 1986. On the calcareous tempestites in the Lower Permian of Silong, Xingwen, Sichuan[J]. Acta Geologica Sinica, 60(1): 55—67. (in Chinese)
- 刘忠宝, 于炳松, 陈晓林, 等, 2003. 塔里木盆地塔东地区中—上奥陶统海底扇浊积岩层序地层格架及沉积特征[J]. 现代地质, 17(4): 408—414.
- Liu Z B, Yu B S, Chen X L, et al., 2003. Sequence stratigraphy and sedimentary characters of submarine fan of Middle-Upper Ordovician in Tadong area, the Tarim Basin[J]. Geoscience, 17(4): 408—414. (in Chinese)
- 吕奇奇, 罗顺社, 李梦杰, 等, 2020. 深水碎屑流与浊流混合事件层沉积特征及分布——以鄂尔多斯盆地西南长 7 油层组为例[J]. 东北石油大学学报, 44(2): 69—78.
- Lü Q Q, Luo S S, Li M J, et al., 2020. Sedimentary characteristics and distribution of deep-water hybrid event beds comprising debris and turbidites: a case study of Chang7 oil formation in the southwest of Ordos Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 44(2): 69—78. (in Chinese)
- 吕奇奇, 王林, 罗顺社, 等, 2025. 湖相细粒浊流沉积动力学机制初探——基于水槽沉积模拟实验[J]. 沉积学报, 43(3): 769—781.
- Lü Q Q, Wang L, Luo S S, et al., 2025. Preliminary study of the dynamic mechanism of lacustrine fine-grained turbidity deposits based on a flume sedimentary simulation[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 43(3): 769—781. (in Chinese)
- 马俊学, 2017. 岷江上游叠溪古堰塞湖溃坝堆积体的沉积特征及溃决洪水反演[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- Ma J X, 2017. Sedimentary characteristics of outburst deposits and inversion of outburst flood induced by the Diexi paleo dammed lake of the Upper Minjiang River in China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese)
- 潘树新, 郑荣才, 卫平生, 等, 2013. 陆相湖盆块体搬运体的沉积特征、识别标志与形成机制[J]. 岩性油气藏, 25(2): 9—18.
- Pan S X, Zheng R C, Wei P S, et al., 2013. Deposition characteristics, recognition mark and form mechanism of mass transport deposits in terrestrial lake Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 25(2): 9—18. (in Chinese)
- 乔秀夫, 李海兵, 2009. 沉积物的地震及古地震效应[J]. 古地理学报, 11(6): 593—610.
- Qiao X F, Li H B, 2009. Effect of earthquake and ancient earthquake on sediments[J]. Journal of Palaeogeography, 11(6): 593—610. (in Chinese)
- 宋天锐, 1988. 北京十三陵前寒武纪碳酸盐岩地层中的一套可能的地震—海啸序列[J]. 科学通报, 33(8): 609—611.
- Song T R, 1988. A probable earthquake-tsunami sequence in Precambrian carbonate strata of Ming Tombs district, Beijing[J]. Chinese Science Bulletin, 33(13): 1121—1124.
- 孙宁亮, 钟建华, 田东恩, 等, 2017. 鄂尔多斯盆地南部延长组事件沉积与致密油的关系[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 41(6): 30—40.
- Sun N L, Zhong J H, Tian D E, et al., 2017. Relationship between event deposits and tight oil of Yanchang Formation in southern Ordos Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 41(6): 30—40. (in Chinese)
- 田景春, 2014. 事件沉积学[M]. 北京: 地质出版社.
- Tian J C, 2014. Event sedimentology[M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)
- 田景春, 梁庆韶, 王峰, 等, 2022. 陆相湖盆致密油储集砂体成因及发育模式——以鄂尔多斯盆地上三叠统长 6 油层组为例[J]. 石油与天然气地质, 43(4): 877—888.
- Tian J C, Liang Q S, Wang F, et al., 2022. Genetic origin and development model of tight oil reservoir sand bodies in continental lacustrine basins: a case study of the Chang 6 oil layer group of the Upper Triassic, Ordos Basin[J]. Oil and Gas Geology, 43(4): 877—888. (in Chinese)
- 田景春, 梁庆韶, 王峰, 等, 2026. 鄂尔多斯盆地延长组事件沉积学研究[M]. 北京: 科学出版社.
- Tian J C, Liang Q S, Wang F, et al., 2026. Study of event sedimentology of the Yanchang Formation in the Ordos Basin[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- 田景春, 文华国, 张翔, 等, 2024. 沉积地质学研究生系列教材持续建设探索——以成都理工大学为例[J]. 成都理工大学学报(社会科学版), 32(6): 103—112.
- Tian J C, Wen H G, Zhang X, et al., 2024. Exploration of continuous construction of graduate textbook series in sedimentary geology: a case study of Chengdu University of Technology[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Social Sciences), 32(6): 103—112. (in Chinese)
- 王成善, 马永生, 彭平安, 等, 2025. 从沉积学到沉积圈科学: 百年简要回顾与发展展望[J]. 沉积学报, 43(5): 1535—1554.
- Wang C S, Ma Y S, Peng P A, et al., 2025. A century journey from sedimentology to sedimentosphere science: review and perspective[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 43(5): 1535—1554. (in Chinese)

- 王伟涛,杨小强,舒鹏,等,2025. 华南沿海珠江口约1 000 a前海啸事件的沉积记录与海啸源分析[J]. 地震地质, 47(4): 999—1019.
- Wang W T, Yang X Q, Shu P, et al., 2025. Sedimentary records and source analysis of a tsunami event about ~1 000 years ago in the Pearl River estuary along the coast of South China[J]. *Seismology and Geology*, 47(4): 999—1019. (in Chinese)
- 王小妮,杨智,冯有良,等,2024. 咸水湖泊细粒重力流沉积及油气意义:以柴达木盆地英西地区下干柴沟组上段为例[J]. 古地理学报, 26(4): 985—1004.
- Wang X N, Yang Z, Feng Y L, et al., 2024. Fine-grained gravity flow deposits and their petroleum significance in saline lacustrine basins: a case study from the upper member of Lower Ganchaigou Formation in Yingxi area of Qaidam Basin, China[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 26(4): 985—1004. (in Chinese)
- 王喻鸣,王玉琨,李琳琳,等,2023. 南海北部海域北宋年间的古海啸记录及其潜在触发机制[J]. 科学通报, 68(20): 2690—2708.
- Wang Y M, Wang Y K, Li L L, et al., 2023. Paleo-tsunami sedimentary records and potential triggering mechanism during the Earlier Song Dynasty at the northern South China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 68(20): 2690—2708. (in Chinese)
- 魏魁生,叶淑芬,郭占谦,等,1996. 松辽盆地白垩系非海相沉积层序模式[J]. 沉积学报, 14(4): 50—60.
- Wei K S, Ye S F, Guo Z Q, et al., 1996. Sequence stratigraphic model of nonmarine sediments in Cretaceous, Songliao Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 14(4): 50—60. (in Chinese)
- 吴崇筠,1986. 湖盆砂体类型[J]. 沉积学报, 4(4): 1—27.
- Wu C Y, 1986. Sandbodies in lake basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 4(4): 1—27. (in Chinese)
- 吴瑞棠,杨玉卿,1991. 冰川事件的识别标志[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 16(4): 353—359.
- Wu R T, Yang Y Q, 1991. The indicators for recognizing glacial event[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 16(4): 353—359. (in Chinese)
- 吴贤涛,尹国勋,1992. 四川峨眉晚侏罗世湖泊沉积中震积岩的发现及其意义[J]. 沉积学报, 10(1): 19—26.
- Wu X T, Yi G X, 1992. Features and significance of seismites from upper Jurassic lacustrine deposits of Emei, Sichuan[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 10(1): 19—26. (in Chinese)
- 夏青松,田景春,黄昌武,2007. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组震积岩识别标志研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 34(3): 312—317.
- Xia Q S, Tian J C, Huang C W, 2007. Study on the recognition marks of seismites in Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 34(3): 312—317. (in Chinese)
- 徐道一,卢演涛,1985. 陆相和海相地层的天文对比方法[J]. 地层学杂志, 9(3): 195—202.
- 许靖华,奥伯亨斯利 H.,高计元,等,1986. 寒武纪生物爆发前的死劫难海洋[J]. 地质科学, 21(1): 1—6.
- Xu J H, Oberhänsli H, Gao J Y, et al., 1986. Strangelove ocean before the Cambrian explosion[J]. *Chinese Journal of Geology*, 21(1): 1—6. (in Chinese)
- 鄢继华,陈世悦,姜在兴,等,2007. 断陷湖盆震浊积岩成因模拟实验[J]. 古地理学报, 9(3): 277—282.
- Yan J H, Chen S Y, Jiang Z X, et al., 2007. Simulating experiment on genesis of seismo-turbidites in rift lacustrine basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 9(3): 277—282. (in Chinese)
- 严兆彬,郭福生,彭花明,等,2014. 浙西下寒武统大陈岭组沉积异常及其海啸成因初探[J]. 沉积学报, 32(3): 459—467.
- Yan Z B, Guo F S, Peng H M, et al., 2014. Preliminary study on abnormal sediments and their tsunami origin of the Lower Cambrian the Dachenling Formation in western Zhejiang[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(3): 459—467. (in Chinese)
- 杨华,牛小兵,罗顺社,等,2015. 鄂尔多斯盆地陇东地区长7段致密砂体重力流沉积模拟实验研究[J]. 地学前缘, 22(3): 322—332.
- Yang H, Niu X B, Luo S S, et al., 2015. Research of simulated experiment on gravity flow deposits of tight sand bodies of Chang 7 Formation in Longdong area, Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(3): 322—332. (in Chinese)
- 杨剑萍,王辉,陈世悦,等,2004. 济阳拗陷古近系震积岩特征[J]. 沉积学报, 22(2): 281—287.
- Yang J P, Wang H, Chen S Y, et al., 2004. The features of seismite in Jiyang sub-basin, Paleogene[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22(2): 281—287. (in Chinese)
- 杨劲松,王永,尹金辉,等,2022. 我国冲积平原区洪水事件重建研究进展及展望[J]. 地球科学, 47(11): 3944—3959.
- Yang J S, Wang Y, Yin J H, et al., 2022. Progress and prospects in reconstruction of flood events in Chinese alluvial plains[J]. *Earth Science*, 47(11): 3944—3959. (in Chinese)
- 杨仁超,何治亮,邱桂强,等,2014. 鄂尔多斯盆地南部晚三叠世重力流沉积体系[J]. 石油勘探与开发, 41(6): 661—670.
- Yang R C, He Z L, Qiu G Q, et al., 2014. Late Triassic gravity flow depositional systems in the southern Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 41(6): 661—670. (in Chinese)
- 杨仁超,李作福,张学才,等,2023. 异重流沉积研究进展与展望[J]. 沉积学报, 41(6): 1917—1933.

- Yang R C, Li Z F, Zhang X C, et al., 2023. Advances and perspectives in the study of hyperpycnal flow deposition[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(6): 1917—1933. (in Chinese)
- 杨田, 操应长, 田景春, 等, 2025. 沉积物重力流搬运演化与沉积过程[J]. *沉积学报*, 43(5): 1625—1641.
- Yang T, Cao Y C, Tian J C, et al., 2025. Transport, evolution and depositional processes of sediment gravity flows[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 43(5): 1625—1641. (in Chinese)
- 余斌, 章书成, 王士革, 2005. 四川西昌邛海的浊流沉积初探[J]. *沉积学报*, 23(4): 559—565.
- Yu B, Zhang S C, Wang S G, 2005. A preliminary study on the deposition of turbidity currents in Qionghai Lake, Sichuan, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23(4): 559—565. (in Chinese)
- 苑书金, 李发有, 陆文明, 2025. 加密井快速优化技术在西非深水浊积砂油藏精细描述中的应用——以 Bata 油田为例[J]. *物探与化探*, 49(6): 1303—1310.
- Yuan S J, Li F Y, Lu W M, 2025. Application of rapid infill-well optimization technology in fine-scale description of deep-water turbidite reservoirs in West Africa: a case study of the Bata oilfield[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 49(6): 1303—1310. (in Chinese)
- 袁珍, 李文厚, 杨喜彦, 等, 2019. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组事件沉积及其地质意义[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 49(3): 406—416.
- Yuan Z, Li W H, Yang X Y, et al., 2019. Research on event deposits and its geologic significance of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 49(3): 406—416. (in Chinese)
- 曾建理, 张廷山, Popa M E, 等, 2024. 三叠纪末期四川盆地湖泊风暴记录及其驱动机制[J]. *中国科学: 地球科学*, 54(7): 2419—2436.
- Zeng J L, Zhang T S, Popa M E, et al., 2024. End-Triassic storm deposits in the lacustrine Sichuan Basin and their driving mechanisms[J]. *Science China Earth Sciences*, 67(7): 2383—2400.
- 曾雄伟, 周鹏, 刘安, 等, 2014. 三峡东部地区泥盆系写经寺组下部一套可能的海啸沉积[J]. *沉积学报*, 32(5): 816—822.
- Zeng X W, Zhou P, Liu A, et al., 2014. A possible tsunami deposits in the lower part of the Devonian Xiejingsi Formation in the East Yangtze Gorges area[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(5): 816—822. (in Chinese)
- 章诚诚, 方朝刚, 刘桃, 等, 2024. 沉积盆地洪水异重流研究进展[J]. *华东地质*, 45(1): 49—61.
- Zhang C C, Fang C G, Liu T, et al., 2024. Research progress on flood-triggered hyperpycnal flows in sedimentary basins[J]. *East China Geology*, 45(1): 49—61. (in Chinese)
- 张继庆, 冯纯江, 杜德勋, 1986. 四川下二叠统风暴岩的发现及风暴沉积作用的研究[C]//中国地质学会海洋地质专业委员会. 中国地质学会海洋地质专业委员会硫酸盐比较沉积学学术讨论会, 成都: 地矿部成都地质矿产研究所: 15.
- Zhang J Q, Feng C J, Du D X, 1986. Discovery of tempestites in the Lower Permian of Sichuan and study of storm sedimentation[C]//Marine Geology Committee of the Geological Society of China. Symposium on Comparative Sedimentology of Sulfates, Marine Geology Professional Committee, Geological Society of China, Chengdu: Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Ministry of Geology and Mineral Resources: 15. (in Chinese)
- 张勤文, 徐道一, 杨正宗, 等, 1984. 类地天体与地球地质作用的比较研究[J]. *中国地质科学院院报*, (2): 237—246.
- Zhang Q W, Xu D Y, Yang Z Z, et al., 1984. The comparison of geological processes of the Earth with the Earth-like celestial bodies[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, (2): 237—246. (in Chinese)
- 张廷山, 杜翔, 杨巍, 等, 2017. 米仓山前缘早志留世软沉积物变形构造及其触发机制[J]. *沉积学报*, 35(2): 253—263.
- Zhang T S, Du X, Yang W, et al., 2017. A discussion on deformation structures of early Silurian soft sediment and its trigger mechanism in the front of Micangshan Mountain[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(2): 253—263. (in Chinese)
- 赵梅, 2012. 渭河中游古洪水滞流沉积物特征研究[D]. 西安: 陕西师范大学.
- 周炼, 苏洁, 黄俊华, 等, 2011. 判识缺氧事件的地球化学新标志——钼同位素[J]. *中国科学: 地球科学*, 41(3): 309—319.
- Zhou L, Su J, Huang J H, et al., 2011. A new paleoenvironmental index for anoxic events—Mo isotopes in black shales from Upper Yangtze marine sediments[J]. *Science China Earth Sciences*, 54(7): 1024—1033.
- 朱日祥, 王华建, 张旺, 等, 2026. 白垩系全球油气富集的多圈层驱动机制[J/OL]. *地学前缘*, 2026-02-13. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2026.1.15>.
- Zhu R X, Wang H J, Zhang W, et al., 2026. Multi-spheric interactions driven global enrichment of Cretaceous hydrocarbons [J/OL]. *Earth Science Frontiers*, 2026-02-13. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2026.1.15>. (in Chinese)
- 邹才能, 赵政璋, 杨华, 等, 2009. 陆相湖盆深水砂质碎屑流成因机制与分布特征——以鄂尔多斯盆地为例[J]. *沉积学报*, 27(6): 1065—1075.
- Zou C N, Zhao Z Z, Yang H, et al., 2009. Genetic mechanism and distribution of sandy debris flows in terrestrial lacustrine basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(6): 1065—1075. (in Chinese)
- Agassiz L, 1838. Upon glaciers, moraines, and erratic blocks[J]. *The Edinburgh New Philosophical Journal*, 24: 864—883.

- Al-Saqarat B S, Abbas M, Al Hseinat M, et al., 2024. Interpreting soft-sediment deformation structures: insights into earthquake history and depositional processes in the Dead Sea, Jordan[J]. *Geosciences*, 14(8): 217.
- Aigner T, 1982. Calcareous tempestites: storm-dominated stratification in Upper Muschelkalk limestones (Middle Trias, SW-Germany)[C]//Einsele G, Seilacher A. *Cyclic and Event Stratification*. Berlin: Springer-Verlag: 180—198.
- Aigner T, 1985. Storm depositional systems: dynamic stratigraphy in modern and ancient shallow-marine sequences[M]//Aigner T. *Lecture notes in Earth sciences*, Vol. 3, Berlin: Springer-Verlag.
- Allen J R L, 1982. Sedimentary structures: their character and physical basis[M]. Amsterdam: Elsevier.
- Alvarez L W, Alvarez W, Asaro F, et al., 1980. Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction[J]. *Science*, 208(4448): 1095—1108.
- Baker V R, 1987. Paleoflood hydrology and extraordinary flood events[J]. *Journal of Hydrology*, 96(1/2/3/4): 79—99.
- Baker V R, 2008. Paleoflood hydrology: origin, progress, prospects[J]. *Geomorphology*, 101(1/2): 1—13.
- Batubo P, Morra G, Oppo D, et al., 2024. A medium-sized paleo-tsunami reconstruction by a deep neural network processing sedimentary deposits[J]. *Earth and Space Science*, 11(1): e2023EA003216.
- Bauerman H, 1885. Report on the geology of the country near the forty-ninth parallel of north latitude, west of the Rocky Mountains[R]. Canada Geological Survey Report Program, 1882—1884, Part B: 1—42.
- Bernhardt A, Stright L, Lowe D R, 2012. Channelized debris-flow deposits and their impact on turbidity currents: the Puchkirchen axial channel belt in the Austrian Molasse Basin[J]. *Sedimentology*, 59(7): 2042—2070.
- Bond D P G, Wignall P B, 2010. Pyrite framboid study of marine Permian-Triassic boundary sections: a complex anoxic event and its relationship to contemporaneous mass extinction[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 122(7/8): 1265—1279.
- Boulton G S, 1982. Subglacial processes and the development of glacial bedforms[J]. *Research in glacial, glacio-fluvial, and glacio-lacustrine systems*. Proc. 6th Guelph symposium on geomorphology, 1980: 1—31.
- Bouma A H, 1962. Sedimentology of some flysch deposits: a graphic approach to facies interpretation[M]. Amsterdam: Elsevier: 168.
- Bourgeois J, Hansen T A, Wiberg P L, et al., 1988. A tsunami deposit at the Cretaceous-Tertiary boundary in Texas[J]. *Science*, 241(4865): 567—570.
- Brenchley P J, Newall G, Stanistreet I G, 1979. A storm surge origin for sandstone beds in an epicontinental platform sequence, Ordovician, Norway[J]. *Sedimentary Geology*, 22(3/4): 185—217.
- Chen X S, Kuang H W, Liu Y Q, et al., 2021. Revisiting the Nantuo Formation in Shennongjia, South China: a new depositional model and multiple glacial cycles in the Cryogenian[J]. *Precambrian Research*, 356: 106132.
- Chen X Y, Blockley S P E, Tarasov P E, et al., 2016. Clarifying the distal to proximal tephrochronology of the millennium (B-Tm) eruption, Changbaishan Volcano, northeast China[J]. *Quaternary Geochronology*, 33: 61—75.
- Daly R A, 1936. Origin of submarine “canyons” [J]. *American Journal of Science*, 31(186): 401—420.
- Dawson A G, 1994. Geomorphological effects of tsunami run-up and backwash[C]//The 25th Binghamton Symposium in Geomorphology. Binghamton: Elsevier: 83—94.
- Dawson A G, Stewart I, 2007. Tsunami deposits in the geological record[J]. *Sedimentary Geology*, 200(3/4): 166—183.
- Demaison G J, Moore G T, 1980. Anoxic environments and oil source bed genesis[J]. *Organic Geochemistry*, 2(1): 9—31.
- Dodd T J H, Leslie A G, Gillespie M R, et al., 2020. Deep to shallow-marine sedimentology and impact of volcanism within the Middle Triassic Palaeo-Tethyan Semantan Basin, Singapore[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 196: 104371.
- Einsele G, 1996. Event deposits: the role of sediment supply and relative sea-level changes—overview[J]. *Sedimentary Geology*, 104(1/2/3/4): 11—37.
- Einsele G, Seilacher A, 1982. *Cyclic and event stratification*[M]. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Forel F A, 1881. Ravins sous-lacustres des fleuves glaciaires[J]. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 101(16): 725—728.
- Fujino S, Masuda F, Tagomori S, et al., 2006. Structure and depositional processes of a gravelly tsunami deposit in a shallow marine setting: Lower Cretaceous Miyako Group, Japan[J]. *Sedimentary Geology*, 187(3/4): 127—138.
- Geikie A, 1863. On the phenomena of the glacial drift of Scotland[J]. *Transactions of the Geological Society of Glasgow*, 1(2): 186—190.
- Gilbert G K, 1899. Ripple-marks and cross-bedding[J]. *Bulletin of the Geological Society of America*, 10(1): 135—140.
- Goff J, Pearce S, Nichol S L, et al., 2010. Multi-proxy records of regionally-sourced tsunamis, New Zealand[J]. *Geomorphology*, 118(3/4): 369—382.
- Goff J, Chagué-Goff C, Nichol S, et al., 2012. Progress in palaeo-tsunami research[J]. *Sedimentary Geology*, 243/244: 70—88.
- Goldberg T, Poulton S W, Wagner T, et al., 2016. Molybdenum

- drawdown during Cretaceous Oceanic Anoxic Event 2[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 440: 81—91.
- Hampton M A, 1972. The role of subaqueous debris flow in generating turbidity currents[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 42(4): 775—793.
- Hatch F H, Rastall R H, 1913. *The Petrology of the Sedimentary Rocks*[M]. London: George Allen & Unwin Ltd.
- Heim A, 1932. *Bergsturz und menschenleben*[M]. Zürich: Fretz & Wasmuth.
- Hsü K J, 1983. Actualistic catastrophism; address of the retiring president of the international association of sedimentologists[J]. *Sedimentology*, 30(1): 3—9.
- Hussain A, Haughton P D W, Shannon P M, et al., 2020. High-resolution X-ray fluorescence profiling of hybrid event beds: implications for sediment gravity flow behaviour and deposit structure[J]. *Sedimentology*, 67(6): 2850—2882.
- Jackson K, Rogers J A, Wang P, et al., 2024. Archaeo-tempestites and coastal taphonomy of shell-bearing sites: native American sites in Florida as a case study[J]. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 31(4): 1622—1667.
- Jones C E, Halliday A N, Rea D K, et al., 1994. Neodymium isotopic variations in North Pacific modern silicate sediment and the insignificance of detrital REE contributions to seawater[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 127(1/2/3/4): 55—66.
- Kataoka K S, Nagahashi Y, McArthur A, 2019. From sink to volcanic source: unravelling missing terrestrial eruption records by characterization and high-resolution chronology of lacustrine volcanic density flow deposits, Lake Inawashiro-ko, Fukushima, Japan[J]. *Sedimentology*, 66(7): 2784—2827.
- Kelling G, Mullin P R, 1975. Graded limestones and limestone-quartzite couplets: possible storm-deposits from the Moroccan Carboniferous[J]. *Sedimentary Geology*, 13(3): 161—190.
- Kettler C, Phillips E, Pichler K, et al., 2023. 3D macro- and micro-fabric analyses of Neoproterozoic diamictites from the Valjean Hills, California (United States)[J]. *Frontiers in Earth Science*, 11: 929011.
- Key R M, Liyungu A K, Njamu F M, et al., 2001. The western arm of the Lufilian Arc in NW Zambia and its potential for copper mineralization[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 33(3/4): 503—528.
- Kneller B, Buckee C, 2000. The structure and fluid mechanics of turbidity currents: a review of some recent studies and their geological implications[J]. *Sedimentology*, 47(S1): 62—94.
- Kochel R C, Baker V R, 1982. Paleoflood hydrology[J]. *Science*, 215(4531): 353—361.
- Kreisa R D, 1981. Storm-generated sedimentary structures in subtidal marine facies with examples from the Middle and Upper Ordovician of southwestern Virginia[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 51(3): 823—848.
- Kuenen P H, Migliorini C I, 1950. Turbidity currents as a cause of graded bedding[J]. *The Journal of Geology*, 58(2): 91—127.
- Labourdette R, 2007. Integrated three-dimensional modeling approach of stacked turbidite channels[J]. *AAPG Bulletin*, 91(11): 1603—1618.
- Lara F, Lara-Cueva R, Larco J C, et al., 2021. A deep learning approach for automatic recognition of seismo-volcanic events at the Cotopaxi volcano[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 409: 107142.
- Leenman A S, Eaton B C, Mackenzie L G, 2022. Floods on alluvial fans: implications for reworking rates, morphology and fan hazards[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 127(2): e2021JF006367.
- Li J J, Jansen J D, Carling P A, et al., 2025a. Palaeoseismicity recorded in soft-sediment deformation structures within a 166-m-long drill core from Diexi Palaeolake, eastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Mountain Science*, 22(12): 4464—4489.
- Li F J, Chen Z A, Acikalin S, et al., 2025b. Storm deposit characteristics and orbital cyclicity of the Early Devonian Xiejia wan Formation in the Longmenshan area, Sichuan Province, China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 664: 112792.
- Maier K L, Strachan L J, Tickle S, et al., 2024. Testing turbidite conceptual models with the Kaikōura Earthquake co-seismic event bed, Aotearoa New Zealand[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 94(3): 325—333.
- Magirl C S, Griffiths P G, Webb R H, 2010. Analyzing debris flows with the statistically calibrated empirical model LAHARZ in southeastern Arizona, USA[J]. *Geomorphology*, 119(1/2): 111—124.
- Manville V, Németh K, Kano K, 2009. Source to sink: a review of three decades of progress in the understanding of volcanoclastic processes, deposits, and hazards[J]. *Sedimentary Geology*, 220(3/4): 136—161.
- Liao Z W, Hu W X, Cao J, et al., 2020. Oceanic anoxia through the late Permian Changhsingian Stage in the Lower Yangtze region, South China: evidence from sulfur isotopes and trace elements[J]. *Chemical Geology*, 532: 119371.
- Middleton G V, Hampton M A, 1973. Sediment gravity flows: mechanics of flow and deposition[C]//Middleton G V, Bouma A H. *Turbidity Currents and Deep-Water Sedimentation*. Los Angeles: Pacific Section SEPM: 1—38.
- Modie B N, 2002. A glacial interpretation of a Neoproterozoic (≈ 2.78 Ga) volcanogenic sedimentary sequence in the

- Nnywane Formation, Sikwane, Southeast Botswana[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 35(1): 163—175.
- Molenaar A, Wils K, Van Daele M, et al., 2024. Shaken and stirred: a comparative study of earthquake-triggered soft-sediment deformation structures in lake sediments[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 25(6): e2023-GC011402.
- Montenat C, Barrier P, Ott D'estevou P, et al., 2007. Seismites: an attempt at critical analysis and classification[J]. *Sedimentary Geology*, 196(1/2/3/4): 5—30.
- Moretti M, Pieri P, Tropeano M, 2002. Late Pleistocene soft-sediment deformation structure interpreted as seismites in paralic deposits in the city of Bari (Apulian foreland, southern Italy)[J]. *Special Paper of the Geological Society of America*, 359: 75—85.
- Owen G, 1996. Experimental soft-sediment deformation: structures formed by the liquefaction of unconsolidated sands and some ancient examples[J]. *Sedimentology*, 43(2): 279—293.
- Patacci M, Marini M, Felletti F, et al., 2020. Origin of mud in turbidites and hybrid event beds: insight from ponded mudstone caps of the Castagnola turbidite system (north-west Italy)[J]. *Sedimentology*, 67(5): 2625—2644.
- Percival L M E, van Helmond N A G M, Selby D, et al., 2020. Complex interactions between large igneous province emplacement and global-temperature changes during the Cenomanian-Turonian oceanic anoxic event (OAE 2)[J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 35(10): e2020-PA004016.
- Rodríguez-Pascua M A, Calvo J P, De Vicente G, et al., 2000. Soft-sediment deformation structures interpreted as seismites in lacustrine sediments of the Prebetic Zone, SE Spain, and their potential use as indicators of earthquake magnitudes during the Late Miocene[J]. *Sedimentary Geology*, 135(1/2/3/4): 117—135.
- Rogov M A, Shchepetova E V, Zakharov V A, 2020. Late Jurassic-earliest Cretaceous prolonged shelf dysoxic-anoxic event and its possible causes[J]. *Geological Magazine*, 157(10): 1622—1642.
- Savelyeva O L, 2019. Geochemical events at the Cenomanian-Turonian boundary: relation of anoxia with volcanism, climate, and ocean circulation[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 60(9): 990—1007.
- Schlanger S O, Jenkyns H C, 1976. Cretaceous oceanic anoxic events: causes and consequences[J]. *Geologie en Mijnbouw*, 55(3/4): 179—184.
- Schnyder J, Baudin F, Deconinck J F, 2005. A possible tsunami deposit around the Jurassic-Cretaceous boundary in the Boulonnais area (northern France)[J]. *Sedimentary Geology*, 177(3/4): 209—227.
- Seilacher A, 1969. Fault-graded beds interpreted as seismites[J]. *Sedimentology*, 13(1/2): 155—159.
- Shan X, Yu X H, Jin L N, et al., 2021. Bed type and flow mechanism of deep water sub-lacustrine fan fringe facies: an example from the Middle Permian Lucaogou Formation in Southern Junggar Basin of NW China[J]. *Petroleum Science*, 18(2): 339—361.
- Shanmugam G, 2000. 50 years of the turbidite paradigm (1950s—1990s): deep-water processes and facies models—a critical perspective[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 17(2): 285—342.
- Shimada Y, Matsumoto D, Tanigawa K, et al., 2025. Sedimentological and micropaleontological characteristics of tsunami deposits associated with the 2024 Noto Peninsula earthquake[J]. *Scientific Reports*, 15(1): 9820.
- Shinozaki T, Iguchi A, Nishijima M, et al., 2025. Identification of deposits from modern and ancient large tsunamis by means of environmental DNA[J]. *Scientific Reports*, 15(1): 242.
- Sun W W, Ming G D, Yang G M, et al., 2026. ⁴¹Ca exposure dating of glacial moraines[J/OL]. *Science Bulletin*, 2026-03-24. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2026.03.052>.
- Talling P J, 2014. On the triggers, resulting flow types and frequencies of subaqueous sediment density flows in different settings[J]. *Marine Geology*, 352: 155—182.
- Talling P J, Masson D G, Sumner E J, et al., 2012. Subaqueous sediment density flows: depositional processes and deposit types[J]. *Sedimentology*, 59(7): 1937—2003.
- Tasistro-Hart A R, Macdonald F A, Crowley J L, et al., 2025. Four-million-year Marinoan snowball shows multiple routes to deglaciation[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 122(18): e2418281122.
- Walker R G, 1978. Deep-water sandstone facies and ancient submarine fans: models for exploration for stratigraphic traps[J]. *AAPG Bulletin*, 62(6): 932—966.
- Wall S, Murphy B P, Belmont P, et al., 2023. Predicting post-fire debris flow grain sizes and depositional volumes in the Inter-mountain West, United States[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 48(1): 179—197.
- Westermann S, Vance D, Cameron V, et al., 2014. Heterogeneous oxygenation states in the Atlantic and Tethys oceans during oceanic anoxic event 2[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 404: 178—189.
- Wignall P B, Twitchett R J, 1996. Oceanic anoxia and the end Permian mass extinction[J]. *Science*, 272(5265): 1155—1158.
- Wilhelm B, Amann B, Corella J P, et al., 2022. Reconstructing

- paleoflood occurrence and magnitude from lake sediments[J]. *Quaternary*, 5(1): 9.
- Yang T, Cao Y C, Liu K Y, et al., 2019. Origin of deep-water fine-grained sediments as revealed from the Lower Cretaceous rifting basin sequence in the Lingshan Island, Yellow Sea, eastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 186: 104065.
- Young G M, 1991. The geologic record of glaciation: relevance to the climatic history of Earth[J]. *Geoscience Canada*, 18(3): 100.
- Yu X X, Bai J H, Wei G J, et al., 2026. Stable neodymium isotopic composition of the upper continental crust through time from ancient glacial diamictites and Holocene marine sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 422: 235—246.
- Zhang T S, Kershaw S, Wan Y, et al., 2000. Geochemical and facies evidence for palaeoenvironmental change during the Late Ordovician Hirnantian glaciation in South Sichuan Province, China[J]. *Global and Planetary Change*, 24(2): 133—152.
- Zhao X D, Xue N H, Yang H, et al., 2025. Climate-carbon-cycle interactions and spatial heterogeneity of the late Triassic Carnian pluvial episode[J]. *Nature Communications*, 16: 5404.
- Zhong G F, Cartigny M J B, Kuang Z G, et al., 2015. Cyclic steps along the South Taiwan Shoal and West Penghu submarine canyons on the northeastern continental slope of the South China Sea[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 127(5/6): 804—824.
- Zurli L, Perotti M, Cornamusini G, 2024. Composition of Late Paleozoic Ice Age tillites in Victoria Land (Antarctica): implications for sediment provenance and ice centers extent in southern Gondwana[J]. *Rendiconti Online della Società Geologica Italiana*, 63: 37—44.