

湖泊沉积记录的古洪水事件识别及与气候关系

张 灿,周爱锋*,张晓楠,吴 铎,郝盛吞

(兰州大学资源环境学院,西部环境教育部重点实验室,兰州 730000)

摘要:作为洪水灾害研究的延伸学科——古洪水研究,其所取得的大量研究成果基本都是基于河流古洪水水文学的研究。然而随着河流古洪水水文学学科的发展,研究材料和方法的缺陷越来越凸显,而作为气候与环境变化信息重要收集器的湖泊沉积物在古洪水水文学上的研究可以弥补上述不足。本文重点综述了湖泊沉积物识别古洪水的方法以及古洪水与环境的耦合机制。主要分为两部分:其一,总结了湖泊洪水识别的4种方法,即湖泊沉积物岩性和粒径、地球化学指标、数学统计分析方法以及洪水与块体运动的甄别;其二,从成因上探讨了古洪水与大陆尺度大气环流变化、区域气候波动的遥相关性。最后,探讨了洪水事件和气候变化的具体物理机制,并对湖泊洪水与同区域河流洪水进行对比研究以及国内湖泊尤其高山地区湖泊洪水领域的研究等方面进行了展望。

关键词:湖泊沉积;古洪水识别;全新世;气候变化

1 引言

洪水作为一种十分普遍的自然灾害,频繁地对人类生命和财产造成巨大损害,如1998年长江特大洪水使整个长江流域都遭受了严重的破坏。随着当前人口数量的增加、森林植被的砍伐以及城市化建设等所致的土地利用方式改变,其如何影响洪水频率和洪灾程度是当今密切关注的问题;特别在全球气候变暖背景下,灾害性天气、极端气候事件的频发以及年内和地区降水分配不均对未来洪水频率和强度变化的影响也是迫切需要解决的科学问题,因此预测和预防洪水灾害意义十分重大。对过去规律的良好认知是把握和搞好未来预测的最好途径。在气候变化对洪水灾害影响的研究中,现代观测数据时间太短,很难进行年代和世纪尺度的气候变化以及对引发洪水的机制探讨。虽然历史记录可以延长洪水资料,但其描述主观性较大,会受致灾程度和人为偏见的影响,且时间跨度也十分有限,因而仍然难以满足需要。为了提高对洪水引发机制和重现周期的理解,需要保存良好的更长时间

序列、更可靠洪水事件的自然档案记录。

古洪水是指全新世以来至可考证的历史洪水期以前由第四纪沉积物所记录的大洪水(Baker, 1983, 1987, 2008),其研究最初源于洪水地貌学和第四纪地质学,并在1982年正式成为一门学科(Kochel et al, 1982)。古洪水水文学首次是应用于美国怀俄明州河流水文条件的研究中,之后许多学者(Dana, 1882; Stewart et al, 1961)在河流古洪水识别和重建方面作了大量工作。先后建立了一套基于树木洪水痕迹、河流侵蚀记录、洪水河漫滩以及平流沉积的粒径、磁学、元素和有机地球化学指标的古洪水重建方法(Baker, 1987; Ely et al, 1993; Macklin, 2003; Benito, 2005; Thorndycraft et al, 2005; Baker, 2008; Stoffel, 2008)。大量研究者利用上述方法重建了一系列洪水事件(Knox, 1993; 朱诚等, 1996; Springer et al, 1997; 杨达源等, 1997; Sui et al, 2001; Heine, 2004; Thorndycraft et al, 2005; Huang et al, 2007),并探讨了洪水与气候(Zhang et al, 2002, 2007; Huang et al, 2007)、文明(朱诚等, 1996; Xia et al, 2004; Mannings et al, 2007; Swierczynski et

收稿日期:2015-01;修订日期:2015-03。

基金项目:国家重点基础研究发展计划“973计划”项目(2012CB956102);国家自然科学基金项目(41271221, 41201203)。

作者简介:张灿(1990-),男,山东济宁人,硕士研究生,主要研究方向为湖泊沉积与环境变化, E-mail: zhangc2013@lzu.edu.cn。

通讯作者:周爱锋(1977-),男,浙江长兴人,副教授,主要研究方向为湖泊沉积与环境变化, E-mail: zhouaf@lzu.edu.cn。

引用格式:张灿,周爱锋,张晓楠,等. 2015. 湖泊沉积记录的古洪水事件识别及与气候关系[J]. 地理科学进展, 34(7): 898-908. [Zhang C, Zhou A F, Zhang X N, et al. 2015. Identification of Paleoflood events by lacustrine archives and their links to climatic conditions[J]. Progress in Geography, 34(7): 898-908.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2015.07.011

al, 2013)的联系。虽然上述重建方法在过去几十年来取得了很大成功,但随着河流古洪水水文学学科的发展,其存在的缺陷和不足逐渐显露。例如,重建时间跨度十分有限,河流证据一般很难记录强度小的洪水事件,洪水后期河流侵蚀和后来大洪水对上次洪水证据的破坏都将会导致洪水记录不完整等。因此,寻找其他记录载体建立连续、高分辨的长时间序列洪水记录迫切需要。

湖泊沉积物具有记录介质丰富、连续性强、分辨率高、对气候与环境变化敏感以及可以提供原始气候变化记录等优点(Zhou et al, 2010; 沈吉等 2010),为建立连续、高分辨率的洪水记录提供了不可多得的材料。利用湖泊沉积物研究洪水的历史最早可以追溯到20世纪70年代(Sturm et al, 1978; Lambert et al, 1979),地质学者发现了河流径流与湖泊碎屑沉积之间的联系,但并没有意识到湖泊沉积物对重建过去洪水的价值。直到1987发生在阿尔卑斯山北部的瑞士大洪水,才引起人们利用湖泊沉积物研究洪水灾害和洪水历史的注意。在之后的20多年内,尤其欧洲和北美地区,利用湖泊沉积物重建洪水研究以指数式增长。对于古洪水研究而言,利用湖泊沉积研究古洪水的最大优势之一是湖泊沉积可以持续地同时记录背景沉积与洪水沉积,这为我们重建完整洪水日历以及探讨洪水与气候关系提供了可能。此外,还可依据湖泊沉积物中洪积层的粒径大小、厚度以及沉积容重等指标重建洪水强度(Giguet-Covex et al, 2012; Jenny et al, 2014)。湖泊沉积物相对于河流洪水沉积物的测年方法也已十分成熟,在一些高分辨率或有纹层的湖泊沉积物中,完全可以精确追踪到洪水发生的年际甚至季节(Lamoureux, 2000; 周爱锋, 2007; Czymzik et al, 2013; Swierczynski et al, 2013)。并且在河流洪水记录证据中,很难区别于洪水的地震、滑坡、崩塌沉积,而湖泊沉积物则可尝试依据岩性、分选性、C-M图等方法进行甄别(Nomade et al, 2005; Schnellmann et al, 2006; Wilhelm et al, 2012)。

虽然湖泊沉积物是洪水与气候、环境变化信息的双重记录载体,不仅可以重建过去洪水,而且还可探讨洪水与大陆尺度大气环流变化、区域气候背景、植被状况之间耦合机制(Loukas et al, 2000; Arnaud et al, 2005; Osleger et al, 2009; Bussmann, 2010),甚至可预测全球气候变暖背景下洪水频率与强度的变化(Milly et al, 2002; Wilhelm et al,

2012)。但是,湖泊作为混杂不同时空尺度气候、环境和水文信息沉积物的收集器,既记录着环流尺度的气候变化,也记录着区域尺度的气候波动。如何从湖泊沉积物中提取与洪水成因相关联的气候、环境信息是亟需解决的问题。现有的大量研究成果基本上都是从以下两个方面探讨古洪水与气候变化的机制:一是只考虑大尺度大气环流影响,探讨湖泊记录的古洪水与气候变化的机制(Glur et al, 2013; Vannière et al, 2013; Wirth, Gilli et al, 2013; Wirth, Glur et al, 2013);二是主要考虑区域尺度上气候动态、大气传输和流域自然特征的影响,探讨湖泊记录的古洪水与区域气候波动的机制(Viglione et al, 2010; Vasskog et al, 2011)。虽然至今已有大量研究成果,但关于湖泊记录的古洪水与气候变化、区域气候波动的研究仅限于相关性探讨阶段,还没有从根本上揭示洪水事件与气候变化、波动的具体物理机制,因此需要更多地依据湖泊沉积重建的古洪水日志进行洪水与气候耦合关系的研究。

本文在介绍河流洪水研究的基础上,重点综述了湖泊沉积物重建古洪水以及古洪水与环境的耦合机制,为今后利用湖泊沉积物研究古洪水水文学提供一些可借鉴的方法。

2 湖泊洪水记录识别

利用湖泊作为载体研究古洪水的首要问题就是从湖泊沉积物中识别洪积层,即通过调查和鉴别古洪水遗留下的地质、地貌与沉积证据来识别古洪水。虽然,洪水引起的碎屑沉积与背景沉积都以“层间流”和“底流”两种方式(Giovanoli, 1990; Gilli et al, 2013; Schillereff et al, 2014)沉积在湖盆中并被保存下来,但是碎屑沉积的岩性、粒径、矿物、容重、元素、磁学、孢粉、有机质和碳酸盐等指标与背景沉积会存在显著的差异,可通过岩性、沉积学方法、有机地球化学方法、元素地球化学方法以及不同的沉积过程(如地震与洪水)等途径识别洪积层。由于影响不同区域的湖泊沉积的因素不同,本文仅综述适应于大多数湖泊的洪水识别方法。

2.1 岩性、粒径方法

湖泊中的洪水沉积层一般来源于强水流携带的颗粒较粗的陆源碎屑物质,这些沉积物与背景沉积之间最基本、最显著的差异表现在岩性和粒径上,因此岩性、粒径是识别湖泊洪水最常用、最普遍

的指标之一(Sletten et al, 2003; Bussmann, 2010)。依据湖泊背景沉积物大多以粘土、粉砂组分为主,很少形成单一碎屑层的特点,可通过岩性突变、中值粒径或者平均粒径的骤增、分选性变差等指标判断洪积层位置(Wilhelm et al, 2012)。此外,也可以利用Weibull函数拟合、端元分析等数学方法,提取洪水沉积粒径组分重建洪水历史。

湖泊记录的洪水沉积与背景沉积的物质来源、物质组分和沉积过程的明显差异,导致湖泊沉积物在岩性上发生显著变化(Gilli et al, 2003; Simonneau et al, 2013; Vannière et al, 2013)。岩性最显著的变化表现为沉积物色度上,如果洪水沉积中的有机质含量高,则洪积层颜色一般比较暗;如果洪水沉积中碳酸盐含量比较高,则洪积层颜色一般比较亮。因此可以利用沉积物色度指标甚至基于XRF岩芯扫描获得的亮度曲线,高分辨率地判别强度较小的洪水(图1a)。另外对于含有纹层沉积的湖泊,洪水一般出现在非纹层内,因此也可以借助纹层和非纹层的差异识别洪水发生位置(Czymzik et al, 2010)。

除了洪积层与背景沉积层存在显著差异外,在洪积层内部也有细微的变化。洪峰时入湖径流很大,将粗颗粒物质带入湖泊,沉积层底部粒径较粗;之后洪水径流逐渐变小,搬运能力减弱,携带的颗粒变小,沉积层上部粒径较细。所以,洪积层内最显著的粒径特征就是沉积物粒径向上缓慢变细,好像洪积层底部粗颗粒上戴了一个“粘土帽”,并且这个特征也是在湖泊沉积中识别洪积层的一个非常有效的方法。Parris等(2010)就基于这个特点,利用端元分析方法在湖泊岩芯中识别了全新世几次高

频洪水沉积层。

洪水沉积层内部粒径向上缓慢变细的特征一般也表现为两种形式(Gilli et al, 2013):其一是洪积层底部粒径突然变大,向上缓慢变细,反映了洪水径流逐渐变弱的过程(图1b1);其二是洪积层底部粒径先出现增大的趋势,达到最大值后,再缓慢变细,这种形式反映了洪水径流慢慢增大再缓慢变弱的过程(图1b2)。有时在沉积层粒径向上缓慢变细过程中出现一个或几个次高峰,可能反映了整个洪水过程中出现多次洪峰过程。因此,粒径特征不仅可作为识别洪水的一种方法,而且还能反映洪峰次数及其对应洪水径流的差异,甚至可利用粒径进一步重建洪水强度变化以及评估洪水灾害程度。

基于湖泊沉积岩性和粒径识别洪水案例很多。如Arnaud等(2002)在对阿尔卑斯山西北部Anterne湖洪水研究中,将湖泊沉积物划分为4种岩性:灰暗色薄层粘土质粉砂、白色粘土、黄黑灰色粘土质粉砂以及黑色粘土质砂;并将4种岩性合并为3个沉积序列:L-type层主要以灰暗色薄层粘土质粉砂组成,A-type层主要以白色粘土、黄黑灰色粘土质粉砂、黑色粘土质砂组成,B-type主要以黄黑灰色粘土质粉砂、黑色粘土质砂;根据岩性、粒径指标,作者认为A-type序列为洪水沉积层(图1c)。类似地,Wilhelm(2012)在阿尔卑斯山西北部Blanc湖(Arnaud et al, 2002)洪水研究中,划分了相似岩性,识别出了过去270年中的56次洪水沉积层。

2.2 地球化学方法

有机地球化学方法主要依据洪水沉积与背景沉积在物质来源、物质组成和沉积过程的差异所导致沉积物中有机质和碳酸盐含量的相应变化识别

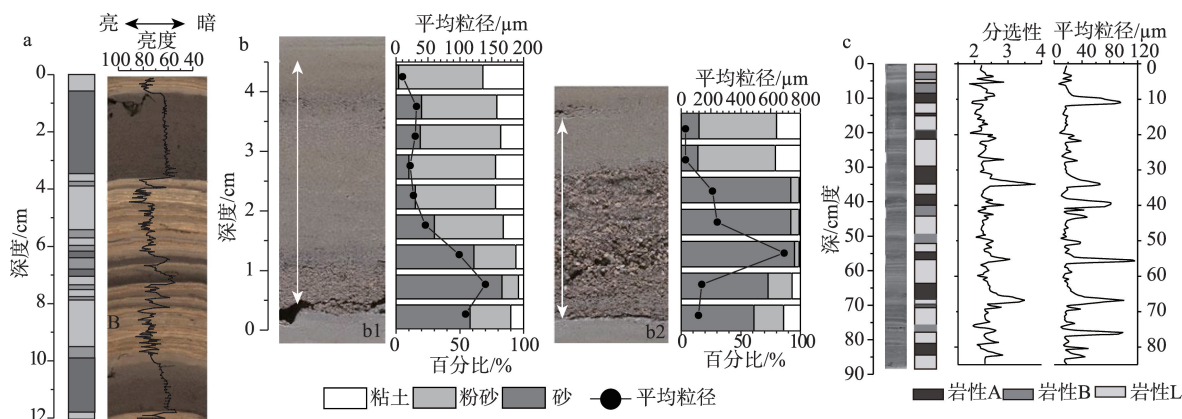


图1 洪水沉积岩性和粒度特征(Gill et al, 2003, 2013; Arnaud et al, 2005)

Fig. 1 Lithology and grain-size measurements of palaeoflood sedimentary layer(Gill et al, 2003,2013;Arnaud et al, 2005)

洪水(Gilli et al, 2003; Simonneau et al, 2013; Vanni re et al, 2013)。在一般情况下,如背景沉积有机质(碳酸盐)含量高(低),则洪积层有机质(碳酸盐)含量相对较低(高);但也存在背景沉积中有机质(碳酸盐)含量低(高)而洪积层有机质(碳酸盐)含量比较高(低)的情况,可根据湖泊所处的区域环境以及有机质或碳酸盐突变位置判断洪积层。

此外,湖泊沉积物中不同元素具有不同的古气候与古环境指示意义(Kylander et al, 2011):如轻元素硅(Si)、铝(Al)、钾(K)、钛(Ti)在湖泊研究中普遍被认为是外源碎屑元素,一般与外源物质的输入有关,可以指示入湖水流的强弱;也有一些元素的相对丰度可指示沉积物的粒径大小与来源(Cuven et al, 2010; Schlolaut et al, 2014),如Si和锆(Zr)与粗粉砂及砂砾层相关,Ti与淤泥(粉砂)层相关,K和铁元素(Fe)则与黏土层相关,Al/Ti和K/Al比值与碎屑来源相关。因此,上述沉积物元素变化特征为判断洪水引起的外源碎屑颗粒来源与识别洪水沉积位置提供了可能。并且随着元素测量技术的发展,这种方法也越来越广泛地被采用。

Morell n等(2009)在研究西班牙Estanya湖时,通过XRF岩芯扫描获得了Si、K、Al、Ti、Fe、S、Ca等元素数据,利用SPSS软件进行主成分分析,其中PC1主要反映了Si、K、Al、Ti的正值,分析认为PC1指示陆源碎屑物质的输入;当PC1突然增加时可以作为识别洪水发生的依据。Moreno等(2008)用同样的方法研究了西班牙的Taravilla湖,通过XRF岩芯扫描获得了相似的元素数据,同样作主成分分析,结果表明:PC1负值指示碳酸盐输入量增加,PC2正值指示硅酸盐输入量增加,并将碳酸盐和硅酸盐输入量同时增加(即陆源碎屑增加)视为洪水发生(图2)。

除了以上依据常规元素识别湖泊洪积层外,也可利用Rb/Sr比值(Vasskog et al, 2011)、Sr与Nd同位素(Revel-Rolland et al, 2005)识别洪积层。根据等效离子半径效应,在矿物中Rb经常替代K,而Sr经常替代Ca,并且K类矿物相对于Ca类矿物更易风化;一般降雨引发的洪积层中Sr的含量相对较高,则Rb/Sr低值可用来识别洪水沉积层。但是,在冰川湖泊中,由于冰川侵蚀的沉积矿物更接近原岩矿物,冰川侵蚀引发的突发性洪积层,Rb/Sr反而较背景沉积层高。所以,在利用元素指标识别洪水沉积层时,要注意区域的差异性。

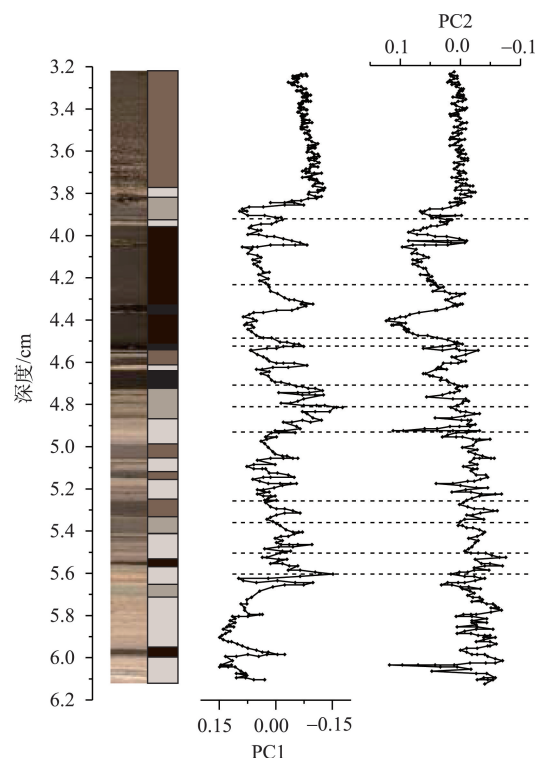


图2 Taravilla湖沉积记录元素分析(Moreno et al, 2008)
(PC1指示碳酸盐输入量、PC2指示硅输入量,当PC1和PC2同时增加时视为洪水发生)

Fig. 2 Elemental analysis result measured by the ITRAX Core Scanner for the Taravilla Lake (Moreno et al, 2008)
(The PC1 and PC2 axis profiles interpreted as carbonate and silicate input respectively)

2.3 洪水识别的数学方法:RoC

将岩性、粒度、元素等指标的突变作为判断洪水事件依据时,突变程度的判定通常会受到人为因素的影响,然而应用数学统计方法,将大于1或2个标准方差判定为突变点,再结合指标指示意义识别洪水事件,将会减少主观因素的影响。如St ren等(2010)首先应用一种数学统计方法指标变化速率(Rate of Change, RoC),在Meringsdalsvatnet湖泊中识别洪水事件,这种方法可以精确地诊断出各指标快速波动的位置,即洪水开始发生的时刻。

指标变化速率方法(RoC)原理如下:首先,将获得的湖泊沉积各代用指标(粒度、色度、磁化率、元素、有机质、碳酸盐、生物标志化合物等)参数变量(y)采用滑动平均或其他方法去除气候变化的长期趋势信息,根据可靠年代模型计算各样品对应的年代t(单位:年);然后,将相邻样品各代用指标参数变量 Δy 与时间变量 Δt 相除即: $RoC = \Delta y / \Delta t$,获得各代用指标的变化速率。在洪水发生时,各代用指标的

RoC 会突然增高(正值),随洪水强度和沉积速率逐渐变小时, RoC 则减小为负值,但绝对值没有发生时的变化速率大(图3)。因此,可把 RoC 的突然高值对应的时间作为洪水发生时刻,同时还可根据高于 RoC 的一个或两个标准方差,识别出不同强度的洪水。

Støren 等(2010)在挪威 Meringsdalsvatnet 湖泊中利用上述方法判别洪水时,将 CT-number 和 MS 原始数据采用 30 点滑动平均去除受长期气候变化影响的 95% 的长期趋势,并用 RoC 一个标准方差临界,分别识别出 317 和 92 个洪水事件,虽然洪水发生频数存在很大的差异(可能与不同指标对气候响应的敏感度有关),但两指标对应的洪水高频发生期非常吻合。而且对比距 Meringsdalsvatnet 湖泊 15 km 的 Otta 河流自 1789 年以来历史或器测记录的 6 次洪水事件,利用 RoC 方法共识别了 5 次,且其中 4 次事件对应非常好。可见,尽管这种方法在一定程度上低估了洪水发生的频率,但总体上能很好记录洪水事件。

虽然 RoC 方法可以很客观地从沉积底层中识别洪水起始位置,但仍在不同程度上受到年代—深度关系模型、沉积速率和分样间隔等因素的影响。例如在沉积速率高时, RoC 值将会增加。然而,一般认为沉积速率增加是受流域径流量增强引起的,所以沉积速率对此方法的影响并不是主要的,因而

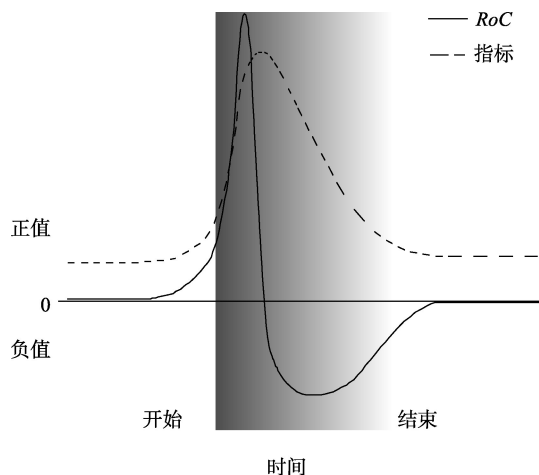


图3 洪水记录指标及其指标变化速率概念模型(Støren et al, 2010)(阴影部分指示洪水事件的发生过程,指标变化速率正值标示洪水发生时刻)

Fig. 3 A conceptual model for the response in the rate of change(RoC) (Støren et al, 2010) (The shaded section indicates a flood event and the strong positive RoC marks the onset of a flood event)

其在一定程度上具有很好的客观可信性。

2.4 洪水和块体运动识别法

从沉积岩性方面观察,块体运动(如地震、滑坡等)与洪水成因的沉积层有很大相似性,经常会干扰湖泊沉积中洪水事件的识别。但在沉积连续性上,湖泊中的洪水沉积层一般来源于强水流携带的颗粒较粗的陆源碎屑物质,与湖泊背景沉积差异较大,在湖泊沉积序列中表现为明显的不连续性。而由地震或湖泊水位异常波动等原因引起的块体运动浊流沉积层往往由重组的湖泊背景沉积构成,表现为沉积连续性。此外,块体运动浊流层在地球化学组成等方面也与洪水引起的碎屑沉积明显不同。而由三角洲崩塌或者其他因素导致的滑坡引致的块体运动浊流沉积层在湖泊沉积序列中同样表现为明显的不连续性,同为离散型的洪水与块体运动沉积层很难从沉积连续性上进行区分,但可根据两类沉积层的沉积结构和组成加以判别。一般而言,块体运动碎屑层相比洪积层厚度更大、粒径更粗,并且在沉积层底部含有基岩碎屑组分。此外,很多学者(Arnaud et al, 2002; Giguët-Covex et al, 2012)在岩性基础上将沉积层划分为不同的沉积序列,依据沉积序列最顶部是否含有白的“粘土帽”区别洪水和块体运动碎屑层,是由于洪水发生时,水体浊度增加,等到洪水结束或冬季上层湖水结冰之后,缓慢沉积成一层分选性非常好的白色粘土层,(图4a)。Arnaud (2002)依据不同岩性组合的垂直结构将 Anterne 湖划分为L型、A型、B型3种沉积类型(本文只讨论A型洪水沉积、B型沉积块体运动沉积),其中A型沉积从底至顶部有岩性4、岩性3、岩性2组成,而B型沉积从底至顶部有岩性4、岩性3组成。A型与B型相比,一方面B型顶部沉积缺少岩性2部分(白色粘土层),另一方面B型底部沉积是由粒径较粗的基岩碎屑组成。因此,可根据碎屑沉积层底部的基岩碎屑层和洪积层上部的白色“粘土帽”区分洪水与块体运动。

块体运动与洪水沉积层除了粒径大小、组分不同外,在分选性上也存在很大的差异,一般情况下,块体运动的分选性比洪水沉积更差。如图4c, Arnaud在研究 Anterne 湖的洪水和地震事件时,对比湖泊沉积的平均粒径和分选性,发现B型沉积的分选性比A型沉积分选性差。这是因为相比地震作用造成的基岩碎屑和细颗粒的混合沉积,洪水水流具有一定的分选作用,粒径分布相对集中。所以,湖

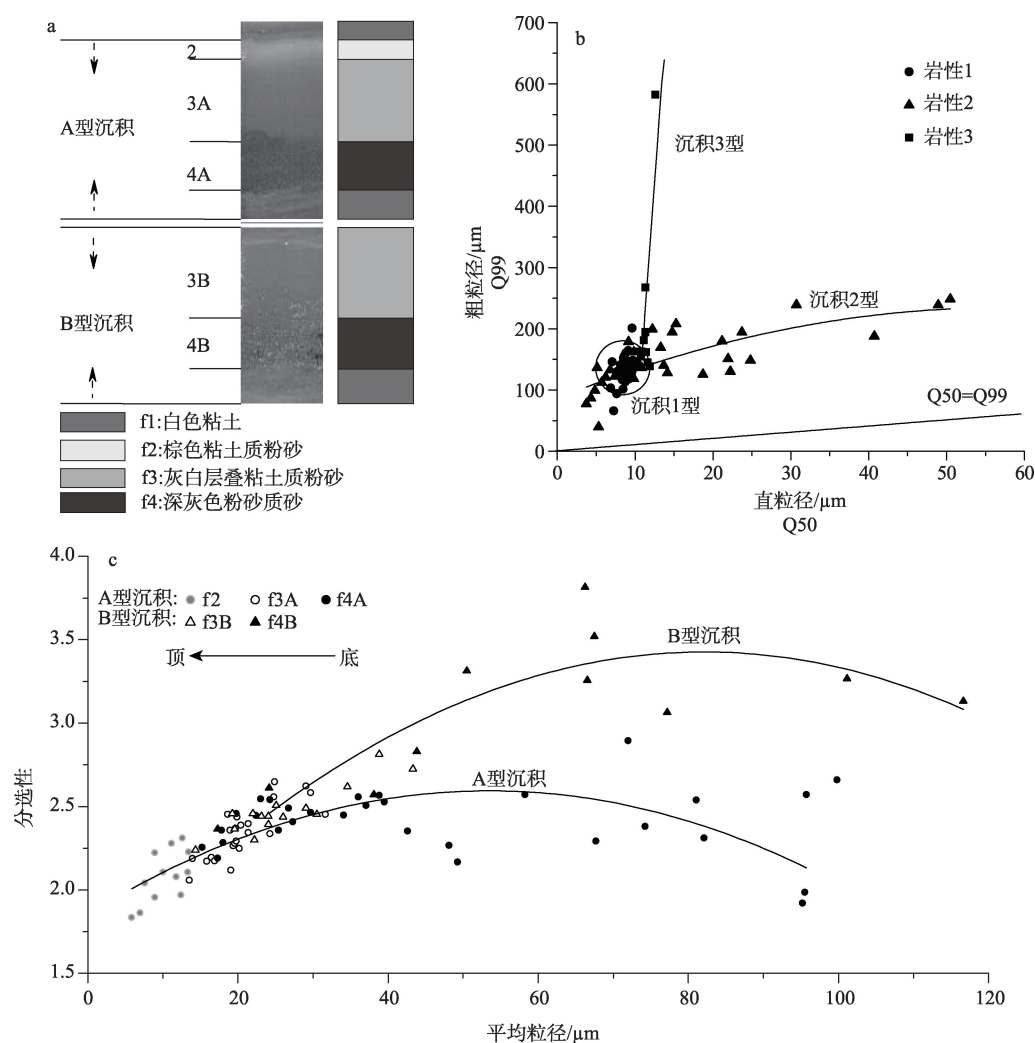


图4 洪水和块体运动沉积物岩性与粒径特征对比(a:不同沉积类型的岩性组合;b:A类型和B类型粒径差异;c:不同沉积型C-M分布图)(Arnaud et al, 2002; Wilhelm et al, 2012)

Fig.4 Comparison of lithology and granulometric distribution between flood layers and mass-flow sediments(a: Lithological association of different sedimentary types; b: Granulometric differentiation between sequences A and B; c: C-M distribution of different sedimentary types)(Arnaud et al, 2002; Wilhelm et al, 2012)

泊沉积粒径的分选性在一定程度上也可以帮助洪水和地震事件更准确的识别(Arnaud et al, 2002)。类似地, Wilhelm 等(2012)在 Blanc 湖洪水研究中, 利用C-M分布图(即中值粒径和百分之一粗颗粒组分分布图)得到了三块指示不同沉积过程的分布区域, 并以此来识别洪水和地震事件(图4b), 其中沉积2型、沉积3型分别指示洪水和地震事件。

除上述广泛应用的指标之外, 还有一些其他识别洪积层的方法。很多研究者(Bøe et al, 2006; Wolfe et al, 2006)发现, 磁学指标(高磁化率、高等温剩磁), 孢粉指标(不易腐蚀的舌状花亚科和蕨目孢粉)和容重指标等也可以识别洪积层。总之, 在识别洪水事件时, 不能只单独采用一种方法, 需要结

合多种指标综合分析才能获得更精确的结果。

3 湖泊洪水记录与气候机制

上文已提及, 湖泊沉积物既可记录洪水事件, 还可以记录沉积背景, 即当时环境, 为探讨洪水与气候环境的关系提供了便利。湖泊作为混杂不同时空尺度气候、环境和水文信息沉积物的收集器, 既记录了环流尺度的气候变化, 也记录了区域尺度的气候波动, 所以在依据湖泊沉积物重建气候—洪水关系时不可避免地要考虑空间尺度、区域差异对洪水成因的影响(Støren et al, 2010)。同时, 可直接观测的洪水事件与气候环境关系的研究, 也为湖泊

沉积记录的古洪水事件与古气候、古环境耦合关系的探讨提供了重要借鉴和验证。为更精确地探讨与重建洪水成因机制及与环境的耦合关系,本文先按照区域条件差异将洪水分类,再探讨环流与区域尺度上的气候变化对洪水成因的影响。

3.1 洪水与北大西洋涛动

Wirth(2013)、Wirth, Gilli 等(2013)研究了阿尔卑斯山15个湖泊(北部10个、南部5个)记录的全新世以来的洪水与太阳辐射、北大西洋涛动(NAO)的关联。表明15个湖泊沉积记录的洪水频率与太阳辐射呈负相关,即在全新世冷期洪水频率增强,具体影响机制表现:气温通过影响哈德利环流圈的南北移动,改变洪水发生频率。在冷期时,哈德利环流圈北移受阻,其北界位于欧洲中部,促进了大西洋锋面系统抵达阿尔卑斯山地区,大西洋气团带来的水汽增加了本地区降水,因此洪水频率升高;在暖期时,哈德利环流圈北移,副热带高压控制本地区,降水减少,洪水频率降低。

Wirth通过对比阿尔卑斯山南部和北部洪水频率发现两者存在显著差异,且造成这种差异的原因与NAO有关,即在NAO负相位时,热带辐合带(ITCZ)和西风南移增强,导致所控制的南阿尔卑斯山地区降水增多洪水频率偏高,而北阿尔卑斯山地区的洪水频率相对降低。另外,还依据阿尔卑斯山南部洪水频率变化重建了NAO的波动序列。因此对洪水与气候物理机制的探讨不仅可以帮助我们找到引发洪水的气候机制,甚至还可以利用记录完整的洪水日历重建气候变化。

3.2 洪水与北极涛动

Noren等(2002)研究了美国东北部13湖泊的洪水周期以及与北极涛动(AO)的关联,发现美国东北部洪水存在3000年周期波动,而且在AO负相位时,美国东北部洪水频率升高;在AO正相位时,美国东北部洪水频率降低。Parris等(2010)对美国东北部湖泊记录的洪水研究与Noren的结论相似,同样认为,美国东北部洪水强弱主要驱动机制是北极气团控制的冷干气候与热带气团控制的暖湿气候之间的“跷跷板式”交互转换所引发的降水变化。

除此之外,AO负相位时,欧洲变冷、高纬度西风减弱所导致的美国东北部洪水频率的变化与上述阿尔卑斯山洪水研究结果具有一定遥相关性,即美国东北部洪水与北大西洋千年尺度上的气候波动可能也存在相关性。所以,可依据造成不同区域

洪水频率、强度变化的气候机制对比,探讨全球环流尺度间气候机制的遥相关。

3.3 洪水与太平洋涛动

Li等(2013)对中国长江下游太湖洪水的研究,发现太湖洪水也与太平洋十年涛动(PDO)具有强相关性。作者利用太湖历史碑文记载、湖泊沉积物记录重建了过去400年30次洪水事件,通过对比年际尺度上PDO序列与太湖洪水记录,发现有13次洪水事件与PDO峰值相重叠,即PDO可以解释太湖过去30次洪水事件中43%的信息。考虑到太湖沉积物分辨率仅为0.173 cm/a,很难与年际尺度上PDO序列对比。对PDO与太湖洪水记录10年滑动平均后,对比发现两者的重叠次数达到了22次,并且两序列的C-检测结果也表明太湖洪水与PDO存在很好的相关性。虽然关于太湖湖泊记录的古洪水与气候变化的研究还处于相关性探讨阶段,没有从根本上解决洪水事件与气候变化的具体物理机制,但仍为利用湖泊沉积重建古洪水序列以及探讨洪水与气候联系提供了借鉴,未来这类研究还有待进一步深化。

Kiem等(2003)通过对澳大利亚东南部新南威尔士州的洪水研究,发现该地区洪水与太平洋年代际涛动(IPO)、ENSO具有强相关性。在拉尼娜(La Nina)事件和IPO负相位气候条件下,要比厄尔尼诺(El Ninos)和IPO非负相位时洪水频率和强度增加,并且在IPO负相位时的La Nina事件也比非负相位的La Nina事件的洪水频率和强度更大、更强。结论为:澳大利亚东南部新南威尔士州洪水的频率和强度受到年代际IPO和ENSO涛动双重调控影响。

对澳大利亚东南部新南威尔士州洪水记录的频谱分析,发现以传统经验分析方法得到的区域洪水指数为3.17的洪水周期大约是100年;但在IPO负相位气候背景下,其相同强度洪水的周期仅为15年。这也从另一侧面验证了IPO涛动对新南威尔士州强洪水的调控作用;同样也启示,在预测未来洪水变化时,考虑不同的气候驱动机制和不同的气候环境背景对洪水的频率周期和灾害程度影响的差异,可能会大大提高预测的可信性与正确性。

3.4 洪水与厄尔尼诺—南方涛动

Kiem等(2003)同时发现澳大利亚东南部新南威尔士州洪水与ENSO也具有一定相关性。La Nina事件时洪水频率和强度明显比非La Nina事件时增加和增强很多。

然而,也有研究者(Waylen et al, 1986; Wells, 1990; Kundzewicz, 2003)发现与La Nina事件洪水增强相反的结果,认为在美国中东部、秘鲁西北部和阿根廷中西部,ENSO暖相位(厄尔尼诺事件)相比冷相位(拉尼娜事件)洪水频率更高、持续时间更长、强度更大。类似地,Wirth(2013)也发现ENSO暖相位时,阿尔卑斯山南部洪水频率会增高。上述这些洪水与ENSO事件的一致性 or 异质性可能与研究地点所处的区域位置有关,也可能与影响不同研究地点洪水发生的气候机制差异有关,这就需要我们在今后更广泛、更深入地研究洪水与气候背景的具体物理机制关系,而不仅仅停留在古洪水与气候变化、区域气候波动的相关性探讨上。

除大量关于洪水与北大西洋涛动、北极涛动、太平洋年代际涛动和厄尔尼诺-南方涛动的研究之外,洪水与季风、二氧化碳、人类活动的关系也有一些研究。比如Palmer等(2002)的研究表明亚洲季风增强,降水增多,洪水强度和频率增加(Palmer et al, 2002),这种关系仅能解释某一地区引发洪水的原因,但具体到特定区域洪水的引发机制可能不仅仅受亚洲季风的影响,还可能与西风、ENSO、PDO等气候波动有关。因此,要预测未来洪水频率和强度的变化,就必须从根本上探讨不同区域与气候的具体物理机制。

4 研究展望

(1) 影响湖泊洪水的因素很多,包括气候变化、地形、流域植被状况等,如何准确地从湖泊沉积层中提取洪水信息,并排除滑坡、植被变化、人类活动等因素干扰是如今洪水研究领域急需解决的问题。

(2) 现有的对洪水事件与气候变化关系研究,还仅仅处于相关性探讨阶段,并没有从根本上探讨洪水事件和气候波动的具体物理机制。而且在很多洪水事件与气候波动研究结果中,还存在很大分歧,所以迫切需要开展更多、更广泛河流尤其湖泊记录的古洪水研究。

(3) 在现有湖泊洪水研究中,虽然已有大量关于洪水频率的探讨,但很少有涉及洪水强度的重建。这就需要我们开展更多的湖泊洪水研究来寻找到底哪种指标(如沉积物的单位容重、沉积物厚度、粒径粗细等)可指示洪水强度。

(4) 寻找高分辨率湖泊沉积物,探讨洪水与季节的关系,尤其通过湖泊纹层,精确识别洪水发生

的季节,以及依据不同季节洪水强弱变化研究洪水与气候的具体物理机制,并重建古气候记录。

(5) 湖泊洪水记录与同区域河流洪水记录的联系研究较少,寻找合适的流域同时进行研究,不仅有助于了解古洪水记录的特征,而且可以通过对比研究,了解更多的气候信息。

参考文献(References)

- 沈吉, 薛滨, 吴敬禄, 等. 2010. 湖泊沉积与环境演化[M]. 北京: 科学出版社. [Shen J, Xue B, Wu J L, et al. 2010. Lake sediments and environment changes[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 杨达源, 谢悦波. 1997. 古洪水平流沉积[J]. 沉积学报, 15(3): 29-32. [Yang D Y, Xie Y B. 1997. Paleoflood slack-water deposits[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 15(3): 29-32.]
- 周爱锋. 2007. 晚全新世苏干湖年纹层沉积及其环境记录[D]. 兰州: 兰州大学. [Zhou A F. 2007. Varve chronology and late Holocene environmental changes in Sugan Lake, Northern Qaidam Basin[D]. Lanzhou, China: Lanzhou University.]
- 朱诚, 宋健, 尤坤元, 等. 1996. 上海马桥遗址文化断层成因研究[J]. 科学通报, 41(2): 148-152. [Zhu C, Song J, You K Y, et al. 1996. Middle and late Holocene environmental changes of Maqiao, Shanghai[J]. Chinese Science Bulletin, 41(2): 148-152.]
- Arnaud F, Lignier V, Revel M, et al. 2002. Flood and earthquake disturbance of ^{210}Pb geochronology (Lake Anterne, NW Alps)[J]. Terra Nova, 14(4): 225-232.
- Arnaud F, Revel M, Chapron E, et al. 2005. 7200 years of Rhône river flooding activity in Lake Le Bourget, France: a high-resolution sediment record of NW Alps hydrology [J]. the Holocene, 15(3): 420-428.
- Baker V R. 1983. Paleoflood hydrologic techniques for the extension of streamflow records[C]//Naomi Kassabian. Improving estimates from flood studies. Washington, DC: Transportation Research Record: 18-23.
- Baker V R. 1987. Paleoflood hydrology and extraordinary flood events[J]. Journal of Hydrology, 96(1-4): 79-99.
- Baker V R. 2008. Paleoflood hydrology: origin, progress, prospects[J]. Geomorphology, 101(1-2): 1-13.
- Benito G, Thorndycraft V R. 2005. Palaeoflood hydrology and its role in applied hydrological sciences[J]. Journal of Hydrology, 313(1-2): 3-15.
- Bøe A G, Dahl S O, Lie Ø, et al. 2006. Holocene river floods in the upper Glomma catchment, southern Norway: a high-resolution multiproxy record from lacustrine sediments[J]. the Holocene, 16(3): 445-455.

- Bussmann F, Anselmetti F S. 2010. Rossberg landslide history and flood chronology as recorded in Lake Lauerz sediments (central Switzerland)[J]. *Swiss Journal of Geosciences*, 103(1): 43-59.
- Cuven S, Francus P, Lamoureux S F. 2010. Estimation of grain size variability with micro X-ray fluorescence in laminated lacustrine sediments, Cape Bounty, Canadian High Arctic[J]. *Journal of Paleolimnology*, 44(3): 803-817.
- Czymzik M, Dulski P, Plessen B, et al. 2010. A 450 year record of spring-summer flood layers in annually laminated sediments from Lake Ammersee (southern Germany)[J]. *Water Resources Research*, 46(11): W11528.
- Czymzik M, Brauer A, Dulski P, et al. 2013. Orbital and solar forcing of shifts in mid- to late Holocene flood intensity from varved sediments of pre-alpine Lake Ammersee (southern Germany)[J]. *Quaternary Science Reviews*, 61: 96-110.
- Dana J D. 1882. The flood of the Connecticut River valley from the melting of the Quaternary glacier[J]. *American Journal of Science*, 23: 179-202.
- Ely L L, Enzel Y, Baker V R, et al. 1993. A 5000-year record of extreme floods and climate change in the southwestern United States[J]. *Science*, 262: 410-412.
- Giguët-Covex C, Arnaud F, Enters D, et al. 2012. Frequency and intensity of high-altitude floods over the last 3.5ka in northwestern French Alps (Lake Anterne)[J]. *Quaternary Research*, 77(1): 12-22.
- Gilli A, Anselmetti F S, Ariztegui D, et al. 2003. A 600-year sedimentary record of flood events from two sub-alpine lakes (Schwendiseen, Northeastern Switzerland) [M]// Beres M, Scheidhauer M, Marillier F. *Lake systems from the Ice Age to Industrial Time*. Birkhäuser Verlag, Basel: Springer, 49-58.
- Gilli A, Anselmetti F S, Glur L, et al. 2013. Lake sediments as archives of recurrence rates and intensities of past flood events[M]//Schneuwly-Bollschweiler M, Stoffel M, Rudolf-Miklau F. *Dating torrential processes on fans and Cones*. Netherlands: Springer, 225-242.
- Giovanoli F. 1990. Horizontal transport and sedimentation by interflows and turbidity currents in Lake Geneva[M]//Tilzer M M, Serruya C. *Large Lakes*. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 175-195.
- Glur L, Wirth S B, Buntgen U, et al. 2013. Frequent floods in the European Alps coincide with cooler periods of the past 2500 years[J]. *Scientific Reports*, 3: 2770.
- Heine K. 2004. Flood reconstructions in the Namib Desert, Namibia, and Little Ice Age climatic implications: evidence from slackwater deposits and desert soil sequences[J]. *Journal of the Geological Society of India*, 64(4): S535-S548.
- Huang C C, Pang J L, Zha X C, et al. 2007. Impact of monsoonal climatic change on Holocene overbank flooding along Sushui River, middle reach of the Yellow River, China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 26(17-18): 2247-2264.
- Jenny J P, Wilhelm B, Arnaud F, et al. 2014. A 4D sedimentological approach to reconstructing the flood frequency and intensity of the Rhône River (Lake Bourget, NW European Alps)[J]. *Journal of Paleolimnology*, 51(4): 469-483.
- Kiem A S, Franks S W, Kuczera G. 2003. Multi-decadal variability of flood risk[J]. *Geophysical Research Letters*, 30(2): 1035.
- Knox J C. 1993. Large increases in flood magnitude in response to modest changes in climate[J]. *Nature*, 361(6411): 430-432.
- Kochel R C, Baker V R. 1982. Paleoflood hydrology[J]. *Science*, 215: 353-361.
- Kundzewicz Z W. 2003. Extreme precipitation and floods in the changing world[C]//Blöschl G, Franks S, Kumagai M. *Water resources systems-hydrological risk, management and development*[C]. Wallingford, USA: IAHS Press, 32-39.
- Kylander M E, Ampel L, Wohlfarth B, et al. 2011. High-resolution X-ray fluorescence core scanning analysis of Les Echets (France) sedimentary sequence: new insights from chemical proxies[J]. *Journal of Quaternary Science*, 26(1): 109-117.
- Lambert A, Hsü K J. 1979. Non-annual cycles of varve-like sedimentation in Walensee, Switzerland[J]. *Sedimentology*, 26(3): 453-461.
- Lamoureux S. 2000. Five centuries of interannual sediment yield and rainfall-induced erosion in the Canadian High Arctic recorded in lacustrine varves[J]. *Water Resources Research*, 36(1): 309-318.
- Li Y F, Guo Y, Yu G. 2013. An analysis of extreme flood events during the past 400 years at Taihu Lake, China [J]. *Journal of Hydrology*, 500: 217-225.
- Loukas A, Vasiliades L, Dalezios N R. 2000. Flood producing mechanisms identification in southern British Columbia, Canada[J]. *Journal of Hydrology*, 227(1-4): 218-235.
- Macklin M G, Lewin J. 2003. River sediments, great floods and centennial-scale Holocene climate change[J]. *Journal of Quaternary Science*, 18(2): 101-105.
- Manners R B, Magilligan F J, Goldstein P S. 2007. Floodplain development, El Niño, and cultural consequences in a Hyperarid Andean environment[J]. *Annals of the Association of the Geological Society of India*, 64(4): S535-S548.

- tion of American Geographers, 97(2): 229-249.
- Milly P C, Wetherald R T, Dunne K A, et al. 2002. Increasing risk of great floods in a changing climate[J]. *Nature*, 415 (6871): 514-517.
- Morellón M, Valero-Garcés B, Vegas-Vilarrúbia T, et al. 2009. Lateglacial and Holocene palaeohydrology in the western Mediterranean region: the Lake Estanya record (NE Spain)[J]. *Quaternary Science Reviews*, 28(25-26): 2582-2599.
- Moreno A, Valero-Garcés B L, González-Sampériz P, et al. 2008. Flood response to rainfall variability during the last 2000 years inferred from the Taravilla Lake record (Central Iberian Range, Spain)[J]. *Journal of Paleolimnology*, 40(3): 943-961.
- Nomade J, Chapron E, Desmet M, et al. 2005. Reconstructing historical seismicity from lake sediments (Lake Laffrey, Western Alps, France)[J]. *Terra Nova*, 17(4): 350-357.
- Noren A J, Bierman P R, Steig E J, et al. 2002. Millennial-scale storminess variability in the northeastern United States during the Holocene epoch[J]. *Nature*, 419(6909): 821-824.
- Osleger D A, Heyvaert A C, Stoner J S, et al. 2009. Lacustrine turbidites as indicators of Holocene storminess and climate: Lake Tahoe, California and Nevada[J]. *Journal of Paleolimnology*, 42(1): 103-122.
- Palmer T N, Räisänen J. 2002. Quantifying the risk of extreme seasonal precipitation events in a changing climate[J]. *Nature*, 415(6871): 512-514.
- Parris A S, Bierman P R, Noren A J, et al. 2010. Holocene paleostorms identified by particle size signatures in lake sediments from the northeastern United States[J]. *Journal of Paleolimnology*, 43(1): 29-49.
- Revel-Rolland M, Arnaud F, Chapron E, et al. 2005. Sr and Nd isotopes as tracers of clastic sources in Lake Le Bourget sediment (NW Alps, France) during the Little Ice Age: palaeohydrology implications[J]. *Chemical Geology*, 224 (4): 183-200.
- Schillereff D N, Chiverrell R C, Macdonald N, et al. 2014. Flood stratigraphies in lake sediments: a review[J]. *Earth-Science Reviews*, 135: 17-37.
- Schlolaut G, Brauer A, Marshall M H, et al. 2014. Event layers in the Japanese Lake Suigetsu 'SG06' sediment core: description, interpretation and climatic implications[J]. *Quaternary Science Reviews*, 83: 157-170.
- Schnellmann M, Anselmetti F S, Giardini D, et al. 2006. 15000 Years of mass-movement history in Lake Lucerne: Implications for seismic and tsunami hazards[J]. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 99(3): 409-428.
- Simonneau A, Chapron E, Vannière B, et al. 2013. Mass-movement and flood-induced deposits in Lake Ledro, southern Alps, Italy: implications for Holocene palaeohydrology and natural hazards[J]. *Climate of the Past*, 9(2): 825-840.
- Sletten K, Blikra L H, Ballantyne C K, et al. 2003. Holocene debris flows recognized in a lacustrine sedimentary succession: sedimentology, chronostratigraphy and cause of triggering[J]. *the Holocene*, 13(6): 907-920.
- Springer G S, Kite J S. 1997. River-derived slackwater sediments in caves along Cheat River, West Virginia[J]. *Geomorphology*, 18(2): 91-100.
- Stewart J E, Bodhaine G L. 1961. Floods in the Skagit River Basin, Washington[R]. Water-supply paper. Washington, DC: United States Department of the Interior, Geological Survey: 66.
- Stoffel M, Bollschweiler M. 2008. Tree-ring analysis in natural hazards research-an overview[J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 8(2): 187-202.
- Sturm M, Matter A. 1978. Turbidites and varves in Lake Brienz (Switzerland): deposition of clastic detritus by density currents[M]//Matter A, Tucker M E. Modern and ancient lake sediments. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.
- Sui J Y, Koehler G. 2001. Rain-on-snow induced flood events in southern Germany[J]. *Journal of Hydrology*, 252(1-4): 205-220.
- Swierczynski T, Lauterbach S, Dulski P, et al. 2013. Late Neolithic Mondsee culture in Austria: living on lakes and living with flood risk[J]. *Climate of the Past*, 9(4): 1601-1612.
- Støren E N, Dahl S O, Nesje A, et al. 2010. Identifying the sedimentary imprint of high-frequency Holocene river floods in lake sediments: development and application of a new method[J]. *Quaternary Science Reviews*, 29(23-24): 3021-3033.
- Thorndycraft V R, Benito G, Rico M, et al. 2005. A long-term flood discharge record derived from slackwater flood deposits of the Llobregat River, NE Spain[J]. *Journal of Hydrology*, 313(1-2): 16-31.
- Vannière B, Magny M, Joannin S, et al. 2013. Orbital changes, variation in solar activity and increased anthropogenic activities: controls on the Holocene flood frequency in the Lake Ledro area, Northern Italy[J]. *Climate of the Past*, 9 (3): 1193-1209.
- Vasskog K, Nesje A, Støren E N, et al. 2011. A Holocene record of snow-avalanche and flood activity reconstructed from a lacustrine sedimentary sequence in Oldevatnet, western Norway[J]. *the Holocene*, 21(4): 597-614.

- Viglione A, Chirico G B, Woods R, et al. 2010. Generalised synthesis of space – time variability in flood response: an analytical framework[J]. *Journal of Hydrology*, 394(1-2): 198-212.
- Waylen P R, Caviedes C N. 1986. El Niño and annual floods on the north Peruvian littoral[J]. *Journal of Hydrology*, 89 (1-2): 141-156.
- Wells L E. 1990. Holocene history of the El Niño phenomenon as recorded in flood sediments of northern coastal Peru [J]. *Geology*, 18(11): 1134-1137.
- Wilhelm B, Arnaud F, Enters D, et al. 2012. Does global warming favour the occurrence of extreme floods in European Alps? first evidences from a NW Alps proglacial lake sediment record[J]. *Climatic Change*, 113(3-4): 563-581.
- Wirth S B. 2013. The Holocene flood history of the central Alps reconstructed from lacustrine sediments: frequency, intensity and controlling climate factors[D]. Zürich, Switzerland: ETH Zürich.
- Wirth S B, Gilli A, Simonneau A, et al. 2013. A 2000 year long seasonal record of floods in the southern European Alps[J]. *Geophysical Research Letters*, 40(15): 4025-4029.
- Wirth S B, Glur L, Gilli A, et al. 2013. Holocene flood frequency across the Central Alps: solar forcing and evidence for variations in North Atlantic atmospheric circulation[J]. *Quaternary Science Reviews*, 80: 112-128.
- Wolfe B B, Hall R I, Last W M, et al. 2006. Reconstruction of multi-century flood histories from oxbow lake sediments, Peace-Athabasca Delta, Canada[J]. *Hydrological Processes*, 20(19): 4131-4153.
- Xia Z K, Wang Z H, Zhao Q C. 2004. Extreme flood events and climate change around 3500 a BP in the Central Plains of China[J]. *Science in China D: Earth Sciences*, 47 (7): 599-606.
- Zhang Q, Chen J Q, Becker S. 2007. Flood/drought change of last millennium in the Yangtze Delta and its possible connections with Tibetan climatic changes[J]. *Global and Planetary Change*, 57(3-4): 213-221.
- Zhang Q, Zhu C, Cheng J. 2002. Preliminary study on the flooding and drought calamity during past 1500 years in the Hai'an region, Jiangsu Province[J]. *Chinese Geographical Science*, 12(2): 146-151.
- Zhou A F, Sun H L, Chen F H, et al. 2010. High-resolution climate change in mid-late Holocene on Tianchi Lake, Liupan Mountain in the Loess Plateau in central China and its significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(20): 2118-2121.

Identification of Palaeoflood events by lacustrine archives and their links to climatic conditions

ZHANG Can, ZHOU Aifeng*, ZHANG Xiaonan, WU Duo, HAO Shengtun

(College of Earth and Environment Sciences, Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Palaeoflood hydrology, as an extended field of flood disaster research, has gained great achievements based on sedimentary records extracted from rivers. However, these river palaeoflood studies have limitations due to the short duration and incompleteness of sedimentary records. Lake sediments as a more efficient archive, however, often record a temporally complete palaeoflood sequence. This article reviews four most commonly applied methods to identify and reconstruct palaeofloods from lake sediments, that is, lithology and grain size, geochemical indicators, statistical analysis, and eliminating mass- movement from palaeoflood layers. Subsequently we explore the causal relationship between palaeofloods and change in continental scale atmospheric circulation and regional climate change. Finally, we discuss the prospects of several studies, including the physical mechanism of palaeoflood events and climate change, comparative study of lake palaeoflood records and regional river paleoflood records, and palaeoflood research in lakes, especially mountain lakes.

Key words: lake sediments; palaeoflood indication; Holocene; climate change