

doi: 10.12029/gc20220413004

张宇, 徐宗恒, 查玲珑, 陈云英, 陶真鹏. 2024. 不同计算方法的云南省永胜县下院滑坡堰塞湖沉积物粒度特征及沉积历史重建[J]. 中国地质, 51(5): 1761-1775.

Zhang Yu, Xu Zongheng, Zha Linglong, Chen Yunying, Tao Zhenpeng. 2024. Grain size characteristics and sedimentary history reconstruction of the Xiayuan ancient landslide-dammed lake in Yongsheng County, Yunnan Province, based on different calculation methods[J]. Geology in China, 51(5): 1761-1775(in Chinese with English abstract).

不同计算方法的云南省永胜县下院滑坡堰塞湖沉积物粒度特征及沉积历史重建

张宇^{1,2}, 徐宗恒^{1,2}, 查玲珑^{1,2}, 陈云英^{1,2}, 陶真鹏^{1,2,3}

(1. 云南师范大学地理学部, 云南 昆明 650500; 2. 云南省高原地理过程与环境变化重点实验室, 云南 昆明 650500; 3. 云南省玉龙纳西族自治县气象局, 云南 丽江 674100)

摘要:【研究目的】滑坡堰塞湖灾害链危害大,其形成和溃决过程中受外部环境影响大。堰塞湖沉积物作为记录堰塞湖全生命周期的载体,具有良好的古环境和古气候的指示作用,采用最佳解析方法对其进行解读有利于还原沉积物沉积过程及古环境变化。【研究方法】通过野外调查采样和室内测试分析相结合的方法,采用图解法和矩值法计算下堰塞湖沉积物统计特征的适用性问题,使用粒度结合有机质含量重建了堰塞湖沉积环境,对堰塞湖的发育过程进行还原。【研究结果】(1)堰塞湖沉积物分层沉积层序明显,为单一水动力湖相沉积,物质来源稳定,非多物源沉积;综合有机质变化和沉积物粒度特征表明该堰塞湖经历了 4 次干湿周期,在气候和地质活动的共同作用下至少存在 3 次堵塞-泄流沉积过程,估算沉积旋回周期约为 1750 a,该沉积历史应该是断裂带长期复杂的活动和气候-河流共同作用的结果。(2)通过对图解法和矩值法进行统计分析结果表明,两种方法对平均粒径和分选系数评价一致性较好,可直接进行替换;矩值法对偏态峰态整体计算结果比图解法大,在使用中需进行线性代换。由于描述参照值的缘故,偏态、峰态在统计表述中有所偏差。【结论】堰塞湖沉积物粒径分布简单,采用图解法计算更加便捷,与其他沉积物对比方便,推荐图解法对堰塞湖沉积进行计算。研究结果表明粒度特征对堰塞湖的沉积和溃决过程以及滑坡灾害对气候变化的响应研究具有一定的指导意义,可为还原该堰塞湖沉积期的古环境和古气候提供理论依据。

关键词: 滑坡; 堰塞湖沉积; 粒度特征; 图解法; 矩值法; 沉积历史; 环境地质调查工程; 永胜县; 云南省

创新点: 全面系统地对分析了图解法和矩值法在堰塞湖沉积物粒度特征中的应用,尝试使用沉积物粒度特征重建古堰塞湖的发育演化历史。

中图分类号: P954 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)05-1761-15

Grain size characteristics and sedimentary history reconstruction of the Xiayuan ancient landslide-dammed lake in Yongsheng County, Yunnan Province, based on different calculation methods

ZHANG Yu^{1,2}, XU Zongheng^{1,2}, ZHA Linglong^{1,2}, CHEN Yunying^{1,2}, TAO Zhenpeng^{1,2,3}

收稿日期: 2022-04-13; 改回日期: 2022-07-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41967034)和云南省科技计划项目(202401AT0701194)联合资助。

作者简介: 张宇,男,1998年生,硕士生,主要从事山地灾害方面的研究;E-mail: 578014156@qq.com。

通讯作者: 徐宗恒,男,1987年生,副教授,主要从事山地灾害和地质环境方面的研究;E-mail: 553790356@qq.com。

(1. Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, Yunnan, China; 2. Key Laboratory of Plateau Geographic Processes and Environment Change of Yunnan Province, Kunming 650500, Yunnan, China; 3. Meteorological Bureau of Yulong Naxi Autonomous County of Yunnan Province, Lijiang 674100, Yunnan, China)

Abstract: This paper is the result of environmental geological survey engineering.

[Objective] The cascade of disasters caused by landslide-dammed lakes is highly destructive, with its formation and outburst processes significantly influenced by the external environment. The sediment within the dammed-lake serves as a valuable tool for documenting the entire lifecycle of the dammed-lake, offering important insights into paleoenvironment and paleoclimate. Utilizing the most effective analytical methods to interpret this sediment can aid in reconstructing the sediment deposition process and understanding changes in paleoenvironment. **[Methods]** Through sediment sampling for field investigation and laboratory analysis, the suitability of statistical characteristics of dammed lake sediments is assessed using graphical and moment methods. The sediment environment of the dammed lake is reconstructed by analyzing particle size in conjunction with organic matter content, allowing for the restoration of the development process of the dammed lake. **[Results]** (1) The stratified sediment sequence of the dammed lake sediment is distinct, representing a monogenic hydrodynamic lacustrine sediment with consistent material sources rather than polygenic sediment. Analysis of the organic matter and sediment grain size variations indicates that the dammed lake has undergone four cycles of wet-dry periods, with at least three instances of blockage-overflow deposition processes resulting from the combination of climatic and geological factors. The estimated sedimentary cycle period is approximately 1750 a. It is suggested that the sedimentation history is a consequence of prolonged and intricate activities within the fault zone, as well as the combined influence of climate and river dynamics. (2) The statistical analysis results from the graphical method and the moment method indicate a high level of agreement in assessing the average grain size and sorting coefficient, suggesting that they are interchangeable. However, the partial kurtosis values obtained from the moment method are greater than those from the graphical method, necessitating a linear adjustment for practical application. Additionally, deviations from statistical expressions are observed in the skewness and kurtosis due to the reference value description. **[Conclusions]** The grain size distribution of the sediment from the dammed lake is straightforward and easily calculated, making it convenient for comparison with other sediment types. The graphical method is suggested for these calculations. The findings indicate that the grain size characteristics offer valuable insights into understanding the deposition and outburst processes of dammed lake, as well as the response of landslide disasters to climate change. This information can serve as a theoretical foundation for reconstructing the paleoenvironment and paleoclimate of the dammed lake during its deposition phase.

Key words: landslide; deposit of dammed-lake; grain size characteristics; graphical method; moment method; sedimentation history; environmental geological survey engineering; Yongsheng County; Yunnan Province

Highlights: This paper makes a comprehensive and systematic comparison was made on the application characteristics of the graphic method and the moment method in analyzing the grain size features of paleo dammed lake sediments, with an attempt to reconstruct the evolutionary history of paleo dammed lake using these sediment grain size characteristics.

About the first author: ZHANG Yu, male, born in 1998, master candidate, engaged in research on mountain disasters; E-mail: 578014156@qq.com.

About the corresponding author: XU Zongheng, male, born in 1987, associate professor, engaged in the research on mountain disasters and geological environment; E-mail: 553790356@qq.com.

Fund support: Supported by National Natural Science Foundation of China (No.41502340) and Yunnan Natural Science Foundation Project (No.202401AT070119).

1 引 言

堰塞湖是由于河川河道受到阻碍,溪水无法流出,慢慢累积水而形成的湖泊(陈颢,2015),常由滑

坡泥石流堵江而致。堰塞湖灾害危害范围广、灾害损失大、溃决不确定性强,对其发育演化机制尚不明晰(崔鹏等,2009;李乾坤等,2011;Yang et al.,2020;Fan et al.,2021;申通等,2023;王高峰,

2024)。在堰塞湖沉积期内形成的沉积物具有显著的其他沉积物所不具有的高分辨率,沉积时间短,沉积量大,沉积特征显著等优势,已成为很好的古环境和古气候的记录体(Wang et al., 2014; Dufresne et al., 2018; Wang et al., 2019),但由于滑坡的发生和发育同时易受气候变化和地质构造等因素的影响(Sun et al., 2019; Zhang et al., 2020; Wang et al., 2021; Peng et al., 2023),部分发生堵江形成堰塞湖的滑坡(群)具有多期多发的情况,沉积物的复杂性具有明显的对外部条件变化的响应(万飞鹏等, 2023; 谢佐彬等, 2024),对其中作为常用解析指标的粒度特征进行精确解析对还原沉积物沉积过程及外部条件变化就显得尤为重要。

目前,堰塞湖沉积和粒度特征解读方面已经有许多成熟的研究成果。王小群等通过与黄土沉积物、冰川沉积物、封闭湖泊沉积物的对比,证实了叠溪团结村沉积物为古堰塞湖沉积物,并通过粒度、碳氧同位素、孢粉将一万年来的沉积划分为 7 个环境时段(王小群, 2009; 王小群等, 2010, 2013);沈曼(2014)利用堰塞湖沉积物的地震液化现象和粒度信息的周期性变动探究了叠溪大地震的周期分布;前人以风成沉积(徐树建等, 2005; 綦琳等, 2020; 马茜茜等, 2020)、黄土沉积(毛龙江等, 2007)、山区河流(陶敏等, 2011)、堰塞湖溃决物(陈松等, 2017; Xu et al., 2019)、盐湖(曾方明和张萍, 2015)、海洋(贾建军等, 2002; 刘志杰和龙海燕, 2009; 徐兴永等, 2010; 蔡国富等, 2014; 于晓晓等, 2014; 李高聪等, 2020)等沉积物为研究对象,对图解法和矩值法的粒度适用性方面进行研究得到平均粒径和分选系数两者的线性转换规律,但在峰态和偏态方面受制于样品自身性质,两种方法不存在普适性的转换关系。而其他学者则从理论角度出发,对两种方法进行深入剖析(李志亮和杜小如, 2008; 卢连战等, 2010; 付莉莉等, 2011; 刘涛等, 2012),试图揭示两者原理的异同。相关研究结果表明在使用过程中不同的方法对粒度进行解析存在解读多样、样品受限的问题,因此需要对不同类型样品进行单独分析。

位于云南省永胜县下院滑坡堰塞湖沉积物是发育于程海—宾川断裂带鸡腿山西南缘的巨型古滑坡堵塞宾居河形成的。作为滇西北活动性最为强

烈的程海大断裂的主干断裂,程海—宾川断裂带是一条区域性深大断裂,其左旋走滑拉张和垂直错动的运动方式导致频发的地震活动就曾在该断裂带中段诱发产生金沙江右岸寨子村巨型滑坡群(李乾坤, 2011)。目前对滑坡群的研究侧重于成因分析,对堰塞湖系统开展研究较少(李乾坤, 2011; 徐则民等, 2011),本文在前人研究的基础上,以下院滑坡堰塞湖沉积物为研究对象,采用具有测量迅速,适应性广,效率和精度高等优点的激光粒度仪粒度测量方法(王君波等, 2007)对沉积物开展粒度测试,并基于图解法和矩值两种方法结合理论与实验数据,对堰塞湖沉积物粒度特征及其计算问题进行研究。最后结合沉积物有机质含量这一化学指标,重建沉积环境,还原该堰塞湖发育历程,进一步探究古滑坡对气候变化的响应。

2 研究区概况

研究区位于云南省永胜县片角镇下院村委会,受程海—宾川断裂带长期强烈活动影响以及特殊的区域地形地貌和宾居河侵蚀的多重因素作用下,在下院村北东方向约 2 km 的鸡腿山西南缘诱发了规模巨大的断裂带滑坡群,下院滑坡为其中典型滑坡之一(图 1)。宾居河位于金沙江干热河谷地带,为金沙江一级支流,发源于大理宾川县鸡足山镇茅草坪(张坤等, 2017),宾居河自源头由西向东,转折北流,在丽江市永胜县片角花坪汇入金沙江。下院滑坡发育于宾居河汇入金沙江处上游右岸约 3 km 处,程海—宾川断裂带从滑坡体中下部通过,滑坡滑动方向 287° ,滑床产状 $287^\circ \angle 32^\circ$,与程海断裂带倾向一致。根据历史影像和现场调研发现,滑源区后缘最大标高约 2250 m,推测滑源区平均宽约 1.5 km。滑源区前缘至后缘距离约 2 km,滑体平均厚度 50 m,估计滑坡方量约 $1.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。滑坡前缘堆积体曾造成宾居河堵塞,虽然滑坡坝后期受到侵蚀,但目前仍有约 $2.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的堆积体残留于宾居河左岸(查玲珑等, 2022)。受下院滑坡堆积体前缘以及毗邻的达古旦滑坡影响,河道发生摆动,改道为 Ω 状,长期稳定存在的滑坡坝使得在其上游形成了连续分布且厚度较厚的堰塞湖沉积物。

本次取样点是出露于下院村旁的一典型沉积物剖面($24^\circ 51.904' \text{N}$, $102^\circ 50.827' \text{E}$, 1288 m)。该剖

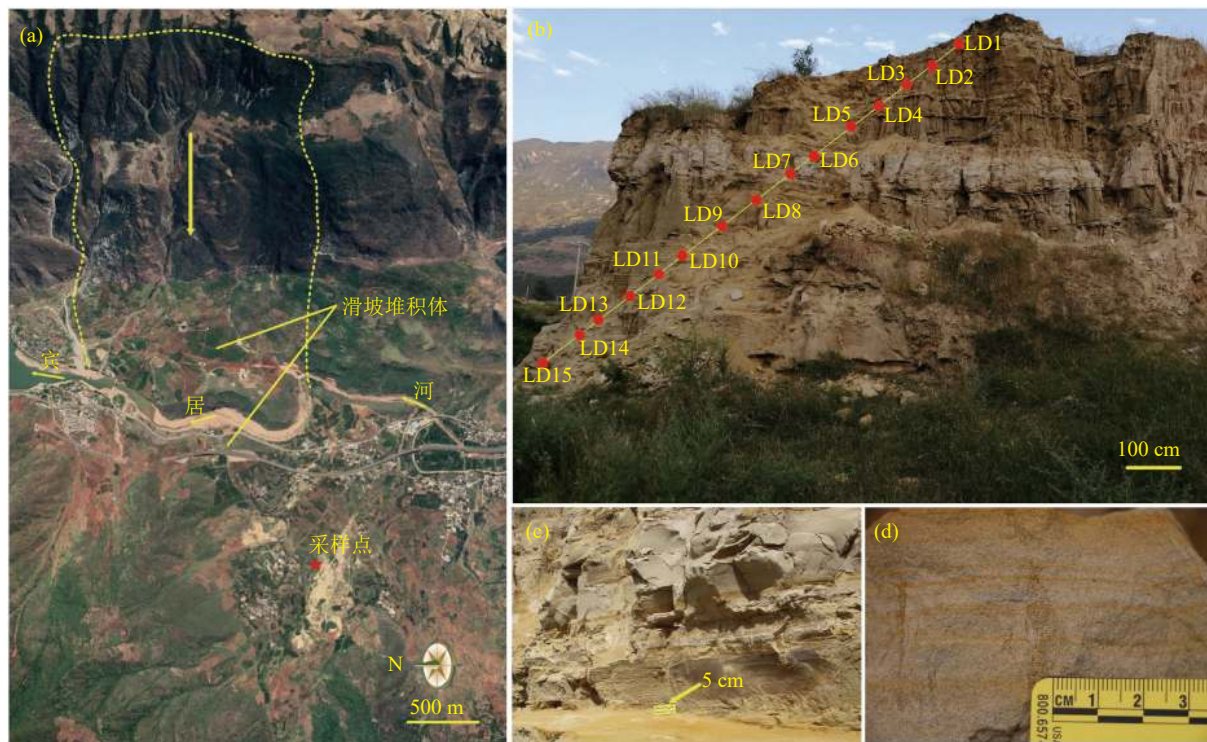


图1 取样位置点及堰塞湖沉积物宏观特征

Fig.1 Sampling location and macroscopic characteristics of the sediments of dammed lake

面位于宾居河下游左侧,距河岸较近,为后期宾居河支沟冲蚀而成。取样剖面整体来看,剖面高度约10.5 m(未揭穿底部),上覆约10 cm土壤层,无作物种植,无砾石等河流相沉积。沉积物具有明显的水平层理构造,无尖灭和透镜体现象,无断层等地质构造痕迹,沉积层序明显,说明该剖面形成于比较稳定的堰塞湖水动力环境条件。剖面上半成岩状态的砂泥岩互层特征明显,厚度不均匀,但由于不同沉积时期物源的差别,在剖面上沉积物质的颜色、颗粒大小等的纵向变化明显。在对堰塞湖沉积剖面体现的不同位置不同深度的沉积相进行详细观察和描述的基础上,结合沉积相上宏观上粒度、颜色差异以及夹层分层的情况进行了15层的取样,自上而下编为LD1~LD15。LD1为堰塞湖相浅黄—黄白色粉土层,发育水平层理;LD2~LD5为堰塞湖相偏褐色砂—粗砂层,间有干层;LD6、LD7为堰塞湖相黄白色粉土,固结程度较高;LD8~LD11为堰塞湖沉积砂—粗砂层,沉积厚度较上层厚;LD12为堰塞湖黄白色粉土层,水平层理为主;LD13堰塞湖沉积为砂—粗砂层;LD14、LD15为浅黄色粉土层,沉积构造以水平层理为主。在取样

时,首先去除剖面表面约10 cm受降雨侵蚀和风化影响的沉积物,对该剖面出露新鲜岩层自上而下每层采挖土样数千克,充分混合均匀后在实验室条件下对沉积物开展粒度测试并用图解法和矩值法对其粒度特征开展相关研究。

3 研究方法

3.1 测试方法

激光粒度仪测量沉积物粒度具有用样少、测量快、准确率高的显著优势,因此得到广泛使用(袁红旗等,2019)。湖泊沉积物研究中通常有许多代用指标,粒度指标是与湖泊水位进行直接联系,反映沉积水动力条件,并作为气候干湿变化的重要证据。目前对粒度数据通常有两种解读:(1)在长时间尺度、低分辨率研究中,粗粒沉积物常常用来指示水位降低、湖泊面积缩小的干旱气候时期;细粒沉积物用来指示湖泊水位升高、湖泊面积增大的湿润气候期;(2)在短时间尺度、高分辨率的相关研究中,粗粒沉积物指示来水较多搬运能力强的降水量较大的湿润年份;细粒沉积物则指示降水量小的干旱年份。因此,具体解读要依靠实际环境状况进行

分析(孙千里等, 2001; 陈敬安等, 2003)。堰塞湖沉积物在符合以上特征的同时具备自己的独有特性: 即沉积快、存在时间短、湖区狭长比降大、流域水源单一、湖盆陡峭无湖滨带等洪水缓冲区、水位上升快、存在多次溃决状况, 因此对堰塞湖沉积物的粒度特征的解读更加复杂。存在气候变化导致上游来水对搬运沉积的影响、河流堵塞导致湖面水位急剧上升对河流顶托作用加强, 短期溃决及多次溃决对湖泊水文特征的影响, 三重因素叠加之下难以采用现有的湖泊沉积的粒度分析方式进行解读, 故本文结合另一古气候常用指标有机质含量进行联合解析。

本文主要研究堰塞湖沉积物粒粒径的特征, 因此需对沉积物颗粒进行充分分散, 以去除钙质胶结、有机质等杂质, 只保留分散均匀的沉积物颗粒即可。由已有研究结果发现, 前处理时加入盐酸以后在洗酸的过程中人为操作可能会造成细颗粒流失(王力等, 2018), 或是洗酸不彻底会造成颗粒絮凝并对测试样品粒度结果造成影响(刘海丽等, 2012)。所以此处采用不加盐酸的方法对样品进行前处理, 首先利用 10% 的过氧化氢去除样品中的有机质, 然后用 0.5 mol/L 的 10 mL 六偏磷酸钠分散剂并使用仪器自带超声振动 10 s 进行分散、测定(付莉莉等, 2011)。本文所涉及粒度分析实验前处理及测量在云南省高原地理过程与环境变化重点实验室采用 Malvern 2000 激光粒度仪测试完成, 该仪器可测量 0.02~2000 μm 粒径范围的沉积物颗粒。有机质的测量采用重铬酸钾氧化加热法, 在实验室自行测定完成。

3.2 粒度参数计算统计方法

粒度分布曲线通常为正态分布, 常用的描述粒度统计特征的参数主要有: 平均粒径(M_z)、中值粒径(d_{50})、分选系数(Sd)、偏态(Sk)和峰态(Ku)。目前, 对以上参数的计算通常有两种方法: 图解法和矩值法。图解法为根据粒径频率分析结果绘制累计曲线, 并在曲线上选取计算所需的代表性点, 代入公式得出结论。矩值法是根据数理统计原理, 定量计算粒度分布特征的计算(卢连战和史正涛, 2010)。在充分汲取前人成果基础上, 进一步针对堰塞湖沉积物的粒度特征在图解法和矩值法的适用性问题进行探究, 并深入分析两种计算方法产生

差异的内在原因, 试图建立两种方法的联系。

本文图解法采用最经典的 Folk-Ward 图解法(Folk and Ward, 1957)和 Friedman 矩法矩值法公式对堰塞湖沉积物的粒度特征进行计算(马茜茜等, 2020)。Folk-Ward 图解法计算公式:

$$M_z = (\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84}) / 3 \quad (1)$$

$$Sd = (\Phi_{84} - \Phi_{16}) / 4 + (\Phi_{95} - \Phi_5) / 6.6 \quad (2)$$

$$Sk = (\Phi_{16} + \Phi_{84} - 2\Phi_{50}) / [2(\Phi_{84} - \Phi_{16})] + (\Phi_5 + \Phi_{95} - 2\Phi_{50}) / [2(\Phi_{95} - \Phi_5)] \quad (3)$$

$$Ku = (\Phi_{95} - \Phi_5) / [2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25})] \quad (4)$$

式中, M_z , Sd , Sk , Ku 分别为平均粒径, 分选系数, 偏态和峰态。 Φ 值标度为克鲁宾(Krumbein)转换方法: $\Phi = -\log_2 D$, D 为粒径(mm); Φ_5 、 Φ_{16} 、 Φ_{25} 、 Φ_{50} 、 Φ_{75} 、 Φ_{84} 、 Φ_{95} 分别为粒度累计曲线上 5%、16%、25%、50%、75%、84%、95% 对应的颗粒直径。平均粒径 M_z 可以表示剖面上纵向的粒度变化情况, 对沉积韵律有指示作用。

目前使用较广的 Friedman 矩值法对堰塞湖沉积物粒度特征进行研究, 采用的计算公式如下:

$$M_z = \frac{1}{100} (\sum f M^\phi) \quad (5)$$

$$Sd = \sqrt{\sum (M_z - X)^2 f / 100} \quad (6)$$

$$SK = \sum f (M_z - X)^3 / (100 S d^3) \quad (7)$$

$$Ku = \sum f (M_z - X)^4 / (100 S d^4) \quad (8)$$

式中, M_z , Sd , SK , Ku 分别为平均粒径、分选系数、偏态和峰态; f 为某一粒级的百分含量(频率); M^ϕ 为某一粒径的中值点(以 Φ 制表示)。

4 结果分析

4.1 粒度频率分布特征

通过野外调查采样对堰塞湖沉积物激光粒度数据绘制粒径分布频率曲线和累计粒度分布曲线(图 2)。堰塞湖沉积物粒度分布频率曲线均为单峰正态分布, 表明颗粒进入堰塞湖的过程中只受到一种外力作用, 即河流水动力的影响。且该分层沉积层序明显, 水动力条件单一, 且较为平稳, 物质来源

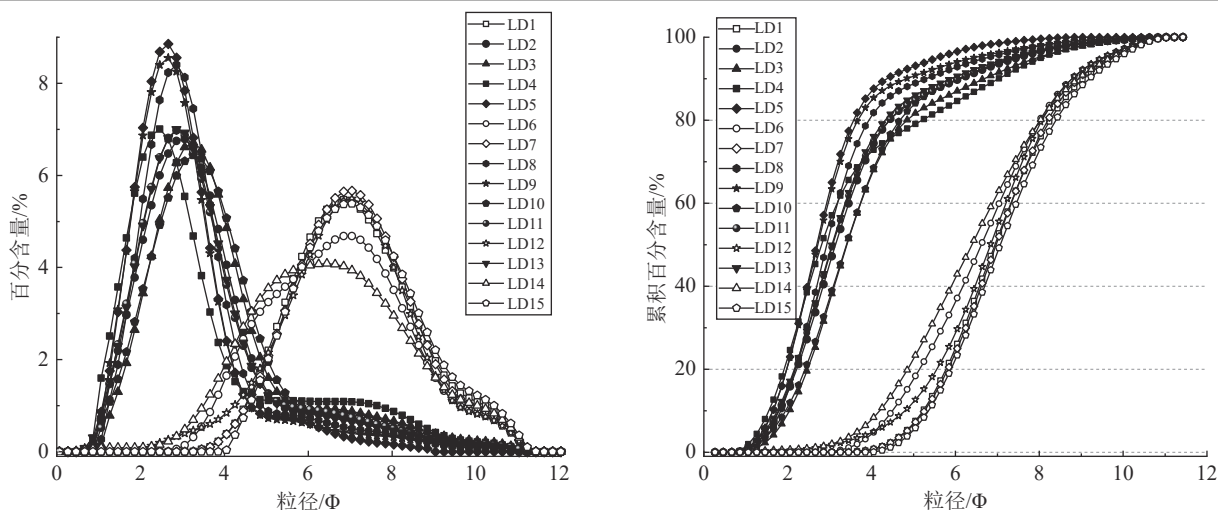


图 2 样品粒径分布频率曲线和累积曲线

Fig.2 Sample particle size distribution frequency curve and cumulative curve

稳定,非多物源沉积(朱筱敏,2008;王盈,2019),可排除风沙和冰川作用影响,为典型湖相沉积物。同时还可以看出,部分样品取样位置相邻,沉积物源类似,频率分布和累计粒度分布曲线均表现出相同的特征,故将其可以归为一组进行分析。

本文将 15 层的部分土样合并,按照自上而下的沉积顺序统一划分为 7 组,对 7 组样品的整体特征进行分析探究。组一(LD1)、组三(LD6、LD7)、组五(LD12)为粉砂质沉积,沉积物粒径呈单峰分布,主要集中在 $6\Phi\sim 8\Phi$,为细粒分布;组二(LD2、LD3、LD4、LD5)、组四(LD8、LD9、LD10、LD11)、组六(LD13)均为砂质沉积,两尾端含量较低,为单峰分布,粒径分布在 $2\Phi\sim 4\Phi$,粗粒沉积为主说明沉积水动力较强;组七(LD14、LD15)均为单峰分布的粉砂质沉积,其中 LD14 粒径分布于在 $5\Phi\sim 8\Phi$,分布范围相对较宽,LD15 集中在 $6\Phi\sim 8\Phi$,以细粒沉积为主。在频率累积图中两种沉积累积曲线划分明显,砂质沉积在 $2\Phi\sim 4\Phi$ 间显著上升,由于含部分细粒沉积,砂质曲线上升至 90% 左右,开始细粒的缓慢累积,该概率累积曲线为二段型,表明水动力发生变化的频率增加,在 2Φ 附近,曲线明显变陡,说明沉积主要集中在该区域,且沉积较均匀,而曲线两端较平,斜率低说明沉积少且分布不均匀。组二、组四、组六这三组砂质沉积累积曲线分散,重合度低,一方面与水环境变化较大,沉积环境不同有关;另一方面与颗粒粒径变大,颗粒沉积对水动力

变化敏感降低,水力搬运分选能力变差,导致沉积物沉积粒度分布不均;粉砂质在 $6\Phi\sim 8\Phi$ 上升迅速,综合累积粒度分布曲线也可以看出在该范围内曲线较陡,概率累积曲线为一段型,颗粒较小,表明沉积环境相对恒定,沉积物来源稳定,水力波动较小,且各层间频率曲线重合度较高,可认为 1、6、7、12、14、15 这 6 层粉砂沉积物经历了湖泊水环境水文条件大致相似的沉降运动。

本文依据“乌登-温特沃斯”(Udden-Wentworth)粒径分级标准,将堰塞湖沉积物划分为黏土($<2\mu\text{m}$)、粉砂($2\sim 63\mu\text{m}$)、砂($>63\mu\text{m}$)三个粒级进行讨论分析,各粒级百分含量如图 3 所示。同时根据所取 15 层样品粒度分级性质,绘制谢帕德三角图,对样品粒级进行命名分类。由图 3 可知,这 15 层样品可按沉积顺序和沉积环境分为以下 7 组:(1)组一为剖面出露顶端,上覆地层已充分成壤,且仅此一层为粉砂,该层以粉砂为主,占比达 87.87%,其次为黏土,砂组分基本没有,粒径整体偏细,反映了水动力较弱的稳定湖泊沉积环境;(2)LD2、LD3、LD4 为粉砂质砂,LD5 为砂,层理结构清晰,层间夹层明显,该组沉积以砂为主,占比 63%~85%,其次为粉砂 15%~33%,黏土含量低于 4%,尤以 LD5 颗粒最粗,基本不含黏土,砂含量比上覆三层高 19%,这 4 层虽连续沉积砂质组,但层间有以黏土颗粒为主的夹层出现,且该夹层层面表面具有硬壳状结皮,推测在该沉积周期内曾出现短暂气候干旱事件,沉

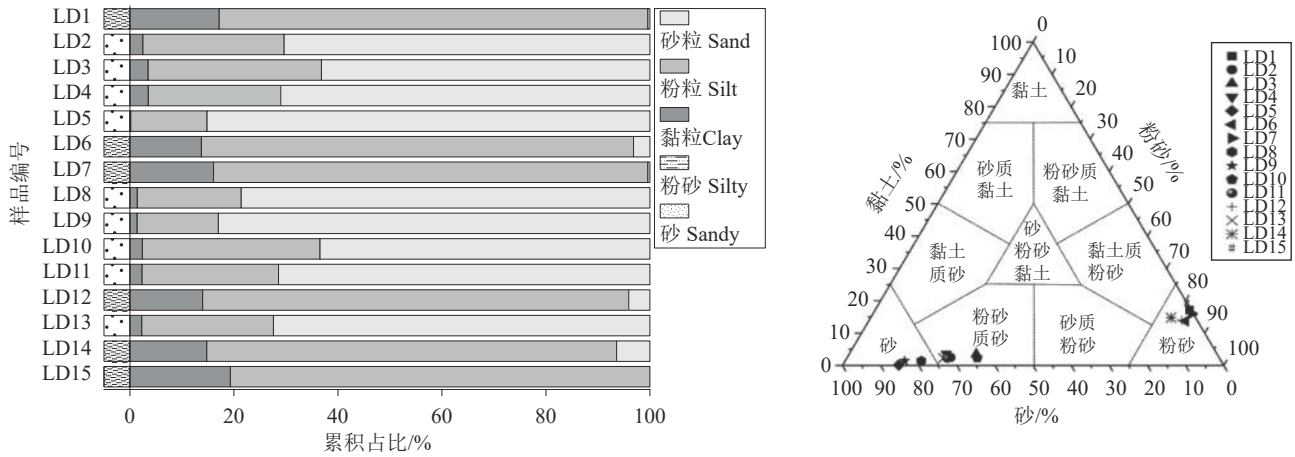


图 3 堰塞湖沉积物分类及谢帕德三角图
Fig.3 Sheppard's triangle diagram of the sediment of dammed lake

积物粒度对气候事件具有明显动态响应；(3)LD6、LD7 为粉砂，粉砂占比 83% 以上，黏土占比 13% 左右，粒径分布集中，整体机械组成与 LD1 相近；(4)LD8、LD9 为砂，LD10、LD11 为粉砂质砂组，砂含量为 71%~82%，粉砂含量 16%~34%，层间区分明显，颗粒组成有所差别，沉积水动力波动明显，但整体机械组成与 LD2~LD5 粉砂质砂组相似，表明了堰塞湖具有沉积旋回的特征；(5)LD12 为单独沉积的粉砂层，以粉砂为主，占比 81%，与上覆地层粉砂沉积机械组成高度一致，且 LD12 下覆地层沉积物颗粒组成几乎相同，说明该三个沉积阶段具有沉积演化趋势的连贯性；(6)LD13 为独有的单层粉砂质砂沉积，其上下覆地层均为粉砂，以砂为主占比 72%，粉砂占 25%，与 LD11 一致，也表现出堰塞湖沉积旋回的特征；(7)该出露地层的 LD14、LD15 为粉砂沉积，粉砂占比分别为 78%、80%，黏土为 15%、19%，且 LD15 无砂沉积，在出露地表所有地层中颗粒最细，由于该地层并未完全出露，因此下覆地层状况有待于进一步探究。

4.2 粒度参数特征

为了实现堰塞湖沉积物粒度特征的精准解读，按照 Folk-Ward 图解法和 Friedman 矩值法公式对堰塞湖沉积物的粒度参数进行计算，结果如图 4 所示，并对各层沉积物的分选性、偏态和峰态做出评价，结果如表 1 所示。从表中可以看出，两种计算方法得到的指标变化趋势具有一致性。整体而言，砂比粉砂分选性更差、更加正偏、峰态更加尖锐，这

与砂沉积过程中水动力更强有关。(1)分选系数除 LD4 分选差外，其余 14 层均为分选较差，这与频率分布结果相一致，两种计算方法得出的结论相同。在该堰塞湖沉积条件下，各层的沉积物分选性都不好，从图 4 可以看出，粉砂和砂的分选性相差不大，而与沉积顺序呈现出抱团特征，推测与沉积过程中的水动力条件周期性变化有关，从侧面说明了沉积过程的连续性。(2)两种方法计算得到的偏态描述样品间差异较大，整体表现为 LD1~LD4 图解法比矩值法更加正偏一级，但在具体数值中，矩值法明显比图解法大得多，LD5~LD15 中除 LD11 图解法为极正偏矩值法为正偏，其余样品两种方法描述指标一致，具有较好的适配性，说明在部分样品方面，两种方法对偏态的描述存在偏差，需进一步适配分析。无论矩值法还是图解法，砂层都比粉砂层更加正偏，即粗粒组分偏多，这与频率分布结果一致。(3)峰态描述中，两种计算方法得出的数据一致性较好，矩值法整体计算结果比图解法更大，表述方面也存在矩值法比图解法更尖锐的情况。两种方法中除 LD12 粉砂为尖锐，其余 5 层均为中等；图解法中砂层全部为尖锐峰态，而矩值法大部分为很尖锐，可见随着沉积物粒径的增加，两种方法计算得到的结果差异增大，该结果与频率分布曲线一致，从曲线中可看出砂层分布比粉砂更加尖锐。

结合平均粒径可以看出，粉砂层粒径小，分选性更好，频率曲线也更加对称，峰态更加宽平；砂层平均粒径较大，分选性较粉砂略差，频率曲线更加

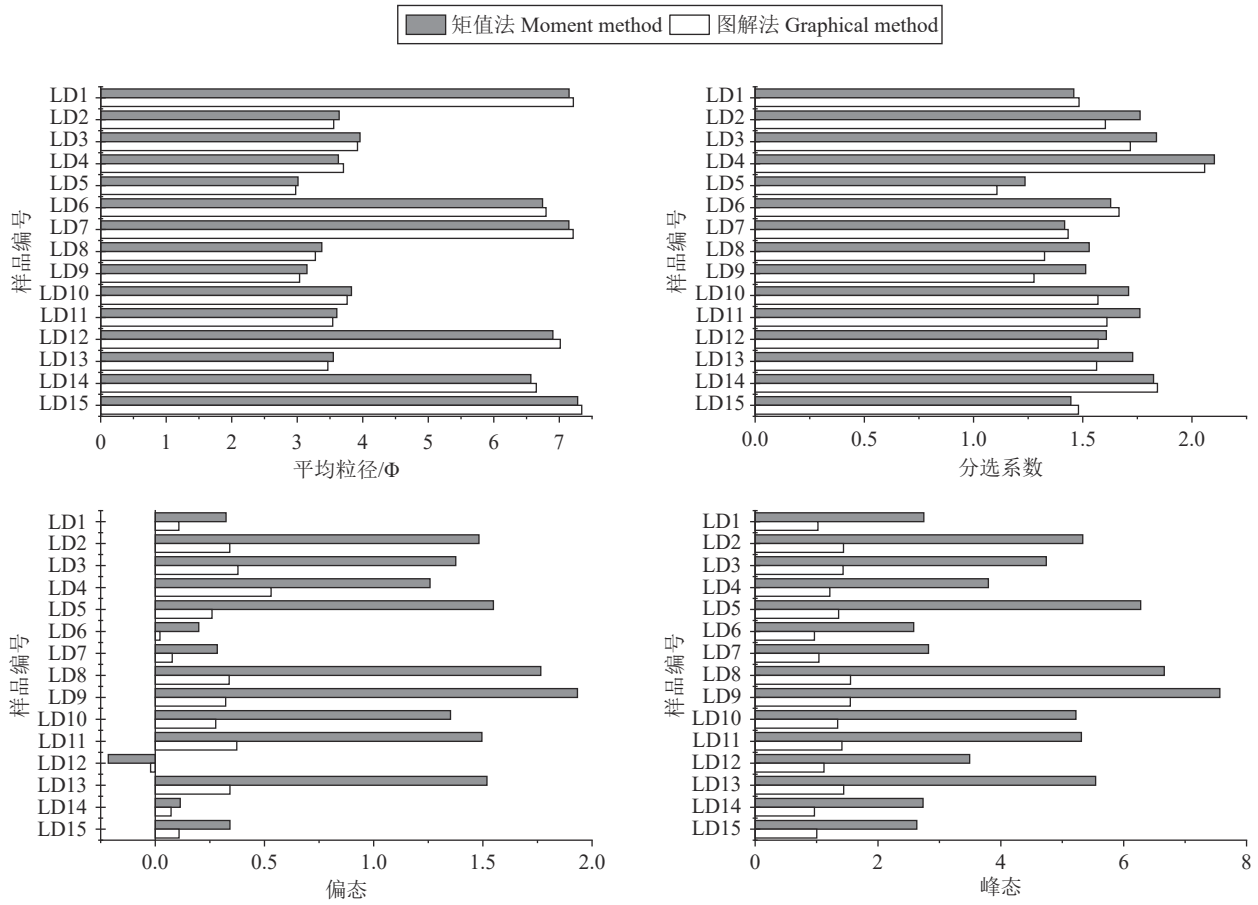


图4 堰塞湖沉积物粒度参数
Fig.4 Granularity parameter of the sediment of dammed lake

表1 样品主要粒度参数描述

Table 1 Description of main particle size parameters of samples

样品 编号	矩值法			图解法		
	分选系数	偏态	峰态	分选系数	偏态	峰态
LD1	分选较差	近对称	中等	分选较差	正偏	中等
LD2	分选较差	正偏	很尖锐	分选较差	极正偏	尖锐
LD3	分选较差	正偏	尖锐	分选较差	极正偏	尖锐
LD4	分选差	正偏	尖锐	分选差	极正偏	尖锐
LD5	分选较差	极正偏	很尖锐	分选较差	正偏	尖锐
LD6	分选较差	近对称	中等	分选较差	近对称	中等
LD7	分选较差	近对称	中等	分选较差	近对称	中等
LD8	分选较差	极正偏	很尖锐	分选较差	极正偏	尖锐
LD9	分选较差	极正偏	很尖锐	分选较差	极正偏	尖锐
LD10	分选较差	正偏	很尖锐	分选较差	正偏	尖锐
LD11	分选较差	正偏	很尖锐	分选较差	极正偏	尖锐
LD12	分选较差	近对称	尖锐	分选较差	近对称	尖锐
LD13	分选较差	极正偏	很尖锐	分选较差	极正偏	尖锐
LD14	分选较差	近对称	中等	分选较差	近对称	中等
LD15	分选较差	正偏	中等	分选较差	正偏	中等

正偏,整体峰态更尖锐,这与沉积物中的细粒组分有关。在对堰塞湖沉积物的描述中,图解法可以更

好地表述沉积物的整体特征,矩值法受极端值的影响较大,在堰塞湖这种结构复杂的沉积物中存在一

定的适用性问题。虽然图解法只是部分子集,但是去掉两端的图解法也减少了极端值的影响。综合以上分析认为,在堰塞湖沉积物的粒径分析中,优先推举公式更简单、方便、经典的图解法进行计算。为进一步探究图解法和矩值法在堰塞湖沉积物中的实用性,对两种方法进行定量分析。

对图解法和矩值法的几个主要粒度统计参数进行 Pearson 相关分析,并定量回归分析如表 2 所示。从表中可以看出,图解法与矩值法计算的平均粒径($R^2=0.999$, $p<0.01$)、分选系数($R^2=0.829$,

$p<0.01$)、偏态($R^2=0.755$, $p<0.01$)峰态($R^2=0.897$, $p<0.01$)整体变化趋势一致,相关性显著。两种方法的平均粒径、偏态、峰态与中值粒径存在显著相关关系($p<0.05$),分选系数与中值粒径均无显著相关性。为进一步探究两种计算的内在联系,对两种算法的计算进行定量分析探究,如图 5 对上述指标进行拟合分析发现,图解法和矩值法的平均粒径和分选系数存在显著的线性相关关系,且近似分布在 $Y=X$ 上,两者对同一样品的描述可具相同效果,在计算中两者可相互替换,与前人在山区河流沉积

表 2 各粒径统计指标相关性分析
Table 2 Correlation analysis of statistical indexes of particle size

	中值粒径	平均粒径 (距)	平均粒径 (图)	分选系数 (距)	分选系数 (图)	偏态 (距)	偏态 (图)	峰态 (距)	峰态 (图)
中值粒径	1.000								
平均粒径 (距)	0.975**	1.000							
平均粒径 (图)	0.961**	0.996**	1.000						
分选系数 (距)	-0.196	-0.125	-0.114	1.000					
分选系数 (图)	0.154	0.246	0.264	0.882**	1.000				
偏态 (距)	-0.796**	-0.850**	-0.861**	-0.075	-0.482	1.000			
偏态 (图)	-0.607*	-0.568*	-0.554*	0.529*	0.193	0.671**	1.000		
峰态 (距)	-0.836**	-0.893**	-0.907**	-0.025	-0.457	0.907**	0.568*	1.000	
峰态 (图)	-0.711**	-0.775**	-0.793**	0.107	-0.336	0.882**	0.682**	0.936**	1.000

注: **表示在 0.01 级别 (双尾), 相关性显著; *表示在 0.05 级别 (双尾), 相关性显著; (图) 为图解法, (距) 为矩值法。

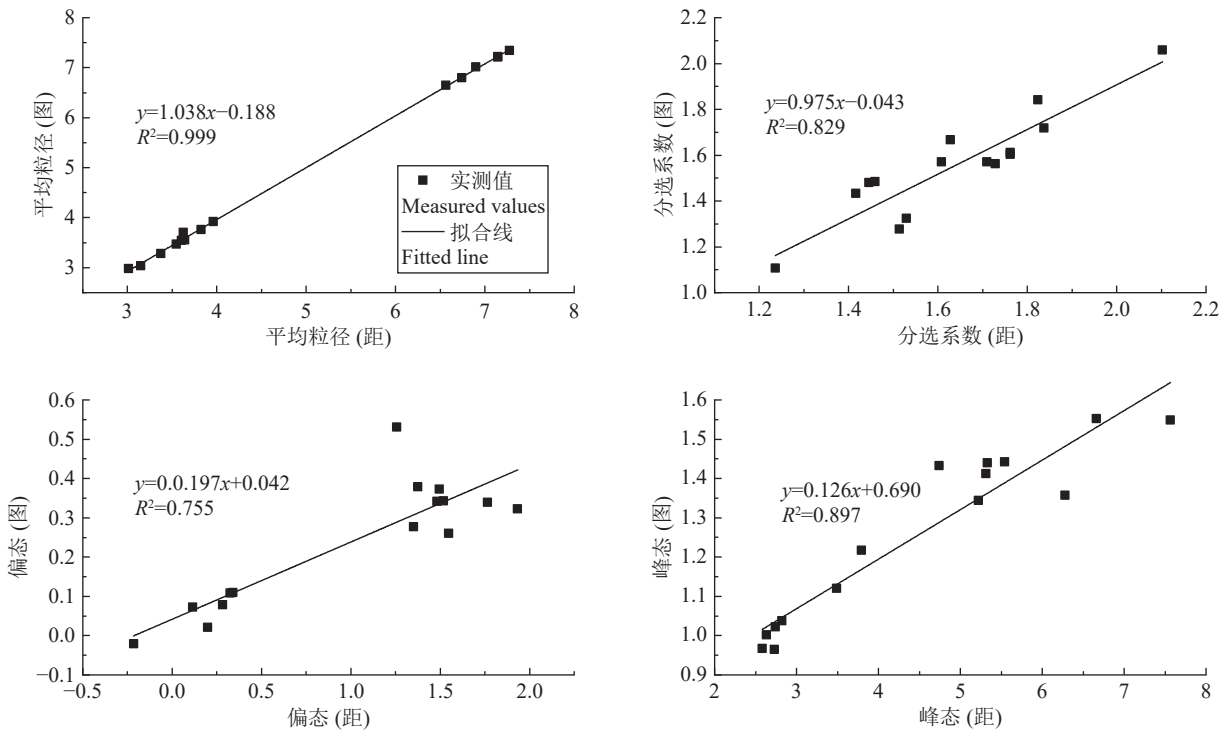


图 5 图解法与矩值法所得参数回归分析
Fig.5 Regression analysis of parameters were obtained by graphic method and moment value method

物、堰塞湖溃坝沉积物、海洋沉积物(贾建军等, 2002; 陶敏等, 2011; 陈松等, 2017)等研究结论一致, 表明两种方法计算的平均粒径和分选系数不受样品限制, 两种方法存在通用性; 图解法和矩值法偏态、峰态进行线性回归, 发现两者都存在一定的线性转换关系, 图解法计算值整体小于矩值法, 且粉砂部分拟合较好, 砂的部分较为分散, 两种算法的数值差异较大, 需进行转换, 在统计变量的描述中需格外注意。这也是在上述统计中, 两种方法的分选系数描述效果一致, 而偏态峰态差异较大的原因。由于中值粒径在图解法计算中应用广泛, 中值粒径与图解法矩值法计算(除峰态)结果相关性显著; 而矩值法由于全部样品数据参与计算, 反映样品整体分布, 中值粒径在计算中的影响较小, 但仍显著, 说明中值粒径能较好地代替样品的整体状况。鉴于图解法和矩值法涉及计算采用同一原始数据, 区别在于图解法选取部分代表性数据, 即样品的子集, 而矩值法代入全部数据, 两者采用不同公式进行计算。初始平均粒径和分选系数计算过程中, 图解法运算简单, 矩值法运算幂次低, 两者用同一数据在不同运算变化下仍存在相关性; 至于偏态计算, 由于矩值法涉及高次幂增加, 图解法指标运算变复杂, 在复杂计算过程中对两者的差异进行指数放大, 虽然仍然相关, 在计算过程中却要进行相应的转换。综上, 图解法与矩值法计算得到的平均粒径、分选系数可直接进行替换, 偏态、峰态需进行线性公式代换, 因为描述参照值的缘故, 偏态、峰态在实际统计描述表达中会有所偏差。

5 讨 论

根据堰塞湖沉积物沉积韵律, 并结合图解法计算所得样品粒度统计特征, 可对堰塞湖沉积过程进行初步解读。下院滑坡顺河道 600 m 以上, 滑坡坝较厚且平缓, 坝高相对河床较高, 宾居河流量小, 干热河谷年降雨量少且集中蒸发量大, 该堰塞湖具备长期存在条件。在粒度基础上, 本文结合沉积环境重建的主要指标之一——有机质(图 6)进行综合分析发现, 在该堰塞湖沉积物中, 有机质含量与粒径大小负相关, 即粒径小有机质含量高。在传统湖泊沉积学中, 一般解释为气候湿润, 湖泊水位高, 粒径较小, 流域内植被生长茂盛, 入湖有机质含量高; 反

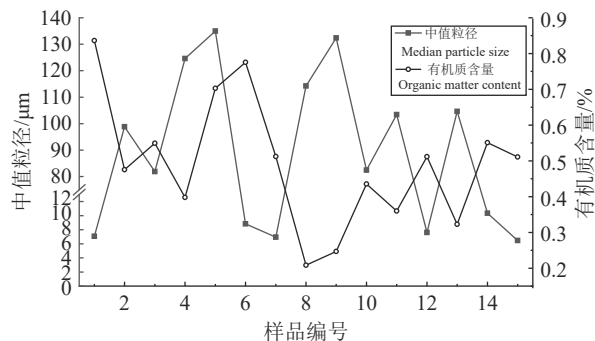


图 6 有机质含量和中值粒径的关系

Fig.6 Relationship between organic matter and median particle size

之, 粒径粗有机质含量低, 湖泊水位低, 气候干旱, 植被稀疏。但堰塞湖湖区结构有别于传统湖泊, 加上堰塞坝的不稳定性, 高水位时期大流量对河道的侵蚀导致溃决或者急剧冲刷导致水位降低, 难以形成深厚的细粒沉积。所以, 笔者认为该堰塞湖高水位应为次级滑坡堵江形成新堰塞湖所致。因此, 在堰塞湖沉积韵律的基础上结合粒度特征与有机质变化对堰塞湖沉积过程进行推断。

(1) LD15、LD14 沉积时期气候湿润, 湖泊水位较高, 沉积点在滑坡坝附近, 上游来水受湖面顶托作用明显, 沉积物粒径较小。对坝体结构造成破坏, 使堰塞湖出现泄流, 甚至溃决, 导致水面不断降低下蚀减弱, 新河道趋于稳定; LD13 时期, 气候干旱, 流域植被减少, 加上湖泊溃决水位降低, 沉积物以粗粒为主, 呈正偏状态, 峰态比粉砂尖锐。(2) LD12 期间, 气候湿润降水量大, 水流增大对既有河道进行侧蚀, 造成河道“上窄下宽”, 可能叠加断层活动影响, 导致古滑坡复活堵江, 再次形成堰塞湖, 湖泊水位上升, 粒径减小, 结合粒度统计指标推测这一时期水位达到 LD15 水平。过高的水位和上游来水进一步侵蚀新形成的堰塞坝, 导致水位逐步下降直至形成新的平衡。LD11、LD10、LD9、LD8 为气候逐渐变干, 流域植被减少、有机质下降, 湖泊水位进一步下降, 粒径变粗。(3) 长期干旱的气候改变滑坡内部结构, 河流的深切下蚀破坏了坡脚的稳定, 在降雨增加的情况下, 发生第三次滑坡堵江事件, LD7 到 LD6 粒径增大, 分选变差, 有机质含量高, 反映了气候逐渐变湿, 堰塞坝逐渐侵蚀, 水流增大水位降低的过程。LD5、LD4、LD3、

LD2 气候相对干旱,河道逐渐侵蚀河床降低,湖区沉积高程增加导致堰塞湖深度不断减小,在气候变化的响应下,出现了干层沉积,发生了至少 3 次干旱事件。LD1 粒径较小,有机质含量高,应为气候湿润时期,基于现代河床位置和地形推测,LD1 沉积时期采样点位置较高,位于主河道边缘,故沉积物粒径较细。

综上推断该堰塞湖可能经历了 4 次干湿周期,在气候和地质活动的共同作用下至少经历了 3 次溃决过程。断裂带的长期活动也进一步改变滑坡的形态。在对下院滑坡的考察过程中发现了多个次级滑坡也佐证了该滑坡次级滑坡多发的观点。该堰塞湖位于山区河流,河流比降沉积速率等与其他堰塞湖差异较大,沉积年代难以进行比较,本文大致以同为金沙江支流粉砂和砂交替沉积的大渡河石广东古滑坡堰塞湖(夏银珍等, 2017)沉积速率(2 mm/a)推断,则下院堰塞湖一个沉积周期约为 1750 a。从堰塞湖的发育历程可以看出,堰塞湖发育过程中存在多次堵江风险,特别是大型堰塞湖更加应该注意后续监测,及时处理,防止产生更大危害。气候变化、河道侵蚀、构造运动、工程建设等多重扰动使古滑坡的复活风险增加(朱赛楠等, 2024),在地质灾害普查中特别是西南大河河谷地区(冉涛等, 2024)应对古滑坡进行识别并且进行滑坡易发性评价,将高风险地区纳入监测范围以图长远应对。

对于堰塞湖沉积物粒度特征的解析所采用两种方法,图解法起源较早,仪器要求简单,计算公式成熟,描述词语贴切,计算公式方便,在粒度参数计算方面应用得到广泛应用。在早期,以粒径 Φ 为基础的图解法化粒径为整数,并通过累积曲线进行计算,既把握了粒径整体分布规律,又可实现有限数据精准化,得以用简单的公式表达出内在特征。随着激光粒度仪等一系列先进粒径测量仪器的发展,粒径测量分辨率不断提高,但根植于客观现实的沉积物粒径近正态分布规律不会发生改变,因此随仪器升级图解法测量精度也不断提高。图解法立足于粒径近正态分布的基本特征,采用样品的 90% 子集进行计算,抛弃了两端极值,也可间接消除不同进样方式对粒径的影响,更能反映样品的整体规律,但会丢失细节。对于部分双峰等复杂沉积,图

解法描述难以反映样品的真实状况。矩值法基于统计学原理,采用分布的一次矩、二次矩、三次矩、四次矩,矩值法可以充分利用所有数据,反映样品的全部特征,且随着计算机技术的发展,矩值法计算愈加便捷,但矩值法目前存在公式较多,应用不统一和描述词语混杂的问题,且在相关结论对比方面受限,在具体使用过程中存在一些困难,仍需进一步完善。本文研究中的程海—宾川断裂带下院滑坡堰塞湖沉积动力单一,样品分布简单,基本满足图解法运算需求。因此在沉积物粒径分布较好的堰塞湖沉积计算中,优先推选更加成熟简单的图解法计算。

6 结 论

(1) 方量约 $1.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的永胜县下院滑坡曾造成宾居河堵塞,目前仍有约 $2.9 \times 10^7 \text{ m}^3$ 体积的滑坡体残留于宾居河左岸。长期稳定存在的滑坡坝使得在其上游形成了连续分布且厚度较厚的堰塞湖沉积物,为研究该堰塞湖沉积环境提供重要媒介。

(2) 宏观上沉积物具有明显的水平层理构造,沉积层序清楚,粉砂和砂互层特征分明,颜色、颗粒大小垂向变化明显,厚度不均,无变形痕迹,说明沉积时期地质环境稳定。粒度频率分布特征表明堰塞湖沉积期内水动力条件单一且较为稳定,物质来源单一,非多物源沉积。依据图解法统计信息,综合各层沉积物粒度特征和有机质含量变化推测该堰塞湖经历了 4 次干湿周期,在气候和地质活动的共同作用下至少经历了 3 次溃决过程,该沉积历史应是断裂带长期复杂的活动和气候—河流共同作用的结果。

(3) 图解法和矩值法对粒度参数评价结果表明,两种方法对平均粒径和分选性评价一致,矩值法对偏态整体计算结果比图解法大。相关性显示两种结果平均粒径、分选系数可直接进行替换,偏态、峰态需进行线性公式代换。因为描述参照值的缘故,偏态、峰态在实际统计描述表达中会有所偏差,通常表现为矩值法比图解法更加突出。

(4) 矩值法粒度特征描述对堰塞湖沉积物适用性较差,堰塞湖沉积物粒径分布较好情况下推荐采用简单成熟的图解法进行计算。

致谢: 十分感谢两位审稿专家和编辑老师对本文提出的宝贵意见和建议, 极大地提升了论文质量和可读性。

References

- Cai Guofu, Fan Daidu, Shang Shuai, Wu Yijing, Shao Lei. 2014. Difference in grain-size parameters of tidal deposits derived from the graphic and its potential causes[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 34(1): 195–204 (in Chinese with English abstract).
- Chen Jing'an, Wang Guojiang, Zhang Feng, David Dian Zhang, Huang Guirong. 2003. Environmental records of lake sediments at different time scales—Taking sediment particle size as an example[J]. *Science in China (Series D: Earth Science)*, 33(6): 563–568 (in Chinese with English abstract).
- Chen Song, Chen Jian, Qiao Chunsheng, Ma Junxue, Liu Chao. 2017. Application of graphic and moment methods on the analysis of particle sizes of dam-break accumulations by Xuelongnang ancient landslide lake in the upper Jinsha river[J]. *Geoscience*, 31(6): 1278–1283 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yong. 2015. *Natural Disasters (4th Edition)*[M]. Beijing: Beijing Normal University Press (in Chinese with English abstract).
- Cui Peng, Han Yongshun, Chen Xiaoqing. 2009. Distribution and risk analysis of dammed lakes by Wenchuan Earthquake[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 41(3): 35–42 (in Chinese with English abstract).
- Dufresne A, Ostermann M, Preusser F. 2018. River-damming, Late-Quaternary rockslides in the Ötz Valley region (Tyrol, Austria)[J]. *Geomorphology*, 310: 153–167.
- Fan X M, Dufresne A, Whiteley J, Yunus A P, Subramanian S S, Okeke C A U, P'aneke T, Hermanns R L, Peng M, Strom A, Havenith H, Dunning S, Wang G H, Stefanelli C T. 2021. Recent technological and methodological advances for the investigation of landslide dams[J]. *Earth-Science Reviews*, 218: 103646
- Folk R L, Ward W C. 1957. Brazos River Bar: A study in the significance of grain size parameters[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 27(1): 3–26.
- Fu Lili, Feng Xiuli, Yang Xuhui. 2011. The responses of grain-size parameters to grade interval[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 41(9): 83–89 (in Chinese with English abstract).
- Jia Jianjun, Gao Shu, Xue Yunchuan. 2002. Grain-size parameters derived from graphic and moment methods: A comparative study[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 33(6): 577–582 (in Chinese with English abstract).
- Li Gaocong, Li Zhiqiang, Zhu Bingbing, Zhang Huiling, Zeng Chunhua. 2020. Comparative study on grain-size parameters of marine sediment derived from graphic and moment methods[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 40(6): 96–101 (in Chinese with English abstract).
- Li Qiankun. 2011. The Zhaizicun Landslide in Jinsha Rive and its Deposits of Landslide-Dammed Lake[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 1–77 (in Chinese with English abstract).
- Li Qiankun, Xu Zemin, Zhang Jiaming. 2011. The ancient landslide and dammed lake found in the Jinsha River near Zhaizicun, Yongsheng, Yunnan, China[J]. *Journal of Mountainous Sciences*, 29(6): 729–737 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhiliang, Du Xiaoru. 2008. Comparison of methods solving sediment particle size parameters[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 25(4): 16–19 (in Chinese with English abstract).
- Liu Haili, Han Zhiyong, Li Xusheng, Fang Yingsan. 2012. Influence of pretreatments on grain-sizedistribution of the red earth in Southern China: A case study on the quaternary red earth profile in Xuancheng, Anhui Province[J]. *Quaternary Geology*, 32(2): 162–165 (in Chinese with English abstract).
- Liu Tao, Cui Gaosong, Wang Mo. 2012. The comparative study of mean grain-size derived[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 32(3): 8–10, 14 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zhijie, Long Haiyan. 2009. Comparing study on the grain-size parameters estimated from the graphical method and the moment method of the sediments from South China Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 39(2): 313–316, 336 (in Chinese with English abstract).
- Lu Lianzhan, Shi Zhengtao. 2010. Analysis for sediment grain size parameters of connotations and calculation method[J]. *Environmental Science and Management*, 35(6): 54–60 (in Chinese with English abstract).
- Ma Qianqian, Xiao Jianhua, Yao Zhengyi. 2020. A comparative study on the three calculation methods of grain-size parameters for Aeolian sediments[J]. *Journal of Desert Research*, 40(4): 95–102 (in Chinese with English abstract).
- Mao Longjiang, Pang Jiangli, Liu Xiaoyan. 2007. Comparative study on grain-size parameters of Xiashu loess derived from graphic and moment methods in Nanjing[J]. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 35(3): 95–99 (in Chinese with English abstract).
- Peng C, Yin Z Q, Zhang X J, Shao H, Pang M F. 2023. A comparative study of the main factors controlling geohazards induced by seismic events in Western China since the Wenchuan earthquake[J]. *China Geology*, 6(1): 70–84.
- Qi Lin, Wang Yan, Cai Yao, Qiao Yansong, Yao Haitao, Yang Shuaibin, Bai Wenbin. 2020. Paleoclimatic and paleo-environmental evolution recorded by the aeolian

- sand-paleosol sequence in the Zoigê basin[J]. *Journal of Geomechanics*, 26(2): 244–251 (in Chinese with English abstract).
- Ran Tao, Xu Ruge, Zhou Hongfu, Zhang Jinghua, Chen Hao, Wang Yuke, Sun Jie, Cui Yanzong. 2024. Type, formation mechanism and distribution regularity of landslides in the deeply-incised valley area of Yalong River basin: A case study of Zituoxi–Malangcuo river section[J]. *Geology in China*, 51(2): 511–524 (in Chinese with English abstract).
- Shen Man. 2014. Earthquake Information Study for Paleo-dammed Lake at Minjiang River Upstream[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1–128(in Chinese with English abstract).
- Shen Tong, Huang Zhiquan, Song Shuaiqo, Zheng Chao, Yuan Yue, Liu Heng, Wu Xuyang, Chu Yapei. 2023. Formation mechanism and motion processes of the Aizigou giant paleolandslide, Jinshajiang river[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 45(6): 1091–1110 (in Chinese with English abstract).
- Sun Qianli, Zhou Jie, Xiao Jule. 2001. Grain-size characteristics of lake Daihai sediments and its paleoenvironment significance[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 21(1): 93–95 (in Chinese with English abstract).
- Sun X Y, Zhang R J, Huang W, Sun A, Lin L J, Xu H G, Jiang D C. 2019. The response between glacier evolution and eco-geological environment on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *China Geology*, 2(1): 1–7.
- Tao Min, Deng Shan, Wang Tingle, Yuan Jinzhao, Xiao Shangbin. 2011. The difference between moment method and graphic method for calculating grain-size parameters of sediments in mountain streams[J]. *Journal of Three Gorges University (Natural Science)*, 33(6): 27–32 (in Chinese with English abstract).
- Wan Feipeng, Yang Weimin, Qiu Zhanlin, Xiang Lingzhi, Qu Jingkai, Wu Jihuan, Zhang Tiantian. 2023. Disaster mechanism and evolution of Nagune Gully landslide-debris flow disaster chain in Minxian County, Gansu Province[J]. *Geology in China*, 50(3): 911–925 (in Chinese with English abstract).
- Wang Gaofeng, Li Gang, Sun Xiangdong, Li Hao, Tian Yuntao, Dong Hanchuan, Gao Youlong, Xu Youning, Wang Hongde, Li Ruidong. 2024. Preliminary study on the “point-surface dual control” model of geological hazard risk in typical mountainous towns in Gansu Province[J/OL]. *Geology in China*, 1–21[2024-09-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20230505.0935.004.html>.
- Wang Junbo, Ju Jianting, Zhu Liping. 2007. Comparison of lake sediment grain size results measured by two laser diffraction particlesize analyzers[J]. *Journal of Lake Science*, 19(5): 509–515 (in Chinese with English abstract).
- Wang H, Cui P, Liu D Z, Liu W M, Nazir A B, Wang J, Zhang G T, Lei Y. 2019. Evolution of a landslide-dammed lake on the southeastern Tibetan Plateau and its influence on river longitudinal profiles[J]. *Geomorphology*, 343: 15–32.
- Wang H Y, Wang P, Hu G, Ge Y K, Yuan R M. 2021. An Early Holocene river blockage event on the western boundary of the Namche Barwa Syntaxis, southeastern Tibetan Plateau[J]. *Geomorphology*, 395: 107990
- Wang Li, Li Xi'an, Hong Bo, Zhao Ning, Lin Lincui. 2018. Experimental study on the effect of pretreating method on grain size distribution pattern of Malan Loess[J]. *Earth and Environment*, 46(2): 210–217 (in Chinese with English abstract).
- Wang P F, Chen J, Dai F C, Long W, Xu C, Sun J M, Cui Z J. 2014. Chronology of relict lake deposits around the Suwalong paleolandslide in the upper Jinsha River, SE Tibetan Plateau: Implications to Holocene tectonic perturbations[J]. *Geomorphology*, 217: 193–203.
- Wang Xiaoqun. 2009. The Environmental Geological Information in the Sediments of Diexi Ancient Dammed Lake on the Upstream of the Minjiang River in Sichuan Province, China[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1–116 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaoqun, Wang Lansheng, Shen Junhui. 2010. Granularity analysis of sediments in Diexi Ancient Dammed Lake on the upstream of Minjiang River[J]. *Journal of Engineering Geology*, 18(5): 677–684 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaoqun, Wang Lansheng. 2013. The pollen and spore characteristics of the Diexi Ancient Dammed Lake on the upstream of Minjiang River[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38(5): 975–982 (in Chinese with English abstract).
- Wang Ying. 2019. Landslide-dammed Lake Deposits And Landslide Hazards in Landslide-dammed Lake Deposits And Landslide Hazards in Qiaojia-Dongchuan Section of Jinsha River[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 1–122(in Chinese with English abstract).
- Xia Yinzhen, Liu Weiming, Lai Zhongping, Hu Kaiheng, Zhu Zhengfeng, Wang Hao, Zhang Xinbao, Cao Guangchao. 2017. Age of paleo-landslide-dammed lake at Shiguang-dong in Dadu Rive[J]. *Journal of Earth Environment*, 8(5): 419–426 (in Chinese with English abstract).
- Xie Zuobin, Xiang Fang, Xu Qiang, Wang Yunsheng, Wang Zhuo, Luo Chao, Chen Xijie. 2024. Characteristics of ancient Aniangzhai barrier lake in upper reaches of Dadu River[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition)*, 51(3): 449–464 (in Chinese with English abstract).
- Xu H, Chen J, Cui Z J, Chen R C. 2019. Sedimentary facies and depositional processes of the Diexi ancient dammed lake, Upper Minjiang River, China[J]. *Sedimentary Geology*, 398: 105583.
- Xu Shujian, Pan Baotian, Zhang Hui, Li Qiong. 2005. Grain size parameters of loess-palaeosol deposits from graphic and moment

- methods: A comparative study[J]. *Arid Land Geography*, 28(2): 194–198 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xingyong, Yi Liang, Yu Hongjun, Li Naisheng, Shi Xuefa. 2010. The differences of grain-size parameters estimated with graphic and moment methods in coastal sediments[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 32(2): 80–86 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zemin. 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 with English abstract).
- Yang Q Y, Guan M F, Peng Y, Chen H Y. 2020. Numerical investigation of flash flood dynamics due to cascading failures of natural landslide dams[J]. *Engineering Geology*, 276: 105765
- Yu Xiaoxiao, Gu Dongqi, Yan Wenwen, Du Jun, Liu Shihao. 2014. The response of sedimentary characteristics and sedimentary environment of typical cape bay beaches and Shaba lagoon beaches in Shandong Peninsula[C]//The 13th National Paleogeography Collection of Abstracts of Academic Conference Papers on Science And Sedimentology, 57(in Chinese with English abstract).
- Yuan Hongqi, Wang Lei, Yu Yinghua, Zhang Dongjie, Xu Fengming, Liu Haitao. 2019. Review of sedimentary particle size analysis methods[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 49(2): 380–393 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Fangming, Zhang Ping. 2015. Composition analysis of organic from some stages of potash fertilizer production in the qarhan salt lake[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 23(3): 1–4, 22 (in Chinese with English abstract).
- Zha Linglong, Xu Zongheng, Zhang Yu. 2022. Effects of different pretreatment methods on grain size characteristics of sediments from a landslide-dammed lake based on Mastersizer 2000[J]. *Quaternary Sciences*, 42(6): 1643–1654 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Kun, Li Jie, Xiong Jianglan, Guan Bangjin. 2017. Research on the temporal and spatial distribution of rainfall and runoff trends in the Sangyuan River Basin[J]. *Yangtze River*, 48(S2): 76–80 (in Chinese).
- Zhang T L, Zhou A G, Sun Q, Wang H S, Wu J B, Liu Z H. 2020. Hydrological response characteristics of landslides under typhoon-triggered rainstorm conditions[J]. *China Geology*, 3(3): 455–461.
- Zhu Sainan, Yin Yueping, Tie Yongbo, Salan Peng, Gao Yanchao, He Yu, Zhao Hui. 2024. Deformation characteristics and reactivation mechanism of giant ancient landslide in Wumeng Mountain area of northeast Yunnan Province: A case study of the Daguan ancient landslide [J/OL]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1–10[2024-09-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20-240522.0847.004.html>.
- Zhu Xiaomin. 2008. *Sedimentary Petrology (4th Edition)*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press.

附中文参考文献

- 蔡国富, 范代读, 尚帅, 吴伊婧, 邵磊. 2014. 图解法与矩值法计算的潮汐沉积粒度参数之差异及其原因解析[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 34(1): 195–204.
- 陈敬安, 万国江, 张峰, David Dian Zhang, 黄荣贵. 2003. 不同时间尺度下的湖泊沉积物环境记录——以沉积物粒度为例[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 33(6): 563–568.
- 陈松, 陈剑, 乔春生, 马俊学, 刘超. 2017. 图解法与矩值法在金沙江上雪隆囊古滑坡堰塞湖溃坝堆积物粒度分析中的应用[J]. *现代地质*, 31(6): 1278–1283.
- 陈颢. 2015. *自然灾害(第四版)*[M]. 北京: 北京师范大学出版社.
- 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.
- 付莉莉, 冯秀丽, 杨旭辉. 2011. 沉积物粒度参数和频率曲线对粒级划分的响应[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 41(9): 83–89.
- 贾建军, 高抒, 薛允传. 2002. 图解法与矩法沉积物粒度参数的对比[J]. *海洋与湖沼*, 33(6): 577–582.
- 李高聪, 李志强, 朱士兵, 张会领, 曾春华. 2020. 图解法和矩值法海洋沉积物粒度参数的对比[J]. *广东海洋大学学报*, 40(6): 96–101.
- 李乾坤. 2011. 金沙江寨子村滑坡及其堰塞湖沉积[D]. 昆明: 昆明理工大学, 1–77.
- 李乾坤, 徐则民, 张家明. 2011. 永胜金沙江寨子村古滑坡和古堰塞湖的发现[J]. *山地学报*, 29(6): 729–737
- 李志亮, 杜小如. 2008. 沉积物粒度参数求解方法的对比[J]. *长江科学院院报*, 25(4): 16–19.
- 刘海丽, 韩志勇, 李徐生, 房迎三. 2012. 不同前处理方法对南方红土粒度测量的影响——以安徽宣城第四纪红土剖面为例[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 32(2): 162–165.
- 刘涛, 崔高嵩, 王沫. 2012. 图解法和矩值法所求平均粒径应用对比研究[J]. *海洋测绘*, 32(3): 8–10, 14.
- 刘志杰, 龙海燕. 2009. 南海沉积物图解法和矩值法粒度参数计算及对比[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 39(2): 313–316, 336
- 卢连战, 史正涛. 2010. 沉积物粒度参数内涵及计算方法的解析[J]. *环境科学与管理*, 35(6): 54–60.
- 马茜茜, 肖建华, 姚正毅. 2020. 风成沉积物3种粒度参数计算方法比较[J]. *中国沙漠*, 40(4): 95–102.
- 毛龙江, 庞奖励, 刘晓燕. 2007. 南京下蜀黄土图解法与矩值法粒度参数对比研究[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 35(3): 95–99.
- 綦琳, 王燕, 蔡遥, 乔彦松, 姚海涛, 杨帅斌, 白文彬. 2020. 若尔盖风成砂-古土壤序列的古气候与古环境记录研究[J]. *地质力学学报*, 26(2): 244–251.
- 冉涛, 徐如阁, 周洪福, 张景华, 陈浩, 王羽珂, 孙洁, 崔炎宗. 2024. 雅砻江流域深切河谷区滑坡类型、成因及分布规律——以子拖西—

- 麻郎错河段为例[J]. 中国地质, 51(2): 511-524.
- 沈曼. 2014. 岷江上游叠溪古堰塞湖沉积物中地震信息研究[D]. 成都: 成都理工大学, 1-128.
- 申通, 黄志全, 宋帅奇, 郑超, 袁玥, 刘恒, 吴旭阳, 楚亚培. 2023. 金沙江矮子沟巨型古滑坡形成机制及运动过程研究[J]. 地震学报, 45(6): 1091-1110.
- 孙千里, 周杰, 肖举乐. 2001. 岱海沉积物粒度特征及其古环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 21(1): 93-95.
- 陶敏, 邓山, 王婷乐, 袁金钊, 肖尚斌. 2011. 矩值法和图解法计算山区河流沉积物粒度参数的差异[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 33(6): 27-32.
- 万飞鹏, 杨为民, 邱占林, 向灵芝, 渠敬凯, 吴季寰, 张田田. 2023. 甘肃岷县纳古呢沟滑坡-泥石流灾害链成灾机制及其演化[J]. 中国地质, 50(3): 911-925.
- 王高峰, 李刚, 孙向东, 李浩, 田运涛, 董翰川, 高幼龙, 徐友宁, 王洪德, 李瑞冬. 2024. 甘肃南部山区城镇地质灾害风险双控模式初探[J/OL]. 中国地质, 1-21[2024-09-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20230505.0935.004.html>.
- 王君波, 鞠建廷, 朱立平. 2007. 两种激光粒度仪测量湖泊沉积物粒度结果的对比[J]. 湖泊科学, 19(5): 509-515.
- 王力, 李喜安, 洪勃, 赵宁, 李林翠. 2018. 前处理方法对乌兰黄土粒度测量影响的实验研究[J]. 地球与环境, 46(2): 210-217.
- 王小群. 2009. 岷江上游叠溪古堰塞湖沉积物的环境地质信息研究[D]. 成都: 成都理工大学, 1-116.
- 王小群, 王兰生, 沈军辉. 2010. 岷江上游叠溪古堰塞湖沉积物粒度特征及环境意义[J]. 工程地质学报, 18(5): 677-684.
- 王小群, 王兰生. 2013. 岷江叠溪古堰塞湖沉积物中孢粉特征[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 38(5): 975-982.
- 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, 1-122.
- 夏银珍, 刘维明, 赖忠平, 胡凯衡, 朱正峰, 王昊, 张信宝, 曹广超. 2017. 大渡河石广东古滑坡堰塞湖沉积物光释光年代研究[J]. 地球环境学报, 8(5): 419-426.
- 谢佐彬, 向芳, 许强, 王运生, 王卓, 罗超, 陈熙杰. 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.
- 徐树建, 潘保田, 张慧, 李琼. 2005. 末次冰期旋回风成沉积物图解法与矩值法粒度参数的对比[J]. 干旱区地理, 28(2): 194-198.
- 徐兴永, 易亮, 于洪军, 李乃胜, 石学法. 2010. 图解法和矩值法估计海岸带沉积物粒度参数的差异[J]. 海洋学报(中文版), 32(2): 80-86.
- 徐则民. 2011. 金沙江寨子村滑坡坝堰塞湖沉积及其对昔格达组地层成因的启示[J]. 地质论评, 57(5): 675-686.
- 于晓晓, 谷东起, 闫文文, 杜军, 刘世昊. 2014. 山东半岛典型岬湾海滩与沙坝潟湖海滩沉积特征与沉积环境的响应[C]/第十三届全国古地理学及沉积学学术会议论文摘要集(2014), 57.
- 袁红旗, 王蕾, 于英华, 张冬杰, 许凤鸣, 刘海涛. 2019. 沉积学粒度分析方法综述[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 49(2): 380-393.
- 曾方明, 张萍. 2015. 图解法和矩值法计算西台吉乃尔盐湖沉积物粒度参数的差异[J]. 盐湖研究, 23(3): 1-4, 22.
- 查玲珑, 徐宗恒, 张宇. 2022. 基于 Mastersizer 2000 的不同前处理方式对滑坡堰塞湖沉积物粒度特征的影响[J]. 第四纪研究, 42(6): 1643-1654.
- 张坤, 李婕, 熊江兰, 官邦锦. 2017. 桑园河流域降雨时空分布与径流趋势变化研究[J]. 人民长江, 48(S2): 76-80.
- 朱赛楠, 殷跃平, 铁永波, 撒兰鹏, 高延超, 贺宇, 赵慧. 2024. 乌蒙山区巨型古滑坡变形特征与复活机理研究——以大关古滑坡为例[J/OL]. 岩土工程学报, 1-10[2024-09-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20240522.0847.004.html>.
- 朱筱敏. 2008. 沉积岩石学(第4版)[M]. 北京: 石油工业出版社.