

福建益溪源区第四纪沉积环境及其对益溪河发展过程的指示



Pre-pub. on line: www.
geojournals.cn/georev

赵举兴¹⁾, 张书光¹⁾, 林淑珍¹⁾, 叶俊¹⁾, 张鹏²⁾, 李长安³⁾

1) 福建省煤田地质勘查院, 福州, 350005;

2) 中国科学院地球环境研究所黄土科学全国重点实验室, 西安, 710061;

3) 中国地质大学地理与信息工程学院, 武汉, 430074

内容提要: 益溪是闽江上游支流——沙溪的一级支流,其整个河谷的纵横剖面很能代表福建省河流的特征;在一定程度上,被认为是福建省河流的缩影。本次工作在益溪源区施工第四纪地质钻孔一口(GC4孔),揭露第四纪沉积物 22.4 m,通过 AMS¹⁴C、粒度和磁化率,分析了源区沉积环境。通过区域地层对比和河谷地貌特征分析,讨论了源区第四纪沉积环境及对益溪河谷地貌过程的指示。主要结论如下:① GC4孔从下到上分为5个沉积阶段:分别为河流相、湖沼相、湖相风化、山前洪积相和河流相。时代为晚更新世中期至今,在晚更新世晚期发生沉积间断。② 源区沉积环境反映了区域抬升、下降、稳定、剧烈抬升、先下降后抬升以及持续抬升的构造运动过程,益溪源区、上段和中段都有相对应的地貌表现。③ 益溪开始发育时间为晚更新世中期,河谷地貌定型于全新世中期。区内构造抬升最剧烈的时期为晚更新世晚期。

关键词: 河流源区;沉积环境;粒度;磁化率;河谷地貌

河流地貌是陆地地貌的重要组成部分。地貌演化过程记录了丰富的构造活动和气候变化信息(李长安和殷鸿福,1998;潘保田等,2005;郑洪波和贾军涛,2009;谢婉婷等,2022;王先彦和于洋,2023),同时与经济建设、人类活动密切相关(沈玉昌,1956;李吉均等,1996;许炯心等,2016)。因此,河流地貌长期备受重视,也一直是研究热点。相比于通过不同河段盆地沉积环境用来反演河流地貌过程(王书兵等,2004;季军良等,2006;Zhang Yufen et al., 2008;Craddock et al., 2010;赵希涛等,2018;Wang Licheng et al., 2021;Su Qi et al., 2023),源区的沉积环境研究工作则并不多。在以“源—汇”系统思路为指导的研究中,源区的主要工作集中在物源示踪工具的选择(Clift et al., 2006;Zhang Yufen et al., 2008;Zhang Zengjie et al., 2016;徐杰等,2019;李亚伟等,2019;Zhang Hanzi et al., 2021),也并不是源区的沉积环境。

福建省共有 600 多条河流,29 个水系。主要为

闽江、九龙江、汀江和晋江四大水系(图 1a)。河流多数流程短,形成外流区单向性格子状水系;同时具有自成流域、独立入海的水系单元,以闽江最为典型。闽江干流长度 541 km,流域面积 60992 km²,不仅是福建省最大的河流,也是我国东南沿海最大的河流(福建师范大学地理系,1987)。

沙溪是闽江上游三大支流之一,发源于武夷山脉杉岭南麓。流经永安、三明后,在南平汇入闽江(福建师范大学地理系,1987)。益溪是沙溪的一级支流(图 1a),由于,其整个河谷的纵横剖面很能代表福建省河流的特征,同时,流域内地层发育较齐全,构造类型较丰富,在一定程度上,益溪被认为是福建省河流的缩影(余泽忠等,1963),在福建省的河流研究中具有重要意义。

20 世纪 60 年代,福建师范大学余泽忠等对益溪河谷的范围、地貌特征及地质基础进行了系统研究(余泽忠等,1963),成果沿用至今。受当时条件所限,并没有进行年代学和沉积学研究。此后,1:5

注:本文为山东省专项经费(编号:LSKJ202203300)、2023 年度黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金课题(编号:SKLLQG2328)和福建省自然科学基金(编号:2021J01349)的成果。

收稿日期:2024-07-19;改回日期:2024-12-25;网络首发:2025-01-20;责任编辑:李明,章雨旭。Doi:10.16509/j.georeview.2025.01.052

作者简介:赵举兴,男,1986 年生,高级工程师,主要从事第四纪地质与水工环地质的调查与研究;Email:zhaojuxing1986@126.com。通讯作者:张鹏,男,1987 年生,副研究员,主要从事环境磁学与古气候学研究;Email:zhangpeng@ieecas.cn。

下段,长 9.8 km。河谷较宽,平均纵比降 3.0% (余泽忠等,1963)。

上段流域切割剧烈,海拔>400 m,流域内最高峰牛角岭(海拔 996.3 m)位于该段西南。出露东坑口群(ϵ_4dn)、魏坊组(O_{1w})和罗峰溪组(O_{2-3l})等下古生界地层,岩性主要为千枚岩、千枚状粉砂岩及变质中细粒石英砂岩。中段流域海拔 450~200 m,出露泥盆系一二叠系。其中天瓦寨组(D_{3t})、桃子坑组(D_{3tz})和林地组(C_{1l})为千枚状粉砂岩、泥页岩及石英砂砾岩;船山组(P_{1c})和栖霞组(P_{2q})为纯微晶灰岩和含燧石微晶灰岩;文笔山组(P_{2w})为泥页岩和粉砂岩。此外,中段开始发育大面积第四系沉积,多表现为混杂堆积的山前洪积相。下段流域海拔 560~180 m,主要为侏罗系—白垩系地层及晚侏罗世花岗岩。其中南园组(J_{3n})和坂头组(K_{1b})为凝灰岩及凝灰质砂岩,沙县组(K_{2s})和崇安组(K_{2c})为砂岩和砂砾岩。该段第四系为河流沉积物,多具二元结构,下部为砂、砂砾石,上部为粉质黏土、黏土质粉砂等细粒沉积物(朱玉磷^①;赵举兴^②)(图 1b)。

益溪流域褶皱、断裂构造发育且复杂。上段下古生界地层分布受控于复式背斜;中、下段背斜与向斜交替发育,后被断层改造,因此,形成飞来峰以及出现南园组(J_{3n})和坂头组(K_{1b})不整合于船山组(P_{1c})之上的沉积序列。区内断层主要为北西向和北东向两组,北西向断层处多有河流发育(图 1)。

2 钻孔岩性及沉积环境概述

GC4 孔位于益溪源区、永安市大湖镇坪尾村,地理坐标 26°13'67"N,117°26'94"E,地表高程为海拔 456.4 m(图 1)。钻孔深 54.8 m,第四纪松散沉积层厚 22.4 m,下伏罗峰溪组千枚状粉砂岩 32.4 m。钻孔直径 130 mm,每钻进尺 1~2 m,个别砂砾石层单次取芯率为 90%,其余回次单次取芯率均为 100%。

GC4 孔第四系由 24 个自然沉积层组成。按照颜色、岩性和内含物特征,可划分为 9 个岩性层,岩性自上向下简述如下:

1. 人工填土。厚 0.4 m
2. 浅褐色黏土质粉砂。厚 0.2 m
3. 灰黄—褐黄色黏土质粉砂,底部见砾石,砾石分选好,粒径 1 cm 左右,磨圆以次圆为主,岩性为粉砂岩及硅质岩,砾石未见风化。厚 1.0 m
4. 褐红色黏土质粉砂。厚 0.8 m
5. 褐黄色砾石层,砾石分选差,粒径 1~3 cm 占 80%,最大粒径 11 cm,磨圆以次棱为主,岩性为粉砂岩及硅

质岩,砾石存在一定程度风化。厚 0.9 m

6. 红色—青灰色黏土质粉砂互层,顶部取样¹⁴C-1,底部取样¹⁴C-2。厚 3.35 m

7. 青灰色与深褐色黏土质粉砂互层。青灰色粉砂层偶见古树树枝碎屑,未见树皮碎屑;深褐色粉砂层含大量古树树皮及树枝碎屑。8.0 m、9.9 m 和 14.1 m 处见完整树干,分别厚 40 cm、40 cm 和 20 cm。树干呈平卧状,其倒伏面与地层层理平行。该层顶部取样¹⁴C-3,9.9 m 处取树干为¹⁴C-4,底部取样¹⁴C-5。厚 13.55 m

8. 褐黄色粉砂。厚 2.0 m

9. 褐黄色泥质砾石层,砾石层粒径总体 3~5 cm,最大者 11 cm,磨圆以次圆为主,岩性为粉砂岩及硅质岩,粉砂岩风化强烈,锤击易碎。厚 0.2 m

-----假整合-----

下伏地层:罗峰溪组千枚状粉砂岩

依据沉积物颜色和岩性组合,可将 GC4 孔从下到上分为 5 个沉积阶段。阶段 I 由第 9 和 8 岩性层组成,河流相沉积。阶段 II 为第 7 岩性层,由 8 期青灰色—深褐色黏土质粉砂的沉积旋回构成,湖沼相沉积。阶段 III 为第 6 岩性层,红色—青灰色黏土与黏土质粉砂互层,亦称为花斑状黏土。阶段 IV 由第 5 和 4 岩性层组成,山前洪积相沉积。阶段 V 由第 3 和 2 岩性层组成,河流相沉积(图 2)。

3 样品采集与测试

3.1 年代学

GC4 孔共采集 5 件¹⁴C 样品用于年代学研究。¹⁴C-1 和¹⁴C-2 取自第 6 岩性层(花斑状黏土质粉砂)顶部和底部,¹⁴C-3~5 分别取自沉积阶段 II 的顶部、中部和底部。

¹⁴C-1—¹⁴C-2 测试由中国地质科学院水文地质环境地质研究所第四纪年代实验室完成,¹⁴C-3—¹⁴C-5 由迈阿密 BETA 实验室完成。测试仪器均为 NEC 加速器质谱仪。¹⁴C-3—¹⁴C-5 常规年龄均远大于 43.50 ka BP,校正年龄均远大于 46.60 ka BP(表 1)。

3.2 粒度

GC4 孔共采集综合样品 158 件进行粒度和磁化率分析。其中第 5 层(褐黄色砾石层)样品取自细粒沉积物;填土层和第 9 岩性层(褐黄色泥质砾石层)、5 个¹⁴C 样品段和 3 层古树树干段未取样品;第 8 岩性层(褐黄色粉砂层)取综合样品 3 件;其余样品以 10 cm 等间距连续采样。

粒度测试在南京师范大学地理科学学院完成,使用仪器为英国产 Malvern Mastersizer 2000 型激光

表 1 福建永安市益溪源区 GC4 孔 AMS¹⁴C 测试结果Table 1 AMS¹⁴C dating of the borehole GC4 in the source area of the Yixi River, Yong'an, Fujian

样号	深度 (m)	测试材料	现代碳比值 (Fm 值)	样品重量 (g)	¹⁴ C	¹⁴ C 年龄 (ka BP)	±
¹⁴ C-1	3.7	黏土	0.467	300	-537.4	6.19	0.06
¹⁴ C-2	6.4	黏土	0.221	300	-778.5	12.11	0.08
¹⁴ C-3	6.8	树枝碎屑	<0.0044	200	<-995.6	>43.50	—
¹⁴ C-4	14.2	木头	<0.0044	200	<-995.6	>43.50	—
¹⁴ C-5	20.0	黏土	<0.0044	300	<-995.6	>43.50	—

表 2 福建永安市益溪源区 GC4 孔粒度 (φ) 组成与磁化率

Table 2 Grain size (φ) composition and magnetic susceptibility of the borehole GC4 in the source area of the Yixi River, Yong'an, Fujian

岩性层	统计	粒级 (%)				粒度参数				体积磁化率 (×10 ⁻⁶ SI)	质量磁化率 (×10 ⁻⁸ m ³ /kg)
		<4(φ)	4~6(φ)	6~8(φ)	>8(φ)	Mz (φ)	SK	KG	σ		
2 层浅褐色黏土质粉砂 (n=2)	均值	7.45	32.51	40.79	19.25	6.49	0.04	1.06	0.69	29.12	4.09
	最小值	6.39	32.47	40.65	18.29	6.41	0.01	1.03	0.69	26.27	3.90
	最大值	8.51	32.56	40.94	20.21	6.58	0.06	1.08	0.70	31.97	4.28
3 层灰黄—褐黄色黏土质粉砂 (n=10)	均值	7.10	30.29	42.51	20.10	6.53	0.00	1.09	0.70	75.72	10.39
	最小值	3.68	27.60	36.85	17.02	6.03	-0.18	1.00	0.66	33.19	5.13
	最大值	13.09	33.88	45.39	22.98	6.81	0.05	1.41	0.72	158.20	20.56
4 层褐红色黏土质粉砂 (n=6)	均值	4.51	29.08	49.89	16.52	6.61	0.03	1.16	0.76	49.44	7.32
	最小值	3.24	26.96	47.59	15.14	6.51	0.00	1.12	0.75	38.74	6.07
	最大值	5.70	30.89	52.66	17.44	6.71	0.07	1.21	0.77	57.59	8.67
5 层褐黄色砾石层 (n=9)	均值	11.77	29.72	40.88	17.63	6.27	-0.04	1.08	0.67	19.68	2.82
	最小值	3.52	27.61	34.44	14.93	5.68	-0.14	0.98	0.58	5.58	0.70
	最大值	23.03	31.47	47.70	20.22	6.75	0.07	1.23	0.74	31.83	4.57
6 层红色—青灰色黏土质粉砂互层 (n=29)	均值	5.54	25.45	47.82	21.19	6.73	0.05	1.09	0.73	20.37	3.89
	最小值	0.00	12.34	35.17	14.14	5.54	-0.24	0.93	0.57	5.54	0.77
	最大值	23.78	35.00	64.89	30.54	7.27	0.19	1.44	0.82	121.30	31.56
7 层青灰色黏土质粉砂 (n=58)	均值	3.20	28.00	49.55	19.26	6.74	0.09	1.10	0.75	18.20	3.20
	最小值	0	20.40	33.52	12.83	5.89	-0.14	0.9	0.6	2.7	0.85
	最大值	19.34	46.86	59.25	31.4	7.29	0.21	1.55	0.8	37.08	6.77
7 层深褐色黏土质粉砂 (n=41)	均值	5.47	30.35	47.19	16.99	6.53	0.04	1.11	0.73	14.46	3.01
	最小值	0.09	23.42	31.85	9.96	5.36	-0.24	0.97	0.61	-3.87	-1.38
	最大值	22.83	42.48	57.86	26.02	7.09	0.20	1.52	0.8	45.08	8.98
8 层褐黄色粉砂 (n=3)	均值	31.56	24.03	32.20	12.21	5.03	-0.14	0.87	0.40	72.97	9.26
	最小值	14.22	17.54	25.56	10.00	4.27	-0.23	0.62	0.18	20.33	3.39
	最大值	46.90	31.43	40.04	14.31	5.92	-0.03	1.25	0.67	170.3	20.18

注: n 为样品数量; 粒度 φ 与粒径的关系为: $\frac{d}{\varphi} = -\log_2\left(\frac{d}{\text{mm}}\right)$ 。

粒度仪, 粒度测试范围为 0.01~2000 μm, 重复测量相对误差小于 2%。粒度测试方法参照文献 (李长安等, 2010)。

3.2.1 粒度组成

以粒度 (d) 为 4φ、6φ 和 8φ 分别作为砂/粗粉砂、粗粉砂/细粉砂及细粉砂/黏粒的分界线 (曹伯勋, 1995), 粒度参数具有以下特征。

阶段 I 粒度以粉砂级组分为主, 砂组分次之, 黏粒组分远小于砂组分; 岩性为砂质粉砂。阶段 II—V 粒度组成以粉砂级组分为主, 绝大部分样品黏粒

组分次之, 砂级组分最少; 极个别样品砂级组分次之, 黏粒组分最少。阶段 II—V 岩性为黏土质粉砂。

阶段 II 青灰色黏土质粉砂中砂级组分 (3.20%) 和粗粉砂级组分 (28.00%) 的平均含量均小于深褐色黏土质粉砂 (5.47% 和 30.35%), 表明青灰色—深褐色黏土质粉砂的沉积旋回为逆粒序结构。

阶段 III 花斑状黏土质粉砂粒度组成与阶段 II 黏土质粉砂接近, 其砂级和粗粉砂级组分有向上逐渐

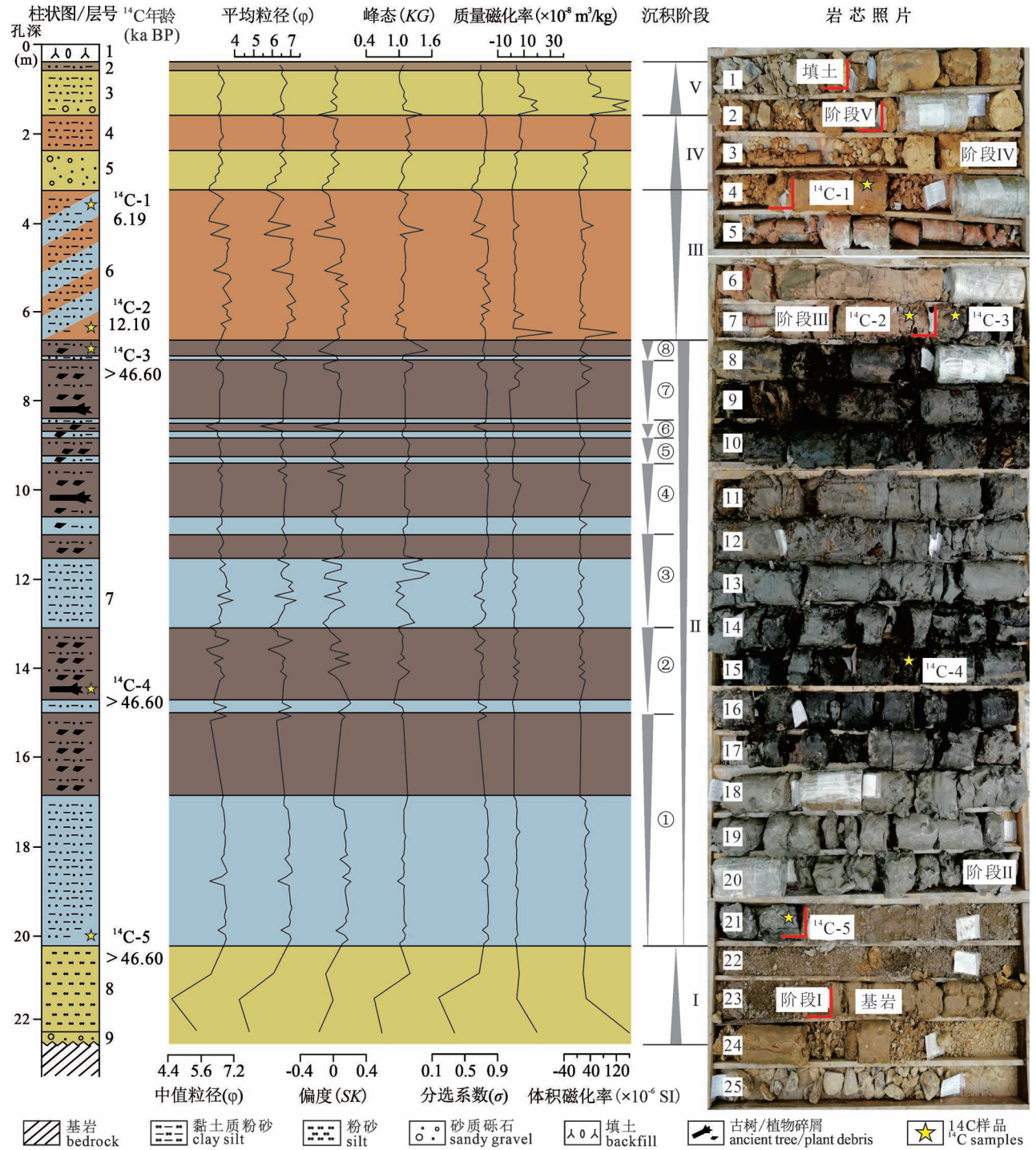


图2 福建永安市益溪源区 GC4 孔综合柱状图

Fig. 2 Integrated stratigraphy of the borehole GC4 in the source area of the Yixi River, Yong'an, Fujian

增加的趋势。阶段IV黏土质粉砂的砂级和粗粉砂级组分相对于砾石层中细粒沉积物含量减少。阶段V整体情况与阶段IV接近(表2)。

3.2.3 粒度参数

根据 Folk 和 Ward (1957) 的算法公式计算平均

粒径 (Mz)、偏度 (SK)、峰态 (KG) 和分选系数 (σ)。

钻孔整体平均粒径 (Mz) 较细。从 Mz 可看出阶段II青灰色 (6.74 φ)—深褐色 (6.53 φ) 黏土质粉砂由细到粗的逆粒序特征表现明显。

钻孔整体偏度 (SK) 与岩性密切相关。阶段 I 砂质粉砂层和阶段 IV 砾石层细粒沉积物都为负偏, 其余岩性层为正偏。除阶段 I 砂质粉砂层峰态 (KG) < 1.00 外, 其余岩性层峰态 (KG) 均值都在 1.00~1.20, 且变化不大。以 0.50 和 0.71 作为分选好/较好和较好/中等的分界线 (Folk and Ward, 1957), 阶段 I 砂质粉砂层分选好 (均值 0.40), 阶段 I 砂质粉砂层 (0.69) 和阶段 V 两个岩性层 (浅褐色黏土质粉砂和灰黄色黏土质粉砂) 分选较好 (0.69 和 0.70), 其余岩性层分选均为中等 (0.73~0.76) (表 2, 图 2)。

3.3 磁化率

磁化率测试在中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院岩石磁学实验室中完成, 使用仪器为捷克产 HKB-3 型卡帕桥, 灵敏度为 2×10^{-8} SI, 且部分样品进行了重复测试, 重复测试相对误差 $\leq \pm 0.5\%$ 。磁化率测试方法参照文献 (张玉芬等, 2021)。

质量磁化率范围为 $-1.38 \times 10^{-8} \sim 20.18 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。河流相沉积的阶段 I ($9.26 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$)、IV ($4.70 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$) 和 V ($9.34 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$) 明显大于湖沼相沉积的阶段 II ($3.89 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$)。但质量磁化率总体变化不大。体积磁化率与质量磁化率变化特征相近。

4 讨论

4.1 GC4 孔年代序列

^{14}C 测试结果显示, GC4 孔 0.4~6.65 m 的时代为 12.11 ka BP 至今, 6.65~22.4 m 年龄均远大于 46.60 ka BP。 $^{14}\text{C}-2$ (6.4 m, 12.11 ka BP) 和 $^{14}\text{C}-3$ (6.8 m, >46.60 ka BP) 表明在 6.65 m 即阶段 II 和阶段 III 的界线处存在沉积间断。该沉积间断在岩性上也有体现。阶段 II 是青灰色—深褐色湖沼相沉积旋回, 阶段 III 的花斑状黏土本质为一套厚层状风化壳 (详见 4.2)。虽然, 两者在岩性上均表现在黏土质粉砂, 平均粒径 (M_z) 显示阶段 III (6.73 ϕ) 小于阶段 II 中的深褐色 (6.53 ϕ) 黏土质粉砂 (表 2); 且花斑状黏土逐渐变粗的趋势也是深褐色黏土质粉砂不具备的特征。

6.65~22.4 m 的年代可通过区域地层对比获得。本次工作在益溪流域上段和中段共收集 17 个钻孔, 以进行过年代学研究、沉积序列清晰、分属不同次级流域单元为原则, 挑选其中 7 个钻孔与 GC4 孔进行区域地层对比 (图 1b)。

三明地区第四系主要为龙海组 ($Q_{p3}l$) 和小陶组 (Q_{hx})。龙海组时代为晚更新世, 广泛分布于河谷两岸及山间盆地。地貌上呈二级阶地或山前洪积扇。小陶组时代为全新世, 地貌上呈一级阶地及漫滩 (赵举兴等, 2022)。

通过 ^{14}C 测试结果和地层对比, 认为 GC4 孔 0.4~6.65 m 的时代为 12.10 ka BP 至今; 考虑到龙海组下伏同安组 ($Q_{p2}t$) 的时代为中更新世—晚更新世早期 (赵举兴等, 2022; 聂春童, 2023), GC4 孔 6.65~22.4 m 的时代为晚更新世中期较为合理 (图 3)。

^{14}C 测试结果显示 GC4 孔的中、下部年龄大于 46.60 ka BP, 超过了 ^{14}C 测试的上限。今后如进行更细致的年代学工作, 可在阶段 II 的深褐色黏土质粉砂和阶段 I 的粉砂中补充光释光测试。地层对比结果认为 6.65~22.4 m 的时代为晚更新世中期, 属于光释光测试的范围 (Xu Xiaolin, 2020; 郭力菲等, 2024)。

4.2 GC4 孔沉积环境与沉积过程

阶段 I 为典型河流相二元结构, 砾石层粒径总体较小以及上覆的粉砂层表明水动力条件较弱, 表明益溪刚开始发育。砾石层中砾石磨圆较差、分选较差以及砾石成份与周边基岩一致表明坪尾所在的山间小盆地就是益溪的源区。源区断陷盆地的形成就在这个时期。

阶段 II 是由 8 期青灰色—深褐色黏土质粉砂的旋回构成湖沼相沉积。沉积旋回方面, 第 ① 期和 ③ 期旋回中青灰色粉砂厚度大于深褐色粉砂, 其余期次青灰色粉砂厚度均远小于深褐色粉砂; 此外, 从下到上沉积旋回变化明显加快。沉积物方面, 青灰色粉砂中不含或偶见植物残体, 类型为树枝碎屑, 未见树皮碎屑, 深褐色粉砂中含大量古树树皮及树枝碎屑, 第 ②、④ 和 ⑤ 期中还出现了完整的树干, 树干纹路垂直于钻机钻进方向, 说明古树倒伏面与地层层理平行的产状 (图 2)。

构造和气候是内陆湖盆变动的两个主要影响因素。构造下降造成湖泊蓄水扩张, 形成湖相沉积; 构造抬升则导致湖水外泄和湖面萎缩, 形成沼泽相沉积 (胡小猛和杨景春, 2001)。在构造稳定时期, 当气候温暖湿润, 降水量大, 同期湖泊面积扩大, 沉积物以青和青灰色细粒的黏土质沉积为主, 磁化率值一般偏低。当气候干燥寒冷, 降水量小, 同期湖泊面积缩小, 但突发性的强降水过程, 沉积物以浅红和褐黄色较粗粒的砂质沉积为主, 磁化率值一般偏高 (张振克等, 1998; 杨晓强和李华梅, 1999, 2000; 张玉

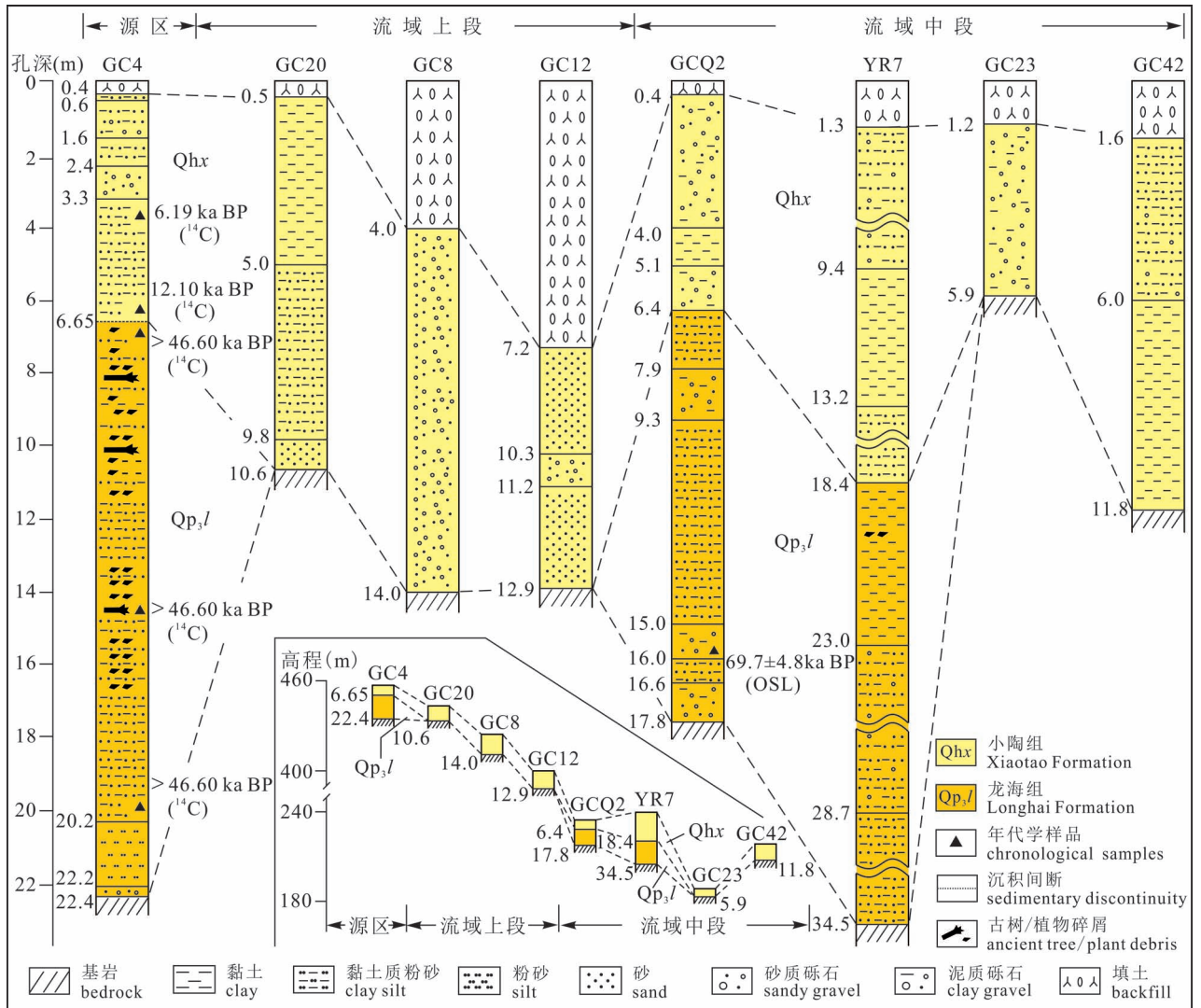


图3 益溪流域第四系划分与对比(钻孔 GC20、GC8、GC12、GCQ2、GC23 和 GC42 来源为赵举兴^②; YR7 来源为赵举兴^①)

Fig. 3 Division and correlation of Quaternary in the Yixi River drainage (borehole GC20, GC8, GC12, GCQ2, GC23 and GC42 from Zhao Juxing^②, YR7 from Zhao Juxing^①)

芬等,2005;舒强等,2009;Dong Jin et al.,2013)。

根据区域地层对比(图3)和前文的年代框架,推断该段沉积物为晚更新世龙海组。如果构造是影响该段沉积的主要因素,那么在区域上都应该有相应的沉积响应。即流域上段由洋坑、李坊、吴坊等自然村组成的串珠状的河谷盆地应该有龙海组沉积。而位于上述几个自然村 GC20、GC8 和 GC12 钻孔均没有揭露到龙海组,钻孔的地层结构全部为全新世小陶组不整合于下伏基岩。据此认为构造作用并不是该段沉积形成的主要因素。

从粒度特征来看,青灰色粉砂粒径(M_z 值 6.74 ϕ)略小于深褐色粉砂(M_z 值 6.53 ϕ)同样可以用气候变化解释。特别是 GC4 孔所在源区为山间小

盆地,面积仅约 2 km²,沉积物粒度的粗细是由流域降雨量或径流量的大小决定的。粒度粗表明地表侵蚀和搬运能力强,代表降雨量相对较大的湿润气候年份;反之,粒度细代表了降雨量相对较小的干旱气候年份(张玉芬,2021)。即相对干旱的气候条件下形成湖相沉积,在更加湿润的条件下形成沼泽。含有植物碎屑、埋藏古树树干的深褐色黏土更直观反映了气温高、降水充足的气候条件(朱诚等,1997;夏正楷等,2002;张强等,2003;孙艳荣等,2007)。GC4 孔磁化率总体变化不大,但也表现出更加温暖湿润的气候条件下,磁化率值更低的特征。即体积磁化率和质量磁化率在深褐色粉砂(14.46×10^{-6} SI 和 3.01×10^{-8} m³/kg)中均低于青灰色粉砂(18.20

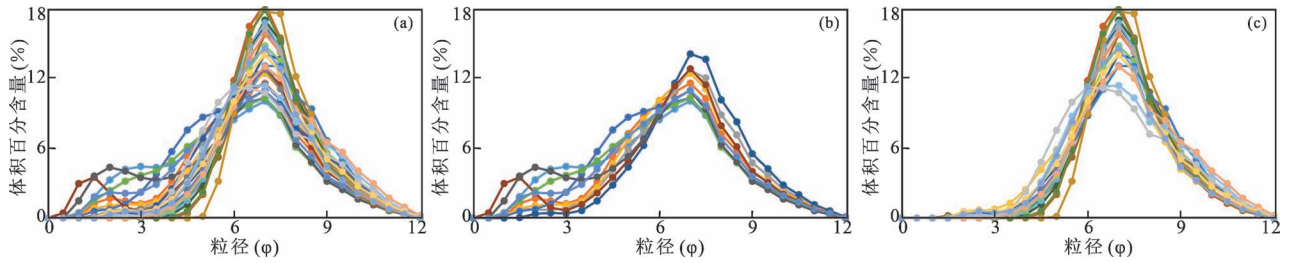


图4 福建永安市益溪源区 GC4 孔阶段Ⅲ 粒度频率曲线

Fig. 4 Frequency curves of the core GC4 in stage III in the source area of the Yixi River, Yong'an, Fujian

(a) 花斑状黏土质粉砂 (样品数量 29 件); (b) 花斑状黏土质粉砂层上部 (28~37 号样品);

(c) 花斑状黏土质粉砂层下部 (38~56 号样品)

(a) Graniphyric clay silt (29 samples); (b) upper part of graniphyric clay silt (samples numbers are 28~37);

(c) lower part of graniphyric clay silt (samples numbers are 38~56)

$\times 10^{-6}$ SI 和 3.20×10^{-8} m^3/kg 。

需要注意的是本阶段第①期旋回中的湖相沉积。该层厚 3.55 m, 厚度远大于其他 7 个旋回的湖相沉积。该层沉积物处于阶段 I 到阶段 II 过渡期, 其形成构造应是主要原因。构造抬升引起河流下切是阶段 I 的主要地貌过程, 此后构造下降, 坪尾一带由河流相转变为湖相。之后构造进入稳定期, 在气候变化的主导下, 完成了阶段 II 的沉积过程。阶段 II 初期形成的断陷湖是外流湖泊, 此时益溪仍在发育。由于外流湖泊水流动力较小, 流域上段都没有沉积龙海组地层 (图 4)。进入流域中段后, 海拔从上段的 >400 m 直降至中段的 200 m。因此, 中段的 GCQ2 和 YR7 都揭露了 >10 m 的龙海组地层。

阶段 III 为厚 3.35 m 的花斑状黏土质粉砂。花斑状黏土是珠江三角洲第四纪沉积物的标志层 (黄镇国, 1982; 黄镇国和蔡福祥, 2007; 韦惺和吴超羽, 2011; 韦成龙等, 2015), 年代 > 75 ka (林鹏辉等, 2023), 成因为海相地层抬升后风化的结果 (黄镇国等, 1982)。GC4 孔该段花斑状粉砂质黏土与珠江三角洲花斑状黏土具有相似成因, 是湖相沉积后经风化改造的产物。从上到下粒度逐渐变细 (图 2) 和粒度频率曲线由双峰逐渐变化至单峰 (图 4) 都是风化作用对粒度影响的表现。即先沉积的沉积物风化时间最长, 粒度最细; 后沉积的沉积物风化时间相对较短, 粒度相对更粗 (赵举兴等, 2020)。

阶段 II 第⑧期沼泽沉积结束后至阶段 III 的花斑状黏土质粉砂, 中间缺失了晚更新世晚期的沉积物。原因为构造抬升, 源区由沉积转为剥蚀, 因此, 没有保留相应的沉积。进入晚更新世末期, 构造转为下降, 开始沉积阶段 III 的湖相地层, 直至全新世中期 (6.19 ± 0.06 ka BP) 结束。此后构造再次抬升,

湖相沉积暴露出地表, 在风化作用下形成花斑状黏土质粉砂。

阶段 IV 为山前洪积成因, 粒度最粗, 沉积物为全新世小陶组。在粒度特征方面表现的更加明显, M_z 值 6.27ϕ , 是所有沉积阶段中的最小值; M_z 值 $< 4 \phi$, 占比 11.77%, 远大于其他沉积阶段。从该阶段开始, 益溪逐渐稳定, 上段的其他河谷盆地中开始沉积全新世沉积物。

此后构造持续抬升, 发育了阶段 V 为河流相沉积。但此时益溪由下切转向侧蚀, 因此该阶段的粒度小于阶段 IV。

4.3 GC4 孔对益溪河流地貌的指示

GC4 孔沉积环境和沉积过程与益溪上段和中段的河谷地貌 (余泽忠等, 1963) 具有清晰的响应 (图 5)。

晚更新世中期的两个阶段表现如下。阶段 I 构造抬升。源区形成断陷盆地, 益溪发育。上段和中段开始发育河谷, 其中, 上段以侵蚀剥蚀为主, 中段除侵蚀外, 也开始沉积。阶段 II 构造下降后逐渐稳定。源区形成湖盆后历经扩张与收缩, 在剥蚀和堆积作用下, 形成了 13.55 m 厚的湖沼相沉积。上段仍以剥蚀为主; 发育宽谷, 以吴坊一带为代表 (图 1)。中段除宽谷外, 还发育河曲, 以坑口以下桃子坑组 (D_3tz) 地层中的河曲最为明显。

源区晚更新世晚期的沉积间断是构造剧烈抬升的结果。上段表现为洋坑至李坊、李坊以下的峡谷发育, 中段桃子坑组 (D_3tz) 地层中深切河曲发育。这一时期, 益溪干流以侵蚀为主, 因此上段流域没有保留晚更新世沉积物。同时, 随着牛角岭的抬升 (余泽忠等, 1963), 干流南侧的支流携带大量沉积物进入大湖盆地, 沉积了 >10 m 的以山前洪积相为

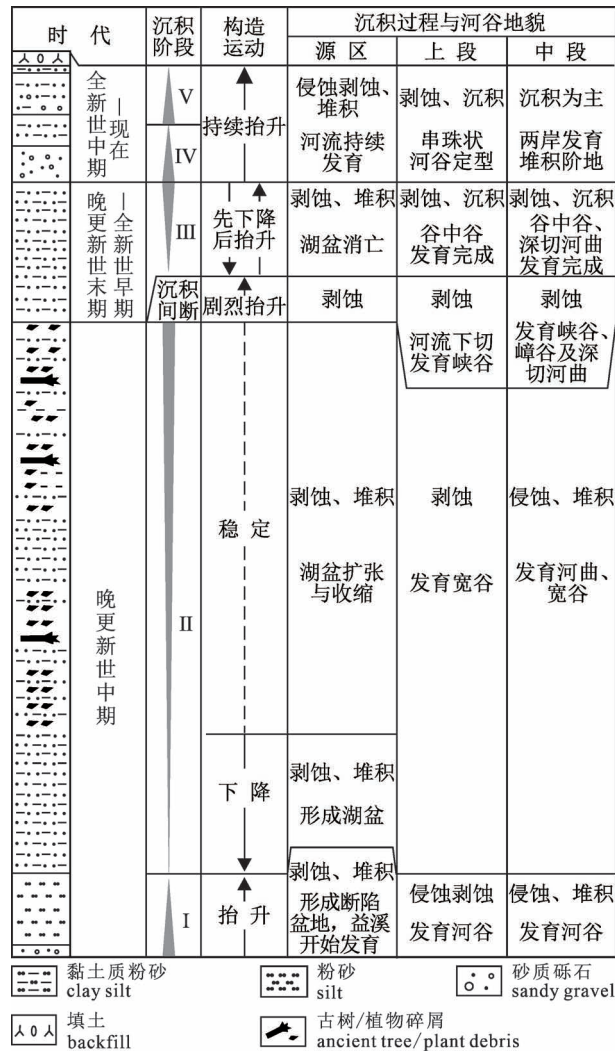


图5 福建永安市益溪源区第四纪沉积环境对河谷地貌的响应

Fig. 5 Response of Quaternary sedimentary environment in source region to the valley geomorphology in the source area of the Yixi River, Yong'an, Fujian

主的龙海组地层。

晚更新世末期—全新世早期,源区构造下降后再抬升,湖盆消亡。上段和中段在晚更新世晚期发育的峡谷、嶂谷及深切河曲发育完成,形成谷中谷。该阶段结束后,益溪河谷地貌基本定型。全新世中期至今,源区仍在持续抬升,但剧烈程度已大大降低。上段河流由下切转为侧蚀,洋坑、李坊、吴坊等山间盆地形成;上段的串珠状河谷地貌定型。中段河谷两岸发育堆积阶地。

5 结论

本次工作对益溪源区 GC4 孔进行了系统的年

代学和沉积学工作。通过区域地层对比和河谷地貌特征分析,讨论了源区第四纪沉积环境及对益溪河谷地貌过程的指示。主要结论如下:

(1) GC4 孔从下到上分为 5 个沉积阶段:分别为河流相、湖沼相、湖相风化、山前洪积相和河流相。时代为晚更新世中期至今,在晚更新世晚期发生沉积间断。

(2) 源区沉积环境反映了区域抬升、下降、稳定、剧烈抬升、先下降后抬升以及持续抬升的构造运动过程。对应的河谷地貌过程如下。源区:形成断陷盆地→形成湖盆及湖盆的扩张与收缩→湖盆消亡及河流持续发育。上段:发育河谷→发育宽谷→发育峡谷→发育谷中谷→串珠状河谷定型。中段:发育河谷→发育河曲、宽谷→发育深切河曲及峡谷→发育谷中谷→河谷两岸发育堆积阶地。

(3) 益溪开始发育时间为晚更新世中期,河谷地貌定型于全新世中期。区内构造抬升最剧烈的时候是晚更新世晚期。

致谢:福建省煤田地质局王仁山教授和福建省煤田地质勘查院邓瑞锦教授在论文写作过程中多次与作者交流探讨,福建省 196 地质大队张涛高级工程师协助野外样品采集,在此一并表示感谢。

注 释 / Notes

- ① 朱玉麟,李金华,邱盛安等. 1988. 中华人民共和国区域地质调查报告(1:5 万安砂幅、贡川幅). 福建三明:福建省地矿局闽西地质大队.
- ② 赵举兴,罗序琪,江晓龙等. 2019. 中华人民共和国水文地质图说明书(1:5 万贡川幅). 福州:福建省煤田地质勘查院.
- ③ 赵举兴,罗序琪,江晓龙等. 2020. 三明城市地质调查岩溶地质调查与岩溶塌陷防治对策专题成果报告. 福州:福建省煤田地质勘查院.

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)
- 曹伯勋. 1995. 地貌学与第四纪地质学. 武汉:中国地质大学出版社: 1~288.
- 福建师范大学地理系. 1987. 福建自然地理. 福州:福建人民出版社: 1~208.
- 郭力菲,潘宝林,王均平,程馨琳,杨勇,周锐,刘秀英,蔡卓昀. 2024. 晚中更新世以来武威盆地沉积特征——基于 wv3 钻孔的释光年代学研究. 地质论评, 70(5): 1689~1708.
- 胡小猛,杨景春. 2001. 临汾盆地末次间冰期以来地貌演化的构造和气候响应. 地质力学学报, 7(2): 176~180.
- 黄镇国,李平日,张仲英,李孔宏,乔彭年. 1982. 珠江三角洲形成发育演变. 广州:科学普及出版社广州分社: 1~274.
- 黄镇国,蔡福祥. 2007. 珠江口晚第四纪埋藏风化层及其环境意义. 第四纪研究, 27(5): 828~833.

- 季军良, 郑洪波, 李盛华, 黄湘通. 2006. 山西平陆黄河阶地与古三门湖消亡、黄河贯通三门峡时代问题的探讨. 第四纪研究, 26(4): 665~672.
- 李长安, 殷鸿福, 于庆文, 黄长生. 1998. 昆仑山东段的构造隆升、水系响应与环境变化. 地球科学—中国地质大学学报, 23(5): 456~459.
- 李长安, 张玉芬, 袁胜元, 邵磊, 江华军, 周耀, 牛志军, 赵小明, 涂兵. 2010. “巫山黄土”粒度特征及其对成因的指示. 地球科学—中国地质大学学报, 35(5): 879~884.
- 李吉均, 方小敏, 马海洲, 朱俊杰, 潘保田, 陈怀录. 1996. 晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆起. 中国科学(D辑), 26(4): 316~322.
- 李亚伟, 李长安, 张玉芬, 林旭, 王节涛, 孙习林, 魏传义, 郭汝军, 冷勇辉. 2019. 长江流域碎屑锆石 U-Pb 年龄物源示踪研究进展. 地震地质, 41(2): 521~544.
- 林鹏辉, 李宏卫, 詹玮琪, 凌息, 宋盈瑾, 徐晓琳, 赖忠平. 2023. 晚更新世以来珠江三角洲钻孔年代及沉积演化. 地质论评, 69(增刊1): 333~335.
- 聂春春. 2023. 晋江深沪湾一带中更新统同安组地质特征及成因探讨. 福建地质, 42(1): 12~18.
- 潘保田, 王均平, 高红山, 管清玉, 王勇, 苏怀, 李炳元, 李吉均. 2005. 河南扣马黄河最高级阶地古地磁年代及其对黄河贯通时代的指示. 科学通报, 50(3): 255~261.
- 沈玉昌. 1956. 汉水河谷的地貌及其发育史. 地理学报, 22(4): 296~323.
- 舒强, 李才林, 赵志军, 陈晔, 张茂恒, 李吉均. 2009. 苏北盆地浅钻沉积物磁化率与粒度记录的末次冰消期以来的环境变化. 沉积学报, 27(1): 111~117.
- 孙艳荣, 崔海亭, 刘鸿雁, 李平日, 谭惠忠. 2006. 埋藏古木的树轮碳同位素作为古气候变化代用指标的可能性. 地球学报, 27(6): 577~582.
- 王书兵, 蒋复初, 吴锡浩, 王苏民, 田国强. 2004. 三门组的内涵及其意义. 第四纪研究, 24(1): 116~123.
- 王先彦, 于洋. 2024. 试论河流地貌学的新进展和趋势. 地质科技通报, 43(1): 150~159.
- 韦伟, 吴超羽. 2011. 全新世以来珠江三角洲的地层层序和演变过程. 中国科学: 地球科学, 41(8): 1134~1149.
- 韦成龙, 张珂, 余章馨, 邱燕. 2015. 珠江口外海域与珠江三角洲晚更新世以来的地层层序对比. 沉积学报, 33(4): 713~723.
- 夏正楷, 陈福友, 岳岳阳. 2002. 北京大学校园内埋藏古树的发现及其意义. 北京大学学报(自然科学版), 38(2): 226~230.
- 徐杰, 姜在兴. 2019. 碎屑岩物源研究进展与展望. 古地理学报, 21(3): 379~396.
- 许炳心, 蔡强国, 李炳元, 吴积善, 金德生, 尤联元, 师长兴, 张青松. 2016. 中国河流地貌研究进展——纪念沈玉昌先生 100 年诞辰. 地理学报, 71(11): 2020~2036.
- 杨晓强, 李华梅. 1999. 泥河湾盆地典型剖面沉积物磁化率特征及其意义. 海洋地质与第四纪地质, 19(1): 75~84.
- 杨晓强, 李华梅. 2000. 陆相断陷湖盆沉积物磁组构特征及环境意义——以泥河湾盆地为例. 海洋地质与第四纪地质, 20(3): 43~52.
- 余泽忠, 丁祥焕, 席廷山. 1963. 福建永安益溪河谷地貌特征和地质构造的关系. 福建师范学院学报, (2): 115~130.
- 张强, 姜彤, 施雅风, 苏布达, 刘春玲. 2003. 长江三角洲地区 1 万年以来洪水与气候变化的关系. 海洋地质与第四纪地质, 23(2): 11~15.
- 张玉芬, 李长安, 陈国金, 王小平, 肖明远. 2005. 江汉平原湖区周老镇钻孔磁化率和有机碳稳定同位素特征及其古气候意义. 地球科学——中国地质大学学报, 30(1): 114~120.
- 张玉芬, 李长安, 赵举兴, 毛欣, 许应石, 魏传义, 李亚伟, 张岱. 2021. 江汉平原东北缘末次冰消期沉积物粒度特征及环境意义. 沉积学报, 39(4): 983~994.
- 张振克, 吴瑞金, 王苏民. 1998. 岱海湖泊沉积物频率磁化率对历史时期环境变化的反映. 地理研究, 17(3): 297~302.
- 赵举兴, 李长安, 黄光明, 贾明明, 林淑珍, 张华松, 冷勇辉. 2020. 福建永安地区网纹红土粒度特征及其成因指示意义. 地质科技通报, 39(6): 43~51.
- 赵举兴, 李长安, 林淑珍, 黄光明, 李亚伟, 贾明明. 2022. 福建三明地区第四纪地层序列. 地质通报, 41(11): 2007~2018.
- 赵希涛, 贾丽云, 胡道功. 2018. 内蒙河套地区黄河阶地与新近纪砾石层的发现及其对黄河发育、中国河流古老性与河湖共存论的意义. 地质学报, 92(4): 845~886.
- 郑洪波, 贾军涛. 2009. 大河的地质演化与构造控制. 第四纪研究, 29(2): 268~75.
- 朱诚, 于世永, 史威, 戴东升, 赵宁曦. 1997. 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.
- Cao Boxun. 1995#. *Geomorphology and Quaternary Geology*. Wuhan: China University of Geosciences Publishing House: 1~288.
- Clift P D, Carter A, Campbell I H, Pringle M S, Lap G V, Allen C M, Hodges K V, Tan M T. 2006. Thermochronology of mineral grains in the Red and Mekong Rivers, Vietnam: provenance and exhumation implications for Southeast Asia. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7(10): Q10005.
- Craddock W H, Kirby E, Harkins N W, Zhang Huiping, Shi Xuhua, Liu Jianhui. 2010. Rapid fluvial incision along the Yellow River during headward basin integration. *Nature Geoscience*, 3(3): 209~213.
- Dong Jin, Gao Rui, Wang Yong, Zhang Shihong, Yao Peiyi, Chi Zhenqing, Zhao Zhili. 2013. Magnetic fabric study of Late Holocene sediments in Huangqihai Lake, inner mongolia and its sedimentary significance. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 87(1): 186~196.
- Department of Geography, Fujian Normal University. 1987#. *Fujian Physical Geography*. Fuzhou: Fujian People's Publishing House: 1~208.
- Folk R L, Ward W C. 1957. Brazos River Bar: A study in the signification of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27: 3~27.
- Guo Lifei, Pan Baolin, Wang Junping, Cheng Xinlin, Yang Yong, Zhou Rui, Liu Xiuying, Cai Zhuoyun. 2024. Sedimentary characteristics of Wuwei Basin since late mid-Pleistocene——based on OSL chronological study of the wv3 core. *Geological Review*, 70(5): 1689~1708.
- Hu Xiaomeng, Yang Jingchun. 2001#. The response of the development of Fen River to neotectonic movement and paleoclimate changes since last non-glaciation stage. *Journal of Geomechanics*, 7(2): 176~180.
- Huang Zhenguo, Li Pingri, Zhang Zhongying, Li Konghong, Qiao Pengnian. 1982#. The Formation and Evolution of the Pearl River Delta. Guangzhou: Guangzhou Branch of Science Popularization Press: 1~274.
- Huang Zhenguo, Cai Fuxiang. 2006#. Buried weathering layers of the late quaternary and their environmental significance in the Zhujiang River Estuary. *Quaternary Sciences*, 27(5): 828~833.
- Ji Junliang, Zheng Hongbo, Li Shenghua, Huang Xiangtong. 2006#. The terraces of the Huanghe River in Pinglu country, Shanxi Province and their relationship with the disappearance of the Sanmen

- paleolake and the formation of the Huanghe. *Quaternary Sciences*, 26(4): 665~672.
- Li Chang'an, Yin Hongfu, Yu Qingwen, Huang Changsheng. 1998#. Tectonic uplift, water system response and environment evolution in the eastern part of the Kunlun Mountains. *Earth Science — Journal of China University of Geosciences*, 23(5): 456~459.
- Li Chang'an, Zhang Yufen, Yuan Shengyuan, Shao Lei, Jiang Huajun, Zhou Yao, Niu Zhijun, Tu Bing. 2010#. Grain size character and origin of the "Wushan Loess" at Wushan area. *Earth Science — Journal of China University of Geosciences*, 35(5): 879~884.
- Li Jijun, Fang Xiaomin, Ma Haizhou, Zhu Junjie, Pan Baotian, Chen Huailu. 1996. Geomorphological and environmental evolution in the upper reaches of the Yellow River during the Late Cenozoic. *Science in China (Series D)*, 39(4): 380~390.
- Li Yawei, Li Chang'an, Zhang Yufen, Lin Xu, Wang Jietao, Sun Xilin, Wei Chuanyi, Guo Rujun, Leng Yonghui. 2019#. Progress of detrital zircon chronology in sediment provenance studies in the Yangtze River Basin. *Seismology and Geology*, 41(2): 521~544.
- Lin Penghui, Li Hongwei, Zhan Weiqi, Ling Ken, Song Yingjing, Xu Xiaolin, Lai Zhongping. 2023#. Late Pleistocene to Holocene sedimentary history in the Pearl River delta revealed by OSL and radiocarbon dating. *Geological Review*, 69(Supp 1): 333~335.
- Nie Tongchun. 2023#. Geological Characteristics and genesis of the middle Pleistocene Tong'an formation in Shen-Huwan area of Jinjiang city. *Geology Fujian*, 42(1): 12~18.
- Pan Baotian, Wang Junping, Gao Hongshan, Guan Qingyu, Wang Yong, Su Huai, Li Bingyuan, Li Jijun. 2005#. Paleomagnetic dating of the topmost terrace in Kouma, Henan and its indication to the Yellow River's running through Sanmen Gorges. *Chinese Science Bulletin*, 50(3): 255~261.
- Shen Yuchang. 1956#. River valley geomorphology and development history of Hanjiang River. *Acta Geographica Sinica*, 22(4): 296~323.
- Shu Qiang, Li Cailin, Zhao Zhijun, Chen Ye, Zhang Maoheng, Li Jijun. 2009#. The records of mass susceptibility and grain size for climate changes in Subei Basin during the last deglaciation. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(1): 111~117.
- Su Qi, Wang Xianyan, Yuan Daoyang, Xie Hong, Li Hongxuan, Huang Xilei. 2023. Fluvial entrenchment of the Gonghe Basin and integration of the upper Yellow River — evidence from the cosmogenically dated geomorphic surfaces. *Geomorphology*, 429: 108654.
- Sun Yanrong, Cui Haiting, Liu Hongyan, Li Pingri, Tan Huizhong. 2006#. The possibility of using the $\delta^{13}\text{C}$ sequence of α -cellulose of the annual ring of buried ancient timbers as substituting indices for paleo-climate change research. *Acta Geoscientia Sinica*, 27(6): 577~582.
- Wang Shubing, Jiang Fuchu, Wu Xihao, Wang Sumin, Tian Guoqiang. 2004#. The connotation and significance of Sanmen formation. *Quaternary Sciences*, 24(1): 116~123.
- Wang Licheng, Shen Lijian, Liu Chenglin, Chen Ke, Ding Lin, Wang Chengshan. 2021. The Late Cretaceous source-to-sink system at the eastern margin of the Tibetan Plateau: insights from the provenance of the Lanping Basin. *Geoscience Frontiers*, 12(3): 101102.
- Wang Xianyan, Yu Yang. 2024#. Progress in fluvial geomorphology and future study: A brief review. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 43(1): 150~159.
- Wei Xing, Wu Chaoyu. 2011. Holocene delta evolution and sequence stratigraphy of the Pearl River Delta in South China. *Science China Earth Sciences*, 54(10): 1523~1541.
- Wei Chenglong, Zhang Ke, Yu Zhangxin, Qiu Yan. 2015#. Correlation of stratigraphic sequences between the Pearl River Delta and its offshore continental shelf since the late Pleistocene. *Acta Sedimentologica Sinica*, 33(4): 713~723.
- Xia Zhengkai, Chen Fuyou, Yue Shengyang. 2002#. Discovery and significance of the buried ancient trees in the Peking University campus. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 38(2): 226~230.
- Xie Wanting, Wang Xianyan, Zhang Hanzhi, Liu Quanyu, Wang Shejiang, Lu Huayu. 2021. Drainage evolution in intermontane basins at the Qinling — Daba Mountains. *Science China Earth Sciences*, 64(11): 1949~1968.
- Xu Jie, Jiang Zaixing. 2019#. Provenance analysis of clastic rocks: current research status and prospect. *Journal of Palaeogeography*, 21(3): 379~396.
- Xu Jiongxin, Cai Qiangguo, Li Bingyuan, Wu Jishan, Jin Desheng, You Lianyan, Shi Changxing, Zhang Qingsong. 2016#. Research progress in river geomorphology in China: In memory of 100-year anniversary of Shen Yuchang's birth. *Acta Geographica Sinica*, 71(11): 2020~2036.
- Xu Xiaolin, Zhong Jiemei, Huang Xianmei, Li Hongwei, Ding Zhaojing, Lai Zhongping. 2022. Age comparison by luminescence using quartz and feldspar on core HPOK01 from the Pearl River Delta in China. *Quaternary Geochronology*, 71: 101320.
- Yang Xiaoqiang, Li Huamei. 1999#. The susceptibility characteristics of the typical sections of the Nihewan Basin and its implication. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 19(1): 75~84.
- Yang Xiaoqiang, Li Huamei. 2000#. Magnetic anisotropy and its environmental significance in limnal faulted basin — taking the Nihewan Basin as an example. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 20(3): 43~52.
- Yu Zezhong, Ding Xianghuan, Xi Tingshan. 1963#. The Relationship between Geomorphic Characteristic and Tectonic of the Yixi Valley in Yong'an, Fujian Province. *Journal of Fujian Normal University*, (2): 115~130.
- Zhang Hanzhi, Lu Huayu, Zhou Yali, Cui Yingying, He Jing, Lv Hengzhi, Wang Kexin, Wang Xianyan. 2021. Heavy mineral assemblages and U-Pb detrital zircon geochronology of sediments from the Weihe and Sanmen Basins: New insights into the Pliocene-Pleistocene evolution of the Yellow River. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 562: 110072.
- Zhang Qiang, Jiang Tong, Shi Ya Feng, Su Buda, Liu Chunling. 2003#. Relationship between climatic changes and the flooding occurrence since the Holocene in the Yangtze River Delta region. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 23(2): 11~15.
- Zhang Yufen, Li Chang'an, Wang Qiuliang, Chen Liang, Ma Yongfa, Kang Chunguo. 2008. Magnetism parameters characteristics of drilling deposits in Jiangnan Plain and indication for forming of the Yangtze River Three Gorges. *Chinese Science Bulletin*, 53(4): 584~590.
- Zhang Yufen, Li Chang'an, Chen Guojin, Wang Xiaoping, Xiao Mingyuan. 2005#. Characteristics and Paleoclimatic Significance of Magnetic susceptibility and stable organic carbon isotopes from a bore in Zhoulaotown, Jiangnan Plain. *Earth Science — Journal of China University of Geosciences*, 30(1): 114~120.
- Zhang Yufen, Li Chang'an, Zhao Juxing, Mao Xin, Xu Yingshi, Wei Chuanyi, Li Yawei, Zhang Dai. 2021#. Grain size characteristics and climatic environmental significance of sediments in the northeastern margin of the Jiangnan Plain during the last deglaciation period. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(4): 983~994.

- Zhang Zengjie, Tyrrell S, Li Chang'an, Daly J S, Sun Xilin, Blowick A, Lin Xu. 2016. Provenance of detrital K-feldspar in Jiangnan Basin sheds new light on the Pliocene–Pleistocene evolution of the Yangtze River. *Geological Society of America Bulletin*, 128 (9–10): 1339–1351.
- Zhang Zhenke, Wu Ruijin, Wang Sumin. 1998. Implication of magnetic frequency dependent susceptibility on environmental variation from lacustrine sediment in Daihai Lake. *Geographical Research*, 17 (3): 297–302.
- Zhao Juxing, Li Chang'an, Huang Guangming, Jia Mingming, Lin Shuzhen, Zhang Huasong, Leng Yonghui. 2020. Grain size characteristics and origin of red earth in Yongan, Fujian Province. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 39(6): 43–51.
- Zhao Juxing, Li Chang'an, Lin Shuzhen, Huang Guangming, Li Yawei, Jia Mingming. 2022. Quaternary stratigraphic sequence in Sanming area, Fujian. *Bulletin of China*, 41(11): 2007–2018.
- Zhao Xitao, Jia Liyun, Hu Daogong. 2018. Discoveries of fluvial terraces and Neogene gravels in the Hetao area, Inner Mongolia: Implications for the development of the Yellow River, antiquity of Chinese rivers, and coexistence theory of rivers and lakes. *Acta Geologica Sinica*, 92(4): 845–886.
- Zheng Hongbo, Jia Juntao. 2009. Geological evolution of big river systems and tectonic control. *Quaternary Sciences*, 29(2): 268–75.
- Zhu Cheng, Yu Shiyong, Shi Wei, Dai Dongsheng, Zhao Ningxi. 1997. Holocene deposits and paleo-floods on the north bank of the Yangtze river Nanjing area. *Geographical Research*, 16(4): 23–30.

Quaternary sedimentary environment in the source area of the Yixi River, Yong'an, Fujian, and development process of the river implications

ZHAO Juxing¹⁾, ZHANG Shuguang¹⁾, LIN Shuzhen¹⁾, YE Jun¹⁾, ZHANG Peng²⁾,

LI Chang'an³⁾ 1) *Fujian Exploration Institute of Coalfield Geology, Fuzhou 350005;*

2) *State Key Laboratory of Loess Science, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061;*

3) *School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074*

Objectives: The Yixi River is a primary tributary of the Shaxi River, which is upper tributary of the Minjing River, valley geomorphology of the Yixi River is more representative in Fujian Province.

Methods: In this study, we completed a Quaternary broehole (GC4) with Quaternary 22.4 m in the source area of the Yixi River, analyzed sedimentary environment according to AMS¹⁴C, Grain-size and magnetic susceptibility. Discussed sedimentary environment in the source area of the Yixi River and development process of the river implications by comparison of regional lithostratigraphy and characteristic of valley geomorphology.

Results: GC4 was divided to 5 sedimentary stages from middle of Late Pleistocene till now: fluvial facies, limnetic facies, weathering lacustrine facies, pluvial facies and fluvial facies. Sedimentary discontinuity happened in later Late Pleistocene.

Conclusions: Sedimentary environment in the source area reflected regional neotectonic movements were as follows: uplift, sinking, steady, uplift rapidly, sinking first and then sinking, uplift durably, corresponding valley geomorphology consisted in in the source area, upper and middle of the Yixi River. The river appeared in middle of Late Pleistocene, valley geomorphology completely developed in middle of Holocene. The most rapidly uplift occurred in later Late Pleistocene.

Keywords: source area; sedimentary environment; Grain-size; magnetic susceptibility; valley geomorphology

Acknowledgements: This paper is supported by the fund of Shandong Province (No. LSKJ202203300), the Foundation of State Key Laboratory of Loess Science, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences (No. SKLLQG2328) and Natural Science Foundation of Fujian Province (No. 2021J01349).

First author: ZHAO Juxing, male, born in 1986, senior engineer, mainly engaged in survey and study of Quaternary and hydrogeology, engineering geology and environmental geology; Email: zhaojuxing1986@126.com.

Corresponding author: ZHANG Peng, male, born in 1987, associate research fellow, mainly engaged in environmental magnetism and paleoclimatology research; Email: zhangpeng@ieecas.cn.

Manuscript received on: 2024-07-19; Accepted on: 2024-12-25; Published online on: 2025-01-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2025.01.052

Edited by: LI Ming, ZHANG Yuxu

