

杨银科, 彭建兵, 刘聪. 滑坡年代学研究方法应用进展[J]. 灾害学, 2015, 30(2): 133 - 137. [Yang Yinke, Peng Jianbing and Liu Cong. The application progress on research methods of landslide chronology[J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(2): 133 - 137.]

滑坡年代学研究方法应用进展*

杨银科^{1,2}, 彭建兵², 刘聪²

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054;

2. 长安大学 地质工程与测绘学院 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 滑坡年代学研究对于滑坡灾害的形成演化、预测预警与风险评估等意义重大。为了对比分析各种滑坡测年新技术, 综述了各个测试技术在国内外滑坡年代学研究中的最新应用进展。对¹⁴C、光释光(OSL)、宇宙成因核素、树木年轮及地衣等测年技术进行了详细分析讨论, 探讨了各个测年技术的优缺点、年代测定中存在的问题以及相应的解决策略。结论表明, 利用¹⁴C、光释光、宇宙核素测年技术分析滑坡年代的研究较多, 树木年轮和地衣测年方法应用较少; 全球已经开展的研究工作主要集中在北美、欧洲及东亚等地区, 中国的研究相对较少; 国内的研究主要集中在黄河上游和长江三峡地区。滑坡年代学的研究在中国刚刚开始, 具有很大的发展空间和重要的科学意义, 对于中西部地区, 特别是青藏高原和黄土高原地区的防灾减灾、社会经济发展现实意义重大。

关键词: 滑坡; 年代学;¹⁴C; 光释光; 宇宙成因核素

中图分类号: P694; X4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000 - 811X(2015)02 - 0133 - 05

doi: 10.3969/j.issn.1000 - 811X.2015.02.026

开展第四纪时期地质灾害年代学研究, 准确重建灾害发生的时间序列, 是正确认识当今重大地质灾害的历史过程、现状和预测其未来发展趋势的重要基础之一^[1]。滑坡是常见的地质灾害, 具有分布广泛、危害性大、发生突然、速度快等特点, 滑坡地质灾害的发生往往会造成人民生命财产和国家经济建设的重大损失。滑坡灾害的预测、预警与风险评估已经被世界各国高度重视^[2-3]。在诸多滑坡研究要素中, 了解滑坡的历史和发展趋势, 尤其是选择合适的年代学分析方法, 精确测定滑坡发生的年代, 对于研究滑坡的形成机理、地理地貌过程、气候环境演化以及评价区域稳定性都具有重要的意义^[4-5]。国内外针对滑坡测年及古环境演化的研究工作已经大量开展, 并针对滑坡测年尝试了¹⁴C、光释光(OSL)、宇宙核素、树轮及地衣等多种测年方法。本文将对比讨论各种滑坡测年新技术, 综述各种测试技术在国内外滑坡地质灾害年代学研究中的最新应用进展, 探讨研究中存在的问题, 提出相应的解决策略, 为我国滑坡年代学研究提供参考。

1 滑坡测年技术及应用进展

在地表过程研究中, 对地貌体及其他地表特

征的定年工作非常重要, 精确的年代学数据可以帮助确定地表过程历史和速率^[6]。由于滑坡灾害的孕育、活跃程度与新构造运动、气候环境演变、河流侵蚀等关系密切, 所以滑坡年代学的研究多借助比较成熟的第四纪地质、区域河流地貌发育史、古气候环境变化史和新构造运动演化史的技术方法和理论^[7]。已经开展的滑坡测年研究中,¹⁴C、光释光、宇宙核素测年、地衣测年、树轮测年等技术方法先后被尝试采用, 并取得了一定的研究成果。

1.1 ¹⁴C 测年

¹⁴C 测年方法至今已有 50 余年发展历史, 是科学界应用最广泛的定年技术之一。精确、可靠的¹⁴C 年代标尺对近 5 万年以来的古环境信息的合理提取具有重要的研究价值^[8-9]。松散沉积物中可用于¹⁴C 测年的物质主要有木质样品、碳化物、腐殖酸、蜗牛化石、孢粉等。随着加速器质谱 AMS 测年技术的发展,¹⁴C 测试方法所需的碳量仅为 1mg, 使得对孢粉这样的微量样品的测年也成为了可能, 对高分辨率、高精度年代标尺的建立起到了巨大的推动作用^[10-11]。

¹⁴C 测年技术在古滑坡年代研究中应用较多。滑坡体埋藏的有机体¹⁴C 年龄是滑坡发生的最大年龄, 滑坡堵塞河道形成的堰塞湖中的有机质或滑

* 收稿日期: 2014 - 10 - 27 修回日期: 2014 - 12 - 14

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2014CB744700); 国家自然科学基金项目(41102107); 黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金项目(SKLLQG1209、SKLLQG1426)

作者简介: 杨银科(1977 -), 男, 陕西扶风人, 副教授, 博士(后), 主要从事地质灾害与环境科学方面的研究。

E-mail: yangyink@chd.edu.cn

坡后缘凹陷地带的沼泽地中的有机质的 ^{14}C 年龄是滑坡发生的最小年龄^[7]。堰塞湖的沉积过程和沼泽中的泥炭形成时间较长,需要几百年,甚至上千年的时间。因此采样位置的选择至关重要,否则容易造成误解^[9]。一般应在采样前对沉积物进行沉积过程分析,以便确认有机体和滑坡体的先后关系,初步判别测定的 ^{14}C 年龄是晚于,还是早于滑坡事件。在国外, Giovanni Bertolini 等先后测定了取自意大利 Apennines 北部的 20 个 ^{14}C 测年样品,揭示了该地区全新世滑坡的活动特征^[12]; Marten Geertsema 等利用 ^{14}C 测年技术,对滑坡堰塞湖和滑坡体中埋藏的树木进行年代测定,确定了位于英国 Columbia 省东北部 Halden Creek 的古滑坡发生的确切年代^[13]; Tamer Y. Duman 研究了土耳其境内最大的堰塞湖坝体, ^{14}C 测年结果表明造成堰塞湖的 Tortum 滑坡发生时间为 $350 \pm 40 \sim 370 \pm 40 \text{ a BP}$ ^[14]。上述几位学者的研究方法具有明显的共同之处,他们均采用了 ^{14}C 年代测定和地质分析相结合的手段。在中国,已有学者陆续开展了滑坡的 ^{14}C 年代学研究。杨丽娟等利用滑带土中一段明显被滑坡滑动所强烈剪切变形的树根,对陕西省凤翔县五曲湾滑坡的年龄进行了 ^{14}C 测定。分析年龄为 $462 \pm 45 \text{ a BP}$,该结果与地质分析获取的认识基本一致,与 1556 年“华县大地震”发生的年份非常接近,为研究该滑坡的触发原因提供了重要的依据^[4]。2011 年,吴玮江等基于 ^{14}C 分析方法,对甘肃武都汉林沟古滑坡体中部和上部的 2 个埋压的古树木样品进行了 ^{14}C 年代测定,结果表明该流域长楞梁古滑坡发生于晚更新世中期,年龄为 $42.0 \sim 44.8 \text{ ka BP}$ ^[7]。蒋瑶等利用 AMS ^{14}C 测年方法,确定了青海玉树古地震滑坡堆积体的年代,说明该区域典型古地震滑坡大多发生于全新世中晚期,集中分布在 5 个不同的时期,而且分析结果与利用古地震探槽所揭示的事件期次及发生年代对应关系非常明确^[15]。

1.2 光释光测年

光释光测年技术是在 1980 年代提出的,测定的是沉积物最后一次曝光事件至今的年代,在第四纪年代学研究中得到了越来越广泛的应用^[16],其测年范围可从几十年^[17]到十几万年^[18],甚至利用有些样品可以使测年范围达到 70 多万年^[19]。与 ^{14}C 测年相比较,光释光测年的误差一般为 5%~10%,稍微偏大,但是其又具有测年物质丰富、测年年限范围大、直接测定沉积物等明显的优势^[16]。

在国外, Balescu 等尝试对位于蒙古国内的 Ba-ga Bogd Massif 古滑坡进行测年^[20]。利用红外光释光方法 (IRSL) 对大于 $40 \mu\text{m}$ 和 $4 \sim 11 \mu\text{m}$ 的长石颗粒进行测定,表明该古滑坡发生在末次间冰期开始阶段,测试结果与蒙古戈壁 Gobi-Altay 山同一滑坡的宇宙核素(^{10}Be)测得年龄非常一致,滑坡发生的年代气候处于暖湿阶段。另外, Fuchs 等在德国的 Bavaria 北部也开展了类似的研究工作^[21]。

在中国,利用光释光技术测定古滑坡发生年代的研究主要集中在长江三峡和黄河上游地区。在长江三峡地区,2008 年, Chen 等基于光释光技术测定了长江三峡地区宝塔滑坡的年代,与热释

光 (TL) 和 ^{14}C 年代相互验证,结果非常一致,进一步分析表明该滑坡发生在 $30 \sim 40 \text{ ka BP}$ 的温暖气候期,由强降水引发形成^[22]; 2010 年,魏宝华等对清江中游具有代表性的 4 个古滑坡进行了石英光释光测年分析,结果表明该地区滑坡主要发生在气候波动期或湿润期,季风加强时期是滑坡的多发时期^[5]。青藏高原东部黄河上游是特大型古滑坡集中的区域,该地区开展的滑坡年代学研究工作较多。2010 年,周保等对拉干峡至寺沟峡段 11 个特大型滑坡进行了光释光和 ^{14}C 年代分析,从时间和空间上对该区域群发性滑坡进行了分期特征的研究,将滑坡的发生划分为 6 个不同时期^[23]; 2012 年,郭小花等对龙羊峡至刘家峡段黄河谷地的 4 个滑坡,共 30 个样本进行了光释光测年分析,探讨了研究区地质构造以及区域环境变化对滑坡发生的影响机理^[24-25]; 2013 年,赵瑞欣等通过对龙羊峡至积石峡段 10 个特大型古滑坡的 11 个样品进行光释光测年分析,划分了该区域特大型群发性滑坡发生的 4 个主要时期,解释了各期滑坡群发的主要触发因素^[3]。

1.3 宇宙成因核素暴露测年

宇宙成因核素测年技术是为了研究陨石中宇宙成因核素而发展起来的,可分为大气宇生核素测年和原地生成宇宙成因核素测年,原地生成宇宙成因核素测年又可分为暴露测年和埋藏测年两种方法^[26-28]。近年来,随着 AMS 技术的发展,宇宙成因核素测年已经成为滑坡年代测定行之有效的的方法之一。在滑坡年代分析中,宇宙成因核素测年具有测年目标矿物成分简单,分布广泛,易于化学处理的特点; ^{10}Be 等核素半衰期较长(1.36 Ma 或 1.387 Ma),有利于研究暴露历史较长的滑坡体;测定的滑坡导致的岩石暴露而开始接受宇宙射线产生核素的时间与滑坡发生的时间是同步的,无时间差,地质意义非常明确等优势^[29-30]。

宇宙成因核素测年技术是定量研究滑坡在造山带地表过程中作用的新技术之一,已经有较多学者利用宇宙成因核素 ^{10}Be 测年方法,分析古滑坡年代的研究工作。2006 年, Yi Chaolu 等学者在中国新疆天山东部的天池,基于裸露岩石的 ^{10}Be 核素测定,分析了天池古滑坡的发生年份,结果表明该滑坡发生于 12 ka BP 前,很可能与 Younger Dryas Stade 是同时期的,该时期属于冰后期,天池地区没有冰进事件,否定了冰碛物堵塞河道形成天池的观点^[31]。2007 年, Mitchell 等学者通过 ^{10}Be 暴露测年研究了 Himalaya 地区印度西北部的 Key-long Serai 大型滑坡体,结果显示该滑坡发生于 $7.5 \pm 0.1 \text{ ka BP}$,为地震触发引起^[32]。2009 年, Jason M. Dortch 等学者在印度北部 Himalaya 和 Transhimalaya 地区利用 ^{10}Be 暴露测年方法分析了四个大型滑坡体的形成年龄,分别为 $7.7 \pm 1.0 \text{ ka BP}$ (Darcha)、 $7.9 \pm 0.8 \text{ ka BP}$ (Patseo)、 $6.6 \pm 0.4 \text{ ka BP}$ (Kelang Serai) 和 $8.5 \pm 0.5 \text{ ka BP}$ (Chilam),并测算了 Lahul 地区的侵蚀速率^[33]; Ivy-Ochs 等分析了瑞士 Graubunden 的 Flims 滑坡年龄,对 16 个巨砾进行了宇宙核素 ^{36}Cl 和 ^{10}Be 年代测定,表明 Flims 滑坡发生年代为 $8.9 \pm 0.7 \text{ ka BP}$,与其同期的还有 Kofels 滑坡和 Kandertal 岩石崩塌,均发生在早全新世气候向暖湿转变时期^[34]。2011 年, Hewitt K 等

学者在巴基斯坦东北部 Karakoram Himalaya 地区, 利用同样的测年方法分析了 7 个滑坡体的年龄, 结果表明在全新世时期这些滑坡相继发生, 阻塞印度河或其支流, 形成湖相沉积, 滑坡形成的堰塞湖对河谷的侵蚀作用具有一定的控制作用^[35]; Kattia Sanhueza-Pino 等学者利用¹⁰Be 暴露测年方法分析了中国 Tien Shan 地区 3 个著名的大型滑坡的年龄, 结果显示位于 Alamyedin 河的滑坡年龄为 11 ~ 15 ka BP, 位于 Aksu 河的年龄为 63 ~ 67 ka BP, 而位于 Ukok 河的滑坡体可能是多次滑动形成的, 早期的年龄为 8.2 ka BP 和 5.9 ka BP, 近期的为 1.5 ka BP 和 0.4 ka BP^[36]。2013 年, Yuan Zhaode 等学者在中国 Pamir 东北部地区, 利用¹⁰Be 暴露测年方法分析了四个大型滑坡 (Bulunkou、Muztagh、Taheman 和 Yimake), 其中 Bulunkou 滑坡的年龄为 2.0 ± 1.0 ka BP, Muztagh 的为 14.3 ± 0.8 ka BP, Taheman 的为 6.8 ± 0.2 ka BP, Yimake 的为 7.1 ± 0.6 ka BP^[30,37]。2014 年, Lewis A. Owen 和 Jason M. Dortch 综述了 Himalayan-Tibetan 造山带地区第四纪冰川作用, 其中对于利用¹⁰Be 暴露测年方法分析滑坡等地表过程给予了很高的评价^[38]。另外, Colin K. Ballantyne 等学者在苏格兰高地^[39], G. Bianchi Fasani 等学者在意大利 Apennines 中部也先后开展了类似的研究工作^[40]。

1.4 其他测年方法

在滑坡年代学研究中,¹⁴C、光释光、宇宙成因核素测年是较为常用的定年方法。树木年轮年代学以树木年际生长层序——树轮为精确的时间记录, 地衣年代学基于地衣大小与其附着面的形成年龄成正比, 也都在滑坡年代学研究中得到了一定范围的应用。

地衣形态量计法是基于地衣大小与年龄增加成正比例变大, 方法的关键是建立地衣年龄与大小之间的正比例关系。地衣年代分析方法多用于研究冰川消融出露地面的时间、河流地貌年龄以及基岩海岸的侵蚀等地表过程方面^[41]。在同震滑坡年代分析中, 地衣测试方法得到学者们的肯定。在中国, 李有利等学者曾用地衣形态量计法研究了山西忻定盆地同震滑坡^[41]。在国外, Bull W B 等学者先后在 Alpine 山^[42]、Alps 南部^[43]、新西兰^[44]开展了利用地衣年代学方法分析滑坡年代的研究, 取得了一定的研究成果。2008 年, Malgorzate Bajgier-Kowalska 在波兰 Flysch Carpathians 山脉西部滑坡年代学研究中采用了地衣年代学的分析方法^[45]。

树木年轮年代学是一门研究树木木质部年生长层, 以及利用树轮来定年的科学^[46]。树木在生长过程中对其生活历程中的气候、环境、突发事件等均有忠实地记录, 研究树木年轮特征变化规律, 反演其生长期间的气候环境及地表过程, 是树木年轮学研究的基本思路。滑坡作为一种快速的地质地表作用过程, 会对其所能影响到的区域上正在生长的树木造成影响, 树轮变化特征会有相应的明显痕迹, 这就为利用树木年轮重建崩塌、滑坡等地质灾害事件提供了生物学依据。目前, 基于树轮资料开展滑坡年代学的研究主要集中于北美和欧洲地区。基于树木年轮资料, 1999 年, Rosanna Fantucci 等学者对意大利 Calabria 地区 La-

go 滑坡进行了年代学分析, 确定了滑坡活动强烈的时段为 1860 - 1895 年^[47]。随后, 2003 年和 2007 年, Paul E Carrara 等分别在美国 Montana 州西南部和 Wyoming 州的 Yellowstone National Park^[48-49]; 2004 年, Maria Cleofe Stefanini 等在意大利 Apennines 北部^[50]; 2009 年, Miet Van Den Eeckhout 等在比利时 Koppenberg 森林地区, 先后开展了滑坡年代分析研究工作^[51]。另外, 在日本 Kenji Kashiwaya 等利用树木年轮指标和降雨阈值的分析, 对日本 Rokko 山的滑坡进行了年代学研究^[52]。利用树轮资料分析滑坡年代的研究在中国开展较少, 洪婷等学者利用树轮分析方法, 对甘肃南部武都区外纳乡的九房山滑坡进行了年代学分析, 结果表明滑坡活动导致树木立地条件的改变, 树轮中伪轮增多, 树轮某些变化特征与滑坡之间的确存在显著的响应关系^[53]。

2 不同滑坡测年技术的对比讨论

滑坡的发生受气候、地震、地质构造、地层岩性、水文地质条件以及人类活动等因素的制约^[54]。滑坡年代的确定需要在充分的野外调研、现场勘探等工作的基础上, 针对不同的古滑坡体地形地貌、覆盖侵蚀特征、地层层序关系等, 有侧重地选择适合的年代测定方法。只有寻找到合适可靠的测年物质, 才能保障测定的滑坡年龄的可靠。¹⁴C 测年方法, 特别是加速器质谱¹⁴C 测年技术的快速应用, 测年所需样品量少、可测样品种类多、精度高、数据可靠性好等优点决定了其在滑坡体松散堆积物年代测定中具有明显的优势。但是, 由于¹⁴C 测年上限目前一般在 40 ~ 50 ka, 对于年龄超过 50 ka 的古滑坡体, 以及基岩地区的滑坡体, 该技术存在着一定的不足^[55]。

宇宙成因核素测年技术探索利用¹⁰Be、²⁶Al、³⁶Cl、³He 等作为靶向元素作为测试目标, 这些放射性核素具有较长的半衰期(¹⁰Be、²⁶Al、³⁶Cl 的半衰期分别为 1.36、0.72、0.301 Ma), 非常适用于过去几万年到几百万年地质事件的年龄测定^[56]。虽然这些核素的自然丰度都很低, 但在加速器质谱仪 AMS 的发展应用后, 宇宙成因核素测年技术获得了新的更加广泛和有效的利用。特别是对于¹⁴C 等测年技术受到限制的基岩区较为古老的滑坡体,¹⁰Be 等核素暴露测年方法则可以很好实现年代测定。而且, 测定的滑坡发生导致的岩石暴露接受宇宙射线产生核素的时间与滑坡发生时间是同时的, 无时间差, 地质学意义更加确切^[57]。

相对于宇宙成因核素暴露测年大多限制在抵御自然风化侵蚀较强的基岩区, 光释光测年技术在滑坡灾害更为严重的松散沉积物区的应用则更为广泛。光释光测年范围可从几十年到十几万年, 甚至利用有些样品可以达到 70 多万年, 这弥补了¹⁴C 测年技术的测试上限小于 5 万年的不足。相对于¹⁴C 测年, 光释光测年虽存在误差偏大的不足(一般 5% ~ 10%), 但也具有测年年限范围大、测年物质丰富、直接测定沉积物等明显的优势^[58]。

树木年轮年代学和地衣年代学定年技术应用范围受到一定的限制, 这两种方法都需要在滑坡

体或与其紧密相关的区域获得具有代表性的测年样本,而且测年尺度相对较短。但是,如果在野外踏勘工作中一旦采集到合适的树木年轮和地衣样品,样品又具有明确的滑坡地质学意义,那么其确定的滑坡年代结果则会非常的精准,特别是树木年轮样本,不仅可以精确至年份,甚至有些可以精确到季节。

总之,在滑坡年代学研究中, ^{14}C 、光释光、宇宙成因核素测年技术各有优缺点,在某些方面完全可以互补不足,是较为常用的定年方法。树木年轮年代学与地衣年代学受制于合适测年样本的不易获取,应用范围较小,但对于某些特定滑坡的定年而言,其定年结果的精准程度则仍然会为滑坡年代学研究增光添彩。

3 结论与展望

精确测定滑坡发生的年代,对于研究滑坡灾害的形成演化、致灾机制以及评价区域稳定性意义重大。已经开展的滑坡测年研究中, ^{14}C 、光释光、宇宙成因核素测年、地衣测年、树轮测年等技术方法先后被尝试采用,取得了丰富的研究成果。其中,利用 ^{14}C 、光释光、宇宙核素测年技术分析滑坡年代的研究较多,树轮测年和地衣测年方法应用较少。就研究区域而言,北美、欧洲及东亚等地区已经开展的滑坡年代学研究工作较多,中国在这方面的研究相对较少,且研究主要集中在黄河上游和长江三峡地区。中国已经开展的滑坡年代学研究工作中, ^{14}C 、光释光、宇宙核素测年、树轮测年、地衣测年等技术方法均有涉及,前三种方法利用的较多,树轮和地衣测年方法仅仅是零星尝试开展。

中国是一个滑坡灾害极为频繁的国家,尤其是在中国的西部地区,滑坡更是以危害大、规模大、机制复杂等特点著称于世,在全球具有典型性和代表性。滑坡年代学的研究在中国刚刚开始,具有很大的发展空间和重要的科学意义,对于中国中西部地区,特别是青藏高原和黄土高原地区的防灾减灾、社会经济发展现实意义重大。

参考文献:

- [1] 安芷生,符淙斌. 全球变化科学的进展[J]. 地球科学进展, 2001, 16(5): 671-680.
- [2] 殷跃平. 斜倾厚层山体滑坡视向滑坡机制研究——以重庆武隆鸡尾山滑坡为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 217-226.
- [3] 赵瑞欣,周保,李滨. 黄河上游龙羊峡至积石峡巨型滑坡OSL测年[J]. 地质通报, 2013, 32(12): 1943-1951.
- [4] 杨丽娟,李华亮,易顺华. 陕西五曲湾滑坡发育特征和 ^{14}C 测龄[J]. 灾害学, 2010, 25(3): 49-52.
- [5] 魏宝华. 清江中游典型滑坡石英光释光年代学研究及其环境意义[D]. 宜昌: 三峡大学, 2010.
- [6] 彭建兵,范文,李喜安,等. 汾渭盆地地裂缝成因研究中的若干关键问题[J]. 工程地质学报, 2007, 15(4): 433-440.
- [7] 吴玮江,叶伟林,孟兴民,等. 武都汉林沟流域古滑坡年龄的 ^{14}C 厘定[J]. 地球科学进展, 2011, 26(12): 1276-1281.
- [8] Zhou Weijian, Chen Maobai. Development of radiocarbon dating in China over the past 50 years [J]. Radiocarbon, 2009, 51(1): 91-107.
- [9] 张生. 第四纪沉积物常用测年方法及其适用性研究[J]. 安徽师范大学学报: 自然科学版, 2001, 24(4): 383-388.
- [10] 周卫健,李小强,董光荣,等. 新仙女木期沙漠/黄土过渡带高分辨率泥炭记录-东亚季风气候颤动的实例[J]. 中国科学(D辑), 1996, 26(2): 118-124.
- [11] 孙建中,张景昭,彭建兵,等. 关中活断层和地裂缝的年代学研究[J]. 地质力学学报, 1998, 4(4): 88-97.
- [12] Giovanni Bertolini, Nicola Casagli, Leonardo Ermini, et al. Radiocarbon data on lateglacial and holocene landslides in the Northern Apennines [J]. Natural Hazards, 2004, 31: 645-662.
- [13] Geertsema M, Clague J J. 1, 000-year record of landslide dams at Halden Creek, northeastern British Columbia [J]. Landslide, 2006, 3: 217-227.
- [14] Tamer Y. Duman. The largest landslide dam in Turkey: Tortum landslide [J]. Engineering Geology, 2009, 104: 66-79.
- [15] 蒋瑶,吴中海,刘艳辉,等. 青海玉树活动断裂带的多期古地震滑坡及其年龄[J]. 地质通报, 2014, 33(4): 503-516.
- [16] 赖忠平,欧先交. 光释光测年基本流程[J]. 地理科学进展, 2013, 32(5): 683-693.
- [17] Liu Xiangjun, Lai Zhongping, Madsen David B, et al. Lake level variations of Qinghai Lake in northeastern Qinghai-Tibetan Plateau since 3. 7 ka based on OSL dating [J]. Quaternary International, 2011, 236: 57-64.
- [18] Yu Lupeng, Lai Zhongping. Holocene climate change inferred from stratigraphy and OSL chronology of Aeolian sediments in the Qaidam Basin, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Quaternary Research, 2014, 81: 488-499.
- [19] Huntley D J, Prescott J R. Improved methodology and new thermoluminescence ages for the dune sequence in south-east South Australia [J]. Quaternary Science Reviews, 2001, 20(5/9): 687-699.
- [20] Balescu S, Ritz J F, Lamothe M, et al. Luminescence dating of a gigantic palaeolandslide in the Gobi-Altay Mountains, Mongolia [J]. Quaternary Geochronology, 2007, 2: 290-295.
- [21] Fuchs M, Fischer M, Reverman R. Colluvial and alluvial sediment archives temporally resolved by OSL dating: Implications for reconstructing soil erosion [J]. Quaternary Geochronology, 2010, 5: 269-273.
- [22] Chen Jian, Li Xiao, Yang Zhifa. Baota landslide in Three Gorges area and its OSL dating [J]. Environmental Geology, 2008, 54: 417-425.
- [23] 周保. 黄河上游(拉干峡——寺沟峡段)特大型滑坡发育特征与群发机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
- [24] Guo Xiaohua, Lai Zhongping, Sun Zheng, et al. Luminescence dating of Suozi landslide in the Upper Yellow River of the Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. Quaternary International, 2014, 1/2: 1-8.
- [25] 郭小花. 黄河上游龙羊峡-刘家峡河段巨型滑坡光释光测年[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [26] 顾兆炎,许冰,吕延武,等. 怒江峡谷构造地貌的演化: 阶地宇宙成因核素定年的初步结果[J]. 第四纪研究, 2006, 26(2): 293-294.
- [27] 袁兆德. 帕米尔活动造山带东北部大型滑坡体特征与年代[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2012.
- [28] 张丽,周卫健,常宏,等. 暴露测年样品中 ^{26}Al 和 ^{10}Be 分离及其加速器质谱测定[J]. 岩矿测试, 2012, 31(1): 83-89.
- [29] 袁兆德,陈杰,张会平. 宇宙成因核素埋藏年龄测定及其在地球科学中的应用[J]. 地震地质, 2011, 33(2): 480-489.
- [30] 袁兆德,陈杰,李文巧,等. 帕米尔高原东部塔合曼大型滑坡体的 ^{10}Be 测年[J]. 第四纪研究, 2012, 32(3): 409-416.
- [31] Yi Chaolu, Zhu Ling, Seong Yeong Bae, et al. A lateglacial rock avalanche event, Tianchi Lake, Tien Shan, Xinjiang [J]. Quaternary International, 2006, 154/155: 26-31.
- [32] Mitchell W A, McSaveney M J, Zondervan A et al. The Keylong Serai rock avalanche, NW Indian Himalaya: Geomorphology and palaeoseismic implications [J]. Landslides, 2007, 4(3): 245-254.
- [33] Jason M. Dortch, Lewis A. Owen, William C. Haneberg. Nature and timing of large landslides in the Himalaya and Transhimalaya of northern India [J]. Quaternary Science Reviews, 2009, 28: 1037-1054.

- [34] Ivy-Ochs S, Poschinger A V, Synal H A, et al. Surface exposure dating of the Flims landslide, Graubünden, Switzerland [J]. *Geomorphology*, 2009, 103: 104–112.
- [35] Hewitt K, Gosse J, Clague J J. Rock avalanches and the pace of Late Quaternary development of river valleys in the Karakoram Himalaya [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2011, 123 (9/10): 1836–1850.
- [36] Katia Sanhueza-Pino, Oliver Korup, Ralf Hetzel, et al. Glacial advances constrained by ^{10}Be exposure dating of bedrock landslides, Kyrgyz Tien Shan [J]. *Quaternary Research*, 2011, 76: 295–304.
- [37] Yuan Zhaode, Chen Jie, Lewis A. Owen, et al. Nature and timing of large landslide within an active orogen, eastern Pamir, China [J]. *Geomorphology*, 2013, 182: 49–65.
- [38] Lewis A. Owen, Jason M. Dortch. Nature and timing of quaternary glaciations in the Himalayan-Tibetan orogen [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 88: 14–54.
- [39] Colin K Ballantyne, John O Stone. Timing and periodicity of paraglacial rock-slope failures in the Scottish Highlands [J]. *Geomorphology*, 2013, 186: 150–161.
- [40] Bianchi G Fasani, Di E Luzio, Espito C, et al. Quaternary, catastrophic rock avalanches in the Central Apennines (Italy): Relationship with inherited tectonic features, gravity-driven deformations and the geodynamic frame [J]. *Geomorphology*, 2014, 211: 22–42.
- [41] 李有利, 杨景春. 地衣形态量计在同震滑坡研究中的应用 [J]. *山地研究*, 1998, 16(3): 167–170.
- [42] Bull W B, King J, Kong F, et al. Lichen dating of coseismic landslide hazards in Alpine mountains [J]. *Geomorphology*, 1994, 10: 253–264.
- [43] Bull W B, Brandon M T. Lichen dating of earthquake-generated regional rockfall events, Southern Alps, New Zealand [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1998, 110(1): 60–84.
- [44] Bull W B. Lichenometry dating of coseismic changes to a New Zealand landslide complex [J]. *Annals of geophysics*, 2003, 46 (5): 1155–1167.
- [45] Malgorzate Bajgier-Kowalska. Lichenometric dating of landslide episodes in the Western part of Polish Flysch Carpathians [J]. *Catena*, 2008, 72: 224–234.
- [46] Liu Yu, Cai Qiufang, Song Huiming, et al. Amplitudes, rates, periodicities and causes of temperature variations in the past 2485 years and future trends over the central-eastern Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 56 (28/29): 2986–2994.
- [47] Rosanna Fantucci, Marino Sorriso-Valvo. Dendrogeomorphological analysis of a slope near Lago, Calabria (Italy) [J]. *Geomorphology*, 1999, 30: 165–174.
- [48] Paul E Carrara, J Micheal O' Neill. Tree-ring dated landslide movements and their relationship to seismic events in Southwestern Montana, USA [J]. *Quaternary Research*, 2003: 25–35.
- [49] Paul E Carrara. Movement of a large landslide block dated by tree ring analysis, Tower Falls Area, Yellowstone National Park, Wyoming [C]//Integrated Geoscience Studies in the Greater Yellowstone Area. U. S. Geological Survey. USGS, 2007: 43–51.
- [50] Maria Cleofe Stefanini. Spatio-temporal analysis of a complex landslide in the Northern Apennines (Italy) by means of dendrochronology [J]. *Geomorphology*, 2004, 63: 191–202.
- [51] Miet Van Den Eeckhaut, Muys B, Van K Loy et al. Evidence for repeated re-activation of old landslides under forest [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34: 352–365.
- [52] Kenji Kashiwaya, Takashi Okimura, Takeshi Kawatani. Critical precipitation conditions for landslide and tree ring responses in the Rokko Mountains, Kobe, Japan [C]//The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources. IAHS, 1987: 191–197.
- [53] 洪婷, 白世彪, 王建, 等. 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.
- [54] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(3): 433–454.
- [55] 殷志强, 魏刚, 祁小博, 等. 黄河上游寺沟峡—拉干峡段滑坡时空特征及对气候变化的响应研究 [J]. *工程地质学报*, 2013, 21(1): 129–137.
- [56] 卢演铸, 陈杰, 尹功明. 活动构造测年方法及年代学研究新进展 [J]. *地震地质译丛*, 1994, 4: 1–8.
- [57] Dong Guanghui, Zhang Fanyu, Ma Minmin, et al. Ancient landslide-dam events in the Jishi Gorge, upper Yellow River valley, China [J]. *Quaternary Research*, 2014, 81: 445–451.
- [58] 殷志强, 程国明, 胡贵寿, 等. 晚更新世以来黄河上游巨型滑坡特征及形成机理初步研究 [J]. *工程地质学报*, 2010, 18(1): 41–51.

The Application Progress on Research Methods of Landslide Chronology

Yang Yinke^{1,2}, Peng Jianbing² and Liu Cong²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering Ministry, School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The study on landslide chronology is important for the formation and development, the prediction and warning systems and the risk assessment of landslide hazard. In order to do a comparative analysis of every landslide dating new technologies, the recent application advances on landslide dating both at home and abroad are summarized. Various technologies of landslide dating, such as ^{14}C , OSL, Cosmogenic nuclides, tree-ring and lichenometry of dating, are discussed and analyzed in detail. The merits and demerits of various technologies and practical problem of landslide dating are discussed and corresponding solutions are given. It is indicated in the conclusion that research projects of ^{14}C , OSL, Cosmogenic nuclides have been well studied, but projects of tree-ring and lichenometry relatively less. Much of the research in the world are focused in Europe, North America and East Asia, etc, however, few in China. The domestic studies are mostly focused in the Upper Yellow River and the Three Gorges area. The researches of landslide chronology are just beginning and have great capabilities and scientific importance in China. To the Midwest, especially the Qinghai-Tibet Plateau and the Loess Plateau, the studies of landslide chronology have great practical significance for the disaster prevention and mitigation and the socioeconomic development.

Key words: landslide; chronology; ^{14}C ; OSL; Cosmogenic nuclides