

基于树轮地貌学的山洪研究进展

郅佳志^{1,2}, 张永^{1*}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:山洪是中国主要的自然灾害之一, 严重威胁山区人民生命财产与工程建设安全。针对山洪已发展了多种多样的研究手段, 但多集中于过去几十年的时间段内。树轮地貌学方法作为研究历史山洪事件的有效手段之一, 在世界范围内被广泛应用。利用树轮中的生长干扰信息, 可以对山洪事件进行精确定年, 重建无记录或少记录地区内山洪发生的频率、大小和空间分布特征等, 根据伤疤的高度或应用水力模型则可以定量重建山洪的流量大小。随着树轮地貌学方法和技术的逐渐成熟, 研究趋向于探讨山洪的驱动机制、更大空间尺度山洪的规律性等, 具有广阔的应用前景, 但是基于树轮的山洪研究在国内还未见报道。论文对树轮地貌学应用于山洪研究的发展过程进行了系统回顾, 对研究进展进行了简要概述, 最后讨论该研究领域的潜力及局限性, 以期在国内进一步开展相关工作提供参考信息。

关键词:山洪; 树轮; 树轮地貌学

山洪是山区快速发生且很难被预防的洪水事件^[1]。山洪发生时常常伴随着山区的强降水事件或基础设施的损坏^[2]。中国拥有多山的地形, 山区面积约占全国陆地面积的2/3, 东部季风区多发暴雨, 西部高山的冰雪融水带来丰沛水源, 三级阶梯之间高差巨大, 这些因素使得中国山洪灾害频发且影响范围广泛^[3]。目前中国已开展了很多系统化的山洪灾害研究工作, 包括山洪成因分析^[4-6]、时空分布特征^[7-9]、预警指标的应用^[10-12]、山洪灾害风险分析和预报^[13-17]等。山洪灾害研究从之前的实地勘测到“3S”技术的应用, 从基于历史记录、实测资料分析到与气象预报数据相结合, 对山洪灾害的研究逐步深入。但已有这些研究大都需要借助历史山洪数据或器测资料, 这些资料记录时期较短, 尤其是在山区, 受地形限制, 人烟稀少, 往往缺乏降水和流量等历史数据, 难以发现洪水的历史规律。近年来, 树轮地貌学方法被广泛应用于过去长时间尺度的山

洪事件的定年和特征分析工作。具有清晰年轮的树木受山洪影响后会在树轮中保留生长干扰信号, 在大样本量的支持下, 借助交叉定年技术可对此类生长干扰事件进行定年, 从而确定山洪的发生年份。依据生长干扰的数量、强度、受山洪影响树木的数量和空间分布, 可以探讨山洪的时空特征, 重建无资料或少资料地区的山洪历史^[18]。该方法可为山洪事件定年提供替代性或补充性资料^[19], 相较于其他代用指标, 该方法定年精确、分辨率高, 甚至可达到季节尺度^[20], 在世界范围已有大量工作开展, 具有广阔的研究前景。

中国山洪灾害时有发生, 特别是近年来极端降水事件频发^[21-23], 因此, 有必要加强更长时间尺度背景下山洪暴发的时空特征及成因研究, 为区域范围内山洪的预测和预防提供必要的背景信息。遗憾的是, 相关工作目前在国内尚未开展, 因此本文系统介绍基于树轮地貌学的山洪研究的发展历史、研

收稿日期: 2019-04-15; 修订日期: 2019-07-22。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471087, 41001009)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41471087 and 41001009.]

第一作者简介: 郅佳志(1993—), 男, 河北省石家庄人, 硕士生, 主要研究方向为气候与环境变化。E-mail: xijz.17s@igsnr.ac.cn

*通信作者简介: 张永(1979—), 男, 吉林省吉林人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为气候与环境变化。

E-mail: zhangyong@igsnr.ac.cn

引用格式: 郅佳志, 张永. 基于树轮地貌学的山洪研究进展 [J]. 地理科学进展, 2020, 39(3): 519-528. [Qie Jiazhi, Zhang Yong. Advances in flash flood research based on dendrogeomorphology. Progress in Geography, 2020, 39(3): 519-528.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.03.015

究方法以及最新的研究进展,并进一步讨论了在国内开展这一新研究方向存在的问题和潜力。

1 利用树轮进行山洪研究的历史及方法

1.1 山洪研究历史

树轮年代学是一门研究树木木质部年生长层,并利用年生长层进行定年的科学,它是由美国天文学家 Douglass 在 20 世纪初创立^[24]。随着学科的发展,树轮年代学派生出许多分支学科,树轮地貌学就是其中之一。Alestalo^[25]对树轮地貌学进行了系统的阐述,将其定义为利用树轮来研究历史时期地貌过程并对未来地貌过程进行预测的学科。之后,树轮在雪崩、泥石流和落石^[26-28]等地貌过程的研究中发挥了重要作用。早在 20 世纪早期,Hardman^[29]就意识到了利用树轮进行水文研究的巨大潜力,不过,直到 Sigafos^[30]对波托马克河 1961 年洪水事件前后的树木差异进行研究,才初步指出河岸植被和洪水频率之间存在关系。Sigafos^[31]随后提出了用树轮研究洪水的理论基础,他的研究对古水文领域起到了巨大的启示作用,他提出的洪水植物学证据在古水文学研究中的巨大潜力被反复论证^[32],并得到广泛应用。近年来,利用树轮进行长时间尺度背景下的山洪事件研究已经在北美^[18,33]、东欧^[34]和地中海山区流域^[35-38]等地区广泛开展,相关研究从对洪水事件进行定年,分析其周期、频率和强度等,逐渐趋向于分析山洪的驱动机制以及受山洪影响后树轮解剖特征的变化。

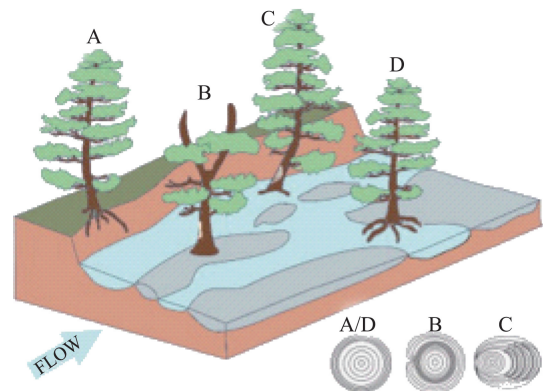
1.2 采样及生长干扰识别

在野外采样时要捕捉伤疤或弯曲树木等生长干扰信号。一般说来,优先选择河岸暴露位置或河道内侧的受干扰树^[39-40]。对受干扰树可以采集生长样芯^[41],采样位置尽可能靠近伤疤,也可直接在受伤位置采集楔形木。对于欧洲针叶树,一般在受伤位置上部采集生长样芯,因为受干扰后树木响应生成的创伤性树脂道在伤口上方的径向延伸最大^[42-43]。另外,也可采集死树圆盘或枝干、暴露树根以制作横切面样本。对于弯曲树木,在弯曲位置采集生长样芯。对于树冠受损或茎干形态异常的树木,则在受伤区域下部采集生长样芯。采样时注意不在茎干其他位置,或者是受其他因素(周围树木倾倒等)影响而形成伤疤的区域采集样本^[37]。记录采样高

度、胸径及周围树木的生长情况等信息,并对采样树进行拍照记录。另外需要在研究区周围采集未受山洪影响的健康生长的同树种样芯,一棵树的两侧各取一个生长样芯,建立当地的参考年表,以便为交叉定年提供依据。

样本采集回实验室后,样芯用胶水固定在样槽上,之后对样芯或树木圆盘进行干燥、打磨直至树轮清晰可见。用轮宽量测仪量测树轮宽度,在建立参考年表前,可用 COFECHA 程序对定年和量测的准确性进行质量控制^[44]。

洪水会阻碍受影响区域树木的正常径向生长,并诱发可以指示地貌过程的生长干扰,包括生长抑制或释放、畸形木、异常生长、愈伤组织、伤疤或创伤性树脂道等,应用最广泛的是伤疤,因为它提供历史时期洪水时间和水位信息的能力较强^[45-46]。图 1 展示了多种生长干扰响应类型。洪水期间,水流及其携带物可能使得较矮树木的树冠被折断,这将造成树轮生长的突然变慢^[31]。被折断树木死亡后不再和周围树木存在竞争关系,存留树木的轮宽会变宽,表现为突然的生长释放。若受洪水影响导致树木弯曲时,树轮会表现为异常生长,一侧轮宽变窄而另一侧轮宽相对变宽。树木受到的创伤不足以使其死亡,则树木就会在接下来几年形成伤疤^[34]。当河岸被洪水侵蚀时,会造成河岸旁树木的根部暴露^[47],这不仅会使得轮宽发生变化,也会导致树木解剖结构的显著改变,通常包括早材管胞大小的变小和晚材细胞的增加^[48-49],管腔面积变小,细胞壁厚



注:A/D为根部暴露;B为分叉树;C为茎干倾斜;B/C为伤疤。

图1 受山洪影响后树木外观、树轮宽度和细胞结构的变化示意图^[35]

Fig.1 Predominant dendrogeomorphic macro-evidence in trees affected by flash floods and associated responses in tree-ring width and cell structure

度增加引起早早材管胞中细胞壁占比增加,早早材管胞的径向长度和切向宽度变小,早材和晚材中创伤树脂道的数量增加^[36]等。但当赤松(*Pinus densiflora* Sieb.)受洪水长期侵蚀时,植物细胞的管腔大小并不会发生改变^[50]。而且不同树种的解剖学特征变化程度不一,存在着明显的树种差异,比如在分析地中海地区中的欧洲桤木(*Alnus glutinosa* L.)、狭叶沙蒿(*Fraxinus angustifolia* Vahl.)和比利牛斯栎(*Quercus pyrenaica* Willd.)受山洪影响后解剖学特征的变化时,发现3个树种在受山洪影响后管腔面积减小,且非参数检验的结果是显著的,但早材纤维和薄壁细胞的面积改变随树种不同而不同,其变化程度也不都是明显的,因此不能仅仅据此来识别山洪事件^[37]。

总之,通过对比受干扰和未受干扰树木的年轮宽度等特征,可以发现受干扰树突然的生长改变^[51],从而确定生长干扰的发生时间,进而可以提供长时间尺度下年分辨率甚至季节分辨率的山洪事件序列,并可为小流域的洪水模型模拟提供基础信息。

1.3 山洪事件的定年及分析

对山洪事件进行定年时,往往依赖于同一年中表现出生长干扰的样本数量、生长干扰的信号强度^[52-53]以及河流区受损伤树木的空间分布^[54]。当树轮中连续多年出现生长干扰信号时,往往只考虑生长干扰出现的第一年作为山洪发生的确切年份^[55]。在实际应用中一般要通过定义指数来确定山洪事件,在个别年份山洪信号的强度可通过指数 I_t 来表示^[56-57],该指数最初是应用于雪崩灾害事件的确定,Šilhán^[58]将该指数引用到山洪事件分析中:

$$I_t = (\sum R_t / \sum A_t) \times 100\% \quad (1)$$

式中: R_t 为在 t 年份受山洪影响表现出生长干扰的树木数量, A_t 表示在 t 年份采集的所有活树数量。该指数在应用时,需要采集大量的样本以避免对近期干扰事件的过高评估。Kogelnig-Mayer等^[52]定义的权重指数 W_t 综合考虑了生长干扰的类型、数量和强度以及可用于重建的样本量,该指数最初用于分析雪崩和泥石流事件,而后引用到山洪的分析中:

$$W_t = [(\sum T_t \times 7) + (\sum T_s \times 5) + (\sum T_m \times 3) + \sum T_w] \times (\sum R_t / \sum A_t) \quad (2)$$

式中: T_t 表示出现伤疤的树的数量, T_s 、 T_m 、 T_w 分别表示有强烈、中等和较弱生长干扰的树木数量。和 I_t 指数相比, W_t 考虑了树轮中出现的生长干扰强度的不同。树木中出现的生长干扰类型可能多种多样,

其强度依次为 $T_t > T_s > T_m > T_w$,分析时选择最强的干扰类型进行计算,该指数的应用在不同研究区有不同的标准。Ballesteros-Cánovas等^[19]对西班牙瓜达拉马山脉的山洪进行重建,当权重指数 $W_t > 1$ 时,可认为该年发生了山洪事件。Ruiz-Villanueva等^[35]对西班牙佩拉约河进行山洪重建时,同样对生长干扰进行权重分级,定义取值从0.1~1的权重指数(wGD: weights of growth disturbances)以区分山洪对树木造成的不同程度的生长干扰,最后综合考虑生长干扰的权重值wGD、受损伤树木的数量占同年被分析树木的比值(%DT: the percentage of damaged trees)以及河流区受损伤树木的空间分布(SD: spatial distribution of affected trees),由这3个参数的乘积(wGD×%DT×SD)来确定山洪事件的发生年份。

2 基于树轮的山洪研究进展

2.1 单点和区域山洪事件重建

山洪事件重建可分为单点和区域重建2种类型,早期工作多为单点重建工作。Ballesteros-Cánovas等^[19]通过调查受洪水影响的伤疤树、倾斜树、截断木和被掩埋木,在178棵受山洪活动干扰的苏格兰松树上采集了287个树轮样芯,得到和山洪活动有关的212个生长干扰信息,重建了西班牙瓜达拉马山脉1748—2011年间的25次山洪事件。Ruiz-Villanueva等^[59]综合利用档案记录、器测资料和树轮地貌学方法,重建了西班牙铁塔尔河流域自19世纪末以来的41次山洪事件,分析了山洪的频率、强度、季节性及其驱动因子状况,其中可靠的36次山洪事件有60%发生在秋冬季,而剩余的40%发生在春夏季。Casteller等^[55]在分析安第斯山的山洪时,采集出现干扰特征的智利雪松(*Austrocedrus chilensis*)、花旗松(*Pseudotsuga menziesii*)和南方假山毛榉(*Nothofagus dombeyi*)的树木样本,干扰特征包括伤疤、暴露的树根、倾斜、断掉或被掩埋的茎干,依据伤疤、偏心现象、反应木、树轮突然的生长抑制和释放以及树轮中出现的切向创伤树脂道等特征,重建了该地区1890—2009年的21次山洪事件,发现山洪事件的平均复发周期为37.4 a,进一步分析表明58.2%的山洪事件发生在休眠期,而有29.1%和12.7%的事件发生在早材和晚材的生长期。可见,利用树轮地貌学手段可以重建季节尺度的历史山洪事件信息,而且山洪事件的发生在区域上具有一

定的共性,例如1936年的山洪事件在西班牙多个研究区均有发现。

随着单个流域山洪重建工作的展开和深入,研究往往趋向于更大的空间尺度,即对一个区域多个流域历史时期的山洪进行重建,例如Ballesteros-Cánovas等^[60]采集了波兰塔特拉山北坡受山洪影响的超过1100个受伤树的样芯,用树轮地貌学方法重建了该地区过去148 a间的山洪活动,进而探讨了塔特拉山北坡4条河流历史时期洪水的时空模式。他还分析了山洪的水文气象学驱动因子,包括4—10月间1、3和5 d降水总量指标,通过计算研究区有效降水数据的差异系数,发现3 d降水总量超过100 mm时水位值会高于平常的150%水平。Rodríguez-Morata等^[61]通过对受山洪影响的63棵欧洲赤松(*Pinus sylvestris* Linn.)的117个样本进行树轮分析,重建了20世纪以及21世纪早期未被历史资料记录的8次山洪事件,从而填补了西班牙中部瓜达拉马山北坡7条河流过去200 a山洪数据的空白。而Šilhán^[58]在捷克共和国东部的利斯霍拉山最高峰周围10个流域范围内采集了446个受伤树根的截面和192个样芯,重建当地的历史洪水,得到了1883—2012年间28个洪水年份发生的64次洪水事件,并指出大多数流域(90%)受1997年的洪水影响。

2.2 山洪流量评估

利用树轮地貌学方法可以对山洪的流量进行评估,应用较多的是伤疤高度。伤疤高度可以代表当年洪水的最低水位^[62]。洪水淹没树干时,并不一定会造成伤疤,而伤疤的存在却证明了当年洪水一定到达过此高度。也有学者对此持不同的观点,比如McCord^[63]和Gottesfeld^[45]则认为伤疤高度代表的是山洪发生时河流的最大水位。利用曼宁方程式,可以把树木中的伤疤高度转化为野外的洪峰流量^[64]。Ballesteros-Cánovas等^[65]在印度西北部喜马拉雅尔邦的古卢区野外测量主要河道的坡度和采样树中伤疤的最大高度,利用曼宁方程式重建了该地区的洪峰流量。Ballesteros-Cánovas等^[99]在研究西班牙塔格斯河流域北坡一条无历史记录河流的山洪状况时,利用受山洪影响树木中伤疤的高度和大小等信息,结合二维的水力模型和地面激光扫描技术,重建了该地区1997年12月17日的一次山洪事件,重建的洪峰流量为 $79 \pm 14 \text{ m}^3/\text{s}$,洪水水位和伤疤高度之间的平均偏差为 $-0.09 \pm 0.53 \text{ m}$ 。进一步分析发现树木的地理位置是控制误差的主要因素,且生

长在基岩等暴露位置的树木有最小的评估误差。

用伤疤高度评估洪峰流量存在着一定的误差。形成伤疤的木质碎屑等物质在被洪水运输时,部分可位于水面之下,这可以解释误差存在的原因^[66]。当然,如果是在洪峰发生前或发生后形成伤疤,而不是在洪峰来临时形成伤疤,那么通过伤疤高度评估的洪峰流量可能比实际值偏小。伤疤高于实际水位的可能原因是:在洪水爆发和局部超高水位存在时,茎干周围的物质沉积而形成伤疤^[67-68];形成层组织的纵向繁殖和纤维损伤可使伤疤变长,从而使伤疤超过实际的洪峰流量对应的水位。

用伤疤高度重建洪峰流量,洪流携带的碎屑物质造成伤疤的不确定性会随着洪水量的增大而增加,可用粗糙度对不确定性进行量化描述。另外,在采样时尽可能远离河道底部,选择可指示较大山洪事件的有伤疤树,能够使不确定性最小化^[69]。

除了基于伤疤高度的洪峰流量分析工作,还可用其他的方法分析洪水大小。Ballesteros-Cánovas等^[70]分析了受洪水影响树木的茎干倾斜状况和洪水大小的关系,并试图分析用茎干倾斜状况来重建历史时期洪水大小的可行性。他们建立了树木倾斜的概念模型,并对模型进行参数化,比较观测数据和模拟数据的差别,分析得到树木茎干基部的倾斜和洪水大小有相关性,从而证明了该方法是可靠的。

2.3 山洪驱动机制研究

基于树轮的山洪驱动机制研究近年来也逐步开展。Casteller等^[55]用树轮地貌学方法重建了巴塔哥尼亚安第斯山脉一个小流域历史时期山洪的时空模式,并结合气候资料分析了可能的洪水驱动因子,发现当1~3 d连续出现大量降水以及整个流域的温度超过雨/雪阈值($2 \text{ }^\circ\text{C}$)时会导致山洪暴发。Ballesteros-Cánovas等^[19]对西班牙中部瓜达拉马山脉上的一条河流1748—2011年间洪水的时空模式进行重建,并分析了该区域洪水的气象驱动因子,发现在不同季节内洪水发生时期的1、3、5 d降雨阈值存在较大差别,且山洪事件常常发生在湿季(秋冬季)。Rodríguez-Morata等^[61]以伤疤和异常生长为标准,重建了西班牙中部瓜达拉马山脉北坡7条河流过去200 a的山洪数据,分析发现1、3、5 d降雨总量可能是驱动山洪发生的因素。Ferrio等^[38]第一次用树轮中的同位素来分析西班牙塔格斯河流域内发生的山洪事件,他们在受山洪影响的森林区域采集4个树种的样本并获取其 α 纤维素,之后将树轮中

的氧同位素组分和气象数据以及降雨中的 $\delta^{18}\text{O}$ 比较,调查山洪可能的气象驱动因素。在去除树轮纤维素中氧同位素的春季信号后,发现晚材的 $\delta^{18}\text{O}$ 和强降雨事件有关,但不同树种树轮中 $\delta^{18}\text{O}$ 和气象要素的相关性会有差异。

对山洪驱动因子的一系列研究表明,连续不断的强降水和山洪之间有很大的相关性,但是,山洪往往不是受单一因子驱动的,它的发生通常是多种气象要素综合作用的结果。由此可见,树轮地貌学方法为在更长时间尺度背景下理解山洪的驱动机制提供了更多有价值的信息,对山洪的预警及防护具有十分重要的意义。

3 基于树轮的山洪研究的优势、局限性及潜力

和其他山洪研究资料相比,树轮指标具有定年精确、空间分辨率高、时间分辨率有时可达季节尺度、记录年代较长且易于获得副本的优势。在典型的有大树存活的山洪易发区,树木可以记录多次的山洪暴发信息,可恢复流域内山洪的发生频次和大小,并为探讨山洪的气候驱动机制提供更多数据,为山洪的预测预防提供更多的背景信息。另外,该方法易于实施,可利用树种较多,可分析样点也便于找寻,不仅可以利用单点的树木样本来恢复山洪历史,也可以利用区域多点的样本进行集成分析,因此,在获取长时间尺度背景下山洪事件的时空变化特征方面具有很大优势。

该方法同样也存在一定的局限性。首先,山洪易发区往往也是滑坡、泥石流、落石等灾害高发的地区,这就导致了不同类型的灾害信号混合问题。此外,受洪水影响树木的伤疤可以指示洪水事件,但是树轮中没有伤疤的时段并不代表未受洪水的影响,可能洪水发生了,只是其大小不足以形成伤疤。当树木长期受洪水影响时,树轮中也有可能不形成伤疤。另外,有伤疤的树木绝大部分分布于河道中或河流周边,一次强烈洪水发生时,很可能导致伤疤树截断而死亡,并把树桩携带到下游区域,这意味着重建的洪水时间序列可能并不完整,即用树轮地貌学方法很难重建较长时间尺度的山洪事件。大量伤疤存在的年份可以指示高强度洪水,但是剩余有伤疤存在的年份其洪水强度很难界定。可能存在上次山洪事件掩盖之后山洪事件的情况,

例如年内连续发生的或者次年发生的事件往往很难判别,造成信号损失。以上列举的局限性,往往随着区域不同而有差异,因此,在不同地区,需要设计有针对性的采样方案,来最大限度地缩小不利情况的影响,以期获取最多的山洪信息。

大量基于树轮地貌学手段的山洪重建工作在海外开展,但是在国内尚未有相关工作的报道。中国的青藏高原—四川盆地过渡带和川滇交界地区、黄土高原区、东部沿海地区及华北等地区是山洪灾害易发地区^[71],且大部分地区均有森林覆盖,因此,利用树轮地貌学手段开展山洪研究有巨大潜力,机遇与挑战并存。

(1) 国内树轮年代学开展较晚,现有的工作主要集中在树轮气候学和树轮生态学领域^[72-76]。近年来,树轮地貌学方法已经慢慢在国内开展起来,从早期的少数几例利用树轮分析古地震的研究^[77-80]开始,到具体的山地灾害实例研究,例如洪婷等^[81]对甘肃南部九房山滑坡活动年份的研究,铁永波等^[82]和Malik等^[83]在四川磨西河流域开展的灾害评估工作,更有利用树轮地貌学手段在西藏东南和喜马拉雅山沿线开展的有关冰川活动的一系列研究工作^[84-87],以及Zhang等^[88]利用祁连圆柏的异常生长特征及*I*和*W*指数,在祁连山地区首次重建了过去300 a的历史滑坡工作。这些工作都显示了树轮地貌学在国内山地灾害研究方面的巨大潜力,但是国内的山洪重建工作还尚未开展,是个亟待探索、潜力巨大的新研究方向。

(2) 中国山洪灾害频发,应用树轮地貌学手段进行山洪研究时,首先,需要确定适宜的树种。即使是目前树轮学工作中利用较多的针叶树种,要开展山洪研究也必须从基础做起,探讨针叶树合适的采样位置,识别其对灾害事件的响应特征。实际上,目前国内山洪多发地区的植被往往多为乔木或灌木,均需进行采样评估,探讨进行灾害研究的潜力。因此,不同灌木、乔木生长对山地灾害的响应特征是未来需要努力突破的重要方向之一;此外,因区域差异,对山洪事件进行定义有多种手段,但缺乏可靠的标准,需要借助历史资料或器测记录来验证。把*I*和*W*指数引入国内的研究时,包括山洪事件的强度界定等,应根据实际情况,确定其合适的阈值范围;最终,分析山洪的特征时,针对峰值流量的评估,需构建小流域洪水模型,确定转换方程式中参数的合理取值。系统的构建适宜于国内情

况的山洪事件界定方法以及小流域洪水模拟体系,也是未来需要努力的重要方向。

总之,利用树轮地貌学在国内开展山洪事件的研究,任重道远,要结合国际经验,基于中国的实际情况,从基础做起,系统性地开展相关研究工作。

参考文献(References)

- [1] Collier C G. Flash flood forecasting: What are the limits of predictability? [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2007, 133: 3-23.
- [2] Georgakakos K P. On the design of national, real-time warning systems with capability for site-specific, flash-flood forecasts [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1986, 67(10): 1233-1239.
- [3] 赵士鹏. 中国山洪灾害系统的整体特征及其危险度区划的初步研究 [J]. 自然灾害学报, 1996, 5(3): 93-99. [Zhao Shipeng. An elementary study on whole characteristics of mountain torrents disaster system in China and its hazard regionalization. Journal of Natural Disasters, 1996, 5(3): 93-99.]
- [4] 高煜中, 邢俊江, 王春丽, 等. 暴雨山洪灾害成因及预报方法 [J]. 自然灾害学报, 2006, 15(4): 65-70. [Gao Yuzhong, Xing Junjiang, Wang Chunli, et al. Cause and forecast of mountain flood from rainstorm. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(4): 65-70.]
- [5] 周存旭, 金世海. 河南省山洪灾害的危害、成因及防治对策 [J]. 自然灾害学报, 2008, 17(3): 148-151. [Zhou Cunxu, Jin Shihai. Cause, damage and control measures of mountain flood hazard in Henan Province. Journal of Natural Disasters, 2008, 17(3): 148-151.]
- [6] 刘传正, 苗天宝, 陈红旗, 等. 甘肃舟曲2010年8月8日特大山洪泥石流灾害的基本特征及成因 [J]. 地质通报, 2011, 30(1): 141-150. [Liu Chuazheng, Miao Tianbao, Chen Hongqi, et al. Basic feature and origin of the "8·8" mountain torrent-debris flow disaster happened in Zhouqu County, Gansu, China, Aug. 8, 2010. Geological Bulletin of China, 2011, 30(1): 141-150.]
- [7] 张平仓, 任洪玉, 胡维忠, 等. 中国山洪灾害防治区划初探 [J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 196-200. [Zhang Pingcang, Ren Hongyu, Hu Weizhong, et al. An elementary study on Chinese mountain torrents disaster prevention regionalization. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(6): 196-200.]
- [8] Li Z, Yang D W, Hong Y, et al. Characterizing spatiotemporal variations of hourly rainfall by gauge and radar in the mountainous three gorges region [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2014, 53(4): 873-889.
- [9] Liu Y S, Yuan X M, Guo L, et al. Driving force analysis of the temporal and spatial distribution of flash floods in Sichuan Province [J]. Sustainability, 2017, 9: 1527. doi: 10.3390/su9091527.
- [10] 江锦红, 邵利萍. 基于降雨观测资料的山洪预警标准 [J]. 水利学报, 2010, 41(4): 458-463. [Jiang Jinhong, Shao Liping. Standard of mountain flood warning based on the precipitation observation data. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(4): 458-463.]
- [11] 程卫帅. 山洪灾害临界雨量研究综述 [J]. 水科学进展, 2013, 24(6): 901-908. [Cheng Weishuai. A review of rainfall thresholds for triggering flash floods. Advances in Water Science, 2013, 24(6): 901-908.]
- [12] 李青, 王雅莉, 李海辰, 等. 基于洪峰模数的山洪灾害雨量预警指标研究 [J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(12): 1643-1652. [Li Qing, Wang Yali, Li Haichen, et al. Rainfall threshold for flash flood early warning based on flood peak modulus. Journal of Geo-information Science, 2017, 19(12): 1643-1652.]
- [13] 唐川, 师玉娥. 城市山洪灾害多目标评估方法探讨 [J]. 地理科学进展, 2006, 25(4): 13-21. [Tang Chuan, Shi Yu'e. Approach to multi-objectives assessment for urban torrent hazard. Progress in Geography, 2006, 25(4): 13-21.]
- [14] 唐川, 朱静. 基于GIS的山洪灾害风险区划 [J]. 地理学报, 2005, 60(1): 87-94. [Tang Chuan, Zhu Jing. A GIS based regional torrent risk zonation. Acta Geographica Sinica, 2005, 60(1): 87-94.]
- [15] Chen H, Yang D W, Hong Y, et al. Hydrological data assimilation with the ensemble square-root-filter: Use of streamflow observations to update model states for real-time flash flood forecasting [J]. Advances in Water Resources, 2013, 59: 209-220.
- [16] Huang W, Cao Z X, Qi W J, et al. Full 2D hydrodynamic modelling of rainfall-induced flash floods [J]. Journal of Mountain Science, 2015, 12(5): 1203-1218.
- [17] 崔鹏, 邹强. 山洪泥石流风险评估与风险管理理论与方法 [J]. 地理科学进展, 2016, 35(2): 137-147. [Cui Peng, Zou Qiang. Theory and method of risk assessment and risk management of debris flows and flash floods. Progress in Geography, 2016, 35(2): 137-147.]
- [18] George S S, Nielsen E. Palaeoflood records for the Red River, Manitoba, Canada, derived from anatomical tree-ring signatures [J]. The Holocene, 2003, 13(4): 547-555.
- [19] Ballesteros-Cánovas J A, Rodríguez-Morata C, Garófano-Gómez V, et al. Unravelling past flash flood activity in a forested mountain catchment of the Spanish Central System [J]. Journal of Hydrology, 2014, 529: 468-479.
- [20] Stoffel M. Dating past geomorphic processes with tan-

- gential rows of traumatic resin ducts [J]. *Dendrochronologia*, 2008, 26(1): 53-60.
- [21] 王志福, 钱永甫. 中国极端降水事件的频数和强度特征 [J]. *水科学进展*, 2009, 20(1): 1-9. [Wang Zhifu, Qian Yongfu. Frequency and intensity of extreme precipitation events in China. *Advances in Water Science*, 2009, 20(1): 1-9.]
- [22] 余敦先, 夏军, 张永勇, 等. 近50年来淮河流域极端降水的时空变化及统计特征 [J]. *地理学报*, 2011, 66(9): 1200-1210. [She Dunxian, Xia Jun, Zhang Yongyong, et al. The trend analysis and statistical distribution of extreme rainfall events in the Huaihe River Basin in the past 50 years. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(9): 1200-1210.]
- [23] 任正果, 张明军, 王圣杰, 等. 1961—2011年中国南方地区极端降水事件变化 [J]. *地理学报*, 2014, 69(5): 640-649. [Ren Zhengguo, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Changes in precipitation extremes in South China during 1961—2011. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(5): 640-649.]
- [24] Fritts H C. *Tree rings and climate* [M]. London, UK: Academic Press, 1976.
- [25] Alestalo J. Dendrochronological interpretation of geomorphic processes [J]. *Fennia*, 1971, 105: 1-139.
- [26] Butler D R. Snow avalanche path terrain and vegetation, Glacier National Park, Montana [J]. *Arctic and Alpine Research*, 1979, 11(1): 17-32.
- [27] Hupp C R. Dendrogeomorphic evidence of debris flow frequency and magnitude at Mount Shasta, California [J]. *Environmental Geology and Water Sciences*, 1984, 6(2): 121-128.
- [28] 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.
- [29] Hardman G. The relationship between tree growth and stream runoff in the Truckee River Basin, California-Nevada [J]. *Transactions, American Geophysical Union*, 1936, 17(2): 491-493.
- [30] Sigafos R S. *Vegetation in relation to flood frequency near Washington, DC* [M]. Washington DC, USA: United States Government Printing Office, 1961.
- [31] Sigafos R S. *Botanical evidence of floods and floodplain deposition* [M]. Washington D C, USA: United States Government Printing Office, 1964.
- [32] Baker V R. Palaeoflood hydrology and extraordinary flood events [J]. *Journal of Hydrology*, 1987, 96: 79-99.
- [33] Bégin Y. Tree-ring dating of extreme lake levels at the subarctic- boreal interface [J]. *Quaternary Research*, 2001, 55(2): 133-139.
- [34] Zielonka T, Holeksa J, Ciapala S. A reconstruction of flood events using scarred trees in the Tatra Mountains, Poland [J]. *Dendrochronologia*, 2008, 26(3): 173-183.
- [35] Ruiz-Villanueva V, Díez-Herrero A, Stoffel M, et al. Dendrogeomorphic analysis of flash floods in a small ungauged mountain catchment (Central Spain) [J]. *Geomorphology*, 2010, 118(3-4): 383-392.
- [36] Ballesteros J A, Stoffel M, Bodoque J M, et al. Changes in wood anatomy in tree rings of *Pinus pinaster* Ait. Following wounding by flash floods [J]. *Tree-Ring Research*, 2010, 66(2): 93-103.
- [37] Ballesteros J A, Stoffel M, Bollschweiler M, et al. Flash-flood impacts cause changes in wood anatomy of *Alnus glutinosa*, *Fraxinus angustifolia* and *Quercus pyrenaica* [J]. *Tree Physiology*, 2010, 30(6): 773-781.
- [38] Ferrio J P, Díez-Herrero A, Tarrés D, et al. Using stable isotopes of oxygen from tree-rings to study the origin of past flood events: First results from the Iberian Peninsula [J]. *Quaternaire*, 2015, 26(1): 67-80.
- [39] Ballesteros-Cánovas J A, Eguibar M, Bodoque J M, et al. Estimating flash flood discharge in an ungauged mountain catchment with 2D hydraulic models and dendrogeomorphic palaeostage indicators [J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(6): 970-979.
- [40] Ballesteros-Cánovas J A, Stoffel M, Guardiola-Albert C. XRCT images and variograms reveal 3D changes in wood density of riparian trees affected by floods [J]. *Trees*, 2015, 29(4): 1115-1126.
- [41] Grissino-Mayer H D. A manual and tutorial for the proper use of an increment borer [J]. *Tree-Ring Research*, 2003, 59(2): 63-79.
- [42] Schneuwly D M, Stoffel M, Dorren L K, et al. Three-dimensional analysis of the anatomical growth response of European conifers to mechanical disturbance [J]. *Tree Physiology*, 2009, 29(10): 1247-1257.
- [43] Schneuwly D M, Stoffel M, Bollschweiler M. Formation and spread of callus tissue and tangential rows of resin ducts in *Larix decidua* and *Picea abies* following rockfall impacts [J]. *Tree Physiology*, 2009, 29(2): 281-289.
- [44] Grissino-Mayer H D. Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program *cofecha* [J]. *Tree-Ring Research*, 2001, 57: 205-221.
- [45] Gottesfeld A S. British Columbia flood scars: Maximum flood-stage indicator [J]. *Geomorphology*, 1996, 14: 319-325.
- [46] George S S. Tree rings as paleoflood and paleostage indi-

- cators [J]. *Tree Rings and Natural Hazards*, 2010, 41: 233-239.
- [47] Stoffel M, Wilford D J. Hydrogeomorphic processes and vegetation: Disturbance, process histories, dependencies and interactions [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2012, 37: 9-22.
- [48] Stoffel M, Casteller A, Luckman B H, et al. Spatiotemporal analysis of channel wall erosion in ephemeral torrents using tree roots: An example from the Patagonian Andes [J]. *Geology*, 2012, 40(3): 247-250.
- [49] Stoffel M, Butler D R, Corona C. Mass movements and tree rings: A guide to dendrogeomorphic field sampling and dating [J]. *Geomorphology*, 2013, 200: 106-120.
- [50] Yamamoto F, Kozłowski T T. Effects of flooding, tilting of stems, and ethrel application on growth, stem anatomy and ethylene production of *pinus densiflora* seedlings [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1987, 38: 293-310.
- [51] Friedman J M, Vincent K R, Shafroth P B. Dating floodplain sediments using tree-ring response to burial [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2005, 30(9): 1077-1091.
- [52] Kogelnig-Mayer B, Stoffel M, Schneuwly-Bollschweiler M, et al. Possibilities and limitations of dendrogeomorphic time-series reconstructions on sites influenced by debris flows and frequent snow avalanche activity [J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2011, 43(4): 649-658.
- [53] Stoffel M, Corona C. Dendroecological dating of geomorphic disturbance in trees [J]. *Tree-Ring Research*, 2014, 70(1): 3-20.
- [54] Schneuwly-Bollschweiler M, Corona C, Stoffel M. How to improve dating quality and reduce noise in tree-ring based debris-flow reconstructions [J]. *Quaternary Geochronology*, 2013, 18: 110-118.
- [55] Casteller A, Stoffel M, Crespo S, et al. Dendrogeomorphic reconstruction of flash floods in the Patagonian Andes [J]. *Geomorphology*, 2015, 228: 116-123.
- [56] Shroder J F. Dendro-geomorphological analysis of mass movement on Table Cliffs Plateau, Utah [J]. *Quaternary Research*, 1978, 9(2): 168-185.
- [57] Butler D R, Malanson G P. A reconstruction of snow-avalanche characteristics in montana, USA, using vegetative indicators [J]. *Journal of Glaciology*, 1985, 31: 185-187.
- [58] Šilhán K. Frequency, predisposition, and triggers of floods in flysch Carpathians: Regional study using dendrogeomorphic methods [J]. *Geomorphology*, 2015, 234: 243-253.
- [59] Ruiz-Villanueva V, Díez-Herrero A, Bodoque J M, et al. Characterisation of flash floods in small ungauged mountain basins of Central Spain using an integrated approach [J]. *Catena*, 2013, 110: 32-43.
- [60] Ballesteros-Cánovas J A, Czajka B, Janecka K, et al. Flash floods in the Tatra Mountain streams: Frequency and triggers [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 511: 639-648.
- [61] Rodríguez-Morata C, Ballesteros-Cánovas J A, Trappmann D, et al. Regional reconstruction of flash flood history in the Guadarrama range (Central System, Spain) [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 550: 406-417.
- [62] Harrison S S, Reid J R. A flood-frequency graph based on tree-scar data [J]. *Proceedings of the Northern Dakota Academy of Sciences*, 1967, 21: 23-33.
- [63] McCord V A. Fluvial process dendrogeomorphology: Reconstructions of flood events from the southwestern United States using flood-scarred trees [C]// Dean J S, Meko D M, Swetnam T W. *Tree rings, environment and humanity*. Tucson, USA: University of Arizona, 1996: 689-699.
- [64] Jarrett R D, England J. Reliability of paleostage indicators for paleoflood studies [C]// House P K, Webb R H, Baker V R, et al. *Ancient floods, modern hazards: Principles and applications of paleoflood hydrology*. Water science and application, vol. 5. Washington D C, USA: American Geophysical Union, 2002: 91-109.
- [65] Ballesteros-Cánovas J A, Trappmann D, Shekhar M, et al. Regional flood-frequency reconstruction for Kullu district, Western Indian Himalayas [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 546: 140-149.
- [66] Webb R H, Jarrett R D. One-dimensional estimation techniques for discharges of paleofloods and historical floods [C]// House P K, Webb R H, Baker V R, et al. *Ancient floods, modern hazards: Principles and applications of paleoflood hydrology*. Water science and application, vol. 5. Washington D C, USA: American Geophysical Union, 2002: 111-125.
- [67] Darby S. Effect of riparian vegetation on flow resistance and flood potential [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 125(5): 443-454.
- [68] Carling P A, Hoffman M, Blatter A S. Initial motion of boulders in bedrock channel [C]// House P K, Webb R H, Baker V R, et al. *Ancient floods, modern hazards: Principles and applications of paleoflood hydrology*. Water science and application, vol. 5. Washington D C, USA: American Geophysical Union, 2002: 147-160.
- [69] Ballesteros J A, Bodoque J M, Díez-Herrero A, et al. Calibration of floodplain roughness and estimation of flood discharge based on tree-ring evidence and hydraulic modelling [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 403(1-2): 103-115.

- [70] Ballesteros-Cánovas J A, Márquez-Peñaranda J F, Sánchez-Silva M, et al. Can tree tilting be used for paleoflood discharge estimations? [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 529: 480-489.
- [71] 郭良, 张晓蕾, 刘荣华, 等. 全国山洪灾害调查评价成果及规律初探 [J]. *地球信息科学学报*, 2017, 19(12): 1548-1556. [Guo Liang, Zhang Xiaolei, Liu Ronghua, et al. Achievements and preliminary analysis on China national flash flood disasters investigation and evaluation. *Journal of Geo-information Science*, 2017, 19(12): 1548-1556.]
- [72] Shao X M, Xu Y, Yin Z Y, et al. Climatic implications of a 3585-year tree-ring width chronology from the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29: 2111-2122.
- [73] Yang B, Qin C, Wang J L, et al. A 3,500-year tree-ring record of annual precipitation on the northeastern Tibetan Plateau [J]. *PNAS*, 2014, 111(8): 2903-2908.
- [74] Zhang Q B, Evans M N, Lyu L X. Moisture dipole over the Tibetan Plateau during the past five and a half centuries [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8062. doi: 10.1038/ncomms9062.
- [75] Liang E Y, Wang Y F, Piao S L. Species interactions slow warming-induced upward shifts of treelines on the Tibetan Plateau [J]. *PNAS*, 2016, 113(16): 4380-4385.
- [76] Liu Y, Cobb K M, Song H M, et al. Recent enhancement of central Pacific El Niño variability relative to last eight centuries [J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15386. doi: 10.1038/ncomms15386.
- [77] 韩同林. 西藏当雄一带地震形变带发生年代确定的新方法: 树木年轮算法 [J]. *中国地质科学院院报*, 1983(6): 95-110. [Han Tonglin. The dendrochronological method: A new method for determining the ages of seismic deformational belts in Damxung of Xizang (Tibet). *Journal of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 1983(6): 95-110.]
- [78] 韩同林. 西藏1411年9月29日8级地震震中位置的讨论 [J]. *地震地质*, 1984, 6(4): 6-12. [Han Tonglin. Discussion on epicentral locations for the Tibet M=8 earthquake on 29, September 1411. *Seismology and Geology*, 1984, 6(4): 6-12.]
- [79] 杨斌, 刘百麓, 周俊喜. 甘肃古浪、景泰活断层上的树木地震学研究 [J]. *地震地质*, 1995, 17(2): 139-147. [Yang Bin, Liu Baichu, Zhou Junxi. Tree seismological study of active Gulang and Jingtai fault in Gansu Province. *Seismology and Geology*, 1995, 17(2): 139-147.]
- [80] Lin A M, Lin S J. Tree damage and surface displacement: The 1931 M 8.0 Fuyun earthquake [J]. *The Journal of Geology*, 1998, 106: 751-757.
- [81] 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. *Journal of Mountain Science*, 2012, 30(1): 57-64.]
- [82] 铁永波, Malik I, Owczarek P. 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, Malik I, Owczarek P. Dendrochronological dating of debris flow historical events in high mountain area: Take Daozao debris flow as an example. *Mountain Research*, 2014, 32(2): 226-232.]
- [83] Malik I, Wistuba M, Tie Y B, et al. Mass movements of differing magnitude and frequency in a developing high-mountain area of the Moxi Basin, Hengduan Mts, China: A hazard assessment [J]. *Applied Geography*, 2017, 87: 54-65.
- [84] Yang B, Bräuning A, Dong Z B, et al. Late Holocene monsoonal temperate glacier fluctuations on the Tibetan Plateau [J]. *Global and Planetary Change*, 2008, 60: 126-140.
- [85] 徐鹏, 朱海峰, 邵雪梅, 等. 树轮揭示的藏东南米堆冰川小冰期以来的进退历史 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(3): 380-389. [Xu Peng, Zhu Haifeng, Shao Xue-mei, et al. Tree ring-dated fluctuation history of Midui glacier since the Little Ice Age in the southeastern Tibetan Plateau. *Science China: Earth Sciences*, 2012, 42(3): 380-389.]
- [86] Zhu H F, Shao X M, Zhang H, et al. Trees record changes of the temperate glaciers on the Tibetan Plateau: Potential and uncertainty [J]. *Global and Planetary Change*, 2019, 173: 15-23.
- [87] Zhu H F, Xu P, Shao X M, et al. Little Ice Age glacier fluctuations reconstructed for the southeastern Tibetan Plateau using tree rings [J]. *Quaternary International*, 2013, 283: 134-138.
- [88] Zhang Y, Stoffel M, Liang E Y, 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.

Advances in flash flood research based on dendrogeomorphology

QIE Jiazhi^{1,2}, ZHANG Yong^{1*}

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences
and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Flash flood is one of the major natural hazards in China. It seriously threatens the lives of people and property in mountainous areas. Various methods have been developed for flash flood study, but most of them focused on the past few decades. As one of the effective methods of historical flash flood events reconstruction, dendrogeomorphology has been used worldwide. It can provide hazard information with long temporal scale and high temporal resolution, sometimes at the seasonal level. By comparing tree ring width and other growth characteristics between disturbed and undisturbed trees, growth disturbance signals can be found in the disturbed trees. Using the growth disturbance in tree rings, flash flood events can be dated, and then the frequency, size, and spatial distribution characteristics of flash floods that have no or little documentary records can be reconstructed. The discharge of flash flood can be reconstructed quantitatively according to the height of scars or by using hydraulic models. With the development of dendrogeomorphology, research tends to probe into the meteorological driving mechanism of flash floods and the pattern of flash floods on a larger spatial scale. In the practical application of dendrogeomorphology, more instrumental data and historical records are applied in the studies. This makes the method increasingly more widely used around the world. But work based on dendrogeomorphology has not been reported in China. In this article, we reviewed the development of the study on flash floods based on tree ring, briefly summarized the research progress, and discussed the advantages, limitations, and potential of this approach, so as to provide some reference information for relevant work in China.

Keywords: flash flood; tree ring; dendrogeomorphology