

地震成因软沉积物变形记录的 地震强度研究进展

钟宁^{1,2)},蒋汉朝³⁾,李海兵⁴⁾,苏德辰⁴⁾,徐红艳³⁾,梁莲姬⁵⁾



www.
geojournals.cn/georev

- 1) 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室,中国地质科学院地质力学研究所,北京,100081;
2) 中国地质调查局新构造与地壳稳定性研究中心,北京,100081;
3) 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;
4) 深地动力学自然资源部重点实验室,中国地质科学院地质研究所,北京,100037;
5) 北京工业大学建筑工程学院,北京,100124

内容提要:确定地震震级对中长期地震预报、震后应急救援和地震危险性评价具有重要意义。古地震学是研究地质记录中的地震事件,特别是它们的位置、时间和震级大小。然而,传统由地表破裂参数确定的古地震震级仍存在不确定性(大多数地震事件不会导致地表破裂,或位移小于0.3 m),尤其是由湖泊沉积记录的古地震事件。为了解决未发现明显位错地震震级问题,本文依据软沉积物变形构造的类型和形式,对确定地震震级/强度的方法(经验估算、最大液化距离、扰动层厚度、软沉积物变形类型,经验公式,快速沉积砂层厚度)进行总结和讨论,并分析其理论基础、优缺点、误差大小、适用性、存在问题等。并以中东死海盆地利桑组晚更新世湖相沉积中的震积岩(混杂层)和岷江上游萝卜寨晚第四纪湖相沉积中地震成因的液化底劈为例,利用上述6种方法推断,其代表的震级分别为M5.5~6.5和M6.0~7.0,进一步证实了前人的研究结果。这6种方法的结合,为确定地震震级/强度,特别是湖泊沉积中的地震事件提供了一种新的、相对便捷的方法。该研究可为基于地表破裂参数确定的古地震震级提供可靠的参考,为更好地认识构造活跃地区的地震活动性和危险性提供数据支持。

关键词:软沉积物变形;地震相关沉积;液化底劈;地震强度;古地震

地震是地球动力作用的表现,它是地球内部结构失去平衡,应力突然释放并产生巨大能量的灾变事件。强烈的破坏性地震不仅引起地表位错、破裂和裂隙、构造隆升或沉降、大量的滑坡崩塌和尘暴,场地的液化、海平面突然变化及海啸,还导致地下水位变化、水文异常、河流变迁、生态变化,以及人类的生命和财产损失等(Michetti et al., 2007; Reicherter et al., 2009)(图1)。震级越强,震中附近的破坏性和毁灭性越大,对自然、社会和人类生存环境的影响也越大。对于强烈地震($M \geq 7.5$)尤为显著,例如1999年台湾Ms7.6集集地震(Chang Muhsiusng et al., 2012)和2008年汶川Ms8.0地震(Liu-Zeng Jing et al., 2012),均造成了重大人员伤亡和财产损失。因此,地震震级/强度的确定对于中长期地震预报、震后应急救援和地震危险性评估具有重要意义。可

见,建立一个较为完整的和新颖的地震危险性评价方法具有重要的理论和现实意义。

古地震学是研究地质记录中的地震事件,特别是它们的位置、时间和震级,分为古液化和地貌瞬时变形的研究。古地震学中的古液化研究侧重于软沉积物变形构造(SSDS)和液化引起的地表破坏等(Mccalpin and Nelson, 1996; Michetti et al., 2007)。传统古地震震级确定主要基于矩震级的经验关系,包括地表破裂长度、破裂面积,以及同震事件的最大或者平均位移等(Wells and Coppersmith, 1994; 邓起东等, 2004)。尽管这些方法受到了广泛的关注并取得了一定的成果,但仍然存在三个方面的问题。首先是同震位错量未达到地表或小于0.3 m($M=6\sim6.8$)时,无法确定其地震活动性(冉勇康和邓起东, 1999)。其次,通过探槽开挖研究古地震并不总

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:42177184,41807298,41572346)、中国博士后基金资助项目(编号:2019M650788)和中国地质调查局项目(编号:DD20190319,DD20190059)的成果。

收稿日期:2021-04-04;改回日期:2021-10-13;网络首发:2021-10-13;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.10.085

作者简介:钟宁,男,1986年生,博士,副研究员,构造地质学专业,研究方向主要为活动构造和灾变沉积学;Email: zdn2018@126.com。

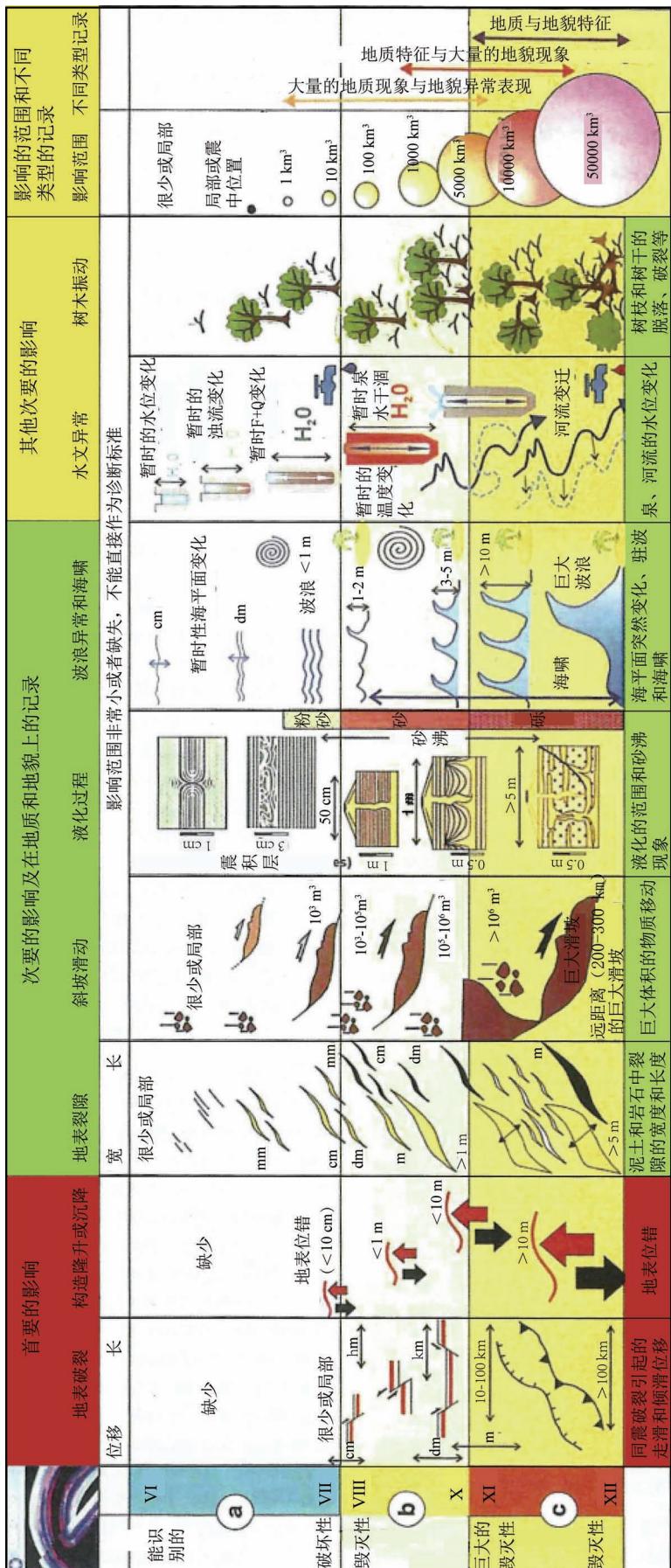


图1 地震对环境影响的主要特征和强度、范围总结表（据Reichert et al., 2009修改）
Fig. 1 The ESI (Environmental Seismic Intensity) 2007 chart summarizes the main features and dimensions of the more relevant Earthquake Environmental Effects
(Modified from Reichert et al., 2009)

是有效的,因为多数地震不会造成明显的地表破裂。例如,2013 庐山 $M_s 7.0$ 地震(Chen Lichun et al., 2014),2015 年皮山 $M_{s6.4}$ 地震(Li Tao et al., 2016),2015 年尼泊尔 $M_{s8.1}$ 地震(刘刚等,2015)和 2017 年九寨沟 $M_{s7.0}$ 地震(徐锡伟等,2017),震后应急考察中都没有发现明显的同震地表破裂,但这些地震均对建筑物造成破坏,还产生了大量张性地裂缝、滑坡、基岩崩塌和液化现象。最后,关于多大地震可以产生地表破裂还存在很大争议。唐茂云等(2015)分析了 1950~2014 年全球范围内有明确记录产生地表破裂的 56 个中小强度震例,发现伴有地表破裂地震的震级下限比 $M_{6\frac{1}{2}}$ 要小,可能在 $M_{5.0}$ 级左右,极端情况下震级可以低至 $M_{3.6}$ 级(例如 1966 年的 Lompoc 地震,震源深度只有 1.1 km)。通过探槽研究古地震仅能识别少数的几次古地震事件,时间尺度也较短。由于缺乏地表破裂和明显的位错,沉积记录(如湖泊沉积)的古地震震级已成为研究的热点问题。因此,建立一个新的古地震震级方法是古地震学研究的一个重要课题。

除产生地表破裂外,地震作用($M \geq 4.5$)常导致饱含水未固结的沉积物产生液化和(或)流化作用(Allen, 1986),从而形成不同类型的软沉积物变形构造(SSDS)。沉积记录或探槽中的软沉积物变形也常作为构造活动区域古地震发生的关键性证据之一(Sims, 1973; 乔秀夫, 1996; Moretti et al., 1999; 杜远生和韩欣, 2000; 田洪水等, 2003; 殷秀兰等, 2005; 乔秀夫

等, 2006; 黄宏伟等, 2007; Moretti and Sabato, 2007; 王昌勇等, 2008; 王约等, 2009; Jiang Hanchao et al., 2014, 2016, 2017; Tian Hongshui et al., 2016; van Loon et al., 2016; 钟宁等, 2017, 2020a; Liang Lianji et al., 2018; Zhong Ning et al., 2019; 丁孝忠等, 2021)。早在 40 年前, 研究人员就开始分析和讨论 SSDS 与地震震级/强度的关系, 主要的方法有经验估算法 (Seed and Idriss, 1971; Scott and Price, 1988)、最大液化距离法 (Kuribayashi and Tatsuoka, 1975; 乔秀夫等, 2017)、扰动层厚度法 (Hibsch et al., 1997; Rodriguez-Pascua et al., 2003)、经验公式法 (Rodriguez-Pascua et al., 2003)、变形类型法 (Rodriguez-Pascua et al., 2000; Neuwerth et al., 2006; 钟宁等, 2017)、快速沉积砂层厚度法 (Moernaut et al., 2014; 钟宁等, 2020b) 等。本文的目的是:①总结利用 SSDS 确定地震强度的方法;②分析各种方法的适用性和优缺点;③发展一种相对便捷的软沉积物变形与地震震级/强度方法。本文的研究成果可为更好地认识区域地震危险性及其相关地质灾害提供了科学依据。

1 确定古地震震级的方法

基于 SSDS 类型和样式确定地震震级/强度的方法有经验估算法、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。其中最常用的方法是最大液化距离法和变形类型法。经验估计法和扰动层厚度法分别基于液化强度和 SSDS 变形幅度与地震强度的关系。这两种方法只能提供地震震级/强度的下限, 使用较少。经验公式和累计砂层厚度法分别以软沉积物变形层厚度及其与上覆砂层厚度与震级的关系。由于 SSDS 变形机制和湖泊沉积过程的复杂性, 该方法仍在探索中。而且对变形层厚度 ($< 15 \text{ cm}$) 和堆积砂层厚度 ($< 50 \text{ cm}$) 也有严格要求, 限制了其使用范围。下面, 我们将逐个分析每种方法的适用性和优缺点。

1.1 经验估算

在构造活动区域, 断层的活动常导致地震的发生, 而地震作用过程中地壳颤动引起的各种作用力 (振动力、剪切力、挤压和拉张力等) 使得饱含水未固结的沉积物发生液化或(和)流化作用, 形成复杂多变的各种变形体。起初一些研究者认为 $M 2.0 \sim 3.0$ 的地震就能够导致液化作用 (Seed and Idriss, 1971)。随后, Scott 和 Price (1988) 认为地震小于 $M 5.0$ 级时, 距离震中 4 km 以外的地区, 不能引起沉

积物的液化;或者震级为 7 级时, 地震影响的液化距离不超过 20 km。Valera 等 (1994) 认为最易受影响的砾石沉积中, 诱发液化现象的震级约为 $M 7.0$ 级 (例如, 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震中, 砾石土的液化占所有液化点的 80% ~ 85%, Cao Zhenzhong et al., 2010), 而砂土液化所需震级约为 $M 5.5$ 。Marco 和 Agnon (1995) 认为能够触发液化的震级应高于 $M 4.5$ 级, 这也符合科学统计的结果 (Kuribayashi and Tatsuoka, 1975; Youd, 1977)。多数研究者 (Youd, 1977; Allen, 1986; Scott and Price, 1988; Galli, 2000) 认为地震震级 $M \geq 5.0$ 级时, 近地表、饱含水, 半固结到松散的沉积物中才能产生明显的液化现象。而震级 $M < 5.0$ 级时, 地震没有足够的持续时间(或动能)引起沉积物液化。

VI 级地震烈度 (MMI , 修正麦加利地震烈度) 区是小尺度 SSDS (如褶皱、假结核、扰动层理和横卧褶皱) 广泛发育的下限值 (Sims, 1975)。尽管在 V ~ VI 级地震烈度可以发现液化现象, Keefer (1984) 认为导致液化变形的最低烈度是 $MMI > VII$ 。Monecke 等 (2004) 发现, 对于湖泊沉积物可能需要 $MMI > VI \sim VII$, 才会受到影响, 或发生液化现象。当 $M = 5.0 \sim 5.5$ 时, 地震会产生小规模的 SSDS, 如扰动和扭曲变形, 以及液化变形 (如碟状构造) (Monecke et al., 2004, 2006)。当地震引起饱含水沉积物液化和/或流化, 形成各种类型的 SSDS 时, 其应 $M \geq 5.0$ 或 $MMI \geq VI$ 。经验估算法的优点是方便、快速和适用范围广。缺点是精度有限, 只提供地震震级/强度下限值。因此, 经验估算法仅能作为一种初步的地震震级/强度估计方法。

1.2 最大液化距离

地震造成的沙土液化现象与地震的震级和震源深度具有明显的相关性, 在其他条件相同的情况下, 震级越大, 地震造成的液化分布范围越广。古地震震级是参考现代地震与历史地震触发的沙土液化记录统计给出的, 关键是要确定与震中最远的沙土液化的位置。因此在野外区域地质调查或古地震专题研究中要尽量找寻和确定与发震断裂最远的液化变形位置。Kuribayashi 和 Tatsuoka (1975) 根据 1872 ~ 1968 年以来日本境内 44 次 $M_s > 5.3$ 的地震资料, 绘制了日本地震与液化分布图, 发现最远液化距离 (R) 与地震震级 (M) 之间存在明显的对应关系, 首次绘制了 $R-M$ 关系图 (图 2)。刘颖和谢君裴 (1984) 统计了中国 1955 年前近 900 年间 30 余次 $M 5.0$ 级以上的地震资料, 绘制了中国的液化现象与

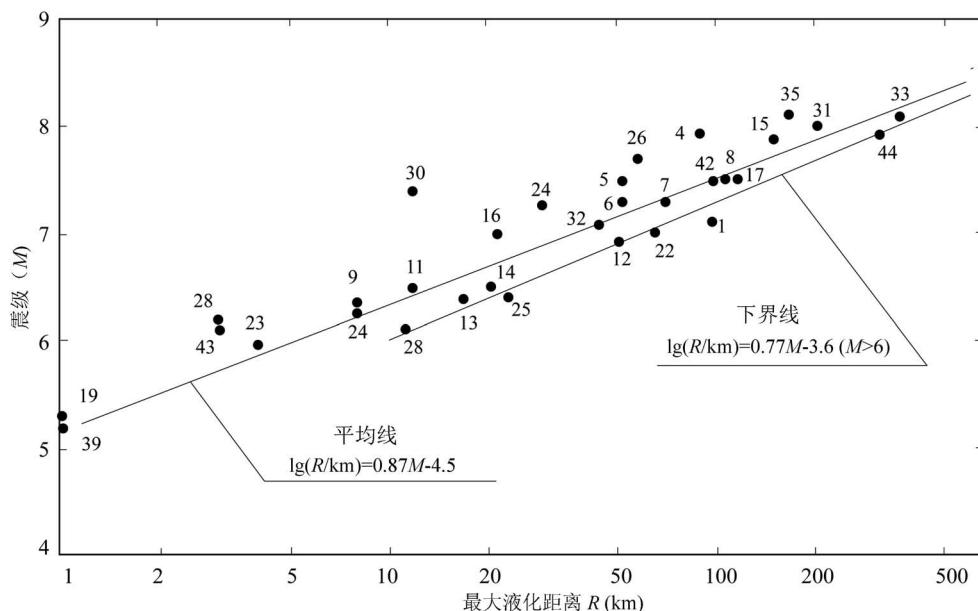


图 2 地震震级与最远地表液化点关系图 (Kuribayashi and Tatsuoka, 1975)

Fig. 2 Relationship between the maximum epicentral distance of liquefied sites R and magnitude M (Kuribayashi and Tatsuoka, 1975)

图中的数字为地震编号

The number in the figure are earthquake No.

地震震级和最大震中距离的关系图。Obermeier (1996, 1998) 和 Obermeier 等 (2002) 在多篇文章和报告中对 Ambraseys (1988) 的结果进行了修正补充。乔秀夫等 (2017) 制作了综合性的最大液化距离与地震震级关系图 (图 3), 表明地震震中与地表最远液化点之间具有明显的线性关系。因此, 可以根据野外确定的液化点与地震震中(或发震断层)之间的距离, 利用现有的 R—M 图件, 反推地震的震级。

在野外往往很难确定所研究的液化变形是否是距震中最远的, 但仍可用图 3 来推测古地震震级, 因为其给出了一个震级由小到大的合理变化范围。古地震由古发震断裂触发软沉积物变形(包括液化变形), 只有确定古发震断裂方能应用图 3。与现代地震震中相同, 古地震震中(宏观与微观震中)也应沿断裂分布。当不知道古地震震中时, 可以将最远的液化变形记录与发震断裂垂直的直线距离投影至图 3 中, 得出古地震震级。当然, 这里给出的古地震震级只是准定量的, 不可能像现代地震震级的确定。

1.3 扰动层厚度

地震震级越大, 其释放能量越大, 破坏性也越强, 对震中范围内沉积物扰动程度也越强。关于软

沉积物变形构造的厚度与地震强度关系, 已有学者做了一些尝试。Sims (1973) 通过加利福尼亚州圣费尔南多 Van Norman 人工湖中记录的软沉积变形(负载和卷曲)的研究, 在考虑距震中位置情况下, 分别获得了 1930 年 M5.2、1952 年 M7.7 和 1971 年 M6.5 等 3 次地震对湖相沉积物扰动的烈度为 VI、VII 和 VIII~IX 级, 沉积物扰动厚度为厘米到毫米级。

Guiraud 和 Plaziat (1993) 测量了尼日利亚东北部 Beune 盆地下白垩统 Bima 砂岩组震积岩的变形强度。

Hibscher 等 (1997) 比较

了厄瓜多尔基多盆地北部全新世河湖相沉积中同震软沉积物变形层厚度(扰动或卷曲变形层)和历史地震强度分布, 提出了一种新的古地震强度估算方法, 该方法对 VI 以上的地震强度区具有较好的约束。图 4 为基多的古地震强度与同震变形层厚度的关系。考虑到沉积学特征对地层厚度的影响, 对于相似岩性(粒度、分选、岩石学、压实度等)的地层, 地震强度越强, 扰动层越厚。VI 级强度地震对应扰动层厚度为 0~8 cm; XI 级强度地震对应扰动层厚度为 27~53 cm。值得注意的是, 扰动层产生于水/沉积物界面, 并具有以下特征: 卷曲变形和破碎层的厚度与滑塌作用无关; 变形层与震后的水平砂层沉积具有相同的岩性组合 (Hibscher et al., 1997)。由于统计资料较少, 缺乏实验数据验证, 且局限于一个地点的研究结果, 从而限制了其使用范围。此外, 该方法并未考虑地震波(振幅和传播时间)对沉积层厚度的影响 (李留藏等, 1991)。在一个特定的沉积序列中, 地震波可使同一层(或一组)沉积物变形, 而与震级无关。强震也可能仅导致薄层状沉积层变形, 而弱震也可能使厚层状地层变形, 需要进一步的研究。

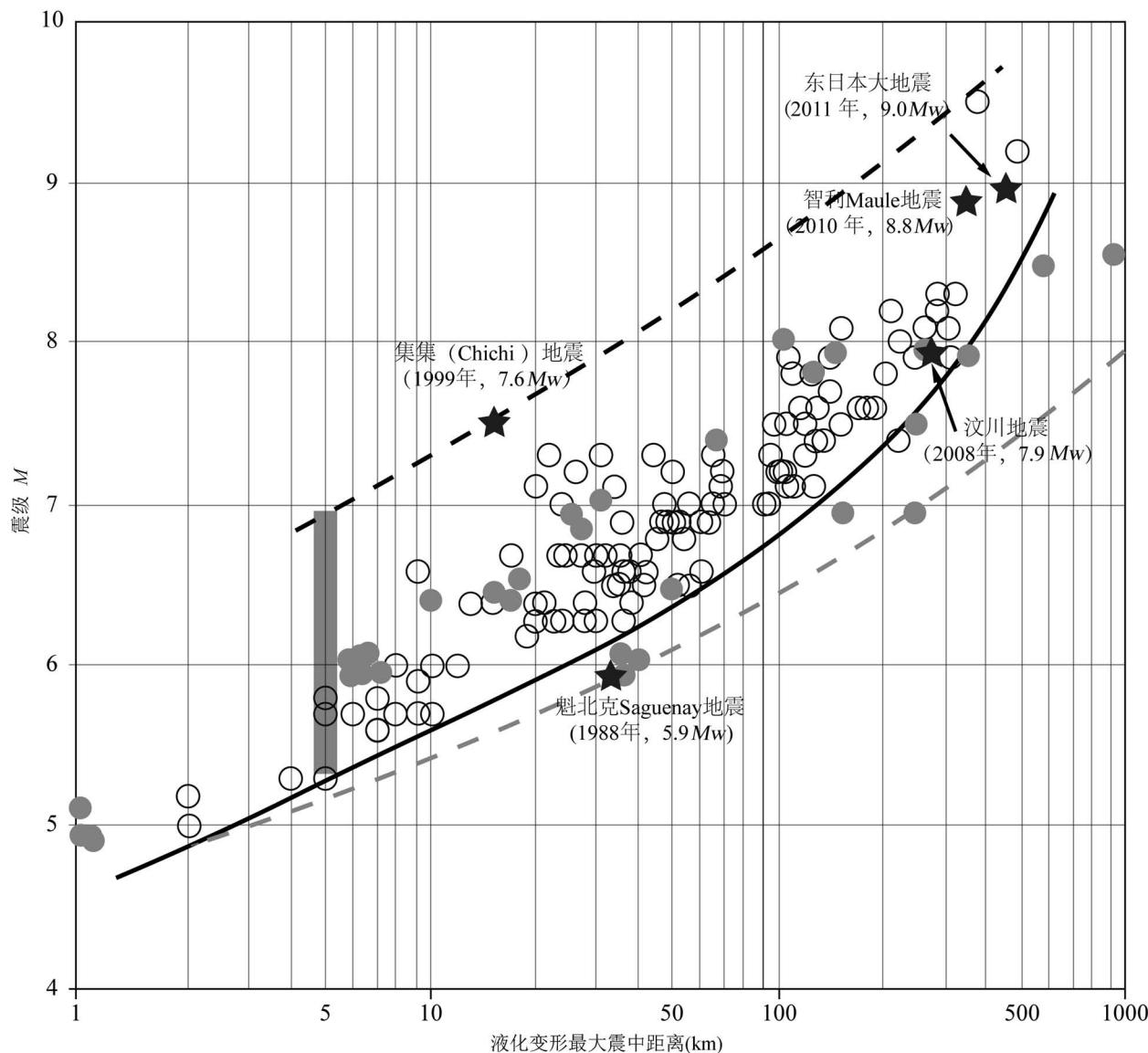


图 3 液化变形最大震中距(R)与地震震级(M)关系图(据乔秀夫等,2017 修改)

Fig. 3 Relationship of magnitude(M) and maximum liquefied deformation distance(R)

图中地震震级主要为矩震级,中国的地震用灰色实心圆圈表示,除汶川地震外,均为 M_s 震级。

黑色虚线代表最大的地震震级,灰色虚线代表最小地震震级

The magnitude of the earthquakes in the figure is mainly moment magnitude. The earthquakes in China are represented by gray solid circles. Except for the Wenchuan earthquake, they are all M_s magnitude. The black dotted line represents the largest earthquake magnitude and the gray dotted line represents the smallest earthquake magnitude.

1.4 经验公式

“ b ”值是由古登堡和里克特提出的大小地震之间的重要统计关系,通常采用最小二乘法对 $\lg N = a - bM$ 关系式求解 b 值,主要用于衡量某地区地震活动水平的标志,是地震危险性和地震预报分析的基础参数(易桂喜等,2013)。Rodriguez-Pascua 等(2003)发现西班牙中新世的 Cenajo、Hijar 和 Elche de la Sierra 盆地湖相沉积中 73 个震积岩的频率—

厚度关系服从指数关系,且求解的“ b ”值(0.86 ± 0.06)与利用震级与频度关系求解的 b 值(0.86 ± 0.08)相同。另外,他们又详细对比了西班牙现代和近代地震作用形成的 SSDS 与古代地震作用形成的 SSDS,发现两者非常相似。然后,建立了地震相关沉积层(液化层和碎屑层)厚度与地震震级之间的经验关系 $M = T/3 + 3.83$,其中 T 是地震相关沉积物的厚度(单位为厘米), M 为震级。完整的地震相

关沉积序列中,可以分 3 个具有不同变形类型的变形层:顶部的流化层、中间的韧性—脆性变形层(破裂和破碎纹层)和底层典型的韧性变形层(褶皱纹层);顶层之上覆盖有未变形的纹层(Rodríguez-Pascua et al., 2003)(图 5)。基于野外实践和文献阅读,地震扰动层必须是液化或流化的均一层、碎屑层(Marco and Agnon, 1995, 2005),或者破碎层(Rana et al., 2013),有变形强弱(韧性到脆性)和粒序变化的变形层。

Rodríguez-Pascua 等(2003)对地震相关沉积层的厚度并未提出明确的判断标准,因此限制了其应用。Mugnier 等(2011)发现岩性、粒度、沉积环境和地震加速度都会影响震积岩的厚度,且一次地震的振动次数和地震复发周期也会影响变形层的厚度。数值模拟表明:变形强度随着加速度的

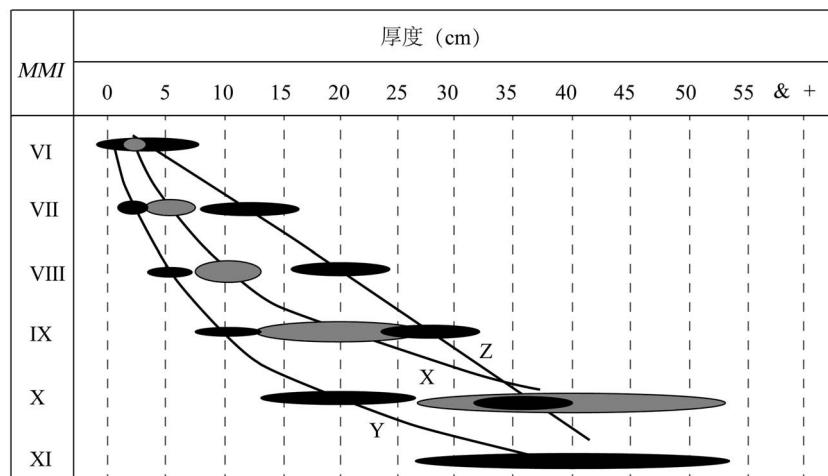


图 4 地震烈度与水平扰动层厚度关系图(Hibsch et al., 1997)

Fig. 4 Scales of relations seismic intensity—thickness of contorted bedding horizon(Hibsch et al., 1997)

增加和变形层厚度的减小而增大;地震持续时间会对变形构造的几何形态产生影响,但不会影响变形的幅度(Wetzler et al., 2010)。Mugnier 等(2011)认为地震相关沉积层厚度与地震强度之间的关系非常

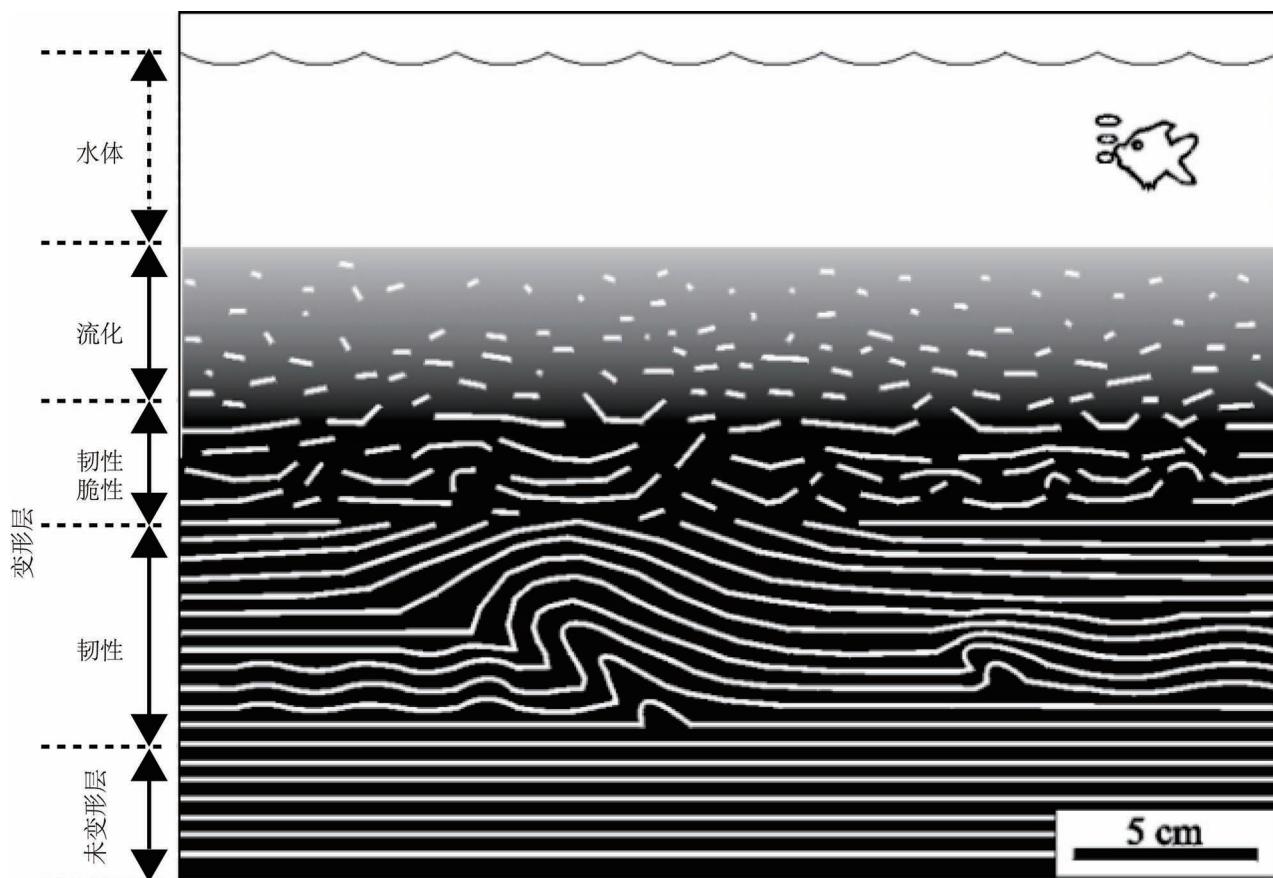


图 5 西班牙埃尔切—德拉谢拉盆地中新世湖相沉积中典型的混杂层(Rodríguez-Pascua et al., 2003)

Fig. 5 Typical mixed layer in Miocene lacustrine sediments from Elche de la Sierra basin, Spain(Rodríguez-Pascua et al., 2003)

复杂, 可能不是单一的线性关系。此外, 大量实际资料表明, 震级与地震频度的对数并不严格呈线性关系(傅征祥, 1997), 需要对 b 值进行稳健估计处理和置信区间的研究。因此, 采用上述经验公式, 必须非常小心。

1.5 软沉积物变形类型

在饱含水松散的沉积物中, 不同地震震级和变形机制(液化、流化、触变等)会形成不同类型的SSDS。例如, 重力和液化作用可以逐渐形成负载、火焰、球枕构造和枕状层:①上覆颗粒较粗, 密度大的物质沉入下伏密度低的、颗粒较细纹泥中, 形成简单负载构造。②随着变形构造的继续发展, 下伏细颗粒物质开始向上挤入, 发生垂向位移形成悬垂负载、挤入的火焰构造。③下伏的地层在受到上覆地层的超覆压力下, 发生水平剪应力, 使得细颗粒的纹泥发生卷曲或褶皱变形(Suter et al., 2011)。④随着液化及流化的进一步作用, 粗颗粒物质完全掉入下伏低密度层中形成脱落负载构造、假结核(Anketell et al., 1970)、球—枕构造(Owen, 1987)等, 并最终形成枕状层(乔秀夫和李海兵, 2008)。Sims(1973)认为由负载构造演变成假结核可能需要更大的震级, 或长时间的地震震动。在同等条件下(相同的沉积环境), 形成球—枕构造所需的震级/强度应大于形成负载和火焰构造所需要的震级/强度; 而形成枕状层所需的震级/强度应大于生成球—枕构造所需的震级/强度(Owen, 1987)。

Rodriguez-Pascua 等(2000)总结出软沉积物变形类型与地震震级的关系(图 6), 其中液化混合层, 假结核、球—枕构造和液化脉所对应的震级分别为 $M5.5 \sim 6.5$, $M6.5 \sim 8$, $M6.0 \sim 8.0$, $M5.0 \sim 8.0$ 。Berra 和 Felletti(2011)结合前人研究的结果, 认为地震成因所导致的液化或流化作用形成的球—枕构造和塑性挤入构造, 其对应的震级为 $M6.0 \sim 8.0$ 和 $M5.0 \sim 6.0$ 级。Qiao Xiufu 和 Guo Xianpu(2013)依据新疆西南天山下侏罗统的液化变形(液化滴状体与液化均一层)与震中距离关系(图 3), 认为其古地震震级为 $M6.5 \sim 7.0$ 级, 与液化变形层同期有大量的负载、球—枕构造记录。龙门山地区以及晚三叠世的汶川—茂县断裂有关的液化变形与球—枕构造, 采用液化变形最大震中距与地震震级关系获得的古地震震级为 $M6.6 \sim 7.2$ 级(乔秀夫等, 2012)。钟宁等(2017)在研究现代湖沼环境软沉积物变形中, 总结出负载、球—枕构造若为地震成因时, 其代表的震级为 $M6.0 \sim 7.0$ 级。因此, 在确定软沉积物变形为地

震成因时, 通过不同沉积环境类似的软沉积物变形对比和分析研究, 有望获得较为可信的古地震震级大小。

1.6 快速沉积砂层厚度法

强烈地震($M \geq 5.0$)不仅会导致饱含水未固结沉积物液化或流化作用, 形成不同类型的脆性和(或)韧性软沉积物变形, 还会产生大量的碎屑(滑坡、灰尘等)物质, 通过风和(或)河流迅速搬运到湖泊中沉积, 形成一系列地震相关沉积(Howarth et al., 2012; Moernaut et al., 2014; Arche et al., 2019)。地震震动还会引发湖盆斜坡或湖泊岸坡沉积物的不稳定(Katz et al., 2009)和湖震(Beck, 2009; Avşar et al., 2014), 导致近端块体搬运(滑坡、崩塌、泥石流等)和远端的浊流沉积(地震浊积岩等)(Zhang Yongshuang et al., 2014)。当地震发生时, 首先会导致未固结的湖相沉积物形成软沉积物变形, 随后滑坡、粉尘等碎屑物质被搬运到湖泊中, 堆积到软沉积物变形层之上, 形成地震事件层(地震后快速沉积的砂层)(Jiang Hanchao et al., 2014, 2017; 钟宁等, 2020b)。进一步的研究发现, 青藏高原东缘理县湖泊沉积中软沉积物变形层上部均存在不同厚度的砂层(地震事件层), 这些软沉积物变形与粒度和磁化率记录显示出良好的一致性(Jiang Hanchao et al., 2016, 2017); 分别代表同震的变形层和震后快速沉积的砂层。Jiang Hanchao 等(2017)指出理县湖相沉积剖面中的粒度和磁化率反复出现突然变粗(增大)和向上缓慢变细(减小)趋势, 与区域频繁的地震活动导致陆源碎屑突然增加/减少有关。然而, 有些地震($M \geq 5.0/5.5$)并未导致湖泊中饱含水未固结沉积物变形, 这可能是由于它们与震中距离较远(Owen and Moretti, 2011)或湖泊沉积物的泥砂比例较高(Jiang Hanchao et al., 2017); 不过它们仍可能在湖泊上游汇水区范围内产生大量的碎屑物质, 并通过河流或风搬运到湖泊中沉积。早期研究者证实了软沉积物变形的扰动层或液化均一层厚度与地震震级或强度具有一定的正相关关系(Hibsch et al., 1997; Rodriguez Pascua et al., 2003)。那么, 地震事件层或者块体搬运沉积快速沉积的厚度(地震后快速沉积的砂层)与地震震级是否存在相关关系?

Keefer(1984)较早利用 1911~1980 年间全球范围内 40 次地震滑坡的资料对滑坡与地震参数定量关系进行了研究, 给出了地震诱发滑坡的最小震级为 $M4.0$ 级, 并绘制了地震滑坡影响面积与地震震级的统计曲线。后来, Rodriguez 等(1999)和 Xu

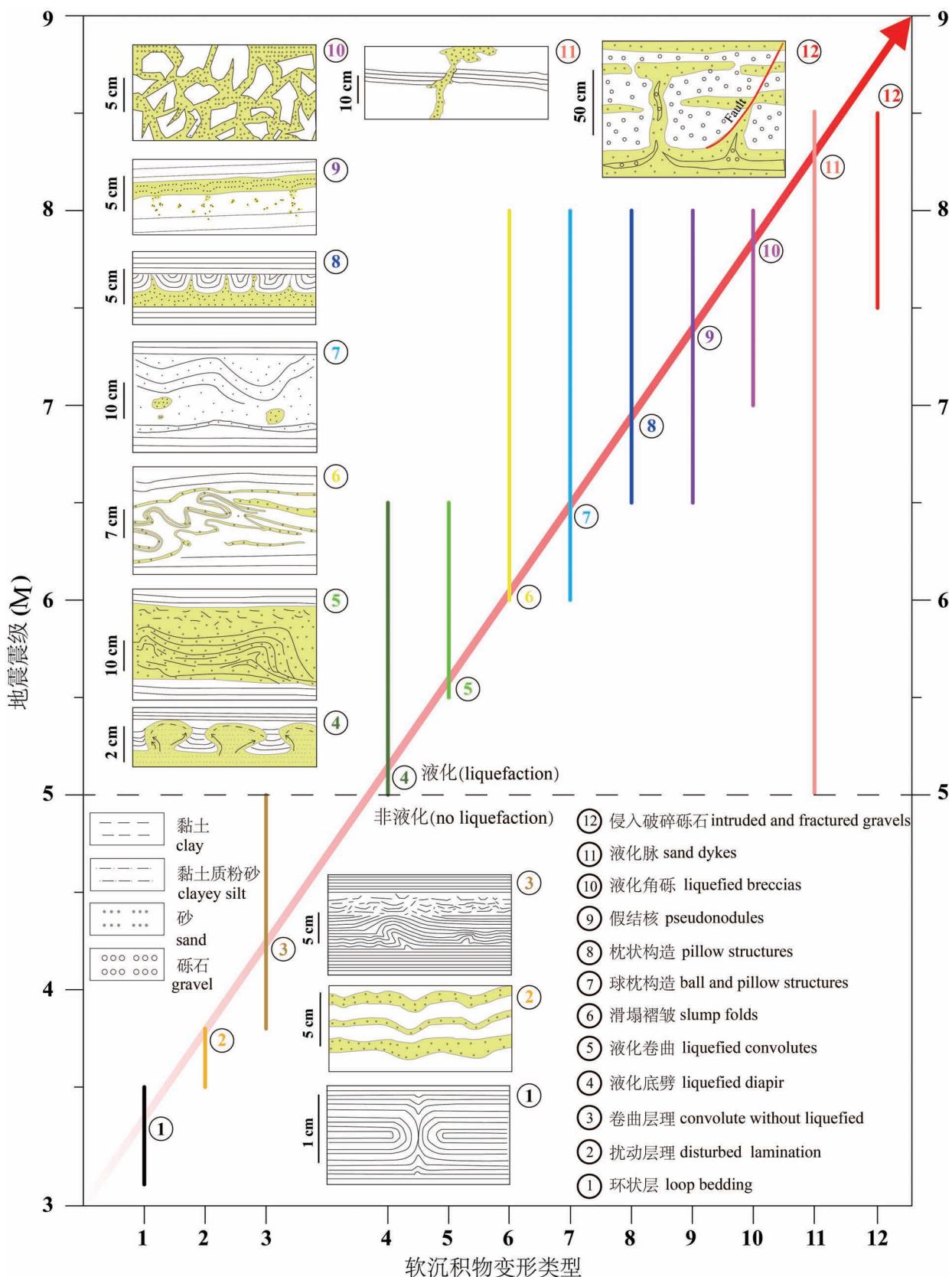


图 6 不同类型软沉积变形与古地震震级关系图(据 Rodriguez-Pascua et al. ,2000 修改)

Fig. 6 Summarized the different soft sediment deformation types with the relationship of the rank of earthquake magnitudes (Modified from Rodriguez-Pascua et al. ,2000)

Chong等(2014)又对其进行了补充和完善。Bommer和Rodríguez(2002)研究了中美洲地震引发的滑坡数据,并指出滑坡面积和地震震级的统计关系,可以应用到全球其他地区。Malamud等(2004)证实了Keefer(1984)的结果,并提出触发滑坡所需的最小地震震级为 $M=4.3\pm0.4$ 。在相同条件下,地震越大,滑坡面积和体积越大。一次强烈的地震可以诱发数以万计的山体滑坡,特别是在高山峡谷区(Xu Chong et al., 2014; Zhang Yongshuang et al., 2017)。

通过建立高分辨率全新世死海地震历史,Migowski等(2004)发现扰动层厚度与震级有较好的相关性。这种扰动层沉积类型被连续的扰动沉积构造所分隔,其沉积结构通常由文石的碎屑“漂浮”在粉砂质碎屑的基质中。此外,Moernaut等(2014)发现浊积岩的空间分布和厚度与地震强度有一定的相关性,可用于重建区域古地震强度。并建立了快速沉积浊积岩厚度与地震强度之间的线性关系。理论上讲,震级越大,产生的碎屑物质(滑坡、灰尘等)就越多,而搬运到附近水体中的碎屑物质就多,形成的积累砂层厚度越厚。当然,如沉积块体的重力失稳程度、结构参数、滑动面深度也是需要考虑的因素,特别是在水下湖盆或斜坡中。基于这种假设,钟

宁(2017)统计了公元181~2010年间法国、土耳其、新西兰、智利等32次地震导致流域内或其周围湖泊中块体搬运沉积的碎屑物质急剧增加,并堆积形成向上变细的砂层(地震事件层);并建立了震级与快速沉积的砂层厚度关系图(图7b)。统计资料显示,随着地震震级越大($M 4.0 \sim M 9.0$),快速沉积的砂层厚度($0.1 \sim 50 \text{ cm}$)越厚,并具有一定的正相关关系,协和度 $R^2 = 0.52$ 。当快速沉积砂层厚度为1cm,对应的震级为 $M 4.0 \sim M 6.0 (5.0 \pm 1.0)$;快速沉积砂层厚度为10cm,对应的震级为 $M 5.8 \sim M 8.4 (7.1 \pm 1.3)$ 。假设湖泊流域范围内或周围的滑坡等碎屑物质绝大多数是由地震触发所致,那么就可以利用地震事件层厚度,推测事件沉积时对应的地震强度。

考虑湖泊流域范围内滑坡、崩塌等碎屑物质剥露机制的复杂性,以及物源、地形、风力和水动力条件等因素对物质输运的影响,造成同一沉积环境中沉积物往往是由具有不同输运机制的组分组成。此外,湖泊沉积物的来源还可能受到极端天气事件(如暴雨、沙尘暴等)的影响。因此,我们建议在研究地震事件层及其厚度时,应通过端元分析方法(Weltje, 1997; 钟宁等, 2020b),识别出不同动力组分和沉积动力环境,厘定出沉积记录的构造事件

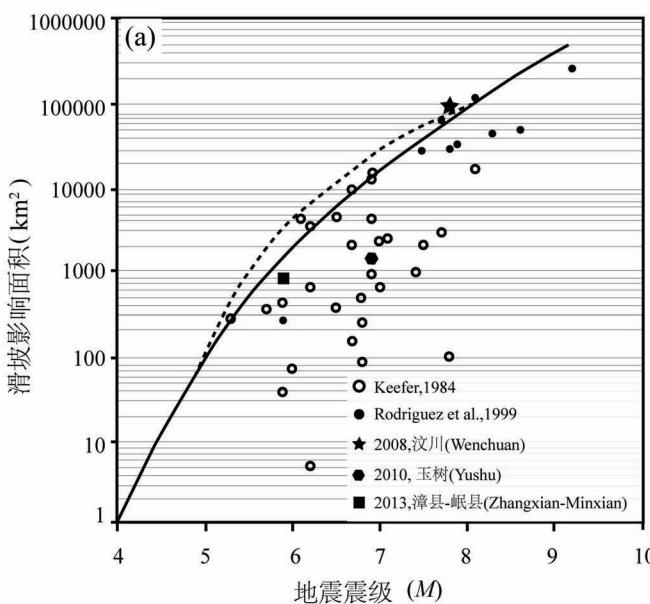
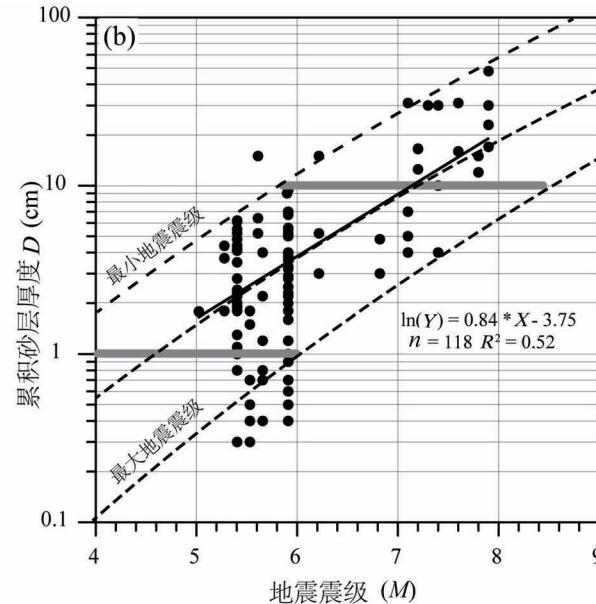


图7(a)滑坡面积与地震震级关系(据Keefer, 1984; Xu Chong et al., 2014; 李艳豪等, 2015整理);



(b) 快速沉积的砂层沉积厚度(D 单位为cm)与地震震级(M)关系(钟宁等, 2020b)

Fig. 7 (a) Area affected by landslides in earthquakes of different magnitudes (Modified from Keefer, 1984; Xu Chong et al., 2014; Li Yanhao et al., 2015&); (b) cumulative sand sediment thickness (D , unit is cm) in earthquakes of different magnitudes (M) (Zhong Ning et al., 2020b&)

(地震等)或气候事件,然后在利用快速沉积砂层厚度法确定地震震级。不可否认,这种利用快速沉积砂层法只是基于数据的统计结果,还需要更多的数据支持和检验。因此,累计砂层厚度法只能得到粗略的震级估计,还需要与其他确定地震震级方法进行对比验证。

2 实例分析和讨论

2.1 以色列利桑湖(死海)马萨达湖相沉积中破碎层及其震级

死海是一个由沿死海—约旦转换板块边界的转换拉张作用形成的活动沉降盆地。死海断层具有很强的地震活动性(Marco and Agnon, 1995, 2005; Klinger et al., 1999)。在过去~3 ka期间,沿死海断层曾发生了数十次 $M > 6$ 的地震(Ambraseys and Finkel, 1991; Ambraseys, 2009),最强两次地震发生在1995年的亚喀巴湾(最南端的死海), $Mw7.3$ (Klinger et al., 1999)和1927年杰里科山谷 $Mw6.2$ (Shapira et al., 1993)。Marco 和 Agnon(1995)在研究以色列利桑湖(死海)马萨达附近的晚更新世扇三角洲沉积时,识别出具有自碎屑、破碎混杂的季节性湖相纹层,认为是死海盆地的震积层。这些混杂的纹层是位于上下未扰动纹层之间的震间变形层(图8a),代表着一次强烈的地震事件($M \geq 5.5$)。为了进一步厘定上述混杂层所记录的古地震震级,我们采用上述6种软沉积物变形构造与地震震级/强度方法进行验证。首先,能够导致液化或流化作用的地震,其应 $M > 5.0$ 。研究剖面位于马萨达的同沉积活动断层旁(<5),利用液化变形最大震中距与地震震级(图3),获得其震级为 $M 5.2 \sim 7.0$ 。其次,研究剖面扰动层厚度约13 cm,采用扰动层厚度与地震强度关系(图4),获得地震烈度为Ⅶ~XI,震级大致在 $M 5.0 \sim 7.0$ 级;而液化均一层厚度约为9 cm,基于液化均一层与地震沉积关系($M = T/3 + 3.83$),获得的震级为 $M 6.83$ 。再次,利用软沉积物

变形类型与地震震级关系(图6),获得研究剖面混杂层(液化混合层)对应的震级为 $M 5.5 \sim 6.5$ 。最后,根据变形层上覆约2 cm厚的水平砂层,利用快速沉积的砂层厚度与震级关系(图7b),获得的震级为 $M 4.2 \sim 6.6$ 。结合上述6种确定地震震级/强度方法,死海地区以色列利桑湖马萨达附近晚更新世扇三角洲沉积记录中的混杂层所代表的古地震震级为 $M 5.5 \sim 6.5$ 。

2.2 岷江上游萝卜寨湖相沉积中液化底劈变形及其震级

岷江上游地处“南北向地震构造带”中段的北中部,受岷江断裂带、松坪沟断裂、虎牙断裂及龙门山逆冲推覆构造带的影响(Wang Ping et al., 2011)。区域地震频发,曾发生2017年九寨沟 $M 7.0$ 、2008年汶川 $M 8.0$ 、1976年松潘—平武 $M 7.2$ 、1933年叠溪 $M 7.5$ 等一系列强震,表明该地区具有较强的地震活动性。由于该区为高山峡谷地貌,缺少第四纪沉积,开挖探槽困难,古地震研究相对薄弱。2008年汶川地震和1933叠溪地震后,岷江上游形成一系列的滑坡堰塞湖(Xu Hongyan et al., 2015; 李艳豪等, 2015)。通过湖泊沉积中发育的软沉积物变形构造和高分辨率指标(粒度和磁化率等),研究人员识别出多个地震事件(Wang Ping et al., 2011; Jiang Hanchao et al., 2014, 2016; 钟宁等, 2020a, b)。钟宁(2019)在研究岷江断裂中南段晚第四纪活动性时,在岷江上游茂县萝卜寨湖相沉积剖面中识别出一层液化底劈变形,上覆和下伏均为未变形层(图8b)。另外,此剖面中也发现了地震成因的负载/火焰构造、微断层和球—枕构造等(图9),均为厘米级的变形构造,具有垂向的重复性和侧向的延展性,且与室内震动模拟实验结果非常相似,表现为地震触发的变形构造(钟宁等, 2017)。初步认为萝卜寨湖剖面的液化底劈为地震成因,虽然不能排除重力负载(Moretti and Sabato, 2007)和快速沉积(Lowe, 1975)的影响。考虑到萝卜寨液化

表1 利桑湖和萝卜寨中软沉积物变形构造所代表的地震震级

Table 1 Earthquake magnitudes inferred from Lake Lisan and Luobozhai soft-sediment deformation structures

研究位置	类型	经验估算法 M	最大液化距离		扰动层厚度		经验公式		变形类型	快速沉积砂层厚度		M
			距离 (km)	M	厚度 (cm)	烈度	厚度 (cm)	M		厚度 (cm)	M	
以色列利桑湖 萝卜寨	液化层或破碎层	>5	5~10	5.2~6.8	13	Ⅶ~XI	9	6.83	5.5~6.5	2	4.2~6.6	5.5~6.5
	液化底劈	>5	5~10	5.2~6.8	10	Ⅶ~XI			6.5~8.0	5	5.2~7.6	6~7

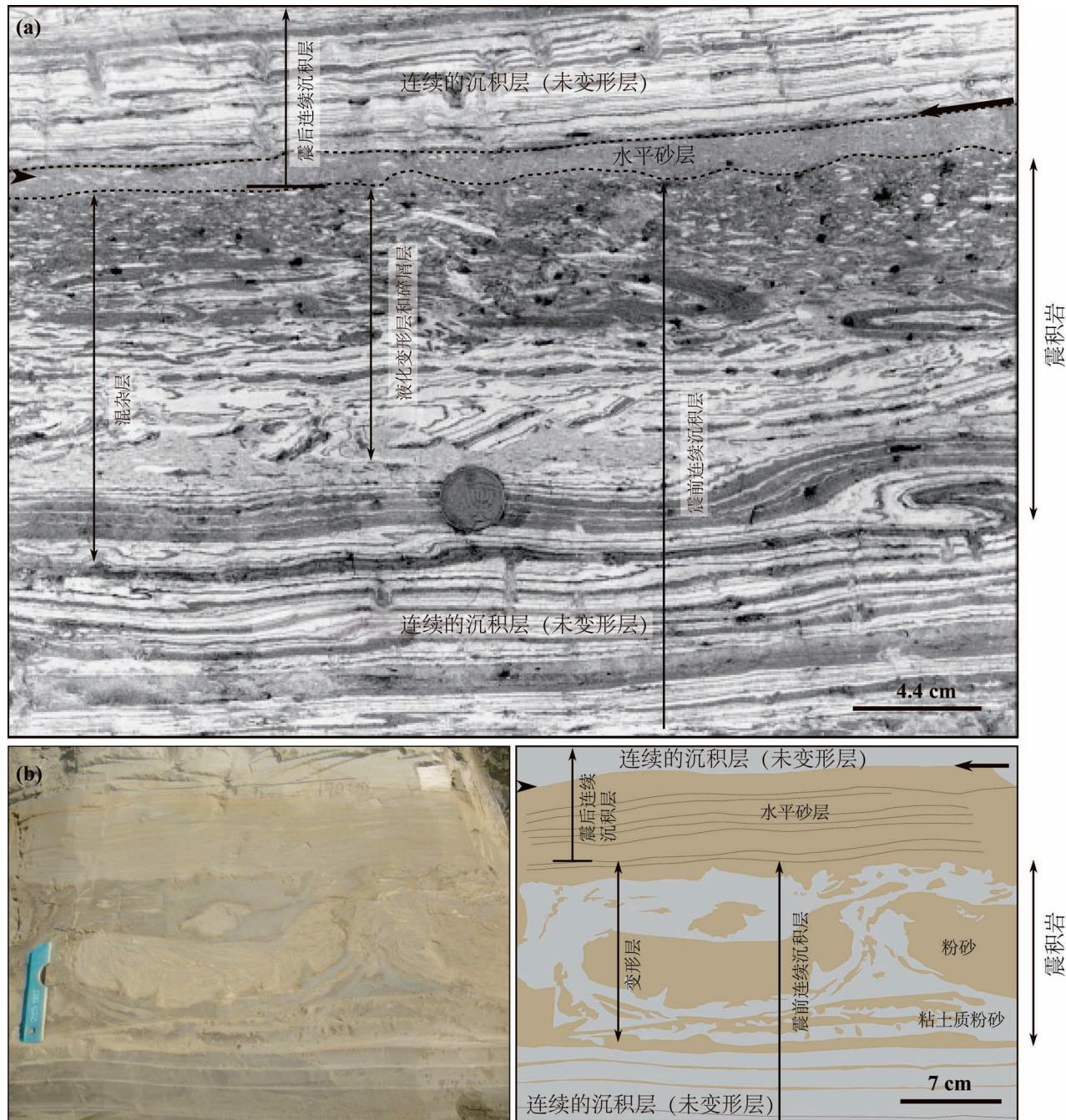


图8(a)以色列利桑湖(死海)马萨达附近晚更新世扇三角洲沉积中典型的地震成因混杂层(Marco 和 Agnon, 1995);
(b)青藏高原东缘岷江上游萝卜寨晚第四纪湖相沉积中地震成因的液化底劈变形(本研究)

Fig. 8(a) Typical mixed layer in late Pleistocene of fan delta sediments which overlying laminated layers shows gradual upward transition from folded strata of Masada near Lisan lake Formation in Israel, through fragment-supported texture, to matrix-supported texture at top. Underlying folds are asymmetrical and recumbent, and in places they have box shapes. Undisturbed, postseismic layers overlie mixed layer (Marco and Agnon, 1995). (b) Typical liquefied diapir which was induced by earthquake in late Quaternary of Luobozhai lacustrine sediment, upper reaches of Minjiang River, east Qinghai—Xizang (Tibetan) Plateau (This study)

底劈变形强烈,且变形层中黏土含量较高,黏性大,需要较大的震级才能引起液化变形(Tian Hongshui

et al., 2016; 苏德辰和乔秀夫, 2018)。利用上述6种方法,罗卜寨剖面的液化底劈可能代表M 6.0~

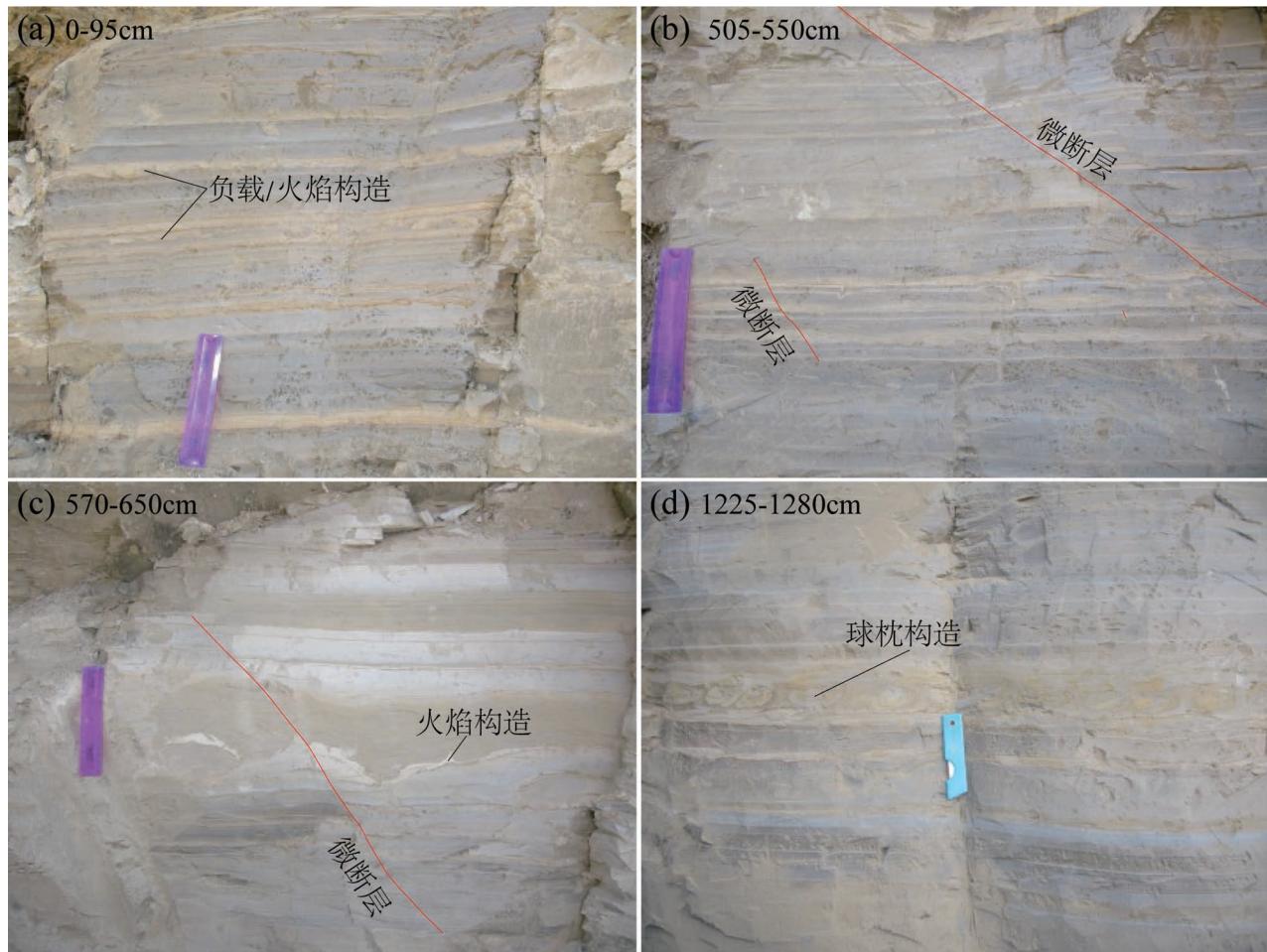


图 9 青藏高原东缘岷江上游萝卜寨晚第四纪湖相沉积中地震成因的负载/火焰构造(a);微断层(b);火焰构造和微断层(c);以及球—枕构造变形(d)(本研究)

Fig. 9 Typical load and flame structure (a); micro fault (b), flame structure and micro fault (c), and ball-and-pillow deformation structure (d) which was induced by earthquake in late Quaternary of Luobozhai lacustrine sediment, upper reaches of Minjiang River, east Qinghai—Xizang (Tibetan) Plateau (This study)

7.0 级地震事件(表 1)。

上述 6 种方法中,SSDS 的类型和最大液化距离提供了一种更为可靠地确定地震震级方法,以上两个案例研究中已得到证实。需要指出的是,在利用 SSDS 确定地震震级/强度时,还应考虑以下 5 个方面。

(1) 考虑到 SSDS 变形机制和触发因素的复杂性,首先要确定 SSDS 的成因和触发机制(Owen and Moretti, 2011)。

(2) SSDS 形态和震积层厚度易受沉积环境、岩性、沉积物的物理特征、液化和/或流化等影响,可能会影响我们对 SSDS 类型(例如火焰构造与底辟构造)的厘定。因此,在分析 SSDS 的特征(类型、变形强度、扰动厚度等)时,需要仔细考虑。

(3) 考虑到古地震震中的不确定性和古液化点的空间分布。为了减小不确定性,建议采用液化变形记录(或液化变形的位置)与发震断层或震中之间的垂直距离。

(4) 为了验证方法的可靠性,重建的地震震级/强度应与研究区现代地震、古地震的震级相当。

(5) 有些地震($M \geq 5$)可能并形成 SSDS,或未在沉积物中保存,或者被侵蚀(Moretti et al., 1999);一次地震也可能诱发多个沉积层变形(Gibert et al., 2011),形成多层的 SSDS,这就导致了地震事件的遗漏或过多解读。

因此,在利用 SSDS 研究古地震时,需要利用沉积学和微观指标(如粒度、磁化率等)来识别那些没有形成 SSDS 但可能诱发大量碎屑物质(如滑坡、尘

暴等)的地震事件,建立长时间尺度,连续的地震事件。然而,湖泊沉积物的来源和化学性质变化除受强烈地震释放的碎屑物质影响外,还可能受到极端天气(如沙尘暴等)(Chen Fahu et al., 2013)、风化作用(Liang Lianji and Jiang Hanchao, 2017)和人类活动(Karlin and Abella, 1996)的影响。由此可见,宏观SSDS和微观沉积指标变化的耦合,以及沉积学分析,使得湖泊沉积中识别出的地震事件更可靠。对于湖相沉积,除了上述提到的6种方法外,最好使用下伏SSDS和上覆砂层的组合,以其获得更为可靠的古地震震级/强度。总之,上述各种方法都各有其应用条件和局限性,目前还只是一种尝试,还有待进一步研究。

3 结论

(1) 利用经验估算、最大液化距离、扰动层厚度、经验公式、变形类型、快速沉积砂层厚度等6种方法,中东死海盆地晚更新利桑组典型的震积层(混杂层)代表的震级应在M5.5~6.5之间;岷江上游萝卜寨晚第四纪湖相沉积中的液化底劈变形代表的古地震震级为M6.0~7.0级;

(2) 软沉积物变形与古地震震级/强度关系的研究,使它特别适合于高山峡谷、强烈侵蚀,没有地表破裂,探槽开挖困难的地区。不仅为确定古地震震级或强度提供了一个相对便捷,新颖的方法,同时也是对利用地表破裂参数确定古地震震级方法的补充和参考;

(3) 软沉积物变形与古地震震级/强度关系,不仅可以提供可靠或可对比的地震震级或强度数据,也为研究构造活跃地区长期的地震活动性和危险性提供了一种新的方法。

致谢:谨以此篇文章纪念中国地质科学院地质研究所乔秀夫先生(1930-10-30~2021-03-01)。他是我国当之无愧的震积岩研究的开拓者、古地震研究先驱及领航人;也是我从事软沉积物变形和古地震研究的领路人,指导者和支持者。乔秀夫先生一生爱国敬业、忘我工作、无私奉献、热情豁达、平易近人;对工作精益求精、一丝不苟、严谨认真的精神,一直激励我从事活动构造、古地震和灾变沉积学研究。同时,感谢何碧竹研究员、硕士研究生张献兵和杨镇在文章修改过程中的帮助及宝贵意见。最后,感谢审稿专家和章雨旭研究员提出的宝贵意见和建议。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese)

- with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)
- 杜远生, 韩欣. 2000. 论震积作用和震积岩. 地球科学进展, 14(4): 389~394.
- 邓起东, 陈立春, 冉勇康. 2004. 活动构造定量研究与应用. 地学前缘, 11(4): 383~392.
- 丁孝忠, 高林志. 2021.《地质论评》前编委、中国震积岩研究的开拓者乔秀夫研究员逝世. 地质论评, 67(2): 541~542.
- 傅征祥. 1997. 中国大陆地震活动性力学研究. 北京: 地震出版社: 44~45.
- 黄宏伟 杜远生 黄志强 陈海. 2007. 广西丹池盆地晚古生代震积岩及其构造意义. 地质论评, 53(5): 723~724.
- 李留藏, 孙亚强, 李运田. 1991. 沉积层中的地震波及其震级. 地震, (2): 64~72.
- 李艳豪, 蒋汉朝, 徐红艳, 梁莲姬. 2015. 四川岷江上游滑坡触发因素分析. 地震地质, 37(4): 1147~1161.
- 刘刚, 王琪, 乔学军, 杨少敏, 游新兆, 张锐, 等. 2015. 用连续GPS与远震体波联合反演2015年尼泊尔中部Ms8.1地震破裂过程. 地球物理学报, 58(11): 4287~4297.
- 刘颖, 谢君斐. 1984. 沙土震动液化. 北京: 地震出版社: 1~327.
- 乔秀夫. 1996. 中国震积岩的研究与展望. 地质论评, 42(4): 317~320.
- 乔秀夫, 宋天锐, 高林志, 李海兵, 彭阳, 张传恒, 章雨旭, 等. 2006. 地层中地震记录(古地震). 北京: 地质出版社.
- 乔秀夫, 李海兵. 2008. 枕, 球—枕构造: 地层中的古地震记录. 地质论评, 54(6): 721~730.
- 乔秀夫, 李海兵, 苏德辰, 何碧竹, 田洪水, 郭宪璞, 宋天锐, 吕洪波, 高林志, 贺静, 袁效奇, 周玮, 张森, 孙爱萍, 王安东. 2017. 软沉积物变形构造—地震与古地震记录. 北京: 地质出版社: 1~278.
- 乔秀夫, 郭宪璞, 李海兵, 荀宗海, 苏德辰, 唐哲民. 2012. 龙门山晚三叠世软沉积物变形与印支期构造运动. 地质学报, 86(1): 132~156.
- 冉勇康, 邓起东. 1999. 古地震学研究的历史、现状和发展趋势. 科学通报, 44(1): 12~20.
- 苏德辰, 乔秀夫. 2018. 黏性沉积物中的古地震触变流动变形. 古地理学报, 20(4): 609~622.
- 唐茂云, 刘静, 邵延秀, 王鹏, 袁兆德. 2015. 中小震级事件产生地表破裂的震例分析. 地震地质, (4): 1193~1214.
- 田洪水, 万中杰, 王华林. 2003. 鲁中寒武系馒头组震积岩的发现及初步研究. 地质论评, 49(2): 123~131.
- 王昌勇, 郑荣才, 高振中. 2008. 准噶尔盆地下侏罗统八道湾组震积岩的发现及其研究意义. 地质论评, 54(6): 821~826.
- 王约, 楚靖岩, 王训练, 杨艳飞, 徐一帆. 2009. 华南震旦系陡山沱组磷质震积岩及其与多细胞生物群相关性初探. 地质论评, 55(5): 620~627.
- 徐锡伟, 陈桂华, 王启欣, 陈立春, 任治坤, 许冲, 魏占玉, 鲁人齐, 谭锡斌, 董绍鹏. 2017. 九寨沟地震发震断层属性及青藏高原东南缘现今应变状态讨论. 地球物理学报, 60: 4018~4026.
- 易桂喜, 闻学泽, 辛华, 乔慧珍, 王思维, 宫悦. 2013. 龙门山断裂带南段应力状态与强震危险性研究. 地球物理学报, 56(4): 1112~1120.
- 殷秀兰, 杨天南. 2005. 胶州-莱阳盆地白垩纪莱阳群中的震积岩及构造意义讨论. 地质论评, 51(5): 502~506.
- 钟宁, 蒋汉朝, 梁莲姬, 徐红艳, 彭小平. 2017. 软沉积物变形中负载, 球—枕构造的古地震研究综述. 地质论评, 63(3): 719~738.
- 钟宁, 蒋汉朝, 李海兵, 等, 2020a. 青藏高原东部河湖相沉积中的软沉积物变形的主要成因类型及其特征. 地球学报, 41(1): 23~

36

- 钟宁,蒋汉朝,李海兵,徐红艳,梁莲姬,时伟. 2020b. 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. 地质学报, 94(3): 968~981.
- 钟宁. 2017. 岷江上游晚更新世湖相沉积的古地震及物源分析. 导师:蒋汉朝. 北京:中国地震局地质研究所博士学位论文: 1~181.
- 钟宁. 2019. 青藏高原东部晚第四纪湖相沉积的古地震记录. 合作导师:李海兵. 北京:中国地质科学院地质研究所博士后报告: 1~93.
- Allen J R L. 1986. Earthquake magnitude—frequency, epicentral distance, and soft-sediment deformation in sedimentary basins. *Sedimentary Geology*, 46: 67~75.
- Ambraseys N N, Finkel, C F. 1991. Long-term seismicity of Istanbul and of the Marmara Sea region. *Terra Nova*, 3(5): 527~539.
- Ambraseys N N. 1988. Engineering seismology: part I. Earthquake engineering & structural dynamics, 17: 1~50.
- Ambraseys N. 2009. Earthquakes in the Mediterranean and Middle East: a multidisciplinary study of seismicity up to 1900. Cambridge University Press, Cambridge.
- Anketell J M, Cegla J, Dzulinsky S. 1970. On the deformational structures in systems with reversed density gradients. *Annales de la Société Géologique de Pologne*, 40(1): 3~30.
- Archer C, Noble P, Rosen M R, Sagnotti L, Florindo F, Mensing S, Piovesan S, Michetti G, Michetti A M. 2019. Lakes as paleoseismic records in a seismically-active, low-relief area (Rieti Basin, central Italy). *Quaternary Science Reviews*, 211: 186~207.
- Avşar U, Hubert-Ferrari A, D E Batist M, Lepoint G, Schmidt S, Fagel N. 2014. Seismically triggered organic rich layers in recent sediments from Göllüköy Lake (North Anatolian Fault, Turkey). *Quaternary Science Reviews*, 103: 67~80.
- Beck C. 2009. Late Quaternary lacustrine paleo-seismic archives in north-western Alps: Examples of earthquake origin assessment of sedimentary disturbances. *Earth Science Reviews*, 96(4): 327~344.
- Berra F, Felletti F. 2011. Syndepositional tectonics recorded by soft-sediment deformation and liquefaction structures (continental Lower Permian sediments, Southern Alps, Northern Italy): stratigraphic significance. *Sedimentary Geology*, 235(30): 249~263.
- Bommer J J, Rodri guez C E. 2002. Earthquake-induced landslides in Central America. *Engineering Geology*, 63(3~4): 189~220.
- Cao Zhenzhong, Hou Longqin, Xu Hongmei, Yuan Xiaoming. 2010. Distribution and characteristics of gravelly soil liquefaction in the Wenchuan Ms 8.0 earthquake. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, (2): 167~175.
- Chang Musiung, Kuo Chiping, Hsu Roneeh, Shau Shihhui, Lin Tinmei. 2012. Liquefaction potential and post-liquefaction settlement evaluations of the Chuoshui river alluvial fan in Taiwan. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71(2): 325~336.
- Chen Fahu, Qiang Mingrui, Zhou Aifeng, Xiao Shun, Chen Jianhui, Sun Donghuai. 2013. A 2000 year dust storm record from Lake Sugan in the dust source area of arid China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(5): 2149~2160.
- Chen Lichun, Wang Hu, Ran Yongkang, Lei Shengxue, Li Xi. 2014. The 2013 Lushan Ms 7.0 earthquake: varied seismogenic structure from the 2008 Wenchuan earthquake. *Seismological Research Letters*, 85(1): 34~39.
- Deng Qidong, Xu Xwei, Zhang Xiankang. 2004&. Methods and techniques for surveying and prospecting active faults in urban areas. *Earth Science Frontiers*, 10(1): 93~104.
- Ding Xiaozhong, Gao Linzhi. 2021#. Prof. QIAO Xiufu, former editorial committee member of Geological Review and pioneer of seismite study in China, pass away. *Geological Review*, 67(2): 541~542.
- Du Yuansheng, Han Xin. 2000&. Seismo-deposition and seimites. *Advance in Earth Science*, 14(4): 389~394.
- Fu Zhengxiang. 1997#. Mechanic study on Seismicity of the Chinese Mainland. Beijing: Seismological Press: 44~45.
- Galli P, 2000. New empirical relationships between magnitude and distance for liquefaction. *Tectonophysics*, 324(3): 169~187.
- Gibert L, Alfaro P, García-Tortosa F J, Scott G. 2011. Superposed deformed beds produced by single earthquakes (Tecopa Basin, California): insights into paleoseismology. *Sedimentary Geology*, 235 (3~4): 148~159.
- Guiraud M, Plaziat J C. 1993. Seimites in the fluvial bima sandstones: identification of paleoseisms and discussion of their magnitudes in a cretaceous synsedimentary strike-slip basin (upperbenue, nigeria). *Tectonophysics*, 225(4): 0~522.
- Huang Hongwei, Du Yuansheng, Huang Zhiqiang, Chen Hai. 2007&. Paleozoic seimites in the Nandan-Hechi Basin, Guangxi and its tectonic significance. *Geological Review*, 53(5): 723~724.
- Hibsch C, Alvarado A, Yepes H, Perez V H, Sébrier M. 1997. Holocene liquefaction and soft-sediment deformation in Quito (Ecuador): a paleoseismic history recorded in lacustrine sediments. *Journal of Geodynamics*, 24: 259~280.
- Howarth J D, Fitzsimons S J, Norris R J, Jacobsen G E. 2012. Lake sediments record cycles of sediment flux driven by large earthquakes on the Alpine fault, New Zealand. *Geology*, 40(12): 1091~1094.
- Jiang Hanchao, Mao Xue, Xu Hongyan, Yang Huili, Ma Xiaolin, Zhong Ning, Li Yanhao. 2014. Provenance and earthquake signature of the last deglacial Xinmocun lacustrine sediments at Diexi, East Tibet. *Geomorphology*, 204: 518~531.
- Jiang Hanchao, Zhong Ning, Li Yanhao, Xu Hongyan, Yang Huili, Peng Xiaoping. 2016. Soft sediment deformation structures in the Lixian lacustrine sediments, eastern Tibetan Plateau and implications for postglacial seismic activity. *Sedimentary Geology*, 344: 123~134.
- Jiang Hanchao, Zhong Ning, Li Yanhao, Ma Xiaolin, Xu Hongyan, Shi Wei, Zhang Siqi, Nie Gaozhong. 2017. A continuous 13.3-ka record of seismogenic dust events in lacustrine sediments in the eastern Tibetan Plateau. *Scientific Reports*, 15686 (7): 1~9.
- Karlin R E, Abella S E B. 1996. A history of Pacific Northwest earthquakes recorded in Holocene sediments from Lake Washington. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B3): 6137~6150.
- Katz A, Agnon A, Marco S. 2009. Earthquake-induced barium anomalies in the lisan formation, Deadsea rift valley, Israel. *Earth and Planetary Science Letters*, 286(1~2): 219~229.
- Keefer D K. 1984. Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, 95(4): 406~421.
- Klinger Y, Rivera L, Haessler H, Maurin J C. 1999. Active faulting in the Gulf of Aqaba: new knowledge from the Mw 7.3 earthquake of 22 November 1995. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(4): 1025~1036.
- Kuribayashi E, Tatsuoka F. 1975. Brief review of liquefaction during earthquakes in Japan. *Soils and Foundations*, 15(4): 81~92.

- Li Tao, Chen Jie, Fang Lihua, Chen Zhuxin, Thompson J A, Jia Chengzao. 2016. The 2015 Mw 6.4 Pishan earthquake: seismic hazards of an active blind wedge thrust system at the western Kunlun range front, northwest Tibetan Plateau. *Seismological Research Letters*, 87(3): 601~608.
- Li Liuzhang, Sun Yaqiang, Li Yuntian. 1991&. Seismic wave in sedimentary layers and earthquake magnitude. *Earthquake*, (2): 64~72.
- Li Yanhao, Jiang Hanchao, Xu Hongyan, Liang Lianji. 2015&. Large quantities of landslides in the upper reaches of the Min River, Sichuan Province. *Seismology and Geology*, 37(4): 1147~1161.
- Liang Lianji, Jiang Hanchao. 2017. Geochemical composition of the last deglacial lacustrine sediments in East Tibet and implications for provenance, weathering, and earthquake events. *Quaternary International*, 430: 41~51.
- Liang Lianji, Dai Fuchu, Jiang Hanchao, Zhong Ning. 2018. A preliminary study on the soft-sediment deformation structures in the Late Quaternary lacustrine sediments at Tashkorgan, northeastern Pamir, China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 92(4): 1574~1591.
- Liu Gang, Wang Qi, Qiao Xuejun, Yang Shaomin, You Xinzhaob, Zhang Rui, Zhao Bin, Tan Kai, Zhou Rong, Fang Rong Xin. 2015&. The 25 April 2015 Nepal Ms 8.1 earthquake slip distribution from joint inversion of teleseismic, static and high-rate GPS data. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(11): 4287~4297.
- Liu Ying, Xie Junfei. 1984#. Vibration Liquefaction of Sandy Soil. Beijing: Seismological Press: 1~237.
- Liu-Zeng Jing, Wang Peng, Zhang Zhihui, Li Zhigang, Cao Zhenzhong, Zhang Jinyu, Yuan Xiaoming, Wang Wei, Xing Xiuchen. 2016. Liquefaction in western Sichuan Basin during the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake, China. *Tectonophysics*, 694: 214~238.
- Lowe D R. 1975. Water escape structures in coarse grained sediments. *Sedimentology*, 22: 157~204.
- Malamud B D, Turcotte D L, Guzzetti F, Reichenbach P. 2004. Landslides, earthquakes, and erosion. *Earth & Planetary Science Letters*, 229(1): 45~59.
- Marco S, Agnon A. 1995. Prehistoric earthquake deformations near Masada, Dead Sea graben. *Geology*, 23(8): 695~698.
- Marco S, Agnon A. 2005. High-resolution stratigraphy reveals repeated earthquake faulting in the Masada fault zone, Dead Sea transform. *Tectonophysics*, 408(1): 101~112.
- Mccalpin J P, Nelson, A. R. 1996. Chapter 1 introduction to paleoseismology. *International Geophysics*, 62(09): 1~32.
- Michetti A M, Esposito E, Guerrieri L, Porfido S, Serva L, Tatevossian R, Vittori E, Audemard F, Azuma T, Clague J, Comerci V, Gurpinar A, Mccalpin J, Mohammdaioun B, Morner N A, Ota Y, Roghozin E. 2007. Environmental seismic intensity scale—ESI 2007. *Memorie Descrittive Carta Geologica D'Italia*, 74: 7~23.
- Migowski C, Agnon A, Bookman R, Negendank J F W, Stein M. 2004. Recurrence pattern of Holocene earthquakes along the Dead Sea transform revealed by varve-counting and radiocarbon dating of lacustrine sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 222(1): 301~314.
- Moernaut J, Daele M V, Heirman K, Fontijn K, Strasser M, Pino M, Roberto U, De Batist M. 2014. Lacustrine turbidites as a tool for quantitative earthquake reconstruction: new evidence for a variable rupture mode in south central Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(3): 1607~1633.
- Monecke K, Anselmetti F S, Becker A, Sturm M, Giardini D. 2004. The record of historic earthquakes in lake sediments of central Switzerland. *Tectonophysics*, 394: 21~40.
- Monecke K, Anselmetti F S, Becker A, Schnellmann M, Sturm M, Giardini D. 2006. Earthquake-induced deformation structures in lake deposits: A Late Pleistocene to Holocene paleoseismic record for Central Switzerland. *Ectogae Geologicae Helvetiae*, 99(3): 343~362.
- Moretti M, Alfaro P, Caselles O, Canas J A. 1999. Modelling seismites with a digital shaking table. *Tectonophysics*, 304: 369~383.
- Moretti M, Sabato L. 2007. Recognition of trigger mechanisms for soft sediment deformation in the Pleistocene lacustrine deposits of the Sant'Arcangelo Basin (Southern Italy): Seismic shock vs. overloading. *Sedimentary Geology*, 196(1~4): 31~45.
- Mugnier J L, Huyghe P, Gajurel A P, Upreti B N, Jouanne F. 2011. Seismites in the Kathmandu basin and seismic hazard in central Himalaya. *Tectonophysics*, 509(1): 33~49.
- Neuwerth R, Suter F, Guzman C A, Gorin G E. 2006. Soft-sediment deformation in a tectonically active area: The Plio-Pleistocene Zarzal Formation in the Cauca valley (western Colombia). *Sedimentary Geology*, 186: 67~88.
- Obermeier S F. 1996. Use of liquefaction-induced features for paleoseismic analysis—an overview of how seismic liquefaction features can be distinguished from other features and how their regional distribution and properties of source sediment can be used to infer the location and strength of Holocene paleo-earthquakes. *Engineering Geology*, 44(1~4): 1~76.
- Obermeier S F. 1998. Liquefaction evidence for strong earthquakes of Holocene and latest Pleistocene ages in the states of Indiana and Illinois, USA. *Engineering Geology*, 50(3): 227~254.
- Obermeier S F, Pond E C, Olson S M. 2002. Paleoliquefaction studies in continental settings: geologic and geotechnical factors in interpretations and back-analysis. US Geological Survey Open-File Report, 1~29.
- Owen G. 1987. Deformation processes in unconsolidated sands. Geological Society, London, Special Publications, 29(1): 11~24.
- Owen G, Moretti M. 2011. Identifying triggers for liquefaction-induced soft-sediment deformation in sands. *Sedimentary Geology*, 235(3): 141~147.
- Qiao Xiufu. 1996&. Study of seismites of China and its prospects. *Geological Review*, 63: 317~320.
- Qiao Xiufu, Song Tianrui, Gao Linzhi, Li Haibing, Peng Yang, Zhang Chuanheng, Zhang Yuxu, et al. 2006#. Seismography in Strata (Paleo-earthquakes). Beijing: Geological Publishing House.
- Qiao Xiufu, Li Haibing. 2008&. Pillow, ball-and-pillow structures: paleo-seismic records within strata. *Geological Review*, 54(6): 721~730.
- Qiao Xiufu, Guo Xianpu. 2013. Early Jurassic soft-sediment deformation interpreted as seismites in the Wuqia pull-apart basin and the strike-slip Talas—Ferghana fault, Xinjiang, China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 87(3): 730~737.
- Qiao Xiufu, Li Haibing, Su Dechen, He Bizhu, Tian Hongshui, Guo Xianpu, Song Tianrui, Lü Hongbo, Gao Linzhi, He Jing, Yuan Xiaoli, Zhou Wei, Zhang Miao, Sun Aiping, Wang Andong. 2017#. Soft-sediment Deformation Structures—Earthquakes and Seismic Records. Beijing: Geological Publishing House: 1~264.
- Qiao Xiufu, Guo Xianpu, Li Haibing, Gou Zonghai, Su Dechen, Tang Zhemin. 2012&. Soft-sediment deformation in the late Triassic and

- the Indosinian tectonic movement in Longmenshan. *Acta Geologica Sinica*, 86(1):132~156.
- Ran Yongkang, Deng Qidong. 1999&. History, status and trend about the research of paleoseismology. *Chinese Science Bulletin*, 44(10): 880~889.
- Rana N, Bhattacharya F, Basavaiah N, Pant R K, Juyal N. 2013. Soft sediment deformation structures and their implications for Late Quaternary seismicity on the south Tibetan detachment system, central Himalaya (Uttarakhand), India. *Tectonophysics*, 592: 165~174.
- Reicherter K, Michetti A M, Barroso P G S. 2012. Palaeoseismology: historical and prehistorical records of earthquake ground effects for seismic hazard assessment. *Environmental & Engineering Geoscience*, 31(1):1~10.
- Rodríguez C E, Bommer J J, Chandler R J. 1999. Earthquake-induced landslides: 1980 ~ 1997. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 18(5): 325~346.
- Rodríguez-Pascua M A, Calvo J P, De Vicente G, Gómez-Gras D. 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. *Sedimentary Geology*, 135(1): 117~135.
- Rodríguez-Pascua, De Vicente G, Calvo J P, Pérez-López R. 2003. 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. *Journal of Structural Geology*, 25(5): 749~763.
- Scott B, Price S. 1988. Earthquake-induced structures in young sediments. *Tectonophysics*, 147: 165~170.
- Seed H B, Idriss I M. 1971. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, 97: 1249~1273.
- Shapira A, Avni R, Nur A. 1993. A new estimate for the epicenter of the Jericho earthquake of 11 July 1927. *Israel Journal of Earth Sciences*, 42(2): 93~96.
- Sims J D. 1973. Earthquake-induced structures in sediments of Van Norman Lake, San Fernando, California. *Science*, 182(4108): 161~163.
- Sims J D. 1975. Determining earthquake recurrence intervals from deformational structures in young lacustrine sediments. *Tectonophysics*, 29: 141~152.
- Su Dechen, Qiao Xiufu. 2018&. Thixotropic deformation features of cohesive sediments triggered by palaeoearthquakes. *Journal of Palaeogeography*, 20(4): 609~622.
- Suter F, Martínez J I, Vélez M I. 2011. Holocene soft-sediment deformation of the Santa Fe—Sopetrán Basin, northern Colombian Andes: Evidence for pre-Hispanic seismic activity? *Sedimentary Geology*, 235: 188~199.
- Tang Maoyun, Liu Jing, Shao Yanxiu, Wang Peng, Yuan Zhaode. 2015&. Analysis about the minimum magnitude earthquake associated with surface ruptures. *Seismology & Geology*, 37(4): 1193~1214.
- Tian Hongshui, Wan Zhongjie, Wang Hualin. 2003&. Discovery and Preliminary Study on Seismites of the Ambrian Mantou Formation in the Central Shandong Area. *Geological Review*, 49(2): 123~131.
- Tian Hongshui, Zhang Shenhe, Zhang Aishe. 2016. Test investigation on liquefied deformation structure in saturated lime - mud composites triggered by strong earthquakes. *Acta Geologica Sinica* (English Edition), 90(6): 2008~2021.
- Valera J E, Traubenik M L, Egan J A, Kaneshiro J Y. 1994. A practical perspective on liquefaction of gravels. In: Prakash S and Dakoulas P. eds. *Ground Failures under Seismic Conditions*. American Society of Civil Engineers Geotechnical Special Publication, 44: 241~257.
- Van Loon A J, Pisarska-Jamrozy M, Nartišs M, Krievāns M, Soms J. 2016. Seismites resulting from high-frequency, high-magnitude earthquakes in Latvia caused by Late Glacial glacio-isostatic uplift. *Journal of Palaeogeography*, 5(4): 363~380.
- Wang Changyong, Zheng Rongcui, Gao Zhenzhong. 2008&. The Discovery and Significance of seismites from the Lower Jurassic Badaowan Formation in Junggar Basin. *Geological Review*, 54(6): 821~826.
- Wang Ping, Zhang Bin, Qiu Weili, Wang Jiancun. 2011. Soft-sediment deformation structures from the Diexi paleo-dammed lakes in the upper reaches of the Minjiang River, east Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(4): 865~872.
- Wang Yue, Chu Jingyan, Wang Xunlian, Yang Yanfei, Xu Yifan. 2009&. Preliminary discussion on phosphorus seismites from the Ediacaran (Sinian) Doushantuo Formation in south China, and its relationship with meta-biotas. *Geological Review*, 55(5): 620~627.
- Wells D L, Coppersmith K J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84: 974~1002.
- Weltje G J. 1997. End-member modeling of compositional data: numerical—statistical algorithms for solving the explicit mixing problem. *Mathematical Geology*, 29(4): 503~549.
- Wetzler N, Marco S, Heifetz E. 2010. Quantitative analysis of seismogenic shear-induced turbulence in lake sediments. *Geology*, 38(4): 303~306.
- Xu Chong, Xu Xiwei, Yao Xin, Dai Fuchu. 2014. Three (nearly) complete inventories of landslides triggered by the May 12, 2008 Wenchuan Mw 7.9 earthquake of China and their spatial distribution statistical analysis. *Landslides*, 11(3): 441~461.
- Xu Hongyan, Jiang Hanchao, Yu Song, Yang Huili, Chen Jie. 2015. OSL and pollen concentrate ¹⁴C dating of dammed lake sediments at Maoxian, east Tibet, and implications for two historical earthquakes in AD 638 and 952. *Quaternary International*, 371: 290~299.
- Xu Xiwei, Chen Guihua, Wang Qixin, Chen Lichun, Ren Zhikun, Xu Chong, Wei Zhanyu, Lu Renqi, Tang Xibin, Dong Shaopeng, Shi Feng. 2017&. Discussion on seismogenic structure of Jiuzhaigou earthquake and its implication for current strain state in the southeastern Qinghai-Tibet Plateau. *Chinese Journal of Geophysics*, 60(10): 4018~4026.
- Yi Guixi, Wen Xueze, Xin Hua, Qiao Huizhen, Wang Siwei, Gong Yue. 2013&. Stress state and major-earthquake risk on the southern segment of the Longmen Shan fault zone. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(4): 1112~1120.
- Yin Xiulan, Yang Tiamnan. 2005&. Seismites in the Laiyang Group in the Jiaozhou—Laiyang Basin, Shandong Province, and their tectonic implications. *Geological Review*, 51(5): 502~506.
- Youd T L. 1977. Discussion of ‘Brief review of liquefaction during earthquakes in Japan’ by E. Kuribayashi and T. Taatsuoka. *Soils Foundation*, 17: 82~85.
- Zhang Yongshuang, Cheng Yuliang, Yin Yueping, Lan Hengxing, Wang

- Jun, Fu Xiaoxiao. 2014. High-position debris flow: a long-term active geohazard after the Wenchuan earthquake. *Engineering Geology*, 180: 45~54.
- Zhang Yongshuang, Yang Zhihua, Guo Changbao, Wang Tao, Wang Donghui, Du Guoliang. 2017. Predicting landslide scenes under potential earthquake scenarios in the Xianshuihe fault zone, Southwest China. *Journal of Mountain Science*, 14(7): 1262~1278.
- Zhong N. 2017#. Earthquake and Provenance Analysis of the Lacustrine Sediments in the Upper Reaches of the Min River during the Late Pleistocene. Tutor: Jiang Hanchao. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, Doctoral thesis: 1~181.
- Zhong Ning, Jiang Hanchao, Liang Lianji, Xu Hongyan, Peng Xiaoping. 2017&. Paleoearthquake researches via soft sediment deformation of load, ball-and-pillow structure: a review. *Geological Review*, 63: 719~738.
- Zhong Ning, Jiang Hanchao, Li Haibing, Xu Hongyan, Shi Wei, Zhang Siqi, Wei Xiaotong. 2019. Last deglacial soft-sediment deformation at Shawan on the eastern Tibetan plateau and implications for deformation processes and seismic magnitudes. *Acta Geological Sinica (English edition)*, 93(2): 430~450.
- Zhong Ning. 2019#. Earthquake Record of the Lacustrine Sediments in the Eastern Tibetan Plateau during the Late Pleistocene. Cooperative tutor: Li Haibing. Beijing: Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, postdoctoral report: 1~93.
- Zhong Ning, Jiang Hanchao, Li Haibing, Xu Hongyan, Huang Xiaolong. 2020a&. The genetic types of soft sediment deformation structures and their characteristics in the fluvial—lacustrine sediments, Eastern Tibetan Plateau. *Acta Geoscientica Sinica*, 94(1): 23~36.
- Zhong Ning, Jiang Hanchao, Li Haibing, Xu Hongyan, Liang Lianji, Shi Wei. 2020b&. End member inversion of Ximocun lacustrine sediment in the upper reaches of the Min River and its recorded tectonic and climate events, *Acta Geological Sinica*, 94(3): 968~981.

The use of soft-sediment deformation structures as proxies for paleoseismic activity and shaking: A review

ZHONG Ning^{1,2)}, JIANG Hanchao³⁾, LI Haibing⁴⁾, SU Dechen⁴⁾, XU Hongyan³⁾, LIANG Lianji⁵⁾

1) Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081;

2) Research Center of Neotectonism and Crustal Stability, China Geological Survey, Beijing, 100081;

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

4) Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics, Ministry of Land and Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;

5) College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing, 100124

Objectives: Quantifying the magnitude of an earthquake is very important for long-term and medium-term earthquake prediction, post-earthquake emergency rescue and seismic hazard assessment. Paleoseismology is the investigation of past earthquakes in the geological record, in particular their location, timing and size. Uncertainties remain in the paleoearthquake magnitudes determined by traditional surface rupture parameters, especially because most seismic events do not result in surface ruptures. This study is in order to address the problem of magnitudes evaluation of earthquakes that did not reveal major dislocations.

Methods: This paper deals with the methods used to determine the seismic shaking based on the types and forms of soft-sediment deformation structures, including, maximum liquefaction distance, thickness of disturbed layer, empirical formulae, and thickness of rapidly-deposited sand layer. Then discuss and analyze these methods in terms of their theoretical basis, advantages and disadvantages, accuracy, applicability and problems. We chose two case studies: first, a typical seismics-related deposit (liquefied layer and dsirupted layer) represented by a seismite in the late-Pleistocene Lake Lisan section near Masada in the Dead Sea Basin; and second, the liquefied diapir triggered by an earthquake in the Luobozhai late-Quaternary lacustrine sediments in the upper reaches of the Minjiang River, east Tibet.

Results: The six methods listed above are employed to determine earthquake magnitudes associated with the seismics-related deposit and liquefied diapir, yielding magnitudes of $M 5.5 \sim 6.5$ and $M 6.0 \sim 7.0$, respectively.

Conclusions: The combination of the six methods, provided a new and relatively convenient method for determining seismic shaking, especially in lacustrine sediments. This study can serve as a valid reference for comparing methods of calculating the magnitude of a paleoearthquake based on surface rupture parameters, and provides a better understanding of the long-term seismic activity and risk in tectonically active regions.

Keywords: Soft sedimentary deformation structure, Seismics-related deposit, liquefied diapir, Seismic shaking, Paleoearthquake

Acknowledgements: This article is in memory of Prof. QIAO Xiufu (1930-10-30~2021-03-01), Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences. He is a well deserved pioneer in the study of seismites, a pioneer and navigator in the study of paleoearthquake in China, and a leader, director and supporter for me to research the soft sediment deformation structures and paleoearthquake. All his life, Mr. Qiao Xiufu was patriotic, dedicated, selfless, enthusiastic, open-minded and approachable. His spirit of continuous improvement, meticulousness and strictness has always inspired me to engage in active tectonics, paleoearthquake and catastrophical sedimentology research. We thank Prof. HE Bizhu, Mr. ZHANG Xianbing and Mr. YANG Zheng for helpful discussions that improved the manuscript. We gratefully acknowledge the joint support by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42177184, 41807298, 41702372, 41572346), the China Postdoctoral Science Foundation (No. 2019M650788), and the China Geological Survey (Nos. DD20190319, DD20190059)

First author: ZHONG Ning, male, born in 1986, associate researcher, mainly engaged in sedimentology and tectonic geomorphology; Email: zdz2018@126.com

Manuscript received on: 2021-04-04; Accepted on: 2021-10-13; Network published on: 2021-10-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2021.10.085

Edited by: ZHANG Yuxu

四川马边地区找矿新发现:磷—铅—萤石矿 三位一体找矿新模型

文俊^{1,2,3)}, 张航飞^{1,2)}, 竹合林^{1,2)}, 李复勇¹⁾

- 1) 四川省地质矿产勘查开发局二零七地质队,四川乐山,614000;
2) 四川省地质矿产勘查开发局张金元劳模创新工作室,四川乐山,614000;
3) 成都理工大学沉积地质研究院,四川成都,610059



www.
geojournals.cn/georev

近年,在实施马边地区永红磷矿勘探项目过程中,新发现了铅矿和萤石矿,从此建立了马边地区磷—铅—萤石矿三位一体找矿新模型,促进了马边地区从以往的单一矿种(磷矿)勘查开发历史转型升级为目前的多矿种多空间(磷—铅—萤石矿)勘查开发现状。四川恰好属于缺乏萤石矿和无萤石成矿区带的地区(王吉平等,2010),在川西南峨边—金阳大断裂带上的马边地区发现萤石矿床,萤石在战略性新兴产业中有重要应用,未来需求将呈快速增长趋势(陈军元等,2021),无疑对乌蒙山马边地区的扶贫攻坚和经济发展具有实际意义,对川西南峨边—金阳大断裂带的区域找矿工作具有重要的指导意义。

1 研究方法

主要采用了1:5000地质填图、钻探工程、探槽工程、坑道等手段对磷、铅、萤石矿体进行调查和控制,采集样品分析测试CaF₂、Pb、Zn、P₂O₅含量,结合矿床地质特征,进行综合分析,确定了新的找矿模型。

2 研究结果

马边地区出露震旦系灯影组,寒武系麦地坪组、筇竹寺

组、沧浪铺组及奥陶系、志留系、二叠系及第四系等地层。磷矿层稳定产出下寒武统麦地坪组,是区域上重要的磷矿勘探层位。铅锌矿、萤石矿呈脉状产出下寒武统筇竹寺组泥质粉砂岩张扭性构造裂隙中,矿体走向为北北东向,倾向西,倾角65°~85°,与围岩产状斜交(图1)。铅矿与萤石矿呈同体共生的脉状产出,矿体走向延伸长度约1500 m,倾向延伸150~600 m,厚度1~8 m,平均2.0 m。根据72个工程的基本分析结果,CaF₂品位0.62%~70.39%,平均品位34.58%,Pb品位0.33%~22.70%,平均品位7.28%,均达到了现行规范的最低工业品位。萤石主要呈灰白色、紫红色,半自形—自形粒状结构,块状构造(图2)。矿石矿物主要有萤石、方铅矿、闪锌矿,脉石矿物主要为石英、方解石等。

通过资源量估算,共获铅金属量94.4 kt,萤石矿资源量450 kt,其中铅达到小型矿床规模,萤石矿达到中型矿床规模。

综合分析发现,马边地区磷—铅—萤石矿三者呈紧密联系,磷矿产出底部的麦地坪组地层中,而铅矿和萤石矿呈同体共生产出于麦地坪组上覆的筇竹寺组之中,麦地坪组与

注:本文为四川省地质矿产勘查开发局张金元劳模创新工作室资助的成果。

收稿日期:2021-10-28;改回日期:2021-10-31;网络首发:2021-11-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.11.045

作者简介:文俊,男,1990年生,硕士研究生,工程师,主要从事区域地质调查与战略性矿产调查研究;Email: wjun9936@sina.com。