引用格式：龚丽文，张怀，陈丽娟，等，2025. 基于小南海地震地质灾害的历史地震参数分析[J]. 地质力学学报，31（3）：345−360. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025001

Citation: GONG L W，ZHANG H，CHEN L J，et al.，2025. Analysis of historical seismic parameters based on geological hazards from the Xiaonanhai earthquake[J]. Journal of Geomechanics，31（3）：345−360. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025001

基于小南海地震地质灾害的历史地震参数分析

龚丽文[1,2,3]，张　怀[1,2]，陈丽娟[3]，王赞军[3]，张秉诺[3]，孙益星[4]，柏昌云[5]

GONG Liwen[1,2,3]，ZHANG Huai[1,2]，CHEN Lijuan[3]，WANG Zanjun[3]，ZHANG Bingnuo[3]，SUN Yixing[4]，BAI Changyun[5]

1. 中国科学院大学地球与行星科学学院，北京 100049；
2. 地球系统数值模拟与应用全国重点实验室，北京 100049；
3. 重庆市地震局，重庆 401147；
4. 重庆安全技术职业学院，重庆 404100；
5. 黔江区应急局，重庆 409000

1. *College of Earth and Planetary Sciences*, *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*;
2. *State Laboratory of Earth System Numerical Modeling and Application*, *Beijing* 100049, *China*;
3. *Chongqing Earthquake Agency*, *Chongqing* 401147, *China*;
4. *Chongging Vocational Institute of Safety & Technology*, *Chongqing* 404100, *China*;
5. *Qianjiang District Emergency Bureau*, *Chongqing* 409000, *China*

Analysis of historical seismic parameters based on geological hazards from the Xiaonanhai earthquake

Abstract: ［**Objective**］As the largest historical seismic event in the Chongqing region, the Xiaonanhai Earthquake holds significant scientific value for deciphering seismogenic parameters to inform regional seismic hazard assessment and anti-seismic fortification standards. This study addresses the critical challenge of scarce observational data in historical earthquake research.［**Methods**］A novel methodology for inverting seismic parameters through characteristic earthquake relics has been developed, systematically reconstructing the historical seismic parameters of the Xiaonanhai Earthquake. The interpretation of high-precision remote sensing and field investigations of seismically induced geo-hazards reveal a dominant near-N–S spatial distribution of the landslide clusters triggered by the Xiaonanhai Earthquake, consistent with the elliptical major axis direction of historically documented felt areas.［**Results**］This spatial congruence suggests that the NNW-striking Yangtoushan Fault is the seismogenic fault. Detailed remote sensing analyses of landslide orientations, sliding directions, and deposit distributions demonstrate, for the first time, coherent SE-directed motion features across multiple landslide masses, indicating a southeastward coseismic rupture propagation. A comparative analysis of the spatial correlation between geo-hazards and seismogenic structures observed in the Ludian Earthquake, coupled with seismotectonic mechanisms in southeastern Chongqing, further validates the rationality of the derived seismic parameters.［**Conclusion**］This study innovatively identifies a "karst–tectonic" composite mechanism: Under persistent NW–SE tectonic stress, bead-like karst caves developed along the fault zone or dominant joint directions form natural weakening

基金项目：国家自然科学基金联合基金项目（U2239205）；重庆市教育委员会科学技术研究项目（KJQN202404711）

This research is financially supported by the Joint Funds of the National Science Foundation of China (Grant No. U2239205) and the Scientific and Technological Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (Grant No. KJQN202404711).

第一作者：龚丽文（1988—），男，在读博士，高级工程师，主要从事地震活动性分析与地球动力学数值模拟研究。Email：gongliwen21@mails.ucas.ac.cn

通信作者：张怀（1973—），男，博士，教授，主要从事计算地球动力学研究。Email：hzhang@ucas.ac.cn

收稿日期：2025−01−08；**修回日期**：2025−03−24；**录用日期**：2025−03−25；**网络出版日期**：2025−04−28；**责任编辑**：吴芳

zones, inducing stress concentration and ultimately triggering left-lateral strike-slip motion with thrust components. This dual mechanism explains the unique seismic characteristics blending tectonic rupture and karst collapse. [**Significance**] The proposed "geo-morphodynamic inversion" methodology advances the reconstruction of historical earthquake parameters and provides critical insights for the evaluation of seismic risk in karst terrains.

Keywords: Xiaonanhai Earthquake; geological disaster; seismogenic fault; dynamic processes; seismogenic mechanism

摘　要：小南海地震作为重庆地区震级最大的历史地震事件，其地震学参数解析对区域地震危险性评价及抗震设防标准制定具有重要科学意义。针对历史地震研究受限于观测资料缺失的瓶颈问题，文章提出了一种通过典型地震遗迹反演地震参数的方法，系统重建了小南海历史地震参数。对地震地质灾害遗迹高精度遥感解译与现场调查的结果显示小南海地震触发的滑坡群具有显著近南北向优势展布特征，与历史记载的有感范围椭圆长轴方向近似一致，这指示该地震的发震构造可能为北北西向仰头山断层。通过地质灾害体的高精度遥感解译，获得滑坡朝向、堆积物的滑动方向和展布特征，研究发现多个滑坡体的堆积物都具有向南东方向运动特征，据此推断地震动力学过程以南东向错动为主。结合鲁甸地震的地质灾害分布特征与发震构造之间的关系，以及渝东南地震成因机理，研究成果论证了地震学参数的合理性。研究创新性揭示该地震具有“岩溶−构造”复合致灾机制：在北西—南东向构造应力持续作用下，沿断裂带或优势节理方向发育的串珠状岩溶洞穴形成天然弱化带，导致应力集中，发生左旋走滑兼逆冲性质的错动，最终引发兼具构造地震与岩溶塌陷特征的特殊震例。该成果为历史地震参数重建提供了“地质遗迹−动力学反演”新方法，对岩溶地区地震危险性评估具有重要指导价值。

关键词：小南海地震；地质灾害；发震断层；动力学过程；地震成因机制

中图分类号：P642.22; P315　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2025)03−0345−16

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025001

0　引言

1856 年 6 月 10 日，在黔江小南海附近(29.70°N, 108.80°E)发生了重庆辖区内有记载以来最大的一次地震，震级为 6¼ 级，震中烈度Ⅸ度，震源深度 2～8 km。川渝湘鄂黔五省市的毗邻地区均有震感，房屋倒塌 300 余栋，死伤居民上千人，崩塌滑坡等地震次生灾害发育(丁仁杰和李克昌, 2004)。由于该地震年代久远，大量地震遗迹风化剥蚀严重，导致对烈度圈范围、发震断层、发震机制及成因机理的认识仍存在分歧(刘锁旺等, 1981; 刘玉亮, 2009)，而这些地震学参数对该地区的地震危险性评价和抗震设防标准的制定具有重要的指示意义。王赞军等(2018)和秦娟等(2018)通过对历史地震有感范围记载梳理，获得烈度圈展布特征。而地质灾害的分布通常指示极灾区的分布范围，滑坡由于其规模较大、保存相对较完好，后续开展了一系列对该滑坡的研究工作；包括对滑坡的野外勘测、形成机制和成因机理研究(周鑫等, 2018; 王赞军等, 2019; 周鑫等, 2020)，对其形成机制的有限元模拟(申通等, 2014)和动力学分析(黄青松, 2014)，这些研究成果对滑坡的分布特征和形成机制研究均较成熟，有助于结合地震地质灾害研究地震学参数。

历史地震的地震学参数的确定需要考虑多方面的因素，如震级的确定通常为地表的破坏程度、地表破裂长度和变形程度等(高云鹏等, 2023)，而古滑坡的形态特征和形成机理受控于断裂活动、降雨入渗、地层岩性、河流侵蚀等多种因素(曾帅等, 2023; 邱振东等, 2024a; 邱振东等, 2024b; 张世殊等, 2024)，地震地质灾害的展布特征和运动方向受发震构造和地震的动力学过程影响较大(孙东等, 2024; Li et al., 2025)。因此，可以通过研究地震地质灾害的形态特征和动力学过程反演地震学参数。地貌解译是研究灾后地质灾害分布特征的最常用且最高效的手段之一(和海霞等, 2016; Cui et al., 2021; Liu et al., 2025)，而滑坡的分布不仅影响烈度圈的划定，还能为发震构造的判识提供证据(Huang et al., 2025)，并可以结合其他震例研究分析其对地震参数的指示意义(许冲等, 2014)。此外，还可以利用地震滑坡堆积物分布特征分析地震动的错动方向和动力机制(周庆和吴果, 2015)。因此，有必要结合滑坡的研究成果及其他地质要素综合分析小南海地震的地震要素及其成因机制。文章以小

南海地震为研究对象，创新地使用动力学分析方法，将地质灾害遗迹与历史地震形成过程紧密融合在一起，开展历史地震的地震参数与成因机理分析，通过研究确定了小南海地震形成的动力学过程和成因机制。

1　构造地质背景

小南海地震宏观震中位于上扬子台坪内的八面山台褶带中，二仙岩-八面山向斜西翼。古生代—中生代以间歇性坳陷为主，形成 6000～10000 m 厚海相碳酸盐岩沉积层；加里东运动后，经历多次地壳抬升和下沉，形成海相沉积和陆相沉积互层（图 1，表 1）；印支运动和燕山运动对沉积地层的改造变形，最终形成向西北突出的弧形断褶带；喜马拉雅运动以来，以地壳差异垂直运动为主，同时经受源于印度板块、太平洋板块对欧亚板块的挤压作用。此外，已有研究通过对第四纪活动断层绝对年龄的测定，并根据断层构造展布的空间位置、力学性质和运动方式，确定其正应力方向，结合地震震源机制解 P 轴轴向（丁仁杰和李克昌，2004），参考现今 GPS 资料反演结果等（Wang and Shen, 2020），以及黔江仰头山地震台的地倾斜仪长期趋势为东南倾的指示意义，综合分析认为该地区新生代构造应力为北西—南东方向的挤压应力（龚丽文等，2019），造就现今黔江地区的构造格局。黔江地区地表出露的岩性以志留系泥页岩夹砂岩为主，上覆二叠系灰岩，下部为奥陶系和寒武系厚层灰岩，而滑坡主要发育在志留系的泥岩中，特别是该区域发育的“龟裂”泥岩，岩石力学试验显示其稳定性较差，为崩塌

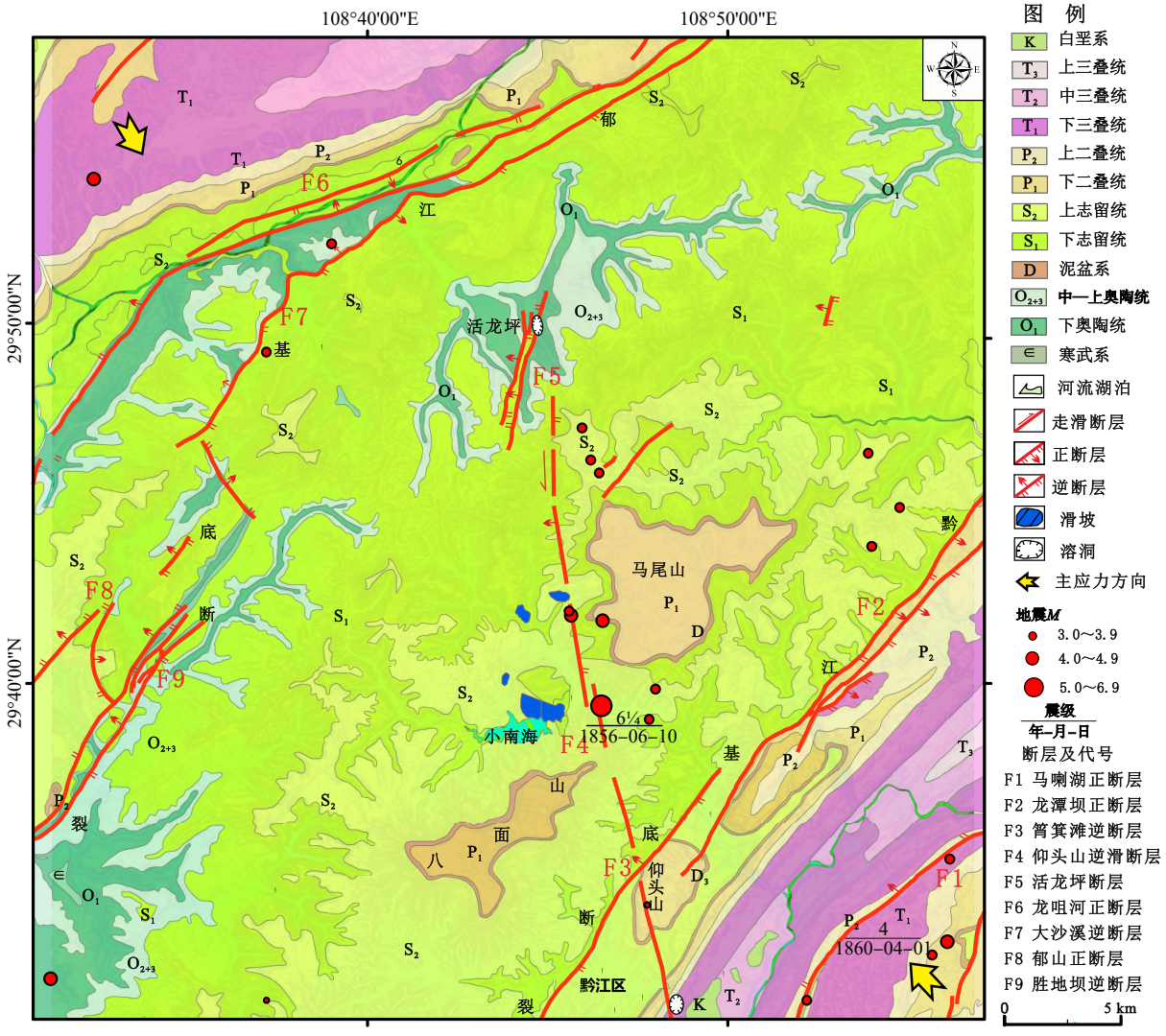


图 1　小南海区域地震构造图（据 1∶20 万地质图修改，来源：地质云 https://geocloud.cgs.gov.cn）

Fig. 1　Seismotectonic map of the Xiaonanhai Region (modified from the 1∶200,000-scale geological map)

滑坡形成提供有利的地质条件(黄青松等, 2014; 张世殊等, 2024)。在地震相对不高的动力荷载作用下, 龟裂泥岩将发生动力崩解而裂离成散体状碎裂岩体, 受地震触发造成次生地质灾害(特别是滑坡)较严重(王金鹏等, 2016), 所形成的滑坡和崩塌遗迹, 为研究历史地震提供最有力的证据。

表 1 区域地层岩性汇总表

Table 1 Summary of the regional stratigraphic lithology

界	系	统	地层代号	厚度/m	岩性
上古生界	二叠系	上统	P_2c, P_2w	192～241	含硅质灰岩和炭质页岩互层
		下统	P_1m, P_1q, P_1l	236～547	中厚层灰岩底部夹页岩
	石炭系	中统	C_2l	0～6	灰色中厚层白云岩
	泥盆系	上统	D_3s	0～92	泥质灰岩和石英砂岩
	志留系	中统	S_2lr	805～1147	粉砂岩和泥岩、页岩
		下统	S_1ln	320～612	黄绿色和黑色泥岩页岩
下古生界	奥陶系	上统	O_3w, O_3l	2.8～26	泥灰岩、钙质页岩和粉砂岩
		中统	O_2b, O_2s	28～80	龟裂纹灰岩和泥质灰岩
		下统	O_1d, O_1h, O_1f, O_1n	315～447	厚层灰岩、白云岩及页岩
	寒武系	上统	$\in_3m$, $\in_3g$	389～412	厚层状灰岩、白云岩
		中统	$\in_2p$, $\in_2m$	593～941	厚层状灰岩、白云岩
		下统	$\in_1s$, $\in_1t$, $\in_1sp$, $\in_1s$, $\in_1m$	584～886	厚层状灰岩、白云岩夹砂岩

2 历史地震学参数分析

2.1 方法思路

历史地震学参数是地震危险性评价和发震机理解析的重要基础, 主要包括历史地震的烈度、地震三要素、震源机制、发震构造、成因机理等参数的确定。秦娟等(2018)根据震中烈度衰减关系、烈度圈面积、有感圈范围及地震对比分析, 对震级和烈度进行详细的论证, 确定了在震中烈度为Ⅸ度条件下(存在大规模滑坡和堰塞湖), 震级范围为 5.5～6.9 级(中值为 6.2 级), 深度为 5～12 km(中值为 8 km), 宏观震中位置位于小南海附近。但由于史料记录的不确定性、经验公式反演多解性及区域构造背景的复杂性等多种因素, 导致历史地震学参数并不唯一。因此, 文章主要针对地震地质灾害特征对历史地震的发震构造、震源机制和破裂过程进行论述, 利用地质遗迹反演技术, 基于地震滑坡、地裂缝、塌陷等遗迹的半定量分析, 建立地震参数与地质灾害遗迹的对应关系。具体研究思路见图 2。

2.2 发震构造特征分析

(1)区域地震构造条件

黔江区地处扬子地块与江南造山带过渡带, 受多期构造运动叠加影响(燕山期北西—南东向挤压、喜马拉雅期近南北向伸展), 形成以北东向断裂为主导的构造格架。小南海地震发生在黔江基底断裂和郁江基底断裂之间, 次级断层发育, 以北东走向为主, 倾向北西或南东, 除了受北西—南东走向挤压形成的逆断层以外, 还分布大量正断层(表 2), 最新活动年代集中于中更新世中、晚期, 部分断层在第四纪仍有活动。该地震的发震断层为北东向的黔江基底断裂还是北北西向的仰头山断层, 目前仍存在争议(刘锁旺等, 1981; 刘玉亮, 2009; 王赞军等, 2018)。区内碳酸岩广泛分布, 岩溶和节理发育, 主要有 3 组节理发育, 其中北东向节理占总数 45%, 平行于区域断裂走向(如郁山断裂), 属共轭剪切节理; 北西向节理占 30%, 与区域主压应力方向(北西—南东)平行, 具张剪复合特性; 近东西向节理占 15%, 受后期应力场改造形成。节理系统与构造活动及岩溶网络具有显著耦合关系, 燕山期北西—南东向挤压形成北东向共轭剪节理, 喜马拉雅期近南北向伸展导致北西向张性节理活化, 地下水流沿初始节理溶蚀, 使开度扩大 2～5 倍, 构造活跃区开度 2～15 cm(如仰头山断层), 其内部充填物以钙质胶结为主, 从而可能形成显著的弱化带, 这为地震发生提供优势破裂方向的构造条件(黄青松, 2014)。

(2)极震区与烈度圈的展布特征

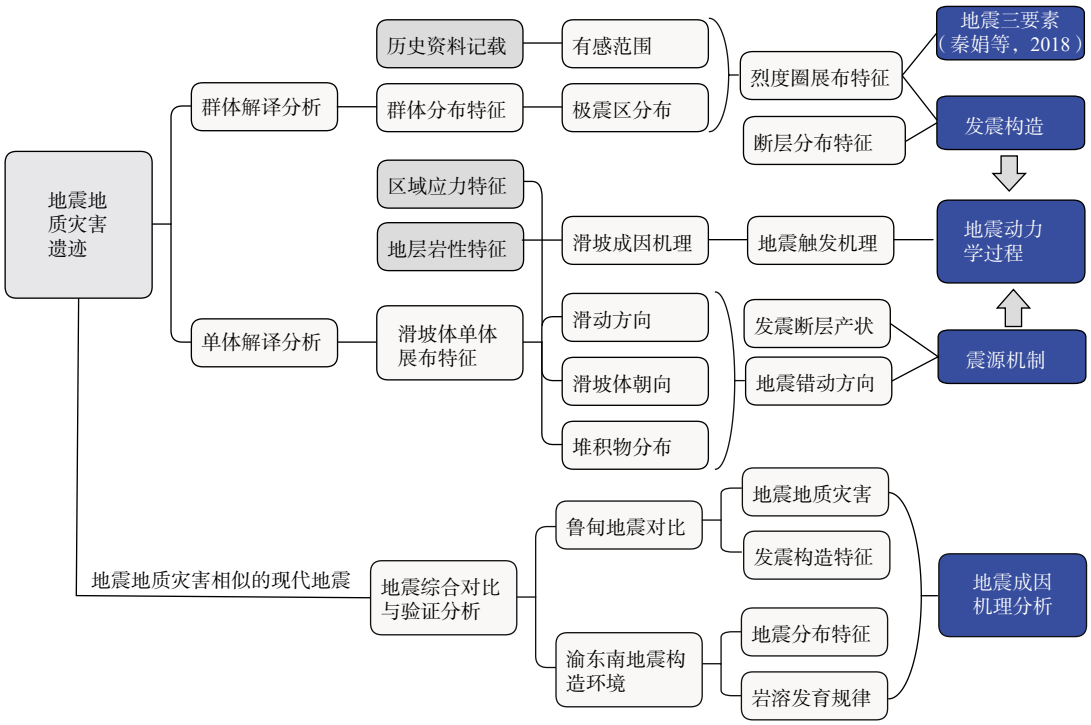


图 2　方法流程图

Fig. 2　Methodology flowchart

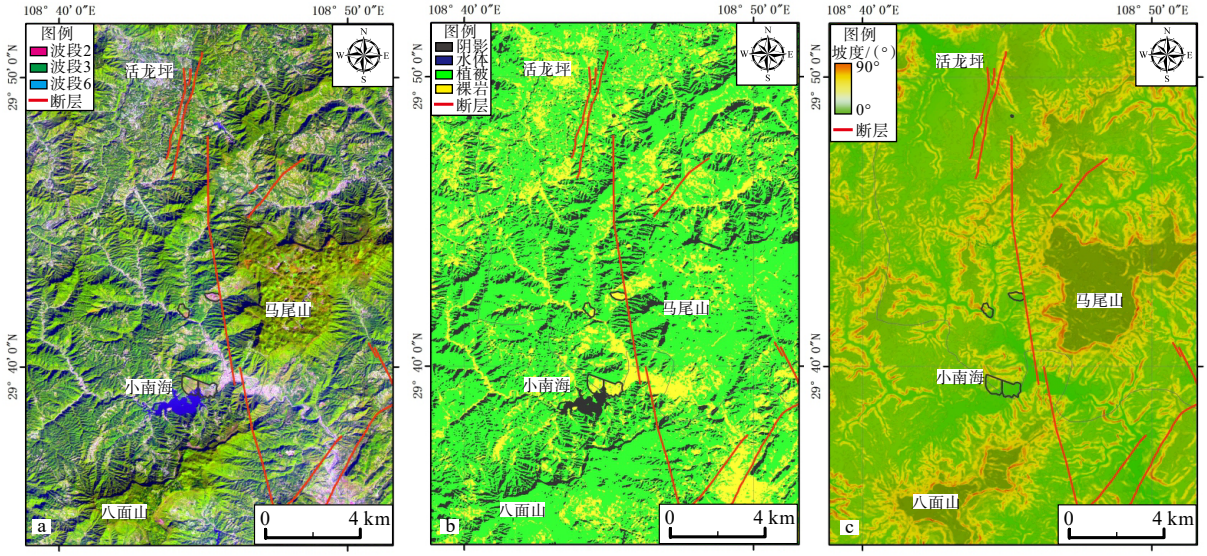
表 2　区域断层汇总表（据韦清海，1975；丁仁杰和李克昌，2004 修改）

Table 2　Summary of regional faults (modified from Wei, 1975; Ding and Li, 2004)

代号	断层名称	长度/km	走向	倾向	倾角/(°)	断层特征	备注
F1	马喇湖正断层	37	N10E	NW	50～70	可见较平整的断面，未见擦痕，角砾岩棱角分明，大小悬殊，无定向排列	张性
F2	龙潭坝正断层	32.5	N30～45E	SE	65～70	断层带宽100～200m，断裂岩石破碎，未见方解石化	张性
F3	筲箕滩逆断层	39	N39E	NW	70～76	构造角砾岩发育，细小微圆，糜棱岩化，构造透镜体附片理和牵引褶曲发育	压扭性
F4	仰头山逆滑断层	12	350	SW	70～80	破碎带发育，主要为碎裂岩、角砾岩、方解石脉和方解石团块组成	逆滑左行平移
F5	活龙坪断层	6	N30E	NW	30～40	断层两盘挤压比较强烈，挠曲发育	压扭性/张性
F6	龙咀河正断层	54	N30～70～30E	NW	50	断裂带宽20 m，局部角砾岩发育。糜棱岩发育地段可见断层泥和构造透镜体	张扭性
F7	大沙溪逆断层	35	N30E	NW	28～45	断层两盘挤压强烈，形成一系列褶皱及倒转褶皱，片理发育，并平行于断裂面	压扭性
F8	郁山正断层	53	N40～30E	NW	50～90	断裂带宽30～50 m，断面不平整，角砾岩发育，棱角分明，大小悬殊，杂乱无章	张扭性
F9	胜地坝逆断层	32.5	N15～50E	NW	35～80	两盘岩石具重结晶和褪色现象，断裂面发育糜棱岩及构造透镜体，片理发育	压扭性

小南海地震极震区地处武陵山区腹地，因长期处于构造隆升，雨水充沛，沟谷发育，地质灾害频发。为了研究小南海地震造成的滑坡整体分布特征，采用的数据源为地理空间数据云（http://www.gscloud.cn/）免费提供的 Landsat-8 卫星产品数据，对其进行校正、裁剪、波段融合、图像增强及非监督分类等处理手段，提高其空间分辨率（15 m），增强地物辨识度（图 3a），并按其波谱特征将其按阴影、水体、植被及裸岩进行分类。结果显示：除了山体翼部出露的基岩可能为滑坡形成的，大量沟谷由于水体侵蚀及人为活动造成基岩裸露，可能给滑坡解译带来误判（图 3b）。此外，局部场地地形对地震作用下的次生灾害发育具有明显的影响或控制作用（图 3c），高陡地形地震加速度得到放大，坡顶的水平峰值加速度可以增大到谷底的 2～3 倍（Ma et al., 2025）。因此，进一步利用地形地貌提取坡度，发现滑坡多分布在 20°～50°的坡度区域，而坡度较大的陡崖，由于其岩性多为块状灰岩，较稳定，不容易形成滑坡。

为综合考虑岩性、地形及坡度结果，基于 ARCGIS 将 3 个图层文件进行叠加计算，滑坡地貌特征得到了一定凸显（图 4a），但部分在斜坡上人工



a—增强处理后的多光谱遥感影像；b—基于波谱特征的解译对象分类；c—基于高程数据的坡度提取

图 3 卫片解译与地形地貌分析结果

Fig. 3 Results of satellite imagery interpretation and topographic–geomorphic analysis

(a) Enhanced multispectral remote sensing imagery; (b) Spectral feature-based object classification; (c) Elevation data-based slope extraction

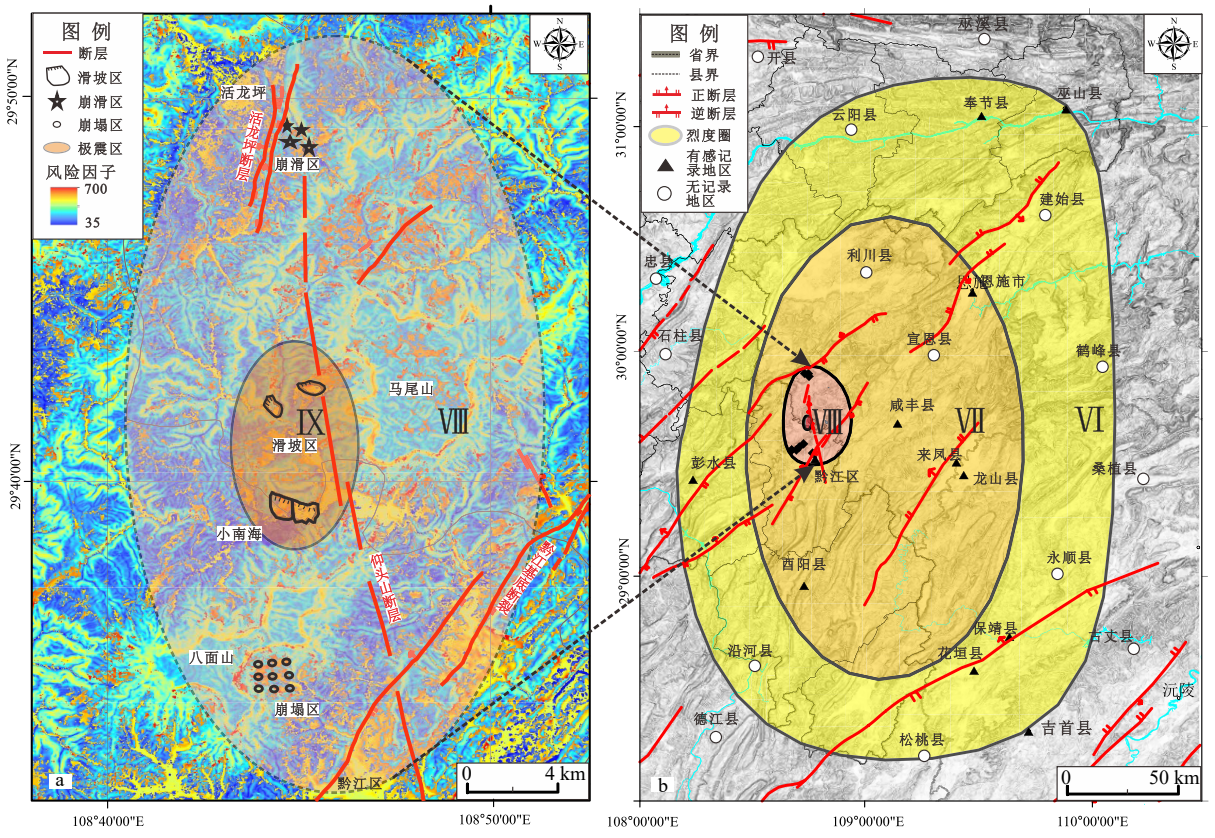
开垦的庄稼地计算值也较高。因此，进一步结合史料记载（丁仁杰和李克昌，2004）和现场调查核实发现：大垮岩−小垮岩、掌上界和蛇盘溪−汪大海 3 处崩滑体规模相对较大，滑坡堆积物和滑坡体特征较明显，可能为烈度Ⅸ度区，该区域滑坡集中分布，且规模较大，可能反映了小南海地震具有震源浅与地震能量衰减迅速的特点；而史料记载（丁仁杰和李克昌，2004）的活龙坪崩滑体和八面山崩滑体，由于其岩性主要为灰岩，震中距较远，崩滑体特征表现为“地剥皮”和崩塌堆积，无滑坡堆积特征，规模较小，可能为烈度Ⅷ度区。滑坡的分布与地震能量释放的位置相一致，尽管滑坡分布不是严格沿着发震断层分布，但是滑坡分布的主体方向仍然表现出了与发震断层走向一致的特征（Ma et al., 2025）；通过整理邻近区县的县志等历史资料，获得有感范围的分布特征，长轴表现为近南北方向，地震东侧的震感明显强于西侧，最远为奉节县和巫山县，该区域形变观测资料也显示该区域对西南地区的中强震反应比较敏感，可能与该地区的基底构造和岩性条件有关（龚丽文等，2021）。结合上述地震烈度区的优势方向和有感范围的展布方向（图 4b），均显示仰头山断层更可能为小南海地震的发震断层。

2.3 震源机制分析

极震区共有 3 处滑坡规模较大，分别为大垮岩−小垮岩滑坡、掌上界滑坡及蛇盘溪−汪大海滑坡，滑坡堆积特征明显。为了更精细化研究单个滑坡的规模、分布范围及滑动方向，进一步利用谷歌高清影像（空间分辨率为 0.5 m）进行影像处理，经过波段增强和监督分类后，将地物按波谱特征分为 4 类：①阴影，可以反映大的岩石块体及沟谷的分布的形态大小；②树木，是生长相对较茂盛的年老植物，代表未发生变化的区域；③草本，是新生的植物，是滑坡体形成后期生长的植物；④裸岩，为滑坡体形成后出露的新鲜面。因此，滑坡体多为裸岩和新生的植被，即主要为黄绿色相间分布的区域。

（1）大垮岩−小垮岩崩滑体

该崩滑体规模较大，小南海总面积为 2.142 km^2，其空间分布形状近似枣核形，长轴方向约为 135°。堆积物堵塞板夹溪形成现今的小南海（图 5a）。周鑫等（2018）通过卫片解译和无人机勘测，对该滑坡体进行了详细的勘测，将滑坡堆积物分成滑坡后壁、滑坡主体区和外围抛洒区；其中滑坡后壁由大垮岩和小垮岩组成的线性陡壁，走向 325°，延伸 500 m，壁高 60～80 m，裸岩覆盖，呈层性好，受节理面控制，是受地震触发后，箭子岭西段山体沿节理面劈成 2 段，残留的滑坡后缘；滑坡主体区还可分为后缘危岩、原地堆积和堰塞堆积 3 部分，表面呈多级平台，块石粒径>7 m，并多分布在相对平缓的北西侧，粒径向东南方向逐渐减小，面积约 1.56 km^2；外围抛洒区可以分为支沟抛洒区和前缘抛洒区，主要



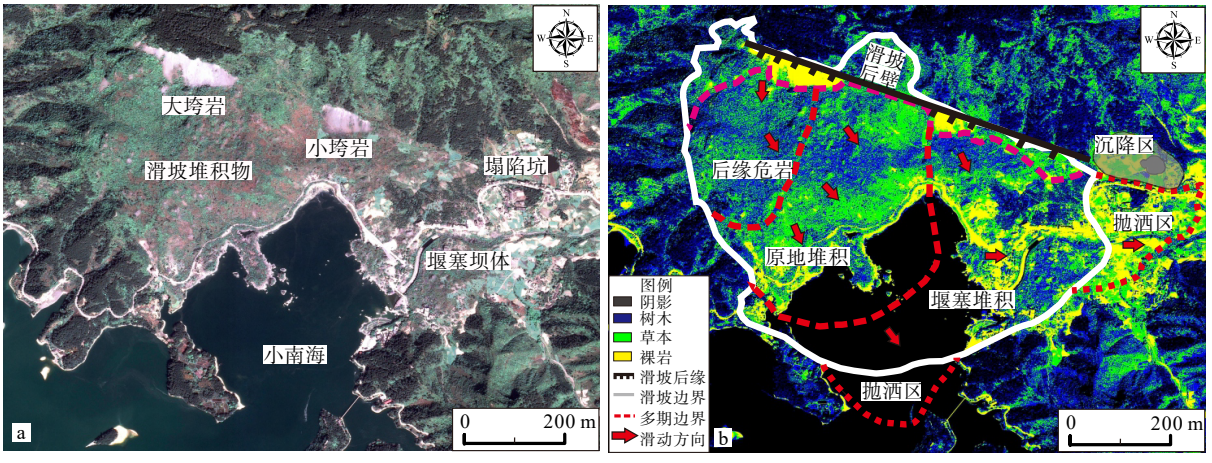
a—极震区分布图；b—地震烈度图

图 4　地貌解译与史料记载融合分析结果

Fig. 4　Integrated analysis of geomorphic interpretations and historical documentations

(a) Distribution map of meizoseismal areas; (b) Seismic intensity map

分布在滑坡体的东部和南部，面积约为 0.426 km^2（图 5b）。此外，在大垮岩–小垮岩后缘的延长线上依次分布着次级滑坡体和塌陷坑。综上所述，大垮岩–小垮岩滑坡体的坡向为南南西向，而堆积物展布的长轴方向和粒径的减小方向均为南东向，即滑坡体的滑动方向为南东向，这与最初的垮塌方向不



a—大垮岩–小垮岩滑坡卫星影像图；b—大垮岩–小垮岩滑坡地貌解译图

图 5　大垮岩–小垮岩滑坡卫星影像及地貌解译结果

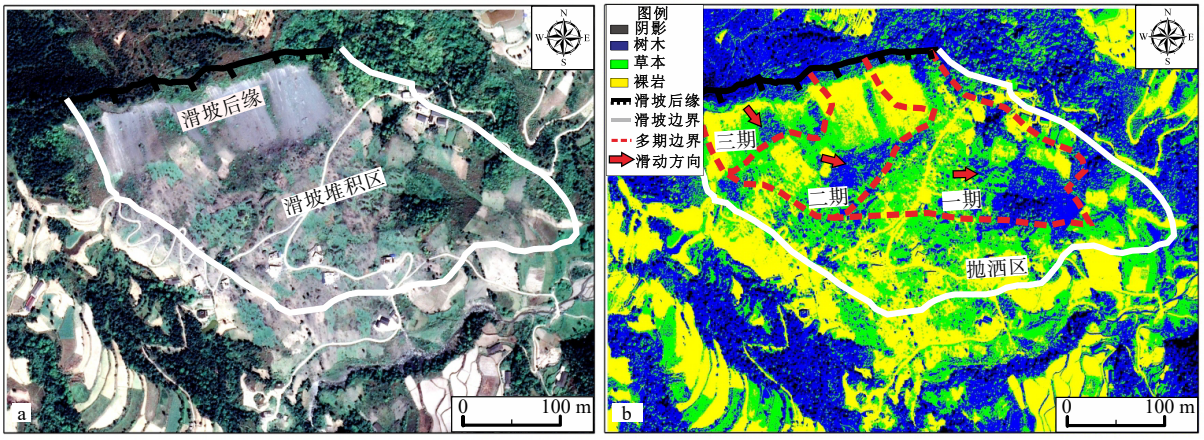
Fig. 5　Satellite imagery and geomorphic interpretation of the Dakuayan–Xiaokuayan Landslide

(a) Satellite imagery of the Dakuayan–Xiaokuayan Landslide; (b) Geomorphic interpretation map of the Dakuayan–Xiaokuayan Landslide

一致，这可能是由于岩体在崩滑瞬间具有南东向的加速度。

（2）掌上界崩滑体

掌上界滑坡位于小南海北北东方向 6 km 处，滑坡坡向为东南方向，滑坡壁走向约 80°，呈高 100 m、宽约 400 m 的长方形陡壁，横切 4 个山脊（周鑫等，2018），滑坡堆积物分布较均匀，延东南方向展布，崩滑体长约 600 m，宽约 400 m（图 6a）。崩滑体坡度总体平缓，滑体上滑坡体粒径分布相对较均匀，在滑坡体堆积物之上有几块树木植被（蓝色区域）集中分布，其波谱信息与滑坡山体上的植被类似，可能是从山体顶部整体滑塌下来的，几块滑体呈近直线分布，可能为下方滑体呈缓慢蠕动牵引上部滑体向前滑动，滑动方向为南东东向（图 6b）。经现场核实，该区域岩性主要为志留纪灰绿色片状泥岩夹紫红色泥岩，易风化，粒径变小，大块状的堆积物风化严重，多呈“馒头”状，与小南海崩塌块体巨大、棱角分明完全不同，可能是其砂岩和页岩含量不同造成的。



a—掌上界滑坡卫星影像图；b—掌上界滑坡地貌解译图

图 6 掌上界滑坡卫星影像及地貌解译结果

Fig. 6 Satellite imagery and geomorphic interpretation of the Zhangshangjie Landslide

(a) Satellite imagery of the Zhangshangjie Landslide; (b) Geomorphic interpretation map of the Zhangshangjie Landslide

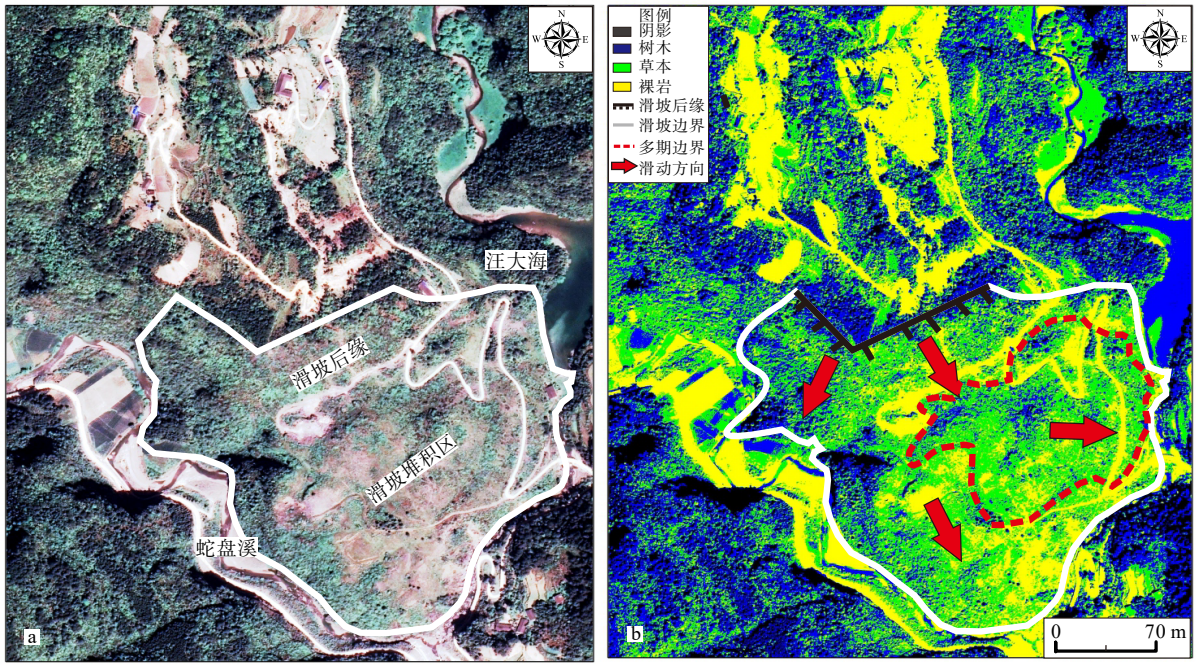
（3）汪大海–蛇盘溪崩滑体

位于小南海以北 5 km 的细沙溪和板溪河交汇口的崩滑堆积物，堵塞两溪流成湖，其东为“汪大海”，西为“蛇盘溪”，即汪大海–蛇盘溪崩滑体（图 7a）。山体被沟谷切割，较为陡峻，滑坡后缘边界由一组相交的陡壁组成，走向分别为 N300°W 与 N76°E，对应西南侧滑坡体规模远小于东南侧，滑坡后壁较陡，高约 50 m，宽约 150 m，成层性较好。崩滑体总体沿南东方向展布，呈舌状，长轴走向北西—南东，长约 800 m，滑坡堆积物呈山丘状堆积在滑坡体东南侧（图 7b），崩塌岩块密集分布两侧河道中，呈板状，堵塞板溪河形成汪大海；滑坡体较小，面积约为 0.21 km^2。

（4）活龙坪崩滑体

活龙坪位于小南海以北约 20 km，震中距较远，据史料记载（丁仁杰和李克昌，2004）及当地居民反映，该地区共有 3 处小规模崩滑体，但由于基岩以奥陶纪灰岩为主，均以“地剥皮”形式存在，崩滑堆积物较少，地貌解译不明显，以史料记载（丁仁杰和李克昌，2004）和现场调查结果对其简单描述：①苏家岩崩滑体，位于东厢水库附近，宽 200 m，高 60 m 的崩积物摧毁了苏家岩口约 0.01 km^2 田地，压垮民舍 4 家；②楼子岩崩滑体，面积约 0.02～0.03 km^2 的覆盖层，地震时产生急剧滑动，剥落殆尽，仅残留一个倾角 20°左右的滑动面；③大石板崩滑体，位于东厢水库北西方向 600 米见一大石板，石板由奥陶纪灰岩组成，长约 140 m，宽约 100 m，面积约为 0.07 km^2，倾向 125°，倾角 15°。在大石板东侧与南侧均可见崩塌岩块，砾径 2～10 m 不等，距离大石板南东方向 200 m 处，见崩塌体前缘，由多块长 4～5 m，宽 3～4 m，厚 1～2 m 板状岩块堆积而成，崩塌岩块总体倾向为南东向，坡体前缘陡坎高近 8 m（图 8a、8b）。

在该大石板上出露一条北西—南东向岩石裂缝，经现场走访调查核实，该裂缝为地震当天出现



a—蛇盘溪–汪大海滑坡卫星影像图；b—蛇盘溪–汪大海滑坡地貌解译图

图 7　蛇盘溪–汪大海滑坡卫星影像及地貌解译结果

Fig. 7　Satellite imagery and geomorphic interpretation of the Shepanxi–Wangdahai Landslide

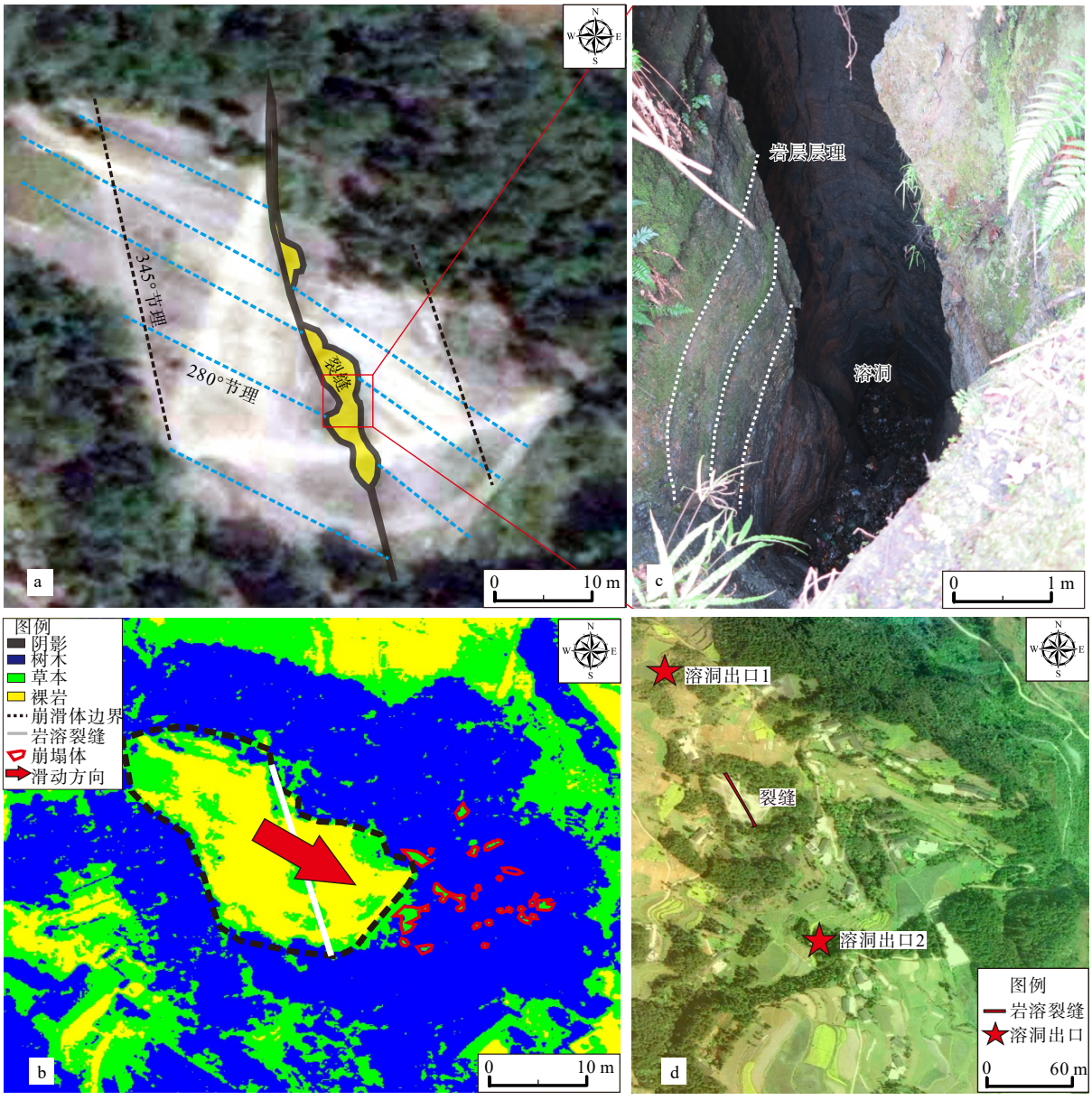
(a) Satellite imagery of the Shepanxi–Wangdahai Landslide; (b) Geomorphic interpretation map of the Shepanxi–Wangdahai Landslide

的，但在形成之前大石板之上覆盖一层泥页岩，地震时滑落，形成大石板。大石板中裂缝出露共 76.8 m，走向大约为 345°，缝隙宽度最宽处约 0.9 m，向两侧逐渐收缩变窄，裂缝两侧由于风化具有一定的高差，高差约 10 cm。裂缝内壁沉积层理清晰，无错动痕迹，未发现断层碎裂岩，且越深空隙越大；在裂缝北西方向和南东方向有 2 个岩溶洞出口，且 2 个洞口贯穿裂缝，三点呈近直线分布，走向近北北西向，与裂缝走向一致（图 8c、8d）。区域范围内北西向和北北西向菱形节理发育，控制着沟谷走向和溶洞的分布（周鑫等，2018），在大石板上发育 2 组节理，形态近似于“X”形，其中 1 组与裂缝平行，节理交汇处的裂缝明显变宽，这是由于经过长期风化，部分结构面贯通，岩体完整性遭到破坏，顺着软弱带不断发生岩溶作用，顺着断层或节理形成串珠状溶洞。

滑坡多发生在发震断层（逆冲）的上盘，当坡体坡向与断层错动方向一致时更容易发生崩塌滑坡（周庆和吴果，2015），小南海滑坡均分布在仰头山断层的上盘，结合地形图和坡向图发现滑坡的坡向均为南南东向，可知滑坡受到南南东向的初始加速度后触发而形成的，即发震断层在该盘的错动方向为南南东向，这与仰头山断层具有左行走滑兼逆冲的断层性质具有高度一致性。因此，小南海的震源机制节面可能受仰头山断层产状控制，其滑动方向为南南东向。

2.4　地震动力学过程分析

Li et al.（2025）基于物理的模拟方法捕捉断层破裂方向和动力学过程，显示破裂方向性效应（由地震波前向传播中的干涉驱动）导致即使断层条件相似，地质灾害与损失仍存在显著差异。极震区的 3 大滑坡体规模较大，分布较集中，堆积物都沿东南方向展布，3 大滑坡体后缘均呈线状展布，与节理走向一致，构造成因的节理带切割单薄山体与主体山脉的连续性，为斜坡后缘张裂提供有利条件。滑坡体的坡向均近似朝南，且滑坡体的滑动方向均有向东南偏移的趋势，即山体的错动的初始加速度近似朝南，并兼有向东逆冲的分量。滑坡堆积物多为泥岩、页岩和砂岩，特别是龟裂状泥岩对动力荷载极为敏感，在动力循环荷载作用下极易崩解为碎裂岩块而形成碎块状剪切带，为滑坡的形成提供物质基础。在地震烈度Ⅷ度区的南北两侧均有不同规模的崩塌发生，特别是北部活龙坪附近出现 1 处崩滑体，上覆崩滑体是由灰岩夹页岩组成，在地震作用下，沿着石板向东南方向滑落于沟谷和坡体中，并



a—活龙坪崩滑体卫星影像图；b—岩溶裂缝内部结构；c—活龙坪崩滑体地貌解译图；d—溶洞出口位置

图 8 活龙坪崩滑体解译与地裂缝的成因分析

Fig. 8 Interpretation of the Huolongping Landslide and genetic analysis of ground fissures

(a) Satellite imagery of the Huolongping Landslide; (b) Internal structure of karst fissures; (c) Geomorphic interpretation map of the Huolongping Landslide; (d) Location of exposed karst caves

在石板上出露 1 条北北东向的地裂缝，该地裂缝是因地震作用而出现的，但并非是断裂错动形成的，而是地震震动触发上部泥页岩顺层滑脱，即“地剥皮”；“地剥皮”后地下沿节理发育的溶洞出露，呈条带状分布，类似于地震裂缝。因此，滑坡的形成是受地震错动的触发，被近于直立构造节理切割的坡体在强震作用下，由于存在以泥岩为主的软弱带，且雨水降低岩层间的抗剪强度，组成坡体的巨大岩块发生崩塌并向南或南东方向滑移，即发震断层在该盘的错动方向以向南错动为主，兼有向东的分量，这与仰头山的断层性质具有高度一致性。

受青藏高原东缘挤压作用影响，黔江地区长期处于北西—南东向构造挤压应力场，形成了北东向隔槽式褶皱和断层体系。燕山期以来的多期构造活动导致断裂带闭锁段闭锁应力持续加载，沿仰头山断裂带发育的岩溶洞穴呈线性排列，形成天然弱化带，显著降低断层抗剪强度，地下水流沿溶洞网络渗透，导致孔隙压力升高，进一步弱化断层带。

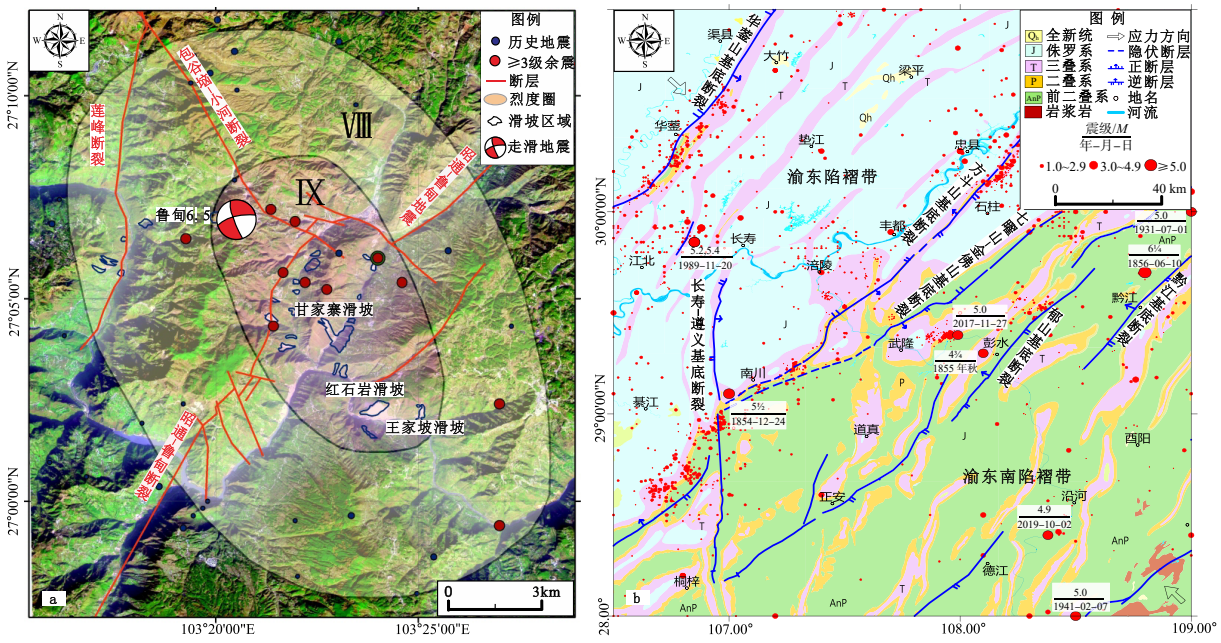
推测其动力学过程为：当构造应力超过断层抗剪强度时，岩溶弱化带优先破裂，闭锁段失稳破裂，引发断层失稳扩展，破裂从震源沿着断层向南南东方向优势扩展，破裂传播过程中，溶洞塌陷释放能量，形成复合型震源机制，导致断层上盘南东向的边坡失稳，进而形成大量滑坡、崩塌和岩溶塌陷。

3　历史地震成因机理分析

由于历史地震残留的地震遗迹较少，缺少地震监测数据，大部分地震参数是通过历史记录、地震遗迹、现场调查和经验公式反推获得的，其结果合理性和可靠性有待验证。He and Xu(2022)与 He et al.(2024)通过分析滑坡分布模式与地震参数(如 PGA、震级、强度以及与震中和发震断层的距离)的相关性，对景谷、鲁甸和漾濞地震滑坡分布及破裂特征对比分析，发现在相似震级下，破裂过程和地震动力学差异是滑坡规模和分布差异的关键因素。因此，有必要选用震级相近、地质灾害相似及研究相对较成熟的鲁甸地震进行对比分析，并结合渝东南地区其他具有显著影响的历史地震和现代地震，综合分析小南海地震的构造环境、成因机理和动力学过程。

3.1　现代地震对比分析

2014 年 8 月 3 日鲁甸 6.5 级地震，发生在扬子准地台凉山−滇东台褶带的滇东北台褶束内，区内发育北东向、南北向和北西向多组断裂构造，其中主体构造为北东向断裂和褶皱，而发震断层却为北西向包谷垴−小河断裂；此次地震造成的次生地质灾害发育(卢永坤等，2014)，其中规模较大的 3 处为红石岩滑坡、王家坡滑坡和甘家寨滑坡等，均位于震中的南东方向，滑坡坡向多朝向南东或南向(图 9a)，崩塌方向显示其具有较统一的力源，即地震震动方向为北西—南东向，同时受牛栏江及支流水系两侧地形深切割河谷区控制；由于基岩为二叠纪灰岩，因此滑坡主要表现为第四系残坡积层和强风化岩层沿坡体坠落，类似于山剥皮，滑坡灾害点主要分布在地震烈度Ⅷ−Ⅸ度区内，其长轴走向与活动断裂展布方向一致(殷志强等，2016)。该地震的发震断层为北西向的包谷垴−小河断层，是与北东向鲁甸−昭通断裂相配套的次级断裂，该断层走向 N30°W，倾向南西—南西西，倾角较陡，由数条小断层组成，总长约 40 km，具有左旋走滑兼逆冲性质(张彦琪等，2016)。此外，多机构给出的震源机制



a—鲁甸地震地质灾害与烈度圈分布图；b—渝东南地震构造图；

图 9　震例对比分析与区域地震构造背景分析

Fig. 9　Comparative analysis of seismic cases and regional seismotectonic context

(a) Distribution map of geological hazards and seismic intensity zonation of the Ludian Earthquake; (b) Seismotectonic map of southeastern Chongqing

解一致显示，区域受北西—南东方向的挤压应力为主，从而发生左旋走滑错动（许冲，2015；周庆和吴果，2015）。此外，Huang et al.（2025）对积石山6.2级地震地质灾害分析也得出类似结论：影响滑坡分布的因素主要包括海拔、坡度、坡向、地震等，坡度20°～40°、东南和南坡向、中坡位置、古近系和新近系地层和断层上盘得滑坡发生概率更高。

1856年6月10日小南海6¼级地震，发生在杨子准地台渝东南褶断带，主体构造为北东向断裂褶皱，地震地质灾害发育，主要分布在地震烈度Ⅷ−Ⅸ度区内，规模较大的为大垮岩−小垮岩滑坡、掌上界崩滑体和汪大海−蛇盘溪崩滑体，虽然滑坡的朝向具有一定的差异，滑坡的堆积物的展布方向均为南东向，显示为较统一的动力源，推测震动方向为北西向南东；该地区的岩性以二叠纪灰岩和志留纪泥页岩为主，下部的泥页岩质软，受长期风化作用，容易坍塌变形，上覆的灰岩则可能沿节理方向发生岩溶作用，形成薄弱带，进而诱发地震滑坡的形成；类似与鲁甸地震的发震构造，该区域的主要断裂为北东向的黔江断裂，但结合烈度圈的长轴方向、地质灾害的分布特征和滑坡体的展布特征，综合认为该地震的发震构造更可能为北北西向的仰头山断层，倾向南西—南西西，倾角较陡，由数条小断层组成，具有左旋走滑兼逆冲性质，受北西—南东方向的挤压应力为主，发生左旋走滑错动，在其上盘发生大量次生地质灾害。综上所述，无论是震级大小、构造背景和发震断层的性质，还是滑坡体的分布特征、坡体朝向和滑动方向，鲁甸地震和小南海地震均具有高度一致性，指示小南海地震可能具有类似的发震机理。

3.2 渝东南地震对比分析

重庆地区属于弱震地区，特别是渝东南长期处于平静期，仪器记录的中小地震均比较罕见，而据《重庆市及其邻近地区历史地震资料汇编》（丁仁杰和李克昌，2004），公元1010年到目前为止辖区内共记录到M≥4.5地震12次（表3），其中除了近期活动较强的荣昌地区有5次以外，其余的都分布在统景地区和渝东南褶皱带内（图9b）。相较于渝东陷褶束内现代小地震较活跃，渝东南及邻近地区中强历史地震较发育，近200年有记录的就有7次5级左右的地震：1854年南川5½级、1855年彭水4¾级、1856年黔江6¼级和2017年武隆5.0级地震，以及邻省的1931年恩施5.0级、1941年德江5.0级和2019年沿河4.9级地震，时间上集中在夏秋两季，空间上离较近的基底断裂有一定距离（图8b），该地区地层以古生代灰岩为主，岩溶地貌发育，可能受季节降雨和岩溶作用诱发，造成基底断裂之间的分支断层失稳，形成中强地震。2017年11月23日在武隆（29.39°N, 107.99°E）发生了重庆2000年以来最大的一次地震，震级为5.0级，震源深度10 km，震中位于武隆凹陷束中，是渝东南有仪器记录以来最大1次地震，距小南海90 km，发震断层北东向文复断层，地表无破裂带出露，最大地震烈度Ⅵ度，等震线长轴走向北北东，通过对余震精定位，大部分余震

表3 重庆辖区M≥4.5级地震汇总表

Table 3 Summary of M≥4.5 earthquakes in Chongqing

时间	坐标/地点	震级	深度/km	备注
1853-09-09	N 30.0°, E 106.8°/统景	4½	/	
1854-12-24	N 29.6°, E 107.0°/南川	5½		2次4级余震，震中烈度为Ⅶ
1855秋	N29.8°, E 108.6°/彭水	4¾		
1856-06-10	N29.2°, E 108.8°/黔江	6¼	2～8	震中烈度Ⅸ度
1880-03-22	N29.4°, E 107.2°/南川	4½		
1989-11-20	N29.92°, E 106.88°/统景	5.2、5.4	5	双震，震前有2次4级双震
1997-08-13	N29.43°, E 105.52°/荣昌	5.2	7.9	地震序列为前—主—余型序列
1999-08-17	N29.35°, E 105.58°/荣昌	5.0	12	地震序列为主—余型序列
2001-06-23	N29.52°, E 105.48°/荣昌	4.9	12	地震序列为主—余型序列
2010-09-10	N29.38°, E 105.43°/荣昌	4.5	6	
2016-12-27	N29.42°, E105.54°/荣昌	4.9	8	
2017-11-23	N29.42°, E105.54°/武隆	5.0	10	

均位于主震之上，显示地震破裂向上扩展（李翠平等，2019）。震前该地区地震活动较弱，震源机制显示该地震为北东向的正断型张性破裂事件，这可能是由于该地区的新构造运动是以间歇式抬升运动和差异性掀斜作用为主（李伦炯，1997），致使岩溶或断裂等脆弱带发生破裂形成的；震后通过加密观测台阵，提取了该地区大量微地震事件，并结合构造地质条件对精定位数据进行分析，结果发现受志留系泥岩隔水层影响，微地震集中分布在上覆的灰岩中，随着地震增多，后期可能逐渐形成隐伏断层薄弱带（Yin et al., 2024）。

综上所述，对比鲁甸地震次生灾害的分布特征及指示意义可知，小南海地震崩滑体分布具有一定的相似性，反映小南海地震的发震断层可能为北北西向的仰头山断层，滑坡集中分布的一盘的错动方向为南南东方向，显示该断层具有左行走滑分量的逆断性质。而渝东南地震活动特性显示该地区虽然小地震活动水平较弱，但具有发生中强地震的背景，特别是武隆 5.0 级地震所提供的观测记录，证实渝东南地区发震的一些特点：中强地震发生前后小地震活动均较弱，震源机制与构造应力背景有一定差异，大部分地震发生在基底断裂之间的分支断层上，受水库蓄水季节降雨影响较大，受地形和岩溶作用影响容易引起次生地质灾害。因此，结合上述震例分析，渝东南地区的中强地震可能由于岩溶–地震–地质灾害多种因子相互诱发作用形成的，而非单一构造应力作用。

4　讨论

地震滑坡受地震、地质及地形等多个因素的影响，地震产生的强震动和起伏的地形地貌是导致地震滑坡的外部因素，即地震滑坡的滑动方向受发震断层错动方向影响较大，而滑坡的分布与发震构造、震中往往表现出位置的一致性（周庆和吴果，2015）。因此，对同震滑坡的研究不仅能揭示历史地震的地震要素（许冲等，2014），还可以通过滑坡的分布特征反推地震的震源性质与破裂过程（许冲，2015）。

（1）发震构造分析

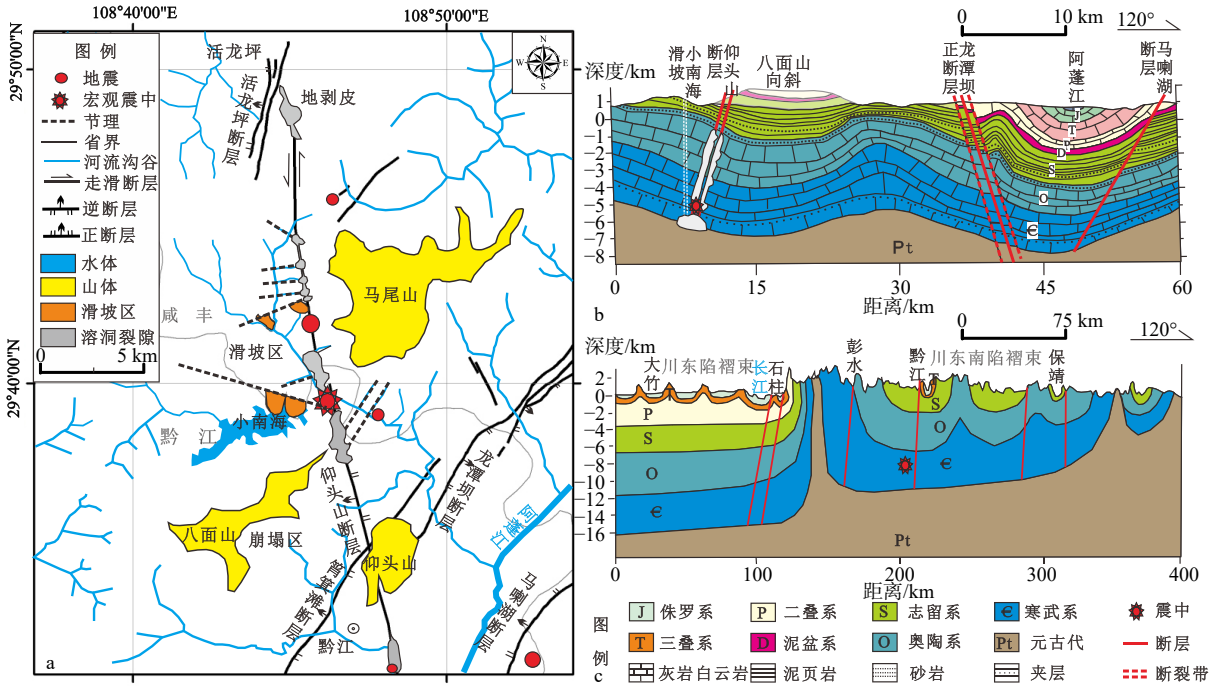
经过长期的野外地质调查，并未找到黔江基底断裂第四纪活动的证据，从而降低了该断裂为发震构造的可能性（王赞军等，2018）。结合滑坡解译结果及现场调查可知，该区共有 3 处规模较大的滑坡，包括大垮岩–小垮岩滑坡、掌上界滑坡、蛇盘溪–汪大海滑坡，分布密集，滑坡要素保存较好，堆积体较大，结构面较新鲜，最初都有堵塞河沟形成堰塞湖，即地震能量释放集中，为地震烈度Ⅸ度区；而位于其北北西方向的活龙坪和南南东方向的八面山东南坡分布多处“地剥皮”和崩塌堆积体，规模较小，为地震烈度Ⅷ；烈度圈的长轴方向与史料记载（丁仁杰和李克昌，2004）的有感范围的长轴方向具有很好的一致性，均为北北西—南南东向，这与邻近的仰头山断层走向具有高度一致性。结合鲁甸地震等震例对比分析可知，可能指示该地震的发震断层为北北西向的仰头山断层（图 10a）。

（2）动力学过程分析

该地区山高坡陡，地形对地震动的放大效应显著，岩石中存在 2 组构造节理，经过长期风化，部分结构面贯通，岩体完整性遭到破坏；岩层为砂泥岩互层结构，泥岩夹层硬度低，是导致滑坡失稳的软弱带；地层层面呈南东方向缓倾，坡体坡向、地层倾向、断层错动方向三者一致，山体更容易发生崩塌滑坡；此外，地震时刚好处于当地雨季，充足的雨水使得覆盖土体及岩层间的抗剪强度降低，容易造成失稳而发生滑坡（黄青松，2014）。地震动是坡体发生崩塌滑坡的触发因素，崩滑体的滑动方向均为东南方向，并最终有向南东东转向的趋势，说明在主压应力为北西—南东向的现代构造应力场作用下，山体在短时间内受到一个自北北西向南南东方向地震动加速度的冲击，指示该盘的错动方向为近似朝南，具有东南向的滑动分量，而仰头山断层为左行逆滑断层，与滑坡的力学性质相似，即该地震的震源机制可能为左旋走滑兼逆冲性质（图 10a、10b）。

（3）成因机理分析

小南海以北 20 km 处的地裂缝实际为地下溶洞的再出露，而该地区大量的溶洞出口和塌陷坑均沿仰头山断层呈线状分布，溶洞附近和滑坡后缘均发育大量节理，节理具有一定的优势方向，地裂缝的形成机制对地震的发震机制具有一定的指示意义，即古生代巨厚层碳酸盐在多期构造运动中形成多组节理，在雨水的侵蚀下沿节理方向的岩溶地貌较发育，形成线状排布的溶洞和沟谷，组成北北西—南南东向薄弱带，随着岩溶作用持续，薄弱带逐渐被贯通，在南西—北东向的构造应力下，发生错动，



a—孕震构造平面分布图；b—1:20 万地质剖面图；b—1:100 万地质剖面图

图 10 小南海地震孕震模式图

Fig. 10 Seismogenic model of the Xiaonanhai Earthquake

(a) Planar distribution map of seismogenic structures; (b) Geological profile (1:200,000-scale); (c) Geological profile (1:1,000,000-scale)

从而发生地震，为岩溶−构造地震（图 10）。

5 结论

对历史地震的研究是关系区域抗震规划和区域地震活动性评价的重要手段。文章通过地貌解译研究小南海地震滑坡等次生灾害的分布特征，并对比现代地震地质灾害特征，分析古地震的发震断层、震源性质和发震机制，主要结论如下：

（1）滑坡等地质灾害点的分布和有感范围的长轴方向均指示小南海地震的发震断层为北北西向的仰头山断层。

（2）滑坡的滑动方向及形成的力学性质指示地震的错动方向，即地震的震源机制可能为左旋走滑兼逆冲性质。

（3）地裂缝的形成机制及溶洞和塌陷坑的线状出露，显示该地震可能为岩溶−构造型地震。

References

CUI Y L, PAN J W, HU J H, et al., 2021. Landslides triggered by the 1970 Tonghai M_S7.7 earthquake and their distribution characteristics[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 861(5): 052011.

DING R J, LI K C, 2004. Chongqing earthquake research[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)

GAO Y P, LIU J, HAN L F, et al., 2023. Discussion on the magnitude or intensity limitation of paleoearthquake events[J]. Journal of Geomechanics, 29(5): 704-719. (in Chinese with English abstract)

GONG L W, DENG Z H, CHEN L J, et al., 2019. Analyses of finite element model based on station's tectonic environment: taking Qianjiang station for example[J]. Acta Seismologica Sinica, 41(1): 80-91. (in Chinese with English abstract)

GONG L W, CHEN L J, GUO W Y, et al. , 2021. Mechanism of borehole strain precursor anomaly at Fengjie station: results from stress transfer in regional stress field[J]. China Earthquake Engineering Journal, 43(5): 1087-1094, 1102. (in Chinese with English abstract)

HE H X, LI S J, LIU M, et al., 2016. Research on landslide spatial distribution in Ludian earthquake disaster area[J]. Journal of Catastrophology, 31(1): 92-95. (in Chinese with English abstract)

HE X L, XU C, 2022. Spatial distribution and tectonic significance of the landslides triggered by the 2021 Ms6.4 Yangbi earthquake, Yunnan, China[J]. Frontiers in Earth Science, 10: 1030417.

HE X L, XU C, QI W W, et al., 2024. Contrasting landslides distribution patterns and seismic rupture processes of 2014 Jinggu and Ludian earthquakes, China[J]. Scientific Reports, 14(1): 28470.

HUANG Q S, 2014. Research on formation mechanism and dynamic characteristics of Xiao Nanhai landslides induced by earthquake[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese with English abstract)

HUANG Y D, XU C, HE X L, et al., 2025. Landslides induced by the 2023

Jishishan Ms6.2 earthquake (NW China): spatial distribution characteristics and implication for the seismogenic fault[J]. npj Natural Hazards, 2: 14.

LI C P, TANG M Y, GUO W Y, et al., 2019. Relocation of the 23 November 2017 Wulong M_S5.0 earthquake sequence and analysis of its seismogenic fault[J]. Seismology and Geology, 41(3): 603-618. (in Chinese with English abstract)

LI L J, 1997. Neotectonism in the juncture of Sichuan, Guizhou and Hunan[J]. Acta Geologica Sichuan, 17(2): 110-114. (in Chinese with English abstract)

LI Y L, YU H Y, WANG M, et al., 2025. The physics-based deterministic scenarios for earthquake hazards and losses of the Zhujiangkou fault in Southern China[J]. Acta Geologica Sichuan Hazards, 2: 6.

LIU J L, XU C, ZHAO B B, et al., 2025. Deformation slope extraction and influencing factor analysis using LT-1 satellite data: a case study of Chongqing and surrounding areas, China[J]. Remote Sensing, 17(1): 156.

LIU S W, DING Z X, ZHANG J S, 1981. Investigation of the 1856 Dalu Dam earthquake in Xianfeng County, Hubei Province[J]. Crustal Deformation and Earthquake(2): 69-81. (in Chinese with English abstract)

LIU Y L, 2009. Study on Quaternary tectonic movements and seismogeology in Qianjiang area of Chongqing municipality[D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University. (in Chinese with English abstract)

LU Y K, ZHANG J G, SONG L J, et al., 2014. Analysis on intensity distribution and seismic disaster characteristics of building of Yunnan Ludian M_S6.5 earthquake in 2014[J]. Journal of Seismological Research, 37(4): 549-557. (in Chinese with English abstract)

MA S Y, SHAO X Y, XU C, et al., 2025. Topographic location and connectivity to channel of earthquake-and rainfall-induced landslides in Loess Plateau area[J]. Scientific Reports, 15(1): 628.

QIN J, WANG Z J, WANG H C, et al., 2018. Discussion on the epicentral intensity and magnitude of the 1856 Qianjiang-Xianfeng earthquake[J]. Earthquake Research in China, 34(3): 551-564. (in Chinese with English abstract)

QIU Z D, GUO C B, WU R A, et al., 2024a. Development Characteristics and Stability Evaluation of the Shadingmai Large-scale Ancient Landslide in the Upper Reaches of Jinsha River, Tibetan Plateau[J]. Geoscience, 38(02): 451-463.

QIU Z D, GUO C B, YANG Z H, et al., 2024b. Spatial structure characteristics and formation mechanism of the ancient Deda landslide elucidated using the microtremor survey method in Sichuan Province, China[J]. Journal of Geomechanics, 30(6): 906-920. (in Chinese with English abstract)

SHEN T, WANG Y S, WU L K, 2014. Discrete element simulation analysis of formation mechanism of Xiaonanhai landslide in Chongqing city[J]. Rock and Soil Mechanics, 35(S2): 667-675. (in Chinese with English abstract)

SUN D, QIN L, MENG M H, et al., 2024. Analysis of the development characteristics of co-seismic geological hazards and their controlling factors in the Maerkang M_S6.0 earthquake swarm, Sichuan, on June 10, 2022[J]. Journal of Geomechanics, 30(3): 443-461. (in Chinese with English abstract)

WANG J P, LI Y S, ZHANG C, 2016. Dynamics mechanism of low-intensity earthquake triggered the collapse of the soft rock: Xiao Nanhai seismic landslide in Chongqing of China as an example[J]. Mountain Research, 34(2): 200-207. (in Chinese with English abstract)

WANG M, SHEN Z K, 2020. Present - day crustal deformation of continental China derived from GPS and its tectonic implications[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 125(2): e2019JB018774.

WANG Z J, QIN J, WANG H C, et al. , 2018. Understanding the activity of the Qianjiang fault zone from the historical earthquakes in Qianjiang[J]. Earthquake Research in Sichuan(2): 5-12. (in Chinese with English abstract)

WANG Z J, QIN J, LI C P, et al., 2019. Discussion on the causes of the 1856 Xiaonanhai, Chongqing earthquake disaster[J]. China Earthquake Engineering Journal, 41(3): 813-822. (in Chinese with English abstract)

WEI Q H, 1975. Regional geological survey report of the Qianjiang sheet (1: 200, 000) (Report No. 107)[M]. Chengdu: Sichuan Bureau of Geology. (in Chinese)

XU C, XU X W, SHEN L L, et al., 2014. Inventory of landslides triggered by the 2014 M_S6.5 Ludian earthquake and its implications on several earthquake parameters[J]. Seismology and Geology, 36(4): 1186-1203. (in Chinese with English abstract)

XU C, 2015. Utilizing coseismic landslides to analyze the source and rupturing process of the 2014 Ludian earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 23(4): 755-759. (in Chinese with English abstract)

YIN G Y, ZHANG H, GONG L W, et al., 2024. Seismic and geological evidence of hidden faults in the Yinpan reservoir area based on a dense seismic array[J]. Science China Earth Sciences, 67(7): 2401-2407.

YIN Z Q, XU Y Q, CHEN H Q, et al., 2016. The development and distribution characteristics of geohazards induced by august 3, 2014 Ludian earthquake and comparison with Jinggu and Yingjiang earthquakes[J]. Acta Geologica Sinica, 90(6): 1086-1097. (in Chinese with English abstract)

ZHANG S S, HU X L, ZHANG G C, et al., 2024. Formation and catastrophic evolution of giant landslides in the alpine canyon area of Western China[J]. Journal of Geomechanics, 30(5): 795-810. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Y Q, LI X, XIE Y Q, et al., 2016. Analysis on seismotectonic background and earthquake hazard characteristic in Zhaotong, Yunnan: taking Ludian M_S6.5 earthquake and Yiliang M_S5.7、5.6 earthquake as examples[J]. Journal of Seismological Research, 39(2): 270-278. (in Chinese with English abstract)

ZENG, MA Z G, ZHAO C, et al., 2023. Multi-Source Remote Sensing Recognition of Reactivation Characteristics of An Ancient Landslide Group at Taipingqiao in the Dadu River Catchment, Eastern Tibetan Plateau[J]. Geoscience, 37(04): 994-1003.

ZHOU Q, WU G, 2015. Seismic landslides and seismogenic structure of the 2014 Ludian M_S6.5 earthquake[J]. Seismology and Geology, 37(1): 269-278. (in Chinese with English abstract)

ZHOU X, ZHOU Q, GAO S P, 2018. Investigation to landslides triggered by the 1856 Qianjiang-Xianfeng (Daluba) earthquake and their generation mechanisms[J]. Seismology and Geology, 40(2): 410-425. (in Chinese

with English abstract)

ZHOU X, ZHOU Q, GAO S P, et al., 2020. Restoration of the original topography of the Xiaonanhai landslide in Chongqing and calculation of its volume[J]. Seismology and Geology, 42(4): 936-954. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

丁仁杰, 李克昌, 2004. 重庆地震研究[M]. 北京: 地震出版社.

高云鹏, 刘静, 韩龙飞, 等, 2023. 古地震事件震级或强度大小限定的讨论[J]. 地质力学学报, 29(5): 704-719.

龚丽文, 邓志辉, 陈丽娟, 等, 2019. 基于台址构造环境的有限元建模分析: 以黔江台为例[J]. 地震学报, 41(1): 80-91.

龚丽文, 陈丽娟, 郭卫英, 等, 2021. 奉节钻孔应变前兆异常机理分析: 区域应力场应力传递的结果[J]. 地震工程学报, 43(5): 1087-1094, 1102.

和海霞, 李素菊, 刘明, 等, 2016. 云南鲁甸6.5级地震灾区滑坡分布特征研判分析[J]. 灾害学, 31(1): 92-95.

黄青松, 2014. 小南海地震滑坡的成因机制及动力学特性研究[D]. 成都: 成都理工大学.

李翠平, 唐茂云, 郭卫英, 等, 2019. 2017年11月23日重庆武隆M_S5.0地震序列重定位及发震断层分析[J]. 地震地质, 41(3): 603-618.

李伦炯, 1997. 川黔湘毗邻区的新构造运动[J]. 四川地质学报, 17(2): 110-114.

刘锁旺, 丁忠孝, 张俊山, 1981. 1856年湖北咸丰县大路坝地震考察[J]. 地壳形变与地震(2): 69-81.

刘玉亮, 2009. 重庆黔江地区第四纪构造活动与地震地质研究[D]. 广州: 中山大学.

卢永坤, 张建国, 宋立军, 等, 2014. 2014年云南鲁甸6.5级地震烈度分布与房屋震害特征[J]. 地震研究, 37(4): 549-557.

秦娟, 王赞军, 王宏超, 等, 2018. 关于1856年黔江-咸丰地震震中烈度与震级的探讨[J]. 中国地震, 34(3): 551-564.

邱振东, 郭长宝, 吴瑞安, 等. 金沙江上游沙丁麦大型古滑坡发育特征与稳定性评价[J]. 现代地质, 2024a, 38(02): 451-463.

邱振东, 郭长宝, 杨志华, 等, 2024b. 基于微动探测的四川德达古滑坡空间结构特征与形成机理研究[J]. 地质力学学报, 30(6): 906-920.

申通, 王运生, 吴龙科, 2014. 重庆小南海滑坡形成机制离散元模拟分析[J]. 岩土力学, 35(S2): 667-675.

孙东, 覃亮, 蒙明辉, 等, 2024. 2022年6月10日四川马尔康M_S6.0震群同震地质灾害发育特征及其控制因素分析[J]. 地质力学学报, 30(3): 443-461.

王金鹏, 李渝生, 张超, 2016. 软岩区低强度地震诱发大规模滑坡的机理: 以重庆小南海地震滑坡为例[J]. 山地学报, 34(2): 200-207.

王赞军, 秦娟, 王宏超, 等, 2018. 从黔江历史地震认识黔江断裂带活动性[J]. 四川地震(2): 5-12.

王赞军, 秦娟, 李翠平, 等, 2019. 1856年重庆小南海地震地质灾害成因探讨[J]. 地震工程学报, 41(3): 813-822.

韦清海, 1975. 黔江幅1: 20万区域地质调查报告[R]. 成都: 四川省地质局.

许冲, 徐锡伟, 沈玲玲, 等, 2014. 2014年鲁甸M_S6.5地震触发滑坡编录及其对一些地震参数的指示[J]. 地震地质, 36(4): 1186-1203.

许冲, 2015. 利用同震滑坡分析2014年鲁甸地震震源性质与破裂过程[J]. 工程地质学报, 23(4): 755-759.

殷志强, 徐永强, 陈红旗, 等, 2016. 2014年云南鲁甸地震触发地质灾害发育分布规律及与景谷、盈江地震对比研究[J]. 地质学报, 90(6): 1086-1097.

张世殊, 胡新丽, 章广成, 等, 2024. 西部高山峡谷区重大滑坡成生规律及灾变演化机理研究进展[J]. 地质力学学报, 30(5): 795-810.

张彦琪, 李西, 谢英情, 等, 2016. 以鲁甸地震和彝良地震为例分析云南昭通地质构造与地震灾害特点[J]. 地震研究, 39(2): 270-278.

曾帅, 马志刚, 赵聪, 等, 2023. 青藏高原东部大渡河流域太平桥乡古滑坡群复活特征多源遥感识别[J]. 现代地质, 37(04): 994-1003.

周庆, 吴果, 2015. 鲁甸6.5级地震崩滑地质灾害分布与成因探讨[J]. 地震地质, 37(1): 269-278.

周鑫, 周庆, 高帅坡, 2018. 1856年黔江咸丰地震(大路坝地震)崩滑体调查及其形成机制[J]. 地震地质, 40(2): 410-425.

周鑫, 周庆, 高帅坡, 等, 2020. 重庆小南海滑坡原始地形恢复及滑坡体体积计算[J]. 地震地质, 42(4): 936-954.