



广东北江上游河流阶地与岩溶洞穴堆积物光释光年代及其地貌意义

黄孝波, 赵心宇, 李宏卫, 田若楠, 胡 昆, 李燕文, 涂 华, 赖忠平

Luminescence dating of fluvial terrace and karst cave deposits in the Upper Beijiang River, Guangdong Province, and its geomorphological implications

HUANG Xiaobo, ZHAO Xinyu, LI Hongwei, TIAN Ruonan, HU Kun, LI Yanwen, TU Hua, and LAI Zhongping

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023122601>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

滇西南沧源岩溶洞穴硝洞堆积物来源分析

Sources of karst cave deposits in Xiaodong Cave in Cangyuan, Southwest Yunnan

海洋地质与第四纪地质. 2024, 44(2): 81–96

江苏南通近岸区晚第四纪沉积序列的沉积相特征与定年

Sedimentary facies characteristics and dating of the late Quaternary sedimentary sequence in the nearshore coastal area of Nantong, Jiangsu Province, China

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(3): 35–48

珠江三角洲第四纪沉积物初始沉积年龄及沉积演化

Discussion on the Quaternary initial sedimentary age and sedimentary evolution in the Pearl River Delta

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(6): 145–156

涌潮沉积揭示长江河口湾全新世最高海面

The sea-level highstand of the Changjiang River estuary in the Holocene revealed from tidal bore deposits

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(3): 160–169

茅尾海钦江河口光滩时空变化过程研究

Spatial-temporal variations of bare flats in the Qinjiang River estuary, Maowei Sea

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(3): 107–118

真光层海水过饱和甲烷的来源及机制探讨

Discussion on the sources and mechanism of supersaturated methane in euphotic seawater

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(1): 50–59



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

黄孝波, 赵心宇, 李宏卫, 等. 广东北江上游河流阶地与岩溶洞穴堆积物光释光年代及其地貌意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(6): 186-194.
HUANG Xiaobo, ZHAO Xinyu, LI Hongwei, et al. Luminescence dating of fluvial terrace and karst cave deposits in the Upper Beijiang River, Guangdong Province, and its geomorphological implications[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(6): 186-194.

广东北江上游河流阶地与岩溶洞穴堆积物光释光年代及其地貌意义

黄孝波¹, 赵心宇², 李宏卫¹, 田若楠², 胡昆¹, 李燕文², 涂华², 赖忠平²

1. 广东省地质调查院, 广州 510080

2. 汕头大学海洋灾害预警与防护广东省重点实验室, 汕头 515063

摘要: 河流阶地沉积和岩溶洞穴冲积物是记录河流下切历史的重要载体,但在流域尺度上多层溶洞的发育过程与河流下切过程的耦合关系仍缺乏直接的年代学证据。广东北江上游水系流经砂岩盆地和石灰岩区,流经区分别发育了多级河流阶地和多层洞穴系统,为探究河流与多层溶洞演化关系提供了理想条件。本文对北江上游坪石镇二级阶地和乐昌古佛岩第二层溶洞中的河流沉积物进行了石英光释光测年,结果表明前者至少形成于 101~79 ka,后者至少形成于 121~71 ka。二者均对应于深海氧同位素 5 阶段,指示该区洞穴冲积物和河流阶地沉积在冰期-间冰期尺度上是同步的。本文为研究北江上游喀斯特洞穴冲积物与河流阶地发育的耦合关系提供了放射性年代学证据,对利用流域内岩溶洞穴冲积物建立区域河流地貌演化和构造抬升历史提供了理论依据。

关键词: 河流阶地; 喀斯特洞穴; 光释光测年; 北江

中图分类号: P531

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023122601

Luminescence dating of fluvial terrace and karst cave deposits in the Upper Beijiang River, Guangdong Province, and its geomorphological implications

HUANG Xiaobo¹, ZHAO Xinyu², LI Hongwei¹, TIAN Ruonan², HU Kun¹, LI Yanwen², TU Hua², LAI Zhongping²

1. Guangdong Geological Survey Institute, Guangzhou, Guangdong 510080, China

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Marine Disaster Prediction and Prevention, Shantou University, Shantou 515063, China

Abstract: Fluvial deposits in river terraces and alluvial deposits in karstic caves are important archives for geomorphological study of river valleys. However, there is still a lack of direct chronological evidence supporting the relationship between the developing processes of multi-layer caves and river terraces in basin scale. The upper reaches of Beijiang River run through both sandstone basins and limestone areas, resulted in multilevel river terraces and cave systems. This unique setting provides an ideal opportunity to investigate the evolutionary relationship between rivers and stratified caves. In this study, optically stimulated luminescence (OSL) dating was applied to constrain the age of the fluvial deposits from the second-level terrace in Pingshi Town in the upper reaches of Beijiang River in Guangdong Province, as well as from alluvial sediments in the second-level karst cave of Gufoyan Cave system in the neighboring area. The dating results reveal that the second terrace at Pingshi dates back to 101~79 ka, while the deposits in the second layer of Gufoyan Cave date back to 121~71 ka, both falling within the Marine Isotope Stage (MIS) 5. These findings indicate that during the last interglacial period, an incision occurred in the upper reach of the Beijiang River, leading to a drop in regional groundwater table. Therefore, it resulted in abandonment of the second layer of Gufoyan Cave by underground river. The cave alluvial sediments and river terrace deposits in the area were synchronous at the glacial-interglacial time scale, which provided direct chronological evidence for co-evolution between karst and river landforms in the upper reaches of Beijiang River. This study provided supports to further studies on regional Quaternary geology and river landform evolution through dating alluvial sediments found within karst caves.

Key words: river terrace; karst cave deposits; optically stimulated luminescence dating; Beijiang River

资助项目: 广东省 2021 年度自然资源事务管理—生态林业建设专项资金项目“第四纪冰期旋回对南岭生物多样性影响调查研究” (2021GJGY001)

作者简介: 黄孝波 (1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事基础地质调查研究, E-mail: hxb411916@163.com

通讯作者: 李宏卫 (1981—), 男, 博士, 正高级工程师, 从事基础地质与第四纪地貌调查研究, E-mail: lihongw1981@126.com

收稿日期: 2023-12-26; 改回日期: 2024-05-14. 文凤英编辑

河流系统是陆地沉积循环的关键物质传输通道和塑造地表形态的重要外营力,河流演化过程受到气候变化、构造抬升和基准面变化等多重因素的影响,因此是当前地貌学领域的研究热点之一^[1-6]。河流阶地是地质历史时期河流下切形成的阶梯状地貌单元,其地貌形态和沉积物共同记录了河流系统对过去气候变化和构造抬升的响应历史。因此,河流阶地是重建河流发育历史的核心材料^[4-6]。但在喀斯特地区的深切峡谷中通常难以发育或保存河流阶地,河流演化研究只能依靠被冲入溶洞并赋存起来的河流沉积物。这一类洞穴碎屑沉积物不易受到地表侵蚀的破坏而得以长久保存,因此可作为研究十万-百万年尺度河流演化过程的理想地质载体^[1-2,7-8]。随着近年来宇生核素定年等放射性测年技术的发展,洞穴河流沉积对于河流演化研究的价值日益凸显^[1-2]。

然而由于河流阶地和洞穴沉积物较少在同一区域共存,在流域尺度上多层溶洞的发育过程如何响应于河流下切过程尚不明确。在缺乏直接年代学支撑的情况下,前人主要通过地貌学观察和高程对比来推断相邻区域河流阶地和洞穴沉积物的对应关系^[3]。孔丽娟等^[7]、樊云龙等^[8]曾采用铀系不平衡测年法测定洞穴沉积物中夹生或上覆钙板的年代来限定洞内河流沉积物的年代,并以此重建区域内河流的演化历史。平亚敏等^[9]也曾通过河流阶地的热释光年代来推测流域内岩溶和砂岩洞穴的形成年代。但目前为止,尚没有报道同时测定同一流域岩溶洞穴内河流沉积和河流阶地沉积的放射性年代以直接验证两者年代对应关系的研究案例。

北江是广东北部地区的主要河流,其上游的一个主支武江在韶关乐昌地区先后流经了砂岩和灰岩地区,在坪石盆地形成了至少6级河流阶地^[10],在相距35 km的古佛岩溶洞中则形成了4层水平溶洞,并在溶洞中保留了较多的河流沉积物。这些保存完好的重要沉积单元为探析同流域内河流阶地与岩溶洞穴之间的联系提供了一个理想的窗口。近年来,光释光测年已逐渐成为河流阶地等的常规测年方法,其可靠性已被多方验证^[11-13]。本文采用光释光测年法对武江T2阶地及与其拔河高度相当的古佛岩第二层洞穴观音岩开展年代学研究,以揭示二者之间的地貌学和年代学关系,为探究流域尺度上多层溶洞的发育过程与河流下切过程的耦合关系提供直接的年代学证据。

1 研究区地质概况

北江是珠江流域第二大水系,其流域集雨面积约占广东省域面积的四分之一,是粤北地区的重要河流(图1)。北江上游分东西两个主支,西源武江出自湖南省临武县西,东源浈江出自江西省信丰县石碣大茅山,两源在广东省韶关市合流而成北江,经佛山三水地区与珠江干流西江合流。北江流域的经纬度范围大致为23°24'~25°N、112°~114°E,属于亚热带季风气候,境内高温多雨,年均降雨量约1800 mm。北江多年平均径流量为 $4.82 \times 10^{10} \text{ m}^3$,年均含沙量 0.126 kg/m^3 ,属少沙河流。南岭处于夏季风的桥头堡地区,对季风降水的波动非常敏感,这对北江河流阶地的形成有重要意义。

前人对北江河流阶地分布做过较系统的调查和梳理,识别出六级河流阶地^[10,14-15]。在河流阶地保存相对完整的武江流域坪石盆地,六级阶地的拔河高度依次为14、20、24、35~40、51和60 m^[15]。武江流出坪石盆地之后,进入以灰岩为主的乐昌段。在乐昌市南、武江右岸古佛岩(又称古佛洞天风景区)中发育了一个复杂的溶洞系统,内部可分为4层洞穴,分别为醉仙洞、观音岩、古佛岩和金龙殿。各层洞穴均保存一些冲积物,具有典型的冲/洪积物沉积构造特征,应是由地下河或洞外河流、洪水形成的原生堆积。各层洞穴之间的垂直裂隙也零星分布一些河流砾石,但其沉积结构并不清晰,难以判断是否为原生堆积。各层洞穴典型河流沉积海拔依次高出附近的武江河床13、20、40和54 m,分别与武江的T1、T2、T4和T5阶地的河拔高度相当,指示该区域河流阶地与岩溶洞穴中河流沉积物之间可能存在对应关系。

北江T3及以上阶地和拔河高度相当的洞穴沉积很可能已超出了石英和长石释光测年的范围(一般<30万年)^[10-11,16],而古佛岩最低一级洞穴当前并不具备采样条件,因此本次研究选择了武江T2阶地及与其拔河高度相当的古佛岩第二层洞穴观音岩开展年代学对比研究。

2 材料与方法

2.1 样品采集

前人对坪石六级河流阶地有过较为系统的报

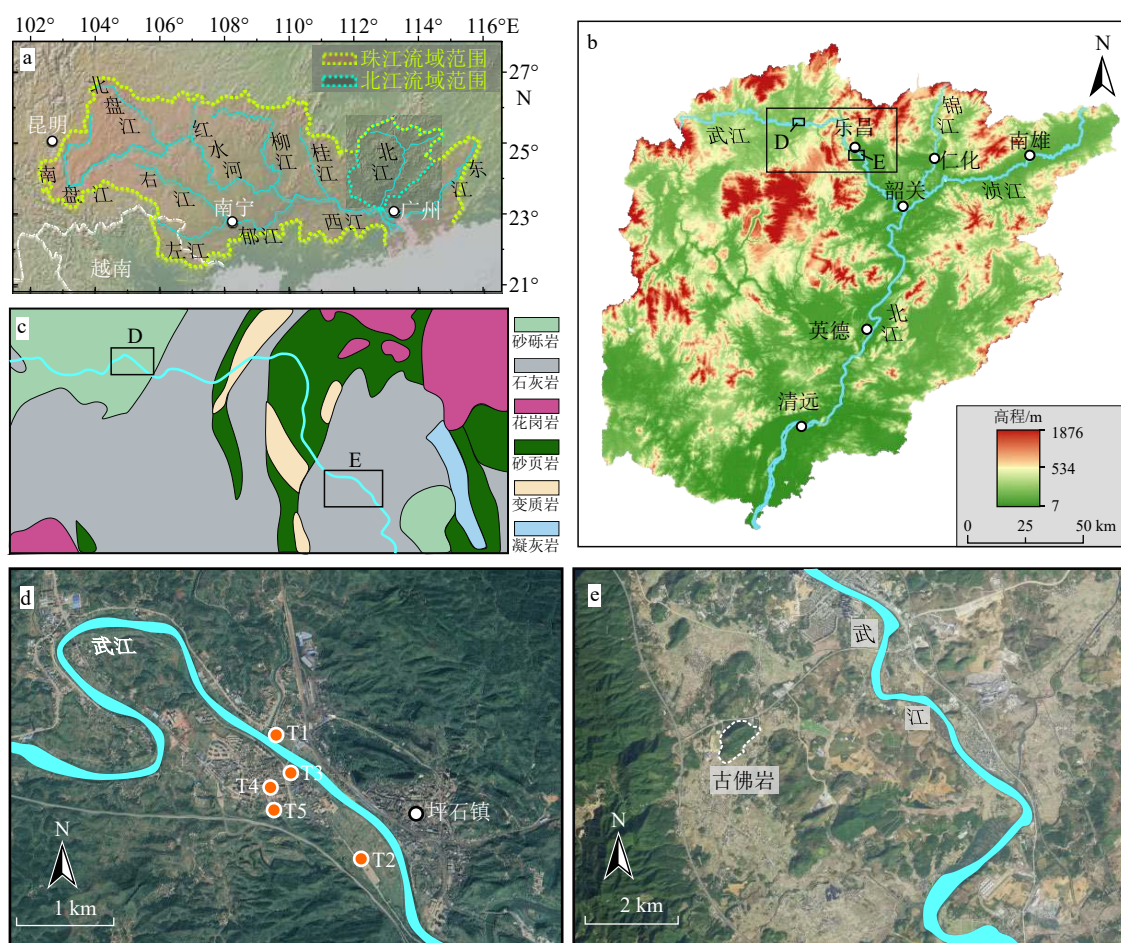


图 1 北江上游坪石盆地河流阶地和古佛岩地理位置

a: 珠江流域和北江流域范围; b: 北江流域范围地形图, 其中较大方框所示为图 1c 范围; c: 北江坪石-乐昌段基岩类型; d: 坪石盆地典型阶地剖面位置, 其中标记 T2 的为 JTJX 剖面位置; e: 古佛岩地理位置。

Fig.1 The location of river terrace in Pingshi Basin and Gufoyan Cave in Lechang in the upper reaches of Beijiang River

a: The drainage areas of Pearl River and Beijiang River; b: the topography of the drainage area of Beijiang River; c: the bedrock types of Pingshi-Lechang areas along Beijiang River; d: the locations of typical terrace profile in Pingshi Basin; T2 indicates the location of JTJX profile; e: the satellite image showing the location of Gufoyan in the west bank of Beijiang River.

道^[14-15],但随着近年来城镇建设的加速,镇区及周边很多阶地都有相当程度的破坏。坪石镇对岸西南侧的骏通驾校周边是 T2 阶地保存相对完好的区域。驾校西北侧的小土岗是一个较为理想的采样剖面。土岗东侧和北侧剖面均出露了河漫滩相沉积,北侧剖面厚约 3 m,上部 1.5 m 为河漫滩相,受植物根系扰动较大,下部 1.5 m 为河流砾石层,未见底。本次研究选取了河漫滩相保存较厚且受植物根系扰动较少的东侧剖面进行样品采集,编号为 JTJX 剖面(25°16′53.89″N、113°02′50.50″E,拔河 19 m)。该剖面顶部为 0.5 m 植物扰动层,中间为 1.2 m 河漫滩相沉积(砂质黏土),呈黄色—浅红棕色,剖面下部不便开挖,故未出露砾石层。相距 5 m 的另一侧剖面底部出露了 0.5 m 砾石层(未见底),砾石磨圆度好,风化程度较弱。JTJX 剖面采了 4 个

光释光样品,每个均包含 1 个平行样,采样深度依次为 57 cm(JTJX-1)、90 cm(JTJX-2)、107 cm(JTJX-3)和 152 cm(JTJX-4)(图 2)。

古佛岩第二层洞穴观音岩的洞厅主体沉积物已经被人工破坏,改建为宗教场所,在洞厅后部及其支洞洞室内尚保留了部分原始堆积。光释光测年样品分别采自两个剖面: GYYa 剖面位于支洞最深处,其最上部 20 cm 为黏土层,其下为厚度约 1 m 的粉砂质黏土,在 0.1 m 和 0.5 m 深处各采集了一个光释光样品(GYY-1, GYY-2),但上部黏土层整体粒度极细,经过化学处理后无法筛取到能够用于测年的粒度矿物组分; GYYb 剖面位于主洞室后部靠近洞壁处,厚度约 1.5 m,主体为粉砂质黏土,与 GYYa 剖面下部地层一致。从高度上看 GYYb 可能位于 GYYa 剖面的下部,但由于洞内大部分堆积已被人

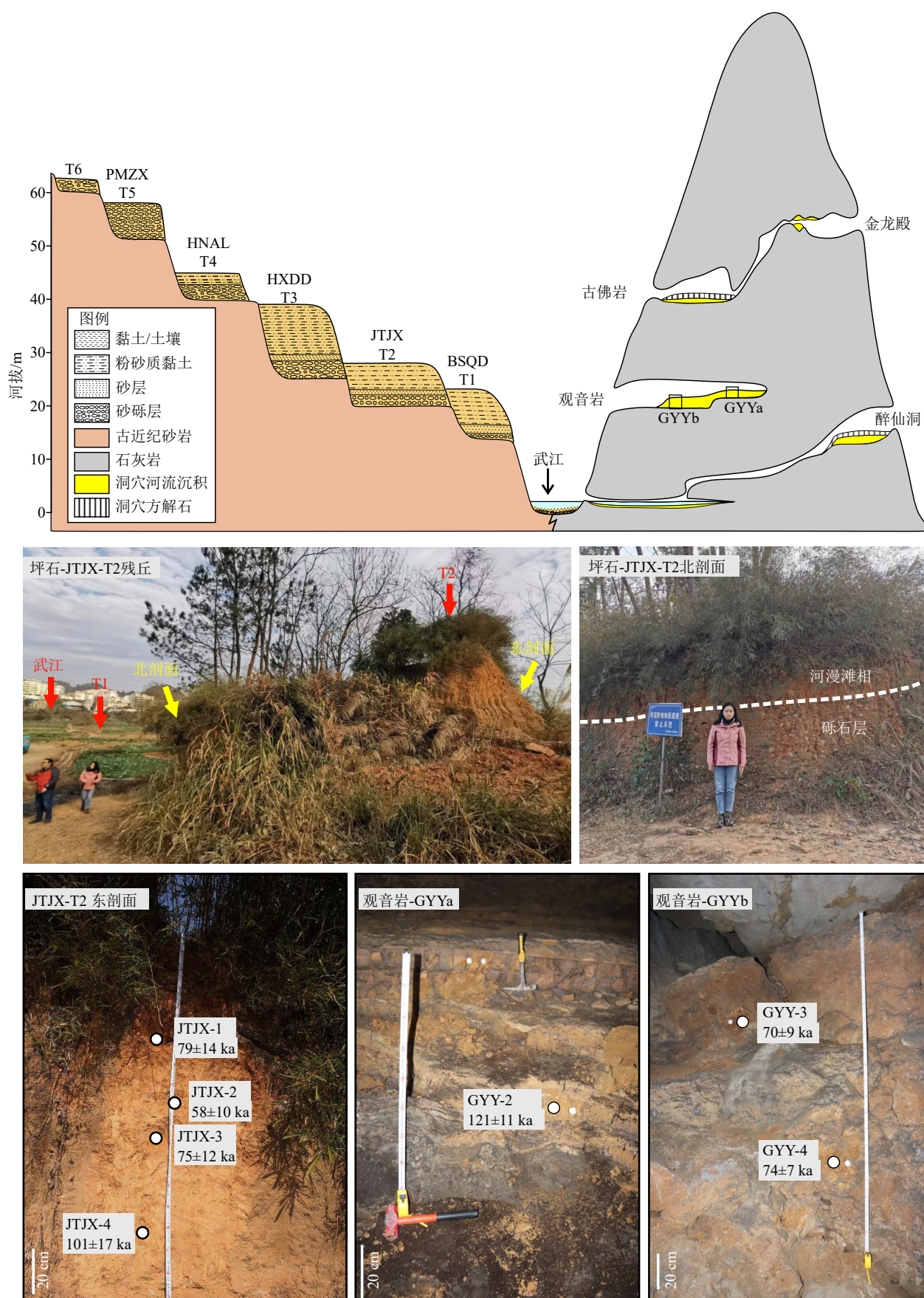


图 2 坪石盆地河流阶地序列与乐昌古佛岩溶洞系统对应关系示意图及 T2 阶地和观音岩洞穴沉积地层照片

Fig.2 A sketch showing the relationship between the river terraces in Pingshi Basin and the karst caves of Gufoyan in Lechang, with photos of cross-sections of the second terrace and the second layer cave

为挖除,两个剖面之间的堆积并不连续,二者也可能分属两次不同期的洪水事件。在 GYYb 剖面 0.8 m 和 1.1 m 深处各采集了一个光释光样品(GYY-3, GYY-4)。

2.2 实验方法

光释光(Optically Stimulated Luminescence, OSL)测年的测试流程参照赖忠平和欧先交^[16]。光释光样品采集前均已剥去剖面表面 10~30 cm 厚的沉积,以避免曝光后的物质参杂在样品中。采样过程采取了严格的防止曝光措施,采样时将钢管的一段先塞满防止曝光的材料,用锤子将钢管打入剖面中,待钢管内充满样品时小心取出,立刻用防止不透光胶带封装,在钢管上标写样品号,在运输中避免曝光和激烈碰撞。释光样品的预处理和测片制备过程均在暗室红光条件(640±10 nm)下进行。去除样品管两端 1~2 cm 可能曝光和污染的部分。钢管两端的样品被单独取出,先用于含水量测试,再烘干并充分研磨用于剂量率测试。其 U 和 Th 含量采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法测定, K 含量用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)法测定。

样品中心部分用于等效剂量(Equivalent Dose, D_e)测量。具体前处理流程^[16]为:(1)依次用 10% 的稀盐酸和 30% 的过氧化氢对样品进行浸泡反应,以去除碳酸盐和有机质;(2)反应完成后加入清水静置和清洗,随后进行低温烘干,筛选出 90~125 μm 的组分;(3)取部分 90~125 μm 样品用于提取石英;加入 40% 的氢氟酸溶液刻蚀长石矿物及石英颗粒表面受到 α 射线影响的部分,刻蚀后加入 10% 的稀盐酸去除反应中产生的氟化物沉淀,随后清洗至清液呈中性后低温烘干,磁选去除含铁矿物,样品测试前用红外检测的方法检验石英纯度,因为长石的污染会导致石英光释光年代的低估。

光释光测量仪为丹麦 Risø TL/OSL-DA-20 型全自动释光仪。石英 OSL 的测试采用单片再生剂量法(SAR)^[17]与标准生长曲线法(SGC)^[18]相结合 SAR-SGC 法^[16]。预热温度选择 260 $^{\circ}\text{C}$, 10 s; 实验剂量的预热温度选择 200 $^{\circ}\text{C}$, 10 s。样品在 125 $^{\circ}\text{C}$ 温度下蓝光激发 40 s, 获得释光信号。以检验 SAR 法可靠程度的常规评估方法^[19]为标准,剔除剂量恢复比率在 0.9~1.1 之外、回授比率大于 5%、循环比值为 0.9~1.1 的不合格测片。

环境剂量率(Dose rate, Dr)计算中, U、Th 和 K 元素的剂量率奉献根据文献^[20]进行计算。宇

宙射线的贡献根据样本的高度、地理位置和深度来计算^[21]。样品所含有的水分对于射线有一定的吸收作用,综合考虑沉积物类型和研究区水热条件,实测含水量太低可能存在含水量低估,不能代表其埋藏时期的平均状况,因此本研究以经验值(20±5)%作为样品的含水量参与 De 计算。 α 辐射相关的 α 系数方面,因为在使用氢氟酸对石英进行刻蚀的过程中已经去除表层受 α 粒子影响的部分,故粗颗粒石英的 α 值为零^[22]。环境剂量率和年代结果的计算在 Aberystwyth University 网站上的 DARC 程序上完成^[23]。

3 测年结果

3.1 光释光特征

本研究样品采用 SAR-SGC 法^[16]进行测试,典型样品 JTJX-3 的光释光(OSL)信号衰退曲线和剂量响应曲线如图 3 所示。总体来看,石英信号均在激发 1 秒内快速衰退到本底值,表明石英矿物 OSL 信号以快组分为主,适合采用 OSL 法测试。剂量响应曲线在 200~250 Gy 左右趋近饱和。为选取合适的预热温度,测试前对坪石镇的石英样品进行了预热坪实验。本次研究选取的是 JTJX 附近一级阶地的条件适宜性实验。保持其他实验条件不变,使预热温度从 200 $^{\circ}\text{C}$ 以每次增加 20 $^{\circ}\text{C}$ 的方式增加到 300 $^{\circ}\text{C}$, 每个预热温度下获得 4 个测片的平均等效剂量值(一共 24 个测片,每个温度下 4 个测片,有 6 个温度点,每个实验剂量的预热温度比预热温度低 40 $^{\circ}\text{C}$),测得的等效剂量变化趋势如图 3B,可以看出 240~280 $^{\circ}\text{C}$ 有一个较为稳定的坪区,对应等效剂量均值为 84.6 Gy,且在 200~300 $^{\circ}\text{C}$ 范围内循环比均值均落在 0.9~1.1,热转移比值均小于 1.5%(在 5% 以内是可接受的范围),由此证明选择 260 $^{\circ}\text{C}$ 作为样品测试的预热温度是合理的。

3.2 光释光年龄

坪石盆地 T2 阶地河漫滩相 4 个样品的石英光释光年代从下往上依次为 101±17、75±12、58±10 和 79±14 ka,对应的等效剂量为 290~433 Gy。观音岩洞穴内河流沉积物剖面采集的 3 个样品石英光释光测年分别为 121±11、70±9 和 73±7 ka,对应的等效剂量为 227~613 Gy(表 1)。由于上述 7 个样品的等效剂量均大于 200 Gy,其光释光信号很可能接近饱和,因此所获得的光释光年龄可能会存在一定

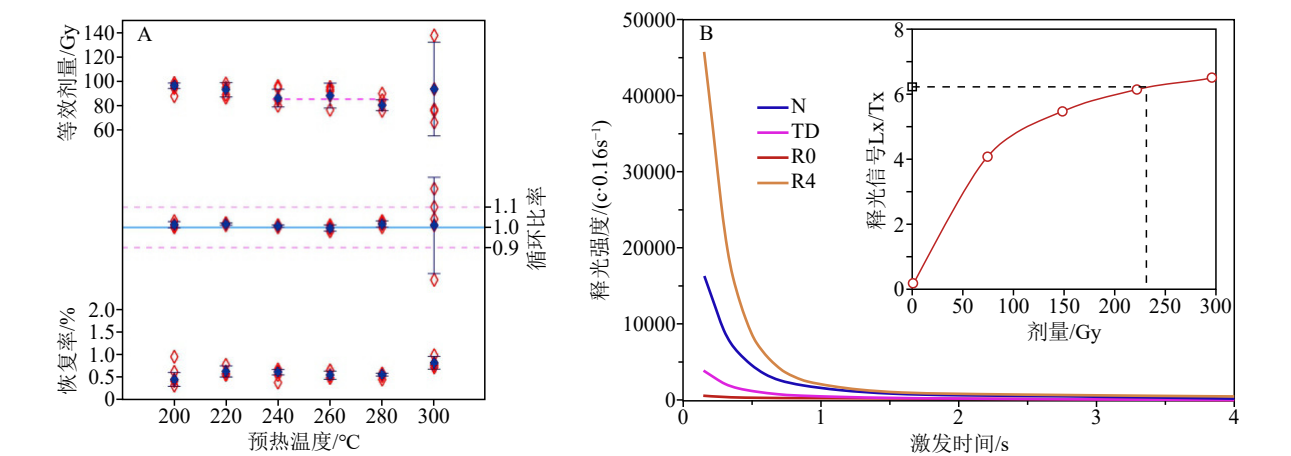


图 3 代表样品的石英光释光测年释光特征
A: 预热坪实验结果, B: TJX-3 样品释光信号衰退曲线和剂量响应曲线。
Fig.3 Luminescent characteristics of representative quartz OSL dating samples
A:Results of preheating test, B: the decay curve and dose response curve of sample JTJX-3.

表 1 坪石盆地武江 T2 阶地和古佛岩下层观音岩洞穴沉积剖面的光释光测年结果
Table 1 OSL dating results of the Wujiang T2 terrace in Pingshi Basin and the Guanyinyan cave sedimentary profile in the lower part of the Gufoyan

样品 编号	深度 /m	含水量/%	K /%	Th/ (μg/g)	U/ (μg/g)	等效剂量/Gy	环境剂量率/ (Gy/ka)	年代* /ka
JTJX-1	0.57	20±5	1.86±0.19	36.23±1.81	10.70±0.53	433±74	5.50±0.23	79±14
JTJX-2	0.90	20±5	1.95±0.20	34.11±1.71	9.04±0.45	290±47	4.98±0.21	58±10
JTJX-3	1.07	20±5	2.12±0.21	36.00±1.80	8.96±0.45	385±61	5.13±0.22	75±12
JTJX-4	1.52	20±5	2.17±0.22	32.95±1.65	8.14±0.41	475±79	4.70±0.20	101±17
GY-2	0.50	15±5	2.63±0.26	19.47±0.97	8.01±0.40	613±48	5.08±0.27	121±11
GY-3	0.80	15±5	1.60±0.16	13.63±0.68	5.09±0.25	227±27	3.26±0.17	70±9
GY-4	1.10	15±5	2.21±0.22	18.12±0.91	7.72±0.39	335±26	4.58±0.23	73±7

*因等效剂量均大于200 Gy, 表明石英光释光信号可能已接近饱和, 所测结果仅代表最小年代值。

程度的低估,是最小年代。

4 讨论

4.1 北江上游阶地与溶洞堆积物年代厘定

前人曾尝试通过¹⁴C、热释光、古地磁等测年方法建立北江上游河流阶地年龄框架^[14-15]。早期的古地磁研究表明,北江主支武江流域坪石镇 T2 阶地沉积处于正极性期,即晚于 0.78 Ma^[24],但是仍然缺乏该区域 T2 阶地的绝对年代数据。刘尚仁^[24]和黄进等^[14]报道了坪石镇一系列阶地的热释光测年结果,其中 T1 阶地砾石层的年代为 206±14~171±12 ka,河漫滩相沉积的年代为 163±11~90±6 ka,而 T3 阶地河漫滩相沉积的年代为 585±47~426±29 ka,并由

此推断 T2 阶地的形成应早于 21.4 万年^[14]。黄进等^[25]也曾报道北江另一个主支浈江上游阶地的年代,其中曲江长坝附近的浈江 T2 阶地年代为 173±11~203.0±13 ka,而其支流锦江的 T2 阶地测年结果为 239±14~314±24 ka。与本文获得的光释光测年结果相比,之前主要基于热释光的年代学框架可能存在显著的高估,其主要原因是河流沉积物未经历过加热事件,并非热释光测年的理想材料^[26]。

采自北江上游坪石镇 T2 阶地河漫滩相沉积物 4 个样品中,上部 3 个样品的年代(75±12、58±10 和 79±14 ka)在±1σ 误差范围内是一致的,而最下部的样品(JTJX-4, 101±18 ka)则显著偏老。考虑到所有样品释光信号都已接近饱和,年龄存在低估,最老的表观年龄(101±18 ka)可能更接近真实的年代,因此 JTJX 剖面的河漫滩相沉积至少形成于深海氧

同位素 5 阶段(MIS 5)(71~130 ka)。古佛岩第二层洞穴观音岩 GYY-a 剖面一个样品年代为 121 ± 11 ka, GYY-b 两个样品的年代分别为 70 ± 9 和 73 ± 7 ka, 两个剖面的年代差异显著。由于 GYY-a 位于洞穴最深处, 且海拔略高于 GYY-b, 两个剖面可能形成于 MIS 5 时期的两期洪积事件, 但也不排除二者是同一期洪积事件形成的, 其表观年龄差异是由于不同样品饱和信号不一致导致的。

本研究通过对武江流域 T2 阶地和古佛岩第二层洞穴内沉积物的光释光测年, 发现这两个位置相邻但岩性不同的区域其下切过程至少在冰期-间冰期的尺度上是基本同步的, 皆发生在 MIS5 阶段。

4.2 北江上游 T2 阶地形成期的气候条件与地貌指示意义

河流阶地是流域内构造活动和环境变迁信息的地质载体^[27-28]。构造抬升^[29-30]和气候变化^[31]均可能引发河流下切形成阶地^[32-33], 而在轨道及亚轨道尺度上构造抬升背景下气候驱动河流堆积/下切过程的观点已逐渐成为学界共识^[5,12,28,31,34-36]。目前中国的河流阶地年代学研究工作主要集中于青藏高原周边的黄河和长江上游。有学者通过光释光测年发现黄河贵德、尖扎和循化盆地 3 级阶地的年代分别为 100~80、53~40 和 21~12 ka, 均对应于冷转暖的时期^[37]。也有学者研究发现黄河一级支流湟水河末次间冰期以来形成了 7 级阶地, 且每次下切均发生在暖转冷的时期^[13,38]。近年来, 有学者在长江源头通天河段运用河流阶地光释光测年发现在 16 ka 之后, 随着气候条件好转和季风降水增加, 河流逐步下切, 形成一系列基座阶地^[39]。Yang 等^[40]结合 ^{10}Be 暴露测年和释光测年揭示祁连山洪水坝河晚第四纪以来的下切过程既可能发生在冷转暖的时期, 又发生在暖转冷的时期。此外, 澜沧江上游囊谦盆地的阶地年代学研究也显示出冰期堆积、冰消期下切的格局^[12]。Wang 等^[35]认为青藏高原东北部强烈的构造抬升为河流下切提供了足够的垂直空间, 因此相对微弱的亚轨道尺度气候波动就能够达到阈值, 引发河流下切, 从而形成新的阶地。

华南板块东部自古近纪进入构造沉寂期, 一直持续到渐新世晚期(约 25 Ma)^[41-43], 随着印度洋板块俯冲欧亚板块, 青藏高原东南缘迅速隆起, 新近纪以来华南地势逐渐从东高西低变为西高东低。南海北部的源汇对比研究表明早渐新世(约 34 Ma)北江就已形成^[41-42]。前人认为北江现存阶地的形成与第四纪以来南岭多次间歇性构造抬升相关^[15], 但构

造活动主要是打破了河流系统原有的均衡状态, 形成不均衡的瞬时地貌, 为河流持续下切提供条件和空间^[29]。在此基础上气候变化通过改变流域降水、植被覆盖度等方式影响着河流的径流和泥沙量, 从而驱动河流堆积和下切过程的转换^[33-34,44]。北江上游 T2 阶地河漫滩相沉积的年代为 MIS5 期, 为温暖的间冰期, 由于测年精度有限, 暂难以明确河流下切具体发生在气候转暖还是转冷的节点。由于南岭地区为东亚夏季风桥头堡, 季风降水的变化可能是北江河流下切的主要动力。冰期向间冰期过渡期, 季风降水增加, 地表径流量增大, 河流搬运能力增强, 同时植被覆盖增加, 坡面侵蚀减弱, 进入河流中的泥沙量减少, 较大的河流径流量与较低的沉积通量相结合可能会导致河流发生下切形成阶地。因此推测北江 T2 下切的时间可能是发生在气候转暖的时期, 即 MIS 5e 早期。

北江流域目前已发现 6 级河流阶地, 最高一级阶地或可追溯到早更新世末期^[15]。本文结果表明 T2 阶地已接近石英光释光测年的极限, 更高级阶地的年代测定可能需引入长石释光测年或宇生核素埋藏测年等新的定年手段^[18]。但北江上游高级阶地因自然侵蚀和人类活动影响, 被严重破坏, 这对年代学研究形成了很大的挑战。北江流域石灰岩地区保留了大量洞穴冲积物, 其中如英德宝晶宫等洞穴内河流沉积物的河拔高度相较上游 T6 阶地更高^[24]。这些洞穴沉积为研究北江百万年尺度的演化历史提供了新的思路。本研究的结果明确了北江流域内洞穴冲积物与河流阶地的年代对应关系, 为将来综合利用岩溶洞穴冲积物和河流阶地建立北江不同时间尺度的演化历史奠定了理论基础。

5 结论

(1) 广东北江上游坪石第二级阶地河流沉积和乐昌古佛岩第二层溶洞中冲洪积物的石英光释光测年结果表明二者均形成于 100 ka 之前, 对应于 MIS 5 阶段。这说明在北江上游砂岩区基座阶地的形成以及灰岩区洞穴冲积物的堆积可能处于同一个氧同位素阶段(MIS 5), 即北江上游在这两个不同岩性的区域的河流下切过程, 至少在冰期-间冰期的尺度上是基本同步的。这一研究为北江上游喀斯特地貌与河流地貌协同演化提供了直接的年代学证据。

(2) 北江流域尺度上洞穴冲积物与河流阶地的同步性为将来进一步揭示岩溶洞穴冲积物的地貌

学意义、重建北江更长时间尺度的演化历史提供了理论依据。

致谢: 本研究在野外考察和样品采集过程中得到了古佛岩景区管理方郭志豪等工作人员的支持和帮助,在此表示感谢!

参考文献 (References)

- [1] Harmand D, Adamson K, Rixhon G, et al. Relationships between fluvial evolution and karstification related to climatic, tectonic and eustatic forcing in temperate regions[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2017, 166: 38-56.
- [2] Rixhon G. Deeper underground: cosmogenic burial dating of cave-deposited alluvium to reconstruct long-term fluvial landscape evolution[J]. *Earth-Science Reviews*, 2023, 239: 104357.
- [3] 陈文奇, 蒋玺, 宁凡, 等. 双河洞层状溶洞与区域河流阶地发育耦合关系探析 [J]. 贵州大学学报: 自然科学版, 2020, 37(5): 46-53. [CHEN Wenqi, JIANG Xi, NING Fan, et al. Analysis of coupling relationship between multi-layer Caves in Shuanghe cave national geopark and regional fluvial terraces[J]. *Journal of Guizhou University: Natural Sciences*, 2020, 37(5): 46-53.]
- [4] Bridgland D R, Westaway R. Preservation patterns of Late Cenozoic fluvial deposits and their implications: results from IGCP 449[J]. *Quaternary International*, 2008, 189(1): 5-38.
- [5] 胡春生. 河流阶地研究进展综述 [J]. *地球环境学报*, 2014, 5(5): 353-362. [HU Chunsheng. Progress in research on river terraces[J]. *Journal of Earth Environment*, 2014, 5(5): 353-362.]
- [6] 王迎国, 常宏, 周卫健. 渭河盆地河流阶地演化及其构造—气候意义 [J]. *地质论评*, 2021, 67(4): 1033-1049. [WANG Yingguo, CHANG Hong, ZHOU Weijian. Fluvial terrace evolution and its tectonic—climatic significance in the Weihe basin[J]. *Geological Review*, 2021, 67(4): 1033-1049.]
- [7] 孔丽娟, 沈冠军, 王颖, 等. 狮子洞铀系测年与百色盆地第Ⅲ级阶地的年代 [J]. *地球与环境*, 2012, 40(3): 349-353. [KONG Lijuan, SHEN Guanjuan, WANG Wei, et al. U-Series dating of the Shizi cave and age of the third terrace of the Bubing and Baise Basins, Guangxi, China[J]. *Earth and Environment*, 2012, 40(3): 349-353.]
- [8] 樊云龙, 刘建建, 朱克卫, 等. 喀斯特峡谷河流下切速率研究: 以北盘江尼珠河大峡谷为例 [J]. *第四纪研究*, 2021, 41(6): 1558-1564. [FAN Yunlong, LIU Jianjian, ZHU Kewei, et al. Study on river down-cutting rate in karst canyon: a case study of Nizhu River grand canyon in Beipan River[J]. *Quaternary Sciences*, 2021, 41(6): 1558-1564.]
- [9] 平亚敏, 杨桂芳, 张绪教, 等. 张家界砂岩地貌形成时代: 来自阶地与溶洞对比的证据 [J]. *地质论评*, 2011, 57(1): 118-124. [PING Yamin, YANG Guifang, ZHANG Xujiao, et al. Timing of Zhangjiajie sandstone landforms: evidence from fluvial terraces and karst caves[J]. *Geological Review*, 2011, 57(1): 118-124.]
- [10] 刘尚仁, 黄瑞红, 张治邦. 广东阶地的特征 [J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 1996, 35(S1): 29-37. [LIU Shangren, HUANG Ruihong, ZHANG Zhibang. Features of Guangdong terrace[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 1996, 35(S1): 29-37.]
- [11] Xu X L, Zhong J M, Huang X M, et al. Age comparison by luminescence using quartz and feldspar on core HPQK01 from the Pearl River delta in China[J]. *Quaternary Geochronology*, 2022, 71: 101320.
- [12] Shen Q J, Zhou Y J, Xu Y T, et al. Late Quaternary river evolution and its response to climate changes in the upper Mekong River of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Geomorphology*, 2023, 442: 108920.
- [13] Lai Z P. Chronology and the upper dating limit for loess samples from Luochuan section in the Chinese Loess Plateau using quartz OSL SAR protocol[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 37(2): 176-185.
- [14] 黄进, 刘尚仁, 高全洲, 等. 粤北坪石武江阶地的研究及金鸡岭年龄的定量测算 [J]. *经济地理*, 2006, 26(S1): 1-6. [HUANG Jin, LIU Shangren, GAO Quanzhou, et al. A study of the Wujiang terraces in Pingshi, northern Guangdong Province and the quantitative estimation of the age of Jinjiling[J]. *Economic Geography*, 2006, 26(S1): 1-6.]
- [15] 刘尚仁, 黄进. 粤北地区的河流阶地: 广东河流阶地研究之三 [J]. *热带地理*, 2011, 31(1): 3-7. [LIU Shangren, HUANG Jin. The River terraces in North Guangdong[J]. *Tropical Geography*, 2011, 31(1): 3-7.]
- [16] 赖忠平, 欧先交. 光释光测年基本流程 [J]. *地理科学进展*, 2013, 32(5): 683-693. [LAI Zhongping, OU Xianjiao. Basic procedures of optically stimulated luminescence (OSL) dating[J]. *Progress in Geography*, 2013, 32(5): 683-693.]
- [17] Murray A S, Wintle A G. The single aliquot regenerative dose protocol: potential for improvements in reliability[J]. *Radiation Measurements*, 2003, 37(4-5): 377-381.
- [18] Lai Z P. Testing the use of an OSL standardised growth curve (SGC) for D_e determination on quartz from the Chinese Loess Plateau[J]. *Radiation Measurements*, 2006, 41(1): 9-16.
- [19] Wintle A G, Murray A S. A review of quartz optically stimulated luminescence characteristics and their relevance in single-aliquot regeneration dating protocols[J]. *Radiation Measurements*, 2006, 41(4): 369-391.
- [20] Guérin G, Mercier N, Nathan R, et al. On the use of the infinite matrix assumption and associated concepts: a critical review[J]. *Radiation Measurements*, 2012, 47(9): 778-785.
- [21] Prescott J R, Hutton J T. Cosmic ray contributions to dose rates for luminescence and ESR dating: large depths and long-term time variations[J]. *Radiation Measurements*, 1994, 23(2-3): 497-500.
- [22] Lai Z P, Zöller L, Fuchs M, et al. Alpha efficiency determination for OSL of quartz extracted from Chinese loess[J]. *Radiation Measurements*, 2008, 43(2-6): 767-770.
- [23] Durcan J A, King G E, Duller G A T. DRAC: Dose Rate and Age Calculator for trapped charge dating[J]. *Quaternary Geochronology*, 2015, 28: 54-61.
- [24] 刘尚仁. 北江水系的形成和发育 [J]. *中山大学学报*, 1987(2): 8-14. [LIU Shangren. Formation and development of the North River Drainage[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 1987(2): 8-14.]
- [25] 黄进, 刘尚仁, 黄瑞红, 等. 丹霞盆地河流阶地的研究 [J]. *经济地理*, 1994, 14(S1): 22-26. [HUANG Jin, LIU Shangren, HUANG

- Ruihong, et al. Study of river terraces in Danxia Basin[J]. *Economic Geography*, 1994, 14(S1): 22-26.]
- [26] Lian O B. LUMINESCENCE DATING | Thermo luminescence[M]// Elias S A, Mock C J. *Encyclopedia of Quaternary Science*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2013: 643-652.
- [27] 潘保田, 刘小丰, 高红山, 等. 渭河上游陇西段河流阶地的形成时代及其成因 [J]. *自然科学进展*, 2007, 17(8): 1063-1068. [PAN Baotian, LIU Xiaofeng, GAO Hongshan, et al. Formation age and causes of river terrace in Longxi section of the upper reaches of Weihe River[J]. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(8): 1063-1068.]
- [28] Chang Q F, Lai Z P, An F Y, et al. Chronology for terraces of the Nalinggele River in the north Qinghai-Tibet Plateau and implications for salt lake resource formation in the Qaidam Basin[J]. *Quaternary International*, 2017, 430: 12-20.
- [29] 李雪梅, 张会平. 河流瞬时代地貌: 特征、过程及其构造-气候相互作用内涵 [J]. *第四纪研究*, 2017, 37(2): 416-430. [LI Xuemei, ZHANG Huiping. Transient fluvial landscape: features, processes and its implication for tectonic-climate interaction[J]. *Quaternary Sciences*, 2017, 37(2): 416-430.]
- [30] Li J J, Fang X M, Van der Voo R, et al. Magnetostratigraphic dating of river terraces: rapid and intermittent incision by the Yellow River of the northeastern margin of the Tibetan Plateau during the Quaternary[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102(B5): 10121-10132.
- [31] Pan B T, Burbank D, Wang Y X, et al. A 900 k. y. record of strath terrace formation during glacial-interglacial transitions in northwest China[J]. *Geology*, 2003, 31(11): 957-960.
- [32] 杨景春, 李有利. 地貌学原理 [M]. 4 版. 北京: 北京大学出版社, 2017: 38. [YANG Jingchun, LI Youli. *Principles of Geomorphology*[M]. 4th ed. Beijing: Peking University Press, 2017: 38.]
- [33] Pan B T, Su H, Hu Z B, et al. Evaluating the role of climate and tectonics during non-steady incision of the Yellow River: evidence from a 1.24 Ma terrace record near Lanzhou, China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28(27-28): 3281-3290.
- [34] Bridgland D R, Westaway R. Quaternary fluvial archives and landscape evolution: a global synthesis[J]. *Proceedings of the Geologists' Association*, 2014, 125(5-6): 600-629.
- [35] Wang A, Smith J A, Wang G C, et al. Late Quaternary river terrace sequences in the eastern Kunlun Range, northern Tibet: a combined record of climatic change and surface uplift[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34(4): 532-543.
- [36] Tao Y L, Xiong J G, Zhang H P, et al. Climate-driven formation of fluvial terraces across the Tibetan Plateau since 200 ka: a review[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 237: 106303.
- [37] Guo X H, Forman S L, Marin L, et al. Assessing tectonic and climatic controls for Late Quaternary fluvial terraces in Guide, Jianzha, and Xunhua Basins along the Yellow River on the northeastern Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2018, 195: 109-121.
- [38] Wang X Y, Vandenberghe J, Yi S W, et al. Climate-dependent fluvial architecture and processes on a suborbital timescale in areas of rapid tectonic uplift: an example from the NE Tibetan Plateau[J]. *Global and Planetary Change*, 2015, 133: 318-329.
- [39] Yu Y, Wang X Y, Yi S W, et al. Late Quaternary aggradation and incision in the headwaters of the Yangtze River, eastern Tibetan Plateau, China[J]. *GSA Bulletin*, 2022, 134(1-2): 371-388.
- [40] Yang H B, Yang X P, Huang W L, et al. ¹⁰Be and OSL dating of Pleistocene fluvial terraces along the Hongshuiba River: constraints on tectonic and climatic drivers for fluvial downcutting across the NE Tibetan Plateau margin, China[J]. *Geomorphology*, 2020, 348: 106884.
- [41] Cao L C, Shao L, Qiao P J, et al. Early Miocene birth of modern Pearl River recorded low-relief, high-elevation surface formation of SE Tibetan Plateau[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 496: 120-131.
- [42] 邵磊, 乔培军, 崔宇驰, 等. 新生代早期南海北部水系演变 [J]. *科技导报*, 2020, 38(18): 57-61. [SHAO Lei, QIAO Peijun, CUI Yuchi, et al. The evolutions of the fluvial systems in the northern South China Sea since the early Cenozoic[J]. *Science & Technology Review*, 2020, 38(18): 57-61.]
- [43] Wang Y, Wang Y J, Li S B, et al. Exhumation and landscape evolution in eastern South China since the Cretaceous: new insights from fission-track thermo chronology[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2020, 191: 104239.
- [44] Vandenberghe J. River terraces as a response to climatic forcing: formation processes, sedimentary characteristics and sites for human occupation[J]. *Quaternary International*, 2015, 370: 3-11.