长江武汉段4.5~2.5 ka沉积地层与古洪水标志识别

张跃颖[1)],李长安[1)],张玉芬[2)],宋喆[1)]
1)中国地质大学(武汉)地球科学学院,武汉,430074;
2)中国地质大学(武汉)地球空间与信息学院,武汉,430074

内容提要:长江中游近年洪灾频发,武汉江段更是其防洪重点,开展武汉地区的古洪水研究,从而延长古洪水记录,对洪水预测具有重要意义。本文选取武汉地区河谷沉溺湖区SK10钻孔沉积作为研究对象,运用AMS ^{14}C测年技术厘定地层年代,通过粒度和地球化学元素的测定与分析,与文献中记录的古洪水频发期进行对比,建立一套适用于长江武汉段古洪水沉积的识别指标,并对长江武汉段距今4.5~2.5 ka的古洪水期进行研究。结果表明:①基于后湖与长江的分布关系,在钻孔沉积中选取粒度指标(P95、砂含量、平均粒径、黏土/粉砂、(粗粉砂+砂)/黏土)和地球化学指标(Na_2O、Al_2O_3、Fe_2O_3、Rb/Sr、Zr/Rb)作为古洪水频发期识别标志,对武汉地区的洪水频发期沉积有较好的指示作用。②通过指标识别出的古洪水频发期为:2608±30 a BP、2814±35 a BP、3094±35 a BP、3577±35 a BP、3830±35 a BP、3939±35 a BP、4084±35 a BP、4193±35 a BP、4391±35 a BP左右,与文献记录中距今4.5~2.5 ka的几次洪水频发期基本一致。

关键词:武汉地区;古洪水频发期;识别标志;粒度;地球化学

自古以来,洪水是危及人类生命财产安全的主要自然灾害之一,近年来,长江流域受到极端暴雨的影响,洪涝灾害屡见不鲜。武汉作为长江中游最大的城市,其受洪水造成的损害值得关注。2016年4月24日,汉江水位达到22.51 m,超过历史同期最高水位记录(1981年22.26 m);同年7月,暴雨灾害导致武汉全城严重内涝,截至7月6日12时,造成了农作物受损974.04 km^2,倒塌房屋2357户,直接经济损失22.65亿元;2017年7月,"长江2017第1号洪水"来势汹汹,导致长江干流城陵矶至大通江段水位全线超警,汉口站最高水位达到27.73 m,峰值超警戒0.43 m,低于保证水位2.00 m。面对如此频繁而严重的灾害,开展洪水发生规律及预测的研究十分必要。为能准确预测洪水发生的可能性和严重程度,除了获取现代大洪水水文信息外,还需要进行古洪水记录的研究。

长江是我国洪水灾害的高发流域,目前长江流域的古洪水研究主要聚焦于上游和下游。长江上游的研究多集中在三峡地区,在考古遗址地层中运用多种方法判别古洪水沉积(如张强等,2004;朱诚等,2005,2008),或根据长江平流沉积物等建立全新世以来的特大洪水序列(杨玉荣和王辉,1997;葛兆帅等,2004;葛兆帅,2009)。长江下游的研究多集中在南京以下江段及三角洲地区,主要讨论长江摆动及海面变化对洪水发生的影响(朱诚等,1997a,b;陈中原等,1997;张强等,2003)。此外,黄春长团队对汉江上游地区开展了较为系统的研究(查小春等,2012;Zha Xiaochun et al.,2014;王恒松等,2014;周亮等,2014),通过野外剖面识别出滞流沉积层,结合粒度、磁化率指标分析,经过年代测试确定全新世以来汉江上游发生过多起特大洪水事件。然而,长江中游是长江流域洪水灾害最为严重的地区,目前的研究主要根据典型剖面及考古遗址地层,集中在江汉平原腹地(谢远云等,2007;张玉芬等,2009;朱诚等,2014;Wu Li et al.,2017),关于武汉江段的古洪水研究较少。近年来,在进行武汉市城市地质调查中,经系统的钻孔揭露发现位于江北汉口的后湖SK10钻孔是开展古洪水研究的理想剖面(谢纪

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:41672355和41871019)和武汉市多要素城市地质调查示范项目(编号:WHDYS-2018-007和DD20160250-6)的成果。
收稿日期:2019-01-23;改回日期:2019-06-13;责任编辑:刘志强。Doi:10.16509/j.georeview.2019.04.013
作者简介:张跃颖,女,1994年生,硕士研究生,第四纪地质学专业,Email:Zhang_luoying@126.com。通讯作者:张玉芬,女,1957年生,教授,主要从事环境地质和环境地球物理等方面的研究,Email:zhyfcug@163.com;李长安,男,1957年生,教授,主要从事流域第四纪环境方面的研究,Email:1002858465@qq.com。

海和张玉芬,2015)。本文在 SK10 钻孔沉积学研究的基础上,通过对古洪水沉积标志的判识,结合 AMS ^{14}C 测年,就武汉地区距今 4.5~2.5 ka 的长江古洪水频发期进行分析。

1 研究区概况

SK10(30°36′30″ N,114°18′50″E)位于汉口后湖地区靠近长江一侧(图 1 黑色五角星处)。后湖是武汉市汉口城区一个重要的湖泊,位于长江左岸的天然堤之后,并与长江隔绝,是由河谷沉溺作用与河口壅塞作用而形成的河谷沉溺湖(何报寅,2002)。新中国成立以来,随着汉口的城市发展,后湖逐渐被填埋,现已成为汉口城区的一部分。由于长江武汉段受一系列基岩低丘(龟山、蛇山、军山等)构成的矶头的控制,河道位置基本固定。后湖自全新世形成以来长期处于湖泊或沼泽环境,沉积连续,相较河道迁徙复杂的江汉平原上的湖泊,对长江古洪水过程有着更为完整的记录。由于后湖位于长江天然堤与中晚更新世网纹红土及下蜀土组成的岗地之间,没有其他水系的注入,其物源主要为周缘岗地(面流或沟谷汇入)长江洪水期(越过天然堤)沉积及湖沼内源生物。同时,长江武汉段天然堤较高大,普遍高于两岸平原达 3~4 m,只有一定规模的洪水的泥沙方能越过天然堤进入湖泊沉积下来。

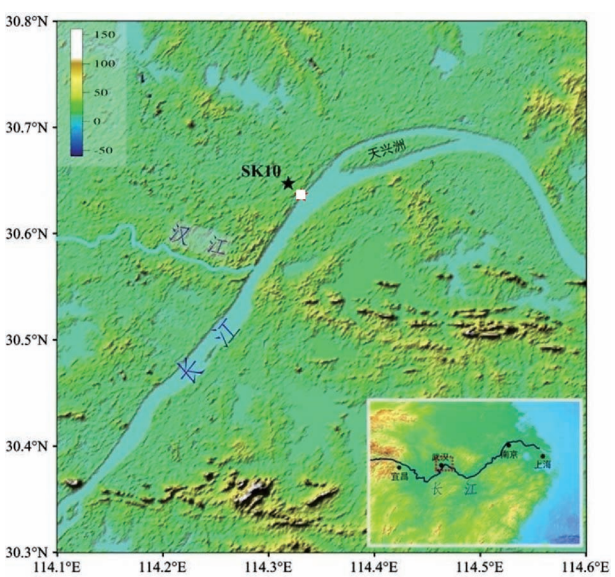


图 1 样品采集地点位置示意图(黑色五角星为 SK10 钻孔位置,白色正方块为江滩样品采集位置)

Fig. 1 Schematic map of sampling location(Location of SK10 is marked by black five-pointed star; sampling location of Jiangtan sample is marked by white square)

由此可见,SK10 钻孔对长江武汉段古洪水研究具有十分理想的地质条件。

2 材料与方法

2.1 样品采集

SK10 钻孔岩性较简单,孔深 45.0 m(图 2),自下而上依次为基岩层(45.0~43.4 m)、砂层(43.4~23.0 m)、粉砂层(23.0~19.2 m)、粉砂质黏土层(19.2~14.4 m)、淤泥质黏土层(14.4~6.5 m)、粉砂质黏土层(6.5~1.6 m)及人工填土层(1.6~0 m)。

SK10 钻孔中共采集 AMS ^{14}C 样品 3 组,深度分别为 3.4 m、7.8 m 和 17.6 m,所采样品均为黑灰色淤泥质黏土,系湖泊相沉积。本文选取质地均一的淤泥质黏土段(6.5~14.4 m)湖相沉积物进行粒度和地球化学元素测试。粒度样品间隔 10 cm 连续采样,共采集 83 组。地球化学样品以不等间距的方式采样,即黏土层间隔 10 cm、粉细砂层间隔 20 cm、砂层间隔 50 cm 进行采样,共采集样品 83 组。

为区分 SK10 钻孔中的洪水沉积物与湖相沉积物的特征,本研究在汉口江滩,即堤外河漫滩顶部采集了两处 2017 年洪水沉积物样品 JT1 和 JT2(采样位置见图1白色正方块处),其中JT1洪水沉积层

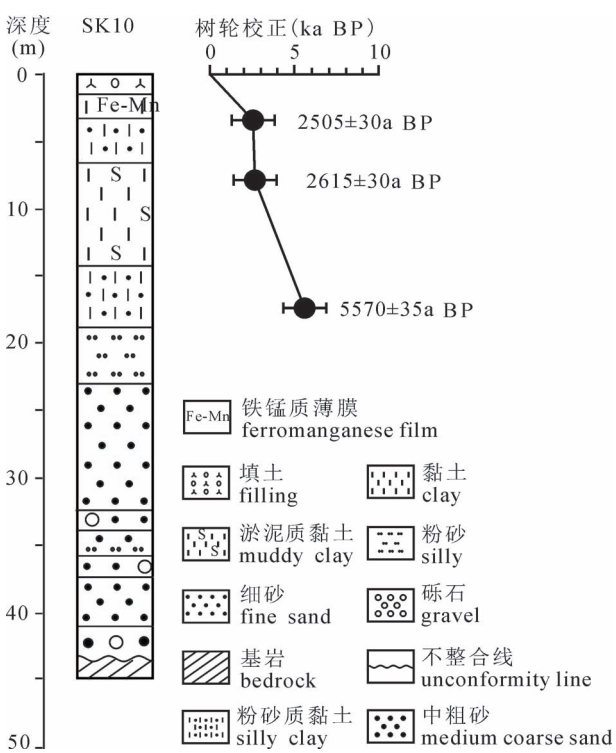


图 2 SK10 钻孔年代随深度变化曲线

Fig. 2 Chronological curve with depth of SK10

厚 15 cm,按 5 cm 间距取样品 3 个;JT2 洪水沉积层厚 9 cm,在距地表下 4 cm 和 5 cm 处各取一个样品。总共采集长江现代沉积样品 5 组。

2.2　实验方法

样品的^{14}C 年代学测试在波兰 Adam Mickiewicz University Poznań Radiocarbon Laboratory 完成,并运用 OxCal 4.3(Online)软件对测试结果进行校正,得到年代学结果。样品的粒度测试均在南京师范大学地理科学学院粒度分析室完成,所用仪器为 Mastersize 2000 型激光粒度仪,检测范围在 0.02~2000 μm,误差小于 2%。钻孔样品的地球化学测试在南京师范大学地理科学学院地球化学分析室完成,江滩样品的常量元素地球化学测试在中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室完成,所用仪器为日本岛津公司 XRF-1800X 射线荧光光谱分析仪。

3　结果与分析

3.1　AMS ^{14}C 测年结果

SK10 钻孔样品 AMS ^{14}C 的测年结果如表 1 所示,根据年代数据绘制了 SK10 钻孔年代随深度变化曲线(图 2)。

表 1 SK10 钻孔样品^{14}C 测年及日历年龄校正结果

Table 1 AMS^{14}C dating and calendar calibration of chronology results of SK10

深度(m)	样品	树轮校正年龄(a BP)	中间值(a BP;1σ)	校正结果(a BP;1σ)	中间值(a BP;2σ)	校正结果(a BP 2σ)
3.40	黏土	2505±30	2548±48	2500~2596	2609.5±125	2485~2734
7.80	黏土	2615±30	2748±11	2737~2759	2747.5±30	2718~2777
17.60	黏土	5570±35	6489±49	6440~6537	6487.5±81	6407~6568

3.2　粒度组分及粒度参数

3.2.1　SK10 钻孔湖相层沉积的粒度组分与粒度参数

测试结果(图 3)表明:该研究段黏土含量变化较大,范围在 13.59%~64.88%,平均含量 32.61%;粉砂范围在 35.12%~84.29%,平均含量 66.57%;砂含量较少,只在个别层位存在,范围介于 0~6.98%,平均含量仅为 0.82%。该段粒度组分以粉砂为主,黏土次之,砂含量最少。样品平均粒径和中值粒径分别为 6.23~8.44 ϕ 和 6.09~8.37 ϕ,平均值分别为 7.30 ϕ 和 7.21 ϕ,属于极细粉砂。标准差介于 1.13~2.02,平均值为 1.51,分选较差。偏态介于-0.11~0.20,平均值为 0.11,近对称,粗细成分含量相当,但粗端稍多。峰态介于 0.91~1.21,平均值为 1.05,属中等沉积峰态。

3.2.2　长江现代洪水沉积物的粒度组分与粒度参数

测试结果(表 2)表明:江滩样品粉砂含量最多,范围在 38.30%~55.86%,平均含量为 48.05%;砂

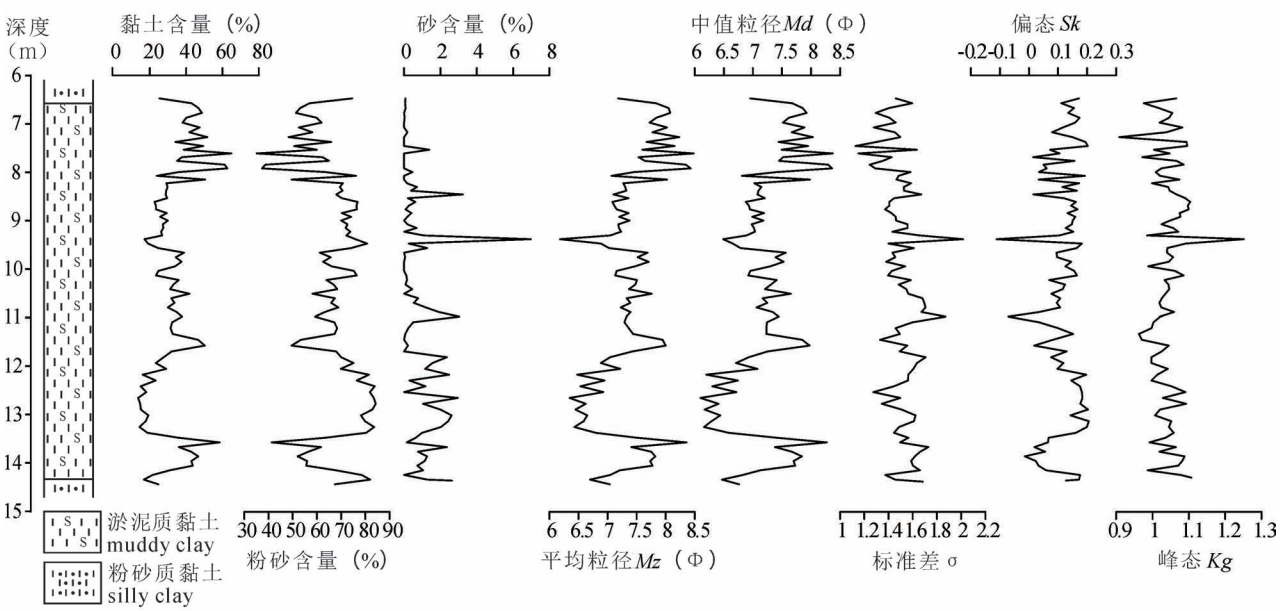


图 3 SK10 钻孔粒度参数及粒度组分随深度变化曲线

Fig. 3 Particle size parameters and particle components curves with depth of SK10

表 2 江滩样品粒度组分及粒度参数

Table 2 Particle size components and parameters of sediment samples from Hankou Jiangtan

样品	深度(cm)	黏土含量(%)	粉砂含量(%)	砂含量(%)	中值粒径 Md(ϕ)	平均粒径 Mz(ϕ)	标准差 σ_I	偏态 S_K	峰态 K_G
JT1-LD-1	0~5	18.14	46.85	35.01	4.93	5.63	2.22	0.13	0.78
JT1-LD-2	5~10	15.14	52.53	32.32	5.03	5.58	2.27	0.34	0.83
JT1-LD-3	10~15	12.67	38.30	49.03	4.03	5.13	2.32	0.32	0.85
JT2-LD-1	0~4	21.24	55.86	22.90	5.81	6.05	2.16	0.28	0.77
JT2-LD-2	4~9	17.12	46.72	36.16	4.85	5.58	2.18	0.53	0.78
平均值		16.86	48.05	35.09	4.93	5.60	2.23	0.32	0.80

含量变化较大,范围在 22.90%~49.03%,平均含量 35.09%;黏土变化较小,范围在 12.67%~21.24%,平均含量为 16.86%。江滩粒度组分以粉砂为主,砂次之,黏土最少。样品平均粒径和中值粒径分别为 5.13~6.05 ϕ 和 4.03~5.81 ϕ,平均值分别为 5.60 ϕ 和 4.93 ϕ,属于粉砂。标准差介于 2.16~2.32,平均值为 2.23,分选很差。偏态介于 0.13~0.53,平均值为 0.32,正偏,粒度集中在中端偏粗的部分。峰态介于 0.77~0.85,平均值为 0.80,属宽峰态。

3.3 地球化学元素

表 3 列出了 SK10 钻孔样品部分地球化学元素含量范围及平均值。根据实验数据得出 SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3 含量变化与 MgO、CaO、Na_2O 具有一致性。SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3、Rb 含量较高的层位中 MgO、CaO、Na_2O、Sr、Zr 表现为低值,反之亦然。

表 4 列出江滩样品主量元素的含量及平均值。SiO_2 含量为 62.30%~66.55%,Al_2O_3 含量为 9.87%~12.54%,Fe_2O_3 含量为 4.44%~5.42%,MgO 含量为 2.34%~2.40%,CaO 含量为 4.35%~5.35%,Na_2O 含量为 1.13%~1.47%。

表 3 SK10 钻孔样品部分地球化学元素含量

Table 3 Contents of major and trace elements in SK10 sediments

样品编号	深度(m)	元素	含量范围	平均值
SK10-DH-1~83	6.50~14.40	SiO_2	48.35%~59.84%	55.85%
		Al_2O_3	11.51%~18.60%	15.85%
		Fe_2O_3	4.78%~12.03%	8.06%
		MgO	1.75%~4.33%	2.12%
		CaO	0.85%~8.85%	2.09%
		Na_2O	0.56%~1.51%	0.86%
		Rb	37.50~70.34	60.72
		Sr	10.65~29.53	15.78
		Zr	37.86~69.53	47.62

注:Rb、Sr、Zr 为标准化 CL 球粒陨石结果。

4 讨论

4.1 粒度指标对古洪水频发期的指示

粒度作为识别古洪水的指标已为许多学者所采用,根据平均粒径、中值粒径等参数突变可以反映出水动力的变化,进而识别出古洪水沉积(赵景波等,2009,2017;魏海燕等,2010)。Toonen 等(2015)和 Wilhelm 等(2013)更关注粗粒部分,提出选取粒径>0.63 mm 的砂含量(MS)、占 95%的成分(P95)或最粗粒度组分(Q90)的高值作为古洪水频发期的识别标志;还有学者针对湖泊沉积物多为黏土的特征,提出用(粗粉砂+砂)/黏土的高值(吴霜等,2017)或黏土、黏土/粉砂、砂的综合对比(Mao Peini et al.,2016)进行古洪水频发期的识别。

根据本研究的结果,钻孔所代表的湖相沉积物的粒度(图 2)明显较江滩所代表的洪水沉积物的粒度(表 1)细,表明钻孔中的粗粒沉积层应该是来自长江洪水的物质,即洪水期长江越过天然堤沉积在湖泊中的。因此,钻孔湖相沉积环境中的粗粒层可指示为洪水事件。本文选取 P95、平均粒径、砂含量 MS、黏土/粉砂、(粉砂+砂)/黏土作为粒度方面的古洪水沉积识别标志,这些指标反映粗颗粒组分增

表 4 江滩样品主要常量元素含量

Table 4 Contents of major elements in sediments of the Yangtze River

样品编号	深度(cm)	SiO_2(%)	Al_2O_3(%)	Fe_2O_3(%)	MgO(%)	CaO(%)	Na_2O(%)
JT1-DH-1	0~5.0	66.55	9.87	4.44	2.38	5.35	1.47
JT1-DH-3	5.0~15.0	62.30	12.54	5.42	2.40	4.36	1.13
JT2-DH-1	0~4.0	64.39	11.55	5.03	2.34	4.46	1.44
JT2-DH-2	4.0~9.0	64.23	11.26	5.00	2.39	4.73	1.28
平均值		64.37	11.31	4.97	2.38	4.73	1.33

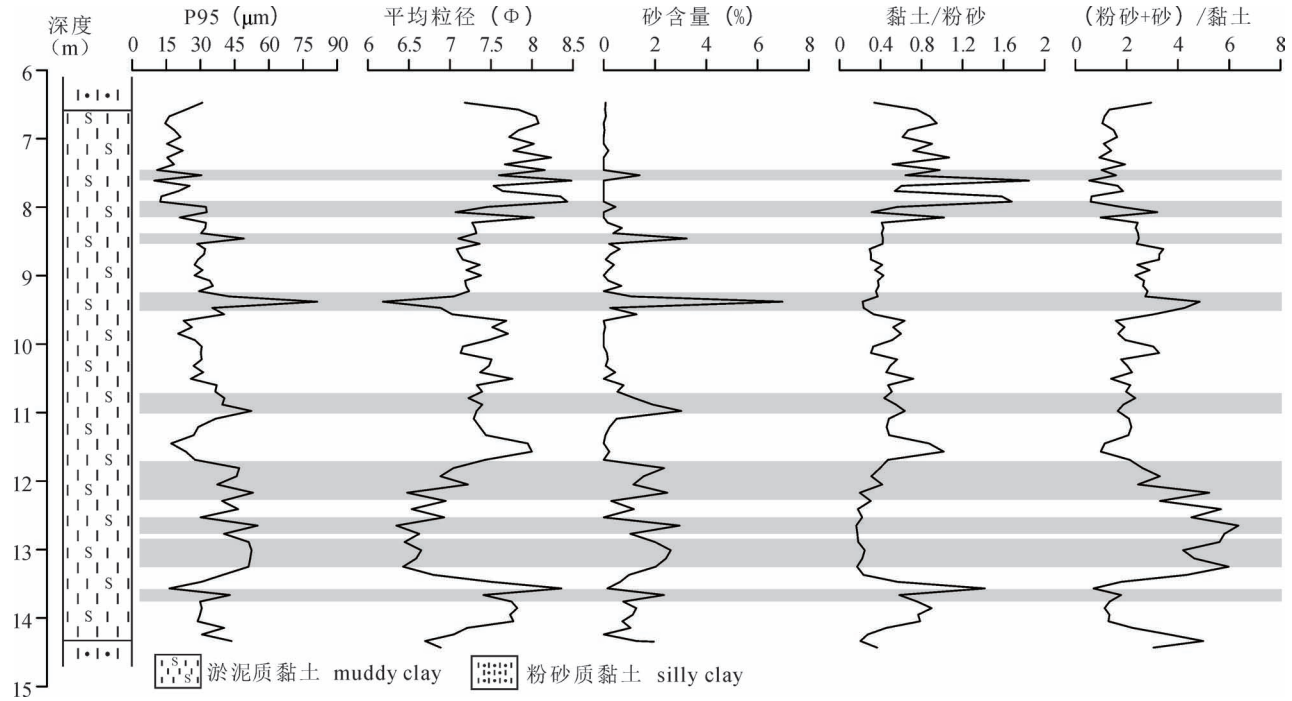


图 4 SK10 钻孔古洪水粒度识别标志随深度变化曲线

Fig.4 Paleoflood grain size identification indicators curves with depth of SK10

加的阶段基本一致,可识别出 5000a 以来的洪水沉积层(图 4 灰色部分)。

需要说明的是,一般的单次洪水在堤后湖泊中的沉积厚度通常较薄(不足厘米级),难以分辨出来,故图 4 所识别的古洪水代表并不是一次洪水事件,而是短时间间隔的多次洪水事件的组合,即代表洪水频发期。

4.2　地球化学指标对古洪水频发期的指示

4.2.1　古洪水频发期常量元素指标选取与识别

基于长江洪水沉积物与湖泊沉积物在地球化学组成方面的区别,SK10 孔沉积物可以选用地球化学指标对古洪水沉积进行识别。通过前人(董金秀等,2010)对武汉地区的主要湖泊(东湖和梁子湖)沉积物与长江洪水期形成的现代河漫滩、一级阶地河漫滩相(古河漫滩)沉积物常量元素组成的比较(表 5),发现长江洪水沉积物 Al_2O_3、Fe_2O_3明显低于湖泊沉积物,而前者 Na_2O、MgO、CaO 又明显高于后者。因此,钻孔中出现低 Al_2O_3、Fe_2O_3 含量,高 Na_2O、MgO、CaO 含量应代表洪水期洪水漫过河漫滩在堤后湖泊中的沉积,可作为洪水沉积标志。据此,本文选取了 Al_2O_3、Fe_2O_3、Na_2O 作为古洪水频发期常量元素指标,在 SK10 孔的 5.0 ka 以来的沉积中划分出 10 个洪水频发期(图 5 灰色部分),并与粒度指示基本一致。

4.2.2　古洪水频发期微量元素指标选取与识别

由于元素自身稳定性不同,被吸附的能力也不同,Rb 离子半径大(0.147 nm),易被黏土矿物吸附保留在原地;Sr 离子半径较小(0.113 nm),主要以游离态形式被洪水带走(朱诚等,2005;Mao Peini et al.,2016;Wu Li et al.,2017)。此外,在风化搬运过程中,Zr 相对富集于粗颗粒中,Rb 相对富集于细颗粒中(王敏杰等,2010)。

朱诚等(2005)对三峡地区的研究表明长江古洪水和现代洪水沉积均具有较高 Rb/Sr 值。但不同于三峡地区,当洪水进入湖后盆地,Rb 离子会

表 5 长江沿岸湖泊沉积物与长江洪水沉积物主要常量元素含量

Table 5 Major elements contents of lacustrine sediments along the Yangtze River and flood sediments in the Yangtze River

研究对象	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	MgO (%)	CaO (%)	Na_2O (%)	引文出处
梁子湖	70.85	12.32	5.40	0.74	0.47	0.40	董金秀等,2010
东湖	68.20	13.11	5.52	1.25	0.50	0.86	董金秀等,2010
长江一级阶地		14.25	6.36	2.52	3.67	1.06	马振东等,2005
现代长江沉积物	64.37	11.31	4.97	2.38	4.73	1.33	本研究

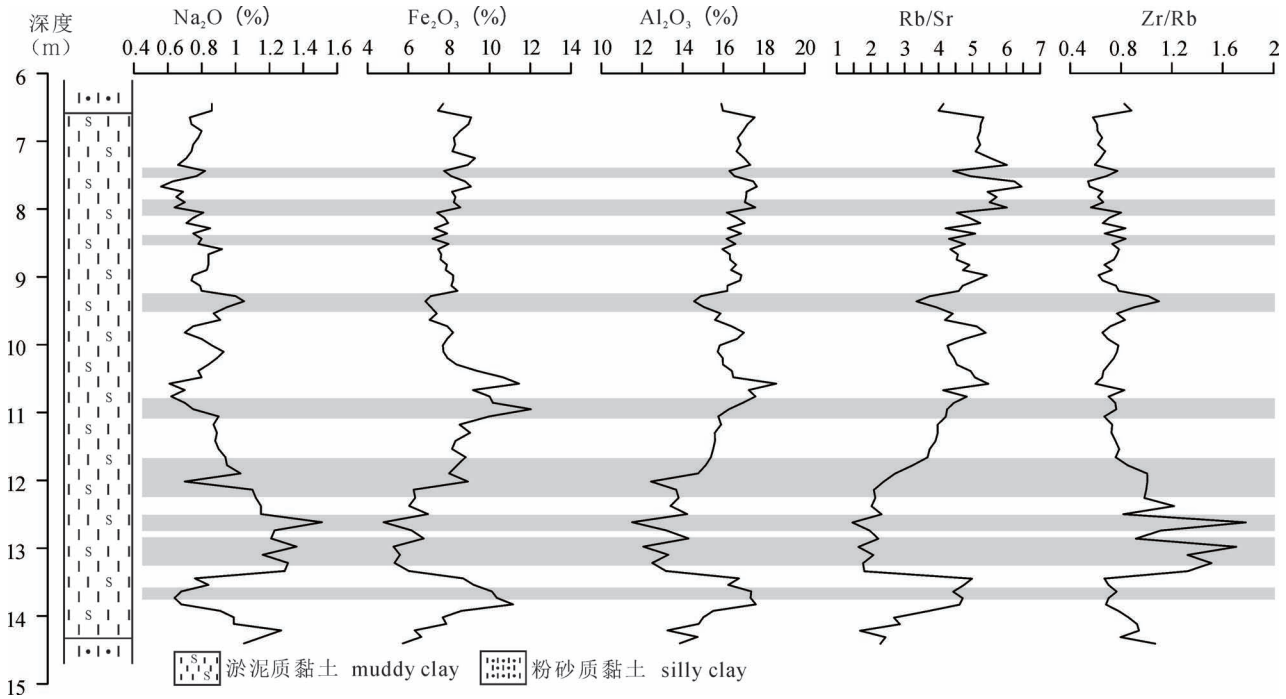


图 5 SK10 钻孔古洪水地球化学识别标志随深度变化曲线

Fig.5 Paleoflood geochemical identification indicators curves with depth of SK10

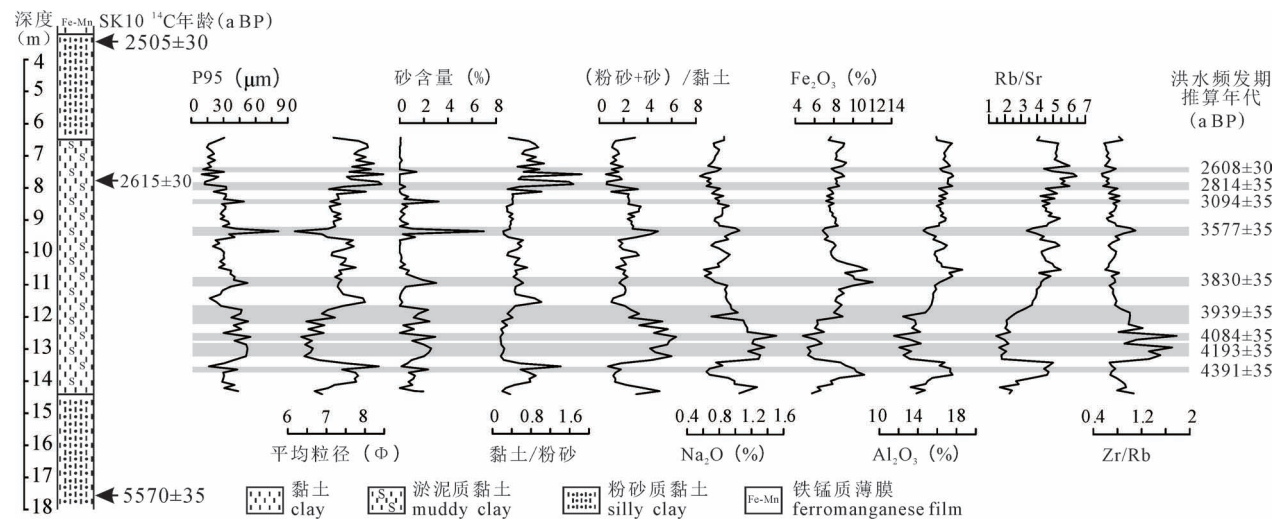


图 6 SK10 钻孔各洪水频发期的推算年代

Fig.6 Reckoning age of paleoflood frequent occurrence periods of SK10

被黏土矿物吸附随之沉积在河漫滩或天然堤上,而 Sr 离子被洪水带入湖泊中沉积,因此在堤后湖泊中 Rb/Sr 的低值可作为洪水沉积标志。洪水发生时,长江径流量迅猛增加,输沙量增大,赋存于粗粒矿物的 Zr 随洪水进入堤后湖泊,所以 Zr/Rb 可以反映粗、细颗粒相对含量的变化,Zr/Rb 的高值可作为堤后湖泊的洪水沉积标志。根据钻孔中的元素变化,Zr/Rb 达到峰值,Rb/Sr 达到谷值,可划分出 5.0 ka 以来的洪水沉积层(图 5 灰色部分)。

4.3 古洪水频发期年代推算与历史文献对比

由粒度和地球化学指标从 SK10 钻孔湖相沉积中识别出 9 次古洪水沉积层(图 6 灰色部分),根据^{14}C 测年结果,通过沉积速率计算出这些短间隔、多次洪水事件组合的发生年代,即古洪水频发期,分

别为 2608±30 a BP、2814±35 a BP、3094±35 a BP、3577±35 a BP、3830±35 a BP、3939±35 a BP、4084±35 a BP、4193±35 a BP、4391±35 a BP。

前人对长江流域古洪水频发期的研究成果丰硕,朱诚等(1997)对全新世以来长江三峡及江汉平原地区新石器文化遗址的研究划分出四个洪水频发期,本文的研究年代属于其中第Ⅱ洪水期(4.7~3.5 ka BP),至少发生 9 次特大洪水。埋藏古树的研究表明 4290~4085 a BP、4200~3900 a BP 及 3730 a BP 前后在长江中下游发生过大范围极端洪水(朱诚等,2014)。葛兆帅等(2004,2009)研究了宜昌站 7810~1998 a A.D.的特大洪水,其中记录了 4518±373 a BP、3983±483 a BP、2581±220 a BP 等多期古洪水。吴立(2013)对江汉平原及周边地区考古遗址的研究表明,屈家岭文化中晚期(4.9~4.6 ka BP)和石家河文化末期至夏代(4.1~3.8 ka BP)两次特大洪水事件在长江中游江汉平原地区非常普遍。张玉芬等(2009)基于磁组构对江陵剖面的研究,识别出(4600~2537)±160 a BP 十期古洪水沉积。张强等(2003)通过对 6.0 ka 以来长江下游地区的古洪水研究发现,泥炭与埋藏古树相对集中形成期分别大致在 5.0~4.5 ka BP、3.3~3.1 ka BP 等多个时期,对应着洪水的频发期以及高海面的时期。故本文推算出长江武汉段 4.5~2.5 ka BP 的古洪水频发期与长江流域全新世古洪水的研究基本一致,3.3~3.1 ka BP 可能是长江中游至下游的洪水频发期。

5　结论

本文基于钻孔沉积物和长江洪水沉积物粒度及地球化学元素的测试及分析,建立了武汉地区堤后湖泊的古洪水识别标志,并初步确定了 4.5~2.5 ka BP 的洪水频发期。

(1)粒度标志:根据测试结果,一般情况(平水期)堤后湖泊的沉积物粒度较细,粒径一般大于 7.36ϕ,即小于 0.0061 mm。洪水期的碎屑物主要为漫过天然堤的沉积物,粒度较粗,粒径一般小于 5.60ϕ,即大于 0.0205 mm。因古洪水沉积的研究更关注钻孔沉积中的粗颗粒组分,故选取 P95、砂含量、平均粒径、黏土/粉砂、(粗粉砂+砂)/黏土等粒度指标作为武汉地区的古洪水沉积标志。

(2)地化元素标志:分析认为,相比堤后湖泊,长江洪水沉积物具有低 Al_2O_3、Fe_2O_3,高 Na_2O 的特点。因此,钻孔中的地化含量出现 Al_2O_3、Fe_2O_3 突降,Na_2O 突增的沉积层可视为洪水发生时期。根据元素自身性质,Rb/Sr 的谷值、Zr/Rb 的峰值也可作为武汉地区的古洪水沉积标志。

(3)基于所确立的洪水沉积标志,可以识别出武汉地区堤后湖泊中短间隔的多次洪水事件的沉积。在 SK10 孔沉积物中共识别出 9 个洪水沉积层,根据 ^{14}C 测年结果,经与前人研究的比对,初步认为 2608±30 a BP、2814±35 a BP、3094±35 a BP、3577±35 a BP、3830±35 a BP、3939±35 a BP、4084±35 a BP、4193±35 a BP、4391±35 a BP 前后为洪水频发期。SK10 孔只有三个确切年代,古洪水期的发生时间是根据年龄内插和外推获得的,其准确发生时间有待今后研究的进一步确认。

值得说明的是,本文是对长江武汉段的古洪水的首次研究,尽管所选择的 SK10 孔具有一定的代表性,但毕竟是一孔之见,有待未来更多资料研究的证实。感谢赵举兴、常国瑞、郁军、魏传义、杨明明、张岱、张华松等在野外调查、岩芯编录和样品分析中的参与及帮助。

参　考　文　献　/　References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

陈中原, 洪雪晴, 李山, 王露, 史晓明. 1997. 太湖地区环境考古. 地理学报, 52(2): 131~137.

董金秀, 乔胜英, 谢淑云. 2010. 梁子湖表层沉积物元素分布模式及地球化学意义. 地质科技情报, 29(3): 91~96.

葛兆帅. 2009. 长江上游全新世特大洪水对西南季风变化的响应. 地理研究, 28(3): 592~600.

葛兆帅, 杨达源, 李徐生, 任朝霞. 2004. 晚更新世晚期以来的长江上游古洪水记录. 第四纪研究, 24(5): 555~560.

何报寅. 2002. 江汉平原湖泊的成因类型及其特征. 华中师范大学学报(自科版), 36(2): 241~244.

马振东, 张德存, 闭向阳, 刘光强, 任利民, 全浩理. 2005. 武汉沿长江、汉江 Cd 高值带成因初探. 地质通报, 24(8): 740~743.

王恒松, 黄春长, 周亚利, 熊康宁. 2014. 汉江上游全新世特大古洪水事件光释光测年研究. 沉积学报, 32(6), 1100~1112.

王敏杰, 郑洪波, 谢昕, 范代读, 杨守业, 赵泉鸿, 王可. 2010. 长江流域 600 年来古洪水: 水下三角洲沉积与历史记录对比. 科学通报, 55(34): 3320~3327.

魏海燕, 黄春长, 查小春, 庞奖励, 王夏青. 2010. 黄河中游晋陕峡谷段全新世晚期洪水滞流沉积研究. 地质论评, 56(5), 745~752.

吴立. 2013. 江汉平原中全新世古洪水事件环境考古研究. 导师: 朱诚. 南京大学.

吴霜, 刘倩, 曹向明, 赖忠平, 陈远辉, 贾玉连. 2017. 赣北黄茅潭湖泊沉积记录的 240 年以来古洪水事件. 地理科学进展, 36(11): 1413~1422.

谢纪海, 张玉芬. 2016. 武汉泛后湖地区第四纪沉积环境与古气候研究. 城市勘测, (5): 155~162.

谢远云, 李长安, 王秋良, 殷鸿福. 2007. 江汉平原近 3000 年来古洪水事件的沉积记录. 地理科学, 27(1): 81~84.

杨玉荣, 王辉. 1997. 三峡工程坝址河段古洪水研究. 人民长江, 28(3): 20~22.

查小春, 黄春长, 庞奖励, 周亚利. 2012. 汉江上游郧西段全新世古洪水事件研究. 地理学报, 67(5): 671~680.

张强, 姜彤, 施雅风, 苏布达. 2003. 6000aBP 以来长江下游地区古洪水与气候变化关系初步研究. 冰川冻土, 25(4): 368~374.

张强, 杨达源, 施雅风, 葛兆帅, 姜彤. 2004. 川江中坝遗址 5000 年来洪水事件研究. 地理科学, 24(6): 715~720.

张玉芬, 李长安, 陈亮, 王辉. 2009. 基于磁组构特征的江汉平原全新世古洪水事件. 地球科学——中国地质大学学报, 34(6): 985~992.

赵景波, 郁耀闯, 周旗. 2009. 渭河渭南段高漫滩沉积记录的洪水研究. 地质论评, 55(2): 231~241.

赵景波, 温震军, 马延东, 黄小刚, 宋友桂. 2017. 西安北郊草店村河漫滩沉积与洪水变化. 地质论评, 63(2): 326~336.

周亮, 黄春长, 周亚利, 庞奖励, 查小春, 毛佩妮, 张玉柱. 2014. 汉江上游郧西郧县段古洪水事件光释光测年及其对气候变化的响应. 地理研究, 33(6): 1178~1192.

朱诚, 于世永, 卢春成. 1997a. 长江三峡及江汉平原地区全新世环境考古与异常洪涝灾害研究. 地理学报, 52(3): 268~278.

朱诚, 于世永, 史威, 戴东升, 赵宁曦. 1997b. 南京江北地区全新世沉积与古洪水研究. 地理研究, 16(4): 23~30.

朱诚, 郑朝贵, 马春梅, 孙智彬, 朱光耀, 王慧麟, 高华中, 王朋岭, 黄润. 2005. 长江三峡库区中坝遗址地层古洪水沉积判别研究. 科学通报, 50(20): 2240~2250.

朱诚, 马春梅, 王慧麟, 白九江, 徐伟峰, 郑朝贵, 史威, 朱光耀, 陈晔, 卢雪峰. 2008. 长江三峡库区玉溪遗址 T0403 探方古洪水沉积特征研究. 科学通报, 53(S1): 1~16.

朱诚, 吴立, 李兰, 郑朝贵, 李中轩, 马春梅, 谭艳, 赵泉鸿, 王坤华, 林留根, 江章华, 丁金龙, 孟华平. 2014. 长江流域全新世环境考古研究进展. 地理学报, 69(9): 1268~1283.

Chen Zhongyuan, Hong Xueqing, Li Shan, Wang Lu, Shi Xiaoming. 1997&. Study of archaeology-related environment evolution of Taihu Lake in southern Chang Jiang Delta Plain. Acta Geographica Sinica, 52(2): 131~137.

Dong Jinxiu, Qiao Shengying, Xie Shuyun. 2010&. Distribution model and geochemical characteristics of the elements in the surface sediments of Liangzi Lake. Geological Science and Technology Info rmation, 29(3): 91~96.

Ge Zhaoshuai. 2009&. The response of Holocene extreme floods in the Upper Changjiang River to changes of southwest monsoon. Geograghical Research, 28(3): 592~600.

Ge Zhaoshuai, Yang Dayuan, Li Xusheng, Ren Zhaoxia. 2004&. The paleoflooding record along the Up-reaches of the Changjiang River since the Late Pleistocene Epoch. Quaternary Sciences, 24(5): 555~560.

He Baoyin. 2002&. The origin types and their characteristics of the lakes in Jianghan Plain. Journal of Central China Normal University(Nat. Sci.), 36(2): 241~244.

Ma Zhendong, Zhang Decun, Bi Xiangyang, Liu Guangqiang, Ren Limin, Quan Haoli. 2005&. Origin of cadmium high-value zones along the Yangtze River and Hanjiang River in Wuhan, Hubei, China. Geological Bulletin of China, 24(8): 740~743.

Mao Peini, Pang Jiangli, Huang Chunchang, Zha Xiaochun, Zhou Yali, Guo Yongqiang, Zhou Liang. 2016. A multi-index analysis of the extraordinary paleoflood events recorded by slackwater deposits in the Yunxi Reach of the upper Hanjiang River, China. Catena, 145: 1~14.

Toonen W H J, Winkels T G, Cohen K M, Prinsc H M, Middelkoop A. 2015. Lower Rhine historical flood magnitudes of the last 450 years reproduced from grain-size measurements of flood deposits using End Member Modelling. Catena, 130(Sp. Iss. SI): 69~81.

Wang Hengsong, Huang Chunchang, Zhou Yali, Xiong Kangning. 2014&. OSL dating and climatic change record of the Holocene paleoflood events in the Upper Reaches of Hanjiang River, China. Acta Sedimentologica Sinica, 32(6), 1100~1112.

Wang Minjiie, Zheng Hongbo, Xie Xin, Fan Daidu, Yang Shouye, Zhao Quanhong, Wang Ke. 2010#. Paleofloods in the Yangtze River Basin in the past 2000 years: comparison between underwater delta deposits and historical records. Chinese Science Bulletin, 55(34): 3320~3327.

Wei Haiyan, Huang Chunchang, Zha Xiaochun, Pang Jiangli, Wang Xiaqing. 2010&. Sedimentary studies of the Late Holocene food slackwater deposits in the Shanxi—Shaanxi Gorges, Middle Reach of the Yellow River. Geological Review, 56(5): 745~752

Wilhelm B, Arnaud F, Sabatier P, Magand O, Chapron E, Courp T, Tachikawa K, Fanget B, Malet E, Pignol C, Bard E, Delannoy J J. 2013. Palaeoflood activity and climate change over the last 1400 years recorded by lake sediments in the north-west European Alps. Journal of Quaternary Science, 28(2): 189~199.

Wu Li. 2013&. Environmental archaeology of the Mid-Holocene palaeofloods in the Jianghan Plain, Central China. Tutor: Zhu Cheng. Nanjing University.

Wu Li, Zhu Cheng, Ma Chunmei, Li Feng, Meng Huaping, Liu Hui, Li Linying, Wang Xiaocui, Sun Wei, Song Yougui. 2017. Mid ~ Holocene palaeoflood events recorded at the Zhongqiao Neolithic cultural site in the Jianghan Plain, middle Yangtze River Valley, China. Quaternary Science Reviews, 173: 145~160.

Wu Shuang, Liu Qian, Cao Xiangming, Lai Zhongping, Chen Yuanhui, Jia Yulian. 2017&. A 240-year sedimentary record of paleoflood events from the Huangmaotan Lake, northern Jiangxi Province. Progress in Geography, 36(11): 1413~1422.

Xie Jihai, Zhang Yufen. 2016&. Reconstruction of Quaternary palaeo-sedimentary environment and paleo-climate in extensive Houhu Region in Wuhan. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, (5): 155~162.

Xie Yuanyun, Li Changan, Wang Qiuliang, Yin Hongfu. 2007&. Sedimentary records of paleoflood events during the last 3000 years in Jianghan Plain. Scientia Geographica Sinica, 27(1): 81~84.

Yang Yurong, Wang Hui. 1997#. Study on paleoflood at damsite section of Three Gorges Project. Yangtze River, 28(3): 20~22.

Zha Xiaochun, Huang Chunchang, Pang Jiangli, Zhou Yali. 2012&. The Holocene palaeoflood events in the Yunxi Reach in the upper reaches of Hanjiang River. Acta Geographica Sinica, 67(5): 671~680.

Zha Xiaochun, Huang Chunchang, Pang Jiangli, Zhou Yali. 2014. Reconstructing the extraordinary palaeoflood events during 3200 ~ 2800 a BP in the upper reaches of Hanjiang River Valley, China. Journal of Geographical Sciences, 24(3): 446~456.

Zhang Qiang, Jiang Tong, Shi Yafeng, Su Buda. 2003&. Relationship between climate changes and the flood occurrences since 6000 a BP in the Yangtze River Delta. Journal of Glaciology and Geocryology, 25(4): 368~374.

Zhang Qiang, Yang Dayuan, Shi Yafeng, Ge Zhaoshuai, Jiang Tong. 2004&. Flood events since 5000 a B. P. recorded in aatural sediments of Zhongba Site, Chuanjiang River. Scientia Geographica Sinica, 24(6): 715~720.

Zhang Yufen, Li Changan, Chen Liang, Wang Hui. 2009&. Magnetic fabric of Holocene palaeo-floods events in Jianghan Plain. Earth

Science——Journal of China University of Geosciences, 34(6): 985~992.

Zhao Jingbo, Yu Yaochuang, Zhou Qi. 2009&. A study on great floods recorded by sediments on the high alluvial flat of Weihe River in Weinan, Shaanxi. Geological Review, 55(2): 231~241.

Zhao Jingbo, Wen Zhenjun, Ma Yandong, Huang Xiaogang, Song Yougui. 2017&. The sediment on floodplain and flood changes at Caodian village in the northern suburb of Xi'an. Geological Review, 63(2): 326~336.

Zhou Liang, Huang Chunchang, Zhou Yali, Pang Jiangli, Zha Xiaochun, Mao Peini, Zhang Yuzhu. 2014&. Palaeoflood OSL chronology and its response to climate change in the Yunxi—Yunxian reach in the Upper Hanjiang River valley. Geographical Research, 33(6), 1178~1192.

Zhu Cheng, Yu Shiyong, Lu Chuncheng. 1997a&. The study of Holocene environmental archaeology and extreme flood disaster in the Three Gorges of the Changjiang River and the Jianghan Plain. Acta Geographica Sinica, 52(3): 268~278.

Zhu Cheng, Yu Shiyong, Shi Wei, Dai Dongsheng, Zhao Ningxi. 1997b&. The study of Holocene environmental archaeology and extreme flood disaster in the Three Gorges of the Changjiang River and the Jianghan Plain. Geographical Research, 16(4): 23~30.

Zhu Cheng, Zheng Chaogui, Ma Chunmei, Sun Zhibin, Zhu Guangyao, Wang Huilin, Gao Huazhong, Wang Pengling, Huangrui. 2005#. Discrimination of paleoflood deposition at Zhongba Site in the Three Gorges Reservoir Area, the Yangtze River. Chinese Science Bulletin, 50(20): 2240~2250.

Zhu Cheng, Ma Chunmei, Wang Huilin, Bai Jiujiang, Xu Weifeng, Zheng Chaogui, Shi Wei, Zhu Guangyao, Chen Ye, Lu Xuefeng. 2008#. Study on sedimentary characteristics of paleoflood at Yuxi Site excavation unit T0403 in the Three Gorges Reservoir Area, the Yangtze River. Chinese Science Bulletin, 53(S1): 1~16.

Zhu Cheng, Wu Li, Li Lan, Zheng Chaogui, Li Zhongxuan, Ma Chunmei, Tan Yan, Zhao Quanhong, Wang Kunhua, Lin Liugen, Jiang Zhanghua, Ding Jinlong, Meng Huaping. 2014&. Research progress on Holocene environmental archaeology in the Yangtze River Valley, China. Acta Geographica Sinica, 69(9): 1268~1283.

Sedimentary strata and paleoflood identification indexes of Wuhan section, Yangtze River, during 4.5~2.5 ka BP

ZHANG Luoying[1)], LI Chang'an[1)], ZHANG Yufen[2)], SONG Zhe[1)]

1) School of Earth Science, China University of Geosciences, Wuhan, 430074;

2) Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan, 430074

Objectives: Frequent floods have occurred in the middle reaches of the Yangtze River in recent years, and the Wuhan Section is also the focus of flood protection in this area. Thus, it is of great significance to carry out the study on the paleoflood of the Yangtze River in Wuhan area so as to prolong the record of the paleoflood and forecast the flood.

Methods: In this paper, the borehole SK10 of sink river valley lake in Wuhan area is selected as the research object. The stratigraphic age is determined by using AMS ^{14}C dating technique. Through the determination and analysis of grain size and geochemical elements, a set of identification indexes for the paleoflood frequent occurrence period in Wuhan Section of the Yangtze River is established to study the paleoflood period in this section during 4.5~2.5 ka BP

Results: Research shows: ①Based on the distribution relationship between the Houhu Lake and the Yangtze River, grain size indexes (P95, sand content, average grain size, clay/silt, (coarse silt + sand)/clay) and geochemical indexes (Na_2O, Al_2O_3, Fe_2O_3, Zr/Rb, Rb/Sr) were selected as the identification indices for the paleoflood frequent occurrence in the borehole sediments, which have better indication for the paleoflood frequent occurrence period in Wuhan area. ②Frequent occurrence of paleofloods identified by indicators are about 2608±30 a BP, 2814±35 a BP, 3094±35 a BP, 3577±35 a BP, 3830±35 a BP, 3939±35 a BP, 4084±35 a BP, 4193±35 a BP, 4391±35 a BP, which are basically consistent with the records of several floods during 4.5~2.5 ka BP in the literature.

Conclusions: The method of multi-indexes analysis has been successfully applied to Wuhan Area for paleoflood sediments identification, providing some new evidences for paleoflood frequent period in Wuhan Section of the Yangtze River.

Keywords: Wuhan area; paleoflood frequent period; identification index; grain size; geochemistry

Acknowledgements: This study was financially supported by Natural Science Foundation of China (Nos.

41672355 and 41871019) and Demonstration Project of Multi-factor Urban Geological Survey of Wuhan (Nos. WHDYS-2018-007 and DD20160250-6)

First author: ZHANG Luoying, female, born in 1994, master of Quaternary geology in reading, mainly engaged in Quaternary geology and environment, Email: Zhang_Luoying@126.com

Corresponding author: ZHANG Yufen, female, born in 1957, Professor, mainly engaged in environmental geology and environmental geophysics, Email: zhyfcug@163.com; LI Changan, male, born in 1956, Professor, mainly engaged in Quaternary geology and environment of basin, Email: 1002858465@qq.com

Manuscript received on: 2019-01-23; Accepted on: 2019-06-13; Edited by: LIU Zhiqiang

Doi: 10.16509/j.georeview.2019.04.013

评《低海拔冰川遗迹典型图谱》一书

钱方

中国地质科学院地质力学研究所, 北京, 100081

为纪念李四光开创中国第四纪古冰川研究百年而出版的《低海拔冰川遗迹典型图谱》(赵松龄、徐兴永著,2019,北京:海洋出版社,242 页)是值得一读的好书。书中追忆了李四光先生从 1913 年 1 月至 1918 年 6 月在英国伯明翰大学学习经历。冰期时期欧洲和亚洲共有的斯堪迪纳维亚冰原的前缘曾到达伦敦。那时的伯明翰处于大冰原的覆盖区,大冰原消退后,留下广为分布的冰川遗迹。李四光先生在遍布冰川遗迹的环境中学习生活了 6 年,为回国后在山西、庐山等地发现古冰川遗迹,并进行翔实研究奠定了基础。

赵松龄研究员、徐兴永研究员依据北半球最强的两大洋流系统——湾流和黑潮对北半球大冰原的形成与发育,进行了系统的分析与研究;对北冰洋冰盆的形成及其对周边环境的影响做了分析;该书对冰盆的两大缺口,通过缺口流向低纬度的寒潮路径,以及它们对不同海域和地域的影响都进行了分析与讨论;该书明确提出,冰期时期位于亚洲北部或者说是东北部向低纬度扩散的寒流,影响的是中国东部低海拔地区;而位于北美洲东北部向低纬度扩散的寒流,影响的是北大西洋地区;这一创新性的理论分析,对于认识中国东部为何存在低海拔冰川遗迹非常重要。

该书分析在这样的环境背景下,中国的雪线高度主要受两种不同机制控制,其一为自然梯度型(如:青藏高原地区);其二为异地入侵型(如:中国东部低山丘陵区)。冰期时期所形成的寒冷气候、特别是频繁的寒潮活动,从亚洲东北部把高纬度的低温气流扩散到低纬度地区,是决定我国东部低山丘陵区雪线高度的关键因素,常年稳定持续的寒潮活动,既带来稳定的低温环境,也带来了低雪线。两地的环境背景不同,控制雪线高低的因子相异,简单地把青藏高原地区的雪线高度延伸到东部低山丘陵区,听起来有"道理",深入分析还是有问题,误导了许多人。

该书还特别提出,近百年来经过几代人的共同努力,已经发现,中国东部低海拔地区所保存的第四纪冰川遗迹,涉及到多种地貌类型。冰川侵蚀地貌包括角峰、刃脊、"U"型谷、粒雪盆、古冰坎、羊背石、拖动地貌、推动地貌、磨光面、颤痕与擦痕、古雪线地貌标志等;古冰川类型有小冰原冰川、山谷冰川、山麓冰川、冰斗冰川、悬冰川以及复式冰川等。冰川堆积地貌有古冰川舌堆积、侧碛、中碛、终碛、漂砾、漂砾群、挤压型漂砾群、飞来石、石摞石、劈石、冰碛剖面、冰川纹泥、古冰川湖沉积、冰下融水喀斯特地貌等。冰消期地貌有与旋转流有关的冰臼(指带有旋转锥的冰臼)、双圆相切型冰臼、带有旋转锥的半冰臼、不带旋转锥的半冰臼、带有旋转球的冰臼,还有孤立的旋转球和旋转柱;与非旋转流有关的地貌类型包括多种类型的冰椅石、冲蚀型磨光面、象形石等。该书提出:中国东部低海拔型冰川遗迹地貌群的发现,再次证明李四光先生的研究是科学、正确、合理的、完全符合中国的实际情况;那种把李四光先生在庐山发现的多冰期形成的冰碛物说成是"对泥石流的误导",并以此为推理依据,否定其它地区冰川遗迹的发现, 是错误的。现在看来,在众多古冰川遗迹群被发现以后,那种错误推理即显得空虚而脱离实际;再用缺乏科学依据的所谓"负球状风化"说,来否定以旋转水流为动力的冰臼、半冰臼的形成,也是不被众人所接受。

该书还首次提出,长江古湖的决堤与现代长江三角洲的形成,两者是密不可分的关系。冰期时期不断堆积的下蜀黄土,成为长江冰湖的天然大坝,它在不断加高的过程中,阻挡了湖水的外流。冰期时期的长江古湖湖口为湖口冰川所占据。该书所开展中国东部低海拔古冰川遗迹的研究,使李四光先生开创的事业得以发扬光大,这是对李四光先生最好的纪念。

总之,该书为多年来罕见的一本冰川地貌书,内容丰富、论点明确、分析合理、说理透彻,结论可靠。

该书不足之处在于,对 20 世纪 30 年代许多外国学者不同意李四光先生研究成果的原因缺乏深入分析。

QIAN Fang: A review on the book *The Typical Atlas of Glacial Remains in Low-altitude Area*

DOI: 10.16509/**j.georeview.**2019.04.021