

引用格式: 李中轩, 朱诚, 袁胜元, 焦士兴. 玉溪遗址多期古洪水的气候背景与周期性[J]. 山地学报, 2024, 42(1): 37-46.

LI Zhongxuan, ZHU Cheng, YUAN Shengyuan, JIAO Shixing. Periodicity of multi-period paleofloods and paleoclimatic context recorded by the layers at the Yuxi site, Southwestern China [J]. Mountain Research, 2024, 42(1): 37-46.

# 玉溪遗址多期古洪水的气候背景与周期性

李中轩<sup>1</sup>, 朱诚<sup>2\*</sup>, 袁胜元<sup>1</sup>, 焦士兴<sup>3</sup>

(1. 许昌学院 城市与环境学院, 河南 许昌 461000; 2. 南京大学 地理与海洋学院, 南京 210093;

3. 安阳师范学院 资源环境学院, 河南 安阳 455000)

**摘要:** 全新世时期形成的连续性古洪积层是追溯古环境信息的可靠记录。重庆市丰都县玉溪遗址存在多期连续的文化层与洪积层, 但已有研究并未系统分析该遗址区的古洪水发生机制及其气候背景, 并且缺乏基于多期古洪积层的周期性研究。(1) 本文基于动物骨屑 AMS<sup>14</sup>C 年代数据, 用 Bacon 程序拟合玉溪遗址剖面的沉积-年代关系, 判定玉溪剖面古洪积层形成时段为约 6.4 ka BP ~ 7.3 ka BP。(2) 古洪水沉积序列的粒度和端元分析结果显示, 玉溪古洪积层由细粉砂-粉砂组成, 表明古洪积层为溢岸憩流和滞水缓流堆积而成。(3) 孢粉组合、磁化率、Rb/Sr 和 Si/Al 比值等环境指标显示, 玉溪剖面的古洪水沉积经历了早期湿热、中期温干、晚期暖湿三个阶段, 其中古洪积层在温干阶段的沉积速率最大 ( $30 \text{ cm} \cdot (100\text{a})^{-1}$ ), 而且古洪水发生的频率亦高于湿热期。(4) 古洪水沉积序列的小波功率谱分布特征表明, 玉溪剖面的古洪水存在约 30 a 的短周期和约 350 a 的长周期; 其长周期与区域性气候冷事件相关、短周期与 ENSO 事件导致的夏季风异常有关。本文提出的搬运洪积物的三种动力类型、干湿期古洪水的沉积速率差异以及古洪水泛滥的长短周期, 对研究新石器早期重庆地区的人地关系和长江上游的洪水发生机制有参考意义。

**关键词:** 古洪水沉积; 环境变迁; 端元分析; 古洪水周期; 气候异常; 玉溪遗址

**中图分类号:** P534.63

**文献标志码:** A

全新世时期形成的连续性古洪积层是追溯古环境信息的可靠记录<sup>[1-3]</sup>。古洪积层的沉积动力、沉积组分、古气候变迁以及古洪水发生的周期等是环境考古研究的重要内容<sup>[4-5]</sup>。史前人类活动遗址的文化地层兼有古环境变迁和古文化演变的信息, 是第四纪环境学研究人地关系与环境变迁的重要载体<sup>[6-8]</sup>。

基于人类遗址地层去解译古洪水事件, 强调人对洪水事件的响应, 其主要关注点包括: 古洪水沉积特征的解译和洪水对史前文化发展的影响<sup>[9-10]</sup>; 古

洪水背景下史前社会的生业结构演变及其影响因素<sup>[11-13]</sup>。同时, 关于古洪水的一些关键问题的研究则有待深化: 一是遗址区的古洪水发生机制及其气候背景研究相对不足; 二是缺乏基于多期古洪积层探究遗址区古洪水事件的周期性研究。另外, 之前关于中全新世环境变迁的信息载体更多地依赖于高山泥炭<sup>[14]</sup>和洞穴石笋等的 C、O 同位素指标<sup>[15]</sup>, 其传递的古气候信息既有其介质形成过程(如化学-物理过程)的特殊性也有形成环境(如溶洞)的局限性<sup>[16]</sup>, 因而用古洪积层研究全新世环境变迁较之石

**收稿日期** (Received date): 2023-04-19; **改回日期** (Accepted date): 2024-01-16

**基金项目** (Foundation item): 国家自然科学基金重大研究计划(90411015); 许昌学院科研开发基金(2023ZX001)。[The Major Research Plan of National Natural Science Foundation of China (90411015); Research Program of Xuchang University (2023ZX001)]

**作者简介** (Biography): 李中轩(1971-), 男, 河南浚县人, 博士, 主要研究方向: 自然地理学。[LI Zhongxuan(1971-), male, born in Mianchi, Henan province, Ph.D., major in physical geography] E-mail: aysylzx@163.com

\* **通讯作者** (Corresponding author): 朱诚(1954-), 男, 安徽歙县人, 博士, 教授, 主要研究方向: 第四纪地质学。[ZHU Cheng(1954-), male, born in Shexian, Anhui province, Ph.D., professor, research on quaternary geology] E-mail: zhuchengnj@126.com

笋、泥炭等载体对古环境信息的记录更加直接。

重庆丰都县玉溪遗址是重庆地区新石器文化的发源地。已有文献对玉溪文化的古环境背景<sup>[17-19]</sup>、人类活动<sup>[20]</sup>以及生业类型<sup>[21]</sup>开展了多层面的研究,但对古洪水的周期性、沉积物的搬运动力、沉积速率与水热条件的耦合等方面的认识碎片化。本文利用动物骨屑遗存的 AMS<sup>14</sup>C 测年数据<sup>[17]</sup>和沉积-时间模型拟合的年代框架,对丰都县玉溪遗址的多期古洪积层序列进行解译,通过洪积物粒度、地层孢粉组合、质量磁化率、Si/Al、Rb/Sr 比值等指标探讨古洪积层的气候背景、沉积环境和洪水周期及其可能的影响因素,以期为新石器早期重庆地区的人地关系和长江上游的洪水发生机制研究提供参考。

## 1 玉溪剖面的地理环境

玉溪遗址位于重庆市丰都县高家镇西北、长江东岸的二级阶地面,面向长江、背靠玉溪河(图 1),总面积约 80 000 m<sup>2</sup>,高程区间为 153 ~ 175 m,中心坐标为 30°02'14"N、107°51'38"E。遗址所在区域为一系列近东西走向的河谷丘陵地貌,局部河谷存在较开阔的阶地但地形较为破碎。遗址附近土壤类型为水稻土,植被以马尾松、麻柳、青冈为主。本区属于亚热带季风气候,年均温 17.2 °C ~ 18.5 °C,降水集中于 7—9 月,年均降水量为 990 ~ 1210 mm。因

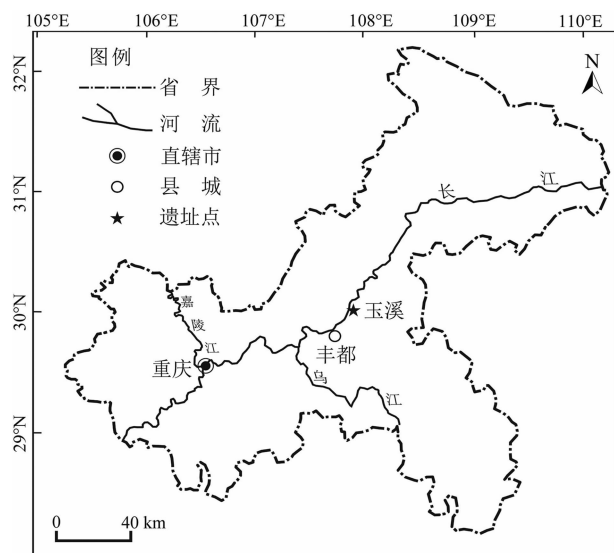


图 1 玉溪遗址位置图

Fig. 1 Location map of the Yuxi archaeological site in Chongqing, China  
(审图号:GS(2019)3333)

位于三峡库区淹没区,玉溪遗址于 2004 年 4 月由重庆市文物考古研究院实施保护性发掘。

本研究剖面是玉溪遗址 T0403 探方的西壁,开挖深度 671 cm;其中,第 4 ~ 30 层是无间断的连续沉积层。根据器物鉴定结论<sup>[22]</sup>,该遗址第 4 ~ 8 层属于玉溪文化晚期(上层),第 9 ~ 29 层属于玉溪文化早中期(下层)。从图 2a 可见,遗址剖面自第 9 层(232 cm)向下,文化堆积层(奇数层)与自然沉积层(偶数层)交错出现,文化层组分包括人类活动堆积物、细砾石以及少量陶片、未完全燃烧的炭屑、动物骨屑等。自然沉积层的组分较均一,主要是粉砂、细粉砂、粘土质粉砂等,质地紧密,各地层之间接触良好,未见有不整合面。由于本文仅探讨古洪积层特征及其古环境背景,因此仅取第 9 ~ 30 层(232 ~ 671 cm)作为研究对象。

## 2 材料与方法

在 T0403 探方的西壁用 1 m 长的采样槽(100 cm × 18 cm × 12 cm)依序采集获取完整的沉积层岩柱,样品采集后即刻用保鲜膜封装后带回实验室。根据不同的测试目标,用不同的长度间隔(1 ~ 5 cm)对地层柱进行分割取样。其中,获取磁化率测试样品 497 个,粒度测试样品 260 个,孢粉鉴定样品和元素测试样品各 48 个。

**粒度测量:**取室内风干的样品 0.7 g,用 HCl (10%) 和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (10%) 处理后,加入分散剂并振荡后用 Mastersizer-2000 粒度分析仪进行土壤粒度测定。

**磁化率测量:**取 10 g 风干后的样品在 AGICO KLY-3 旋转磁化率仪上测试完成。

**孢粉鉴别:**孢粉鉴别采用酸碱处理后、用重液(ZnI<sub>2</sub> 溶液)浮选法提取孢粉,制片后进行镜下鉴别。

**元素含量测定:**Rb、Sr 含量用研磨后的样品压片后用 X 射线荧光光谱仪(XRF)完成测试;沉积物样品的 Si、Al 含量测试,每个样品取研磨至 120 目的风干样品 0.65 g 经强酸处理后,用电感耦合等离子光谱仪(ICP-AES)进行测量。上述指标中除了元素含量在南京现代分析中心完成外,其他指标均在南京大学地理与海洋学院环境演变实验室完成。

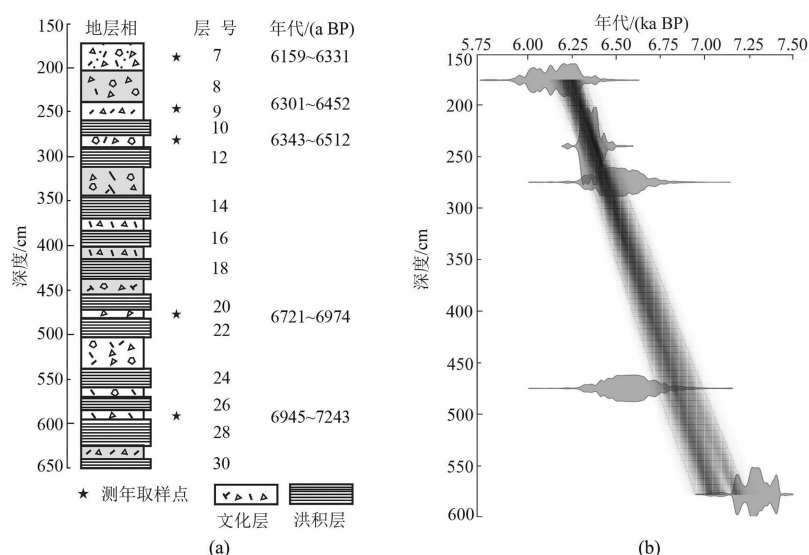


图2 玉溪剖面地层相与沉积-年代拟合示意图:

(a) 古洪积层(偶数层)与文化层(奇数层)的叠置关系;(b) 地层深度-年代关系拟合曲线

Fig. 2 Diagram of the layers and the depth-year curve for the Yuxi profile: (a) interrelationship between paleoflood layers (with even numbers) and cultural layers (with odd numbers); (b) the relationship of depth-year for the deposition in Yuxi profile

放射性碳测年:地层年代 AMS<sup>14</sup>C 测年数据<sup>[18]</sup> (第7、9、11、21、27层中动物骨屑中提取的骨胶原作为测年材料)由中科院西安地球环境研究所测年实验室测定。

地层沉积速率与年代拟合关系用 R-语言 Bacon 程序包<sup>[22]</sup>完成。

### 3 测试结果

#### 3.1 地层的时间框架

玉溪遗址剖面地层的时间序列框架基于5个动物骨屑的 AMS<sup>14</sup>C 测年数据<sup>[18]</sup>,同时参考了出土器物的文化定年结果。第9层测年数据为  $5567 \pm 40$  a BP<sup>[18]</sup> (校正年代:6350 ~ 6306 cal. a BP);第27层测年数据为  $6365 \pm 55$  a BP<sup>[18]</sup> (校正年代:7325 ~ 7249 cal. a BP)。鉴于本地层序列为无间断的连续沉积,根据年代-深度模型<sup>[22-23]</sup>拟合结果,标定玉溪剖面古洪水层的年代的发生区间约为6375 ~ 7294 cal. a BP (校正年代,下文均简称为 a BP,图2b)。

#### 3.2 洪积层形成期的风化阶段

某些元素的表生化学过程具有显著的差异性分馏现象,如 Rb 和 Sr<sup>[24]</sup>、Si 和 Al<sup>[3]</sup> 在地表淋溶过程中因其迁移活性的差别导致了明显的分馏特征:在

暖湿气候背景下, Sr<sup>2+</sup> 的迁移活性远高于 Rb<sup>+</sup>,而在干旱条件下二者的分馏性质差别较小。因而用地层中不同时期的 Rb/Sr 比值变化可以间接指示地层沉积过程的水热条件, Si、Al 的表生迁移过程与 Rb、Sr 类似。本文用 Rb/Sr 比值、Si/Al 比值和质量磁化率变化来识别玉溪剖面古洪水期的风化条件及其环境背景。根据图3中三个环境指标曲线,玉溪古洪积层自下而上可以划分为三个风化阶段(图3d):(1)阶段 I (450 ~ 671 cm) 的平均磁化率达到 70.9 SI ( $10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ), Rb/Sr 比值、Si/Al 比值也均处于高值区间,表明 Sr<sup>2+</sup>、Al<sup>3+</sup> 的淋失率较高,湿热环境特征明显;(2)阶段 II (348 ~ 450 cm) 的环境指标处于低值区间, Sr<sup>2+</sup>、Al<sup>3+</sup> 的淋失较少反映了相对干燥的外部环境;(3)阶段 III (220 ~ 348 cm) 的三个环境指标 Rb/Sr、Si/Al 和质量磁化率较阶段 II 都有显著上升,表明外部环境向暖湿方向转变。

陆源孢粉组合可以指示流域内的古气候特征<sup>[25]</sup>。乔木和蕨类植被较繁盛的区域指示湿润环境,而灌木和草本主导的区域则对应相对干旱的环境。阶段 I (450 ~ 671 cm) 属湿热环境:乔木占 59.1%、草本占 21.5%,蕨类占比 19.4%;阶段 II (348 ~ 450 cm) 属温干环境:乔木占 57.9%,草本 29.6%,蕨类为 12.5%,蕨类占比明显减少;阶段 III (220 ~ 348 cm) 属相对暖湿环境(图3a)。乔木占比

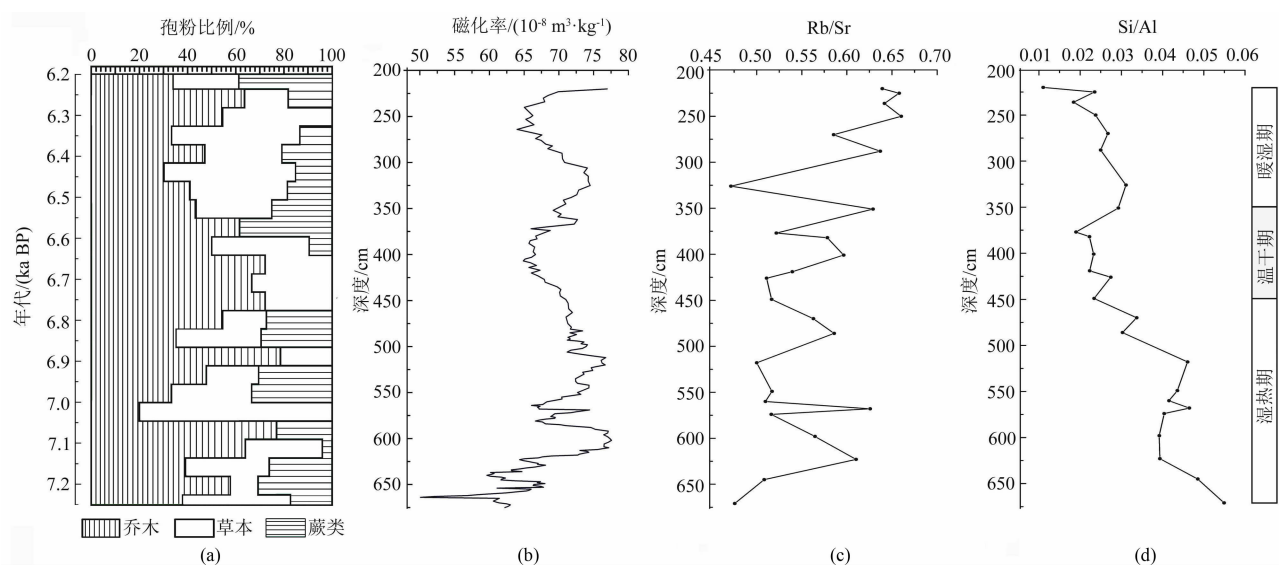


图 3 玉溪剖面研究层段古环境变迁的阶段性特征:

(a) 研究地层花粉比例结构变化; (b) 地层质量磁化率曲线; (c) Rb/Sr 比变化; (d) Si/Al 比变化曲线

Fig. 3 Paleo-environmental features indicated by the proxies in different stages in Yuxi profile:

(a) percentage change in pollen composition; (b) magnetic susceptibility curve; (c) Rb/Sr ratio; (d) Si/Al ratio

57.5%、草本占 26.9%、蕨类占 15.6%,该阶段蕨类比重有所增加。可见,孢粉组合反映的遗址环境特征与质量磁化率、Rb/Sr 比值、Si/Al 比值指示的环境变迁趋势基本一致。

3.3 古洪积层特征

玉溪剖面中自然沉积层与人工堆积层交错出现,图 2a 中偶数层号代表自然层、奇数层号代表文化层。文化层由人类扰动的自然堆积物组成,无层理且夹有陶片、动物骨屑、红烧土屑、炭屑等遗迹和遗物,堆积层颜色呈棕褐色。自然层的主要组分是粉砂、粗粉砂(17.1~34.2 μm),沉积物色调呈浅黄色至黄棕色;其平均厚度(10~35 cm)大于文化层平均厚度(10~25 cm)。而且,自然层的颜色、结构、紧实度、质地具有均一性,可以清晰地辨别自然-文化地层的边界<sup>[26]</sup>。

根据玉溪剖面自然沉积层粒度指标<sup>[18]</sup>,第 14、16、18、20、22 和 24 层的平均粒径(Mz)(21.9~34.2 μm)显著大于其邻接地层,暗示这 6 个地层的洪积物由高动能洪水搬运而来。联系该剖面的气候阶段性特征,这 6 个地层位于 270~522 cm 处于温凉干旱气候期,表明干旱气候背景下的古洪水的携沙能力更强。表 1 是玉溪古洪积层三个气候段的沉积速率对比。其中,温干段(阶段 II)的沉积速率最大为 30 cm·(100a)<sup>-1</sup>(表 1),而湿热段(阶段 I)的

沉积速率显著小于温干期;该现象可能与不同气候期的植被覆盖度和水土流失量相关<sup>[27]</sup>。

表 1 不同气候阶段古洪积层的沉积速率比较

Tab. 1 Accumulation rate of the palaeoflood layers during various climatic stages

气候阶段	堆积厚度/cm	地层数	持续期/a	沉积速率/(cm·(100a) <sup>-1</sup> )
暖湿期	43	2	200	21.50
温干期	60	3	200	30.00
湿热期	99	6	500	19.80

用沉积物粒度数据解译沉积物组分和沉积动力是沉积分析的重要方式<sup>[28]</sup>。图 4a 显示,玉溪古洪水沉积物的粒径主要位于 2~251 μm,而洪积层的平均粒径(Mz)为 17.1~34.2 μm<sup>[18]</sup>,属于中粉砂质堆积物。根据累积概率曲线(图 4b)可知,跃移质组分对古洪积层的贡献最大(59.7%),而悬移质组分贡献率为 35.4%。这表明古洪积层的组分中悬移质和跃移质占比达 95.1%,而砾级沉积物占比较低,暗示溢岸流是玉溪古洪积层的主要搬运动力<sup>[29]</sup>。

3.4 古洪积层的沉积端元

沉积物端元(End member of sediments)分析由 Paterson 和 Helslop<sup>[30]</sup>合作开发,是基于 Matlab 平台

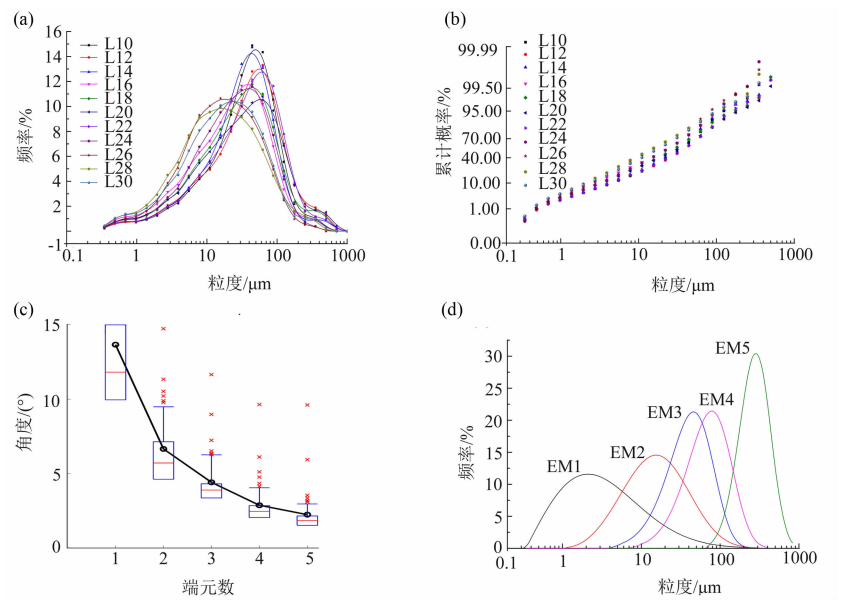


图4 玉溪剖面研究层段洪积物的粒度特征:  
(a) 洪积层沉积物体积频率;(b) 洪积物累计概率分布;(c) 洪积物端元数的确定;(d) 端元沉积物体积频率  
Fig.4 Granularity features and determination of end members for the paleoflood sediments in the Yuxi profile;  
(a) volume frequency; (b) accumulated probability; (c) identification of end members (EM); (d) frequency of EM

的沉积分析工具包,用于分析沉积物的搬运动力类型。利用端元分析的前提条件是<sup>[31]</sup>:(1)沉积物体积百分数与粒径存在线性相关且 $R^2>0.9$ ;(2)端元特征角度最佳偏差 $<5^{\circ}$ 。图4c、4d显示,玉溪古洪积物EM1、EM2的体积峰值位于 $2\mu\text{m}$ 、 $18\mu\text{m}$ ,属于粉砂质粘土组分;EM3、EM4体积峰值位于粉砂—细砂过渡区间( $50\mu\text{m}$ 、 $82\mu\text{m}$ ),该组分是玉溪古洪积层的主体;而EM5则位于细砂—中砂区间( $306\mu\text{m}$ ,表2)。根据端元分析,判断EM1、EM2属于憩流沉积,EM3、EM4属于缓流沉积,EM5属于激流沉积,它们反映了古洪水行洪过程中携沙动力的差异。

表2 玉溪古洪积物不同端元的粒度组分分布

Tab.2 Particle composition of end-members separated from the palaeoflood deposits

端元	搬运动力	端元的粒度组分/%			
		粘土	粉砂	细砂	中砂
EM1	溢岸憩流	64.70	33.30	1.80	0.20
EM2	溢岸憩流	9.60	82.00	8.30	0.10
EM3	溢岸缓流	0.30	65.60	34.10	0.00
EM4	溢岸缓流	0.00	31.90	66.60	1.60
EM5	溢岸激流	0.00	0.00	25.90	74.10

## 4 讨论

### 4.1 古洪水的气候背景

全新世环境变迁与太阳辐射效能的增减造成的海面温度的变化是造成东亚夏季风和印度洋季风异常的关键因子<sup>[32-33]</sup>。而东亚季风异常会伴随水热条件的显著变化,玉溪剖面地层序列的磁化率和Rb/Sr变化曲线在7.3 ka BP、7.0 ka BP、6.7 ka BP、6.4 ka BP处于低值区间,指示了四个显著的元素弱迁移期。综合董哥洞石笋记录的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化曲线<sup>[34]</sup>(图5a)、红原泥炭纤维素<sup>[14]</sup>(图5b)和神农架泥炭记录 $\delta^{13}\text{C}$ 变化曲线(图5c)<sup>[35]</sup>可以发现,在7.3 ka BP、7.0 ka BP、6.8 ka BP、6.4 ka BP前后,C、O同位素含量出现显著波动(图5a、5b、5c),波动间隔约300 a。考虑到马尾松(*Pinus massoniana*)群落的繁盛往往与气候转冷有显著的正相关<sup>[36]</sup>,本文用T0403地层中马尾松花粉含量变化指示可能的变冷事件。图5d显示,马尾松花粉含量升高指示的冷期与石笋氧同位素、泥炭碳同位素所指示的降水量波动存在较好的对应关系,同时也指示了玉溪地区在中全新世存在多期的气候变冷事件<sup>[37]</sup>。

另外,重庆地区的降水变化与印度洋偶极子事

件(Indian Ocean Dipole, IOD)<sup>[38]</sup>、太平洋厄尔尼诺事件(El Niño)关系密切<sup>[39-40]</sup>。当厄尔尼诺事件出现时,印度洋东部水面会出现极冷现象,导致西南季风减弱南缩而西风急流增强、东亚夏季风西进,这将诱发重庆地区降水量陡增而引发洪水<sup>[41]</sup>。本文认为,玉溪剖面记录的多期古洪水与区域性降温事件导致的气候波动密切相关。

#### 4.2 古洪水的周期性

本文基于第 8~31 层洪积物的平均粒径序列,

用 MATLAB 8.3 平台的小波分析工具解析玉溪剖面古洪水序列的周期。古洪水沉积序列的小波功率分布显示(图 6a),高能谱区域(深灰色)代表洪水高频发生年代,如 6.5 ka BP~6.6 ka BP、6.7 ka BP~6.9 ka BP、7.2 ka BP~7.3 ka BP。小波功率谱揭示了 30~35 a(强显著)和 6~10 a(弱显著)两个短周期,其中 30~35 a 周期与现代 ENSO 周期接近<sup>[42]</sup>;长周期高能谱分别出现在 6.5 ka BP、6.8 ka BP、7.3 ka BP 三个年代节点,其间的年代

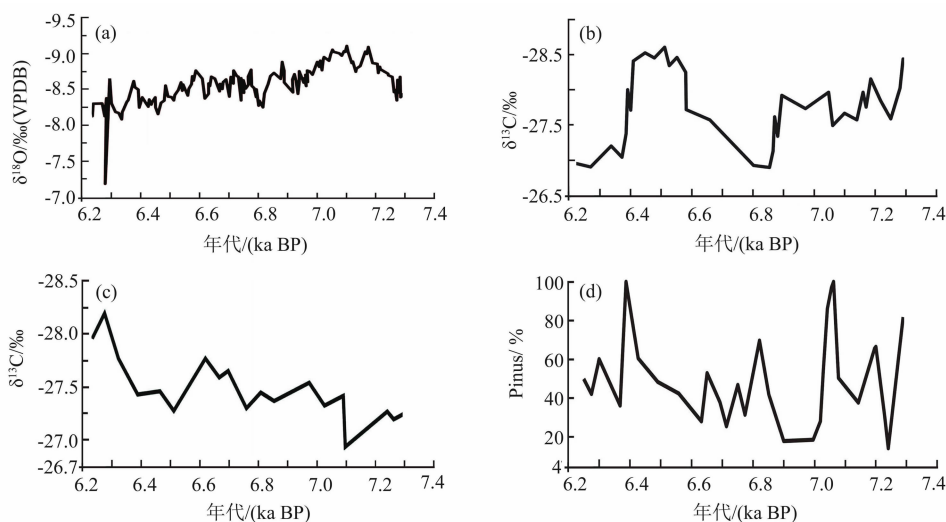


图 5 玉溪地层中马尾松花粉含量与神农架石笋中碳氧同位素含量对比:

(a) 神农架天宝洞石笋  $\delta^{18}\text{O}$  含量记录<sup>[34]</sup>; (b) 红原泥炭  $\delta^{13}\text{C}$  含量记录<sup>[14]</sup>;

(c) 神农架大九湖  $\delta^{13}\text{C}$  含量记录<sup>[35]</sup>; (d) 玉溪遗址地层中马尾松花粉含量变化

Fig. 5 Comparison of Pinus pollen percentage with isotopes of oxygen in stalagmite, and carbon in peat;

(a)  $\delta^{18}\text{O}$  variation in the stalagmite at Shennongjia<sup>[34]</sup>; (b)  $\delta^{13}\text{C}$  variation in the peat at Hongyuan<sup>[14]</sup>;

(c)  $\delta^{13}\text{C}$  variation in the peat at Shennongjia<sup>[35]</sup>; (d) changes in percentage of Pinus pollen in the layers in the Yuxi profile

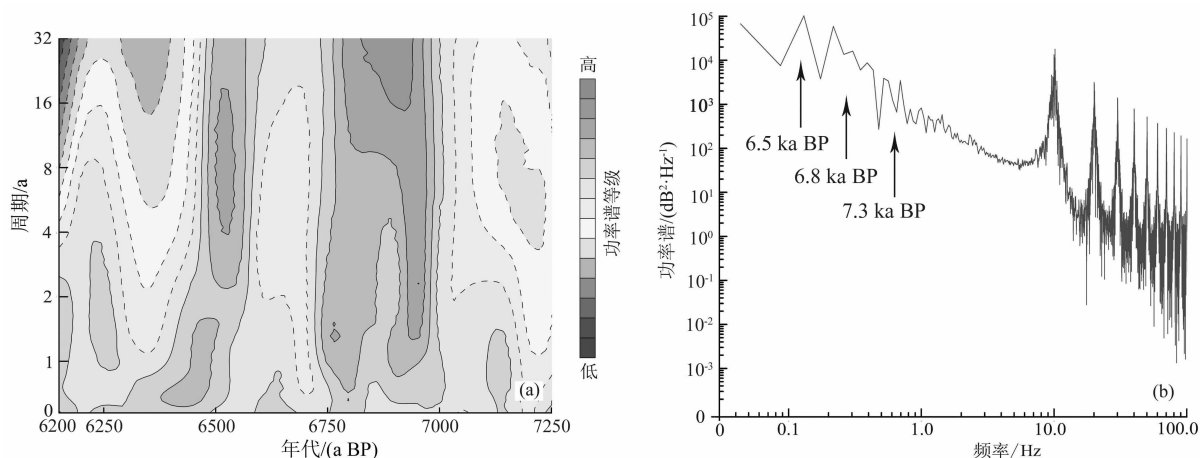


图 6 玉溪剖面洪积层平均粒径的小波功率分布与功率谱分析:

(a) 洪积层沉积物平均粒径的小波分析结果; (b) 洪积物平均粒径序列的功率谱

Fig. 6 Wavelet power distribution and power spectral density for the palaeoflood layers in the Yuxi profile;

(a) wavelet analytical results; (b) power spectral distribution for the palaeoflood layers in the Yuxi profile



跨度平均约 400 a, 该 400 a 周期在功率谱密度曲线上也有体现(图 6b)。这个周期相当于双 Suess 周期( $\sim 210$  a)<sup>[43]</sup>, 表明玉溪古洪水的发生周期可能与太阳活动周期相关。另外, 小波功率谱指示的 6.8 ka BP 的洪水期时间跨度较大(6.8 ka BP  $\sim$  7.0 ka BP)因而缺失 7.0 ka BP 洪水期。综合前述的气候波动间隔和小波分析结果, 本文认为玉溪遗址记录的多期古洪水的长周期大约为 350 a、短周期大约为 30 a。

根据近 200 a 的洪水记录<sup>[44]</sup>, 重庆地区在 19 世纪处于洪水高发期, 该期正值全球性小冰期, 来自印度洋的西南季风增强导致本区洪水频发。重庆寸滩水文站的记录显示, 近 200 a 来重庆长江段的最高洪峰流量超过  $8 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  的超大洪水共有四次, 即 1840、1870、1905 和 1981 年。同时重庆地区的多期洪水事件与冷气候周期高度相关<sup>[45]</sup>, 而且近 200 a 来洪峰流量大于  $6 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  的洪水周期大致为 30 a<sup>[44]</sup>, 该结论与玉溪剖面指示的古洪水周期受气候变冷事件导致降水异常的观点是一致的。

## 5 结论

(1) 玉溪剖面古洪积层的主要组分是细粉砂-粉砂(7.8  $\sim$  62.5  $\mu\text{m}$ ); 根据洪积物端元(End members of sediments)分析结果, 玉溪洪积层的搬运动力可分为溢岸激流、溢岸缓流和溢岸憩流三类。

(2) 综合古洪积层的磁化率、孢粉组分变化、Rb/Sr 值和 Si/Al 值等环境指标将玉溪剖面的古洪水期分为暖湿阶段(6.4 ka BP  $\sim$  6.6 ka BP)、温干阶段(6.6 ka BP  $\sim$  6.8 ka BP)和湿热阶段(6.8 ka BP  $\sim$  7.3 ka BP)。其中, 古洪积层的沉积速率在温干阶段最大( $30 \text{ cm} \cdot (100\text{a})^{-1}$ ), 可能与干旱期的植被覆盖度较小相关。

(3) 玉溪剖面古洪积层的小波功率谱显示, 玉溪古洪水沉积序列存在约 30 a 短周期和约 350 a 长周期; 而地层中马尾松(*Pinus massoniana*)花粉含量高值区指示的 6.4 ka、6.8 ka、7.3 ka 三期降温事件对应了玉溪古洪水的百年尺度周期, 表明降温事件是诱发本区古洪水的主要影响因素。另外, 太阳辐射的周期性减弱诱发的印度洋偶极子事件、El Niño 事件亦可导致印度洋夏季风和东亚夏季风异常, 进

而引发玉溪地区十年尺度的周期性洪水。

## 参考文献(References)

- [1] WU Li, LI Feng, ZHU Cheng, et al. Holocene environmental change and archaeology, Yangtze River Valley, China: Review and prospects [J]. Geoscience Frontier, 2012, 3(6): 875 – 892. DOI: 10.1016/j.gsf.2012.02.006
- [2] INNES J B, ZONG Yongqiang, WANG Zhanghua, et al. Climatic and palaeoecological changes during the mid- to late Holocene transition in eastern China: High-resolution pollen and non-pollen palynomorph analysis at Pingwang, Yangtze coastal lowlands [J]. Quaternary Science Reviews, 2014, 99: 164 – 175. DOI: 10.1016/j.quascirev.2014.06.013
- [3] LILLIOS K T, BLANCO-GONZÁLEZ A, DRAKE B L, et al. Mid-late Holocene climate, demography, and cultural dynamics in Iberia: A multi-proxy approach [J]. Quaternary Science Reviews, 2016, 135: 138 – 153. DOI: 10.1016/j.quascirev.2016.01.011
- [4] CHEN Fahu, JIA Jia, CHEN Jianhui, et al. A persistent Holocene wetting trend in arid central Asia, with wettest conditions in the late Holocene, revealed by multi-proxy analyses of loess-palaeosol sequences in Xinjiang, China [J]. Quaternary Science Reviews, 2016, 146: 134 – 146. DOI: 10.1016/j.quascirev.2016.06.002
- [5] WATERS M R, KEENE J L, PREWITT E R, et al. Late quaternary geology, archaeology, and geoarchaeology of Hall's Cave, Texas [J]. Quaternary Science Review, 2021, 274: 107276. DOI: 10.1016/j.quascirev.2021.107276
- [6] 朱 诚, 郑朝贵, 吴 立. 长江流域新石器环境考古[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 102 – 110. [ZHU Cheng, ZHENG Chaogui, WU Li. Environmental archaeology since the Neolithic Age in the Yangtze River valley, China [M]. Beijing: Science Press, 2016: 102 – 110]
- [7] SHARMA S, SHUKLA A D, BARTARYA S K, et al. The Holocene floods and their affinity to climatic variability in the western Himalaya, India [J]. Geomorphology, 2017, 290: 317 – 334. DOI: 10.1016/j.geomorph.2017.04.030
- [8] 周凤琴, 唐从胜. 长江泥沙来源与堆积规律研究[M]. 武汉: 长江出版社, 2008: 61 – 63. [ZHOU Fengqin, TANG Congsheng. Sediment source and accumulation law of the Yangtze River [M]. Wuhan: Changjiang Press, 2008: 61 – 63]
- [9] 朱诚, 马春梅, 张文卿, 等. 神农架大九湖 15.75 ka BP 以来的孢粉记录和环境演变[J]. 第四纪研究, 2006, 26(5): 814 – 826. [ZHU Cheng, MA Chunmei, ZHANG Wenqing, et al. Pollen record from Dajiuhu Basin of Shennongjia and environmental changes since 15.75 ka BP [J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(5): 814 – 826] DOI: 10.11928/j.issn.1001-7410.2006.05.17
- [10] BENITO G, MACKLIN M G, ZIELHOFFER C, et al. Holocene flooding and climate change in the Mediterranean [J]. Catena, 2015, 130: 13 – 33. DOI: 10.1016/j.catena.2014.11.014
- [11] BANERJI U S, ARULBALAJI P, PADMALAL D. Holocene

- climate variability and Indian Summer Monsoon: An overview [J]. *The Holocene*, 2020, **30**: 744 – 773. DOI: 10.1177/0959683619895577
- [12] ZHANG Yuzhu, HUANG Chunchang, TAN Zhihai, et al. Prehistoric and historic overbank floods in the Luoyang Basin along the Luohe River, middle Yellow River basin, China [J]. *Quaternary International*, 2019, **521**: 118 – 128. DOI: 10.1016/j.quaint.2019.06.023
- [13] 谭典佳, 马运强, 李志忠, 等. 天山北麓河流下游冲积平原沉积记录的中晚全新世环境演变[J]. *山地学报*, 2023, **41**(3): 307 – 321. [TAN Dianjia, MA Yunqiang, LI Zhizhong, et al. Environmental evolution of middle-late Holocene verified by sedimentary evidences in the alluvial plain in the northern foothills of the Tianshan Mountains, China [J]. *Mountain Research*, 2023, **41**(3): 307 – 321] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000750
- [14] HONG Yetang, HONG Bing, LIN Qinghua, et al. Inverse phase oscillations between the East Asian and Indian Ocean summer monsoons during the last 12000 years and palaeo-El Nino [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, **231**: 337 – 346. DOI: 10.1016/j.epsl.2004.12.025
- [15] 赵侃, 陈仕涛, 崔英方, 等. 神农架石笋记录的近 200 年东亚季风变化及其 ENSO 响应[J]. *地理研究*, 2015, **34**(1): 74 – 84. [ZHAO Kan, CHEN Shitao, CUI Yingfang, et al. East Asian monsoon changes and its ENSO response revealed by a 200-year stalagmite record from Yongxing Cave on the Mountain Shengnonjia [J]. *Geographical Research*, 2015, **34**(1): 74 – 84] DOI: 10.11821/dlyj201501007
- [16] 陈建徽, 饶志国, 刘建宝, 等. 全新世东亚夏季风最强盛期出现在何时? ——兼论中国南方石笋氧同位素的古气候意义[J]. *中国科学: 地球科学*, 2016, **46**(11): 1494 – 1504. [CHEN Jianhui, RAO Zhiguo, LIU Jianbao, et al. When the strongest East Asia Summer Monsoon emerged? Also on the significance of oxygen isotopes from stalactite in south China for studies of paleoclimate [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2016, **46**(11): 1494 – 1504] DOI: 10.1360/N072015-00500
- [17] 徐伟峰, 朱诚. 长江三峡库区玉溪遗址地层沉积特征研究[J]. *地层学杂志*, 2008, **32**(1): 21 – 26. [XU Weifeng, ZHU Cheng. Sedimentary features of the strata at the Yuxi Site of the Three Gorges Reservoir area [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2008, **32**(1): 21 – 26] DOI: 10.19839/j.cnki.dexz.2008.0018
- [18] 朱诚, 马春梅, 王慧麟, 等. 长江三峡库区玉溪遗址 T0403 探方古洪水沉积特征研究[J]. *科学通报*, 2008, **53**(S1): 1 – 16. [ZHU Cheng, MA Chunmei, WANG Huilin, et al. Study on sedimentology of the paleofloods at T0403 profile of the Yuxi Site in Three Gorges Reservoir [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**(S1): 1 – 16] DOI: 10.1360/CSB2008-53-zk1-1
- [19] 崔安宁, 马春梅, 朱诚, 等. 长江三峡库区玉溪遗址的环境与人类活动的孢粉记录[J]. *微体古生物学报*, 2015, **32**(2): 161 – 174. [CUI Anning, MA Chunmei, ZHU Cheng, et al. Pollen records of the Yuxi Culture Site in Three Gorges Reservoir area, Yangtze River [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2015, **32**(2): 161 – 174] DOI: 10.16087/j.cnki.1000-0674.2015.02.005
- [20] 马晓娇, 白九江, 邹后曦. 重庆丰都玉溪遗址 2004 年度浮选结果及分析[J]. *农业考古*, 2017(6): 40 – 44. [MA Xiaojiao, BAI Jiujiang, ZOU Houxi. Flotation and analysis on plant remains from the Yuxi Site at Fengdu county, Chongqing [J]. *Agricultural Archaeology*, 2017(6): 40 – 44]
- [21] 陈珊珊, 马江波. 玉溪文化古居民生计模式探析[J]. *农业考古*, 2020(3): 13 – 20. [CHEN Shanshan, MA Jiangbo. Research on livelihood mode of ancient residents in Yuxi culture [J]. *Agricultural Archaeology*, 2020(3): 13 – 20]
- [22] 王海阔, 徐静, 白九江, 等. 重庆丰都玉溪遗址北部新石器时代遗存 2004 年度发掘简报[J]. *江汉考古*, 2013(3): 28 – 43. [WANG Haikuo, XU Jing, BAI Jiujiang, et al. Report of Neolithic remains at Yuxi Site of Fengdu county in 2004 [J]. *Jiangnan Archaeology*, 2013(3): 28 – 43]
- [23] BLAAUW M, HEUVELINK, G B M, MAUQUOY D, et al. A numerical approach to  $^{14}\text{C}$  wiggle-match dating of organic deposits: Best fits and confidence intervals [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, **22**: 1485 – 1500. DOI: 10.1016/S0277-3791(03)00086-6
- [24] CHEN Jun, AN Zhisheng, HEAD J. Variation of Rb/Sr ratios in the loess-palaeosol sequences of central China during the last 130,000 years and their implications for monsoon palaeoclimatology [J]. *Quaternary Research*, 1999, **51**(3): 215 – 219. DOI: 10.1006/qres.1999.2071
- [25] 袁新田, 谢世友. 重庆金佛山国家自然保护区山顶与山坡表土孢粉对比研究[J]. *山地学报*, 2012, **30**(6): 655 – 662. [YUAN Xintian, XIE Shiyu. A comparative study on surface spore-pollen in the mountaintop and mountainside of Mt. Jinfo Nature Reserve, Chongqing, China [J]. *Mountain Research*, 2012, **30**(6): 655 – 662] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2012.06.010
- [26] BENITO G, THORNDYCRAFT V R. Palaeoflood hydrology and its role in applied hydrological sciences [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, **313**: 3 – 15. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.02.002
- [27] 郎燕, 刘宁, 刘世荣. 气候和土地利用变化影响下生态屏障带水土流失趋势研究[J]. *生态学报*, 2021, **41**(13): 5106 – 5117. [LANG Yan, LIU Ning, LIU Shirong. Changes in soil erosion and its driving factors under climate change and land-use scenarios in Sichuan-Yunnan-Loess Plateau region and the southern hilly mountain belt, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(13): 5106 – 5117] DOI: 10.5846/stxb202101310341
- [28] SADEGHI S H, HARCHEGANI M K, ASADI H. Variability of particle size distributions of upward/downward splashed materials in different rainfall intensities and slopes [J]. *Geoderma*, 2017,



- 290**: 100–106. DOI: 10.1016/j.geoderma.2016.12.007
- [29] 郑文波, 邓宏文. 河流相溢岸沉积特征及其层序地层意义 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, **42**(S2): 79–87. [ZHENG Wenbo, DENG Hongwen. Sedimentary features and stratigraphy significance of overbank deposition in fluvial system [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, **42**(S2): 79–87]
- [30] PATERSON G A, HESLOP D. New methods for unmixing sediment grain size data [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2015, **16**: 4494–4506. DOI: 10.1002/2015GC006070
- [31] 王兆夺, 黄春长, 杨红瑾, 等. 六盘山东麓晚更新世以来黄土粒度指示的物源特征及演变 [J]. 地理科学, 2018, **38**(5): 818–826. [WANG Zhaoduo, HUANG Chunchang, YANG Hongjin, et al. Loess provenance characteristics and evolution indicated by grain size since late pleistocene at the eastern foot of Liupan Mountains, China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, **38**(5): 818–826] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2018.05.020
- [32] LI Ziyi, CHEN Minte, LIN Dacheng, et al. Evidence of solar insolation and internal forcing of sea surface temperature changes in the eastern tropical Indian Ocean during the Holocene [J]. Quaternary International, 2018, **490**(10): 1–9. DOI: 10.1016/j.quaint.2018.04.001
- [33] 马奋华, 管兆勇. 中国东部 AOD 等级变化及与东亚夏季风的联系 [J]. 中国环境科学, 2018, **38**(9): 3201–3210. [MA Fenhua, GUAN Zhaoyong. Features of graded AOD in east China in association with East Asian summer monsoon anomalies [J]. China Environmental Science, 2018, **38**(9): 3201–3210]
- [34] WANG Yongjin, CHENG Hai, EDWARDS R L, et al. The Holocene Asian monsoon: Links to solar changes and North Atlantic climate [J]. Science, 2005, **308**: 854–857. DOI: 10.1126/science.1106296
- [35] MA Chunmei, ZHU Cheng, ZHENG Chaogui, et al. High-resolution geochemistry records of climate changes since late-glacial from Dajiuhe peat in Shennongjia Mountains, central China [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, **53**(S1): 28–41. DOI: 10.1007/s11434-008-5007-6
- [36] 吴帆, 朱沛煌, 季孔庶. 马尾松分布格局对未来气候变化的响应 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, **46**(2): 196–204. [WU Fan, ZHU Peihuang, JI Kongshu. Response of masson pine (Pinus massoniana) distribution pattern to future climate change [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2022, **46**(2): 196–204] DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202008019
- [37] 邱雅惠, 刘健, 刘斌, 等. 全新世北半球典型冷事件的模拟研究 [J]. 第四纪研究, 2019, **39**(4): 1055–1067. [QIU Yahui, LIU Jian, LIU Bin, et al. Characteristics of Holocene cold events in the Northern Hemisphere from the TraCE-21ka model simulation [J]. Quaternary Sciences, 2019, **39**(4): 1055–1067] DOI: 10.11982/j.issn.1001-7410.2019.04.23
- [38] NYADJRO E S. Impacts of the 2019 strong IOD and monsoon events on Indian Ocean sea surface salinity [J]. Remote Sensing in Earth Systems Sciences, 2021, **4**: 158–171. DOI: 10.1007/s41976-021-00054-1
- [39] WANG Bin, WU Renguang, FU Xiuhua. Pacific East-Asian teleconnection: How does ENSO affects East Asian climate? [J]. Journal of Climate, 2000, **13**: 1517–1536. DOI: 10.1175/1520-0442(2000)013<1517
- [40] CHEN Wen, FENG Juan, WU Renguang. Roles of ENSO and PDO in the link of the East Asian winter monsoon to the following summer monsoon [J]. Journal of Climate, 2013, **26**(2): 622–635. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00021.1
- [41] 徐建军, 王东晓. 印度洋—太平洋海温的年际、代际异常及其对亚洲季风的影响. 海洋学报, 2000, **22**(3): 34–43. [XU Jianjun, WANG Dongxiao. Diagnosis of interannual and interdecadal variation in SST over Indian-Pacific Ocean and numerical stimulation of their effects on Asian summer monsoon [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2000, **22**(3): 34–43]
- [42] TANG Youmin, ZHANG Ronghua, LIU Ting, et al. Progress in ENSO prediction and predictability study [J]. National Science Review, 2018, **5**: 826–839. DOI: 10.1093/nsr/nwy105
- [43] STEINHILBER F, ABREU J A, BEER J, et al. 9,400 years of cosmic radiation and solar activity from ice cores and tree rings [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, **109**(16): 5967–5971. DOI: 10.1073/pnas.1118965109
- [44] 施雅风, 姜彤, 苏布达, 等. 1840 年以来长江大洪水演变与气候变化关系初探 [J]. 湖泊科学, 2004, **16**(4): 289–297. [SHI Yafeng, JIANG Tong, SU Buda, et al. Preliminary analysis on the relation between the evolution of heavy floods in the Yangtze River catchment and climate changes since 1840 [J]. Journal of Lake Sciences, 2004, **16**(4): 289–297] DOI: 10.18307/2004.0400
- [45] 姚檀栋, 段克勤, 田立德. 达索普冰芯累积量记录和过去 400a 印度夏季风降水变化 [J]. 中国科学 D 辑(地球科学), 2000, **30**(6): 619–627. [YAO Tandong, DUAN Keqin, TIAN Lide. Record of Dassoop ice-core accumulation and variations in summer monsoon rainfall of India over past 400a [J]. Science in China (Earth Science), 2000, **30**(6): 619–627] DOI: 10.1360/zd2000-30-6-619

## Periodicity of Multi-Period Paleofloods and Paleoclimatic Context Recorded by the Layers at the Yuxi Site, Southwestern China

LI Zhongxuan<sup>1</sup>, ZHU Cheng<sup>2\*</sup>, YUAN Shengyuan<sup>1</sup>, JIAO Shixing<sup>3</sup>

(1. School of Urban and Environmental Science, Xuchang University, Xuchang 461000, Henan, China;

2. School of Geography and Oceanology, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

3. School of Resources and Environment, Anyang Normal University, Anyang 455000, Henan, China)

**Abstract:** Continuous paleo-diluvia formed in Holocene epoch have been proved to be one of the reliable carriers for tracing paleoenvironmental information. In the Yuxi site in Fengdu county, Chongqing city, China, there found multiple-period consecutive cultural and paleo-diluvial layers; unfortunately, previous studies had not systematically analyzed the layers for paleo-floods mechanism and paleoclimatic context, particularly short of knowledge of periodicity of the layers.

(1) In this study, it examined AMS<sup>14</sup>C dating of animal bone fragments collected in the cultural layers of the T0403 profile at the Yuxi site; then it obtained a profile of deposition-chronology relationship fitted by Bacon program. It concluded that the formation period of paleo-diluvia in the Yuxi site was in the range of 6.4 ka BP – 7.3 ka BP.

(2) In terms of granularity analysis and end-members analysis of the paleo-diluvial layers, the paleoflood sediments were mainly composed of fine-silt and silt, which suggests that the paleo-diluvia were formed by gradual accumulation inflicted by overbank slack flow and perched slow water.

(3) According to environmental indexes such as synsporopollen assemblage, magnetic susceptibility, Rb/Sr and Si/Al ratios, the paleo-diluvia in the Yuxi site experienced three stages: early hot-wet, middle cool-dry and late warm-dry. The deposition rate of paleo-diluvia was the highest ( $30 \text{ cm} \cdot (100\text{a})^{-1}$ ) in warm-dry stage, and the frequency of paleoflood was higher than those in the hot-wet stage.

(4) In view of the wavelet power spectrum distribution of the paleo – diluvium sedimentary sequence, the paleoflood events speculated by the Yuxi profile exhibited a short cycle of ca. 30 years and a long cycle of ca. 350 years. The long cycle was related to climate cooling events, and the short one was related to summer monsoon anomalies caused by ENSO events.

By this study, it proposed the three dynamic types of paleo-flood deposit transportation, the difference in accumulation rate of paleo-diluvia in dry and wet periods, and the long or short cycles of paleofloods, which are of reference significance for studying the man-land relationship in Chongqing area in the early Neolithic Age and the flood mechanism in the upper reaches of the Yangtze River.

**Key words:** paleoflood deposition; environmental evolution; end-member analysis; paleoflood periodicity; climatic anomaly; the Yuxi site

(责任编辑 钟雨倩)