

湖泊沉积物中洪水事件判识及洪水序列重建的评述与展望

史小丽¹, 刘永超²

(1. 宁波大学 学报编辑部, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 基于国内外利用湖泊沉积物研究洪水事件、重建洪水序列的研究成果, 综合整理了湖泊沉积物中判识洪水事件的常用沉积物指标, 评述了这些指标在洪水层中的变化特征。在此基础上, 指出了利用湖泊沉积物研究洪水事件进而重建洪水序列存在的影响因素以及研究要点, 最后对该领域未来的研究方向进行了展望。

关键词: 湖泊沉积物; 洪水事件; 代用指标

中图分类号: X524; P331.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2015) 02-0069-06

洪水事件是水文过程对气候极端事件的即时响应^[1]。有研究预测^[2-3], 随着全球变暖, 气温上升导致降雨量增加, 历史时期百年一遇的洪水事件, 在 21 世纪可能演变成 10~50 年一遇。为有效地防治洪灾, 探究洪水对气候变化的响应已成为当前全球变化研究的一大热点。

在研究洪水发生规律中, 获取足够长时间跨度的洪水序列是研究的关键和难点之一。目前已有的实测和文字记录的洪水序列时间较短, 即便在历史悠久, 史志碑刻丰富的中国, 据此揭示洪水频率与量级, 推求稀遇洪水仍十分困难。因此, 在自然记录中寻找洪水信息成了弥补洪水资料短缺的重要途径。当前古洪水调查的常用方法有: 在河流的溃口、滨岸和漫滩中探寻洪水痕迹^[4]; 在文化遗迹发掘中发现洪水遗迹^[5-6]; 在河流周边埋藏的古树、泥炭和孢粉中分析洪水; 在河流、湖泊沉积物中提取洪水信息。相比而言, 湖泊沉积作为记录洪水事件档案优势明显: 广泛的地理分布及时序连续性; 较大的沉积速率及较高的分辨率; 有比树轮等更长的历史; 包含多种适用古环境恢复的沉积指标。近年来, 随着湖泊沉积物采样技术、测年技术以及分析测试手段的改进, 基于湖泊沉积物研究洪水事件, 重建洪水序列取得了令人瞩目的成果, 尤其在欧洲和北美, 近 10 几年来洪水重建

数量成指数增长^[7]。与之相比, 国内对湖泊沉积物中洪水事件研究及洪水序列重建的报道较为鲜见。

本文通过对相关文献资料的综合分析, 评述了湖泊沉积物中判识洪水沉积的常用指标及其变化特征, 同时指出了在湖泊沉积物中研究洪水事件、重建洪水序列存在的影响因素以及开展洪水事件研究应重视点, 旨在为利用湖泊沉积物准确、有效地重建洪水序列提供参考。

1 湖泊沉积物中洪水沉积的判识指标

在湖泊沉积物中, 洪水沉积是一次流量、流速、水沙特征等动力过程的变异, 致使洪水期湖泊沉积物在粒度组分、粒径大小、理化生性质等方面有别于其他非洪水期沉积物。分析相关文献资料发现^[8-38], 辨识湖泊沉积物中洪水层的主要指标及其变化特征如下。

1.1 粒度组分及其变化特征

沉积物中粒度组分可以追溯沉积物形成的力学性质、物质来源、输送介质和沉积环境等, 不同粒径的百分含量可以反映不同的湖泊沉积环境。通常含砂量高说明沉积环境不稳定, 水动力条件较强; 粘土含量高表示沉积环境稳定, 水动力条件较弱(极细颗粒的粘土物质要求湖泊水体基本保持平静), 因此湖泊沉积物的粒度组分及其参数特征

是洪水沉积最根本、有效的判别指标之一^[8]。已有研究表明^[9-16],湖泊沉积物中粗颗粒含量与入湖径流的能级有关,入湖径流能量大,沉积物中粗颗粒含量高;相反湖水越稳定,能量越小,沉积物中粘土含量较高。Campbell^[10]在对加拿大Pine湖沉积物研究中发现,粗颗粒沉积物由高能量入湖径流带入,沉积物不同粒径组合能够反映气候的变化(降雨量大小和强度)。同样 Wilhelm 等^[11]对欧洲高纬度的冰堰湖研究发现,洪水沉积层中粗颗粒含量较高,且 Q_{90max} 能指示洪水强度。2010年Parris等^[12]提出了沉积物颗粒大小的端元模型,认为湖泊沉积物中的最粗端是碎屑洪水层底的一个敏感指标。在国内,文献[13]报道了乌巾荡洪水沉积层特征为沉积物粒径粗细不均、分选差,洪水层粒度概率累积曲线呈明显的三段式河流沉积相特征;文献[14]在阳澄湖沉积物研究中认为沉积层粒度相对较粗、分选较差,与洪水沉积有关;文献[15]对巢湖的研究表明,沉积物样品中7个平均粒径和砂百分含量异常增大点与历史记载的洪水年相对应。但是文献[16]指出,湖泊沉积物中粗颗粒含量与入湖径流强度的相关性更为可靠。

因此湖泊沉积物中平均/中值粒径的增大通常被用来辨识洪水沉积层;同时由于粒径分布可以反映水动力条件,尤其是湖泊径流的输移能力,也常被用来评估洪水的强度。

1.2 沉积速率及其变化特征

湖泊沉积速率的变化反映了湖区在自然因素和人类活动影响下,入湖和出湖泥沙量之间的动态平衡被打破和新平衡建立的复杂过程,是综合评价区域环境及其变化的重要指标之一。

通常洪水时期江河水流搬运能力增大,往往会携带更多的物质进入湖泊,并在湖泊相对静止的环境条件下沉积,导致湖泊沉积速率上升。如文献[17]报道了淮河洪涝造成大量泥沙倒灌,导致女山湖沉积速率增大;文献[15]报道了江淮洪涝带来大量泥沙,致使巢湖沉积速率变大。同样,Young等^[18]在对日本Takkobu湖的近300年湖泊沉积研究中发现,洪水事件和流域工程对湖泊沉积速率的影响约为自然条件下湖泊沉积速率的7倍。Gilli等^[19]在对瑞士2个亚高山湖的600年沉积物研究中发现,最强的降雨事件对应沉积物中最厚的碎屑沉积层。

Brown 等^[20]在对美国佛蒙特州湖泊沉积物研究发现,以无机物为主的沉积层厚度和出现间隔与径流强度和频率具有较好的耦合性,暴雨洪水期沉积物厚度较大。Wilhelm 等^[11]在研究阿尔卑斯山冰堰湖1400年湖泊沉积物记录中发现,洪水层的沉积厚度与洪水发生的强度有关。更有研究报道^[21-22],在某些情况下,洪水层的沉积厚度可以用来作为洪水强度的代用指标。

因此对湖泊沉积速率变化的分析可以辨识沉积物中的洪水沉积层,洪水层的沉积厚度结合粒径分布在一定程度上能够反映洪水动力学的特征。

1.3 磁化率及其变化特征

磁化率大小可以反映沉积物来源、搬运过程以及人类活动的影响等^[23]。吉云平等^[24]研究表明,沉积物磁化率在在一定程度上可以作为水动力能量的代用指标,并可作为沉积动力环境的判据之一。

当洪水发生时往往会有表层土壤中丰富的铁磁性矿物进入湖泊,导致湖泊沉积物中磁化率上升。Li等^[25]在研究太湖400年洪水事件中发现,洪水沉积层出现高浓度的粗颗粒物质和高磁化率值。同样,Wolfe等^[26]在对加拿大oxbow湖沉积物洪水重建研究中发现,沉积物中磁化率与平均/中值粒径的大小以及石英和总长石含量成正相关,其解释为高能量的入湖径流带来较粗的沉积颗粒以及富含磁性物质的沉积物,而沉积物中细小的沉积颗粒和富含的粘土矿物与低能量的入湖径流相关,认为磁化率峰值可以作为指示洪水沉积的指标。Eivind等^[27]在利用Meringsdalsvatnet湖沉积物研究洪水事件中发现,洪水层中沉积物磁化率高、粒径较大,而相对体积密度较低。

但也有研究发现^[13,28-29],洪水沉积物中磁化率下降,解释原因是由于洪水期潜积形成的还原环境使沉积物中磁化率降低;同时,由于磁性矿物通常相对富集在粘土颗粒中,洪水层中粗颗粒物质相对增加,粘土含量减少,导致磁化率下降。

因此在用磁参数分析湖泊沉积物中洪水事件时应充分考虑流域的岩性、地质地貌条件,结合其他代用指标,综合分析磁性参数对湖泊沉积物及其环境的实际指示意义。

1.4 化学元素及其变化特征

化学风化记录了古气候、古环境的变化过程,

是元素地球化学循环的重要环节。近年来,根据湖泊沉积物中元素地球化学变化,解释过去全球演变已成为一种有效的研究手段。由于单项元素的迁移受多种因素影响,其对气候变化的反映存在一定的局限性,因此目前主要采用对沉积物中元素含量相加或相比去放大元素指标对气候环境变化的响应,减小各种扰动因素的影响。如用 $C = (Fe + Al + Mn) / (K + Ca + Mg)$ 比值反映湖区的气候变化^[30],用 Rb/Sr 比值^[31]、Zr/Rb 比值^[29]识别沉积物中洪水沉积层。

由于洪水时期入湖沉积物物源不同于非洪水期,使得洪水沉积层与非洪水沉积层在地球化学元素的种类和含量上产生明显的差异。如 Gilli 等^[7]在研究意大利 Ledro 湖沉积物时发现,洪水层因 Si、Fe 元素相对含量较高,与非洪水期沉积物相比颜色较暗。Czymzik 等^[32]在研究德国 Ammersee 湖 450 年沉积物中洪水事件发现,作为陆源碎屑输入的 Ti 元素与 Fe、K、Si、Al 存在明显的相关性,表明这些元素同源,而 Ca 与 Ti 元素呈明显的负相关,因此 Ti 和 Ca 元素含量可以指代物源的变化。同样, Wünnemann 等^[33]研究发现,湖泊沉积物中 Al、Si、Ti 和 Fe 可以表征碎屑物从流域输移至湖泊,并用 Ca/Si 比值区分自生和输入沉积, Ca/Si 比值高代表自生沉积。此外,沉积物中的化学元素还被用来作为粒径变化的代用指标,如文献^[11]发现,沉积物中 Fe 元素含量变化与小于 4 μm 颗粒含量变化一致,而 Zr 元素含量与 Q_{90} 显著相关, Zr/Fe 比值可以用来指代沉积物中 Q_{90} 和小于 4 μm 颗粒的分布。

因此湖泊沉积物中化学元素组成、种类和含量的变化可以反映沉积物的不同物源、气候和环境的变化,同时可以作为粒度等代用指标,是鉴别沉积物中洪水沉积的一个重要依据。

1.5 孢粉及其组合特征

湖泊沉积物中孢粉特征包含有重要的植被、气候信息,能够反演过去植被气候变迁,湖泊沉积物中孢粉的种类和数量可以反映沉积物的来源。就湖泊而言,通常在没有洪水发生时,湖泊处于一个相对单纯的环境,其植物花粉种类有限。洪水时期则不同,大江、大河可能会把广阔流域范围内的各类花粉带入湖泊,从而使得这一时期沉积物中花粉的种类增多,出现较多与该地区环境不相适应

的孢粉种类。文献^[34]在对长江中游网湖沉积物洪水事件研究中发现,洪水时期网湖沉积物中孢粉总浓度以及种类数均有所增加,同时水生生物莎草科花粉含量有所增多。文献^[35]在对法国东部 Annecy 湖研究发现,洪水沉积层中花粉谱显示出清晰的向更多花粉类型的转变,沉积物中出现存在于流域中的蕨类花粉。

因此湖泊沉积物中孢粉种类和数量的突然增多,尤其是陆生花粉的增加对判别洪水沉积有一定的指示意义,但是这通常需要注意与流域人类活动的影响相区分。

1.6 其他指标特征

(1)C/N 比:湖泊沉积物中 C/N 比主要受沉积有机质来源和降解程度的控制。湖泊原始有机物的 C/N 比值较低,通常为 4~10,而脉管陆地植物的 C/N 比值较高,通常 >20。相关研究表明^[20,36],湖泊沉积物中洪水层的 C/N 比值通常较背景层高。

(2)有机物中稳定碳同位素($\delta^{13}C$):碳同位素被用来区分有机物来源(水生和陆生),在典型的陆生植物中 $\delta^{13}C$ 较高。有研究发现^[21,37],在碎屑洪水层中 $\delta^{13}C$ 比背景层高。

(3)烧失量(LOI):LOI 通常用来表征沉积物中总有机碳,洪水沉积层中一般有机质含量低,因此其 LOI 值比背景层低,尤其是富营养化湖泊^[8,26]。但是对贫瘠湖泊,由于洪水带来了陆源有机质,洪水层中 LOI 值比背景层高^[29]。

(4)颜色:沉积物中有机质含量丰富,其颜色一般较暗,反之较明亮。在富营养化湖泊中,洪水层因有机质含量较低,而背景层的有机质含量高,通常形成明显的视觉差异^[21,26]。

2 湖泊沉积物中洪水判识及其重建的影响因素

湖泊作为一个经历较长地质历史的相对独立体系,其连续沉积物蕴含了丰富的信息,提供了区域环境、气候和事件的高分辨率连续记录^[38]。但不同区域的湖泊会受各种不同因素的影响,总括起来影响湖泊沉积物中洪水事件重建的主要因素有:

(1)沉积序列的扰动和相似层。由于洪水过程是涉及流域范围内大规模的侵蚀、搬运、堆积的综合复杂过程,后期洪水有可能造成对前期洪水沉积的冲刷或部分冲刷侵蚀,使得洪水沉积记录缺

失或变得模糊。同时,湖泊中的生物作用也会对正常沉积序列产生扰动。此外,因地震、河流三角洲和湖岸的崩塌、湖平面的变化等会导致沉积物中出现与洪水沉积层相似的碎屑层。这些均会导致对沉积物中洪水层的误判。

(2)沉积物指标的多解性。对湖泊沉积物环境指标研究发现,不同指标指示的环境意义十分复杂,尤其是单项指标或多或少都带有混合信息。如湖泊沉积物中粗颗粒组成既反映气候干旱期湖泊萎缩,又可以反映气候湿润期地表径流增强携带粗颗粒物入湖^[39]。同样,洪水沉积层中磁化率值有高有低,这些都需要根据具体湖泊及流域的地质地貌条件进行综合判识。

(3)沉积序列年代模型选择。目前湖泊沉积物测年方法主要有:沉积物纹层、放射性核素 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 、 AMS^{14}C 、碳球颗粒(SPE)和各种燃烧产生的气溶胶、已知年代的火山灰层、地震、岩体坍塌、大洪水等痕迹。由于纹层极少完整出现, ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 存在扩散/迁移等问题, ^{14}C 法存有碳库效应,且一些测年方法只提供一个时间点,因此选择合适的年代模型,建立高分辨率、高精度的沉积物年表难度较大。

(4)人类活动对湖泊沉积的影响。除了气候因素,人类活动对湖泊沉积有着重大的影响,如人类居住地的建立、对森林的砍伐等会导致水土流失,流域侵蚀增强,使流域中更多的碎屑物被输移带入湖泊,造成湖泊沉积物指标的改变。因此在湖泊沉积物中辨识洪水事件时,必须排除人类活动对湖泊沉积的影响。

3 利用湖泊沉积物研究洪水事件的要点

3.1 湖泊及取样点位置选取

利用湖泊沉积物研究洪水,建立洪水序列的一个关键是获得连续高频沉积记录的储存信息,同时,沉积物不受干扰和侵蚀。因此选择合适的有希望记录洪水事件的湖泊至关重要。理想的湖泊和取样点通常是:(1)未受或很少受到人类活动的干扰,因此很多研究选择高纬度或高海拔地区的湖泊。(2)有明显的入湖径流,能够使流域被侵蚀的碎屑物被输移至湖泊,同时湖泊底部较为平坦。(3)根据研究的时间跨度选择有一定沉积速率的湖泊,

沉积速率过高,限于取芯技术会限制研究时间跨度;反之则会影响洪水重建的精度。(4)沉积物取样可用活塞取芯器(深度大)和重力取芯器(深度小),选择在湖泊较深且有平静回水条件的区域,保证该处沉积物较易积聚。通常主孔位置设置在湖泊中心,沿线可布设副孔,以观察洪水径流变化对湖泊沉积的影响。

3.2 流域地质地貌条件勘察

湖泊流域的地质地貌对湖泊沉积物影响较大。湖泊流域面积的大小、基岩的岩性、岩相、风化程度等都有可能直接影响湖泊沉积物的颗粒大小、分布以及物化性质,使湖泊沉积指标出现不同的变化。同时流域的地形地貌条件会影响其地表径流,进而对湖泊径流的大小、强度以及沉积物物源等产生影响。由于处于不同地域与环境条件下的湖泊,对于气候和环境变化的响应存在不完全一致性,因此做好湖泊及其流域地质地貌的勘察是基于沉积物各类代用指标准确判识湖泊沉积中洪水事件的一个重要前提。

4 展望

在全球变化背景下,利用湖泊沉积物研究洪水事件是建立长时间尺度洪水序列的有效途径。为提高湖泊沉积物中洪水信息提取的可靠性和精确度,应重视和加强以下几方面研究:

(1)加强年代学研究,保证测年技术的精准度。沉积物测年是建立洪水年表的前提,研究中应根据具体湖泊条件选用多种测年方法,并将测年结果与有关的器测资料和文献记载比对,以验证年代模型的精准性。(2)重视应用新的取芯装置和采样分样技术,对沉积物尝试采用各种新的分析测试方法,加强沉积岩芯的微相分析,增加生物标志性指标,提高对湖泊沉积物中各类信息的获取。(3)加强多环境指标之间的综合研究,寻找新的环境替代指标。探求各沉积指标与洪水事件之间的定性乃至定量的转换关系。(4)由于目前对洪水事件的研究几乎都在一个集水区,可能只代表本地事件。综合不同湖泊的洪水记录,可以推动地域性的洪水重建。因此,建立洪水序列数据库,加强不同区域/地区洪水序列的综合对比,抑或能够进一步探究不同区域,不同时段洪水发生的规律、特点以

及洪水对气候变化的响应, 揭示洪水发生的驱动因子, 如太阳活动变化、大西洋扰动、太平洋季风等等, 有利于建立高精度的洪水预测模型。

湖泊沉积物记录了足够久远的洪水信息, 利用这些信息进行长时段的洪水序列重建具有较大潜力。但是基于湖泊系统本身的复杂性和区域环境间的差异性, 因此提高洪水重建的精准度还有待相关学科的发展以及多学科之间的合作。

参考文献:

- [1] Benito G, Sopea A, Sánchez-Moya Y. Palaeoflood record of the Tagus River (Central Spain) during the late Pleistocene and Holocene[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22(15/17):1737-1756.
- [2] Hirabayashi Y, Mahendran R, Koirala S, et al. Global flood risk under climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3:1-6.
- [3] Wilhelm B, Arnaud F, Enters D, et al. 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*, 2012, 113:563-581.
- [4] 李长安, 张玉芬. 长江中游洪水沉积特征与标志初步研究[J]. *水科学进展*, 2004, 15(4):485-488.
- [5] 朱诚, 郑朝贵, 马春梅, 等. 长江三峡库区中坝遗址地层古洪水沉积判别研究[J]. *科学通报*, 2005, 50(20):240-250.
- [6] 吴立. 江汉平原中全新世古洪水事件环境考古研究[D]. 南京: 南京大学, 2013.
- [7] Gilli A, Anselmetti F S, Glur L, et al. Lake sediments as archives of recurrence rates and intensities of past flood events[C]//Schneuwly-Bollschweiler M, Stoffel M, Rudolf-Miklau F. Dating torrential processes on fans and cones, advances in global change research. Dordrecht Netherlands: Springer, 2013:225-242.
- [8] Daniel N S, Richard C C, Neil M, et al. Flood stratigraphies in lake sediments: A review[J]. *Earth Science Reviews*, 2014, 135:17-37.
- [9] Schiefer E, Gilbert R, Hassan M A. A lake sediment-based proxy of floods in the Rocky mountain front ranges, Canada[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2011, 45(2):137-149.
- [10] Campbell C. Late Holocene lake sedimentology and climate change in southern Alberta, Canada[J]. *Quaternary Research*, 1998, 49:96-101.
- [11] Wilhelm B, Arnaud F, Sabatier P, et al. Palaeoflood activity and climate change over the last 1400 years recorded by lake sediments in the north-west European Alps[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2013, 28(2):189-199.
- [12] Parris A S, Bierman P R, Noren A J, et al. Holocene paleostorms identified by particle size signatures in lake sediments from the northeastern United States[J]. *J Paleolimnol*, 2010, 43:29-49.
- [13] 潘凤英, 袁丁. 兴化市乌巾荡湖相沉积层中鉴别洪水沉积标志的研究[J]. *南京师范大学学报: 自然科学版*, 1996, 19(3):78-84.
- [14] 吉磊. 阳澄湖近代沉积物的古湖泊学研究[J]. *湖泊科学*, 1997, 9(1):22-28.
- [15] 顾成军. 巢湖历史沉积记录与流域环境变化研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2005.
- [16] Cockburn J M H, Lamoureux S F. Inflow and lake controls on short-term mass accumulation and sedimentary particle size in a high arctic lake: Implications for interpreting varved lacustrine sedimentary records[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2008, 40:923-942.
- [17] 夏威夷, 王云飞, 潘红玺. 女山湖现代沉积速率和环境解释[J]. *湖泊科学*, 1995, 7(4):314-319.
- [18] Young S A, Shigeru M, Futoshi N, et al. Historical change in lake sedimentation in lake Takkobu, Kushiro Mire, northern Japan over the last 300 years[J]. *Geomorphology*, 2006, 78:321-334.
- [19] Gilli A, Anselmetti F S, Ariztegui D, et al. A 600-year sedimentary record of flood events from two sub-alpine lakes (Schwendiseen, Northeastern Switzerland)[J]. *Eclogae Geologica Helvetia*, 2003, 96:49-58.
- [20] Brown S L, Bierman P R, Lini A, et al. 10000 yr record of extreme hydrologic events[J]. *Geology*, 2000, 28(4):335-338.
- [21] Lucas K A, Achim B, Peter D, et al. Detrital layers marking flood events in recent sediments of Lago Maggiore (N. Italy) and their comparison with instrumental data[J]. *Freshwater Biology*, 2012, 57:2076-2090.
- [22] Jenny J P, Wilhelm B, Arnaud F, et al. A 4D sedimentological approach to reconstructing the flood frequency and intensity of the Rhone River (Lake Bourget, NW European Alps)[J]. *Academic Journal*, 2014, 51(4):469-483.
- [23] 胡守云, 邓成龙, Appel E, 等. 湖泊沉积物磁学性质的环境意义[J]. *科学通报*, 2001, 46(17):1491-1494.
- [24] 吉云平, 夏正楷. 不同类型沉积物磁化率的比较研究和初步解释[J]. *地球学报*, 2007, 28(6):541-549.
- [25] Li Yongfei, Guo Ya, Yu Ge. An analysis of extreme flood

- events during the past 400 years at Taihu Lake, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 500:217-225.
- [26] Wolfe B B, Hall B I, Last W M, et al. Reconstruction of multi-century flood histories from oxbow lake sediments, Peace-Athabasca Delta, Canada[J]. *Hydrological Processes*, 2006, 20:4131-4153.
- [27] Eivind N S, Svein O D, Atle N Ø P. Identifying the sedimentary imprint of high-frequency Holocene river floods in lake sediments: Development and application of a new method[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29:3021-3033.
- [28] 李永飞, 于革, 沈华东, 等. 太湖沉积对流域极端降水和洪水响应的研究[J]. *沉积学报*, 2012, 30(6):1099-1105.
- [29] Kristian V, Atle N, Eivind N S, et al. A Holocene record of snow-avalanche and flood activity reconstructed from a lacustrine sedimentary sequence in Oldevatnet, western Norway[J]. *The Holocene*, 2011, 21(4):597-614.
- [30] 翟秋敏, 郭志永. 坝上高原安固里淖全新世沉积地球化学特征与环境变化[J]. *古地理学报*, 2002, 4(4):55-60.
- [31] Anna F J, Mark G M, Paul A B. A geochemical record of flooding on the upper River Severn, UK, during the last 3750 years[J]. *Geomorphology*, 2012, 179:89-105.
- [32] Czymzik M, Dulski P, Plessen B, et al. A 450 year record of spring-summer flood layers in annually laminated sediments from Lake Ammersee (southern Germany)[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46:1-16.
- [33] Wünnemann B, Demske D, Tarasov P, et al. Hydrological evolution during the last 15 kyr in the Tso Kar lake basin (Ladakh, India), derived from geomorphological, sedimentological and palynological records[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(9):1138-1155.
- [34] 史小丽. 百年来长江中游网湖环境演化及洪水事件与人类活动的湖泊沉积响应[D]. 南京: 中科院南京地理与湖泊研究所, 2011.
- [35] Thorndycraft V, Hu Y, Oldfield F, et al. Individual flood events detected in the recent sediments of the Petit Lac d'Annecy, eastern France[J]. *The Holocene*, 1998, 8:741-746.
- [36] Osleger D A, Heyvaert A C, Stoner J S, et al. Lacustrine turbidites as indicators of holocene storminess and climate: Lake Tahoe, California and Nevada[J]. *J Paleolimnol*, 2009, 42:103-122.
- [37] Revel-Rolland M, Arnaud F, Chapron E, et al. 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]. *Chem Geol*, 2005, 224:183-200.
- [38] 沈吉. 湖泊沉积研究的历史进展与展望[J]. *湖泊科学*, 2009, 21(3):307-313.
- [39] 陈敬安, 万国江, 徐经意. 洱海沉积物粒度记录与气候干湿变迁[J]. *沉积学报*, 2000, 18(3):341-345.

Identifying Flood Events in Lake Sediments and Reconstructing Flood Histories: Review and Prospect

SHI Xiao-li¹, LIU Yong-chao²

(1.Editorial Department of Journal, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Base on the research achievements about flood events using lake sediments in the domestic and oversea, the indexes of lake sediments and their change features on flood stratigraphies in lakes sediments are synthesized and sorted. On this basis, the paper discusses the impact factors and the key points of identifying flood events in lake sediments and reconstructing the flood histories. The directions of further research are also provided.

Key words: lake sediments; flood events; proxy

(责任编辑 章践立)