



地质力学学报  
Journal of Geomechanics  
ISSN 1006-6616, CN 11-3672/P  
中文核心期刊  
中国科技核心期刊  
CSCD 来源期刊（核心库）

## 《地质力学学报》预出版论文

论文题目：湖相沉积地震成因负载与球-枕构造的数值模拟研究  
<sup> </sup>

作者：严泽龙，范瑞祥，张俊杰，钟宁，梁莲姬

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2026005

投稿时间：2026-01-13

录用时间：2026-05-11

预出版时间：2026-06-17

### 预出版版权说明

预出版，是指在网络出版或纸质版印刷出版之前，文章的电子版本在网上提前公开，是正式出版的预备版本。预出版的文章是通过严格的“三审制”审查后，本刊确定录用的文章，其内容的著作权等受《著作权法》等法律法规保护。预出版的文章将在之后的印刷版上刊发，印刷版的文章可能与预出版的文章略有不同，预出版文章经录用后便以电子版本形式在网站发出，没有经过排版和编校，会存在部分文字及编排格式与正式出版有出入，但文章主体内容是完全一致的。

学者研究或引述预出版文章，应当以印刷纸质版内容为准；但如果牵涉首创权等时间问题，则应当以适当方式注明文章的预出版日期。

# 湖相沉积地震成因负载与球-枕构造的数值模拟研究

严泽龙<sup>1</sup>, 范瑞祥<sup>1</sup>, 梁莲姬<sup>1,2</sup>, 钟宁<sup>3</sup>, 张俊杰<sup>1</sup>

YAN Zelong<sup>1</sup>, FAN Ruixiang<sup>1</sup>, LIANG Liangji<sup>1,3</sup>, ZHONG Ning<sup>2</sup>, ZHANG Junjie<sup>1</sup>

1. 北京工业大学建筑工程学院, 北京, 100124;
2. 自然资源部大陆动力学重点实验室, 北京, 100037;
3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京, 100081;

1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing, 100124, China

2. Key Laboratory of Continental Dynamics of Ministry of Natural Resources, Beijing, 100037, China

3. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081, China

## Numerical simulation analysis of seismically triggered load and ball-and-pillow structures in the lacustrine sediment

**Abstract:** [Objective] Seismically triggered soft-sediment deformation structures (SSDSs) in the lacustrine sediments serve as reliable stratigraphic records for studying paleoearthquake events in tectonically active regions. Load and ball-and-pillow structures, as one of the common types of SSDSs, are often attributed to reverse density gradients between different sedimentary layers driven by gravity. However, the formation processes and mechanisms of these structures, as well as their quantitative relationship with seismic intensity remain unclear. [Methods] This study employs a FLUENT software to simulate the formation processes of load and ball-and-pillow structures in saturated sand-clay sedimentary layers with varying physical properties (density, dynamic viscosity and thicknesses) under different seismic accelerations (0.125g, 0.25g, 0.5g, and 0.8g). [Results] The results indicate that as the seismic accelerations increases, load and flame structures appear earlier and gradually evolve from small-scale load structures to larger-scale ones and ball-and-pillow structure. Under the same seismic acceleration, a larger density and dynamic viscosity difference, and a larger thickness in sand layer would result in more intense and large-scale load and ball-and-pillow structures. [Conclusions] The simulation results are generally consistent with the morphological characteristics of load and ball-and-pillow structures identified in the field investigation in the Tashkorgan area. [Significance] This finding verifies the seismic trigger of SSDSs in this region and provides a new technological insight into the study of SSDSs and paleoearthquakes.

**Keywords:** lacustrine sediments; paleoearthquake; soft sediment deformation; load structure; ball-and-pillow structure; numerical simulation

**摘要:** 湖相沉积地震成因软沉积变形构造是构造活动活跃地区古地震事件研究的可靠地层记录。负载与球-枕构造作为常见的软沉积变形构造类型之一, 其成因往往归因于不同沉积层反密度差所驱动的重力作用。然而, 此类构造的形成过程与机制, 及其与地震强度之间的量化关系仍不清楚。采用 FLUENT 多相流数值模拟方法,

基金项目: 国家自然科学基金(项目编号: 42572128); 自然资源部大陆动力学重点实验室开放基金(项目编号: J2408)

This research was financially supported by National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42572128) and the Fund from the Key Laboratory of Continental Dynamics of Ministry of Natural Resources (Grant No. J2408).

第一作者: 严泽龙(2000—), 男, 在读硕士, 从事工程地质专业。Email: 2495820866@qq.com

通讯作者: 梁莲姬(1985—), 女, 博士, 副研究员, 从事古地震和地质灾害研究。Email: liangliangji512@163.com

反演了饱和砂-黏土层在不同地震加速度（0.125g, 0.25g, 0.5g 和 0.8g）及不同物理性质（密度、动力粘度和层厚）条件下负载与球-枕构造形成的过程，揭示了沉积层不同物理性质对此类变形构造发育的影响及其与地震强度之间关系。模拟结果表明，地震加速度越大，砂-黏土层界面越早出现负载与火焰构造，且由小型负载逐渐发展为较大规模的负载与球-枕构造。在相同地震加速度条件下，上覆砂层和下伏黏土层的密度差越大、动力粘度差越小、上覆砂层越厚，负载与球-枕构造的变形程度和规模也更显著。数值模拟得到的负载与球-枕构造形态与塔什库尔干野外观测案例高度一致，不仅支持此类变形构造的力学机制解释，也为软沉积变形构造与古地震研究提供了新的技术途径和直观依据。

**关键词：**湖相沉积；古地震；软沉积变形；负载构造；球-枕构造；数值模拟

## 0 引言

软沉积变形构造是近地表或水下未完全固结沉积物受到强烈地质营力作用而形成的变形构造（OWEN et al., 2010; 乔秀夫, 2017）。自 1952 年 Heezen 等对 1929 年的加拿大格兰德班克地震引发的海底沉积物位移、变形和引发的浊积岩研究以来（HEEZEN et al., 1952），地震作用形成的软沉积变形构造被广泛用于全球范围内地震断裂带地区湖相沉积地层的古地震事件研究（LU et al., 2020; LIANG et al., 2021; NIKOLAEVA et al., 2022; SU et al., 2022; KLUGER et al., 2023; GUO et al., 2023; SABYASACHI et al., 2023; MILNES et al., 2024; 张济东等, 2024）。软沉积变形构造的形成机制往往归因于沉积物发生液化、触变、流化等（ALLEN, 1982; SHANMUGAM, 2017; MILNES et al., 2024）。然而，软沉积变形形成过程的难以再现性以及多种机制的重叠性，其形成与地震触发机制的解析仍存在较多争议（SIPP et al., 2026）。此外，软沉积变形不仅受到沉积物的粒度、密度、厚度等影响（WETZLER et al., 2010），而且与地震震级、烈度等因素相关（OBERMEIER, 1998; GALLI, 2000; LU et al., 2020; 钟宁等, 2021; ARIANA et al., 2021; LI et al., 2025; RAJKHOWA et al., 2026），使得软沉积变形构造与区域地震强度之间的关系难以准确评估。

负载与球-枕构造是常见的软沉积变形构造类型，已被从不同时代不同地层中大量识别出来（OWEN, 2003; 乔秀夫等, 2008; VAN LOON et al., 2014; 张风霄等, 2015; 钟宁等, 2017; 黄婷等, 2025; PIERRE et al., 2023; MILNES et al., 2024）。例如，GIBERT 等（2011）在加州东南部特科帕盆地的更新世火山碎屑沉积物中发现了多个负载构造层，并根据其形态学和沉积环境推断为地震触发。MORETTI 等（2011）描述了南美洲内乌肯盆地河湖相沉积物中发育的负载构造，推断其触发机制与同时期火山活动引发的地震作用有关。张风霄等（2015）在灵山岛早白垩世地层中发现了多尺度、多形态、多组合的负载与球-枕构造，认为其为该时期古地震触发。乔秀夫等（2008）和钟宁等（2017）实例描述了不同时代地层中发育的地震成因负载与球-枕构造，讨论了此类软沉积变形构造所指示的地震震级。以往研究表明，负载构造形成于上下相邻沉积层中存在反密度差的不稳定重力驱动，在地震振动下，上覆比重大的粗颗粒沉积物局部解体后向下伏比重低的细颗粒沉积物中陷落而形成（OWEN, 2003; 乔秀夫, 2017）。球-枕构造源自负载体脱离母岩层在重力作用下向下陷落而形成，且负载体与球-枕体的体积大小与沉积层厚度，陷落的深度等因素有关（MORETTI et al., 2002; 乔秀夫等, 2008）。虽然此类构造已有大量报道和描述，但其形成机制局限于野外观察与理论推理，而变形构造的形成过程及其沉积物性质、地震强度之间的定量关系仍需进一步深入研究。此外，负载与球-枕构造的触发机制具有多解性，除地震作用外，重力超载、快速沉积、滑塌及压实差异等非构造因素也可导致类似变形（OWEN, 2003; VAN LOON et al., 2014; JAMIL et al., 2021）。本研究仅聚焦于地震触发机制，探讨在地震加速度作用下饱和砂-黏土层中负载与球-枕构造的形成过程及其控制因素。

近年来，数值模拟为变形构造的形成机理及其定量分析提供了新途径（刘向冲, 2019; 马佳等, 2025）。赵家康等（2020）采用 PFC<sup>2D</sup> 离散元数值模拟方法，对地震作用下沉积物中扰动变形过程进行了多尺度模拟研

究。WETZLER 等（2010）采用 Fluent 计算流体力学软件，对死海现代沉积物进行了软沉积物变形构造的数值模拟，建立了变形层厚度与地震峰值加速度之间的关系。此后，LU 等（2020）基于调整后的模型参数及其与地震强度的关系，重建了死海地区 22 万年以来的震积岩与古地震序列。但以往研究多侧重单一因素分析，缺少多因素耦合模拟。因此，本研究采用 Fluent 多相流数值方法，对湖相砂-黏土沉积层中负载与球-枕构造的形成过程进行模拟反演，揭示地震加速度及沉积层物理性质对此类变形构造发育的影响规律。将塔什库尔干湖相沉积层中负载与球-枕构造野外案例与模拟结果对比，验证该数值方法在软沉积变形研究中的可靠性，以期为古地震研究提供基础依据。

## 1 数值模拟方法

### 1.1 Fluent 数值模拟方法原理

ANSYS Fluent 商业软件可求解 Navier-Stokes 方程。该软件中 VOF 模型（Volume of Fluid）是一种用于处理两相流或多相流的流体动力学数值方法。该模型主要用于追踪流体之间相界面的动态变化，通过构建相函数来描述计算域内不同相的分布情况。在此模型中，流体被分成若干小的单元，每个单元内部都有一个体积分数来表示流体的占据比例。在交界面处，这些单元的体积分数会发生变化，以模拟复杂界面的流体行为，能清晰看到各种流体的瞬态变化。VOF 模型通过求解动量方程和连续性方程来获取流体运动情况，并基于流体相的体积分数  $\alpha$  来求解。

动量方程：整个多相流体系统在计算域内共享同一个速度场和压力场，求解单一的动量方程。

$$\rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (1)$$

式中： $t$  为时间，s； $\rho$  为流体混合物的密度， $\text{kg/m}^3$ ； $\mathbf{u}$  为流体的速度矢量， $\text{m/s}$ ； $p$  为流体的压力，Pa； $\mu$  为流体混合物的动力粘度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； $\mathbf{g}$  为重力加速度矢量， $\text{m/s}^2$ ； $\mathbf{F}$  为流体所受的体积力矢量， $\text{N/m}^3$ 。

对于一个两相系统，密度  $\rho$  和动力粘度  $\mu$  由各相体积分数计算得到的平均值：

$$\rho = \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2 \quad (2)$$

$$\mu = \alpha_1 \mu_1 + \alpha_2 \mu_2 \quad (3)$$

其中， $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$

式中： $\alpha_1$  为第 1 相流体的体积分数； $\alpha_2$  为第 2 相流体的体积分数； $\rho_1$  为第 1 相流体的密度， $\text{kg/m}^3$ ； $\rho_2$  为第 2 相流体的密度， $\text{kg/m}^3$ ； $\mu_1$  为第 1 相流体的动力粘度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； $\mu_2$  为第 2 相流体的动力粘度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

连续性方程：VOF 模型求解的是混合物的连续性方程，其形式与单相流相同。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

(4)

### 1.2 沉积模型建立与参数设置

沉积模型在 ANSYS 软件 Design Modeler 上建立，模型大小设计为 2.0 m（长） $\times$  0.8 m（厚）。为确保计算精度并兼顾计算效率，进行了网格独立性验证。分别测试了网格分辨率为 15 mm、10 mm 和 5 mm 的工况。选取最大下陷深度、变形起始时间为关键指标进行对比，确认 10 mm 网格可满足计算精度要求。因此网格分辨率采用 10 mm $\times$ 10 mm。模型背景均施加竖直向下的重力加速度，对应沉积物在自重作用下的初始应力状态。

沉积模型左右边界为水平约束，底部边界设为固定约束，顶部边界为自由面，确保沉积层在水平振动下自由发生剪切变形与层间位移。

不同砂-黏土层沉积模型方案见表 1。为了查明在不同地震振动强度下饱和砂-黏土层界面处变形的形成过程，地震波加速度分别设置为 0.125g、0.25g、0.5g 和 0.8g。数值模拟中的砂层与黏土层密度和动力粘度参数参考了已有的湖相沉积物性指标测试结果 (LIANG et al., 2024) 和细颗粒沉积流体特性研究结果 (O'BRIEN et al., 1988; WETZLER, 2010)。此外，为了对比数值模拟与野外观测结果，本研究依据塔什库尔干湖相沉积层中发育的负载与球-枕构造，建立了与野外变形层厚度相近的沉积模型，并采用该地区变形层样品的物性指标参数 (LIANG et al., 2021, 2024) 进行了模拟反演与对比分析。需要说明的是，本研究采用的 VOF 模型侧重于模拟液化后砂层与黏土层因物理性质差异而发生相互流动、陷落和侵彻的变形阶段。

表 1 沉积模型与数值模拟方案

Table.1 Depositional models and numerical simulation schemes

加速度	沉积层	厚度 (m)		饱和密度( $\rho$ , kg/m <sup>3</sup> )			动力粘度 ( $\mu$ , Pa·s)	
0.125g	砂层	0.4		1850	1900	1950	0.01	
0.25g		0.4						
0.5g	黏土层	0.4		1750	1700	1650	10	
0.8g		0.4						
0.5g	砂层	0.4		1900			0.005	0.1
	黏土层	0.4		1700			30	1
0.5g	砂层	0.5	0.3	1900			0.01	
	黏土层	0.4	0.4	1700			10	
0.5g	砂层	0.2		1927			0.01	
	粉砂质黏土层	0.6		1664			10	

### 1.3 地震波选择

本研究选用 El centro 站台在 1940 年 5 月 18 日记录的美国 IMPERIAL Valley 地震 ( $M7.1$ ) 的加速度时程，如图 1。原始 El Centro 地震波总记录时长为 54s，且峰值加速度  $0.28 \text{ m/s}^2$  出现在 2.68s。根据不同工况，将地震波加速度时程曲线计算为目标峰值加速度 (0.125g、0.25g、0.5g、0.8g,  $g=9.81\text{m/s}^2$ )。为了模拟地震振动从地球深部传播到地面的过程，地震波参数由沉积模型底部水平输入，符合软沉积变形以水平剪切为主的力学特征。为了重点观察地震波输入后，沉积模型中负载与球-枕构造的出现与形成的过程，模拟运行时间设置为 10s，时间步数设置为 1000 步，时间步长为 0.01s。

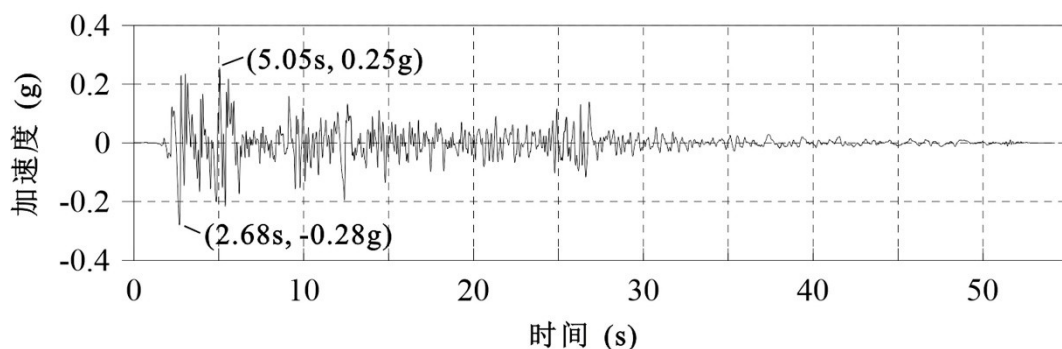


图 1 El Centro 地震波加速度时程曲线

Figure 1 Schematic diagram of El Centro seismic wave acceleration

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同地震加速度下沉积变形过程

为了观察地震波输入后沉积模型中负载与球-枕构造的出现及形成时序，本研究分别提取了在 2 s、3 s、5 s 和 6 s 时刻的瞬态响应特征。在输入 0.125 g 地震加速度后 5 s 时，砂-黏土层界面开始出现变形，至 6 s 时上覆砂层陷落至下伏黏土层形成小规模负载，下伏黏土层向上挤入形成火焰构造，最大下陷深度约为 10 cm（图 2a）。在 0.25 g 地震加速度输入后 4 s 时，砂-黏土层界面开始出现变形。5 s 时，砂-黏土层界面已形成明显的负载与火焰构造，至 6 s 时负载体的规模与变形程度显著增强，最大下陷深度约为 20 cm（图 2b）。在 0.8 g 地震加速度振动下，3 s 时已出现变形，至 6 s 时先前形成的负载构造继续陷落发展为球-枕构造，最大下陷深度约为 36 cm（图 2d）。上述结果表明，地震振动加速度越大，砂-黏土层界面越早出现扰动变形与负载构造，且由小型负载构造逐渐发展为较大规模的负载与球-枕构造，指示地震加速度大小是沉积变形构造发育的关键动力因素。

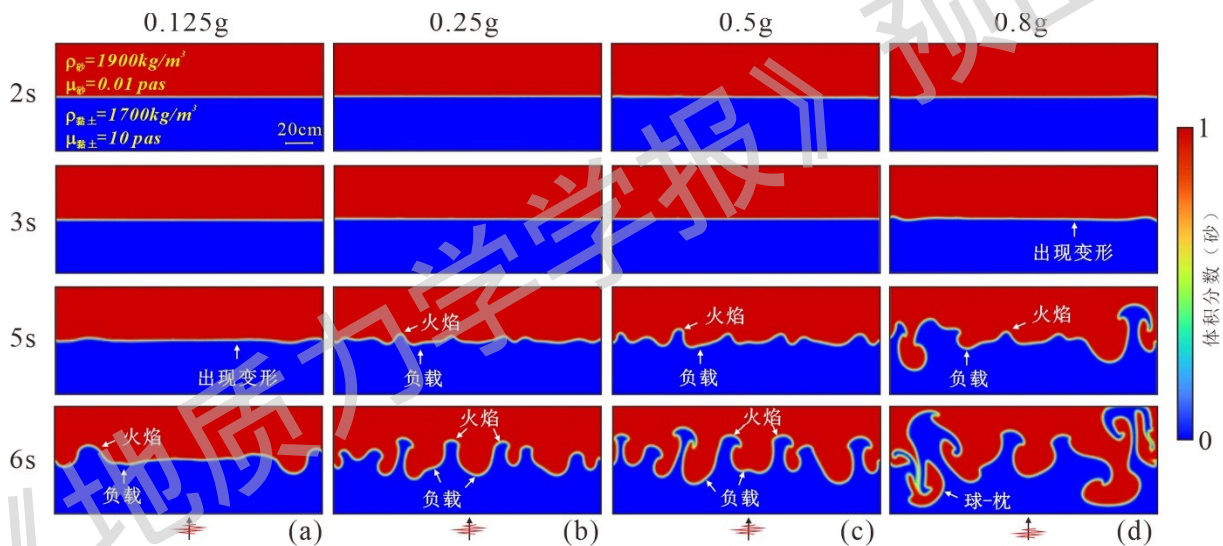


图 2 不同地震峰值加速度作用下，砂-黏土层在 2s、3s、5s 和 6s 时刻的变形图

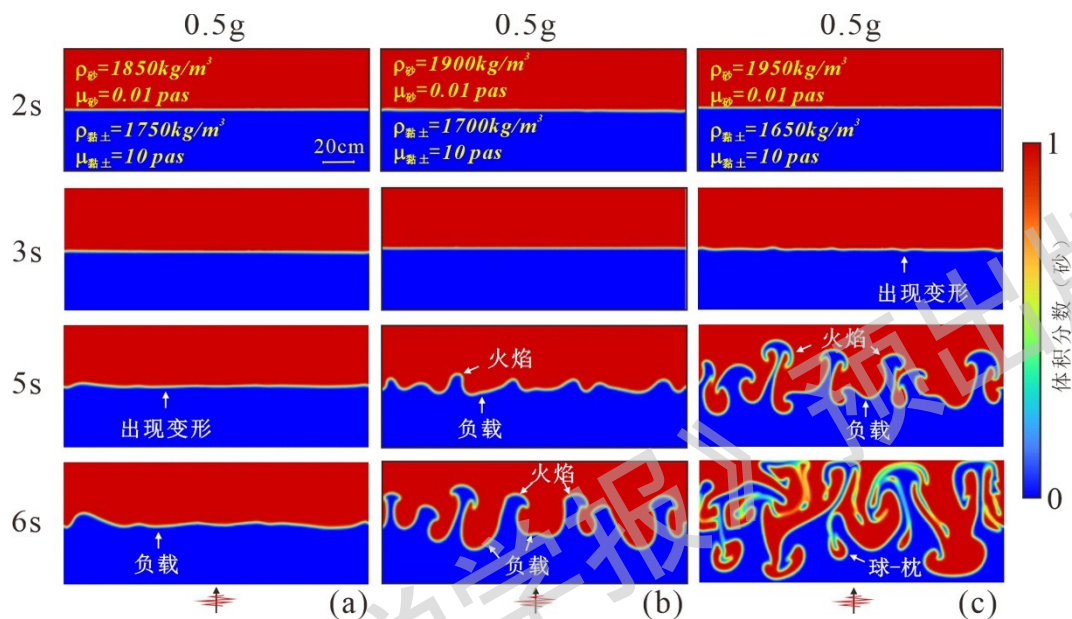
Figure 2 Deformation processes of sand-clay sediment layers at 2, 3, 5 and 6 seconds under different seismic acceleration condition

### 2.2 不同物理性质沉积层中变形过程

在相同地震峰值加速度 0.5g 作用下，具有不同密度差的砂-黏土层发生了不同变形（图 3）。结果显示，在密度差最小（ $\Delta\rho=100\text{ kg/m}^3$ ）的沉积模型中，5 s 时开始出现扰动变形，至 6 s 时仅形成微小的负载构造，最大下陷深度约为 2 cm（图 3a）。在密度差最大（ $\Delta\rho=300\text{ kg/m}^3$ ）的沉积模型中，3 s 时开始出现变形，5 s 时上覆砂层向下陷落形成明显的负载构造，同时下伏黏土层被向上挤入形成火焰构造，至 6 s 时逐渐发展为球-枕构造，最大下陷深度约为 38 cm（图 3c）。该结果表明，在相同地震加速度条件下，上下砂-黏土层反密度差越大，界面出现扰动变形与负载构造的时间越早，且负载与球-枕构造的变形程度和规模也显著增强。

在相同地震加速度 0.5g 作用下，具有不同动力粘度差的砂-黏土层沉积模型也呈现显著差异的变形（图 4）。结果显示，动力粘度差最大（ $\mu_{\text{砂}}=0.005\text{ Pa}\cdot\text{s}$ ， $\mu_{\text{黏土}}=30\text{ Pa}\cdot\text{s}$ ）的砂-黏土层模型中，地震波输入 5 s 时开始

出现变形，且在 6s 时出现微小的负载与火焰构造，最大下陷深度约为 10cm（图 4a）。相比之下，对于动力粘度差最小（ $\mu_{砂}=0.01 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,  $\mu_{黏土}=10 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ）的沉积模型，在地震加速度尚未到达峰值（2.68s）时已出现变形，最大下陷深度约为 39cm（图 4c）。在振动 3s 后，砂-黏土层界面形成小型负载与球-枕构造，且在 5s 后逐渐发展为砂-黏土混合变形层。该模拟结果表明，在本研究参数范围内，相同地震加速度条件下，砂层粘度低、黏土粘度适中、层间粘度差适中时更易快速形成负载与球-枕构造。指示上下沉积层的动力粘度差也显著影响其变形程度与规模。



a— $\Delta\rho=100 \text{ kg/m}^3$ ; b— $\Delta\rho=200 \text{ kg/m}^3$ ; c— $\Delta\rho=300 \text{ kg/m}^3$

图 3 不同密度差砂-黏土层在 2s, 3s, 5s 和 6s 时的变形图

Figure 3 Deformation processes of sand-clay sediment layers with varying density differences at 2, 3, 5 and 6 seconds

(a)  $\Delta\rho=100 \text{ kg/m}^3$ ; (b)  $\Delta\rho=200 \text{ kg/m}^3$ ; (c)  $\Delta\rho=300 \text{ kg/m}^3$

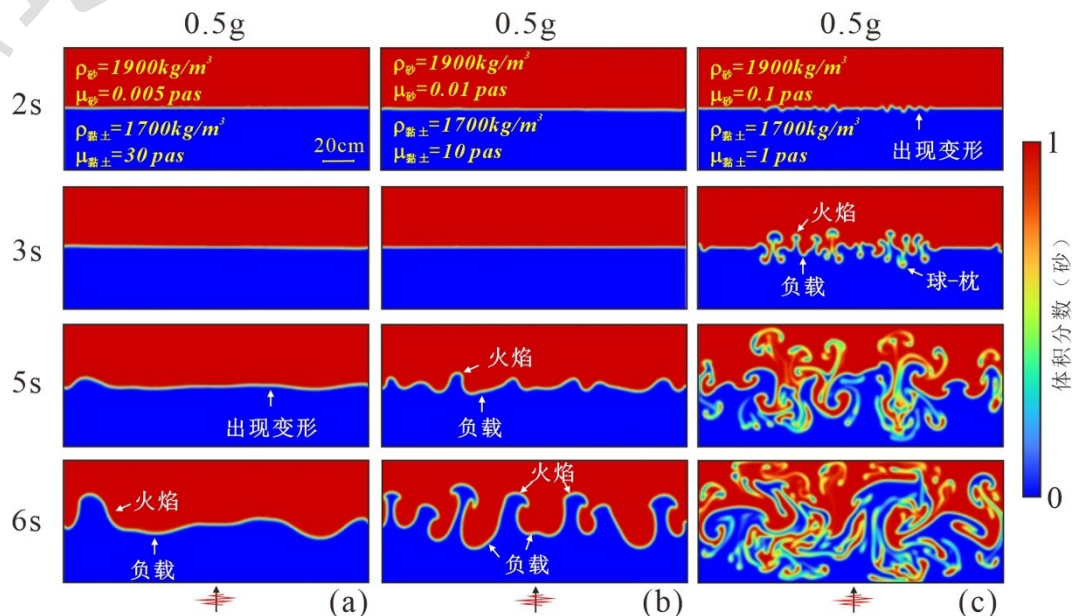
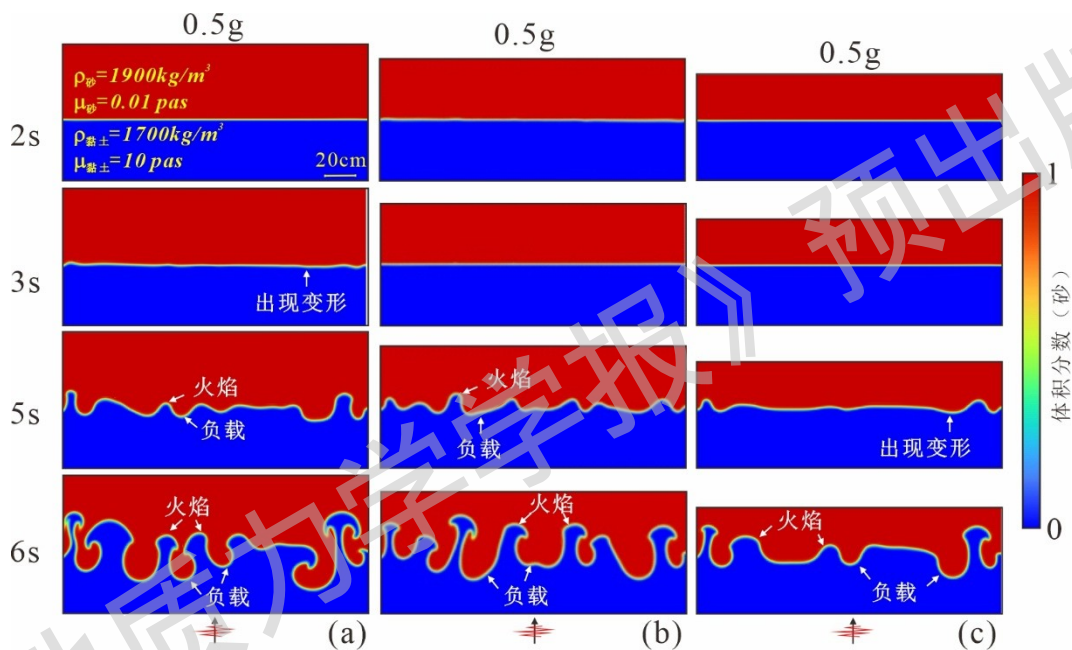


图 4 不同动力粘度砂-黏土层在 2s, 3s, 5s 和 6s 时的变形图

Figure 4 Deformation processes of sand-clay sediment layers with varying dynamic viscosity at 2, 3, 5 and 6 seconds

在下伏黏土层厚度不变的情况下，当上覆砂层厚度改变时，砂层与黏土层界面也会发生不同的变形（图 5）。结果显示，在相同地震加速度  $0.5g$  下，上覆砂层最大（砂层厚度为  $0.5\text{ m}$ ）的沉积模型中，在地震振动  $3\text{ s}$  时模型中开始出现变形， $5\text{ s}$  时形成明显的负载构造，至  $6\text{ s}$  逐渐发展成球-枕构造，最大下陷深度约为  $26\text{ cm}$ （图 5a）。当上覆砂层厚度分别减小至  $0.3\text{ m}$  时，地震振动  $5\text{ s}$  时形成微弱变形，至  $6\text{ s}$  时出现明显的负载和火焰构造最大下陷深度约为  $18\text{ cm}$ （图 5c）。该结果表明，上覆砂层厚度越厚，更早形成沉积变形与负载构造，且所形成的负载与球-枕构造体规模越大。相比之下，上覆砂层厚度越薄，沉积变形出现时间更晚，负载体的规模和变形程度越小。



a—砂层厚度= $0.5\text{ m}$ ; b—砂层厚度= $0.4\text{ m}$ ; c—砂层厚度= $0.3\text{ m}$

图 5 下伏黏土层厚度不变且上覆砂层厚度发生变化时，砂-黏土层在 2s, 3s, 5s 和 6s 时的变形图

Figure 5 Deformation diagrams of sand-clay layers at 2 s, 3 s, 5 s and 6 s with different overlying sand layer thicknesses and constant underlying clay layer thickness

(a) Sand thickness= $0.5\text{ m}$ ; (b) Sand thickness= $0.4\text{ m}$ ; (c) Sand thickness= $0.3\text{ m}$

### 2.3 数值模拟结果与野外实例对比

为与野外实际观测到的变形构造进行对比，本研究选取塔什库尔干湖相沉积层中发育的负载与球-枕构造为案例（LIANG et al., 2021, 2024）（图 6a 和表 2），建立接近野外厚度的砂-黏土层沉积模型，并通过数值模拟复现其变形过程。根据野外观察，该负载与球-枕构造发育于上覆薄层深灰色细砂层与下伏厚层灰黄色粉砂质黏土层之间。负载体底部呈向下弯曲形态，球-枕构造主体呈近圆状，负载与球-枕体的垂直长度约  $20\text{--}30\text{ cm}$ 。负载与球-枕体的充填物质来源于已基本消失的上覆深灰色砂岩层，指示原始母岩层较薄，难以仅由超负载作用导致下陷，推测其形成与强烈地震触发有关。

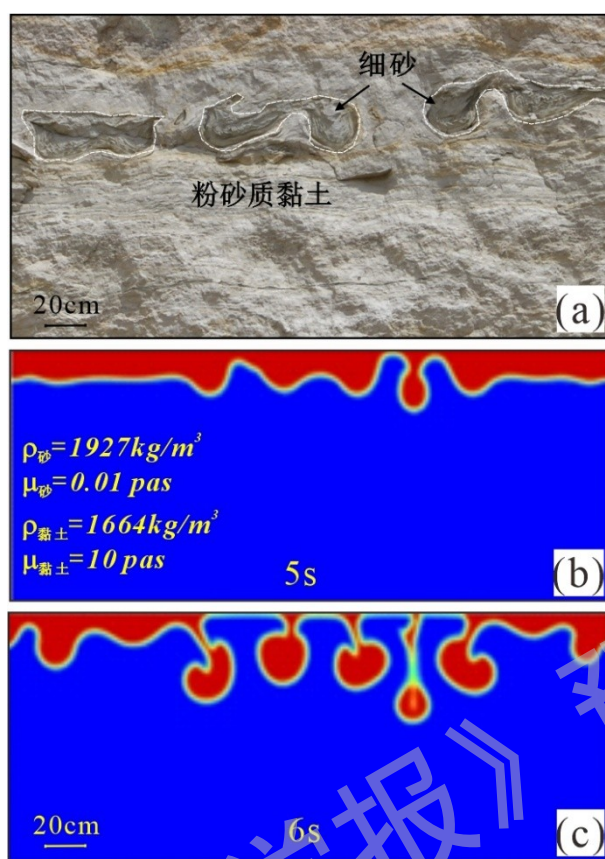
数值模拟结果显示，在 0.5g 地震加速度作用下，5s 时上覆砂层已向下伏粉砂质黏土层陷落，形成负载和火焰构造，至 6s 时上覆砂层完全陷没，原负载构造进一步发育为球-枕构造（图 6b 和 6c）。模拟所得的负载与球-枕体在形状和规模上均与野外观察特征高度一致，表明该变形构造的形成归因于薄砂层陷落到下伏粉砂质黏土层的陷落，支持其形成机制的解释。值得注意的是，在不同地震加速度的持续振动下，该沉积模型界面均发育出负载与球-枕构造，但在其形成时间与变形程度却存在差异，这表明此类构造的形成不仅受地震加速度大小控制，也与地震振动持续时间密切相关。

采用 Fluent 中的 VOF 多相流数值模拟方法，能够有效实现未固结饱和沉积层在地震作用下负载与球-枕构造的形成过程及其演变规律。需指出的是，尽管这类变形构造往往伴随砂层或粉砂层的液化，但本模拟方法更侧重于液化后沉积层的变形阶段，旨在揭示砂层和黏土层因物理性质差异而发生的相互流动过程及其动力机制。本研究仍存在一定的局限性。首先，模型未考虑地震动过程中孔隙水压力的累积与消散过程及沉积层的排水条件。地震输入采用简化的单向水平加速度时程，未充分考虑地震动的持续时间、频率及多次地震的叠加效应。其次，当前模型为二维，而天然地层往往呈现三维非均质性，可能影响变形的形态。因此，为更准确反演大范围软沉积变形过程并解析其与地震动强度的关系，未来仍需结合更多野外实例与实验数据，进一步优化模型构建与参数条件，从而提升该方法在不同地质背景下软沉积变形识别与古地震研究的应用性。

表 2 野外实例与数值模拟关键参数对比

Table. 2 Comparison of key parameters between field example and numerical simulation

参数类型	野外实例（塔什库尔干）	数值模拟（本方案）
上覆砂层厚度	0.15-0.25 m	0.2 m
下伏黏土层厚度	>0.5 m	0.6 m
砂层饱和和密度	~1927 kg/m <sup>3</sup>	1927 kg/m <sup>3</sup>
黏土层饱和和密度	~1664 kg/m <sup>3</sup>	1664 kg/m <sup>3</sup>
球-枕体垂直长度	20-30 cm	20-35 cm



a—负载与球-枕构造野外拍摄图；b—5s 时模拟变形图；c—6s 时模拟变形图

图 6 塔什库尔干湖相沉积负载与球-枕构造和数值模拟结果图

Figure 6 Load and ball-and-pillow structures in the lacustrine sediment from Tashkorgan area and the diagram of numerical simulation results

(a) Image of load and ball-and-pillow structures in the field; (b) Simulated deformation at 5s; (c) Simulated deformation at 6s

### 3 结论

本研究以软沉积变形构造中典型的负载与球-枕构造为案例，采用 Fluent 多相流数值方法，复现了砂-黏土沉积层在不同地震加速度及不同物理性质（密度、动力粘度和层厚）条件下该变形构造的形成过程及其规律。

(1) 地震加速度大小是负载与球-枕构造发育的关键动力因素。加速度越大，砂-黏土层中变形与负载构造出现更早，且由小型负载逐渐发展为规模更大的负载与球-枕构造。

(2) 在相同地震加速度条件下，沉积层的物理性质差异显著影响变形构造特征。上覆砂层和下伏黏土层的密度差越大，上覆砂层越厚，负载构造的变形程度和规模也更显著。在本研究参数范围内，砂层粘度低、黏土粘度适中、层间粘度差适中时更易快速形成负载与球-枕构造。

(3) 数值模拟结果与野外观测的负载与球-枕构造在形态上高度一致，进一步支持该地区此类构造的地震成因机制。

作者贡献声明：严泽龙负责论文写作和修改；范瑞祥参与数值模拟分析；梁莲姬参与论文构思、数据分析和修改；钟宁参与论文修改并提供建议；张俊杰参与修改，所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author's Contributions: YAN zelong drafted and revised the manuscript; FAN ruixiang performed numerical simulation analysis; LIANG lianji conceived the study、data analysis and revision; ZHONG ning revised the manuscript and provided suggestions; ZHANG junjie participated in manuscript revision.

利益冲突声明： 本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict Interests: All authors declare no conflict interests.

## 参考文献

### References

- ALLEN J, 1982. Sedimentary structures, their character and physical basis[J]. *Earth Science Reviews*, 19(4): 362-363.
- ARIANA M, MAARTEN D V, THOMAS V, et al., 2021. What controls the remobilization and deformation of surficial sediment by seismic shaking? Linking lacustrine slope stratigraphy to great earthquakes in South-Central Chile [J]. *Sedimentology*, 68 (6): 2365-2396.
- GALLI P, 2000. New empirical relationships between magnitude and distance for liquefaction[J]. *Tectonophysics*, 324(3): 169-187.
- GIBERT L, ALFARO P, GARCÍA-TORTOSA F J et al. , 2011. Superposed deformed beds produced by single earthquakes (Tecopa Basin, California): insights into paleoseismology[J]. *Sedimentary Geology*, 235: 148-159.
- GUO L, HE Z, LI L , 2023. Lacustrine sedimentary responses to earthquakes—soft-sediment deformation structures since late Pleistocene: A review of current understanding[J]. *Earthquake Research Advances*, 3(2): 100158.
- HEEZEN B C, EWING W M, 1952. Turbidity currents and submarine slumps, and the 1929 Grand Banks [Newfoundland] earthquake[J]. *American Journal of Science*, 250(12): 849-873.
- HUANG T, WU F, LI Z H, et al. , 2025. Records of Holocene paleoearthquake events from soft-sediment deformation structures in the southeastern segment of Xiangshan-Tianjingshan Fault Zone on the northeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Northwestern Geology*, 58(6): 131-148 (in Chinese).
- JAMIL M, SIDDIQUI N A, UMAR M, et al., 2021. Aseismic and seismic impact on development of soft-sediment deformation structures in deep-marine sand-shaly Crocker fan in Sabah, NW Borneo[J]. *Journal of King Saud University-Science*, 33: 1-13.
- KLUGER M O, LOWE D J, MOON V G, et al., 2023. Seismically-induced down-sagging structures in tephra layers (tephra-seismites) preserved in lakes since 17.5 cal ka. Hamilton lowlands, New Zealand[J]. *Sedimentary Geology*, 445.
- LIU X C, 2019. Finite-element simulations of structure-fluid coupling: a case study in vein-type tungsten deposits[J]. *Journal of Geomechanics*, 25(S1): 163-169 (in Chinese).
- LIANG L J, LU Z H, ZHANG Q T, et al., 2024. Shaking table simulation of soft sediment deformation structures in lacustrine sediments[J]. *Sedimentary Geology*, 472: 106756.
- LIANG L J, QIAO X F, DAI F C, et al. , 2021. Seismically triggered soft-sediment deformation structures in Tashkorgan lacustrine sediments, northeastern Pamir, China[J]. *Quaternary International*, 604: 82-92.
- LU Y, WETZLER N, WALDMANN N, et al, 2020. A 220,000-year-long continuous large earthquake record on a slow-slipping plate boundary[J]. *Science Advances*, 6(48): eaba4170.
- LI J, JANSEN D J, CARLING A P, et al., 2025. 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.
- MORETTI M, RONCHI A, 2011. Liquefaction features interpreted as seismites in the Pleistocene fluvio-lacustrine deposits of the Neuquén Basin (Northern Patagonia) [J]. *Sedimentary Geology*, 235(3): 200-209.
- 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.

- MA J, HE D F, LU G, et al., 2025. The influence of weak layers on thrust structure deformation: A finite element numerical simulation study[J]. *Journal of Geomechanics*, 31(3): 444-457 (in Chinese).
- NIKOLAEVA S B, 2022. Paleoseismic Events Reflected in Late Pleistocene and Holocene Deposits of the Terraces of Imandra Lake (Kola Region, Fennoscandian Shield)[J]. *Doklady Earth Sciences*, 506(Suppl 1): S108-S115.
- MILNES R A, PLUMMER S P, MAY I R, 2024. Earthquake-induced soft-sediment deformation in the Pleistocene succession, Noarlunga Embayment, South Australia[J]. *Transactions of the Royal Society of South Australia*, 148(2): 154-169.
- OWEN G, 2003. Load structures: gravity-driven sediment mobilization in the shallow subsurface[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 216(1): 21-34.
- OWEN G, MORETTI M, ALFARO P, 2010. Recognising triggers for soft-sediment deformation: Current understanding and future directions[J]. *Sedimentary Geology*, 235(3-4): 133-342.
- OBERMEIER S, 1998. Liquefaction evidence for strong earthquakes of Holocene and latest Pleistocene ages in the states of Indiana and Illinois, USA[J]. *Seismological Research Letters*, 50: 227-254.
- O'BRIEN J S, JULIEN P Y, 1988. Laboratory analysis of mudflow properties[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(8): 877-887.
- PIERRE M, SILVIA T, NICCOLÒ M, et al., 2023. Concurrence of load-and-flame structures, ball-and-pillows, clastic injectites and shear deformation bands as indicator of seismicity in mixed siliciclastic-carbonate successions (Finale Ligure Basin, Italy)[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 155: 106345.
- QIAO X F, LI H B., 2008. Pillow and ball-pillow structures: Paleoequake records in strata[J]. *Geological Review*, 54(6): 721-730 (in Chinese).
- QIAO X F, 2017. Soft-sediment deformation structures: Records of earthquakes and paleoearthquakes[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-263 (in Chinese).
- RAJKHOWA S, JAISWARA K N, PANDEY P, et al., 2026. Coseismic liquefaction during Mw6.0 2021-Assam earthquake and paleoliquefaction features in the Brahmaputra Plain, India: implications on boundary conditions and paleoseismicity[J]. *Natural Hazards*, 122(4): 153.
- SHANMUGAM G, 2017. Global case studies of soft-sediment deformation structures (SSDS): Definitions, classifications, advances, origins, and problems[J]. *Journal of Palaeogeography*, 6(4): 251-320.
- SABYASACHI M, ABHA S, SANTANU B, et al., 2023. Linking the impact of seismicity on palaeogeographic evolution and sedimentary architecture: A case study from Middle Jurassic succession of Spiti Himalaya[J]. *Geological Magazine*, 160(10): 1863-1874.
- SU D C, SUN A P, LI Z L, et al., 2022. Origin of soft-sediment deformation structures in Nihewan Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 11(3): 332-359.
- SIPP S G, SCHERER S D M C, RODRIGUES G A, et al., 2026. Soft-sediment deformation structures in eolian sandstones: Morphology, genesis, and stratigraphical relationships through time [J]. *Sedimentary Geology*, 2026, 491: 106996.
- VAN LOON A J, PISARSKA-JAMROŻY M, 2014. Sedimentological evidence of Pleistocene earthquakes in NW Poland induced by glacio-isostatic rebound[J]. *Sedimentary Geology*, 300: 1-10.
- WETZLER N, MARCO S, HEIFETZ E, 2010. Quantitative analysis of seismogenic shear-induced turbulence in lake sediments[J]. *Geology*, 38(4):303-306.
- ZHANG J D, LIANG C, CAO Y C, et al., 2024. Event bed assemblage characteristics constrain the seismic origin of soft-sediment deformation-Application in Lingshan Island, Qingdao[J]. *Advances in Earth Science*, 39(1): 96-107 (in Chinese).
- ZHONG N, JIANG H C, LIANG L J, et al., 2017. Research progress of paleoearthquake from load and ball-pillow structures in soft-sediment deformation[J]. *Geological Review*, 63(3): 719-738 (in Chinese).
- ZHONG N, JIANG H C, LI H B, et al., 2021. Research progress on seismic intensity recorded by seismically induced soft-sediment deformation[J]. *Geological Review*, 67(6): 1785-1802 (in Chinese).
- ZHANG F X, ZHOU Y Q, WANG A D, et al., 2015. Study on load structures and ball-pillow structures in Lingshan Island, Shandong Province[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 35(3): 42-50 (in Chinese).
- ZHAO J K., 2020. Dynamic disturbance characteristics and simulation reproduction of soft-sediment deformation in Diexi paleo-dammed lake[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese).

## 附中文参考文献

- 黄婷, 吴芳, 李振宏, 等, 2025. 青藏高原东北缘香山 - 天景山断裂带东南段全新世古地震事件的软沉积变形构造记录[J]. 西北地质, 58(6): 131-148.
- 刘向冲, 2019. 构造-流体耦合有限元模拟:以石英脉型钨矿为例[J]. 地质力学学报, 25(S1): 163-169.
- 马佳, 何登发, 鲁国, 等, 2025. 软弱层对逆冲构造变形的影响: 有限元数值模拟研究[J]. 地质力学学报, 31(3): 444-457.
- 乔秀夫, 李海兵, 2008. 枕、球-枕构造:地层中的古地震记录[J]. 地质论评, (6): 721-730.
- 乔秀夫, 2017. 软沉积物变形构造: 地震与古地震记录[M]. 北京, 地质出版社, 1-263.
- 张济东, 梁超, 操应长, 等, 2024. 事件层组合特征限定软沉积变形的地震成因—在青岛灵山岛的应用[J]. 地球科学进展, 39 (1): 96-107.
- 钟宁, 蒋汉朝, 梁莲姬, 等, 2017. 软沉积物变形中负载、球-枕构造的古地震研究综述[J]. 地质论评, 63(3): 719-738.
- 钟宁, 蒋汉朝, 李海兵, 等, 2021. 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, 67(6): 1785-1802.
- 张风霄, 周瑶琪, 王安东, 等, 2015. 山东省灵山岛负载构造和球-枕构造研究[J]. 沉积与特提斯地质, 35(3): 42-50.
- 赵家康, 2020. 叠溪古堰塞湖中软沉积变形的动力扰动特征及其模拟再现研究[D]. 成都理工大学.

《地质力学学报》预出版