

地震，在玉树划了一道伤口

今年是玉树地震十周年。十年前的 4 月 14 日，7.1 级强烈地震袭击了青海省玉树藏族自治州，造成了严重的人员伤亡和财产损失。玉树地震是近几十年来汶川地震之外我国大陆人员伤亡最严重的地震，也是青海省有历史记载以来死亡人数最多、经济损失最大的一次地震事件。那么，此次地震是如何发生的？为什么地震会发生在这里？这次地震有什么特点？我们通过下面这一段文字把这些问号逐个打开。

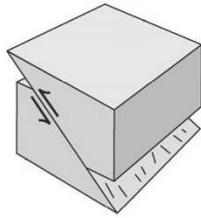
1. 活断层与地震



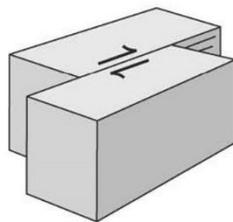
图 1 1995 年日本阪神 7.3 级地震，由野岛断层活动产生。地震后当地专门建立博物馆将断层遗迹加以保护。

我们通常说的地震，是由构造活动产生的。我们生活的地球，表面看似平静，实则“暗流涌动”，从其 46 亿年前开始形成以来，就没有停止过活动。由于地球不断运动和变化，地下岩石受到挤压、拉伸等力的作用，逐渐积累应变能量，当其积累到一定程度超过岩石的强度时，在某些脆弱部位突然破裂和错动，巨大的能量在瞬间急剧释放出来，以地震波的形式由该处向四周传播出去，引起地球表面的震动，这就形成了地震。岩石发生破裂和错动的脆弱部位就是断层（也叫断裂），它是两侧的岩层发生相对移动的一种破裂（图 1）。地震是断层活动的一种表现。

断层的活动有两种基本表现方式，上下运动和水平运动。当断层受到垂直方向的挤压或者拉伸时，断层两侧作上下运动，这种断层叫倾滑断层（垂移断层）（图 2a）。当断层受到与其平行的剪切力作用时，其两侧物质沿断层走向作方向相反的水平运动，这种断层叫走滑断层（平移断层）（图 2b）。当然，自然界的断层运动并不是简单到只有这样的两种运动方式，往往是在地壳中的不同方向地应力的混合作用下产生的复合运动，而这种运动方式往往会影响到断裂活动所释放的地震能量的大小。地球表层发育了许多断层，有的断层形成于较老的地质时期，现在已不再活动，这种断层不会发生大地震。发生大地震的断层都是活断层，是距今 10 万年以来活动过，未来也可能活动的断层，地震主要发生在这种活断层上。



图a 汶川地震中断层从白鹿中学教学楼前面通过，发生上下运动，断层右侧大楼所在地面相对左侧被抬高~1.8米。



图b 美国加州地震，断层活动导致两侧的田垄发生水平走滑运动。镜头远景一侧的田垄向右运动，近景一侧的田垄向左运动。

图2 断层活动的基本方式及实例：a，上下运动方式。b，水平运动方式，图片来自 Karl Mueller。

2. 地震，在玉树草原切了一道伤口

在普通大众的眼里，地震一般是山崩地裂、房倒屋塌。确实，地震时会发生“地裂”。这是因为，地震是断层活动引起的，断层运动时会将断裂两侧的地层错开，在地表产生破裂。这就像大地被划了一道口子。地震产生的地表破裂带，包含了关于地震断层的许多信息，成为我们认识断层活动的突破口。



图3 玉树地震地表破裂带（陈立春摄）。破裂由一系列隆起的鼓包、张开的裂缝，相间排列而成。

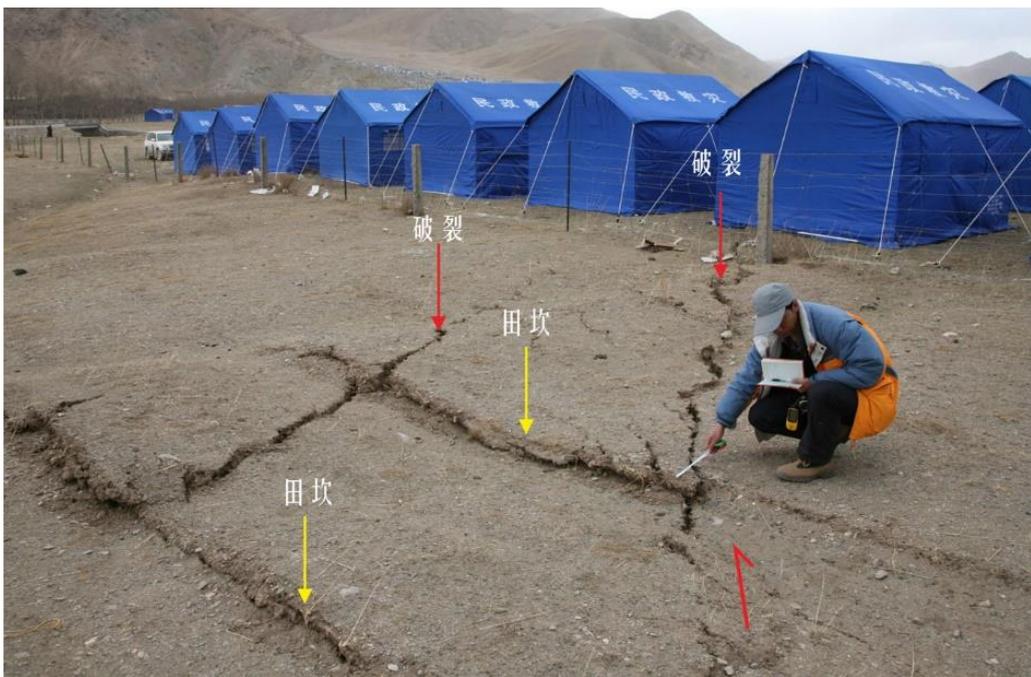


图4 玉树地震地表位移（张永双摄）。此处两条破裂斜向排列，其中右侧一条将田坎水平错动 20cm，该破裂的右侧地面向着帐篷的方向滑动。

调查发现，在玉树 7.1 级地震震中以东 20km 处，产生了一条长约 30km 的地表破裂（图 3），伸展方向为西北-东南向。破裂将道路、田界、溪流、堤坝、栅栏、房屋等水平错断（图 4），在穿过河流的地方还造成跌水。地震破裂由一条条破裂首尾叠加、斜向排列组成一条宽度 10-20 米的破裂带。破裂产生的水平位移一般在 0.5 到 1 米之间，最大位移为 1.8 米，小的一般不到 0.5 米。上述现象都显示，这次地震为一次典型的走滑型地震。

3. 为什么是玉树？

玉树所在的青藏高原是全球最高的高原，它是印度板块和欧亚板块在距今 5500 万年前开始发生碰撞并不断隆起的产物。青藏高原不仅号称世界屋脊，而且是全球地震活动最强烈的地区之一，是世界三大地震带之一的地中海--喜马拉雅地震带的组成部分（图 5）。另一方面，青藏高原自南向北又被大型活动断裂带分割成多个次一级的地块（图 6）。这些地块之间的边界带往往会发生 7-8 级地震。在这些次一级的地块中，有一个近东西向的长条状地块，叫巴颜喀喇地块。它位于青藏高原中部，其四周边界均为活动断裂带，是青藏高原最活跃的地块之一，近年来我国大陆 7 级以上的地震主要围绕这一地块的边界带发生。

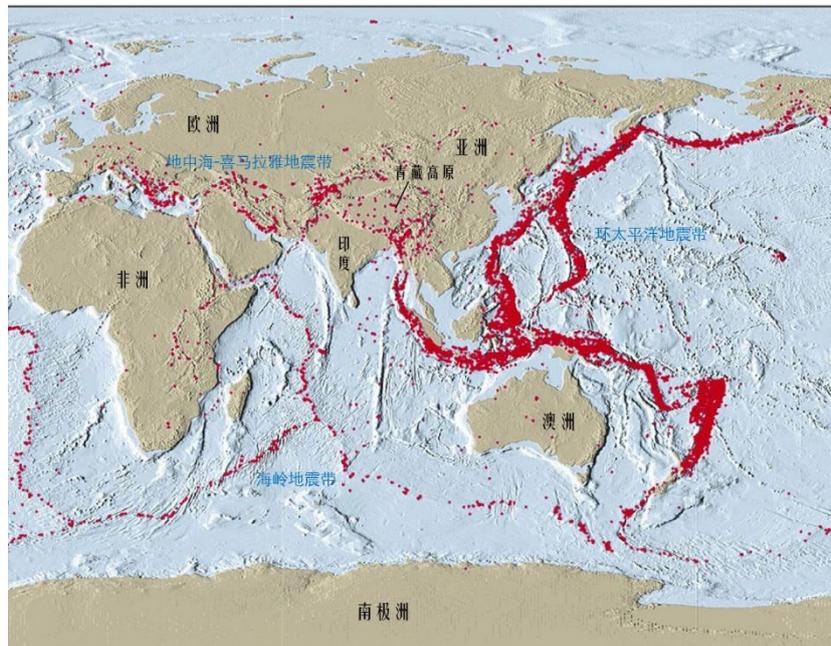


图 5 地中海--喜马拉雅地震带的位置。红色圆点代表一个个地震的位置，许许多多红色圆点叠置显示了地震带的存在。图中同时显示了另外两大地震带的局部。

研究发现，印度板块向北推挤，青藏高原地块持续隆升，造成次一级的巴颜喀喇活动地块向东挤出。地块的挤出运动导致断裂活动，这是巴颜喀喇地块边界带上大地震频繁发生的原因。玉树地震之前，在该地块的四个边界分别发生了 1997 年玛尼 7.9 级、2001 年昆仑山 8.1 级、2008 年于田 7.3 级和 2008 年汶川 8.0 级地震（图 6）。

玉树地震发生在巴颜喀喇地块的南边界，该边界主要由甘孜-玉树和鲜水河两大活动断裂带构成。鲜水河断裂带是我国著名的地震活动带之一，它的所有段落历史上均发生过 7 级以上大地震。甘孜-玉树断裂带位于鲜水河断裂带西侧，二者首尾相接。甘孜-玉树断裂带也是一条活动性很强的断层，有文字记录以来，该断裂带的其他段落都发生过大地震，只有玉树断裂没有记录到强震发生（图 6）。2010 年玉树 7.1 级地震填补了该断裂带上的这一空段。从这方面来说，地震在玉树发生并不意外。

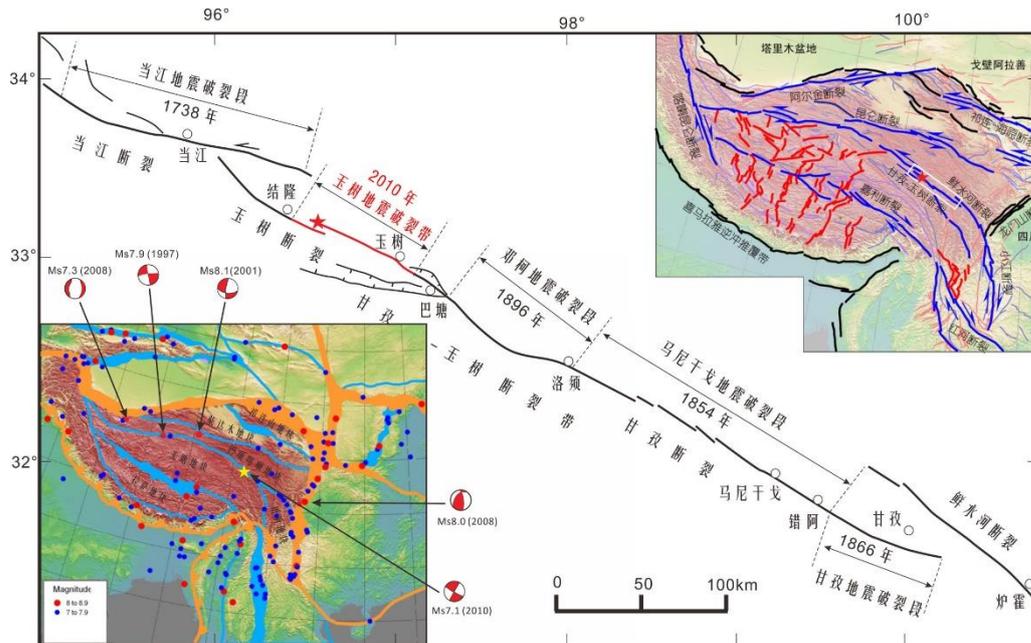


图6，甘孜-玉树断裂带与其所处的巴彦喀喇地块。左下与右上角分别显示青藏高原地区的地块划分和主要断裂带分布。左下图中，蓝色粗线代表地块边界，蓝色与红色圆点代表地震；右上图中，蓝色线条代表断裂带。二者中边界与断裂带是重合的。黄色、红色五角星均为玉树地震震中位置。

那么，产生玉树地震的是怎样的一条断层？让我们一起揭开它的面纱。

4. 玉树活动断裂——玉树地震的元凶

玉树地震地表破裂沿着玉树断裂发生，其破裂形迹叠加在玉树断裂的活动遗迹之上，充分说明玉树断裂是造成此次玉树地震的元凶。

玉树断裂与其东、西两侧的甘孜断裂和当江断裂一起组成了甘孜-玉树断裂带（图6）。甘孜-玉树断裂带总长约500km，沿西北-东南方向延伸，为走滑断层。在2010年之前，玉树地区由于没有发生强震的记录，人们对于其关注比较少，甚至认为它是一条弱活动或者不活动断层。玉树地震后10年来，随着工作的开展让我们逐渐对这条断裂有了一些认识。沿着2010年地震地表破裂的调查，发现更早之前断裂上重复发生地震的地貌证据，表明这条断裂是一条一直在活动的断层。那么，它的活动能力如何？一般首先看它的滑动速率。断层的滑动速率是指某个时段内断层发生错动的速度，一般用毫米/年表示，就是每年运动多少毫米。2010年地震后，我们利用无人机测量技术和放射性碳测年对玉树断裂的滑动速率进行了测定（图7）。我们选取小型河流废弃的河床，通过测量获得它们经历多次地震后沿断层产生的总位移（也叫累积位移）；同时，采集这些废弃河床沉积物的放射性碳年龄样品，得到河床发生这一位移需要的时间。利用位移与时间的比值，获得玉树断裂的走滑速率为~6.6毫米/年。这个数值比其东侧更为活动的甘孜断裂要小，近年来的研究结果认为甘孜断裂的水平滑动速率为8-10毫米/年。

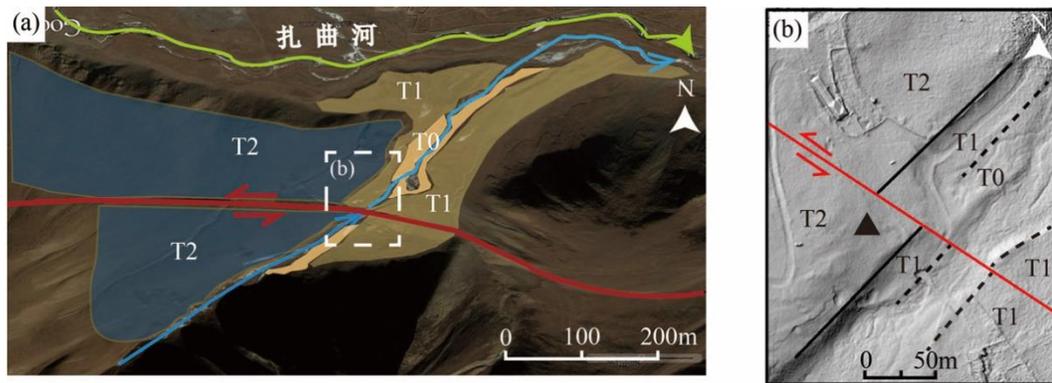


图7 玉树断裂的位移测量与采样。T1与T2代指两个不同时期的废弃河床，T2更早。红线为断层，黑三角为年龄样品采集点。

问题来了。断层的滑动速率越高，是不是意味着它发生的地震会越大？答案并不是肯定的。比如，同是走滑断层的海原断裂带，曾发生了1920年海原8.6级大地震，它的滑动速率才5毫米/年左右。那么，一条断层的滑动速率高，是不是说明它发生地震的频率也高？这个是有关系的，但还需要同时考虑另外一个数据，断裂的同震位移（断层在一次地震中发生的位移）。这个数据重要在哪里？

5. 2010 年地震，玉树断裂的一次非典型活动

一条断层上可能会发生各种震级的地震，这是由于断层有时会是整体活动，有时只是其中一部分活动。一条断层上如果重复发生震级相近的地震，我们称这种地震为特征地震（图8）。怎么理解呢？比如，一个跳远运动员通常能跳7米远，7米就是他的特征距离，而如果他跳5米或者6米就不是正常表现。特征地震也是如此，反映一条断层通常发生的地震大小。特征地震的产生往往是整条断层发生了活动。由特征地震产生的同震位移每次也是大小相近的，叫特征同震位移。利用同震位移和断层滑动速率的比值，可以得到一次地震发生的时间。因此，断裂的滑动速率需要与同震位移一起讨论，才能确定地震的发生频率。另一方面，通过比较特征同震位移与累积位移的关系，也可以认识断裂长期的地震行为。



图8 美国圣安德列斯断裂上的累积位移与同震位移（Robert E. Wallace 摄）。圣安德列斯断层是世界上著名的活断层，该断裂上地震重复发生，每次地震产生的位移均为10米左右，为特征位移。A与A'点对应的溪

沟在 1857 年大地震中发生了 10 米的位移，A 与 A' 在该地震之前本是同一个点。B 与 B' 点原来也是同一个点，随着断层的不断滑动相距越来越远，现在二者之间的距离为 130 米，大约由 12 次地震所形成。红色箭头位置及其延伸方向为断层。

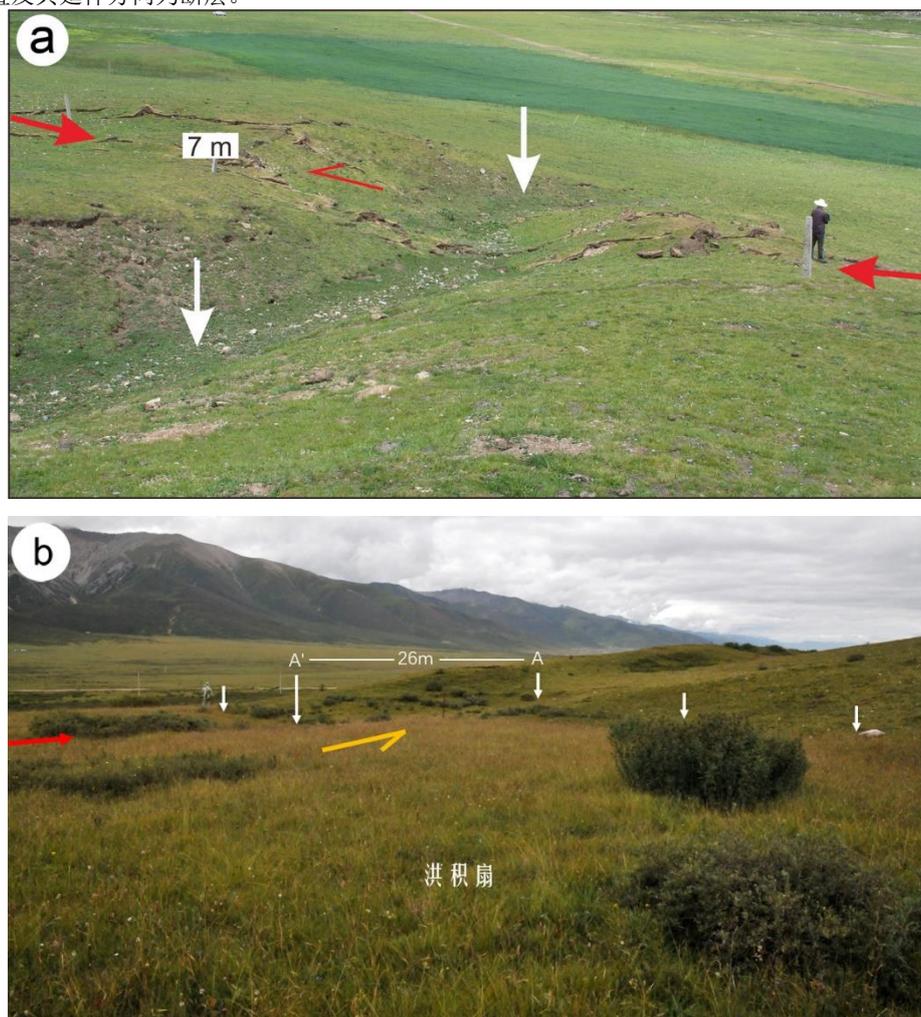


图 9 玉树断裂上的位移。a, 小溪沟被断层错动产生 7m 位移，为测量断层位移中最小的一组数值，两个相对红色箭头连接起来的位置为断层，白色箭头为小溪沟位置。b, 洪积扇被断层错动 26m，为最大一组位移，白色箭头指示洪积扇的边缘，A 与 A' 原本为同一点。红色箭头位置及其延伸方向为断层，黄色箭头指示断层右侧物质的运动方向。

我们根据野外实测并结合卫星影像测量，沿玉树断裂获得了年轻地貌体被断裂断错产生的位移量（不含 2010 年地震位移）。这些年轻地貌体发育较晚，它们记录的只是最新几次地震的位移。测量结果显示，位移明显分为几组，最小一组为 6-8 米，是由一次地震形成（图 9a）。而其他几组分别是这个数值的不同倍数，代表了不同次数地震的累积位移（图 9b）。这些位移分组特征显示，在玉树断裂上曾经以 6-8 米的相同位移发生过多地震。6-8 米的位移是玉树断裂的特征位移，其对应的地震是玉树断裂上的特征地震，是由整条断裂同时活动产生的。而 2010 年玉树 7.1 级地震的同震位移一般为 1 米左右，相对特征地震来说是一次具有小位移的“小”地震事件，不是玉树断裂上的特征地震，是玉树断裂的一次非典型活动。它的发生可能是近期巴彦喀喇地块各个边界的活动对玉树断裂的触发作用所造成。

这么看，玉树断裂果然是一条活动性比较强的断层，而且该断裂上可能会重复发生更大震级的地震。对于这样的活断层，研究人员还有一项需要做的工作，就是确定它发生一次特

征地震的时间间隔。

6. 玉树断裂多久会发生一次大地震？

要回答这一问题，需要了解玉树断裂以前发生过的地震信息。根据断裂上地震发生的历史，就可以得知其发生一次地震的时间。但是，从一次地震之后到下一次地震的发生，其时间间隔往往比我们人类有历史记载的时间要长很多。于是，研究者们想到利用地震“考古”的方法，也就是古地震研究的方法来进行研究。通过发掘保存在地质记录中的地震信息，就能够在一个更长的时间范围内研究地震活动的历史。研究古地震最常用的方法是开挖探槽（图10）。通过选择合适的地点，在地表挖开一个深度为几米的长方体凹槽，揭露和识别沉积地层中保存下来的地震遗迹，由此恢复之前已发生的强震的历史。

玉树地震发生以后，研究者在玉树断裂的不同段落开挖了十几个探槽来揭露断裂上的古地震事件（图11）。结果发现，在这次地震破裂的下面，保存着多次史前地震的遗迹。综合所开展的这些古地震研究，对玉树断裂的古地震事件进行了逐次界定。研究表明，玉树断裂上在距今6,000年以来共发生过四次古地震，这些地震之间相隔的时间为1150-1800年不等。也就是说，玉树断裂发生一次大地震的时间间隔为一千多年。同时，从探槽揭露的古地震特征看，这些地震均为玉树断裂上的特征地震。利用断裂长度与震级的经验公式分析，这样一次地震的震级大约是7.5-8.0级。

古地震研究结果同时说明，玉树断裂在地质历史时期就一直是地震活跃地带。这无疑也给我们一个重要的警示，工程建设和防灾规划中必须对活断层有足够的重视，才能预防和减轻它可能给我们带来的危害。



图10 古地震研究的探槽。1999年台湾集集7.6级地震后，在发生地震的车笼埔断层上开挖了探槽，以研究它的古地震历史。图片来自Karl Mueller。

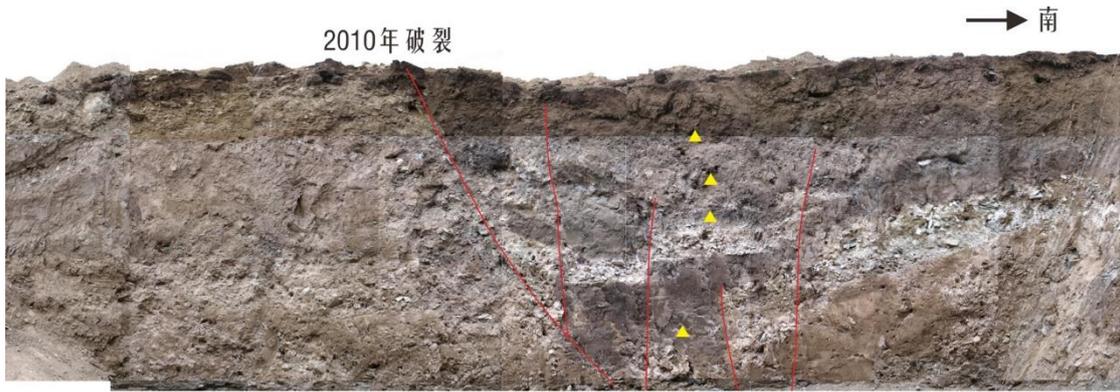


图11 玉树断裂上的古地震探槽剖面。红色线条代表断层，黄色三角为年龄样品点。

地震是一个十分复杂的自然现象，我们对它的认识还很有限。这一方面需要加强科学研究，逐渐加深对它的了解，另一方面，要强化全社会的防震减灾意识，学会如何更好地与自然灾害共处，最大限度地减轻地震灾害所造成的损失。