

# 大渡河上游阿娘寨古堰塞湖的发现及其特征

谢佐彬<sup>1</sup>, 向芳<sup>2</sup>, 许强<sup>3</sup>, 王运生<sup>3</sup>, 王卓<sup>3</sup>, 罗超<sup>3</sup>, 陈熙杰<sup>3</sup>

1. 成都理工大学 地球与行星科学学院, 成都 610059;

2. 成都理工大学 沉积地质研究院, 成都 610059;

3. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 成都 610059

[摘要] 古堰塞湖的沉积特征研究是开展堰塞湖古环境、古气候研究的基础。大渡河上游小金川两岸多地出露粉砂质黏土、砂和砾石构成的堰塞湖剖面, 通过沉积学分析、光释光测年以及对堵江坝体的岩性构造分析, 认为小金川在距今(15.7±1.9)~(9.1±1.0) ka 期间发生了一次重大的堵江—堰塞—溃决事件, 且该古堰塞湖的沉积环境随时间和空间的变化发生迁移: 时间上, 堰塞湖经历了形成、充填和溃决 3 个阶段; 空间上, 从下游至上游划分出深—半深湖、浅湖、滨湖和河湖交汇区 4 个沉积区, 该古堰塞湖是由阿娘寨古滑坡堵江形成, 据此命名为阿娘寨古堰塞湖。该古滑坡主要受控于岩性和构造作用。本次研究进一步丰富了青藏高原东南缘山区大型古堰塞湖的研究成果, 其沉积特征、年代和成因特征为后续的深入研究提供了基础材料。

[关键词] 大渡河; 小金川; 阿娘寨古堰塞湖; 阿娘寨古滑坡; 沉积特征

[分类号] P512.2; P532

[文献标志码] A

## Characteristics of ancient Aniangzhai barrier lake in upper reaches of Dadu River

XIE Zuobin<sup>1</sup>, XIANG Fang<sup>2</sup>, XU Qiang<sup>3</sup>, WANG Yunsheng<sup>3</sup>,  
WANG Zhuo<sup>3</sup>, LUO Chao<sup>3</sup>, CHEN Xijie<sup>3</sup>

1. College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

3. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,  
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

**Abstract:** The examination of the sedimentary characteristics of ancient barrier lakes provides the foundation for research on the ancient environment and climate. A section of a barrier lake containing silty clay, sand, and gravel has been exposed on both sides of Xiaojinchuan in the upper reaches of the Dadu River. The results of sediment analysis, photoluminescence dating, and investigations into the

[收稿日期] 2023-08-25。

[基金项目] 国家自然科学基金(42272123, 41972101)。

[第一作者] 谢佐彬(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 第四纪地质学, E-mail: Chengdu\_MrXie@163.com。

[通信作者] 许强(1968—), 男, 教授, 研究方向: 滑坡灾害的评价、预测及防治处理, E-mail: xq@cdut.edu.cn。

[引用格式] 谢佐彬, 向芳, 许强, 等, 2024. 大渡河上游阿娘寨古堰塞湖的发现及其特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 51(3): 449-464.

Xie Z B, Xiang F, Xu Q, et al., 2024. Characteristics of ancient Aniangzhai barrier lake in upper reaches of Dadu River[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 51(3): 449-464.

lithology and structure of the barrier dam suggest that a major river-blocking dam collapse event occurred in Xiaojinchuan during  $(15.7 \pm 1.9) \sim (9.1 \pm 1.0)$  ka, and caused the sedimentary environment of the ancient barrier lake to migrate over time. The barrier lake has undergone three stages of filling and collapse during its formation over time. Its four sedimentary areas can be divided from downstream to upstream into deep to semi-deep lake, shallow lake, riverside lake, and the area of intersection between river and lake. This ancient barrier lake was formed by the blockage of the river by the ancient Aniangzhai landslide, and is named after it. The ancient landslide was mainly controlled by the lithology and tectonic processes in the area. The work here enriches research on large-scale ancient barrier lakes in the mountainous areas of southeastern Tibet, and provides materials for subsequent examinations of their sedimentary characteristics, age, and genetic characteristics.

**Key words:** Dadu River; Xiaojinchuan; ancient Aniangzhai barrier lake; ancient Agniangzhai landslide; sedimentary characteristics

青藏高原东南缘一直是第四纪地质学研究的热点区域,其独特的构造条件和地貌背景,导致了众多地质灾害事件的发生。堵江—堰塞—溃决链生灾变是一类重要的地质灾害,伴生形成的堰塞湖沉积中蕴含着大量构造、气候以及地表演变过程的信息,因此开展青藏高原周缘的古堰塞湖研究可以为青藏高原周缘与内部差异隆升机制、第四纪气候演变、地貌河流演化以及地质灾害事件预测提供重要的证据(Burbank et al., 2003; 王兰生等, 2005; Geertsema and Pojar, 2006; 陈晓清等, 2008; 王兆印等, 2014; Guo et al., 2015; Liu et al., 2018; Argentin et al., 2022)。青藏高原东南缘分布有较多古堰塞湖,如岷江上游的叠溪古堰塞湖(王兰生等, 2007; 陈晓清等, 2008; 范宣梅等, 2021)、金沙江流域的奔子栏古堰塞湖(张永双等, 2007)、昔格达堰塞湖(陈智梁等, 2004; 徐则民, 2011)、巧家堰塞湖等一系列堰塞湖群(Zhang et al., 2010; 陈剑和崔之久, 2015; 张信宝等, 2020; 陈剑等, 2021)以及雅鲁藏布江流域的古堰塞湖群(刘宇平等, 2006; 李翠平等, 2015; 王萍等, 2021)。前人在这些古堰塞湖的形成机制、年代学及古气候研究中取得了丰富成果,但对堰塞湖的沉积体系研究并不深入,且这些研究都集中在金沙江、岷江等干流上,对于支流内的堰塞湖研究颇少。

前人对小金川流域内的研究主要是针对堵江滑坡体、泥石流的单点地质灾害研究,且集中在地质灾害发生机制和防治措施上(黄润秋, 2007; 李娟, 2012; 胡凯衡等, 2020; Zhu et al., 2021),关于小金川堵江引起的古堰塞湖研究未见报道。阿娘寨古堰塞湖是继昔格达组(陈智梁等, 2004)和叠

溪古堰塞湖(王兰生等, 2005)之后在青藏高原东南缘发现的又一具有巨厚湖相沉积的古堰塞湖,因此,对该古堰塞湖展开研究能丰富山区大型古堰塞湖的研究成果;此外,研究表明阿娘寨古滑坡很有可能面临再次失衡的局面(张海泉等, 2021),因此,对该古滑坡引起的古堰塞湖展开研究对于后续阿娘寨古滑坡堵江灾害预测和防治具有重要示范意义。

本文以小金川两岸分布的湖相沉积剖面为研究对象,对阿娘寨古堰塞湖的沉积特征、形成年代及成因进行了初步分析,同时对该古堰塞湖坝体——阿娘寨古滑坡的性质展开了探讨。

## 1 研究区概况

小金川是大渡河上游左岸的一级支流,流经阿坝藏族羌族自治州小金县,在甘孜藏族自治州丹巴县附近与大金川汇合注入大渡河。小金川流域位于青藏高原东南缘“歹”字型构造,地处川滇南北构造与小金—金汤弧形构造复合部位(图 1-A),西侧受鲜水河断裂制约,东侧分布有龙门山断裂,南侧为安宁河断裂,区内构造主要为北西或东西展布的线状褶皱,断裂构造少且规模小,但鲜水河断裂和龙门山断裂在喜山期以来活动剧烈,两侧新构造断裂活动强烈(闻学泽等, 1989; 陈国光等, 2007),主要发育北西向和北东向 2 组不同方向、不同规模、不同性质的活动断裂,这对于小金川流域内地震的分布和发育有较大影响。小金川地处高山峡谷区,两岸斜坡坡度以及河流陡峭指数较大,表现为典型的高原构造地貌特征,反映了区内自新构造运动以来经历了强烈的升降运动。

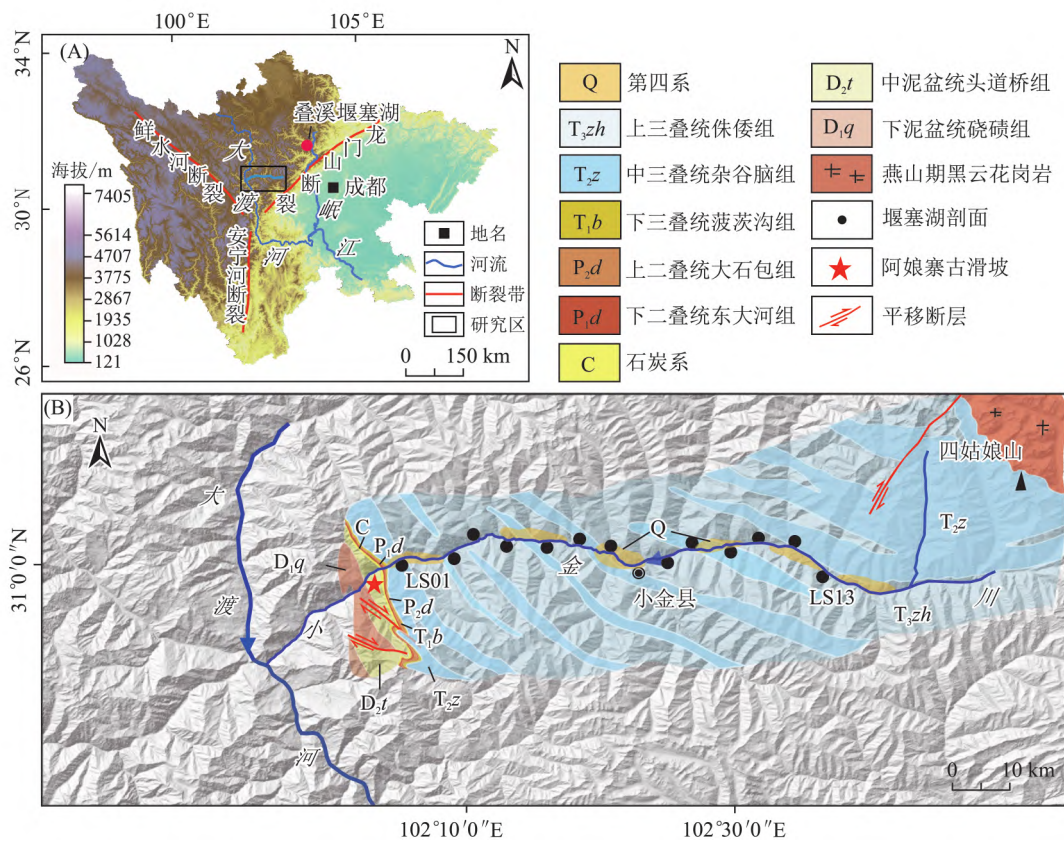


图 1 研究区地质概况

Fig. 1 General geology of the research area

(A) 研究区区域构造背景及所处地理位置; (B) 研究区地层及堰塞湖剖面分布位置, 蓝色箭头指示现今河流流向

区内主要发育古生界泥盆系到新生界第四系的地层, 缺乏元古界地层, 大多呈带状沿 NNW-SSE 走向分布(图 1-B)。其中第四系(Q)沉积物成因复杂多样, 包含河流沉积、湖泊沉积、冲洪积等多种类型沉积物。三叠系(T)地层发育最为广泛, 受东西方向水平构造挤压和后期风化剥蚀作用, 上三叠统和下三叠统地层在平面上构成连续的褶皱构造, 其岩石层型属于西康群(李娟, 2012), 主要为板岩、变质(细)砂岩、砂岩; 二叠系(P)、石炭系(C)、泥盆系(D)地层主要分布在阿娘寨古滑坡附近, 地层厚度小, 岩性为灰岩、板岩、千枚岩。除第四系地层外, 区内其他地层均经历了不同的变质作用, 其中主要是区域动力变质作用, 并形成了板岩—千枚岩的单相均匀变质岩群, 因此研究区的地层岩性条件整体较脆弱。岩浆活动弱, 主要在东北侧发育了燕山期的黑云花岗岩。

## 2 堰塞湖沉积特征

小金川两岸分布有众多滑坡崩塌体以及泥石

流扇, 在空间上表现为湖相、河流相以及滑坡泥石流混杂相的复杂接触关系(Wang et al., 2024)。在野外调查过程中发现小金川流域发育有三级阶地, 整体保存较差。小金川流域内已发现的堰塞湖沉积剖面总共有 13 处, 它们沿小金川两岸断续出露, 具体分布点位如图 1-B 所示, 这些剖面露头(在平面上)的延展性较好, 初步推测为同一事件沉积的结果, 下文中将按从下游到上游的顺序以 LS01~LS13 对它们分别命名并进行描述, 且在野外发现 LS01 剖面下游的阿娘寨古滑坡应是该古堰塞湖的坝体(图 1-B), 据此将其命名为阿娘寨古堰塞湖。笔者结合普通湖泊沉积体系划分依据和区内各个堰塞湖剖面沉积物的岩性、构造特征, 将阿娘寨古堰塞湖划分出深湖—半深湖沉积区、浅湖沉积区、滨湖沉积区和河湖交汇沉积区。

### 2.1 深—半深湖沉积区沉积特征

LS01~LS04 这 4 个剖面均主要由粉砂质黏土构成, 水平层理发育(图 2-A, D, F, H, I), 其沉积时所处环境的水动力微弱, 沉积速率相对缓慢。

LS01 团结村剖面是保存最为完整的一个堰塞湖剖面,下伏基岩为变质砂岩与板岩互层,两者呈角度不整合接触(图 2-E),底部海拔 2 148 m,顶部海拔 2 276 m,厚度达到 128 m,是区内沉积厚度最大的堰塞湖剖面。剖面最底部为一套混杂沉积,泥质含量高,厚度约 10 m,砾石主要为变质砂岩、板岩,呈次圆状,分选差,向上砾石减少,逐渐过渡为粉砂质黏土沉积,粉砂质黏土局部可见水平层理(图 2-F),这套沉积序列应是形成于堰塞湖初期,此处湖水位还并不深时由于水动力突然减弱导致砾、砂与粉砂质黏土共同沉积而形成。剖面中部为巨厚粉砂质黏土层,整体不含砂砾,且发育水平层理(图 2-D)。剖面最顶部为一套砾

石、砂和泥质的混杂沉积(图 2-B),厚度约 2 m,其中砾石沉积在上部,主要为砂岩、变质砂岩、板岩,呈圆一次圆状,分选较好,快速沉积的砾石层挤压下部泥质层发生同生变形(图 2-B),且接触部位的粉砂质黏土呈火焰舌状嵌入上覆层中(图 2-C),LS01 顶部这套高能沉积在 LS02 顶部也有出露,应是堰塞湖溃决时水体携带大量碎屑推移载荷形成的快速沉积(陈剑和崔之久,2015),且此过程中堰塞湖水体不断变浅、水动力由弱变强。即便 LS01 与 LS03 剖面在垂向上存在明显的相变,但这 4 个剖面的主体部分都是粉砂质黏土沉积,发育水平层理,因此将 LS01~LS04 区域划分为古堰塞湖的深一半深湖沉积区。

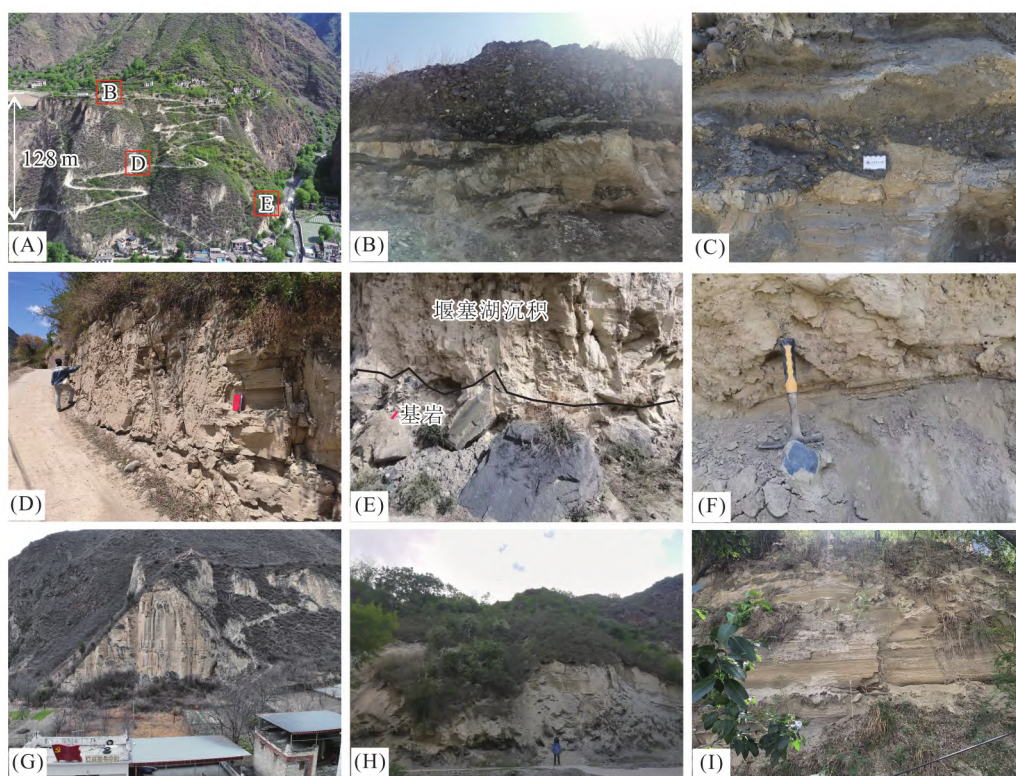


图 2 深湖一半深湖区剖面沉积特征

Fig. 2 Sedimentary characteristics of the deep lake and semi-deep lake sections of the study area

- (A) LS01 整体剖面; (B) LS01 顶部砾石、砂与泥质混杂层; (C) 砾石挤压下部软沉积物变形;
- (D) LS01 剖面中部水平层理; (E) LS01 剖面底部混杂沉积; (F) LS01 剖面底部粉砂质黏土中的水平层理;
- (G) LS02 剖面; (H) LS03 剖面; (I) LS04 粉质黏土中极薄层粉砂, 可见水平层理

## 2.2 浅湖沉积区沉积特征

LS06 与下伏板岩、变质砂岩互层呈角度不整合接触,最底部是一套混杂沉积(图 3-A),其岩相特征与 LS01 底部混杂层相似,这是早期水动力突然减弱而形成的产物,该混杂沉积的上覆层是

发育了水平层理的粉砂、粉砂质黏土,表面有泥石流扰动的痕迹,LS05 和 LS07 剖面未见底。这 3 个剖面主体的砂质成分含量高,砂层内细层保留了明显的波状起伏痕迹,前积层与后积层水平长度比例约 4 : 1(图 3-B);粉砂、细砂分别与粉砂质

黏土互层构成韵律层理(图 3-C, E, I), 粉砂质黏土受上覆砂层挤压形成火焰状构造, 并且砂层底部发育重荷膜构造(图 3-D, E); 粉砂质黏土主要发育水平层理, 砂层主要发育中型板状交错层理(图 3-F)、爬升沙纹层理(图 3-G)和波状层理(图 3-H); LS06 和 LS07 剖面中可见大量滑塌变形构造(图 3-I)。LS05, LS06 与 LS07 剖面中砂质含量相比深湖沉积区显著增多, 砂质沉积的前积层和后积层形态表明此处受到流水冲刷, 水流方向 SW, 水动力相比深湖区进一步增强, 且爬升沙纹层理指示沉积物周期性快速堆积的环境, 波

状层理则说明沉积环境中存在大量的悬浮泥质, 因此此处水流应是活动期与停滞期交替出现, 从而形成砂、泥互层的韵律层理(李元昊等, 2009)。爬升沙纹层理、波痕构造说明此处应处于浅水沉积环境, 而波状层理和韵律层理则说明此处为滨岸到深一半深湖的过渡沉积环境, 板状交错层理反映沉积环境存在沙浪迁移作用, 沉积物在相对水浅坡陡的环境下更容易发生滑塌变形(梅志超和林晋炎, 1991; Guo et al., 2023), 因此将 LS05~LS07 划为古堰塞湖稳定沉积期间的浅湖沉积区。

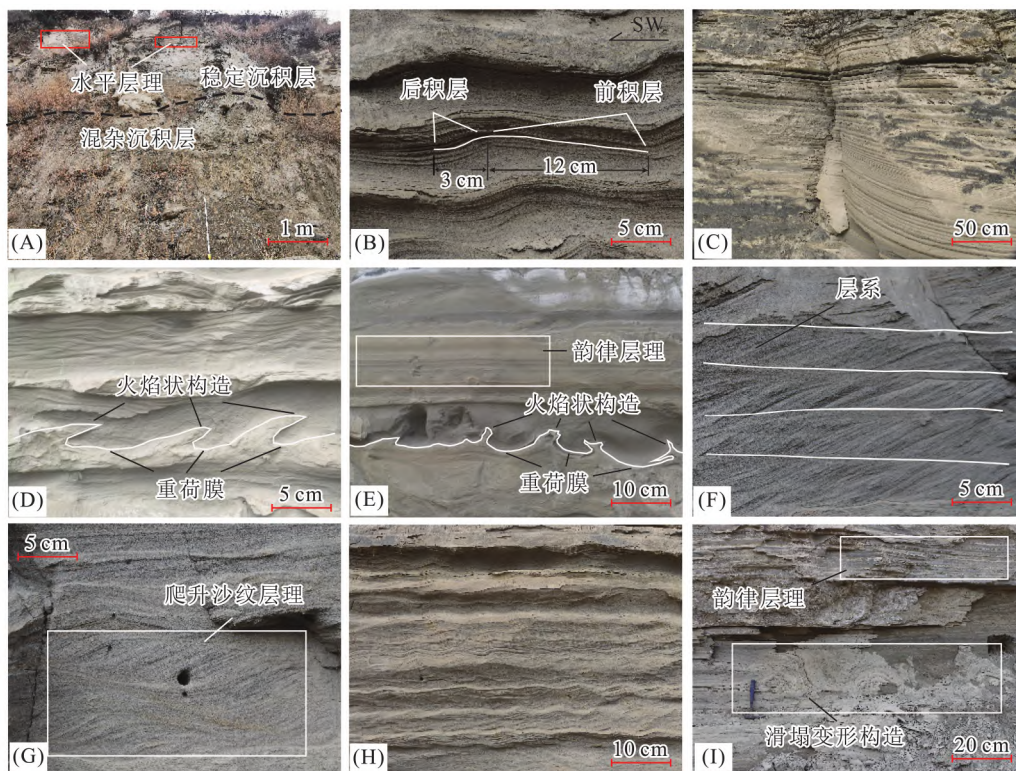


图 3 浅湖区剖面沉积特征

Fig. 3 Sedimentary characteristics of the section of shallow lake

(A)LS06 剖面底部混杂沉积;(B)LS06 剖面中砂层内细层形态,前积层水平长度与后积层水平长度之比约 4 : 1;  
(C)LS05 剖面发育韵律层理;(D)LS06 剖面发育火焰状构造与重荷膜;(E)LS07 剖面发育火焰状构造与重荷膜;  
(F)LS06 剖面中砂层发育板状交错层理;(G)LS06 剖面中砂层发育爬升沙纹层理;(H)LS06 剖面发育波状层理;  
(I)LS07 剖面中滑塌变形构造,并可见韵律层理

### 2.3 滨湖沉积区沉积特征

LS08~LS11 四个剖面均未见底部基岩, 其主要特征是砾石层与砂质层组成粗细粒交替的沉积旋回(图 4-A~C), 说明此处受到季节性洪水的影响非常大(马俊学等, 2019; 许会等, 2019)。其中, 砂质层以中粗砂为主, 可见平行层理和剥离线理构造(图 4-D, E), 部分呈

块状, 说明此处水浅流急, 水动力较浅湖沉积区更强(Li et al., 2021)。另外, LS11 下部的砾石层可见向上变粗的逆粒序层理(图 4-F), 推测应是靠近河口坝位置, 前积作用较强(梅志超和林晋炎, 1991; 田景春等, 2004), 水动力呈现由弱到强的变化, 此处应属古堰塞湖的滨湖沉积区。

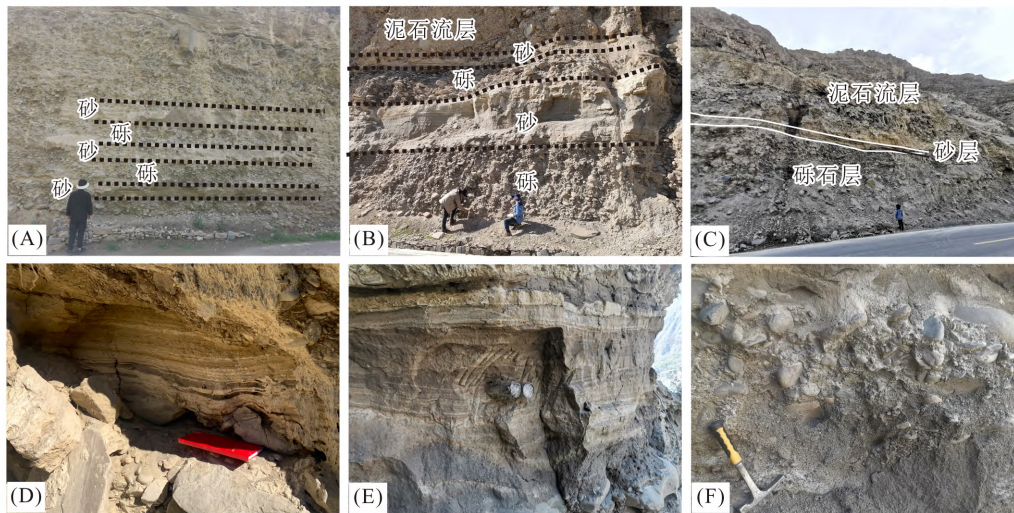


图 4 滨湖区剖面沉积特征

Fig. 4 Sedimentary characteristics of the lakeside section

(A)LS08 粗细粒交替沉积;(B)LS09 整体剖面;(C)LS10 整体剖面,砂层受到上覆泥石流挤压发生变形;  
(D)LS10 上部中粗砂层,发育平行层理;(E)LS11 上部中粗砂层,发育平行层理;(F)LS11 下部砾石可见逆粒序

#### 2.4 河湖交汇沉积区沉积特征

LS12 与 LS13 两个剖面与下伏基岩呈角度不整合接触,厚度较大(表 1),LS12 与 LS13 的拔河高度与区内的 T2 阶地相近,剖面中的砾石具有河流沉积的特征,但却与区内 T2 阶地堆积的砾石层特征有一定区别,相比区内 T2 阶地,这 2 个剖面的砾石分选性更好,且砾石层中砂、泥含量较少(图 5-A,C),砾石层整体呈现一定的韵律性(图 5-B)。野外调研期间,笔者在 LS12,LS13 各

自随机采取了 50 个砾石长轴面产状数据,通过它们的砾石倾向玫瑰花图可以发现,LS12,LS13 两处剖面中砾石的倾向优势方向分别为  $84^{\circ}$ ,  $51^{\circ}$ (图 5-D,E),而两处剖面所在处的现今河流流向分别为  $310^{\circ}$ ,  $260^{\circ}$ ,这说明砾石来自小金川上游,但是砾石倾向的次级优势方向较多,即侧向水流干扰较强(陈妍等,2008;马文华和贾星亮,2008;黄远光等,2018)。通过对比下游滨湖区堰塞湖剖面中出现的砾石沉积,此处砾石层的韵律性说明

表 1 阿娘寨古堰塞湖剖面信息统计表  
Table 1 Information on the Agniaozhai ancient barrier lake

剖面编号	底部基岩	基岩产状	底部海拔	底部拔河	顶部覆盖物	顶部海拔	厚度
LS01	变质砂岩、板岩互层	$152^{\circ} \angle 46^{\circ}$	2148	10	现代植被	2276	128
LS02	未见底	无	2165	12	泥石流	2225	60
LS03	变质砂岩、板岩互层	$27^{\circ} \angle 14^{\circ}$	2195	10	现代植被	2220	25
LS04	未见底	无	2170	15	现代植被	2190	20
LS05	未见底	无	2261	45	坡面流	2276	15
LS06	变质砂岩、板岩互层	$45^{\circ} \angle 58^{\circ}$	2220	12	泥石流	2278	58
LS07	未见底	无	2250	20	泥石流	2265	15
LS08	未见底	无	2326	8	泥石流	2336	10
LS09	未见底	无	2339	15	泥石流	2348	9
LS10	未见底	无	2357	22	泥石流	2365	8
LS11	未见底	无	2479	25	泥石流	2481	2
LS12	砂岩夹板岩	$48^{\circ} \angle 40^{\circ}$	2565	15	坡面流	2626	30
LS13	变质砂岩	$57^{\circ} \angle 63^{\circ}$	2582	12	坡面流	2637	25

注:所有高度、厚度单位均采用 m。

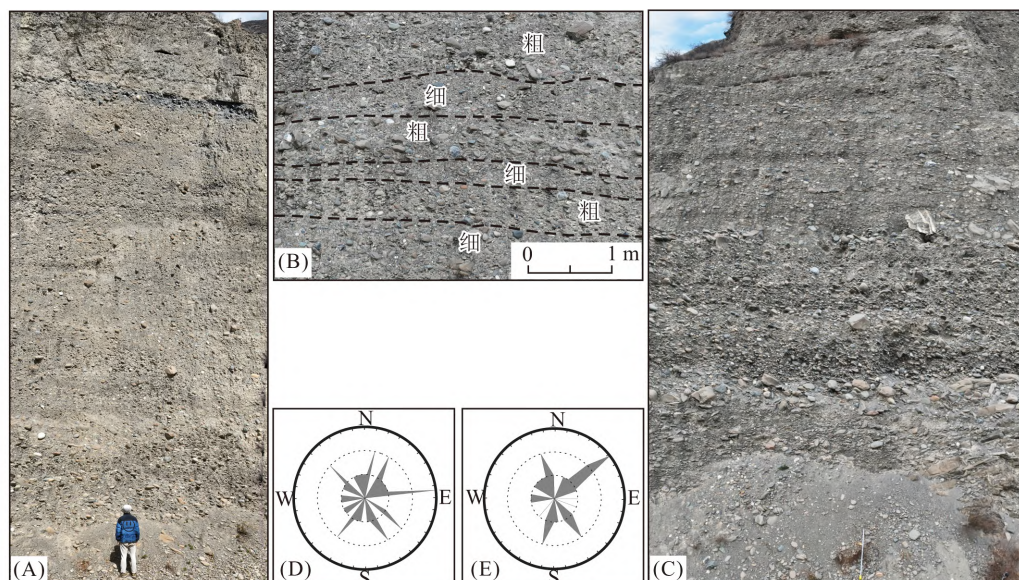


图 5 河湖交汇区剖面沉积特征

Fig. 5 Sedimentary characteristics of the area where the river and lake intersect

(A)LS12 整体剖面;(B)LS12 局部剖面,可见粗细粒交替沉积的韵律;(C)LS13 剖面沉积特征;  
(D)LS12 砾石倾向玫瑰花图,现今河流流向  $310^{\circ}$ ;(E)LS13 砾石倾向玫瑰花图,现今河流流向  $260^{\circ}$

也应受到季节性洪水的影响,且自 LS13 向上游追溯,发现陆续出现多个砾石沉积剖面,因此推测 LS12,LS13 是形成于河湖交汇口位置。此处河流裹挟碎屑物汇入堰塞湖中后水动力相对上游突然减弱,导致河流携带的大量砾石在此处快速沉积而成,而泥、砂等细颗粒碎屑物在进积作用下向湖深处沉积(Xu et al., 2020),且堰塞湖在演化过程中,随着基准侵蚀面的上升,河湖交汇处以上河段的可容纳空间增加,形成众多厚度较大的砾石堆积层。

## 2.5 堰塞湖沉积的时空演化特征

通过整理各个剖面的海拔、厚度、拔河高度等参数(表 1),结合各自的沉积特征,绘制了 LS01~LS13 纵向上的剖面对比图(图 6)。

已有研究表明,在大型湖盆的充填过程中,其沉积体系随着时间和空间的推移会发生有规律性的变化(武富礼等,2004;郭艳琴等,2019),阿娘寨古堰塞湖的充填过程也符合这个规律。由剖面对比图可以发现阿娘寨古堰塞湖在演化过程中,沉积环境随时间和空间的变化而发生迁移(图 6)。时间上,在堰塞湖形成早期阶段,由于水动力突然减弱,砾石、砂和泥质一起快速沉积形成底部的含泥砂砾层,随着湖水面逐渐上升,早期滨浅湖沉积区逐渐向深湖一半深湖演化,沉积物向上过渡为

粉砂质黏土,并且,早期的滨浅湖沉积区向上游方向迁移;随后,堰塞湖进入比较稳定的充填阶段,形成堰塞湖主体沉积,在此阶段,湖滨岸线不再后退或后退速度减缓,堰塞湖沉积相对稳定以至于形成巨厚的沉积层(图 6),且这些巨厚湖积层在空间上表现为不同的岩性构造特征;晚期堰塞湖发生溃决时,由于快速泄水作用造成河流搬运物质的快速进积,从而在早期细粒沉积物之上形成突变的砾石层。从空间上看,LS01~LS04 剖面都主要由粉砂质黏土构成,砂质成分极少,普遍发育水平层理,表明沉积过程中水动力条件整体较弱,对应深湖一半深湖沉积区;而 LS05~LS07 剖面中沉积的砂质成分明显增多,与粉砂质黏土构成韵律层,层理构造类型复杂多样,主要有水平层理、韵律层理、波状层理、爬升沙纹层理和板状交错层理,且发育滑塌变形构造,表明水动力条件较堰塞湖库首位置明显增强,沉积过程中受到流水和静水的共同作用,对应浅湖沉积区;LS08~LS11 剖面处于阿娘寨堰塞湖的库尾位置,相比下游其他剖面,其沉积物中砾石含量增多,形成砾石与砂的旋回沉积层,这些剖面中沉积的砂层发育平行层理,局部可见砾石向上变粗的反粒序层理,说明水动力极强(吴崇筠,1981),且这里见到较多季节性洪水成因的粗细粒交替层理,反映其形成

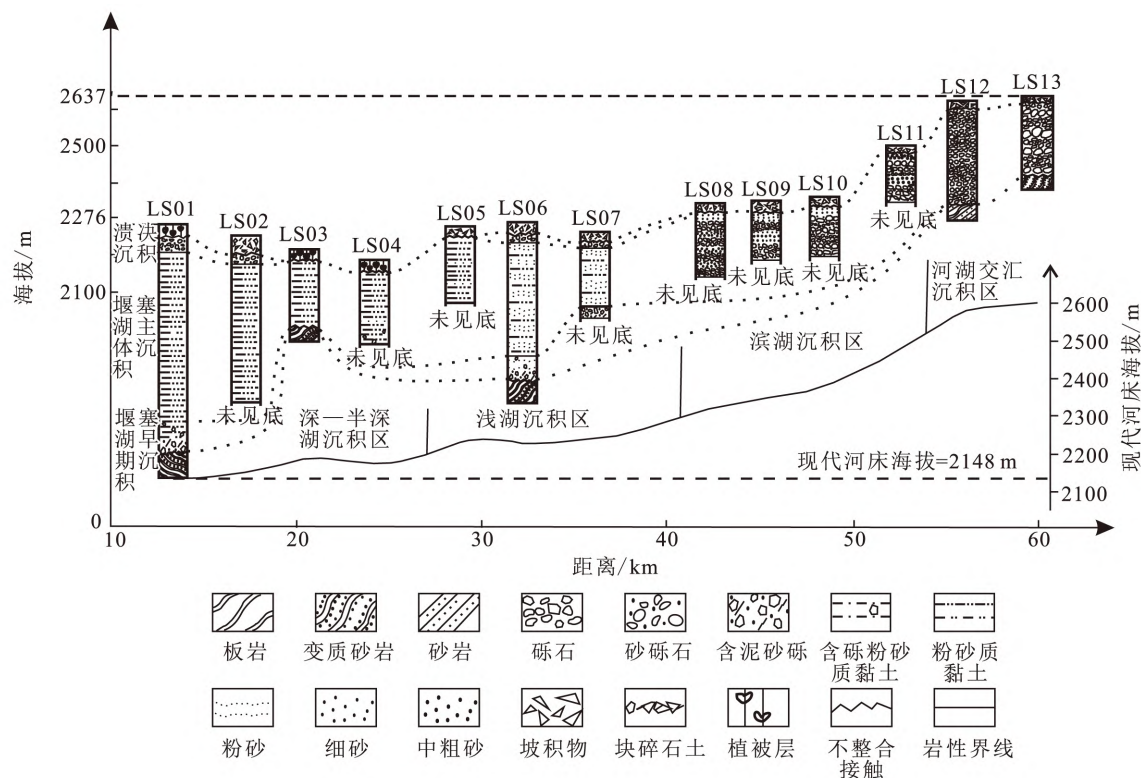


图 6 阿娘寨古堰塞湖剖面对比图  
Fig. 6 Comparison of the profile of Aniangzhai barrier lake

在枯水位与洪水位之间,对应滨湖沉积区;而 LS12,LS13 两个剖面均由砾石构成,砾石受侧向水流的影响较大,表明沉积时水体动荡不稳定,且细颗粒沉积物均因河流进积作用汇入湖盆(许会等,2019),所以此处对应河湖交汇区。古堰塞湖的发展演化对于河谷地貌产生重要影响,随着水体淤积,河流原有的侵蚀基准面上升,加快了河湖交汇口以上河段堆积地貌的形成;而堰塞湖的溃决对下游河谷形成巨大的冲刷作用,由此形成沟壑纵横的冲蚀地貌。

### 3 堰塞湖年代讨论

沉积年龄早晚、沉积物类型对测年方法的限制较大,据此测试得到的年龄数据会有不同的时限和误差(陈铁梅,1995;田婷婷等,2013)。在针对第四纪湖相沉积物的年代学研究中,OSL 与<sup>14</sup>C 测年已成为研究者普遍的选择(English et al., 2001;易朝路等,2005;张家富等,2007;张克旗等,2015),因此,笔者根据 OSL 测年数据结合周边堰塞湖沉积速率计算综合讨论阿娘寨古堰塞湖的年龄。

#### 3.1 OSL 测年

光释光采样选择具有完整连续沉积的 LS01 团结村剖面(31°00′43.19″N,102°05′12.15″E)和 LS09 马厂村剖面(31°01′10.52″N,102°24′42.86″E)(图 7-A)。其中,LS01 选取粉砂质黏土层的底部和顶部进行采样(图 7-B,C),该层沉积物分选良好,成分均匀(图 7-D,E),形成于深湖—半深湖,水动力微弱,以静水沉积为主,沉积速率较小,因此具有充分的晒退条件;LS09 剖面则是于上下两层细砂中进行取样(图 7-F,G),样品符合采集条件(图 7-H,I)。样品采集于新鲜开挖剖面,采样时全程进行了避光处理。

4 个 OSL 样品在中国地质科学院地质力学研究所新构造运动与地质灾害重点实验室进行测试,采用单片再生剂量法(SAR)对石英颗粒进行 OSL 测年,前期制样过程采用常规处理过程(Aitken,1985;Lu et al.,1988)。测试结果如表 2 所示,LS01 与 LS09 两个剖面顶底的样品测出的年龄在误差范围内,两者基本一致,说明 MCC03 采样点应接近 LS09 剖面最底部沉积,本次 OSL 测年结果也进一步说明阿娘寨堰塞湖存在的合理性。

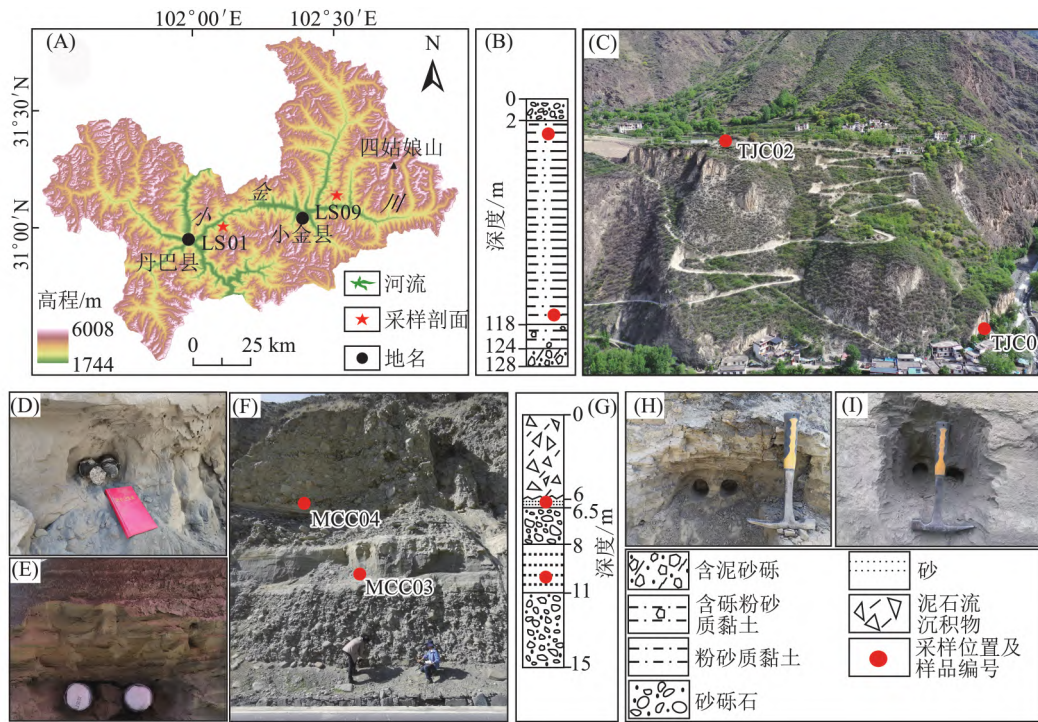


图 7 OS� 采样位置

Fig. 7 Sampling position for photoluminescence

(A) OS� 采样剖面 LS01 和 LS09 所处位置; (B) LS01 剖面岩性柱及采样点位置; (C) LS01 剖面 OS� 采样点位置; (D) TJC01 采样后记录; (E) TJC02 采样后记录; (F) LS09 剖面采样点位置; (G) LS09 剖面岩性柱及采样点位置; (H) MCC04 采样后记录; (I) MCC03 采样后记录

表 2 阿娘寨古堰塞湖光释光样品年龄测定结果

Table 2 Results of age determination of photoluminescence samples from Aniangzhai ancient barrier lake

野外编号	埋深/m	U/ ( $\mu\text{g/g}$ )	Th/ ( $\mu\text{g/g}$ )	K/ %	含水量/ %	有效 测片数	环境剂量率/ (Gy/ka)	等效剂量/ Gy	年龄/ ka
TJC01	116.0	3.06	15.9	1.89	10±2	30	3.669±0.10	57.66±6.87	15.7±1.9
TJC02	3.0	2.39	14.1	2.20	10±2	36	3.672±0.11	33.41±3.57	9.1±1.0
MCC03	3.5	3.71	19.3	2.33	10±2	42	4.395±0.12	71.89±6.61	16.4±1.6
MCC04	0.5	6.73	21.8	2.75	10±2	31	5.566±0.15	44.55±5.09	8.0±0.9

注 1: 含水量为经验值。

其中 LS01 剖面保留较为完整, 因此本文中采用测出的 LS01 剖面顶底年龄来表示阿娘寨古堰塞湖的年龄, 即距今(15.7±1.9)~(9.1±1.0) ka。

### 3.2 沉积速率对比结果

结合前人对青藏高原东南缘主要堰塞湖的年代学研究(表 3), 可以看出, 青藏高原东缘大部分古堰塞湖形成在距今 90~10 ka 之间, 在 10 ka 以来形成的古堰塞湖较少。可见, 晚更新世是堰塞湖形成的一个集中时期, 这应与晚更新世以来青藏高原进入快速隆升期有关(李吉均, 2013), 而通过 OS� 测年得到的阿娘寨古堰塞湖年龄正好在

这个时间范围内。

通过对比阿娘寨古堰塞湖和附近流域(金沙江、岷江)古堰塞湖淤积期间的沉积速率, 结合分析河水体量、流速及河谷地形的差异等沉积速率影响因子可进一步提高该年龄数据的可靠性。不同于即生即消型的堰塞湖, 藏东南缘堰塞湖的年代数据表明(表 3), 发育了巨厚湖相层的堰塞湖持续时间相对较长, 多达几万年, 少则几千年。其中叠溪古堰塞湖的沉积速率最大, 达到了 16~20 mm/a, 而金沙江中下游石鼓、龙街、奔子栏古堰塞湖的沉积速率只有 3~10 mm/a, 均值在 5~

6 mm/a 左右,而根据 OSL 测年得来的阿娘寨古堰塞湖年龄数据为(15.7±1.9)~(9.1±1.0) ka 及最大沉积厚度(128 m),可计算出其沉积速率均值范围在 13.47~34.59 mm/a。其中叠溪古堰塞湖位于阿娘寨古堰塞湖的东北侧,两者直线距离仅 200 km,共处于松潘—甘孜地块(图 1-B),

具有相同的构造背景和气候背景,且均是高山峡谷区形成的堰塞湖,地形十分相似,因此可以推测两者的实际平均沉积速率应相差不大,叠溪古堰塞湖的沉积速率均值范围在 16~20 mm/a,与阿娘寨古堰塞湖相对接近,说明此次 OSL 测年得出的堰塞湖年龄数据是较为可靠的。

表 3 青藏高原东南缘古堰塞湖年龄、厚度对比

Table 3 Comparison of the age and thickness of ancient barrier lakes on the southeastern edge of the Qinghai Tibet Plateau

名称	厚度/m	坝体性质	位置	古堰塞湖形成—溃决年龄
叠溪	230	滑坡	岷江上游	22~10 ka(王兰生等,2005)、30~15 ka(王兰生等,2012)
特米古	15	滑坡	金沙江上游	7.2~4.4 ka(龙维等,2015)、2.15~1.08 ka(吴瑞安等,2022)
奔子栏	120	滑坡	金沙江上游	149~122 ka(张永双等,2007)
石鼓	50	滑坡	金沙江中游	(23.25±1.57)~(9.38±1.19) ka(张信宝等,2020)
龙街	80	滑坡	金沙江下游	(55.02±4.42)~(44.52±3.78) ka(张信宝等,2020)
昔格达	410	岸坡崩塌	金沙江下游	4.2~2.6 Ma B. P. (王书兵等,2006) 4.18~1.78 Ma B. P. (王萍等,2011)
巧家	290	滑坡	金沙江下游	(122.71±8.12)~(81.23±8.24) ka(张信宝等,2020) 100~70 ka(王盈,2019)
大竹卡	100	泥石流	雅鲁藏布江中游	25.6~3.26 ka(胡敬仁等,2004) 32.3~13.2 ka(Hu et al., 2018) 25~9 ka(王萍等,2021)
格嘎	200	冰川坝	雅鲁藏布江上游	41~13 ka(Liu et al., 2015)

### 4 堰塞湖成因分析

研究表明,高山峡谷河流区发生的堰塞事件大部分是由滑坡或泥石流堵江形成的(崔鹏等,2009;李海龙等,2010)。阿娘寨古堰塞湖沉积的最高海拔在 2 637 m,最靠近下游的沉积剖面出露在团结村,意味着坝体必然出现在团结村的下游河段,结合 Google Earth 遥感解译和野外实地调查,发现团结村下游能满足上游区域内堰塞最大高程的坝体只有阿娘寨古滑坡(图 8)。该古滑坡位于丹巴县阿娘寨村(30°58'53.73"N, 102°2'2.86"E),其地貌形态保存较好,整体呈圈椅状,边界较为清晰(图 8-B,C)。滑坡坡脚河面海拔为 2 000 m,现存滑坡顶部平台海拔约 2 585 m(图 8-C),通过对比滑坡附近上下游河床的海拔,发现在滑坡堵江—溃决期间由于水体的淤积和下切作用导致了此处河流裂点的形成,1 km 内河床海拔下切达到 100 m(图 8-C);且以该滑坡为分界线,上下游的河谷地貌呈现较大差异。综上,阿娘寨古滑坡应是此古堰塞湖事件的坝体。

阿娘寨古滑坡位于下泥盆统碛组(D<sub>1q</sub>)地层中(图 8-A),岩性主要为千枚岩、含碳千枚岩以及石英片岩,此处地层经历了较强的区域变质作用,地层岩性条件整体较脆弱。古滑坡东南侧发育一组平移断层,其形成机制如图 8-D 所示,岩层受到 3 个方向的构造主应力作用(朱光等,2003),最大主应力轴 α<sub>1</sub> 和最小主应力轴 α<sub>2</sub> 斜交是水平的构造应力并与滑动面斜交,中间的主应力轴 α<sub>3</sub> 则垂直于断层滑动面。该组平移断层滑动面的走向为 NWW,其附近的下三叠波茨沟组(T<sub>1b</sub>)、二叠系(P)、石炭系(C)以及泥盆系中上统(D<sub>2-3</sub>)地层均存在 NNW 走向的褶皱变形,应是受 α<sub>1</sub> 或 α<sub>3</sub> 方向的水平构造应力挤压而形成的现象。此外,滑坡后壁岩层与对岸基岩均存在韧性变形,变形方向相向(图 9-B,C),据此推测古滑坡地层也受到了 NNW 方向水平构造应力的挤压。研究表明岩石在经过区域变质作用改造后,原岩的塑性将得到一定程度的增强,即相比原始岩层更容易发生韧性褶皱变形(刘俊来等,2007),但随着构造挤压的持续,当变形程度超出岩层本身承受能力时

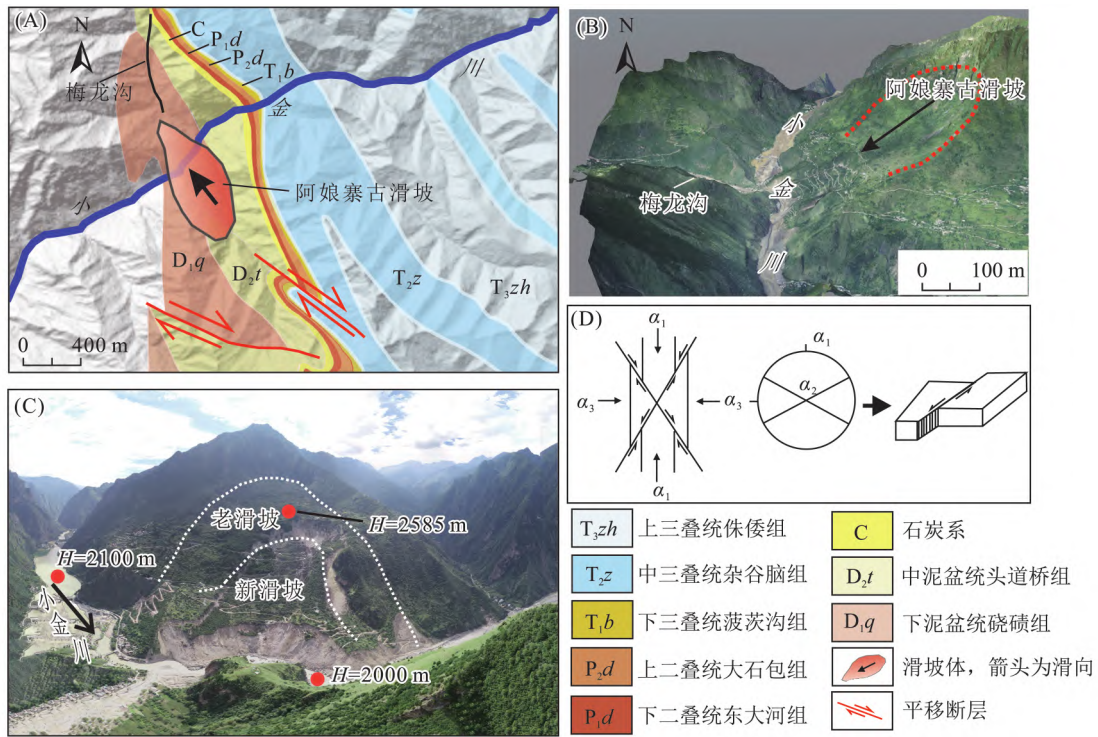


图 8 阿娘寨古滑坡

Fig. 8 Ancient Agniangzhai landslide

(A)阿娘寨古滑坡位置及地质简图;(B)阿娘寨古滑坡三维模型;  
(C)阿娘寨古滑坡野外无人机照片;(D)平移断层形成机制示意图

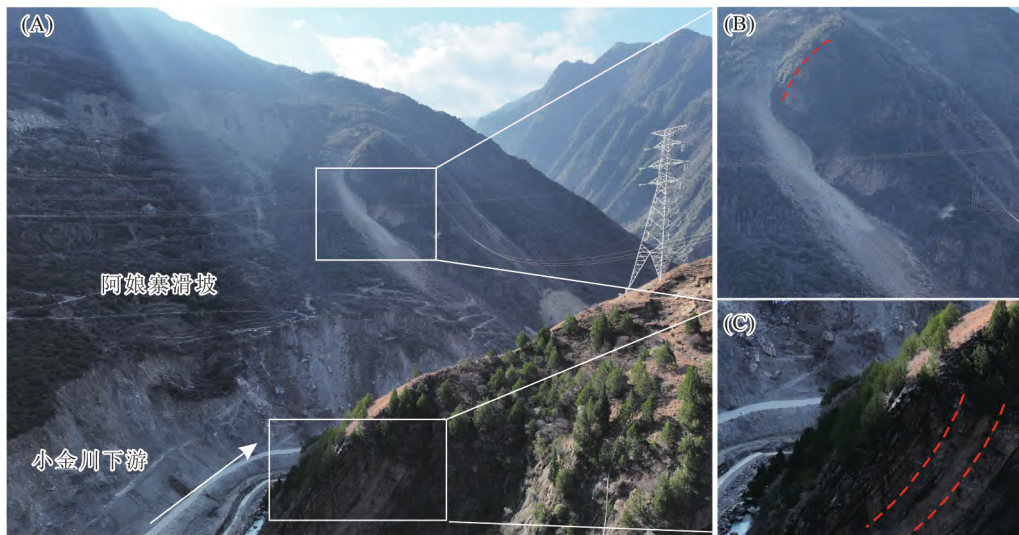


图 9 阿娘寨古滑坡岩层变形及其形成演化示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the deformation of rock and the formation of the Ancient Agniangzhai landslide

(A)阿娘寨古滑坡侧面图;(B)滑坡侧壁岩层变形;(C)滑坡体对岸岩层变形

将转变为脆性变形,并且形成断裂,阿娘寨古滑坡两岸岩层均保留了韧性褶皱变形的证据,并在一定程度的韧性变形后产生断裂,导致上盘岩层下滑形成滑坡堆积。从区域上看,古滑坡位于川滇

南北构造与小金—金汤弧形构造和复合部位,也是南北地震带中段,区域内的构造变形复杂,断裂活动非常活跃(闻学泽等,1989;陈国光等,2007;张培震,2008),并且据前人研究亦表明青藏高原

东南缘自新构造运动以来发生了持续的陆内变形(刘树根等,1995;雷永良等,2008;文竹,2013),所以阿娘寨古滑坡的发生受构造影响的可能性很大。综上分析,岩性和构造应是影响阿娘寨古滑坡发生的主要因素,另外,区内冬夏降雨量差别极大,夏季突发的暴雨可能是阿娘寨古滑坡发生的诱因。

2020年,梅龙沟泥石流事件引起的阿娘寨次级滑坡堵江曾淹没上游关州村大量房屋,同时严重威胁到下游的6个乡镇、17个村、4所学校、3所卫生院、2座寺庙,当地政府紧急转移疏散群众2.12万余人,可见堵江—堰塞—溃决链生灾变给人类生活带来的影响非常深广。现今阿娘寨古滑坡再次处于变形量累积阶段,若因老滑坡失衡再次引起堵江事件,那么造成的生命财产损失必然更大,因此必须对其做好实时监测。

## 5 结论

对小金川两岸出露的13处堰塞湖沉积剖面进行详细的野外观测,通过对比研究其岩性、粒度和沉积构造特征,结合对该古堰塞湖的测年研究,得到了以下几点认识:

a. 这些剖面保留了良好的湖相沉积特征,推测丹巴—小金流域曾发生过重大的古堰塞湖事件,且这些剖面在垂向和纵向上都表现出明显的相变特征,垂向上,沉积物具有向上变细再变粗的沉积特征,反映堰塞湖演化过程中经历了形成、充填和溃决3个时间阶段;纵向上,从下游到上游,粒度组分逐渐变粗,由粉砂质黏土逐渐过渡到粉砂、细砂,且在堰塞湖库尾出现中粗砂、砾石沉积,并且沉积构造也相应由水平层理过渡到浪成层理,在湖滨沉积区大面积出露受洪水影响而形成的粗细粒交替沉积韵律。据此,将阿娘寨堰塞湖在空间上划分为深—半深湖、浅湖、滨湖和河湖交汇区4个沉积区。

b. 针对该古堰塞湖进行了OSL单片再生剂量法(SAR)测年,并结合周边堰塞湖群年龄和沉积速率分析,得到该古堰塞湖的形成—溃决的年代为距今 $(15.7 \pm 1.9) \sim (9.1 \pm 1.0)$  ka。

c. 该古堰塞湖的形成与阿娘寨古滑坡有关,据此命名为阿娘寨古堰塞湖。该大型古滑坡的稳定性受到岩性和构造的制约,古滑坡附近河流裂点明显,且上下游河谷地貌以阿娘寨古滑坡为界

限发生较大的变化,下游冲蚀地貌明显。

## [参 考 文 献]

- 陈国光,计凤桔,周荣军,等,2007. 龙门山断裂带晚第四纪活动性分段的初步研究[J]. 地震地质,29(3): 657—673.
- Chen G G, Ji F J, Zhou R J, *et al.*, 2007. Primary research of activity segmentation of Longmenshan Fault zone since Late-Quaternary[J]. Seismology and Geology, 29(3): 657—673. (in Chinese)
- 陈剑,崔之久,2015. 金沙江上游雪隆囊古滑坡堰塞湖溃坝堆积体的发现及其环境与灾害意义[J]. 沉积学报, 33(2): 275—284.
- Chen J, Cui Z J, 2015. Discovery of outburst deposits induced by the Xuelongnang paleolandslide-dammed lake in the upper Jinsha River, China and its environmental and hazard significance[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 33(2): 275—284. (in Chinese)
- 陈剑,崔之久,陈瑞琛,等,2021. 金沙江上游特米古滑坡堰塞湖成因与演化[J]. 地学前缘,28(2): 85—93.
- Chen J, Cui Z J, Chen R C, *et al.*, 2021. The origin and evolution of the Temi paleolandslide-dammed lake in the upper Jinsha river[J]. Earth Science Frontiers, 28(2): 85—93. (in Chinese)
- 陈铁梅,1995. 第四纪测年的进展与问题[J]. 第四纪研究, (2): 182—191.
- Chen T M, 1995. Progress and problems in Quaternary dating[J]. Quaternary Sciences, (2): 182—191. (in Chinese)
- 陈晓清,崔鹏,程尊兰,等,2008. 5.12汶川地震堰塞湖危险性应急评估[J]. 地学前缘,15(4): 244—249.
- Chen X Q, Cui P, Cheng Z L, *et al.*, 2008. Emergency risk assessment of dammed lakes caused by the Wenchuan earthquake on May 12, 2008[J]. Earth Science Frontiers, 15(4): 244—249. (in Chinese)
- 陈妍,陈世悦,张鹏飞,等,2008. 古流向的研究方法探讨[J]. 断块油气田,15(1): 37—40.
- Chen Y, Chen S Y, Zhang P F, *et al.*, 2008. Discussion on research methods of paleocurrent direction[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 15(1): 37—40. (in Chinese)
- 陈智梁,孙志明, Royden L H, 等,2004. 四川泸定昔格达组的堰塞湖成因及其意义[J]. 第四纪研究, 24(6): 614—620.
- Chen Z L, Sun Z M, Royden L H, *et al.*, 2004. Landslide blocked lake: origin of the Xigeda formation in Luding, Sichuan and its significance[J]. Quaternary Sciences, 24(6): 614—620. (in Chinese)

- 崔鹏,韩用顺,陈晓清,2009.汶川地震堰塞湖分布规律与风险评估[J].四川大学学报(工程科学版),41(3):35-42.
- Cui P, Han Y S, Chen X Q, 2009. Distribution and risk analysis of dammed lakes reduced by Wenchuan earthquake[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 41(3):35-42. (in Chinese)
- 范宣梅,戴岚欣,钟育瑾,等,2021.岷江上游叠溪古滑坡坝—堰塞湖研究进展[J].地学前缘,28(2):71-84.
- Fan X M, Dai L X, Zhong Y J, *et al.*, 2021. Recent research on the Diexi paler-landslide; dam and lacustrine deposits upstream of the Minjiang River, Sichuan, China[J]. Earth Science Frontiers, 28(2):71-84. (in Chinese)
- 郭艳琴,李文厚,郭彬程,等,2019.鄂尔多斯盆地沉积体系与古地理演化[J].古地理学报,21(2):293-320.
- Guo Y Q, Li W H, Guo B C, *et al.*, 2019. Sedimentary systems and palaeogeography evolution of Ordos Basin[J]. Journal of Paleogeography(Chinese Edition), 21(2):293-320. (in Chinese)
- 胡敬仁,孙中良,陈国结,等,2004.日喀则市幅地质调查新成果及主要进展[J].地质通报,23(5):463-470.
- Hu J R, Sun Z L, Chen G J, *et al.*, 2004. New results and major progress in regional geological survey of the Xigaze city sheet[J]. Geological Bulletin of China, 23(5):463-470. (in Chinese)
- 胡凯衡,张晓鹏,罗鸿,等,2020.丹巴县梅龙沟“6·17”泥石流灾害链调查[J].山地学报,38(6):945-951.
- Hu K H, Zhang X P, Luo H, *et al.*, 2020. Investigation of the “6·17” debris flow chain at the Meilong catchment of Danba county, China[J]. Mountain Research, 38(6):945-951. (in Chinese)
- 黄润秋,2007.20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J].岩石力学与工程学报,26(3):433-454.
- Huang R Q, 2007. Large-scale landslides and their sliding mechanism in China since the 20th century[J]. Chinese Journal of Rock mechanics and Engineering, 26(3):433-454. (in Chinese)
- 黄远光,朱锐,张昌民,等,2018.粗粒碎屑岩砾石定向性定量表征方法及应用[J].沉积学报,36(1):12-19.
- Huang Y G, Zhu R, Zhang C M, *et al.*, 2018. A method for quantitative characterization of gravel orientation and its application[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 36(1):12-19. (in Chinese)
- 雷永良,钟大赉,贾承造,等,2008.青藏高原东南缘察隅地区晚新生代岩体差异抬升—剥露和高原扩展的裂变径迹证据[J].岩石学报,24(2):384-394.
- Lei Y L, Zhong D L, Jia C Z, *et al.*, 2008. Late Cenozoic differential uplift-exhumation of batholith and propagation of uplift recorded by fission track thermochronology in Chayu area, the southeast margin of the Tibetan plateau[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(2):384-394. (in Chinese)
- 李翠平,王萍,钱达,等,2015.雅鲁藏布江大峡谷入口河段最近两期古堰塞湖事件的年龄[J].地震地质,37(4):1136-1146.
- Li C P, Wang P, Qian D, *et al.*, 2015. Ages of the recent two episodes of glacially dammed lakes along the upstream of the Yarlung Zangbo gorge[J]. Seismology and Geology, 37(4):1136-1146. (in Chinese)
- 李海龙,张岳桥,李建华,2010.青藏高原东缘南北向河流系统及其伴生古堰塞湖研究[J].第四纪研究,30(4):812-824.
- Li H L, Zhang Y Q, Li J H, 2010. Meridional river systems and ancient dammed lakes on the east margin of the Tibetan Plateau[J]. Quaternary Sciences, 30(4):812-824. (in Chinese)
- 李吉均,2013.青藏高原隆升与晚新生代环境变化[J].兰州大学学报(自然科学版),49(2):154-159.
- 李娟,2012.小金县震后地质灾害危险性评价研究[D].成都:成都理工大学档案馆.
- Li J, 2012. Risk Assessment of Geological Hazard after Earthquake in Xiaojin Country [D]. Chengdu: The Archive of Chengdu University of Technology. (in Chinese)
- 李元昊,刘池洋,独育国,等,2009.鄂尔多斯盆地西北部上三叠统延长组长8油层组浅水三角洲沉积特征及湖岸线控砂[J].古地理学报,11(3):265-274.
- Li Y H, Liu C Y, Du Y G, *et al.*, 2009. Sedimentary characteristics of shallow water delta and lake shoreline control on sandbodies of Chang 8 oil-bearing interval of the Upper Triassic Yanchang Formation in northwestern Ordos Basin[J]. Journal of Paleogeography, 11(3):265-274. (in Chinese)
- 刘俊来,曹淑云,翟云峰,等,2007.用陆块旋转解释藏东南渐新世—中新世伸展作用——来自点苍山及邻区变质核杂岩的证据[J].地学前缘,14(4):40-48.
- Liu J L, Cao S Y, Yi Y F, *et al.*, 2007. Rotation of crustal blocks as an explanation of Oligo-Miocene extension in Southeastern Tibet—evidenced by the Diancangshan and nearby metamorphic core complexes[J]. Earth Science Frontiers, 14(4):40-48. (in Chinese)
- 刘树根,罗志立,戴苏兰,等,1995.龙门山冲断带的隆升和川西前陆盆地的沉降[J].地质学报,69(3):205-

- 214.
- Liu S G, Luo Z L, Dai S L, *et al.*, 1995. The uplift of the Longmenshan thrust belt and subsidence of the western Sichuan foreland basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 69(3): 205—214. (in Chinese)
- 刘宇平, Montgomery D R, Hallet B, 等, 2006. 西藏东南雅鲁藏布大峡谷入口处第四纪多次冰川阻江事件[J]. *第四纪研究*, 26(1): 52—62.
- Liu Y P, Montgomery D R, Hallet B, *et al.*, 2006. Quaternary glacier blocking events at the entrance of Yarlung Zangbo great canyon, southeast Tibet[J]. *Quaternary Sciences*, 26(1): 52—62. (in Chinese)
- 龙维, 陈剑, 王鹏飞, 等, 2015. 金沙江上游特米大型古滑坡的成因及古地震参数反分析[J]. *地震研究*, 38(4): 568—575+697.
- Long W, Chen J, Wang P F, *et al.*, 2015. Formation mechanism and back analysis of paleoseismic parameters of the Temi large-scale ancient landslide in the upper Jinsha river[J]. *Journal of Seismological Research*, 38(4): 568—575+697. (in Chinese)
- 马俊学, 陈剑, 崔之久, 2019. 岷江上游叠溪混杂堆积体的沉积特征及其成因分析[J]. *沉积学报*, 37(1): 72—85.
- Ma J X, Chen J, Cui Z J, 2019. Sedimentary characteristics and causes of formation of diamicts in Diexi, upper Minjiang river, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 37(1): 72—85. (in Chinese)
- 马文华, 贾星亮, 2008. 古流向分析[J]. *内蒙古石油化工*, 34(21): 143—145.
- Ma W H, Jia X L, 2008. Analysis of palaeocurrent direction[J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 34(21): 143—145. (in Chinese)
- 梅志超, 林晋炎, 1991. 湖泊三角洲的地层模式和骨架砂体的特征[J]. *沉积学报*, 9(4): 1—11.
- Mei Z C, Lin J Y, 1991. Stratigraphic pattern and character of skeletal sand bodies in lacustrine deltas[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 9(4): 1—11. (in Chinese)
- 田景春, 陈高武, 窦伟坦, 等, 2004. 湖泊三角洲前缘砂体成因组合形式和分布规律——以鄂尔多斯盆地姬塬白豹地区三叠系延长组为例[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 31(6): 636—640.
- Tian J C, Chen G W, Dou W T, *et al.*, 2004. Origin and association types of lake delta front sandstones and their distribution patterns of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 31(6): 636—640. (in Chinese)
- 田婷婷, 吴中海, 张克旗, 等, 2013. 第四纪主要定年方法及其在新构造与活动构造研究中的应用综述[J]. *地质力学学报*, 19(3): 242—266.
- Tian T T, Wu Z H, Zhang K Q, *et al.*, 2013. Overview of quaternary dating methods and their application in neotectonics and active tectonics research[J]. *Journal of Geomechanics*, 19(3): 242—266. (in Chinese)
- 王兰生, 王小群, 许向宁, 等, 2007. 岷江上游近两万年前发生了什么事件? [J]. *地质前缘*, 14(4): 189—196.
- Wang L S, Wang X Q, Xu X N, *et al.*, 2007. What happened on the upstream of Minjiang River in Sichuan Province 20000 years ago[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(4): 189—196. (in Chinese)
- 王兰生, 王小群, 许向宁, 等, 2012. 岷江叠溪古堰塞湖的研究意义[J]. *第四纪研究*, 32(5): 998—1010.
- Wang L S, Wang X Q, Xu X N, *et al.*, 2012. Significances of studying the diexi paleo-dammed lake at the upstream of Minjiang river, Sichuan, China[J]. *Quaternary Sciences*, 32(5): 998—1010. (in Chinese)
- 王兰生, 杨立铮, 王小群, 等, 2005. 岷江叠溪古堰塞湖的发现[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 32(1): 1—11.
- Wang L S, Yang L Z, Wang X Q, *et al.*, 2005. Discovery of huge ancient dammed lake on upstream of Minjiang river in Sichuan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 32(1): 1—11. (in Chinese)
- 王萍, 李建平, 王建存, 等, 2011. 四川昔格达组地层的石英 Ti 心 ESR 测年及与磁性地层剖面的对比[J]. *核技术*, 34(2): 111—115.
- Wang P, Li J P, Wang J C, *et al.*, 2011. Quartz Ti-center in ESR dating of Xigeda formation in Sichuan and contrast with magnetic stratigraphic profiles[J]. *Nuclear Techniques*, 34(2): 111—115. (in Chinese)
- 王萍, 王慧颖, 胡钢, 等, 2021. 雅鲁藏布江流域古堰塞湖群的发育及其地质意义初探[J]. *地质前缘*, 28(2): 35—45.
- Wang P, Wang H Y, Hu G, *et al.*, 2021. A preliminary study on the development of dammed paleolakes in the Yarlung Tsangpo River basin, southeastern Tibet[J]. *Earth Science Frontiers*, 28(2): 35—45. (in Chinese)
- 王书兵, 赵志中, 乔彦松, 等, 2006. 泸定昔格达组时代认定与古环境[J]. *第四纪研究*, 26(2): 257—264.
- Wang S B, Zhao Z Z, Qiao Y S, *et al.*, 2006. Age and paleoenvironment of Xigeda formation in luding, Sichuan[J]. *Quaternary Sciences*, 26(2): 257—264. (in

- Chinese)
- 王盈,2019.金沙江巧家—东川段堰塞湖沉积及滑坡灾害[D].北京:中国地震局地质研究所.
- Wang Y,2019. Sedimentation and Landslide Hazard of Barrier Lake in Qiaojia Dongchuan Section of Jinsha River[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration. (in Chinese)
- 王兆印,余国安,王旭昭,等,2014.青藏高原抬升对雅鲁藏布江泥沙运动和地貌演变的影响[J].泥沙研究,(2):1—7.
- Wang Z Y, Yu G A, Wang X Z, *et al.*,2014. Impact of tectonic motion on sediment storage and morphology of Yalu Tsangpo Valley[J]. Journal of Sediment Research,(2):1—7. (in Chinese)
- 文竹,2013.四川盆地北部构造变形特征及其陆内变形机制[D].北京:中国地质大学档案馆.
- Wen Z,2013. Structural Deformation Characteristics and Intracontinental Deformation Mechanism in Northern Sichuan Basin[D]. Beijing: The Archive of China University of Geosciences. (in Chinese)
- 闻学泽,Allen C R,罗灼礼,等,1989.鲜水河全新世断裂带的分段性、几何特征及其地震构造意义[J].地震学报,11(4):362—372.
- Wen X Z, Allen C R, Luo Z L, *et al.*,1989. Segmentation, geometric features, and their seismotectonic implications for the holocene XianShuiHe fault zone[J]. Acta Seismologica Sinica,11(4):362—372. (in Chinese)
- 吴崇筠,1981.湖泊沉积相的划分[J].石油勘探与开发,(2):1—10.
- 吴瑞安,张永双,郭长宝,等,2022.金沙江上游特米古滑坡堰塞湖形成与溃决时间讨论[J].地质论评,68(2):586—592.
- Wu R A, Zhang Y S, Guo C B, *et al.*,2022. Discussion on formation and burst time of Temi paleo-landslide dammed lake in the upper Jinsha River[J]. Geological Review,68(2):586—592. (in Chinese)
- 武富礼,李文厚,李玉宏,等,2004.鄂尔多斯盆地上三叠统延长组三角洲沉积及演化[J].古地理学报,6(3):307—315.
- Wu F L, Li W H, Li Y H, *et al.*,2004. Delta sediments and evolution of the Yanchang formation of upper triassic in Ordos Basin[J]. Journal of Paleogeography (Chinese Edition),6(3):307—315. (in Chinese)
- 徐则民,2011.金沙江寨子村滑坡坝堰塞湖沉积及其对普格达组地层成因的启示[J].地质论评,57(5):675—686.
- Xu Z M,2011. Deposits of Zhaizicun landslide-dammed lake along Jinsha River and its implication for the genesis of Xigeda formation[J]. Geological Review,57(5):675—686. (in Chinese)
- 许会,陈剑,崔之久,等,2019.堰塞湖沉积物粒度特征分析——以岷江上游叠溪古堰塞湖为例[J].沉积学报,37(1):51—61.
- Xu H, Chen J, Cui Z J, *et al.*,2019. Grain size characteristics of sediments in a dammed Lake: A case study of the Diexi Ancient Dammed Lake upstream of the Minjiang River [J]. Acta Sedimentologica Sinica,37(1):51—61. (in Chinese)
- 易朝路,崔之久,熊黑钢,2005.中国第四纪冰期数值年表初步划分[J].第四纪研究,25(5):609—619.
- Yi C L, Cui Z J, Xiong H G,2005. Numerical periods of quaternary glaciations in China[J]. Quaternary Sciences,25(5):609—619. (in Chinese)
- 张海泉,何文秀,赵波,等,2021.四川丹巴县“6.17”梅龙沟泥石流—阿娘寨滑坡灾害链现场调查与监测分析[J].科学技术与工程,21(29):12481—12489.
- Zhang H Q, He W X, Zhao B, *et al.*,2021. Analysis of field investigation and monitoring of “6.17” Meilong vally debris flow—Amiangzhai landslide disaster chain in Danba County, Sichuan Province[J]. Science Technology and Engineering,21(29):12481—12489. (in Chinese)
- 张家富,周力平,姚书春,等,2007.湖泊沉积物的<sup>14</sup>C和光释光测年——以固城湖为例[J].第四纪研究,27(4):522—528.
- Zhang J F, Zhou L P, Yao S C, *et al.*,2007. Radio carbon and optical dating of lacustrine sediments—A case study in lake Gucheng [J]. Quaternary Sciences,27(4):522—528. (in Chinese)
- 张克旗,吴中海,吕同艳,等,2015.光释光测年法——综述及进展[J].地质通报,34(1):183—203.
- Zhang K Q, Wu Z H, Lü T Y, *et al.*,2015. Review and progress of OSL dating [J]. Geological Bulletin of China,34(1):183—203. (in Chinese)
- 张培震,2008.青藏高原东缘川西地区的现今构造变形、应变分配与深部动力过程[J].中国科学(D辑:地球科学),38(9):1041—1056.
- 张信宝,刘彧,胡凯衡,等,2020.金沙江折向东流的地质背景、古堰塞湖沉积、第四纪河流演化[J].山地学报,38(6):805—815.
- Zhang X B, Liu Y, Hu K H, *et al.*,2020. Geological implication of the Jinsha River flowing eastward, ancient dammed lake deposition, and quaternary river evolution in China[J]. Mountain Research,38(6):805—

815. (in Chinese)
- 张永双, 赵希涛, 胡道功, 2007. 滇西北德钦地区金沙江奔子栏古堰塞湖的发现及意义[J]. 地质通报, 26(8): 970—975.
- Zhang Y S, Zhao X T, Hu D G, 2007. An ancient landslide-dammed lake found in the Jinsha River valley near Benzilan, Dêqên, Yunnan, China and its significance [J]. Geological Bulletin of China, 26(8): 970—975. (in Chinese)
- 朱光, 刘国生, 牛漫兰, 等, 2003. 郯庐断裂带的平移运动与成因[J]. 地质通报, 22(3): 200—207.
- Zhu G, Liu G S, Niu M L, *et al.*, 2003. Transcurrent movement and genesis of the Tan-Lu fault zone[J]. Geological Bulletin of China, 22(3): 200—207. (in Chinese)
- Aitken M J, 1985. Thermoluminescence Dating [M]. London: Academic Press; 36—39.
- Argentin A L, Hauthaler T, Liebl M, *et al.*, 2022. Influence of rheology on landslide-dammed lake impoundment and sediment trapping: Back-analysis of the Hintersee landslide dam [J]. Geomorphology, 414: 108363.
- Burbank D W, Blythe E A, Putkonen J K, *et al.*, 2003. Decoupling of erosion and precipitation in the Himalayas [J]. Nature, 426: 652—655.
- English P, Spooner N A, Chappell J, *et al.*, 2001. Lake Lewis basin, central Australia: Environmental evolution and OSL chronology[J]. Quaternary International, 83: 81—101.
- Geertsema M, Pojar J J, 2006. Influence of landslides on biophysical diversity—A perspective from British Columbia[J]. Geomorphology, 89(1): 55—69.
- Guo L, He Z T, Li L L, *et al.*, 2023. Lacustrine sedimentary responses to earthquakes—soft-sediment deformation structures since late Pleistocene: A review of current understanding[J]. Earthquake Research Advances, 3(2): 2772—4670.
- Guo X H, Wei J C, Song Z J, 2015. Luminescence dating of a dammed lake formed by Ashegong landslide on the northeastern Tibetan Plateau[J]. Quaternary International, 45(6): 1789—1797.
- Hu H P, Feng J L, Chen F, 2018. Sedimentary records of a palaeo-lake in the middle Yarlung Tsangpo: Implications for terrace genesis and outburst flooding[J]. Quaternary Science Reviews, 192: 135—148.
- Li P, Chen S L, Xu C L, *et al.*, 2021. Sedimentary characteristics and spatial differentiations of the sedimentary facies in the Yellow River sub-delta lobes during the different historical periods[J]. Regional Studies in Marine Science, 47(12): 101997.
- Liu W M, Lai Z P, Hu K H, *et al.*, 2015. Age and extent of a giant glacial-dammed lake at Yarlung Tsangpo gorge in the Tibetan Plateau [J]. Geomorphology, 246: 370—376.
- Liu W M, Wu C H, Liu N N, *et al.*, 2018. Sediment records indicate outburst events of Gega dammed lake at Yarlung Tsangpo River in the Tibetan plateau[J]. Acta Geologica Sinica(English Edition), 93(S2): 87—90.
- Lu Y C, Zhang J Z, Xie J, 1988. Thermoluminescence dating of loess and paleosols from the Lantian section, Shaanxi Province, China [J]. Quaternary Science Reviews, 7(3): 245—250.
- Wang Z, Xu Q, Xiang F, *et al.*, 2024. The “Aniangzhai” ancient dammed lake discovered on the eastern margin of the Tibetan Plateau [J]. Sedimentary Geology, 461: 106578.
- Xu H, Chen J, Cui Z J, *et al.*, 2020. Sedimentary facies and depositional processes of the Diexi Ancient Dammed Lake, Upper Minjiang River [J]. Sedimentary Geology, 398: 42—51.
- Zhang Y, Zhao X, Lan H, *et al.*, 2010. A Pleistocene landslide-dammed lake, Jinsha River, Yunnan, China [J]. Quaternary International, 233(1): 72—80.
- Zhu L, He S M, Qin H K, *et al.*, 2021. Analyzing the multi-hazard chain induced by a debris flow in Xiaojinchuan River, Sichuan, China [J]. Engineering Geology, 124: 68—76.

(责任编辑: 黄维婷)