

文章编号: 1008-2786-(2016)5-545-10

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000161

利用树木年轮重建滑坡复活时间的方法

丁苗¹, 白世彪^{1*}, 王建¹, 商志远¹, 赵业思¹, 赵俏玲²

(1. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏省环境演变与生态建设重点实验室,

虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210023;

2. 三亚市海洋与渔业监测中心, 海南 三亚 572000)

摘 要: 认识过去滑坡等灾害事件发生的频率, 是自然灾害风险评价的重要任务之一。树轮由于其定年准确、分辨率高和时间尺度相对较长等特点, 在重建滑坡等山地灾害复活时间和发生频率的研究中发挥了重要作用, 其对预测滑坡体未来发生滑动的概率具有重要的意义。为了提高利用树木年轮重建滑坡复活时间的可靠性和准确性, 首先阐述了树轮重建滑坡活动时间的野外采样方法, 如滑坡区与参照区的选择、树种的选择、样品采集方式的选择。其次, 介绍了室内样品的处理和分析方法, 主要是根据树木受滑坡滑动影响后表现出的不同形式, 选择适合的指标进行分析, 例如传统的年轮宽度分析法、树木倾斜时的压力木分析法、树木受伤时的愈伤组织及创伤树脂道分析法及木质细胞的大小变化分析法。其中, 分析愈伤组织及创伤树脂道能使重建滑坡复活的时间更精确。最后对国内开展树轮重建滑坡等山地灾害复活的时间和发生频率等研究进行了总结和展望。

关键词: 树轮; 滑坡; 灾害; 采样方法; 样品分析

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

随着滑坡、泥石流等山地地质灾害性事件发生频率的增加, 地质灾害风险管理和评价受到了越来越多的关注。滑坡风险分析与评估主要包括滑坡空间概率、危险性和风险评估三个方面, 目前滑坡风险评估处于从定性到定量估算的发展阶段, 存在很大的技术难点和问题^[1-2], 其中滑坡危险性(Landslide hazard)是滑坡空间概率、时间概率以及规模的函数^[1-4]。滑坡时间概率是滑坡危险性评估的关键内容之一^[2]。

许多树种可以存活几个世纪甚至更长的时间, 在对缺乏较长历史记载的地区, 应用树轮重建滑坡、

崩塌和泥石流等灾害事件的发生时间, 预测该地未来发生滑动等的概率具有重要的意义。滑坡复活是指滑坡在初次滑动后的再活动。虽然一次灾害性的滑坡复活事件可能会毁灭其上生长的所有乔木或灌木, 但是经历强度较小、速度较慢的灾害事件的乔木或灌木可以存活下来, 这种再活动的强度和速度应该足以影响乔木或灌木的生长, 如: 树木断头、倾斜、撞击的痕迹或者根部的断裂、暴露, 这些损伤都记录在了树轮里面^[5-10]。这些记录下来的损伤为利用树轮重建滑坡、崩塌、泥石流等灾害事件复活的时间、发生频率、时空分布规律以及预测将来发生的概

收稿日期(Received date): 2014-10-07; 改回日期(Accepted): 2014-12-19。

基金项目(Foundation item): 2015 年省重点研发计划(社会发展)项目(BE2015704); 江苏高校优势学科建设工程(164320H101)和国土资源部黄土地质灾害重点实验室开放基金资助项目(GLA2014005)。[The 2015 Jiangsu Provincial Key R & D Program (Social Development) (BE2015704); the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (164320H101) and The Opening Fund of Key Laboratory for Geo-hazards in Loess area (GLA2014005).]

作者简介(Biography): 丁苗(1989-), 女, 硕士研究生, 自然地理学专业。[Ding Miao (1989), female, M. Sc candidate, major in Physical Geography.]E-mail: ddylyq@sina.com

* 通信作者(Corresponding author): 白世彪(1974-), 男, 教授, 主要从事自然地理学和滑坡等自然灾害的相关研究。[Bai Shibiao (1974), male, professor, research interests are physical geography and natural disasters (landslide and debris flow).]E-mail: shibiaobai@njnu.edu.cn

率等研究,提供了可靠的手段和方法。

利用树轮分析确定滑坡复活时间需要一定的前提条件,必须在初次滑坡迹地内尚存一定数量的长寿命的木本植物,这些植物由于受到滑坡的影响出现生长变化,并且它们未在随后的滑坡再活动中消亡,这样的滑坡才能采取本文的方法确定再活动的时间或次数。利用树轮重建滑坡灾害发生时间的可靠性,取决于在野外树轮样品的采集和在实验室内对样品的处理及分析。国内用树轮来重建滑坡复活的时间和时空分布规律等研究的采样方法及样品处理、分析成果鲜见^[7-10]。本文对树轮样品的野外采集方法和实验室样品的处理及分析进行了阐述,并对国内利用树轮重建滑坡等山地灾害事件复活时间等研究进行了总结和展望。

1 采样环境的选择

树木生长非常复杂,受到许多环境因子的影响,包括树木的位置、土壤的湿度、温度、坡度等^[7]。在受到滑坡滑动影响的区域内,要采集适合重建滑坡灾害时间的乔木或灌木,需要通过野外调查和区分出滑坡发生滑动以及没有发生滑动的区域。树轮样品采集环境的选择需要遵循以下几点原则:1. 选择未受人类活动影响的树木。公园、庭院、道路旁等处处于人类浇灌、移栽的树木一般不宜作为样本被采集。2. 生长在干旱、半干旱地区的滑坡体上的生长条件较差的林缘木和孤立木,以及高寒地区和高海拔地区的树木都适合作为本来采集。3. 要尽量选择明显受滑坡滑动影响的乔木或灌木,且树龄较长的树木。

2 树种的选择

树种选择的重要依据是看年轮宽度的变化对滑坡等灾害响应的敏感度。敏感度较高的树种一般都生长在限制性因子地区。如果在一些干旱半干旱或冰缘等地区,可能只生长灌木,那么即使此地为非限制性因子区域,也可以采集灌木。树种应尽量选择同一树种,以本地区的建群种为最佳。由于不同种的植被生长特征不一,所以在对滑动区和参照区上的样品进行年轮对比时,一般挑选同种样品进行对比分析。野外还应选择树龄较长的树种。一般来说,年代较短的树木重建的滑坡灾害的年表意义不

大,较少被选用;而一些长寿的树种是生长在中高纬度和高海拔地区的针叶树^[8],要求该树种的年轮界线清晰,以便于确定年代和测量宽度。年轮界线清晰与否根据野外采集经验,目测即可判断。

国外已经进行了大量的利用树轮重建滑坡等灾害活动的研究,采集的样本的气候带、海拔、树种及数量见表1。在当前国外的研究中,可见的研究树种主要有针叶树中的白云杉^[12]、云杉^[13]、黑松^[14-15]、山地松^[16-17]、高山松^[18]、兴凯赤松^[19]、道格拉斯松^[15,20]、柔枝松^[15]、亚高山冷杉^[15]、意大利五针松^[21]、克里米亚松^[22]等,阔叶树中的土耳其橡树^[23]、欧洲栎树^[24]、橡树^[14]、桤木喜树^[25]、欧洲山毛榉^[26]等。还有部分灌木:瑞士柳树^[29]、欧洲锐刺山楂^[30]。总体而言,用于树轮地貌学重建滑坡活动时间所用的树种,针叶树多于阔叶树,环孔材多于散孔材,硬木多于软木,对灌木的研究还较少。

3 标本的采集方式

在确定研究区域内的树种适合用于进行滑坡灾害重建研究工作之后,就开始进行树轮样品的野外采集工作。为获得充足树轮样品来进行地质灾害的重建,首先需要在研究区域内的滑坡体上对明显受到滑坡事件影响的树木进行采集,然后在滑坡附近的森林群落中采集未受影响的树木,即参照树样品采集,以便于其相互对比,准确确定事件发生的时间。

样品的采集可以通过以下4种方式进行:1. 圆盘片采集;2. 楔形木采集;3. 树芯采集;4. 根部采集。圆盘片和楔形木标本的采集有利于年轮的全方位分析,但是这种方法会严重毁坏树木,并且将标本运回实验室也要花费极大的人力、物力和财力。圆盘的采集一般使用油锯或长柄龙锯。然而对于灌木,尽管采集圆盘会使其严重毁坏,但为了更好的观察年轮的变化特征,灌木样品采集的主要方式仍为圆盘。近年来,用生长锥进行树芯的采集,是标本采集的主流方法。按照国际年轮资料库的要求,一组标准的标本至少要取10~20棵树木的钻芯,并且每棵树木要取2个或以上的钻芯复本。这种方法在取样、运输和保存中都较方便省力。第四种采样方法是采集乔木或灌木的根部。因为乔木或灌木在受到滑坡灾害事件影响后,有时根部细胞变化比树干细胞变化更明显。

表 1 树轮重建滑坡活动时间研究概况
Tab. 1 Overview of landslide activity reconstruction using tree rings

作者及文献年代	气候带	海拔 /m	滑坡体上的树种	样本数
Stefanini ^[23] 2004	北温带	625 ~ 956	土耳其橡树(<i>Quercus laevis</i>) 欧洲铁木(<i>Ostrya</i>) 和多种灌木	—
Saez et al ^[16] 2012	北温带	1 600 ~ 1 680	<i>Pinus uncinata</i> 松	99 棵树
Corominas et al ^[24] 2010	北温带	980 ~ 2 332	欧洲栎树(<i>Quercus robur</i>)	254 棵树
Begin et al ^[12] 1987	北温带	30 ~ 45	白云杉(<i>Picea glauca</i>)	305 棵树
Migoñ et al ^[13] 2010	北温带	约 936	云杉(<i>Picea asperata</i>)	32 棵树
Saez et al ^[27] 2012	北温带	1 740 ~ 1 980	<i>Pinus uncinata</i> 松	223 棵树
Fantucci et al ^[14] 1999	北温带	500 ~ 800	橡树(<i>Quercus palustris</i>)	24 棵树
Carrara et al ^[15] 2003	北温带	1 950 ~ 2 250	道格拉斯松(<i>Douglas F. Lamont</i>) 黑松 (<i>Pinus thunbergii</i> Parlatore) 柔枝松(<i>pinus flexilis</i>) 亚高山冷杉(<i>abies faxoniana</i>)	—
Saez et al ^[17] 2009	北温带	600 ~ 1 700	<i>Pinus uncinata</i> 松	—
Saez et al ^[18] 2012	北温带	1 470 ~ 1 750	高山松(<i>Pinus densata</i> Mast)	403 棵树
Kashiwaya ^[19] 1987	北温带	—	兴凯赤松(<i>Pinus densiflora</i> var. <i>ussuriensis</i>)	—
Carrara ^[20] 2007	北温带	1 830 ~ 2 150	格拉斯松(<i>Douglas F. Lamont</i>)	13 棵树
Bollati et al ^[21] 2012	北温带	> 1 000	意大利五针松(<i>Pinus pinea</i> L)	45 棵树
Šilhán et al ^[22] 2012	北温带	430 ~ 1 140	克里米亚松(<i>Pinus nigra</i> ssp. <i>pallasiana</i>)	225 棵树
Paolini et al ^[25] 2005	亚热带	400 ~ 2 700	桤木喜树(<i>Alder C. acuminata</i>)	—
Eeckhaut et al ^[26] (2008)	北温带	10 ~ 150	欧洲山毛榉(<i>European beech</i>)	147 棵树
Corominas et al ^[28] 1999	北温带			
Roer et al ^[29] 2013	北温带	2 000 ~ 2 550	瑞士柳树(<i>Swiss willow</i>)	20 株灌木
Thomas et al ^[30] 2001	北温带	—	欧洲锐刺山楂(<i>Crataegus oxyacantha</i> L)	56 株灌木 112 根树芯

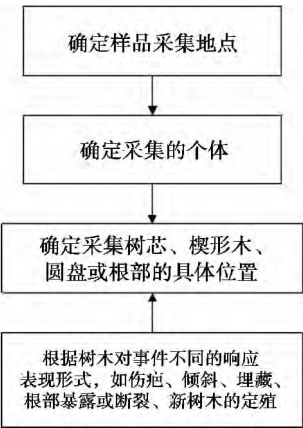


图 1 标本采集步骤

Fig. 1 Steps of Specimen collection

对每一个样品的采集都要记录以下野外信息：样品编号、胸径、每棵树的样品数量、采样方向、GPS 定点数据、采样高度和坡向。标本采集步骤如下(图 1)：

1. 确定样品采集地点。利用当地的地形图和地质图以及当地以前发生过的灾害事件的工程报告、

档案数据或者有关报道来确定以前发生的事件的时间和地点。

2. 确定采集的个体。观察树干表面是否有明显受到过事件干扰的标记，根据详细的地形图来看该个体是否在所研究事件的影响区域内。根据上述两点确定采集的研究样本。

3. 确定要采集的树木的树芯、楔形木、圆盘或根部。根据树木对事件不同的响应表现形式，决定树芯采集的具体部位以及楔形木、圆盘或者根部样品。根据以下 5 种不同的树干或根部响应形式进行滑坡体上样品采集：

1) 伤疤。从树干或根部受伤最明显处采集圆盘，可以很容易确定过去灾害事件发生的时间。另外，也可以从树干的过度生长的愈伤组织上锯下楔形木，在伤口的相反方向提取树芯。万一圆盘和楔形木都不能从受伤的树干上提取，那么也至少要提取两个树芯，一个在过度生长的愈伤组织上提取，另一个在伤口的相反方向提取

从图 2 中可看出，提取树芯时如果在伤口处

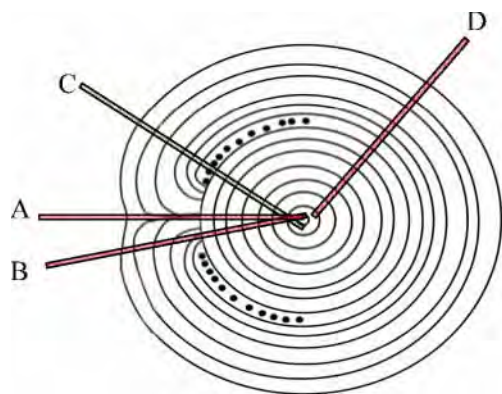


图2 树芯采样位置图

Fig. 2 Location of tree ring sampling

(A) 或者在过度生长的愈伤组织处(B)提取的树芯,上面的年轮都是不完整的,因为伤口在树芯的边缘处闭合。在(C)处提取树芯是非常理想的,因为该处接近伤口,并且愈伤组织和创伤树脂道可以用来精确确定灾害事件发生的时间。在(D)处提取树芯就离伤口太远,该处的年轮没有受到干扰事件的影响,因此不能用来确定灾害事件发生的时间。

2) 倾斜。如果树木受到灾害事件的影响而发生树干倾斜,那么至少每棵树要提取两个树芯,一个在倾斜的方向上提取,另一个在反方向提取。单个树芯的采集最好是在树木形态学上的树木最倾斜处。树木发生倾斜同样会反应在其根部,使得根部年轮出现偏心生长。因此也可以采集树木的主要根系的根盘。

3) 埋藏。如果树干被埋藏,那么在相反的两个方向上提取两个树芯(最理想是在上坡和下坡方向上提取树芯)。采样高度最好选择在尽可能接近地面处,这样可以尽可能多的提取到灾害信息。树干被灾害事件携带的泥沙埋藏后,会新的地表面上生长不定根,通过采集的不定根也可确定树干被埋藏的时间,若灾害事件导致树木断头,采样高度最好在断头高度之下,这样也可以获得尽可能多的年轮中记载到的灾害信息。

4) 根部暴露或断裂。根部暴露的树木一般要采集圆盘,因为这种树木经常缺轮,根部由于滑坡等灾害事件的影响会出现断裂,这时可以采集残留的根系。并且要详细记录采样地点的地面状况或者根部没有被侵蚀的部分。

5) 新树木的定殖。在事件过后的新的平面上生长的树木,利用在树干基部提取的树芯显示的树轮数量来确定事件发生的时间。但是这种树木要考

虑滑坡事件发生后到新树木定殖的间隔时间。

最后,按照上述采样方法,利用复本原理^[8]、尽可能多的采集受滑坡灾害事件影响的年轮样品。采集完受影响的样品之后,就要进行参照树样品的采集,以便于其相互对比,准确确定事件发生的时间。参照树要选择在灾害事件附近的森林群落中未受影响的树木,且选择的参照区应该与滑坡区的坡度、坡向、地形、土壤等因素一致。通常,参照树木的采集要遵循以下两个原则: a. 没有明显的受伤或者疾病的标记,目的是把非气候影响树木生长的因素降到最低,但是如果病虫害爆发、比较严重的干旱事件的发生、火灾的发生等等这些既影响滑坡体中的植物,也影响参照区的植物,在对参照区和滑坡体上的年轮进行对比时,发现二者变化相似,也能将非滑坡事件的发生时间排除。然而,如果滑坡体在某年发生了滑动并且导致其上生长的树木年轮出现了生长异常,正好该年又出现了某种非滑坡事件同时影响了滑坡区和参照区,导致生长在他们上面的树木年轮也发生变化,那么这一年即使发生了滑坡复活事件,我们也无法将该年纳入滑坡复活的时间序列,这是利用树轮重建滑坡复活时间的一个缺陷。b. 为了最大限度地扩大采样树木的年龄和得到最长的树轮年表,参照树要采集最老的树,参照树的树芯要选在垂直于坡面约 130 mm 的胸高处采集。一般每个树种要采集约 30 棵树,以尽量减少地貌过程和隐性生长扰动的潜在影响。

4 实验室样品处理

将采集到的树芯样品、灌木圆盘及根部运回实验室,在距根颈大约 2 cm 处,用小锯子锯出一个根盘。为了使年轮及细胞结构清晰可见,首先将样品摆放在通风处风干 15 ~ 30 d,把干燥后的树芯样本粘贴在事先准备好的样品槽中,继续风干 1 ~ 2 d,粘贴在样品槽中只针对树芯,树盘及根盘则不需要。然后使用 100 ~ 600 目的砂纸对树芯样品、树盘及根盘进行打磨,直至在显微镜下年轮细胞和界线清晰可见为止^[8]。在实验室,对没有完全木质化的灌木树盘或根盘进行打磨时,要注意力度和速度,尽量慢点、轻点,因为他们极易碳化。对于灌木树盘或根盘,由于其直径较小,一般可以将其放在显微镜下,照出放大 400 倍的数字相片,使其年轮的解剖结构清晰可见。然后使用树轮宽度仪的测量系统逐年测

量树轮宽度两次,并取平均值以减小误差。利用骨架图对样芯之间进行交叉定年,再利用 COFECHA 程序对定年结果进行质量控制检验(图3),得到采集样品的年龄长度^[5,31]。

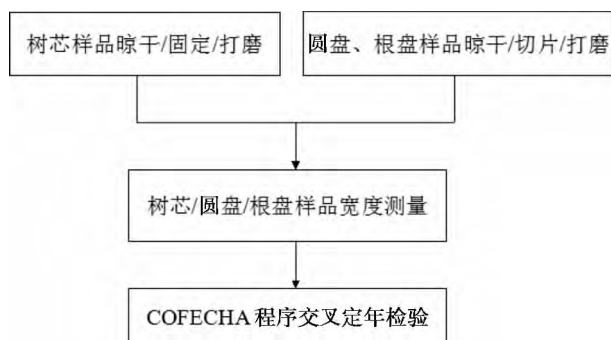


图3 实验室样品处理流程

Fig. 3 Basic procedures of sampling in laboratory

5 滑坡事件在年轮样品中的表现

5.1 样品出现生长减少

通过分析样品中生长减少开始出现的时间,从而确定滑坡发生的时间。树木受到滑坡影响,使得树干被埋藏或发生断头,导致生长抑制,树轮出现窄轮。

洪婷等^[8]利用年轮宽度连续3 a 的生长量变化作为确定滑坡发生年份的指示标准,重建了位于甘肃省九房山滑坡的3个复活时段:1980—1982年、1984—1987年和1991—1993年,其中1992年和1993年的滑坡滑动与当地资料记载一致。

Lopez - Saez Jérôme^[16]在 Bois Noir 滑坡体附近采集到79棵严重受损的高山松(*Mountain pine*),一共发现了151个生长扰动(GD),并利用某一年年轮宽度与前一年树轮宽度对比减少50%,且连续5年的宽度生长量减少,将生长开始急剧减少的起始年作为滑坡发生的标志,重建了1874—2008年间滑坡的8次复活年份。这些重建结果被当地历史记载和附近地区的航片所证实。

利用生长量减少重建滑坡活动是一个比较传统的手段。大部分研究表明,利用年轮宽度的变化重建滑坡发生的时间只能将时间精确到年份。因此,在需要进一步精确滑坡发生时间的要求下,利用其重建滑坡复活时间有其缺陷。

5.2 样品出现偏心生长及压力木

通过分析样品中偏心生长及压力木开始出现的

时间,可以确定滑坡发生的时间。一棵树受到滑坡缓慢但持续的扰动,会发生倾斜。一棵倾斜的树木将会努力恢复其直立状态,从而形成偏心生长及压力木。

Miet Van Den Eeckhaut 等^[32]对比利时阿登山 Koppenberg 森林一个深层旋转型古滑坡进行研究,在分析样品中出现的偏心生长,利用 Braam 等(1987 b)定义的树木偏心计算公式: $E_i = (R_{Li} - R_{Oi}) / (R_{Li} + R_{Oi})$,其中 E_i 为第 i 年样品的偏心率, R_{Li} 为第 i 年倾斜方向(即样品的最长半径方向)的年轮宽度, R_{Oi} 为第 i 年垂直于倾斜方向的年轮宽度,计算出显著偏心的年份。得到了在滑坡上出现偏心轮的年份主要集中在1951—1954年、1969—1970年、1980—1985年和1988—1992年。Malgorzata Wistuba 等^[33]在欧洲中部喀尔巴阡山和苏台德山的3个滑坡上采集到118棵受滑坡影响的云杉,在附近地区采集到22棵云杉作为参照树。利用树轮偏心指数,得出参照树的树轮偏心指数值一般不超过正负100%,然而在滑坡上采集到的样品的树轮偏心指数值一般能够达到百分之几百至百分之一千,研究了滑坡的发生时间。Karel Šilhán 等^[34]也在欧洲中部喀尔巴阡山一个不稳定坡体上采集了274棵阔叶树,同样利用树轮的偏心生长率,确定了坡体上不同部位滑坡复活的时段。Ellen Gers 等^[26]在德国莱茵黑森西北部的第三级斜坡滑坡活动处,使用灌木的偏心生长(图4)确定了滑坡发生的时间为1981—1982年。

针叶树或阔叶树出现了由厚壁致密细胞形成的黄褐色或棕红色的树轮^[17],则认为其形成了压力木。而对于小灌木来说,因为其缺少主干,故很难观察到压力木。一般我们在显微镜下观看因出现压力木而导致的异常细胞结构,看异常细胞结构出现在树轮中的早早材、晚早材、还是晚材就可以精确确定滑坡发生的季节甚至月份(图5)。Lopez - Saez Jérôme 等^[27]对法国南部阿尔卑斯山地区的 Aiguettes 滑坡进行研究,利用223棵严重受损的山地松(*Pinus uncinata*)形成的生长变化和压力木,确定了滑坡发生的季节。Lopez - Saez Jérôme 等^[16]在该地区的 Bois Noir 滑坡体附近采集到79棵严重受损的高山松,利用年轮中压力木开始形成的月份,精确了滑坡发生的月份:在1874—1875年、1896—1897年、1946—1947年、1992—1993年和2003—2004年树木倾斜出现压力木是在前一年的10月到

当年的4月;1963年、1977年和2000年在7—9月树木倾斜出现压力木。



图4 具有明显偏心生长的灌木树盘^[26]

Fig. 4 Cross section of shrubs with apparent accentricity^[26]

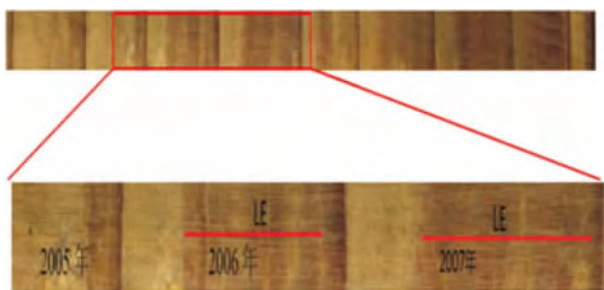


图5 通过压力木开始形成的时间确定滑坡发生的月份

Fig. 5 Determine the month of landslide reactivation based on the onset of compression wood

当前利用年轮中出现的压力木,可以将滑坡复活的时间精确到季节甚至月份,尤其是对受滑坡滑动的影响,树干出现倾斜的树木,在实验室内利用其年轮内出现的压力木,可以最好的精确确定滑坡复活的时间。

5.3 样品在伤疤附近出现愈伤组织和创伤树脂道

在对样品进行分析时,观察创伤树脂道可以作为进一步确定年内滑坡发生的依据,观察年轮内愈伤组织的第一层细胞开始形成的时间就是滑坡发生的季节^[10, 12, 16, 23-24, 27]。由于受到滑坡所引起的落石的撞击,树木出现伤疤,形成层细胞被破坏,在受伤的部位就不会有年轮形成^[33]。在伤疤的边缘,形成层开始过度生长愈伤组织^[35-36],而临近伤疤的地方会出现创伤树脂道^[6, 35, 37-38](图6)。通过创伤树脂道和过度生长的愈伤组织开始出现在早早材、中早

材、晚早材、早晚材,还是晚晚材,可以确定滑坡发生的季节甚至月份。Markus Stoffel等^[39]在瑞士阿尔卑斯山南部森林区域的一个斜坡上,从18棵落叶松中采集到270个圆盘,为了把重建的落石事件的时间精确到季节甚至月份,他将1a的年轮划分为:早早材、中早材、晚早材、早晚材和晚晚材5部分(图7),并利用树轮中开始形成的愈伤组织和创伤树脂道的时间,成功确定了落石事件发生的季节。

不同树种的生长周期不一样,所以我们在利用创伤树脂道和过度生长的愈伤组织确定滑坡发生的时间时,要了解该树种出现早早材、中早材、晚早材、早晚材还是晚晚材的月份。Markus Stoffel等^[39]利用Täschgufer, Täsch (Swiss Alps)区域 *Larix decidua*, *Pinus montana* and *Pinus uncinata* 三种针叶树的生长周期,将该地区落石事件的发生时间精确到月份。

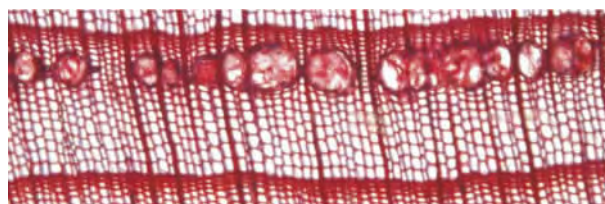


图6 临近伤疤处形成的愈伤组织^[39]

Fig. 6 Traumatic resin ducts (TRD) bordering impact scars^[38]

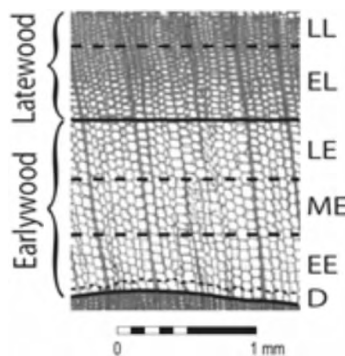


图7 年轮的划分^[39]

Fig. 7 Subdivisions of a tree-ring^[39]

利用年轮中出现的愈伤组织和创伤树脂道,同样可以将滑坡复活的时间精确到季节甚至月份,此种方法针对的是受滑坡滑动影响受到外力撞击而出现伤疤的树木。相对于利用压力木确定滑坡复活的季节或月份,利用愈伤组织和创伤树脂道确定的时间更准确。因为树木受伤后在一个星期左右即可形成,而树木受倾斜后出现压力木的时间会远超过一个星期,滞后时间更长。所以如果年轮样品中同时

出现压力木和愈伤组织及创伤树脂道,为了更准确的重建滑坡复活的季节或月份,最好利用愈伤组织及创伤树脂道。

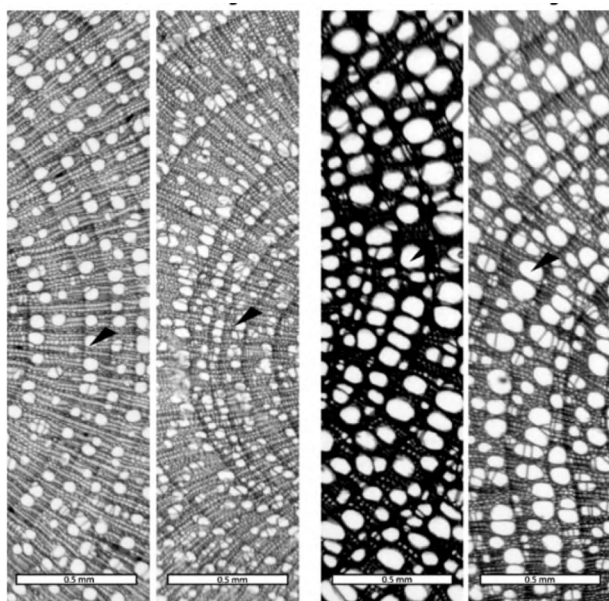


图8 左图为活动区根部细胞,右图为稳定区根部细胞:
黑色尖头指示细胞^[29]

Fig. 8 Micro-sections of Swiss willow roots from an active (left) and inactive rockglacier (right); black arrows indicate vessels^[29]

5.4 样品中年轮细胞的大小

如果利用灌木来重建滑坡事件,因为处在滑动区与稳定区样品的树轮宽度的变化不明显,故就不能简单的比较树轮宽度的变化,可以通过分析灌木根部年轮在受到机械压力后细胞大小的变化。Isabelle Gärtner-Roer等^[29]在瑞士阿尔卑斯山南部的图尔特曼山谷采集了受滑动影响区域的及稳定区的灌木瑞士柳树,通过比较在滑动区与稳定区采集的柳树根部细胞大小,发现在滑动区根部细胞比稳定区的根部细胞要小得多(图8),可以利用这种年轮细胞的大小来重建滑坡事件发生的时间。

目前利用年轮中细胞大小的变化,重建滑坡复活的时间,一般只能将复活时间精确到年份,较少达到季节。所以如果想将滑坡复活的时间进一步精确,最好是利用压力木或愈伤组织及创伤树脂道。

在对样品进行分析时,观察到的生长扰动往往不是以某种单一形式的出现。Saez等^[40]研究法国阿尔卑斯山北部的Manival泥石流,对156棵樟子松树上采集到的312个树芯样品在实验室内进行分析,发现了357个生长扰动,其中169个生长扰动为

压力木;15个出现愈伤组织,164个为生长减少或生长增加。利用这些生长扰动,重建了1931—2008年间出现的13个泥石流事件,分别出现在1931、1936、1946、1953、1956、1967、1972、1974、1975、1981、1989、1990和2000年。

6 确定滑坡事件年份的方法

对滑坡活动事件的确定,是基于在同一年中所有的树芯样品出现生长扰动(growth disturbance, GD)(生长减少、偏心生长及压力木)的个数和在滑坡体上受影响的树木的空间分布来确定的。由于年代较近的年份样品量较多,呈现的GD个数也就越多,为了避免过高的估计近年来GD的个数对滑坡滑动事件的影响,在此,采用Bulter和Malanson^[41]提出的指数值 I_t (公式1)进行质量控制:

$$I_t = \left(\sum_{i=1}^n (R_i) / \sum_{i=1}^n (A_i) \right) * 100 \quad (1)$$

R 表示在 t 年受事件影响而产生的GD的数量; A 表示所有样品中,在 t 年存活的树木的总数。在一次初始事件发生之后,树木可能不会马上产生可以指示事件发生的有用数据(如:树木可能会形成一个窄轮带,这样连续的生长扰动就不会被发现),这就是在 t 年要把 I 值调整到树木只记录有效数据的数值。这个阈值的使用会减小由于其他地貌过程导致的GD被误认为是本次事件所导致的可能性。并且还要求样品中至少10棵树表现出对这次事件的响应,以避免早期记录中高估了树木响应的百分比^[42-44]。一般将 $I_t > 5\%$ 的年份作为滑坡事件年份,对 $2\% \leq I_t \leq 5\%$,且出现GD的树木数量 > 5 的年份进一步用Moran指数检验^[24]。当样品量为30~50棵树时,最理想的 I_t 阈值为5%,且此时 $GD \geq 2$;当样品量 > 200 棵树时,最理想的 I_t 阈值减少到2.5%,且此时 $GD \geq 5$,这样可以更准确的重建滑坡事件发生的年份^[45]。

7 结论与讨论

7.1 结论

本文介绍了利用树木年轮重建滑坡灾害复活的时间和发生频率等研究的基本流程。由于针叶树在欧洲和北美分布较广且树龄较长,所以当前主要研究的树种为针叶树,对阔叶树、灌木、草本植物的研究较少。现在国家更注重自然环境的保护,所以在

野外一般采集树芯样品。当前重建滑坡事件发生的时间的研究大多选用窄轮,其重建的时间分辨率一般精确到年份。需要我们进一步提高重建滑坡发生的时间分辨率,分析压力木及创伤树脂道等细胞结构,以及通过数学模型分析等,可以将滑坡事件发生的时间分辨率提高到月份。

7.2 讨论

1. 扩展研究区域。重建滑坡事件发生的时间的研究,选择的采样点绝大部分在寒冷的高山地区,如欧洲的阿尔卑斯山、亚平宁山,北美的阿巴拉契亚山等地区。采样的地区扩展是当前研究热点之一,譬如可以在亚热带滑坡等地质灾害严重的区域,以及在树木生长的非限制性因子地区,选择合适的研究区域进行案例研究。

2. 加强根部样品采集与分析。根部每年都生长,不存在缺轮的现象,所以能更好的呈现树轮每年的变化特征,并且对于一些滑动较深的滑坡来说,它可能不会导致树木发生倾斜甚至没有撞伤树木,但是可能损害了树木的根部,这时就可以研究乔木或灌木的根部来重建滑坡的发生时间。当前研究的样品主要从树干处采集,今后还可以加大对树木根部样品的研究。

3. 扩充重建滑坡复活时间的指标。当前典型的研究除了利用树轮生长量的变化来研究滑坡外,逐渐拓展到利用愈伤组织、创伤树脂道、压力木和偏心率指数等细胞结构指标研究滑坡,但仍处于发展之中。利用细胞结构重建滑坡复活时间的成果更是鲜见。因此对细胞结构的研究还存在很大的发展空间;除了细胞结构外,还应注重研究树木对滑坡等扰动事件的生理和化学反应。

4. 提高重建的时间分辨率。现在利用树轮样品研究滑坡事件发生的时间,要求的时间精度越来越高。在利用愈伤组织及创伤树脂道、压力木等精确滑坡发生的季节甚至月份,需要今后进一步研究这些细胞结构指标对滑坡事件响应的滞后时间。

参考文献(References)

- [1] Van Westen C J, Van Asch T W J, Soeters R. Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 2006, 65(2): 167–184
- [2] Wu Shuren, Shi Jusong, Wang Tao. Theory and method of landslide risk assessment [J]. Beijing: Science Press 2012: 8–19 [吴树仁, 石菊松, 王涛. 滑坡风险评估理论与技术 [J]. 北京: 科学出版社 2012: 8–19]
- [3] Cui Peng. Debris flow and landslide of the upper reaches of the Yangtze river and the southwestern rivers and its disaster reduction [J]. *Soil and Water Conservation in China* 2008, 12: 31–34 [崔鹏. 长江上游及西南诸河泥石流滑坡及其减灾对策 [J]. 中国水土保持 2008, 12: 31–34]
- [4] Liu Xilin, Yu Chengjun, Shang Zhihai. Risk mapping and spatial pattern of debris flow and landslide hazards in China [J]. *Journal of Basic Science and Engineering* 2011, 19(5): 721–731 [刘希林, 余承君, 尚志海. 中国泥石流滑坡灾害风险制图与空间格局研究 [J]. 应用基础与工程科学学报 2011, 19(5): 721–731]
- [5] Stoffel M, Bollschweiler M. Tree-ring analysis in natural hazards research—an overview [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 2008: 187–202
- [6] Stoffel M, Bollschweiler M. Tree Rings and Natural Hazards: A State-of-the-Art [M]. Springer 2010: 81–121
- [7] Hong Ting, Bai Shibiao, Wang Jian. A review on study of landslide activities using dendrogeomorphological methods [J]. *Geological Review* 2014, 60(4): 755–763 [洪婷, 白世彪, 王建. 树轮地貌学重建滑坡事件研究进展 [J]. 地质论评 2014, 60(4): 755–763]
- [8] Hong Ting, Bai Shibiao, Wang Jian. Reconstruct the activity years of Jiufangshan landslide by means of tree-rings [J]. *Mountain Research* 2012, 30(1): 57–64 [洪婷, 白世彪, 王建. 利用树轮重建九房山滑坡活动年份 [J]. 山地学报 2012, 30(1): 57–64]
- [9] Hong Ting, Bai Shibiao, Wang Jian. Reconstruction of landslide activity by tree-ring analysis—a case study for Jiufangshan landslide, Gansu [G]//European Geosciences Union General Assembly 2012 Vienna, Austria 2012: 22–27
- [10] Hong Ting, Bai Shibiao, Wang Jian. Reconstruction of the landslide temporal distribution patterns based on tree rings [G]//First International Symposium: New Techniques for Geohazards Research and Management in commemoration of the Zhouqu 2010 Debris Flow Disaster, Gansu Province, China 2012: 10–15
- [11] Wu Xiangding. Tree rings and climate change [M]. Beijing: China Meteorological, 1990: 1–356 [吴祥定. 树木年轮与气候变化 [M]. 北京: 气象出版社, 1990: 1–356]
- [12] Bégin C, Filion L. Age of landslides along the Grande Rivière de la Baleine estuary, eastern coast of Hudson Bay, Québec (Canada) [J]. *Boreas* 1988, 17: 289–299
- [13] Migon P, Panek T, Malik I, et al. Complex landslide terrain in the Kamienne Mountains, Middle Sudetes, SW Poland [J]. *Geomorphology* 2010, 124: 200–214
- [14] Fantucci R, Sorriso-Valvo M. Dendrogeomorphological analysis of a slope near Laci, Calabria (Italy) [J]. *Geomorphology* 1999, 30: 165–174
- [15] Carrara P E, O'Neill J M. Tree-ring dated landslide movements and their relationship to seismic events in southwestern Montana, USA [J]. *Quaternary Research* 2003: 59(1): 25–35
- [16] Saez J L, Corona C, Stoffel M, et al. Dendrogeomorphic reconstruction of past landslide reactivation with seasonal precision: the Bois Noir landslide, southeast French Alps [J]. *Landslides* 2012, 9: 189–203
- [17] Saez J L, Astrade L, Corona C, et al. The forest: an efficient spatio-temporal bioindicator of landslide activities [G]//Astrade L, et

- al. (Eds.) ,Panorama de la dendrochronologie en France ,Editions Edytem ,Chambéry 2009: 8 – 10
- [18] Saez J L ,Corona C ,Stoffel M ,et al. Probability maps of landslide reactivation derived from tree-ring records: Pra Bellon landslide , southern French Alps [J]. *Geomorphology* 2012 ,138: 189 – 202
- [19] Kashiwaya K ,Okimura T ,Kawatani T. Critical precipitation conditions for landslide and tree ring responses in the Rokko Mountains , Kobe ,Japan [G]//The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources ,1987: 191 – 197
- [20] Carrara P E. Movement of a large landslide block dated by treering analysis ,Tower Falls Area ,Yellowstone National Park ,Wyoming [G]//Integrated Geoscience Studies in the Greater Yellowstone Area. U. S. Geological Survey 2007: 43 – 51
- [21] Bollati I ,Della Seta M ,Pelfini M ,et al. Dendrochronological and geomorphological investigations to assess water erosion and mass wasting processes in the Apennines of Southern Tuscany (Italy) [J]. *Catena* 2012 90: 1 – 17
- [22] Šilhán K ,Panek T ,Hradecký J. Tree-ring analysis in the reconstruction of slope instabilities associated with earthquake and precipitation (the Crimean Mountains ,Ukraine) [J]. *Geomorphology* 2012: 173 – 174 ,174 – 184
- [23] Stefanini M C. Spatio-temporal analysis of a complex landslide in the Northern Apennines (Italy) by means of dendrochronology [J]. *Geomorphology* 2004 63(3 – 4) : 191 – 202
- [24] Corominas J ,Moya J. Contribution of dendrochronology to the determination of magnitude-frequency relationships for landslides [J]. *Geomorphology* 2010 ,124 : 137 – 149
- [25] Paolini L ,Villalba R ,Grau H R. Precipitation variability and landslide occurrence in a subtropical mountain ecosystem of NW Argentina [J]. *Dendrochronologia* 2005 22: 175 – 180
- [26] Eeckhaut V D M ,Muys B ,Van Loy K ,et al. Evidence for repeated reactivation of old landslides under forest [J]. *Earth Surface Processes and Landforms* 2009 34(3) : 352 – 365
- [27] Saez J L ,Corona C ,Stoffel M ,et al. High-resolution fingerprints of past landsliding and spatially explicit ,probabilistic assessment of future reactivations: Aguiettes landslide ,Southern French Alps [J]. *Tectonophysics* 2013 602(5) : 355 – 369
- [28] Corominas J ,Moya J. Reconstructing recent landslide activity in relation to rainfall in the Llobregat River basin ,Eastern Pyrenees , Spain [J]. *Geomorphology* ,1999 30: 79 – 93
- [29] Isabelle G R ,Heinrich I ,Gartner H. Wood anatomical analysis of Swiss willow (*Salix helvetica*) shrubs growing on creeping mountain permafrost [J]. *Dendrochronologia* 2013 31(2) : 97 – 104
- [30] Ellen G ,Florin N ,Gartner H ,et al. Application of shrubs for dendrogeomorphological analysis [J]. *Geomorphology* ,2001 ,125: 163 – 175
- [31] Stokes M A ,Smiley T L. An introduction to Tree – Ring Dating [M]. Chicago: The University of Chicago Press ,1968.
- [32] Wistuba M ,Malik I ,Gartner H ,et al. Application of eccentric growth of trees as a tool for landslide analyses: the example of *Pinus abies* Karst ,in the Carpathian and Sudeten Mountains(Central Europe) [J]. *Catena* 2013 ,111(2013) : 41 – 55
- [33] Šilhán K ,Panek T ,Tursky O ,et al. Spatio-temporal patterns of recurrent slope instabilities affecting undercut slopes in flysch: a dendrogeomorphic approach using broad-leaved trees [J]. *Geomorphology* 2014 213: 240 – 254
- [34] Schweingruber F H. Tree rings and environment [M]. *Dendroecology* ,Paul Haupt ,Bern ,Stuttgart ,Wien ,1996: 609
- [35] Sachs T. Pattern formation in plant tissue [M]. Cambridge: Cambridge University Press ,1991: 1 – 246
- [36] Brown P M. Oldlist: a database of maximum tree ages [G]//Dean J S ,Meko D M ,Swetnam T W. Eds [J]. *Tree Rings ,Environment , and Humanity. Radiocarbon* 1996 ,Department of Geosciences ,The University of Arizona ,Tucson ,1996: 727 – 731
- [37] Stoffel M. Dating past geomorphic processes with tangential rows of traumatic resin ducts [J]. *Dendrochronologia* 2008 26(1) : 53 – 60
- [38] Stoffel M ,Lievre I ,Monbaron ,et al. Seasonal timing of rockfall activity on a forested slope at Taschgufer (Valais ,Swiss Alps) – a dendrochronological approach [J]. *Geomorphology* 2005 49(1) : 89 – 106
- [39] Saez J L ,Corona C ,Stoffel M ,et al. Debris-flow activity in abandoned channels of the Manival torrent reconstructed with LiDAR and tree-ring data [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences* , 2011 ,11: 1247 – 1257
- [40] Butler D R ,Malanson G M ,Oelfke J G. Tree-ring analysis and natural hazard chronologies: minimum sample sizes and index values [J]. *Prof. Geogr* ,1987 39: 41 – 47
- [41] Dubé S ,Filion L ,Héty B. Tree-ring reconstruction of high-magnitude snow avalanches in the Northern Gaspé Peninsula ,Québec , Canada [J]. *Arctic ,Antarctic and Alpine Research* 2004 36: 555 – 564
- [42] Corona C ,Rovéra G ,Saez J L ,et al. Spatio-temporal reconstruction of snow avalanche activity using tree rings: Pierres Jean Jeanne avalanche talus ,Massif de l'Oisans ,France [J]. *Catena* 2010 83: 107 – 118
- [43] Corona C ,Saez J L ,Stoffel M ,et al. How much of the real avalanche activity can be captured with tree rings? An evaluation of classic dendrogeomorphic approaches and comparison with historical archives [J]. *Cold Regions Science and Technology* ,2012: 74 – 75 , 31 – 42
- [44] Corona C ,Saez J L ,Stoffel M . Defining optimal sample size ,sampling design and thresholds for dendrogeomorphic landslide reconstructions [J]. *Quaternary Geochronology* 2014 22: 72 – 84

Basic Procedures of Using Tree Rings to Reconstruct the Time of Landslide Reactivation

DING Miao¹, BAI Shibiao¹, WANG Jian¹, SHANG Zhiyuan¹, ZHAO Yesi¹, ZHAO Qiaoling²

(1. Jiangsu Collaborative Innovation Center of the development and use of geographic information resources, Jiangsu Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Key Laboratory of Virtual Geographical Environment (Ministry of Education), Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;
2. Sanya Marine and fishery monitoring center, Sanya 572000, China)

Abstract: The knowledge of the frequencies of past landslide occurrence are important elements for the assessment of natural hazards. Many studies have shown that tree ring is a reliable approach to obtain the information of past landslides with its such characteristics like accurate dating, high resolution and long time span. In order to improve the reliability and accuracy of the time of landslide reactivation, Firstly, The paper elaborate the methods of field sampling, including the choice of landslide area and reference region, the choice of tree species, the choice of the way of specimen collection. Secondly, laboratory processing and analysis of tree rings were elaborated in this paper. The selection of analyzed indicators should be depended on the different form which tree rings response to landslides, including tree ring width, compression wood caused by trees tilt, callus tissue and traumatic resin duct caused by injuring and the size of vessels. Among these indicators, callus tissue and traumatic resin duct may be the best way to acquire the most accurate time of landslide reactivation. Finally, summary and prospects about the time and frequency reconstruction of landslide reactivation were stated.

Key words: tree rings; landslide; hazard; sampling methods; sampling analysis