

国外滑坡活动与气候变化关系研究进展评述

刘芸芸

(国家气候中心, 中国气象局, 北京 100081)

摘要: 滑坡活动与全球气候变化有着密不可分的关系。气候变化引起了地球表层系统结构调整, 是滑坡灾害发生的重要外强迫因子。首先介绍了针对古气候不同阶段的一些地区的滑坡事件研究, 给出了滑坡与古气候变化之间的联系。在此基础上, 进一步讨论了全球变暖对滑坡活动触发机制的影响, 以及未来全球变暖背景下不同区域滑坡活动的可能变化趋势。由于不同区域滑坡触发机制的不同, 在全球变暖背景下表现出的变化特征也不同。这些最新的国外研究进展将给国内的相关研究者提供必要的了解和参考信息。

关键词: 滑坡活动, 气候变化, 全球变暖, 灾害

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.z1.003

1 引言

滑坡是指斜坡上的土体或者岩体, 受河流冲刷、地下水活动、雨水浸泡、地震及人为活动等因素影响, 在重力作用下, 沿着一定的较软的面或带状区域, 整体地或者分散地顺坡向下滑动的自然现象。自20世纪初中期以来, 随着世界人口的不断增长、人类活动空间范围的逐渐扩展, 以技术和经济条件为支撑的工程活动对地质环境的扰动程度不断加大, 加之受到全球气候变化等因素的影响, 滑坡灾害, 尤其是大型滑坡发生的频率越来越高, 所造成的经济损失和人员伤亡也不断加大。到目前为止, 全球范围内凡是有人类居住和工程活动的山岭地区, 几乎都有滑坡灾害发生, 滑坡成为各类灾害中频度最高、损失最大的地质灾害类型。在欧洲, 瑞典、挪威所在的斯堪的纳维亚(Scandnavia)地区, 占据法国东部、瑞士、奥地利及意大利北部的阿尔卑斯山(Alps)地区及纵贯意大利全境的亚平宁山区(Apennines)都是滑坡灾害的高发区。

随着气候变暖话题的热议, 滑坡与气候变化关系的研究也开始受到各国科学家的重视, 成为滑坡地质灾害研究的热点问题之一。气候变化引起了地球表层系统结构调整, 这是滑坡灾害发生的外强迫因子。国内外许多研究表明, 中更新世中期(0.5MaB.P.)以来滑坡的主要发育期与气候变化密切相关, 滑坡主要集中在气候波动的相对暖湿期和强降雨期, 大区域滑坡的运动规律与全球气候的间冰期之间呈现大致同步的一致性关系。当然, 滑坡的形成发育不仅仅受到气候变化的影响, 它跟不同的地质环境和坡体地质结构有

关, 而地震、极端气候条件和全球气候变化则构成大型滑坡发生的主要触发和诱发因素。这里侧重介绍国外最新的与气候变化有关的滑坡研究工作, 及其对气候变化的响应过程的研究成果, 以期给国内的相关研究者提供一定参考信息。

本文第2部分主要介绍国外研究者对古气候与滑坡活动关系的研究成果, 这部分多是基于气候代用资料和模式的成果, 时间序列长, 对分析气候变化如何影响大型滑坡活动有重要意义; 第3部分主要讨论气候变化对滑坡活动激发机制的影响, 这是在上述统计分析的基础上, 进一步从激发机制方面用模式结果检验气候变化对滑坡活动的作用; 第4部分则讨论基于情景模拟的未来气候变化对滑坡的可能影响, 这里主要介绍了欧洲委员会的第7个框架方案, 专门针对滑坡灾害风险、评估、气候变化影响和风险管理对策的Safeland计划; 第5部分为小结。

2 滑坡活动与古气候的关系

无论是从滑坡的机制研究角度还是从滑坡趋势预测和环境保护的研究角度, 滑坡与古气候之间的关系研究都是一个十分有新意的探索方向, 且在近20年来已成为国际滑坡研究的热点之一。

许多科学家针对古气候的不同阶段, 对一些地区的滑坡事件进行了深入研究, 试图给出滑坡与古气候变化之间的联系。Soldati等(2004)等采用碳同位素测年、地层学、历史分析以及滑坡类型研究等方法, 对意大利北部阿尔卑斯山前缘地区末次冰期(约15000a)以来的大量古滑坡与气候变化关系进行了综合研究, 得出了很有意义的滑坡分布与古气候变化关系的柱状图(图1)。图上反映出该地区滑坡活动有两个非常集中的时段, 第一个时段发生在Wurm冰川期后退过程, 主要是由于原来冰川覆盖的高陡山坡失

收稿日期: 2013年11月25日; 修回日期: 2013年12月6日
作者: 刘芸芸(1981—), Email: liuyuny@cma.gov.cn

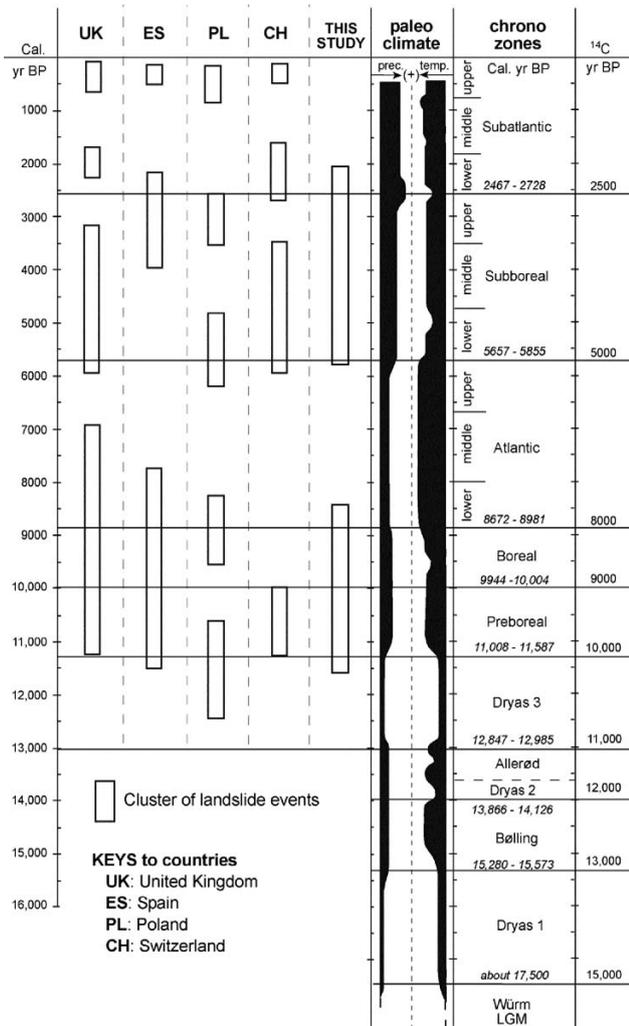


图1 末次冰期欧洲不同地区滑坡活动的时间分布与古气候演变的对比

去冰川压力作用而往往发生特大型的岩质滑坡。第二个滑坡集中阶段则发生在5000~2500a前之间的亚北方冰期（Subboreal），滑坡类型以古滑坡的复活和流动性滑坡为主，在此时期内，气温适中、降雨量充沛可能是滑坡的主要影响因素。Margielewski（2002，2004）对喀尔巴阡山（Carpathian）复理式地层中的滑坡活动与全新世以来气候波动的关系进行了深入研究，建立了不同冰川作用亚期与滑坡集中活动时期对应关系的图表。研究结果表明，往往在气候的潮湿阶段，滑坡活动明显集中，说明大区域滑坡运动规律与全球气候变化之间的一致性关系。

3 气候变化对滑坡触发机制的影响

滑坡的发生跟地质环境和坡体地质结构有关，从而也表现为不同的诱发机制和触发因素。近年来气候变化对滑坡活动触发机制的影响也受到各国科学家的重视，成为地质灾害研究领域的重要科学问题。其

中，强震、极端气候条件和全球气候变暖成为滑坡灾害发生的主要触发和诱发因素。例如，当暴雨强度达到200~300mm/d时就易于触发大型滑坡的发生；春季冻结层的融化，也是大规模黄土滑坡发生的诱因。而近年来全球气候变化导致气温上升、雪线上移、冰川后退、冰湖溃决，也都成为一些具有特殊地形地区发生大型滑坡灾害的诱发和触发因素。另外，超过50%以上的大型滑坡发生还与人类活动有密切的关系。从国内外学者对古气候与滑坡发生规律的研究也能看出，全球不同地区末次冰期以来古（老）滑坡的大规模发育期主要集中在气候波动的相对暖湿期和强降雨期，气候温暖潮湿阶段，古滑坡活动集中，大范围滑坡的发育规律与气候变化的间冰期有较好的对应关系。

在讨论气候变化对滑坡活动触发机制的影响时，当前的大多数研究和试验都是重点关注降水的变化特征，降水对坡体的变形和滑坡的形成起着重要的作用。相对而言，其他影响因子如积雪融化、土地退化或者一些非直接因素（如土地侵蚀），它们的作用则不太显著，并且仅在一些特定的区域内发生。但在研究与降水有关的滑坡活动时，往往是针对粗颗粒土壤地质条件，由降水触发的滑坡活动速度较快。对于有细密纹理的岩石地质条件，降水对其影响较小，形成的滑坡速度较慢。气候变化属于外动力地质作用，受气候条件影响，滑坡灾害一方面随降雨变化发生强弱交替的周期性变化，另一方面随着近年来人类活动的不断增强，在强弱交替中滑坡活动也呈不断严重的趋势。随着人们对重大滑坡灾害研究的深入，人们发现对灾害发生的频度和规模很难从单纯的外动力或内动力作用来解释，需要从区域的角度加以系统研究。研究表明，在气候变暖背景下，滑坡发生的次数往往与局地的降水总量成正比，并且与降水的持续时间也表现出类似的正比关系。有些地区，滑坡往往容易发生在持续干旱后出现暴雨的时候，或者是大量融雪的时候，以及长时间的降雨期期间或略滞后，即使雨量并不大。这里给出两个不同区域全球变暖对滑坡活动触发机制影响的例子。

Jakob等（2009）利用IPCC第4次评估报告里的19个气候模式，通过模式对未来月平均降水的模拟，讨论了在3种不同碳排放情景下，全球变暖对不列颠哥伦比亚地区（British Columbia，位于加拿大西部）海岸的滑坡活动频率的可能影响。滑坡活动往往存在多种触发因素，在不列颠哥伦比亚海岸地区，前期降水和短时间强降水是滑坡活动的重要触发机制，因此他

们首先检验了模式对这两种降水特征的模拟能力，发现模式能够较好地模拟出前期降水，但对短时间强降水过程模拟较差，这可能跟模式本身的分辨率较低有关。在此基础上，他们利用这19个气候模式模拟了3种碳排放情景下21世纪末全球变暖对前期降水的可能影响，其多模式平均的结果显示未来降水量表现出略微增加的趋势，其增长率约为10%。尽管实际上各模式都存在显著的内部变率，但大多数模式模拟的降水量都表现出增长的趋势，仅有极少数模式模拟的全球降水量略微减少。这说明随着温室气体的增加，全球变暖将导致降水量也随之增加。另一方面，通过统计方法来解决模式对短时间降水强度模拟较差的缺陷，将短时间强降水与月平均降水联系起来。利用统计方法得到的模拟结果显示，到21世纪末短时间强降水将增加6%。由于模式预测未来前期降水和短时间强降水都将增加，因此推测21世纪不列颠哥伦比亚西南海岸区的滑坡活动发生频率也将有所增加。

但滑坡活动也并不总是呈现增加的趋势。Collison等（2000）利用模式分析了全球变暖对英国东南部地区滑坡活动频率的影响。先前的很多研究都表明，随着大气中温室气体和硫酸盐气溶胶的增多，英国东南部地区气温和降水均呈现增长的趋势。英国东南部地区多岛屿分布，典型的岛屿滑坡活动频繁。模式模拟结果表明，尽管未来该地区的降水将增加11%（741~816mm），但同时气温也增加，导致该区域的蒸发量也增大，增长率达到13%，水分循环加大，两者作用相互抵消，因此该区域大型滑坡的发生频率没有明显的变化趋势。相反，在全球变暖背景下，未来浅层土壤水分储存量将小幅增长，这将有利于未来80年内英国东南部地区小型滑坡活动发生频率有所降低。

4 未来气候变化对滑坡的影响

越来越多的研究发现，随着气候变暖，全球滑坡灾害和风险也随之增加，因此现代及未来气候变化对滑坡的影响也逐渐受到许多国家的重视和媒体的关注。近期欧洲委员会针对滑坡灾害风险、评估、气候变化影响和风险管理对策几个方面制定了第7号框架方案——Safeland计划，这是一个大型的综合研究项目，汇集了欧洲12个国家以及来自中国、印度、美国、日本和中国香港等的许多合作者和专家。其中对未来气候变化对滑坡活动的可能影响进行了深入的分析。

为了预估未来气候变化背景下滑坡活动的可能变化，该项目主要应用了欧盟第6号框架方案（EU

FP6）中的8个区域气候模式的集合模拟结果，这个模式集合结果曾用来研究极端降水事件的趋势。模式首先分别对1961—2009年夏季和冬季欧洲大陆的降水模拟情况进行分析，研究不同季节下降水的变化趋势。研究表明，在8个区域气候模式中暴雨的大尺度模态都很一致。冬季，所有模式都表现出欧洲中部和北部地区暴雨有所增加，在一些受局地地形影响较大的地区稍有差别，尤其是在山区。夏季，大多数模式显示在斯堪的纳维亚地区暴雨呈现增长趋势，而在欧洲南部地区暴雨则呈现减少的趋势。在南北地区暴雨呈现不同变化趋势的转换区域上，不同模式间的模拟结果存在较大的差异。

那么未来100年由气候引起的滑坡活动将发生怎样的可能变化？由于相对准确的资料很难覆盖整个欧洲，所以其模拟结果存在一定的不确定性。对于整个欧洲范围来说，滑坡活动的主要变化可能主要受该地区的人口密度变化影响。尽管如此，模式对欧洲未来80年滑坡灾害和风险的预估结果还是有意义的。总体而言，滑坡活动的变化将影响到欧洲0.7%的人口。这个影响比例已经跟欧洲未来80年洪水和干旱等灾害可能造成的影响相差无几。有10个国家的研究结果甚至预估将对超过2%的人口造成显著影响。而这些国家目前大多已经受到滑坡灾害风险的显著影响。

为了更精确地预估一些敏感区域滑坡活动的可能变化，还将模式结果降尺度到欧洲4个小区域范围，包括挪威南部的鲁默里克地区（Nedre Romerike）、意大利的坎帕尼亚地区（Campania）、法国阿尔卑斯山区的巴西洛内特地区（Barcelonnette）、罗马尼亚的泰勒戈地区（Telega），分辨率为3.8km×3.8km。模式积分时间为1951—2050年，模拟情景为A1B排放情景。区域模式利用更高分辨率的模拟结果试图改进这些区域对暴雨的模拟能力，从而更准确地估计出由降水引起的滑坡灾害的可能变化趋势。

模式结果显示，在鲁默里克地区增温显著，尤其冬季增温显著，而降水略有增加，极端降水也是略有增加，仅在西部较为明显。坎帕尼亚地区气温也明显增加，但略小于鲁默里克地区，冬季降水有大幅增加，且极端降水增加明显，而夏季在大部地区月平均降水略微有些减少，但该区域以及其西海岸地区极端日降水却有明显增多。在巴西洛内特地区，冬夏季未来气温都明显增加，增温幅度可达3℃，其中冬季更显著，冬夏季的降水在一些局地有一定增加，大部地区的极端降水没有显著变化。而在泰勒戈地区，冬季和夏季气温增幅大约为1.5℃，冬季降水增加，而夏季

降水则有所减少, 北部地区冬季和夏季的极端降水有所增加, 其中冬季极端降水的变化更为显著。对意大利南部的坎帕尼亚、阿尔卑斯山区的巴西洛内特和挪威南部的鲁默里克地区这3个区域, 还进一步分析了未来气候变化对滑坡灾害的影响。即使这些区域的滑坡活动是由不同的原因导致的, 但不同的模式结果均显示由于气候变化导致滑坡活动增加, 主要表现为滑坡活动发生频率增加, 或者是在不稳固的地区滑坡面积增加。

对于特定区域的未来预估结果与大尺度模式预估结果稍有不同, 这是因为小区域模式运用了更为合理的订正方案, 且气候模式更合理地考虑了局地的地形影响(主要对降水的影响)。因此, 如果说大尺度模式主要用来判断该区域的滑坡活动相对于其他地区来说有何区别, 那么不同的小区域模式则有必要用来为当地的决策者评估当地的未来气候及滑坡活动的可能变化趋势, 有些模式还给出空间分布情况。但是, 这些模式需要精确的数据, 不仅是订正数据, 还有预测数据, 还需要像上述分析一样, 将模式降尺度到更为精细的分辨率上来实现。

5 小结

滑坡活动与全球气候变化有着密不可分的关系。气候变化引起了地球表层系统结构调整, 是滑坡灾害发生的重要外强迫因子。通过对古气候的不同阶段一些典型区域的滑坡事件研究, 发现往往在气候潮湿阶段, 滑坡活动相对集中, 大区域滑坡运动规律与全球气候变化之间存在一致性关系。

在此基础上, 进一步讨论了全球变暖对滑坡活动触发机制的影响以及未来滑坡活动的可能变化趋势。其中, 降水对坡体的变形和滑坡的形成起着重要的作用, 成为滑坡灾害发生的主要触发和诱发因素。但由于不同区域地质结构的不同, 降水在滑坡触发机制中所起的作用表现也不尽相同, 从而导致在全球变暖背景下, 不同区域的滑坡活动也表现出不同的变化特征。这些最新的国外研究进展将给国内的相关研究者提供必要的了解和参考信息。

深入阅读

- Borgatti L, Soldati M, Surian N. 2001. Rapporti tra frane e variazioni climatiche: una bibliografia ragionata relativa al territorio europeo. *Il Quaternario Italian Journal of Quaternary Sciences*, 14: 137-166.
- Borgatti L, Soldati M. 2002. The influence of Holocene climatic changes on landslide occurrence in Europe. In: Rybař J, Stemberk J, Wagner P (Eds), *Landslides*. Lisse, The Netherlands: A.A. Balkema Publishers.
- Bovis M J, Jones P. 1992. Holocene history of earth flow mass movement in south-central British Columbia: the influence of hydroclimatic changes. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 29: 1746-1755.
- Buma J, Dehn M. 1998. A method of predicting the impact of climate change on slope stability. *Environment Geology*, 35: 190-196.
- Burbank D W, Leland J, Fielding E, et al. 1996. Bedrock incision, rock uplift and threshold hillslopes in the northwest Himalayas. *Nature*, 379: 505-510.
- Collison A, Wade S, Griffiths J, et al. 2000. Modelling the impact of predicted climate change on landslide frequency and magnitude in SE England. *Engineering geology*, 55: 205-218.
- Dixon B N, Ibsen M L. 2000. *Landslide in Research, Theory and proceeding*. London: Thomas Telford Ltd.
- Glade T. 1997. The temporal and spatial occurrence of rainstorm-triggered landslide events in New Zealand (Ph.D. Thesis). Wellington, New Zealand: Victoria University of Wellington.
- Highland L M. 2000. *Landslide hazards*. U.S. Geological Survey Fact Sheet 0071-00.
- Jakob M, Lambert S. 2009. Climate change effects on landslides along the southwest coast of British Columbia. *Geomorphology*, 107: 275-284.
- Margielewski W. 2002. Geological control on the rocky landslides in the Polish Flysch Carpathians. *Folia Quaternaria*, 73: 53-68.
- Margielewski W. 2004. Patterns of gravitational movements of rock masses in landslide forms of the Polish Flysch Carpathians. *Przegląd Geologiczny*, 52: 603-612.
- Matthews J A, Brunnsden D, Frenzel B, et al. 1997. Rapid mass movement as a source of climatic evidence for the Holocene. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag.
- Parise M, Wasowski J. 1999. Landslide activity maps for landslide hazard evaluation three case studies from Southern Italy. *Natural Hazards*, 20: 159-183.
- Schuster R L, Highland L M. 2001. Socioeconomic and environmental impacts of landslides in the Western Hemisphere. USGS Open-File Report 2001-276.
- Soldati M, Corsini A, Pasuto A. 2004. Landslides and climate change in the Italian Dolomites since the Late Glacial. *Catena*, 55(2): 141-161.
- Staub I B. 2001. A methodology for the mapping and analysis of debris-flow initiation hazard application to the Bragousse torrent. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 59: 319-327.
- Surdeanu V. 1998. *Geografia terenurilor degradate*. I. Alunecări de teren, Ed. Presa Universitară Clujeană, Cluj-Napoca.
- Thomas F T. 1999. Evidence for high energy landforming events of the central African plateau: eastern province, Zambia. *Zeitschrift für Geomorphologie Neue Folge*, 43: 273-297.