

文章编号: 1008-2786-(2020)1-132-10

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000497

基于树木地貌法重建崩塌历史事件 ——以川东华蓥山石林为例

王锐^{a,b}, 马超^{a,b*}, 王云琦^{a,b}, 王玉杰^{a,b}

(北京林业大学 水土保持学院 a. 重庆三峡库区森林生态系统教育部野外科学观测研究站;

b. 重庆缙云山三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站;100083, 北京)

摘 要: 了解崩塌活动史与区域气候变化之间的关系对于掌握区域山地灾害形成规律, 预测未来发展趋势具有非常重要的作用。利用树木地貌法可以准确掌握山地灾害发生频率, 并为定量分析气候变化对山地灾害发生发展趋势提供支撑。本文以川东华蓥山石林景区一大型崩塌为研究对象, 通过杉木树木年轮、降水和气温数据对该崩塌活动时间进行分析。结果表明: 该崩塌可能共有四个活动年份, 2015 年为大规模活动年份, 2008 年、2012 年和 2016 年为小规模活动年份, 崩塌活动的季节主要集中在旱材期间(4 月—9 月)。基于滚石冲击树干产生的愈伤组织和标准木年轮对比表明: 树木在受到滚石冲击后, 都表现为生长抑制, 且树木年轮宽度要滞后滚石活动 1 年。参考树木与干扰树木年轮宽度和月降雨量没有相关性, 但干扰树木年轮与月平均气温(4 月—9 月)呈负相关关系。本研究结果可以为研究区内山地灾害活动史与气候变化关系提供支撑, 尤其是为研究区域降雨诱发的崩塌活动规律提供借鉴。

关键词: 崩塌滚石; 树木地貌法; 华蓥山

中图分类号: P642

文献标志码: A

崩塌、滚石是高山峡谷区中常见的山地灾害^[1], 其重量可高达几十吨, 坠落速度超过几十米每秒^[2], 具有强大的冲击力^[3-4], 在中国西部山区, 往往形成大规模的崩塌灾害^[5-7]。而这些山地灾害潜伏期长、辨识难, 往往对交通、建筑、人民生命财产安全构成巨大威胁^[8-12]。利用树木地貌法可以较好地识别这些灾害发生的历史。崩塌、滚石活动对树木一般有四种影响^[13-18]。对树干产生撞击, 并留下伤疤; 堆积在上坡方向使树干发生倾斜; 长时间堆积产生的侧向压力使树干产生弯曲或者压力过大导致折断; 因周围树木的损毁造成树木生境变化。这些因崩塌产生的外界干扰信号都能够很好地记录在

树轮里面。因此, 可以通过树轮变化分析树木受到灾害之后的响应, 为重建崩塌滚石活动提供可靠的手段和方法^[19]。目前, 利用树木地貌法重建崩塌、滚石事件研究成果多见于欧洲地区和北美地区, 如 Perret 等^[20]在瑞士阿尔卑斯山脉分析了 33 棵云杉圆盘, 重建了 1724—2002 年的 301 次崩塌事件, 崩塌与年平均、夏季和冬季气温呈正相关, 与年降水量或季节降水量无相关性。Stoffel 等^[21-24]通过对愈伤组织研究, 确定了崩塌、滚石发生的时间、频率和范围等, 并且发现了崩塌滚石主要发生在非生长季。

国内利用树木地貌学方法重建山地灾害已有部分研究出现^[25-27], 而对落石发生频率、发生时间的

收稿日期(Received date): 2019-03-04; 改回日期(Accepted date): 2019-11-28

基金项目(Foundation item): 国家重点研发计划(2017YFC0505602)。[National Key Research and Development Project(2017YFC0505602)]

作者简介(Biography): 王锐(1994-), 女, 硕士研究生。主要研究方向: 树木年代学。[WANG Rui(1994-), born in Yuncheng, Shanxi province, M. Sc. candidate, research on dendrochronology] E-mail: wangrui@bjfu.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author): 马超(1986-), 男, 副教授, 主要研究方向: 植被与山地灾害。[MA Chao(1986-), male, associate professor, Ph. D. research on vegetation and mountain hazards] E-mail: sanguoxumei@163.com

确定等方面的研究还未见。本文以四川省华蓥山脉主峰石林一大型崩塌为研究对象,在实地调查受干扰的杉木分布基础上,对受干扰树和标准树年轮进行取样,先建立年轮宽度年表,再分析树木受到落石冲击和掩埋的响应,并重现该崩塌发生的年份和季节,以期为研究区域气候变化和山地灾害活动提供支撑。

1 研究区概况

华蓥山脉位于四川省和重庆市境内,地处四川盆地东部的川东平行岭谷带,北起大巴山南麓,向南延至重庆江津区(图1)。研究区位于华蓥山以东(属川东地区)的华蓥山国家地质公园,为国家旅游景点,属于亚热带湿润季风气候,气候温暖潮湿、雨量充沛,多年平均降水量1209 mm,降水多集中在4月—9月份(图2)。海拔为1100~1300 m。海拔800 m以上,冬春有霜雪出现。区域为白云岩、次生石灰岩、硬石膏等。该研究区植被覆盖好,主要植被类型乔木层为杉木,灌木层仅有少数马桑跟川莓,草

本层的优势种为野草莓。而乔木层杉木为针叶树种,树木年轮明显,适合进行树木地貌法的研究。另外,研究区构造活动强烈,地质环境较复杂,是山地灾害的多发区^[28]。

2 研究方法

2.1 年轮样品获取

在经过实地调查之后,确定需要采取的树木(图1),并用手持GPS确定受伤树木的位置(图1),同时记录受伤树木的胸径。用相机对整棵树及每个伤口进行拍照(图3a),以便在实验室进行分析。

在不影响树木正常生长的前提下,采用内径为5.15 mm的生长锥对干扰树木和参考树木进行采样。对于干扰树木采样主要是针对具有伤疤的树木(图3a),采样时一般在C处提取年轮样本较为理想(图3b)^[13],因为愈伤组织只发生在损伤的边缘,而愈伤组织在年轮中的位置是精确确定灾害事件发生时间的重要特征。

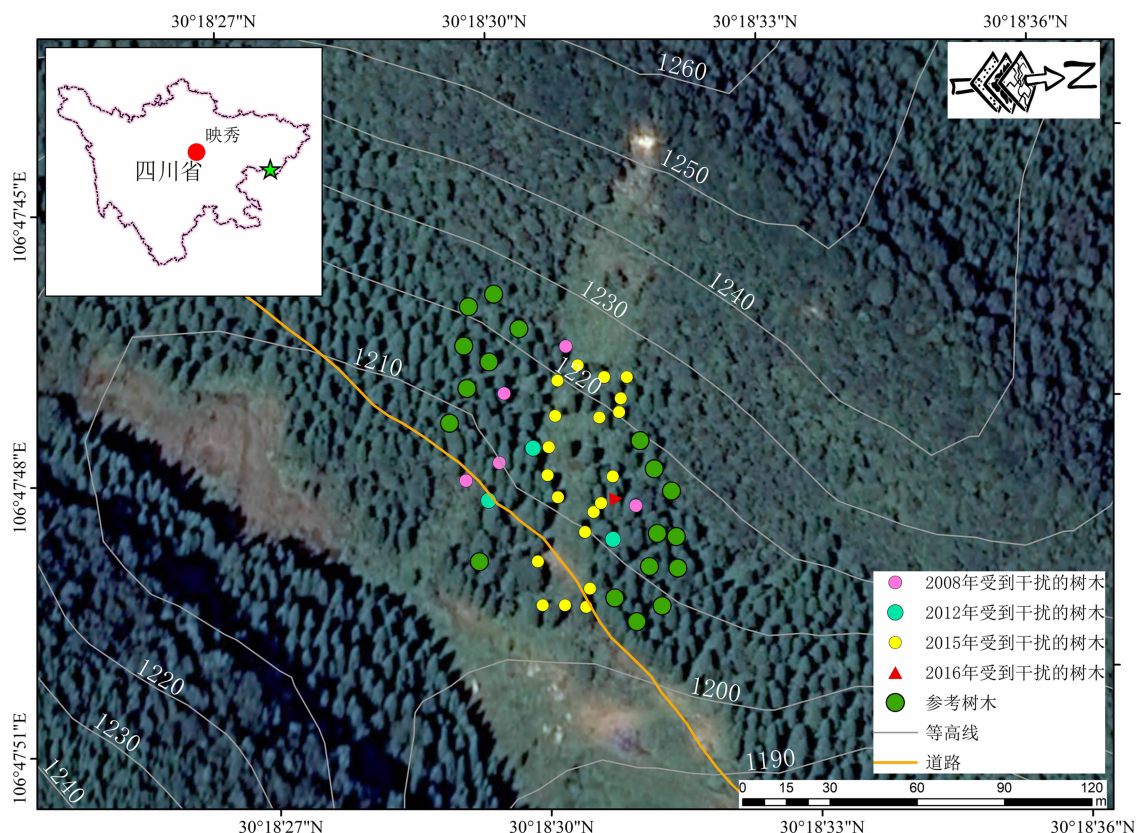


图1 研究区

Fig. 1 Study area location in China

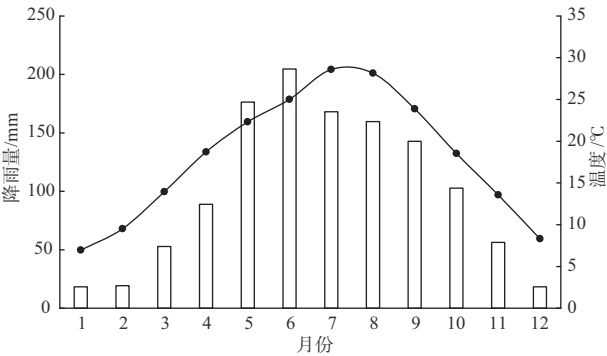


图2 研究区域月平均温度和降水量
Fig.2 Monthly mean temperature and precipitation in the study area

此外,将同一类型树木但没有受到崩塌滚石影响的树木作为参考树木,参考树木采样时,在每棵树的胸径位置(1.3 m 左右)进行采样,沿交叉方向采取 2 个样品。将参考树木与受干扰的树木进行对比分析,用来排除受到区域气候、温度以及外界因素干扰的树木年轮时间序列。

2.2 样本处理和年轮分析

将年轮样本用纸筒封装,自然风干,放在特制木

质凹槽中,经 300 目、600 目、800 目、1000 目和 1500 目的砂纸逐级打磨至树轮界限和细胞在显微镜下清晰可见(图 4)^[29]。使用 LinTabTSAPWin6.0 树木年轮分析系统(精度为 0.001 mm)测量年轮宽度,利用 COFECHA^[30] 程序对交叉定年进行检验。检验过程中,剔除或重测与树轮序列相关性较低的样品,最终确定每一树轮所对应的年份,用于年表研制。利用 dplr 程序对原始树木年轮宽度去趋势化,采用标准化的年表(STD)分别与月平均降水和月平均气温进行响应分析。

3 结果与分析

3.1 交叉定年结果

树木地貌学以树轮交叉定年确定的每一年年轮的年份为基础,进而确定灾害发生的时间。树木的生长与立地环境密切相关,并受到气候变化的影响,大多数树木年轮的宽窄能够真实的记录每年外界环境的变化。参考树木的生长主要受到气候的影响,

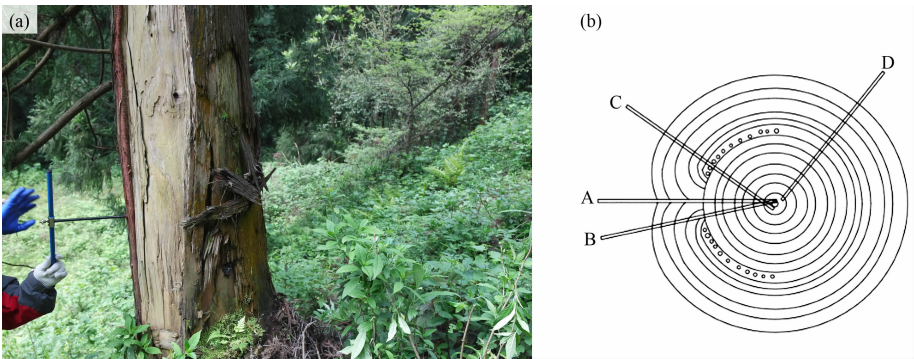


图3 崩塌点采样实物图(a)以及受损伤树木采样位置(b)
Fig.3 Sample physical map of the collapse point (a) and the location of the damaged tree(b)



图4 年轮样品
Fig.4 Tree ring Samples

其影响程度相同,具有相同的生长趋势;而受到崩塌影响之后的树木,它们的树冠、根系或树干等受损程度等不一样,进而造成受干扰的树木年轮样本定年成功率会比未受干扰的树木的定年成功率低。

研究区以人工林杉木为主,共对 52 棵杉木进行取样,计 110 个年轮样品(表 1)。其中干扰树木取样 34 棵,样品 80 个,定年成功的树木有 21 棵(41 个样品),交叉定年成功率为 51.25%,树龄分布在 24 年左右,胸径范围在 15~34 cm 之间。参考树木取样 18 棵,样品 30 个,通过交叉定年检验的有 27 个样品,成功率为 90%,树龄分布在 27 年左右,胸径范围为 25.8~40 cm(受干扰树木与参考树木分布见图 1)。

表 1 样品基础数据

Tab. 1 Basic sample data

类型	受到干扰的样品	参考样品
采取的样品数/个	80	30
通过交叉定年的样品数/个	41	27
未通过交叉定年的样品数/个	39	3
交叉定年的百分比/%	51.25	90.12
树龄分布/年	24	27
胸径范围/cm	25.60~40.00	15.00~34.00

3.2 崩塌落石年份

树木受到崩塌滚石活动撞击后,会形成伤疤,在伤疤的部位不会有年轮的形成,而在伤疤的边缘开始过渡形成愈伤组织,即依据年轮内愈伤组织形成的时间来确定崩塌滚石的季节,并以此来确定过去滚石活动时间^[31-33]。

根据愈伤组织的位置(图 4),将滚石发生的年份定为 2008 年、2012 年、2015 年和 2016 年。图 5 所示,2008 年、2012 年、2015 年和 2016 年受滚石活动影响的树木分别有 5 棵、3 棵、12 棵和 1 棵(共 21 棵),通过交叉定年的样品数分别为 9 个、7 个、23 个和 2 个(图 5)。在过去 20 年间,将这几次崩塌滚石活动受到影响的树木进行比较,确定 2015 为崩塌大规模活动年份,2008 年、2012 年和 2016 年为小规模崩塌活动年份。

图 6 是干扰的树木与参考树木的年轮指数图。结果显示,树木年轮在 2009 年、2013 年和 2016 年表现出明显的生长抑制,即树木年轮宽度对崩塌滚

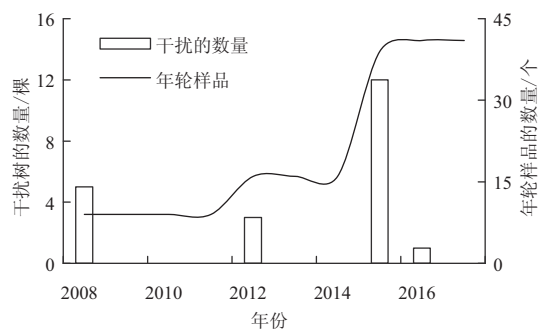


图 5 受干扰树木的数量

Fig. 5 The number of disturbed trees

石活动的响应要滞后 1 年。抑制的程度分别为 50.2%、35.9% 和 19%。2008 年崩塌的抑制程度最大,2012 年的抑制程度最小。这可能是由于在 2008 年树木受到崩塌滚石的碰撞产生的伤疤也较大,使得树木响应程度比较强烈(图 7)。

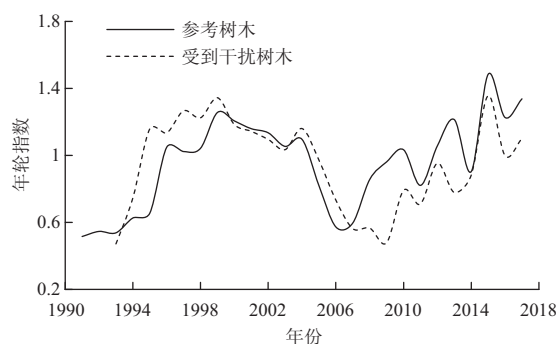


图 6 参考树木与干扰树木的年轮指数

Fig. 6 Tree ring index of reference trees and interference trees

3.3 落石活动时间

通过分析 21 棵树(41 个样品)愈伤组织在年轮内的位置来确定岩崩落石活动发生的季节^[31-32]。图 8 显示,该研究区崩塌落石活动主要发生在早材期间(90%),其次发生在休眠季节(5%),晚材期间仅占 5%。崩塌滚石活动发生在 2008 年、2012 年和 2016 年的样品全部发生在早材期间;在 2015 年各有一棵树受到崩塌滚石活动影响的时间发生在晚材和休眠期,其余的全部发生在早材期间。根据年轮内愈伤组织形成的位置和 2008 年、2012 年、2015 年及 2016 年的降水数据(图 9)推测滚石发生月份。结果显示崩塌滚石分别发生于 2008 年 8 月、2012 年 5 月、2015 年 6 月和 2016 年 6 月。可见,崩塌滚石活动大多数发生在树木的早材期间(4 月—9 月),在非生长季较少。



图 7 崩塌树木实物图 (a)2015 年受影响 (b)2008 年受影响

Fig. 7 Trees physical maps affected by the collapse in 2015 (a) and 2008 (b)

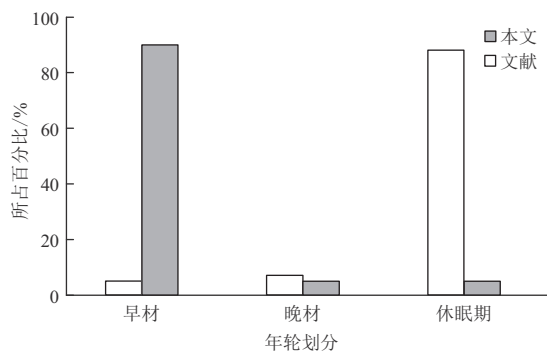


图 8 崩塌活动时间分布图

Fig. 8 Time distribution map of rockfall activity

3.4 气候相关分析

年表的统计量显示(表 2),干扰年表的平均敏感度、第一特征向量、信噪比和样本总体代表性均高于参考年表,说明干扰年表包含更多的环境信息,对气候的变化更为敏感,更易受到环境的影响,并且两个年表的样本总体代表性均超过 85%,可以用于年轮气候学的研究。

表 2 年表统计特征

Tab. 2 Statistical Characteristics of the Chronology

年表类型	S. D.	M. S.	A. C.	PCI/%	SNR	EPS
参考年表	0.21	0.16	0.44	41.17	7.815	89.3
干扰年表	0.32	0.28	0.44	69.24	18.61	96.53

注: S. D. 为标准差; M. S. 为平均敏感度; A. C. 为一阶自相关系数; PCI 为第一主分量所占的方差量; SNR 为信噪比; EPS 为样本对总体的解释信号。

将参考树木和干扰树木分别与月降水量进行相关分析,结果显示:(图 10a)树轮宽度与月降水量的相关性较差。参考树木与当年 2 月降水显著负相关

($P < 0.05$),而干扰树木与月降水量均未达到显著水平。相比于参考树木,受到干扰的树木与月降水量的相关性有下降的趋势,但并不是很明显。

将参考树木和干扰树木分别与月平均温度进行相关分析,结果所示(图 10b)参考树木和受干扰树木都与去年 10 月份呈显著的正相关($P < 0.05$)。而受干扰树木与 1 月平均气温显著正相关。相比于参考树木,受到干扰的树木对气温的响应有明显的上升趋势。

4 讨论

本文利用树木地貌法得出该研究区崩塌滚石活动大多数发生在树木的早材期间(4 月—9 月),非生长季则较少。相关学者对该区气象水文资料和崩塌之间的相关性分析表明,在坡度、坡高和地质等其他影响因素都具备的条件下,持续降雨和大暴雨是崩塌滚石活动影响的主要因素^[34],大多数发生在降雨量较大的时间段(4 月—9 月),这与本文中的研究结果相一致。在类似的研究中,瑞士阿尔卑斯山塔斯古弗森林斜坡上 18 棵落叶松年轮和 270 个茎盘研究表明^[35,36]:崩塌滚石活动主要发生在树木的非生长期(图 8)。这与本文中崩塌滚石活动的主要发生时间恰好相反。造成两者不同的主要原因在于两个地区发生灾害的诱发因素不一样。在古弗森林的初冬时节(非生长季的 3 月),积雪开始融化,岩石裂缝中的融水始终处于凝固—融化循环之中,加剧岩石裂缝的扩展,并导致岩石之间的胶结程度降低,进而触发崩塌活动。而华莹山石林景区在生长季节(4 月—9 月),降雨密集,岩石在遇水的情况下容重增加,反复膨胀导致崩解,易

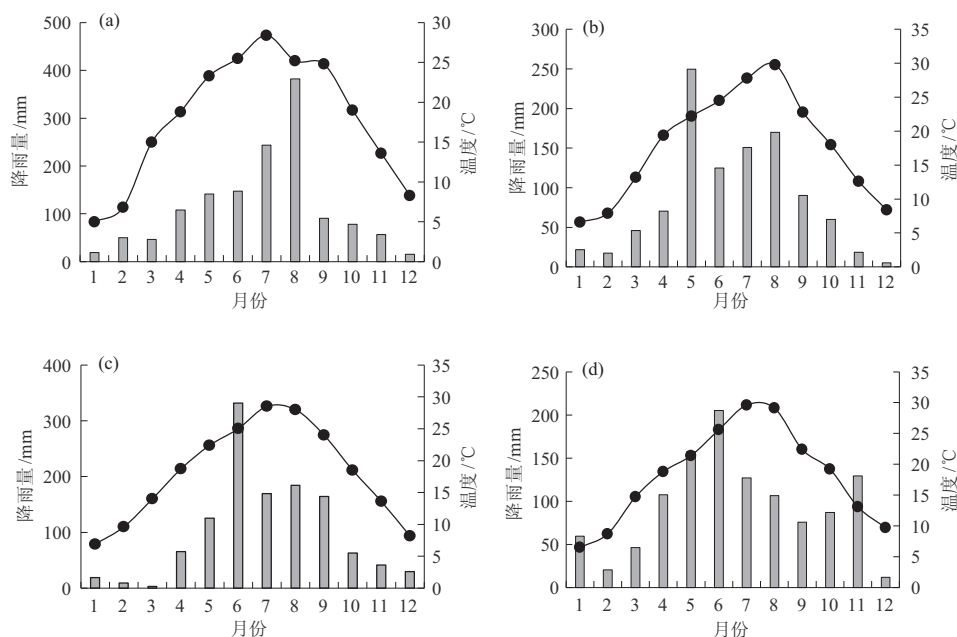


图9 灾害年份降雨、气温分布图(a)2008年(b)2012年(c)2015年(d)2016年

Fig. 9 Distribution of rainfall and temperature in disaster Years

于软化,而且岩石中的可溶性盐类极易被水溶解带走,影响其胶结,造成抗剪强度降低,进而引起崩塌^[37]。

通过树木年轮宽度指数曲线分析可得,树木年轮宽度对崩塌滚石活动的响应要滞后1年。根据愈合组织的位置可知崩塌发生与2008年、2012年、2015年和2016年,而树木年轮宽度在次年产生明显的生长抑制(图6)。这在类似的树木年轮法判别自然灾害的研究中并不是特例:已有学者对泥石流与地震灾害迹地的树木年轮进行研究,树木年轮对于灾害的响应在当年或者滞后了1年^[26,38-40]。这可能主要取决于灾害的发生时间(月份)与树木的生长季节之间的先后顺序。根据对研究区树木年轮的测定表明2008年、2012年、2015年和2016年的崩塌灾害均发生生长季中间时段之后,所以树木年轮宽度会在次年产生明显的生长抑制(图6)。

参考树木年表与干扰树木对于月降雨量的响应程度没有很大的变化,而受干扰树木与月平均气温呈现出明显的负相关性。已有研究表明同种树木组成的健康林分和受损伤的林分对温度和降水的响应存在差异,受损林分对不利的气候条件更为敏感^[41]。这主要是因为受干扰的树木由于根系或者形成组织的破坏,在降雨比较充足的条件下,干扰树木对于气温的变化更加明显,即温度越高(4月—9

月),树木生长越差。

5 结论

本文以川东华蓥山主峰石林景区的一处大型崩塌为研究对象,通过树木年轮样品重建研究区崩塌活动年份,并对降水和气温特点进行了分析,结果表明:

(1)华蓥山石林景区在过去20年间可能有四次落石活动,时间分别为2008年8月、2012年5月、2015年6月和2016年6月。2015年为大规模崩塌活动年份,2008年、2012年和2016年为小规模活动年份。并且崩塌滚石活动大多数发生在树木的生长的早材期间(4月—9月),在非生长季非常罕见。

(2)树木年轮宽度指数曲线分析结果显示,树木年轮在2009年、2013年和2016年表现出明显的生长抑制。其结果对崩塌的响应滞后1年,树木年轮宽度对崩塌滚石活动的响应滞后1年,即在树木受到崩塌滚石影响后的次年,树木年轮宽度才会对崩塌滚石活动产生响应。

(3)同种树木组成的健康林分和受损伤的林分对温度和降水的响应存在差异,受损林分对不利的气候条件更为敏感。

(4)树木地貌法具有一定的局限作用。在快速

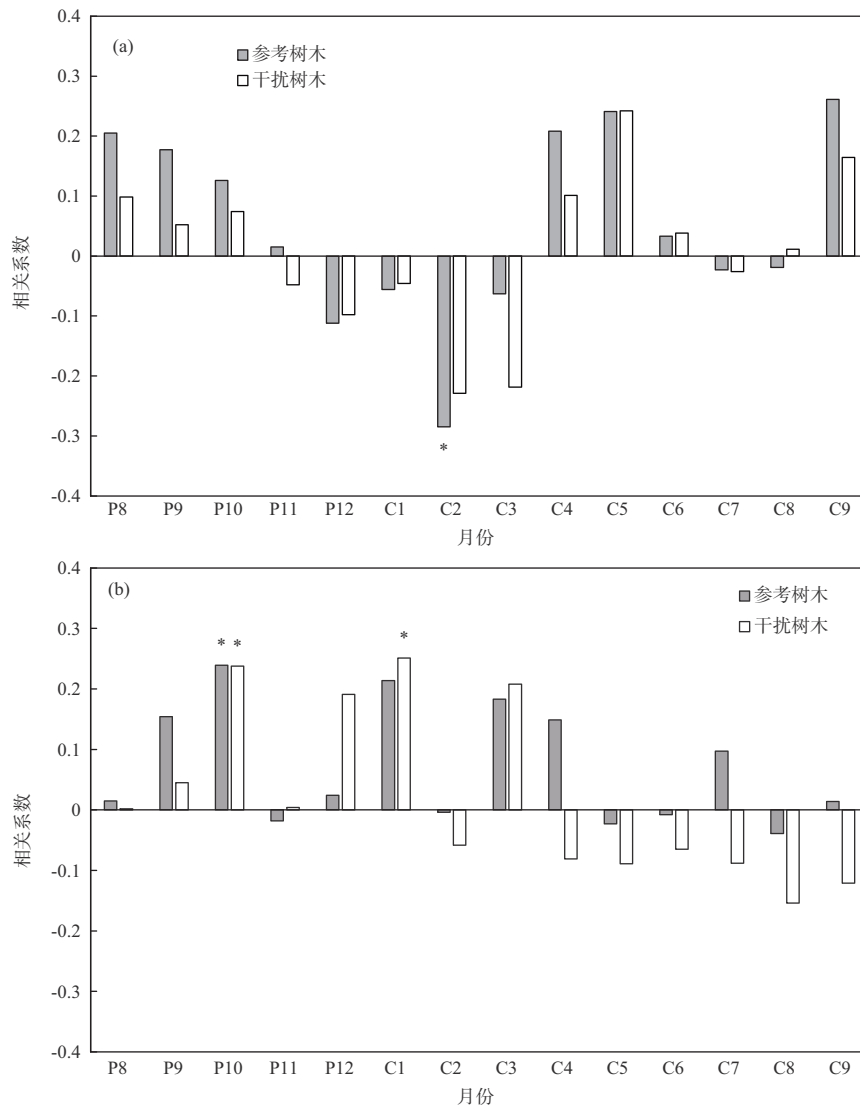


图 10 年表与气候相关分析:(a)年表与月平均降水的响应分析;(b)年表与月平均温度的响应分析

注 P 表示前一年的月份,C 后为当年的月份

Fig. 10 Correlation analysis of chronology and climate:(a) Response analysis of chronology and monthly mean precipitation;

(b) response analysis of chronology and monthly mean temperature

Note: P refers to the month of the previous year, C refers to the month of the current year

生长的树木中,小伤口可能在短短几年内完全愈合,以及对于一些受到灾害发生时间比较久的树木中,这些伤口可能都已经愈合,从外面并不能看出受过影响。这些都可能影响结果,造成部分灾害活动的缺失。

参考文献 (References)

- [1] 于廷新. 四川地震灾区陈家山坪崩塌稳定性评价及治理研究 [D]. 长春:吉林大学, 2010. [YU Yanxin, Research on stability evaluation and treatment of Chenjiashanping collapse in Sichuan earthquake disaster area [D]. Changchun Jilin University, 2010]
- [2] 张路青,杨志法,张英俊. 公路沿线遭遇滚石的风险分析——方
- 法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(S2):5543 – 5548. [ZHANG Luqing, YANG Zhifa, ZHANG Yingjun. Risk analysis of encountering rockfalls on highway and method study. [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2005, **24** (S2): 5543 – 5548]
- [3] 乔建平,蒲晓虹. 四川沐川—马边(1994 – 12 – 30)5.5 级地震山地灾害类型研究[J]. 自然灾害学报, 1995 (3): 92 – 98. [QIAO Jianping, PU Xiaohong. Study on types of mountain disaster induced by Muchu and mabian earthquake (M = 5.5) on 1994 – 12 – 30 in Sichuan [J]. Journal of Natural Disasters, 1995 (3): 92 – 98]
- [4] 张路青,杨志法,许兵. 滚石与滚石灾害[J]. 工程地质学报, 2004, **12** (3): 225 – 231. [ZHANG Luqing, YANG Zhifa, Xu Bing. Rock falls and rock fall hazards [J]. Journal of Engineering

- Geology, 2004, **12**(3):225–231]
- [5] 张广裕. 西部地区环境保护与地质灾害防治研究[J]. 河北科技大学学报: 社会科学版, 2016, **16**(4): 15–19. [ZHANG Guangyu, Study on environmental protection and prevention of geological disasters in West China [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology (Social Sciences), 2016, **16**(4): 15–19]
 - [6] 沈均, 何思明, 吴永. 滚石灾害研究现状及发展趋势[J]. 灾害学, 2008, **23**(4): 122–125. [SHEN Jun, HE Siming, Wu Yong. Present Research Status and Development Trend of Rockfall Hazards [J]. Journal of Catastrophology, 2008, **23**(4): 122–125]
 - [7] 何思明, 王东坡, 吴永, 等. 崩塌滚石灾害的力学机理与防治技术[J]. 自然杂志, 2014, **36**(5): 336–345. [HE Siming, WANG Dongpo, Wu Yong, et al. Formation mechanism and key prevention technology of rockfalls [J]. Chinese Journal of Nature, 2014, **36**(5): 336–345]
 - [8] 李文鑫, 王兆印, 王旭昭, 等. 汶川地震引发的次生山地灾害链及人工断链效果——以小岗剑泥石流沟为例[J]. 山地学报, 2014, **32**(3): 336–344. [LI Wenxin, WANG Zhaoyin, WANG Xuzhao, et al. Secondary mountain disaster chain induced by the Wenchuan Earthquake and the result of chain-cutting engineering in the Xiaogangjian Gully [J]. Mountain Research, 2014, **32**(3): 336–344]
 - [9] 崔鹏, 韦方强, 陈晓清, 等. 汶川地震次生山地灾害及其减灾对策[J]. 中国科学院院刊, 2008, **23**(4): 317–323. [CUI Peng, WEI Fangqiang, CHEN Xiaoqing, et al. Geo-hazards in Wenchuan earthquake area and countermeasures for disaster reduction [J]. S&T for Disaster Relief, 2008, **23**(4): 317–323]
 - [10] 崔鹏, 韦方强, 何思明, 等. 5·12汶川地震诱发的山地灾害及减灾措施[J]. 山地学报, 2008, **26**(3): 280–282. [CUI Peng, WEI Fangqiang, HE Siming, et al. Mountain disasters induced by the earthquake of May 12 in Wenchuan and the disasters mitigation [J]. Mountain Research, 2008, **26**(3): 280–282]
 - [11] 黄小福. 地震条件下崩塌落石运动特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016. [Huang Xiaofu. Mobility character of earthquake-induced rockfall [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016]
 - [12] 罗博宇. 四川省崩塌灾害特征及防治工程效果评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2017. [LUO Boyu. The characteristic of collapse and effectiveness evaluation of its prevention and control projects in Sichuan Province [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017]
 - [13] 唐亚, 谢嘉穗, 李蓬勃, 等. 树木年代学在山地自然灾害研究中的应用[J]. 工程科学与技术, 2018(3): 29–37. [TANG Ya, XIE Jiasui, LI Pengbo, et al. Potential application of dendrochronology in the research of mountain natural disasters [J]. Advanced Engineering Sciences, 2018(3): 29–37]
 - [14] JACOBY G C. Application of tree ring analysis to paleo seismology [J]. Reviews of Geophysics, 1997, **35**(2): 109–124.
 - [15] STOFFEL M. Magnitude-frequency relationships of debris flows—a case study based on field surveys and tree-ring records [J]. Geomorphology, 2010, **116**(1–2): 67–76.
 - [16] JACOBY G C, BUNKER D E, BENSON B E. Tree-ring evidence for an A. D. 1700 Cascadia earthquake in Washington and northern Oregon [J]. Geology, 1997, **25**(11): 999–1002.
 - [17] STOFFEL M, BOLLSCHWEILER M. Tree-ring analysis in natural hazards research—an overview [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2008, **8**(2): 187–202.
 - [18] 穆叶赛尔·吐地, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清. 树木年轮学方法在自然灾害研究中的应用[J]. 干旱区研究, 2014, **31**(2): 267–273. [MUYESSAR Turdi, JILILI Abuduwaili, JIANG Fengqing. Application of dendrochronology in studying natural hazards [J]. Arid Zone Research, 2014, **31**(2): 267–273]
 - [19] BOLLSCHWEILER M, STOFFEL M. Tree rings and debris flows: recent developments, future directions [J]. Progress in Physical Geography, 2010, **34**(5): 625–645.
 - [20] PERRENT Simone, STOFFEL Markus, KIENHOLZ Hans. Spatial and temporal rockfall activity in a forest stand in the Swiss Prealps — a dendrogeomorphological case study [J]. Geomorphology, 2006, **74**(1): 219–231.
 - [21] STOFFEL Markus. Assessing the vertical distribution and visibility of rockfall scars in trees [J]. Schweizerische Zeitschrift Fur Forstwesen, 2005, **156**(6): 195–199.
 - [22] SCHNEEUWLY D M, STOFFEL M. Tree-ring based reconstruction of the seasonal timing, major events and origin of rockfall on a case-study slope in the Swiss Alps [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences. 2008, **8**(2): 203–211.
 - [23] STOFFEL M. A Review of studies dealing with tree rings and rockfall activity: the role of dendrogeomorphology in natural hazard research [J]. Natural Hazards, 2006, **39**(1): 51–70.
 - [24] SCHNEEUWLY D M, STOFFEL M. Spatial analysis of rockfall activity, bounce heights and geomorphic changes over the last 50 years—a case study using dendrogeomorphology [J]. Geomorphology, 2008, **102**(3): 522–531.
 - [25] 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. [HONG Ting, BAI Shibiao, WANG Jian, et al. Reconstruct the activity years of Jiufangshan landslide by means of tree-rings [J]. Mountain Research, 2012, **30**(1): 57–64]
 - [26] 铁永波, Ireneusz, Malik, 等. 树木年代学在高寒山区泥石流历史事件重建中的应用——以磨西河流域倒灶沟为例[J]. 山地学报, 2014, **32**(2): 226–232. [TIE Yongbo, Ireneusz Malik, Piotr Owczarek. Dendrochronological dating of debris flow historical events in high mountain area—take Daozao Debris Flow as an example [J]. Mountain Research, 2014, **32**(2): 226–232]
 - [27] ZHANG Yong, STOFFEL Markus, LIANG Eryuan, et al. Centennial-scale process activity in a complex landslide body in the Qilian Mountains, northeast Tibetan Plateau, China [J]. Catena,

- 2019, 179: 29 – 38.
- [28] 李玉生. 华蓥山区地质灾害发育规律[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1990(1): 35 – 44. [LI Yusheng. Development law of geological hazard in Huaying MT. Area [J]. Journal of Geological hazard and control, 1990(1): 35 – 44]
- [29] 王棒. 树木年代学在灾害研究中的应用[D]. 北京: 北京林业大学, 2006. [WANG Bang. Application of dendrochronology in studying natural hazards [D]. Beijing: Beijing Forestry University. 2006]
- [30] 马志远, 高露双, 郭静, 等. TSAP 软件和 COFECHA 软件交叉定年差异研究——以长白山阔叶红松林优势树种红松为例[J]. 四川农业大学学报, 2014, 32(2): 141 – 147. [MA Zhiyuan, GAO Lushuang, GUO Jing, et al. Crossing-dating differences between COFECHA and TSAP: a case study in Korean pine of Changbai mountain [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2014, 32(2): 141 – 147]
- [31] SCHWEINGRUBER F H. Tree rings and environment; dendroecology [J]. Tree Rings and Environment Dendroecology, 1996, 46(3): 241 – 254.
- [32] SCHNEUWLY D M, STOFFEL M. Tree-ring based reconstruction of the seasonal timing, major events and origin of rockfall on a case-study slope in the Swiss Alps [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2008, 8(2): 203 – 211.
- [33] Trappmann D, Corona C, Stoffel M. Rolling stones and tree rings: a state of research on dendrogeomorphic reconstructions of rockfall [J]. Progress in Physical Geography, 2013, 37(5): 701 – 716.
- [34] 李壮壮. 川东红层地区缓倾顺层崩塌发育机制与防治对策 [D]. 北京: 中国地质大学, 2018. [LI Zhuangzhuang. Formation mechanism and prevention strategies for collapse in gently inclined red stratum in east Sichuan basin [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2008]
- [35] STOFFEL Markus, PERRET, et al. Reconstructing past rockfall activity with tree rings: Some methodological considerations [J]. Dendrochronologia, 2007, 24(1): 1 – 15.
- [36] STOFFEL M, BOLLSCHWEILER M. Tree-ring analysis in natural hazards research – an overview [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2008, 8(2): 187 – 202.
- [37] 徐波, 周申立, 康艳梅, 等. 四川华蓥山地重力灾害类型及成因分析[J]. 工程地质学报, 2006, 14(6): 763 – 768. [XU Bo, ZHOU Shenli, KANG Yanmei. Type and causes of mountain hazards in Huaying Region Sichuan Province. Journal of Engineering Geology. 2006, 14(6): 763 – 768]
- [38] MOYA, COROMINAS, ARCAS P, et al. Tree-ring based assessment of rockfall frequency on talus slopes at Solà d'Andorra, Eastern Pyrenees [J]. Geomorphology, 2010, 118(3): 393 – 408.
- [39] ARSDALE R B V, STAHL D W, CLEAVELAND M K, et al. Earthquake signals in tree-ring data from the New Madrid seismic zone and implications for paleoseismicity [J]. Geology, 1998, 26(6): 515 – 518.
- [40] WELLS A, YETTON M D, DUNCAN R P, et al. Prehistoric dates of the most recent Alpine fault earthquakes, New Zealand [J]. Geology, 1999, 27(11): 995 – 998.
- [41] 何海. 川西亚高山针叶林主要针叶树种年轮生态学研究 [D]. 成都: 中国科学院研究生院 (成都生物研究所), 2006. [HE Hai. Dendroecological studies on dominant conifers of subalpine coniferous forests in western Sichuan, southwest China [D]. Chengdu: Chinese Academy of Sciences (Chengdu Institute of Biology), 2006]

Reconstruction of Rockfall Activity Based on Dendrogeomorphological Method: A Case Study of Huaying Mountain in Eastern Sichuan, China

WANG Rui^{a,b}, MA Chao^{a,b*}, WANG Yunqi^{a,b}, WANG Yujie^{a,b}

(a. Three-gorges area (Chongqing) Forest Ecosystem Research Station of Ministry of Education, School of Soil and Water Conservation;

b. Chongqing Jinyun Forest Eco-system Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The effect of climate change on rock avalanche is crucial for understanding the formation conditions and evolution of regional mountain hazard and helpful for the forecasting and predication work. Dendrogeomorphology has great potentials in reconstruction of past landslides, earthquakes and debris flows. Trees are widely distributed and will not migrate, so tree ring records play an important role in the study of geomorphic processes. We can date the

historical events of mountain hazards in the past few years according to the reaction of tree ring to the activity of mountain hazards by dendrochronological method. Tree ring-based method (Dendrogeomorphological method) reconstruction accurately elucidates the frequency of mountain hazards and reveals how the mountain hazards evolve in response to climate change, while few studies were documented in China. This work reconstructed a rock avalanche in Huaying Mountain, eastern Sichuan province, China, and analyzed the correlation between the occurrence with climate conditions. The results revealed that most of the rockfalls occurred in the year of 2015 and some of them occurred in the year of 2008, 2012, and 2016 respectively. Furthermore, most rockfall events concentrated in the earlywood season (from April to September). Comparison the location of callus in impacted scars on tree trunks and the tree rings of normal wood revealed that the rockfall impactation would decrease the tree rings. The tree rings decrease will delay one year as the impact elapsed. No significant correlation was found between the monthly precipitation and tree rings of normal wood and disturbed wood. However, the tree rings of disturbed wood are negatively related to the mean monthly temperature. The result of this work is helpful for the knowledge about the effect of climate change on the occurrence of mountain hazards and particularly useful for the predication of rainfall-induced avalanche in the study area.

Key words: rockfall; dendrochronological method; Huaying mountain