

## 湖泊沉积的灾害事件记录与识别方法：研究进展与存在问题

李莹莹, 李林林, 何仲太

### The Lacustrine Sedimentary Response to the Natural Hazards

LI Ying-ying, LI Lin-lin, and HE Zhong-tai

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19987/j.dzqxjz.2023-130>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 菲律宾国家自然灾害响应机制研究

Study on the Philippines natural disaster response plan

地震科学进展. 2021(8): 379-384

#### 逆断层地震作用下三维沉积盆地地震动谱元法模拟

Spectral element method simulation of three-dimensional sedimentary basin under reverse-fault earthquakes

地震科学进展. 2020(10): 13-22

#### 地震影响的经济韧性评价研究进展

The progress of the research on economic resilience to earthquake disasters

地震科学进展. 2021(7): 297-303

#### 唐山地震震后科普状况调研及政策建议

Research and policy suggestions on the popularization of science after the great Tangshan earthquake

地震科学进展. 2020(11): 27-32

#### 区域与城市地震风险评估与监测技术研究项目及研究进展

Project plan and research progress on regional and urban earthquake risk assessment and monitoring technology

地震科学进展. 2020(3): 1-19

#### 数字化氡气在井（泉）地震监测中的研究进展

The research progress on digital measurement of gas Radon in wells(springs) for seismic monitoring

地震科学进展. 2020(8): 8-13



关注微信公众号，获得更多资讯信息

李营营, 李林林, 何仲太. 湖泊沉积的灾害事件记录与识别方法: 研究进展与存在问题 [J]. 地震科学进展, 2024, 54(1): 110-123. doi:10.19987/j.dzksjz.2023-130

Li Y Y, Li L L, He Z T. Lacustrine sedimentary response to natural hazards[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2024, 54(1): 110-123. doi:10.19987/j.dzksjz.2023-130

## 综述与评述

# 湖泊沉积的灾害事件记录与识别方法: 研究进展与存在问题

李营营<sup>1)</sup> 李林林<sup>1, 2, 3)\*</sup> 何仲太<sup>4)</sup>

1) 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100085

2) 复合链生自然灾害动力学应急管理部重点实验室, 北京 100085

3) 中国地震局地壳动力学重点实验室, 北京 100085

4) 地震动力学国家重点实验室, 中国地震局地质研究所, 北京 100029

**摘要** 湖泊沉积储存有丰富的信息, 常被用于指示气候变化。地震、洪水、滑坡或崩塌等自然灾害事件通常会在湖泊沉积中形成特征性的湖泊沉积扰动, 可以使用湖泊地质学方法对其进行分析与识别。本文回顾了湖泊沉积研究历程, 对典型自然灾害湖泊沉积特征进行系统总结, 着重梳理介绍湖泊沉积中自然灾害事件识别方法。其中综合分析法集成了现阶段湖泊事件沉积识别的多种分析手段: ①根据沉积相与异常事件沉积(EID)之间的关系判定其内源或外源成因; ②根据对触发因素的排除, 确定最可能的触发因素; ③根据现有的识别标准, 验证最可能触发因素的正确性。是目前识别湖泊扰动成因最有效的分析手段。本文还对湖泊沉积灾害事件研究的优势与不足及制约因素进行讨论, 湖泊沉积具有连续性、敏感性和高分辨率的特点有助于对灾害事件进行研究, 但对湖泊典型自然灾害事件沉积识别标志的建立仍然是制约湖泊异常事件沉积研究的关键。

**关键词** 湖泊沉积; 自然灾害; 地震; 异常事件沉积

中图分类号: P343.3 文献标识码: A 文章编号: 2096-7780(2024)01-0110-14

doi: 10.19987/j.dzksjz.2023-130

## Lacustrine sedimentary response to natural hazards

Li Yingying<sup>1)</sup>, Li Linlin<sup>1, 2, 3)\*</sup>, He Zhongtai<sup>4)</sup>

1) National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management of China, Beijing 100085, China

2) Key Laboratory of Compound and Chained Natural Hazards Dynamics, Ministry of Emergency Management of China, Beijing 100085, China

收稿日期: 2023-09-20; 采用日期: 2023-11-30。

基金项目: 应急管理部国家自然灾害防治研究院中央级公益性科研院所基本科研业务专项(ZDJ2019-14)和国家科技基础资源调查专项(2021FY100104)联合资助。

第一作者: 李营营(2000-), 女, 硕士研究生, 主要从事古地震学、活动构造与地震地质学研究。E-mail: lemon\_liy@163.com。

\* 通信作者: 李林林(1986-), 男, 副研究员, 主要从事沉积学、湖泊沉积古地震学、活动构造与地震地质学研究。

E-mail: lecin@sina.com。



3) Key Laboratory of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

4) State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

**Abstract** Lacustrine sediments store a wealth of information and are often used to indicate climate change. Natural disasters such as earthquake, flood, landslide or collapse usually form characteristic disturbances in lacustrine sediments, which can be analyzed and identified using lake geology methods. This paper reviews the research progress of lacustrine sediments, systematically summarizes the characteristics of typical natural disasters in lacustrine sediments, and focuses on the identification methods of natural disaster events in lacustrine sediments. Among them, the comprehensive analysis method integrates various analysis methods for sedimentary identification of lake events at the present stage. ① Identify the endogenous and exogenous origin based on the relationship between sedimentary facies and event-induced deposits (EID); ② Recognize the most likely trigger based on the elimination of impossible triggers; ③ Verify the correctness of the most likely trigger according to the existing identification criteria. This method integrates the advantages of typical mark analysis and exclusion method, and is the most effective analysis method at present. This paper also discusses the advantages, disadvantages and constraints of the study of lacustrine sediment disaster events. The continuity, sensitivity and high resolution of lacustrine sediments are conducive to the study of disaster events, but the establishment of sedimentary identification markers of typical natural disaster events in lakes is still the key to restricting the study of lake abnormal events in the future.

**Keywords** lacustrine sediments; natural hazard; earthquake; event-induced deposit

## 0 引言

湖泊沉积储存有丰富的信息,如全球和区域气候波动、构造事件及人类活动引发的扰动等信息,具有连续性、敏感性和高分辨率的特点,常被用来研究气候变化<sup>[1-4]</sup>,如 Wang 等<sup>[5]</sup>利用邛海湖沉积物的脂质生物标志物和地球化学记录来推断近 30 cal ka BP 的古气候变化。湖泊沉积不仅可用于研究环境气候变化,还有助于深入理解沉积过程。与河流或海洋等类似,湖泊也可以提供有价值的数据,可以放大以模拟湖泊环境中的各种过程,并重建过去的自然灾害事件,如洪水、地震、滑坡或崩塌等<sup>[6-10]</sup>。

此类自然灾害事件通常会在湖泊沉积中形成特征性的湖泊沉积扰动,引发特征性的大规模运动以及沉积物变形等“异常事件沉积”(EID)。EID 的 4 种主要类型包括以整体搬运为主的块体运动堆积(MTD),变形结构(DS),以湖泊浊流沉积为代表的重力流堆积(LT)以及地震动触发沉积物重启、搬运并最终形成的分散体系沉积(SIR)。EID 是指示异常事件的最主要标志<sup>[11]</sup>。这种特征性的 EID 在湖泊沉积物中普遍发育,且与历史上的灾难性事件(如洪水、地震、滑坡和崩塌等)息息相关,可以使用湖泊地质学方法对其进行分析与识别。通过对已知历史灾害事件相关 EID 特征的精确表征,结合不同测年

技术获取高精度时间标尺,可以实现对过往自然灾害事件过程的重建。历史记录和仪器数据的时间范围通常仅限于千年,为了讨论低频灾害事件的发生和发展过程,需要更长时间尺度的记录,而湖泊沉积研究恰好可以弥补这一缺陷。

研究以往地震、洪水、滑坡或崩塌等自然灾害事件,对于预测及防治此类自然灾害事件具有十分重要的意义。传统的湖泊科学研究主要关注连续沉积的古气候演变及其趋势,甚少对湖泊沉积中自然灾害异常事件记录进行研究。本文将回顾湖泊沉积研究历程,对典型自然灾害湖泊沉积特征进行系统总结,着重总结梳理湖泊沉积中自然灾害事件识别方法。

## 1 湖泊沉积研究历程

对于湖泊沉积的研究最早起源于美国,1885 年 Russel 利用内华达州西部更新世 Lahontan 湖泊沉积物对地质历史进行研究。1890 年 Gilbert 对犹他州大盐湖前身更新世 Bonneville 湖泊沉积物进行湖泊演化研究开启了湖泊沉积研究的先河<sup>[12]</sup>。1920 年, Nipkow 使用简易的玻璃管式取样装置,在苏黎世湖中获得首个湖芯,并对其进行内部性质分析,极大地推动了湖泊沉积研究的发展。20 世纪 50 年代以来,湖泊沉积研究取得快速发展, Kullenberg 首次在苏黎世湖中钻得 8.5 m 长湖芯,通过对样品进行化学和孢粉分析,

阐明了冰后期以后的湖泊演变过程以及物质循环变化,其代表湖泊沉积研究在取样手段以及研究内容上的巨大革新。20 世纪 70 年代后期以来,古湖泊学在国际地学界被普遍关注。其研究主要分为两个方向:①以湖泊沉积中的晚第四纪地层为研究对象,主要讨论古气候演化与发展趋势预测以及环境保护等<sup>[13-16]</sup>;②以构造湖盆的中新生代地层为研究对象,重点讨论盆地构造、油气形成和地质演化等<sup>[17-22]</sup>。

我国湖泊科学研究起步稍晚于国外,20 世纪 10 年代江淮水利测量局在洪泽湖的盱眙、老子山和蒋坝等地设水文站进行水文观测,是我国湖泊科学的开端。随后,20 年代至 40 年代国内学者进行了太湖、洞庭湖等部分湖泊的水文测量及形态测量。20 世纪 50 年代以后,我国科学家开始对湖泊进行综合调查、水文气象、湖泊地貌、水文保护、水文化学以及水生生物等方面的研究,取得了一系列成果,并在 20 世纪 70 年代,逐渐开展湖泊沉积与环境演变研究<sup>[23]</sup>。80 年代以来,湖泊沉积学进入全面发展时期,该时期湖泊沉积研究还引入稳定同位素、环境磁学等新技术和新方法,同时由于油气勘探的需要,还在陆相含油盆地、中新生代湖相地层和湖泊沉积的岩相古地理等方面进行了深入研究。自 80 年代后期到 90 年代初,湖泊沉积研究受到了广泛关注和重视。在全球环境变化及国际大陆钻探计划的推动下,中国陆续展开了多个湖泊钻探项目,从而积累了涵盖不同地貌阶梯的百万年尺度湖泊环境演变资料,揭示了青藏高原抬升的环境影响<sup>[24-25]</sup>,并且主要根据古季风理论探讨晚第四纪环境演化,但是以湖泊沉积重建的环境演化序列量化研究仍处于探索阶段。近年来,浅地层地震剖面技术等新技术方法应用于湖泊沉积研究<sup>[26-27]</sup>,填补了钻孔分析“一柱之见”的不足,进一步推动了湖泊沉积研究的发展。

关于湖泊沉积物中的异常事件沉积,前人也进行过相关研究。1932 年 Heim 详实的记录并探讨了瑞士主要湖泊(如卢塞恩湖和苏黎世湖等)在过去自然灾害事件中发生的再沉积过程,这是关于自然灾害事件在湖泊中响应的首次研究。近现代的湖泊沉积学主要关注连续沉积的古气候演变及其趋势,甚少对自然灾害事件在湖泊沉积中的记录进行研究,但是地震、滑坡等自然灾害事件在湖泊沉积中也有非常好的响应记录<sup>[28-30]</sup>。20 世纪 80 年代以来,在地学领域中“灾变论”被广泛关注,事件沉积学与事件地层学也逐渐引起人们的注意,演变并发展成为新兴

边缘学科,在湖泊沉积中突变事件研究也开始受到学者们的重视,如 1987 年 Siegenthaler 等<sup>[31]</sup>对瑞士卢塞恩湖的地震和地震沉积物进行了研究。近年来,地震、滑坡、崩塌以及洪水等自然灾害事件在湖泊沉积中的记录逐渐成为湖泊研究的重要内容,但研究的难点还在于如何在 EID 中区分出不同自然灾害事件。Girardclos 等<sup>[32]</sup>在 2017 年研究公元 1996 年布里恩茨湖三角洲崩塌和巨型浊积岩时认为,湖泊沉积研究会为自然灾害的评估开辟新的视角。

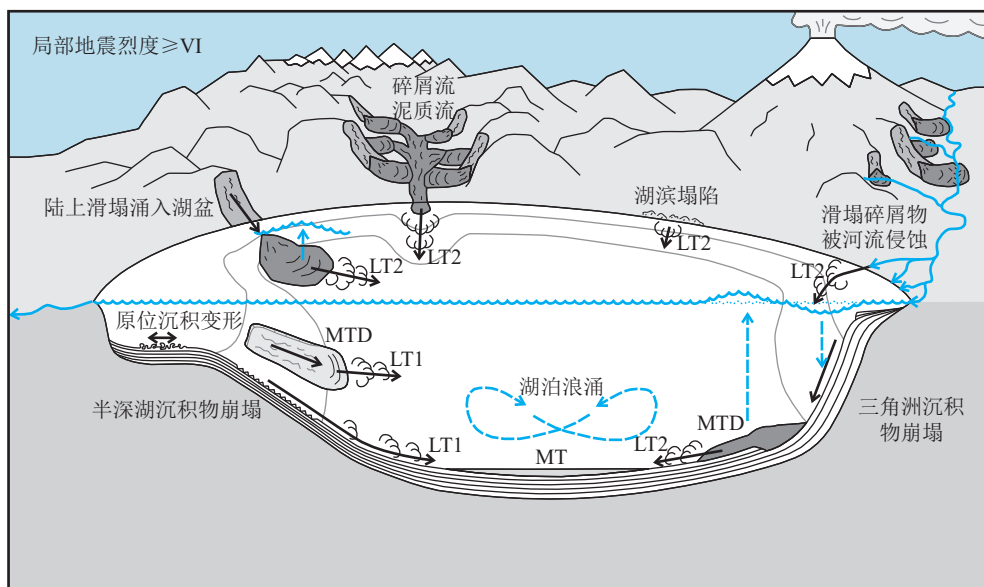
## 2 湖泊典型自然灾害事件沉积

湖泊沉积储存有丰富的环境信息,具有连续性、敏感性和高分辨率的特点,地震、洪水、滑坡和崩塌等自然灾害事件在湖泊沉积中均有良好的记录。

### 2.1 地震

地震作为地球内动力作用的重要表现形式,是由地球内部结构失衡,应力突然释放以及爆发巨大能量的灾变事件<sup>[33]</sup>。古地震学是旨在揭示并探讨地质记录中保留的古地震事件的科学,其主要优势是可以填补仪器数据以及历史地震资料的短时和有限性的不足,从而让我们可以深入了解地震断裂的长期活动习性,并评估未来地震风险。传统的古地震研究常用探槽技术进行遗迹探测,如冉勇康等<sup>[34]</sup>利用三维探槽技术对海原断裂高湾子地点进行古地震研究,但是传统的古地震研究具有明显局限性,例如古地震记录不够完整以及可供古地震研究的区域有限。而湖泊沉积物通常会形成具有相对连续性的沉积地层,具有高分辨率、高敏感性、长期记录以及地域分布广泛等特点,可以在一定程度上弥补这些缺陷。湖泊沉积古地震是借助古地震活动所导致的湖泊沉积扰动,在辨识湖泊沉积物扰动特征的基础上,与年代学约束相结合,以重建古地震事件的相关信息<sup>[35]</sup>。近年来,由于水下采样技术的不断完善,地震剖面采集精度的提升,以及多种分析测试方法的发展,以湖泊沉积扰动为基础的古地震研究逐渐引起了研究者的重视<sup>[36-39]</sup>。Van Daele 等<sup>[40]</sup>对智利南部的 17 个湖盆中 1960 年和 2010 年两次地震事件所留下的湖泊沉积记录开展了细致的研究,识别出变形结构(DS)、块体搬运沉积(MTD)、浊流沉积(LT)等不同的异常事件沉积,通过对各类异常事件沉积分布位置和形态特征分析,制作出地震发震时的湖泊沉积响应模式(图 1)。



图1 地震活动引发湖泊沉积响应模式<sup>[40]</sup>Fig. 1 Model of seismicity-induced lacustrine sedimentary response<sup>[40]</sup>

传统的古地震学根据断层长度与位错量等推断古地震震级/强度<sup>[41]</sup>, 湖泊异常事件沉积也可以用来确定古地震震级/强度。主要方法有经验估算法、最大液化距离法、扰动层厚度法、经验公式法、变形类型法、快速沉积砂层厚度法等。

在经验估算法中, Scott 和 Price<sup>[42]</sup>认为地震震级  $M \geq 5.0$  时, 湖泊沉积物可以产生显著的液化现象, 小于 5 级的地震几乎不会导致液化。而最大液化距离法是根据地震引发的液化与地震震级以及震源深度之间存在的显著关联性进行估算, Kuribayashi 和 Tatsuka<sup>[43]</sup>以 1872—1968 年间在日本发生的 44 次  $M_S > 5.5$  的地震资料为基础, 制作了日本地区地震和液化的分布图。结果表明, 最远液化距离  $R$  和震级  $M$  有很好的正相关关系, 并且第一次得到了地震震级和最远地表液化距离关系图。乔秀夫等<sup>[44]</sup>于 2017 年在总结前人成果的基础上绘制了综合性的液化变形最大震中距与地震震级关系图(图 2)。

地震的强度与其释放的能量成正比, 伴随着地震强度的增加, 破坏性也相应增强, 导致震中区域内的沉积扰动程度加重。Hibsch 等<sup>[45]</sup>通过对厄瓜多尔基多盆地北部的全新世河流—湖泊沉积物进行地震成因变形的厚度和历史地震活动记录的地震强度的分析, 提出扰动层厚度法来确定地震古烈度。对于相似岩性地层, 地震强度与扰动层厚度呈正相关关系。具体而言, VI 级强度的地震对应的扰动层厚度范围为 0~8 cm, 而 XI 级强度的地震则对应着扰动层厚度

范围在 27~53 cm 之间。

Pascua 等<sup>[46]</sup>建立了地震扰动湖泊沉积厚度与地震震级之间的经验关系式  $M=H/3+3.83$ , 其中  $M$  代表震级,  $H$  表示地震扰动湖泊沉积的厚度(单位 cm)。但是大量资料数据显示, 地震扰动湖泊沉积厚度和震级之间并非简单的线性关系, 因此使用经验公式时要谨慎。

在湖泊沉积中, 不同地震震级和变形机制(液化、流化等)会导致不同类型的软沉积变形(SSDS)。确定地震为触发因素后, 通过不同沉积环境下相似软沉积物变形比较与分析, 有望得到比较可靠的古地震震级<sup>[33]</sup>。钟宁等<sup>[33]</sup>完善了 Pascua 等<sup>[46]</sup>绘制的软沉积物变形类型与地震震级的关系图(图 3)。

钟宁等<sup>[47]</sup>对土耳其、新西兰和智利等地区(181—2010 年)的 32 次地震进行总结研究, 提出快速沉积砂层厚度法。研究显示地震引发了流域内或周边湖泊中块体搬运沉积的碎屑物质明显增多, 并形成了一种向上逐渐变细的砂层, 即地震事件层, 因此建立了震级与累积砂层厚度之间的关系图。随着地震震级的增加( $M_{4.0} \sim 9.0$ ), 累积砂层的厚度增厚(0.1~50 cm), 且震级与砂层厚度存在一定程度的正相关性, 协和度  $r^2=0.52$ 。具体而言, 当累积砂层厚度为 1 cm 时, 相应的震级范围为  $M_{4.0} \sim 6.0 (5.0 \pm 1.0)$ , 而当累积砂层厚度为 10 cm 时, 相应的震级范围为  $M_{5.8} \sim 8.4 (7.1 \pm 1.3)$ 。

在上述地震震级/强度判断方法中, 最大液化距

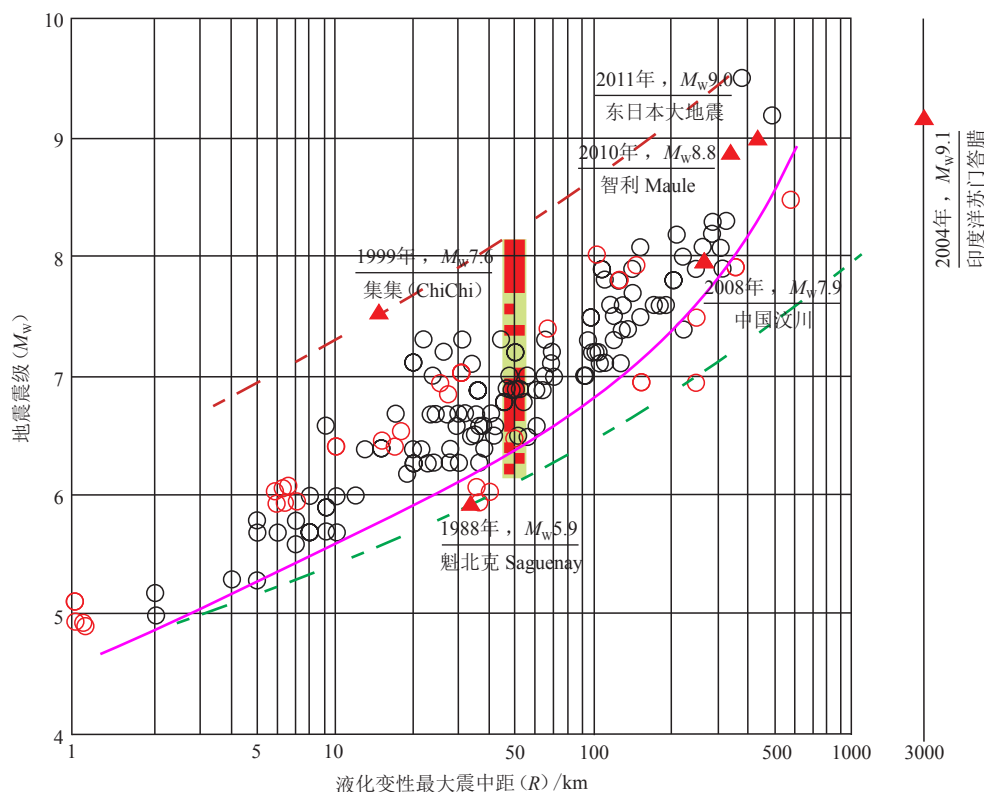


图2 液化变形最大震中距( $R$ )与地震震级( $M_w$ )关系图<sup>[44]</sup>

Fig. 2 Relationship between maximum epicentral distance ( $R$ ) of liquefaction deformation and earthquake magnitude ( $M_w$ )<sup>[44]</sup>

离法以及变形类型法是目前最广泛使用的两种方法。经验估算法与扰动层厚度法分别以液化强度以及湖泊沉积变形幅度与地震强度之间的关系为基础,这两种方法仅能给出地震震级/强度的下限,应用不多。而经验公式法和快速沉积砂层厚度法则分别建立在湖泊沉积变形层厚度及上覆砂层厚度与震级之间的关系基础之上,然而,由于湖泊沉积变形机制及湖泊沉积过程的复杂性,目前这种方法仍处于研究探索阶段。此外,其对于变形层厚度(小于 15 cm)和堆积砂层厚度(小于 50 cm)也提出了较高的要求,有一定的局限性<sup>[33]</sup>。

## 2.2 洪水

洪水是常见的自然灾害之一,会对生态环境以及人民群众的正常生活、生产和生命安全产生严重影响。湖泊沉积物为提高我们对自然洪水过程的研究提供了理想的资料,它将不同事件记录为不同的沉积层。结合地球物理以及地球化学分析,根据洪水沉积物的沉积特征和对其中有机物进行同位素测年可以确定洪水的流量和发生的年代。已有研究者利用湖泊沉积对洪水的发生频率、流量等进行研究,例如 Johansson 等<sup>[48]</sup>通过湖泊沉积对挪威西南部地区 6500 年以来的洪水频率进行研究。

含沙水流在向湖泊方向流动时,由于其密度与湖水密度的差异会表现出 4 种不同的类型(图 4): 异轻流(hypopycnal flow)、等重流(homopycnal flow)、异重流(hyperpycnal flow)以及层间流(mesopycnal flow),洪水通常会导致等重流和异重流<sup>[49]</sup>。洪水引起的异重流在湖泊沉积中表现为下部粒径向上变粗以及上部向上变细,分别由洪水流量的鼎盛期以及衰退期形成,但是通常只能观察到其向上变细的上部;异轻流、等重流以及层间流会在湖泊沉积中形成粒径向上变细的层序,并且洪水结束后顶部会缓慢沉积分选出白色黏土层<sup>[49]</sup>。

## 2.3 滑坡及崩塌

湖泊外部滑坡崩塌灾害也可能到达湖盆,从而被观测到并进行分析研究,分析湖泊沉积中滑落体异常事件沉积有助于更全面的了解滑坡及崩塌的破坏及活动过程。

沉积物重力流通常会最终演化为流动的滑落体<sup>[32]</sup>,滑落体可以分为滑坡和崩塌。滑坡和崩塌会产生块体运动,在湖泊沉积中显示块体运动碎屑层,滑坡崩塌异常沉积物的形态通常也可以与灾害过程相联系。滑坡和崩塌有可能是由地震等外部因素诱发,也可能是由正常沉积物堆积崩溃所致<sup>[32]</sup>。

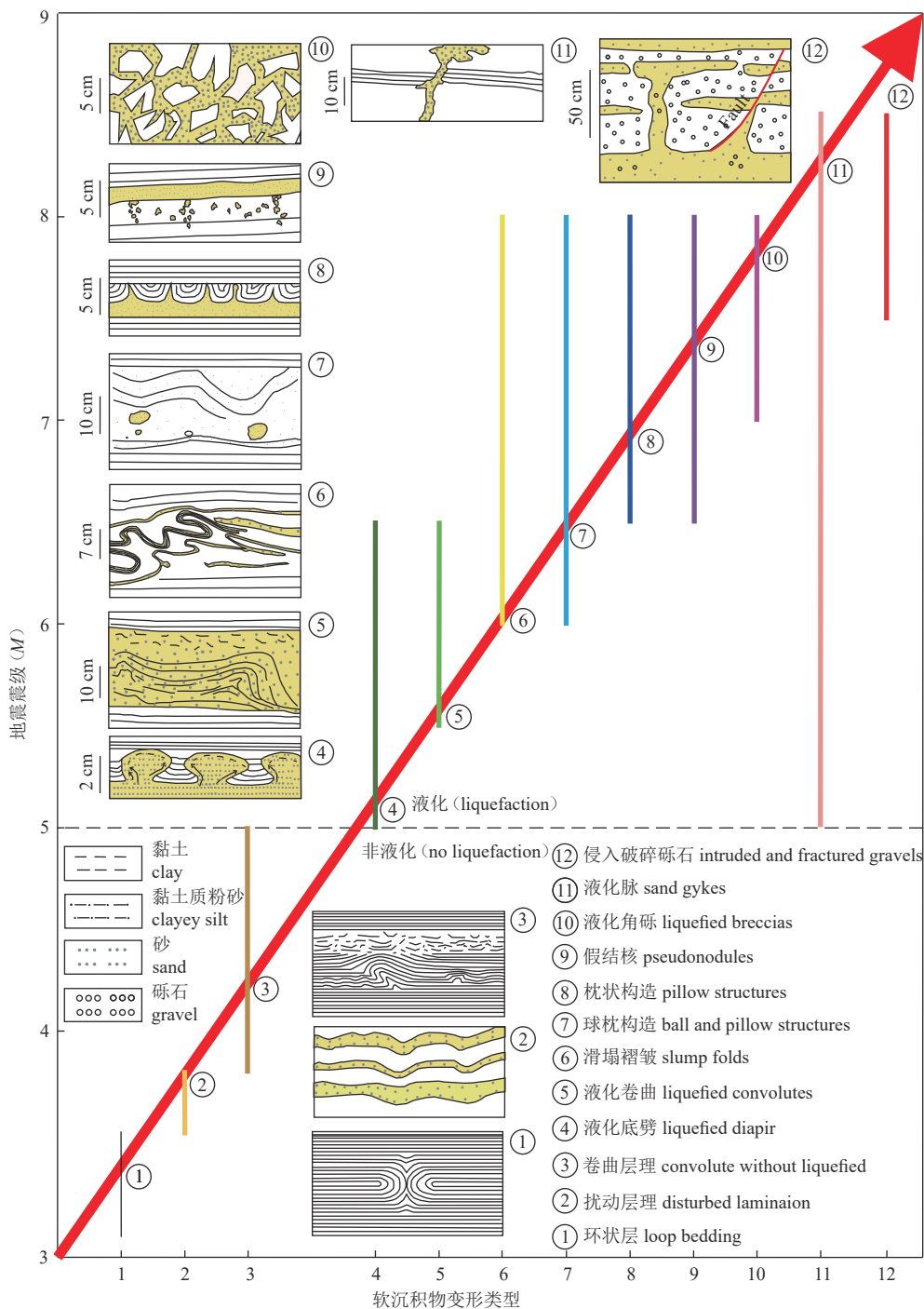


图 3 不同类型软沉积变形与古地震震级关系图<sup>[33]</sup>

Fig. 3 Relationship between different types of soft sediment deformation and paleoseismic magnitude<sup>[33]</sup>

3 典型自然灾害湖泊沉积事件识别

以往学者常用典型标志分析法和排除法进行事件沉积识别与区分, Owen 等<sup>[50]</sup>在识别软沉积物变形因素时提出综合分析法, 自然灾害异常事件湖泊沉积判别同样适用于综合分析法。

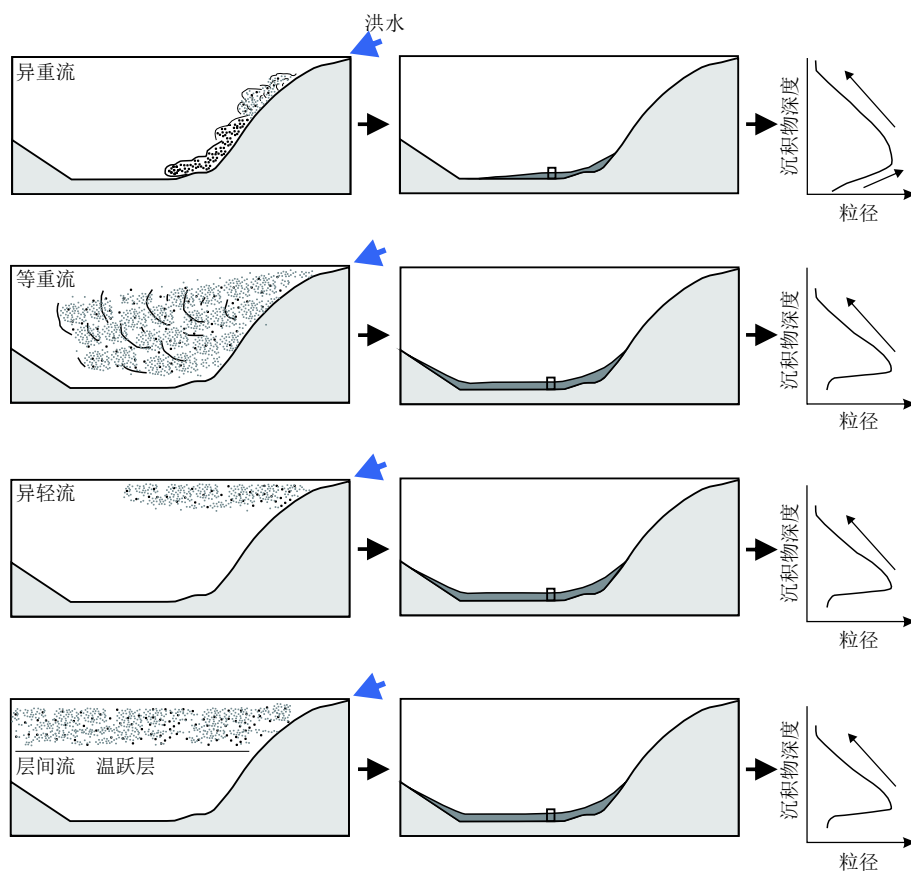
3.1 典型标志分析法

不同灾害事件由于其特定的环境特征及表现形

式, 往往会形成具有一定特征的湖泊沉积扰动样式。典型标志分析法主要利用不同灾害事件过程中差异性的湖泊沉积响应特征标志进行灾害事件判别。

3.1.1 地震

Shiki 等<sup>[51]</sup>研究日本琵琶湖后认为, 地震浊积岩的一般特征为: 由两个亚层(下砂质亚层和上泥质亚层)组成; 缺少或很少存在牵引构造; 粒度分布特征



左图说明了颗粒是如何根据水流在湖盆中扩散的；中图显示洪水沉积物的不同空间范围；右图显示粒径趋势  
The image on the left shows how particles spread through the lake basin depending on the current; The central figure shows the different spatial ranges of flood sediments; The graph on the right shows particle size trends

图4 洪水期间不同的含沙水流以及由此产生的沉积物<sup>[49]</sup>

Fig. 4 Different sediment-bearing currents and resulting sediments during floods<sup>[49]</sup>

是在较厚的砂质亚层中粒径较粗，在两个亚层中间边界处粒度快速变化，上泥质亚层粒度快速变小且粘土含量较高。Beck<sup>[52]</sup>根据对布尔热湖沉积物的调查研究后认为地震标志是：①存在粗粒浊积岩、含粗砂和泥灰岩碎屑的均质岩；②存在流动构造(原地液化)；③存在微断层。Ettensohn等<sup>[53]</sup>认为，可以同时使用4个标准(地层、构造、时间和环境)来判断地震是否为触发机制：是否存在与震源一致的变形；在时间和地层限制范围内广泛表现相似的变形特征；表现出向可能的震中地区增加频率或增大强度的区域模式，并排除其他可能的原因，能够极大地增加地震起源的可能性。

目前认为与地震相关的异常事件沉积典型识别标志主要有：①空间区域内分布广泛；②侧向连续性；③垂向上的重复性；④变形构造形态特征与地震所形成的构造具有可对比性；⑤邻近活动断层；⑥变形带的复杂性和频率与离断层的远近相关<sup>[50]</sup>。

这些标准的一致性越高，地震成因的可能性就越大。

### 3.1.2 洪水

在湖泊沉积物中，洪水沉积是流量、流速、水沙特征等动力过程的变异，其在岩性、粒径、矿物、容重、元素、磁学、孢粉、有机质和碳酸盐等指标方面区别于正常沉积，可通过粒度组分、沉积速率、磁化率、化学元素、孢粉等指标对湖泊沉积中的洪水沉积进行多指标分析识别。

湖泊洪水沉积与正常沉积中，岩性最明显差异体现在洪水沉积物色度上。当洪积物中有机质含量较高时，洪积层的色度一般较深，当洪积物中碳酸盐类含量较高时，洪积层的色度一般较明亮<sup>[54-55]</sup>；洪积层通常表现为平均粒径增加以及粒径下部向上变粗和上部向上变细或只表现向上变细<sup>[56]</sup>；洪积层密度一般较大<sup>[49]</sup>；洪水层通常富含成岩元素，如Ti、K、Rb、Ca；且Ca/K、Zr/Rb、Zr/Fe、Ti/Rb比值增大<sup>[57-59]</sup>；还可以依据洪水沉积与正常沉积在物质来源、物质组成



和沉积过程的差异所导致沉积物中有机质或碳酸盐突变位置判断洪积层<sup>[60]</sup>; 磁学指标<sup>[48]</sup>(高磁化率、高等温剩磁), 孢粉指标(不易腐蚀的舌状花亚科和蕨目孢粉)和容重指标等也可以识别洪积层<sup>[61]</sup>。在识别洪水事件时, 需要综合考虑各种指标。Wilhelm等<sup>[62]</sup>通过对前冰期布兰克湖湖芯的粒度和地球化学分析, 依据正常湖泊沉积物以粘土、粉砂为主要成分, 几乎不能形成单一碎屑层这一特征, 从岩性突变、中值粒径或者平均粒径突增、分选性变差等来识别洪水导致的异常事件沉积。

### 3.1.3 滑坡和崩塌

由滑坡和崩塌灾害所导致的块体运动沉积层与

同样是离散型的洪水沉积在沉积连续性上难以判别, 但是能够通过这两类异常事件沉积的沉积结构与组成来区别。通常情况下, 与洪积层相比, 滑塌碎屑层具有更大的厚度、更粗的粒径, 而且沉积层底部还存在基岩碎屑成分<sup>[60]</sup>; 滑塌沉积的底部略粗, 粗粒底部向细粒顶部的过渡较短; Beck<sup>[52]</sup>绘制了洪水浊积岩和滑塌浊积岩 CM 图(图 5), 从沉积物的垂直演化进行区分; Knapp 等<sup>[28]</sup>将高分辨率地震剖面数据上靠近斜坡区域土丘状的混沌到透明的部分解释为边坡破坏沉积, 并且认为滑塌沉积分选性差, 存在正常分级基质层, 从而重建 Oeschinen 湖地区的陆上边坡破坏。

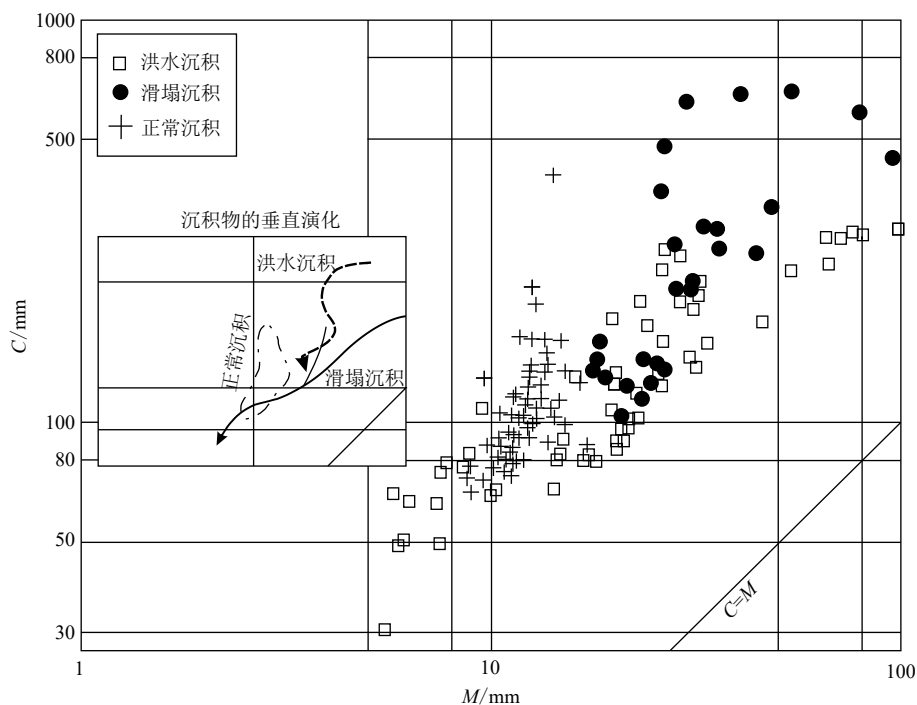


图5 洪水浊积岩和滑塌浊积岩 CM 图<sup>[52]</sup>

Fig. 5 CM diagram of flood turbidite and slump turbidite<sup>[52]</sup>

### 3.2 排除法

湖泊沉积过程中, 由于沉积环境的复杂多样性, 导致相同或相似的湖泊沉积扰动往往具有复杂多样的成因指示意义, 因此具有典型指征意义的湖泊沉积扰动非常有限, 仅依据典型湖泊沉积扰动特征, 很难实现对灾害事件的有效识别。排除法通过对湖泊沉积扰动信息的全面提取, 通过对不可能成因事件的逐一排除, 进而实现对可能成因事件的识别, 也是目前湖泊异常事件沉积识别的重要手段。

在对圣阿卡杰洛盆地的更新世湖泊沉积研究中, Moretti 和 Sabato<sup>[63]</sup>在湖泊沉积中心地区分析了

湖泊沉积物变形结构, 没有证据表明是风暴波和地下水位突然变化这两种触发因素的作用, 因此可以排除这两种因素的影响; 古湖泊的沉积中心或边缘地区没有观测到冰盖存在的证据, 也可排除冰川作用。因此, 认为观测到的湖泊沉积液化和流化效应的可靠触发机制是超载和地震冲击。

### 3.3 综合分析法

典型标志分析法和排除法分别基于具有典型指示意义的湖泊沉积扰动特征标志分析和对湖泊沉积扰动潜在可能成因的逐一对比分析来实现对湖泊沉积扰动成因判别, 不同方法都具有其各自的优势和

局限性。由于湖泊沉积是复杂地球动力学和物理化学过程综合影响下的产物,因此每一种沉积扰动现象可能都存在各种复杂因素的叠加,因此单一典型标志分析法和排除法在湖泊沉积研究中,往往无法实现对沉积扰动成因的有效识别。Owen 等<sup>[50]</sup>对前人研究进行总结,提出采用综合多种要素的综合分析法来进行异常事件沉积成因识别(图 6)。

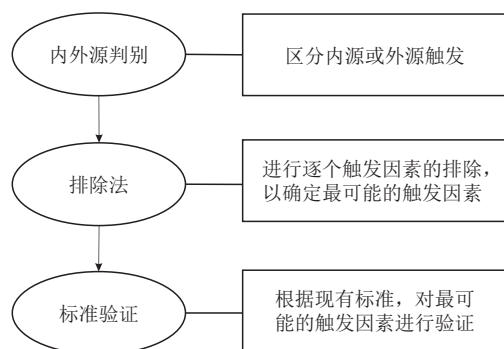


图 6 综合分析法

Fig. 6 Comprehensive analysis method

(1) 内外源判。沉积相与 EID 之间的关系将决定其成因是内源还是外源。

内源是沉积系统内部由固有沉积机制提供的动能引起的,代表极端事件,包括风暴或快速沉积事件;外源是由沉积系统外部的动能造成的,是独立于沉积环境的触发因素,如地震或撞击。对于内源因素,沉积环境与成因之间存在一定联系,因此沉积相与 EID 之间也存在一定联系,并且 EID 应该一致地存在于相似沉积相地区;对于外源触发,这种关系联系应该不太密切或不存在。

(2) 排除法。内外源判别之后,再进行排除。

与上文中的排除法类似,但要在确定触发因素是外源性还是内源性之后,再针对特定触发因素类型范围内使用所有可用证据来接受或拒绝每个可能的触发,进行逐个可能的触发因素的排除,以确定最可能的触发因素。与上文的排除法相比,这种方法针对性和有效性更强,更加简便。

(3) 标准验证。最后与现有标准进行对照,以验证 EID 是否支持所选择的触发因素。

综合分析法的第三步标准验证与上文中典型标志分析法有较大差异。典型标志分析法是直接利用现有标准与湖泊沉积物特征进行对比以确定触发因素。而标准验证是进行内外源判别与排除法后,基本确定触发因素,基于特定的触发因素的特定特征标准进行验证式对照确定。由于沉积环境的复杂多样

性,导致许多标准并不局限于某一特定触发因素,因此典型标志分析法有较大缺陷,而综合分析法更加全面,准确性更高。

通过对内乌肯盆地软沉积变形构造分析和相分析,Moretti 和 Ronchi<sup>[64]</sup>建立了变形机理和变形驱动力体系,并解释了最可能的触发因素。未变形层的沉积学特征与变形层非常相似(位于变形层的下方和上方),存在相同的未变形层,可以摒弃内部普通的沉积和侵蚀过程(如超载、波浪作用等)作为可能的触发机制(内源),因为在具有类似沉积特征的地层中完全没有变形。在讨论并排除了所有可能的外部触发因素后,观察到的液化效应可以合理地解释为地震所诱发(外源)。

Azenoud 等<sup>[65]</sup>在对非洲西北部伊夫拉湖异常事件沉积触发机制的研究中,使用综合分析法进行识别,考虑沉积环境(内外源判别),讨论所有可能的触发因素(基于触发因素进行排除),并参考特定研究案例的一些标准,从而作为最可能触发因素的支持证据(标准验证)。通过一系列沉积相证据,否定了快速沉积造成的超载、地下水位的突然变化等内源触发因素的可能性,确定了外源触发成因;之后结合研究区地质构造背景,排除了其他外因,推测地震是最可能的触发机制;最后对照前人得出的地震触发标准,明确了地震成因。

## 4 讨论

### 4.1 湖泊沉积灾害事件研究的优势

湖泊沉积是记录过去自然灾害的优秀档案,同时具有连续性、敏感性和高分辨率的特点。湖泊沉积研究有助于深入理解灾害事件沉积过程及沉积环境变化,提供有价值的证据,湖泊沉积灾害事件研究具有以下主要优势。

#### 4.1.1 湖泊沉积灾害事件记录更为完整

湖泊沉积具有高分辨率、高敏感性,长期记录以及地域分布广泛等特点,使得湖泊沉积灾害事件记录更为完整。

例如传统古地震研究是基于地震引发的地表破裂的解译,但通常 6 级以上地震才可造成明显的地表破裂,而且易受后续的侵蚀堆积改造作用使其不易识别。但是湖泊沉积物具有较高的敏感性以及在垂向上较高的分辨率,能够捕捉到更小规模和极短时间尺度内的灾害事件,如地震、洪水等。历史记录和仪器数据的时间范围通常仅限于千百年,而湖泊

沉积物能够记录更长周期的灾害事件,可以在很大程度上弥补仪器和历史记录的局限性。而且湖泊地域分布广泛,全球各地存在大量湖泊,它们分布在不同的地理环境中,适用于研究各种灾害事件,具有较强的代表性。

#### 4.1.2 灾害事件时代确定更为精确

湖泊沉积具有沉积过程连续、稳定等特点,确保了灾害事件发生前后沉积记录的完整性,连续缓慢的湖泊环境有利于沉积过程中沉积物的充分搬运和曝光,保证了释光信号的重置,同时稳定的湖泊沉积环境有利于湖泊生物的繁殖及有机质的保存。因此湖泊沉积物通常有利于释光及 $^{14}\text{C}$ 测年样品的采集,保证了在灾害事件发生前后,均能采集到有效的测年样品,再通过年代学方法,如放射性碳定年和光释光测年,获取更为精确的灾害事件发生的时间和频率。

#### 4.1.3 可运用湖泊沉积多元数据进行综合灾害事件识别

湖泊沉积物中蕴含多种数据,如岩性、粒度、化学元素含量、磁化率等,这些多元数据提供了多角度的研究视角,能够全面了解灾害事件的性质和过程,可以运用湖泊沉积多元数据进行综合的灾害事件研究。如Gilli等<sup>[66]</sup>在研究瑞士东北部的两个湖泊时,综合利用粒径、总有机碳、磁化率等多指标识别洪水沉积物,根据粒径下粗上细,总有机碳含量较低,磁化率较高等进行洪水沉积识别。

#### 4.2 湖泊沉积灾害事件研究的不足及制约因素

湖泊沉积灾害事件研究虽然具有许多优势,但也存在一些不足和制约因素。其中湖泊沉积记录的提取和灾害事件记录的识别是制约其发展的主要因素。由于沉积环境的复杂多样,通过案例研究总结的灾害事件识别标志往往具有很强的区域限制,很难建立具有普适性的识别标准,虽然前人在湖泊沉积灾害事件识别中已经提出了多种分析方法,但其各自均具有明显的局限性,制约了湖泊沉积灾害事件研究的发展。同时由于灾害事件研究的湖泊沉积物载体为现代湖泊水下松散沉积物,湖泊沉积物采集过程会导致沉积结构的破坏,如何无扰动采集湖泊完整的沉积记录也是制约湖泊沉积灾害事件研究的重要障碍。

#### 4.2.1 湖泊沉积扰动信息的提取

由于不能在现代湖泊开展探槽布设,因此湖泊

沉积灾害事件研究主要是通过湖泊取芯和湖底地震剖面探测来获得湖泊沉积扰动信息,其中湖芯的获取是湖泊灾害事件研究的关键。湖泊沉积物因缺乏埋藏成岩固结作用而极为松散,在钻取过程中极易扰动变形,从而影响到原有的湖泊沉积结构,因此怎样获得无扰动的连续完整湖芯尤为关键。

此外,湖芯虽然是进行湖泊沉积扰动信息提取的关键,但湖芯只能得到湖盆某个特定位置的沉积信息,而无法获取整个湖泊的沉积展布和湖泊沉积扰动分布特征。因此,除有效的湖泊取芯技术之外,高精度的湖底浅层地震剖面数据的采集也是开展湖泊沉积灾害事件研究的重要环节。目前高精度水下地震剖面探测精度可以达到10 cm左右,对于厚度小于10 cm的湖泊沉积扰动层,尚无行之有效的探测方法。

#### 4.2.2 湖泊沉积扰动成因的多样性

湖泊地质背景非常复杂,受多种地质过程的交互作用及多种因素的制约,这使得判定湖泊沉积扰动的形成因素变得复杂困难。而且不同湖泊地区的地质条件、沉积物特性和灾害历史都可能不同,这也是研究的地理差异性和普适性的挑战。

### 5 结论

湖泊沉积物是敏感的档案,储存了丰富的信息,例如全球和区域气候波动、构造事件和人类活动引发的扰动等。湖泊沉积具有沉积环境稳定、沉积地层连续、地层延伸范围广等特点,使得其可以完整的记录自然灾害事件。同时湖泊相对稳定连续的沉积过程便于测年样品的采集,有利于精确约束自然灾害事件的时代,并且湖泊沉积物中蕴含多种数据,可运用湖泊沉积多元数据进行综合灾害事件研究。

对于湖泊自然灾害事件沉积识别,前人提出了典型标志分析法、排除法以及综合分析法等多种方法。其中综合分析法集成了现阶段湖泊事件沉积识别的多种分析手段:①根据沉积相与EID之间的关系判定其内外源成因;②根据对触发因素的排除,确定最可能的触发因素;③根据现有的识别标准,验证最可能触发因素的正确性。是对事件沉积进行综合分析。该方法综合了典型标志分析法和排除法的优势,是目前最为有效的分析手段,但在实施过程中仍然存在很强的主观性和局限性。

大部分自然灾害湖泊沉积研究所关注的晚渐新世及全新世湖泊沉积物仍埋藏于现代湖泊之下,因



此,如何精确获取湖泊沉积扰动信息是制约其发展的关键因素。此外,湖泊沉积扰动成因具有多样性,如何准确识别成因仍需进一步大量探索研究,在未来的研究中,对湖泊自然灾害事件沉积识别标志的建立,仍然是制约湖泊异常事件沉积研究的关键。

## 致谢

衷心感谢审稿专家对本文提出的宝贵意见,感谢编辑部的大力支持!

## 参考文献

- [1] Huang C J, Hinnov L. Astronomically forced climate evolution in a saline lake record of the Middle Eocene to Oligocene, Jiangnan Basin, China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2019, 528: 115846
- [2] Misra P, Tandon S K, Sinha R. Holocene climate records from lake sediments in India: Assessment of coherence across climate zones[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 190: 370-397
- [3] Gracia F J, Morales J A, Castaneda C, et al. Shallow lacustrine versus open ocean coastal clastic deposits: Morphosedimentary diagnostic indicators and interpretation[J]. *Sedimentary Geology*, 2021, 423: 105981
- [4] Xu C, Shan X L, He W T. The fluctuation of warm paleoclimatic controls on lacustrine carbonate deposition in the Late Cretaceous (Late Santonian), Southern Songliao Basin, Northeast China[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2022, 111(1): 85-102
- [5] Wang G, Wang Y L, Wei Z F, et al. Paleoclimate changes of the past 30 cal ka BP inferred from lipid biomarkers and geochemical records from Qionghai Lake, Southwest China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 172: 346-358
- [6] 范宣梅, 戴岚欣, 钟育瑾, 等. 岷江上游叠溪古滑坡坝——堰塞湖研究进展 [J]. *地学前缘*, 2021, 28(2): 71-84  
Fan X M, Dai L X, Zhong Y J, et al. Recent research on the Diexi paleo-landslide: Dam and lacustrine deposits upstream of the Minjiang River, Sichuan, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(2): 71-84
- [7] Li Y C, Chen J P, Li Z H, et al. Comprehensive analysis of a paleo-landslide damming event on the upper reach of the Jinsha River, SE Tibetan Plateau[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, 81(8): 334
- [8] Üner S, Selçuk A S, Ozsayin E. Non-seismic soft-sediment deformation structures from Late Pleistocene lacustrine deposits of Lake Van (Eastern Turkey): Storm and overloading effect[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2019, 45(3): 664-671
- [9] Schiefer E, Geck J, Ostman J S, et al. Fluvial suspended sediment transfer and lacustrine sedimentation of recent flood turbidites in proglacial Eklutna Lake, western Chugach Mountains, Alaska[J]. *Hydrological Processes*, 2021, 35(10): e14375
- [10] Daxer C, Ortler M, Fabbri S C, et al. High-resolution calibration of seismically-induced lacustrine deposits with historical earthquake data in the Eastern Alps (Carinthia, Austria)[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2022, 284: 107497
- [11] 李德文, 李林林, 马保起, 等. 湖泊沉积对地震动的响应特征与古地震序列重建 [J]. *地学前缘*, 2021, 28(2): 232-245  
Li D W, Li L L, Ma B Q, et al. Characteristics of lake sediment response to earthquakes and the reconstruction of paleoseismic sequences[J]. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(2): 232-245
- [12] 沈吉. 湖泊沉积研究的历史进展与展望 [J]. *湖泊科学*, 2009, 21(3): 307-313  
Shen J. Progress and prospect of palaeolimnology research in China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, 21(3): 307-313
- [13] Hamilton R, Penny D, Hua Q. A 4700-year record of hydroclimate variability over the Asian monsoon intersection zone inferred from multi-proxy analysis of lake sediments[J]. *Global and Planetary Change*, 2019, 174: 92-104
- [14] Nazarova L B, Razjigaeva N G, Golovatyuk L V, et al. Reconstruction of environmental conditions in the eastern part of primorsky krai (Russian Far East) in the Late Holocene[J]. *Contemporary Problems of Ecology*, 2021, 14(3): 218-230
- [15] Plóciennik M, Mroczkowska A, Pawłowski D, et al. Summer temperature drives the lake ecosystem during the Late Weichselian and Holocene in eastern Europe: A case study from east European Plain[J]. *Catena*, 2022, 214: 106206
- [16] Wang Y B, Liu X Q, Han L, et al. Late Holocene climate variation on the northern Tibetan Plateau inferred from Lake Ayakum[J]. *Catena*, 2021, 207: 105599
- [17] Coianiz L, Schattner U, Lang G, et al. Between plate and salt tectonics-new stratigraphic constraints on the architecture and timing of the Dead Sea Basin during the Late Quaternary[J]. *Basin Research*, 2020, 32(4): 636-651
- [18] Liu Q Y, Li P, Jin Z J, et al. Organic-rich formation and hydrocarbon enrichment of lacustrine shale strata: A case study of Chang 7 Member[J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, 65(1): 118-138
- [19] Singh B P, Mondal K, Singh A, et al. Seismic origin of the soft-sediment deformation structures in the Upper Palaeo-Mesoproterozoic semri group, Vindhyan supergroup, central India[J]. *Geological Journal*, 2020, 55(11): 7474-7488



- [20] Qi W, Wu J, Xia Y Q, et al. Influence of ionic composition on minerals and source rocks: An investigation between carbonate-type and sulfate-type lacustrine sediments based on hydrochemical classification[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 130: 105099
- [21] Shen J J, Chen K Q, Liu Y, et al. Sedimentary facies of Paleogene lacustrine dolomicrite and implications for petroleum reservoirs in the southern Qianjiang Depression, China[J]. *Open Geosciences*, 2019, 11(1): 513-532
- [22] Yang R C, Jin Z J, Van Loon A J, et al. Climatic and tectonic controls of lacustrine hyperpycnite origination in the Late Triassic Ordos Basin, central China: Implications for unconventional petroleum development: Reply[J]. *AAPG Bulletin*, 2019, 103(2): 511-514
- [23] 王树基. 关于赛里木湖的形成、演变与第四纪古冰川作用的关系 [J]. 干旱区地理, 1978(1): 47-55  
Wang S J. The relationship between the formation and evolution of Sailimu Lake and Quaternary glaciation[J]. *Arid Land Geography*, 1978(1): 47-55
- [24] 沈吉, 肖海丰, 王苏民, 等. 云南鹤庆深钻揭示的区域气候轨道尺度演化 [J]. 科学通报, 2007, 52(10): 1168-1173  
Shen J, Xiao H F, Wang S M, et al. The orbital scale evolution of regional climate recorded in a long sediment core from Heqing, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(13): 1813-1819
- [25] 王苏民, 薛滨. 中更新世以来若尔盖盆地环境演化与黄土高原比较研究 [J]. 中国科学 (D 辑), 1996, 26(4): 323-328  
Wang S M, Xue B. Environmental evolution of Zoigê Basin since 900 kaB. P. and comparison study with Loess Plateau[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 1997, 40(3): 329-336
- [26] Daxer C, Moernaut J, Taylor T, et al. Late Glacial and Holocene sedimentary infill of Lake Mondsee (Eastern Alps, Austria) and historical rockfall activity revealed by reflection seismics and sediment core analysis[J]. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 2018, 111(1): 111-134
- [27] 蔡明刚, 鲁人齐, 何宏林, 等. 水域三维地形与活动断层探测研究——以西昌邛海为例 [J]. 地震地质, 2018, 40(1): 204-214  
Cai M G, Lu R Q, He H L, et al. Exploration of underwater three-dimensional topography and active faults: A case study of Qionghai, Xichang[J]. *Seismology and Geology*, 2018, 40(1): 204-214
- [28] Knapp S, Gilli A, Anselmetti F S, et al. Multistage rock-slope failures revealed in lake sediments in a seismically active alpine region (Lake Oeschinen, Switzerland)[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2018, 123(4): 658-677
- [29] Gastineau R, Sabatier P, Fabbri S C, et al. Lateral variations in the signature of earthquake-generated deposits in Lake Iznik, NW Turkey[J]. *The Depositional Record*, 2023, doi:10.1002/dep2.232. in press
- [30] Lauterbach S, Mingram J, Schettler G, et al. Two twentieth-century  $M_{LH}=7.5$  earthquakes recorded in annually laminated lake sediments from Sary Chelek, western Tian Shan, Kyrgyzstan[J]. *Quaternary Research*, 2019, 92(2): 288-303
- [31] Siegenthaler C, Finger W, Kelts K, et al. Earthquake and seiche deposits in lake lucerne, Switzerland[J]. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 1987, 80(1): 241-260
- [32] Girardclos S, Schmidt O T, Sturm M, et al. The 1996 AD delta collapse and large turbidite in Lake Brienz[J]. *Marine Geology*, 2007, 241(1/4): 137-154
- [33] 钟宁, 蒋汉朝, 李海兵, 等. 地震成因软沉积物变形记录的地震强度研究进展 [J]. 地质论评, 2021, 67(6): 1785-1802  
Zhong N, Jiang H C, Li H B, et al. The use of soft-sediment deformation structures as proxies for paleoseismic activity and shaking: A review[J]. *Geological Review*, 2021, 67(6): 1785-1802
- [34] 冉勇康, 段瑞涛, 邓起东, 等. 海原断裂高湾子地点三维探槽的开挖与古地震研究 [J]. 地震地质, 1997, 19(2): 2-12  
Ran Y K, Duan R T, Deng Q D, et al. 3-D trench excavation and paleoseismology at Gaowanzi of the Haiyuan fault[J]. *Seismology and Geology*, 1997, 19(2): 2-12
- [35] 李林林, 李德文. 古地震学研究新探索——湖泊沉积古地震研究进展 [J]. 地球物理学进展, 2018, 33(6): 2241-2250  
Li L L, Li D W. New methods for paleoseismology: The development of lacustrine paleo-seismic study[J]. *Progress in Geophysics*, 2018, 33(6): 2241-2250
- [36] Fan J W, Xu H Y, Shi W, et al. A ~28-kyr continuous lacustrine paleoseismic record of the intraplate, slow-slipping Fuyun fault in Northwest China[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 828801
- [37] Liang L J, Dai F C, Jiang H C, et al. A preliminary study on the soft-sediment deformation structures in the Late Quaternary lacustrine sediments at Tashkorgan, Northeastern Pamir, China[J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 2018, 92(4): 1574-1591
- [38] Molenaar A, Van Daele M, Huang J J S, et al. Disentangling factors controlling earthquake-triggered soft-sediment deformation in lakes[J]. *Sedimentary Geology*, 2022, 438: 106200
- [39] Vardanyan A A, Korzhnikov A M, Sorokin A A, et al. Paleogeographic conditions and age of a strong earthquake according to data from studying of the Holocene deposits from Lake Sevan, Armenia[J]. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2018, 54(8): 1211-1221

859-866

- [40] Van Daele M, Moernaut J, Doom L, et al. A comparison of the sedimentary records of the 1960 and 2010 great Chilean earthquakes in 17 lakes: Implications for quantitative lacustrine palaeoseismology[J]. *Sedimentology*, 2015, 62(5): 1466-1496
- [41] Wells D L, Coppersmith K J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1994, 84(4): 974-1002
- [42] Scott B, Price S. Earthquake-induced structures in young sediments[J]. *Tectonophysics*, 1988, 147(1/2): 165-170
- [43] Kuribayashi E, Tatsuoka F. Brief review of liquefaction during earthquakes in Japan[J]. *Soils and Foundations*, 1975, 15(4): 81-92
- [44] 乔秀夫, 李海兵, 苏德辰, 等. 软沉积物变形构造——地震与古地震记录 [M]. 北京: 地质出版社, 2017  
Qiao X F, Li H B, Su D C, et al. Soft sediment deformation structures: Earthquakes and paleoseismic records[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017
- [45] Hibsich C, Alvarado A, Yepes H, et al. Holocene liquefaction and soft-sediment deformation in Quito (Ecuador): A paleoseismic history recorded in lacustrine sediments[J]. *Journal of Geodynamics*, 1997, 24(1/4): 259-280
- [46] Pascua M A R, De Vicente G, Calvo J P, et al. Similarities between recent seismic activity and paleoseismites during the Late Miocene in the external Betic Chain (Spain): Relationship by  $b$  value and the fractal dimension[J]. *Journal of Structural Geology*, 2003, 25(5): 749-763
- [47] 钟宁, 蒋汉朝, 李海兵, 等. 岷江上游新磨村湖相沉积物粒度端元反演及其记录的构造和气候事件 [J]. *地质学报*, 2020, 94(3): 968-981  
Zhong N, Jiang H C, Li H B, et al. End member inversion of Xinmocun lacustrine sediments in the upper reaches of the Minjiang River and its recorded tectonic and climate events[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(3): 968-981
- [48] Johansson F E, Bakke J, Støren E N, et al. Lake sediments reveal large variations in flood frequency over the last 6 500 years in south-western Norway[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2020, 8: 239
- [49] Wilhelm B, Amann B, Corella J P, et al. Reconstructing paleoflood occurrence and magnitude from lake sediments[J]. *Quaternary*, 2022, 5(1): 9
- [50] Owen G, Moretti M, Alfaro P. Recognising triggers for soft-sediment deformation: Current understanding and future directions[J]. *Sedimentary Geology*, 2011, 235(3/4): 133-140
- [51] Shiki T, Kumon F, Inouchi Y, et al. Sedimentary features of the seismo-turbidites, Lake Biwa, Japan[J]. *Sedimentary Geology*, 2000, 135(1/4): 37-50
- [52] Beck C. Late Quaternary lacustrine paleo-seismic archives in north-western Alps: Examples of earthquake-origin assessment of sedimentary disturbances[J]. *Earth-Science Reviews*, 2009, 96(4): 327-344
- [53] Ettensohn F R, Kulp M A, Rast N. Interpreting ancient marine seismites and apparent epicentral areas for paleo-earthquakes, Middle Ordovician Lexington Limestone, central Kentucky[M]//Ettensohn F R, Rast N, Brett C E. Ancient Seismites. McLean: Geological Society of America, 2002: 177-190
- [54] Rapuc W, Jacq K, Develle A L, et al. XRF and hyperspectral analyses as an automatic way to detect flood events in sediment cores[J]. *Sedimentary Geology*, 2020, 409: 105776
- [55] Jacq K, Ployon E, Rapuc W, et al. Structure-from-motion, multi-view stereo photogrammetry applied to line-scan sediment core images[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2021, 66(3): 249-260
- [56] Parris A S, Bierman P R, Noren A J, et al. Holocene paleostorms identified by particle size signatures in lake sediments from the northeastern United States[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2010, 43(1): 29-49
- [57] 曹向明. 长江中下游地区高分辨率河湖相沉积记录的洪水事件及其规律 [D]. 南昌: 江西师范大学, 2020  
Cao X M. Flood events recorded by high-resolution fluvial and lacustrine deposits in the middle and lower reaches of the Yangtze River and their properties[D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2020
- [58] Rapuc W, Sabatier P, Arnaud F, et al. Holocene-long record of flood frequency in the Southern Alps (Lake Iseo, Italy) under human and climate forcing[J]. *Global and Planetary Change*, 2019, 175: 160-172
- [59] Wang X Q, Jin Z D, He Z, et al. New insights into dating the sediment sequence within a landslide-dammed reservoir on the Chinese Loess Plateau[J]. *The Holocene*, 2019, 29(6): 1020-1029
- [60] 张灿, 周爱锋, 张晓楠, 等. 湖泊沉积记录的古洪水事件识别及与气候关系 [J]. *地理科学进展*, 2015, 34(7): 898-908  
Zhang C, Zhou A F, Zhang X N, et al. Identification of paleoflood events by lacustrine archives and their links to climatic conditions[J]. *Progress in Geography*, 2015, 34(7): 898-908
- [61] Schillereff D N, Chiverrell R C, Macdonald N, et al. Flood stratigraphies in lake sediments: A review[J]. *Earth-Science Reviews*,

2014, 135: 17-37

- [ 62 ] Wilhelm B, Arnaud F, Enters D, et al. Does global warming favour the occurrence of extreme floods in European Alps? First evidences from a NW Alps proglacial lake sediment record[J]. Climatic Change, 2012, 113(3/4): 563-581
- [ 63 ] Moretti M, Sabato L. Recognition of trigger mechanisms for soft-sediment deformation in the Pleistocene lacustrine deposits of the Sant'Arcangelo Basin (Southern Italy): Seismic shock vs. overloading[J]. Sedimentary Geology, 2007, 196(1/4): 31-45
- [ 64 ] Moretti M, Ronchi A. Liquefaction features interpreted as seismites in the Pleistocene fluvio-lacustrine deposits of the Neuquén Basin (Northern Patagonia)[J]. Sedimentary Geology, 2011, 235(3/4): 200-209
- [ 65 ] Azennoud K, Baali A, El Asmi H, et al. Soft-sediment deformation structures recognised in a reverse-drag associated with normal faulting (Lake Ifrah, Northwest Africa): Palaeoseismic assessment and neotectonic implications[J]. Sedimentary Geology, 2022, 441: 106264
- [ 66 ] Gilli A, Anselmetti F S, Ariztegui D, et al. A 600-year sedimentary record of flood events from two sub-alpine lakes (Schwendiseen, Northeastern Switzerland)[J]. Eclogae Geologica Helvetica, 2003, 96: 49-58

=====

## 致谢审稿专家

2023 年, 本刊继续得到了科学家们的大力支持和帮助。他们的付出是无私的, 着实令人感动。正是因为有了他们的无私帮助, 期刊的整体质量和影响力才得以不断提升。在此, 本刊编辑部全体成员对一年来为本刊辛勤审稿的专家表示衷心的感谢! 我们要感谢的专家是(以姓名的首字母为序):

白志明	曹 飒	常祖峰	陈 斌	陈红娟	陈华霆	陈 铭	陈 鹏	陈学良	陈 志	崔玉龙	翟鸿宇
刁守中	房立华	冯 蔚	付广裕	高继宗	高景春	高小其	高 原	龚永俭	谷洪彪	郭 晓	哈广浩
韩竹军	何仲太	洪时中	胡 隼	黄建平	冀战波	蒋海昆	蒋长胜	景立平	黎 明	李东平	李 璐
李学勤	李 营	李有利	连尉平	廖成旺	刘爱文	刘 锋	刘 杰	刘如山	刘瑞丰	陆明勇	吕红华
吕悦军	马海建	马钦忠	孟 娟	祁国亮	饶 刚	任俊杰	任治坤	沈 萍	帅向华	苏小宁	苏有锦
孙 磊	孙艳萍	田勤俭	万永革	王方建	王佳龙	王 建	王恬恬	王同利	王伟涛	王晓美	王秀英
王 喆	危自根	韦永祥	魏本勇	温瑞智	温增平	吴楠楠	吴 清	吴庆举	吴 琼	吴中海	谢富仁
谢俊举	徐 敏	徐 平	徐伟进	徐占品	徐志国	许 冲	许秋龙	严 炎	杨晓平	姚海涛	叶高峰
于海英	余 年	俞 岗	俞晶星	俞言祥	张 波	张晁军	张国宏	张会平	张晋辉	张军龙	张清秀
张瑞青	张尚荣	张素琴	张小涛	张晓东	张 翼	张元生	赵 波	赵翠萍	赵建和	赵亚敏	郑建常
钟 宁	周正华	朱少华									

本刊编辑部