

河南卢氏盆地张家村组粒度特征与沉积环境研究*

李 超^{①②} 杨石岭^① 李阳阳^{①②} 黄晓芳^{①②} 姜文英^①

(①中国科学院地质与地球物理研究所, 新生代地质与环境重点实验室, 北京 100029; ②中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 本文对河南卢氏盆地中始新世张家村组河湖相沉积进行了粒度分析。结果表明: 1) 从底到顶, 张家村组沉积岩粒度总体上由粗变细, 平均粒径由约 6ϕ ($16\mu\text{m}$) 减小到 8ϕ ($4\mu\text{m}$) 左右, 指示沉积动力由强到弱的变化; 2) 粒度频率分布曲线整体为近对称分布, 且从底到顶由双峰逐渐变为单峰特征; 3) 沉积颗粒以悬浮和跳跃组分为主, 不含或含少量滚动组分。粒度和岩性综合分析表明, 张家村组下段为河流相沉积, 中段为河漫滩相或滨湖相沉积, 上段为滨湖区和浅湖相沉积。张家村组沉积可能记录了卢氏古湖逐渐形成的过程。

关键词 粒度 沉积环境 张家村组 卢氏盆地

中图分类号 P588.21⁺2.1, P534.61⁺3 **文献标识码** A

卢氏盆地位于我国中部, 盆地内出露了厚度较大的古近纪地层。该套地层自下而上可划分为张家村组、卢氏组和大峪组^[1]。卢氏盆地较厚的古近纪沉积无疑保存了大量的构造和古气候信息, 但是, 提取其记录的构造和古气候信息的一个前提是对该套地层沉积相或沉积环境的确立。已有研究表明卢氏盆地古近纪经历了初期的裂陷成盆, 早期发展成湖, 中期湖泊扩张和收缩, 以及晚期盆地复活直至最终封闭等过程, 表明卢氏盆地内古湖的存在^[2]。盆地内卢氏组主体为灰白色灰岩和灰绿色泥岩互层沉积, 有煤层发育, 部分层段含有腹足类、腕足类、介形类等化石^[2], 水平层理广泛发育, 表明其为还原条件下的湖相沉积, 而位于卢氏组之下的张家村组主体为一套厚的红色细粒沉积, 其沉积环境不太确定。

粒度是沉积岩的基本物理特征^[3]。粒度能有效地反映沉积动力和沉积过程, 进而可以用来解释和区分不同沉积相或沉积环境^[3-11]。很多传统的粒度数据分析处理方法能够较好地用来反映沉积物的粒度特征以及粒度与沉积过程的关系, 如粒度参数统计分析^[12-14]、概率累积曲线^[5]、C-M 图^[4, 15, 16]等。基于此, 本文拟对卢氏盆地张家村组粒度进行

测试分析, 结合野外观察, 初步判别其沉积相或沉积环境。

1 区域地质概况与地层划分

卢氏盆地是秦岭东段的山间断陷盆地, 盆地以北为崤山, 以南为熊耳山, 大体上呈北东东-南西西方向展布, 总面积约 300km^2 ^[17]。始新世时期, 卢氏盆地的构造运动以块断升降为主, 稳定而持续, 因而盆地内部沉积了厚度大、岩性较细的地层^[17]。卢氏盆地始新统为一单斜层, 以南东东方向向断层一侧倾斜, 不整合覆盖在中元古界熊耳群之上, 与其上覆的渐新统为连续沉积^[17, 18](图 1)。

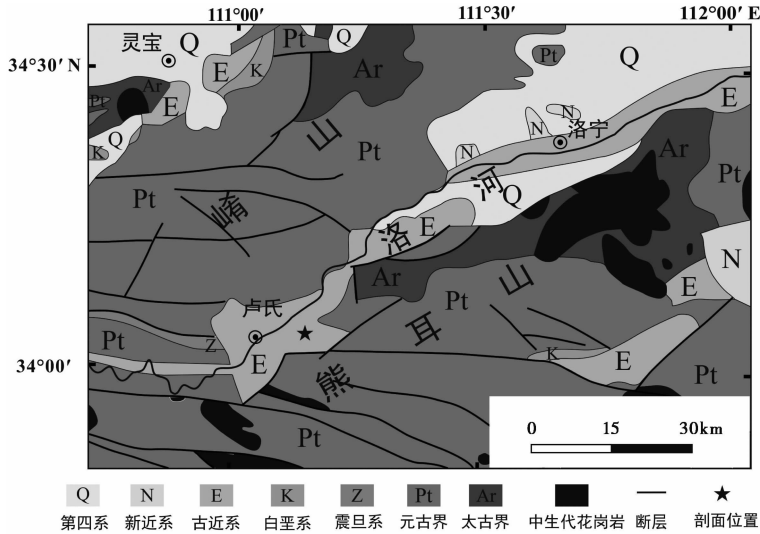
前人在卢氏盆地做了大量的生物地层工作^[1, 2, 19-22]。早在 20 世纪 30 年代李悦言^[19]就首次确立了该区始新统的存在; 1957 年周明镇等^[20]在卢氏县城西南的孟家坡发掘了丰富的哺乳动物化石, 并将该区地层命名为晚始新世卢氏组。河南省地质矿产局^[1]将盆地内部的古近纪地层自下而上划分为张家村组、卢氏组和大峪组。张家村组中产 *Uintatherium*、*Hyrachyus*、*Lophialetes* 和 *Teleolophus* 等哺乳动物化石^[1]。*Uintatherium* 是中始新世典型的哺乳动物化石, 在北美见于中始新世地层, 在我国

第一作者简介: 李 超 男 25 岁 硕士研究生 第四纪地质学专业 E-mail: lichao@mail.iggcas.ac.cn

* 中国科学院战略性先导科技专项项目(B类)(批准号: XDB03020503)、国家重大科学研究计划项目(批准号: 2013CB956404)和国家自然科学基金项目(批准号: 41472318)共同资助

2016-03-10 收稿, 2016-05-11 收修改稿

通讯作者: 杨石岭 E-mail: yangsl@mail.iggcas.ac.cn

图 1 研究区地质简图(修改自马丽芳等^[18])Fig. 1 The geological sketch map of study area, modified from Ma *et al.*^[18]

山东中始新世官庄组亦有报道^[21,23]；*Lophialetes* 在内蒙古伊尔丁曼哈组有发现^[24]，在河南核桃园组内较繁盛^[25]；*Hyrachyus* 目前仅产生于中始新统，在山东官庄组也有产出^[23]。据此，张家村组可与山东的官庄组以及北美的 Bridgerian 阶相对比，年代为中始新世^[1,21]。卢氏组中的孟家坡化石坑含丰富的哺乳动物化石如 *Lushilagus lohoensis*、*Eudinoceras* sp.、*Anthracotheriidae*、*Lushius* 和 *Rhinotitan*^[1,20]，孟家坡动物群的年代被确认为中始新世^[20,22,26-28]。

我们对位于河南省卢氏县城以东 10km 处的卢氏剖面(34.07°N, 111.16°E)进行了详细的地质野外勘察，根据岩性特征和主要标志层位，界定了组与组的界线，其中剖面底部 138m 为张家村组，岩性以细粒的红色粉砂岩为主。张家村组可进一步划分为下段(0~18m)，中段(18~74m)和上段(74~138m)(图 2)。

2 材料与方 法

自下而上，以 25cm 为间距，在张家村组共采集 551 个散样。粒度测量在中国科学院地质与地球物理研究所粒度分析实验室 Mastersizer3000 激光粒度仪上完成。仪器测量范围为 0.01~3500 μm ，重复测量误差 $\pm 0.5\%$ 。样品前处理方法为：取烘干的样品 0.1~0.2g，置于 50ml 的烧杯中，加 1M 的盐酸约 5ml，去除碳酸盐，加入 0.05mol/L 的六偏磷酸钠((NaPO_3)₆)溶液约 10ml，并置于超声波清洗机中振荡 10 分钟，使颗粒充分分散，最后将烧杯中的酸性

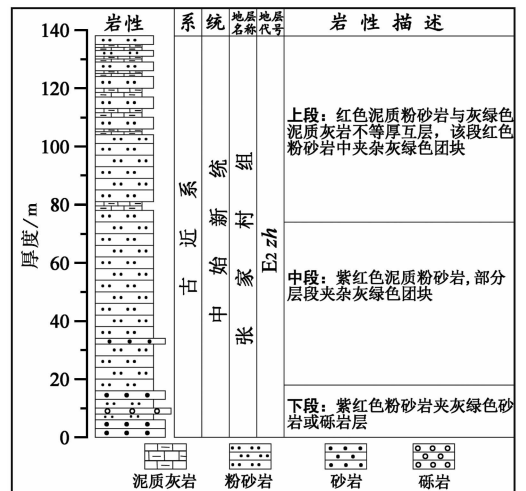


图 2 张家村组地层与岩性

Fig. 2 The stratigraphy and lithology of the Zhangjiacun Formation

溶液用 1M 的 NaOH 溶液调至中性后上机测量。

3 结果与分析

3.1 粒度组成

按照 Udden-Wentworth 粒度分级标准，将沉积岩粒度分为 5 级：粘土($<4\mu\text{m}$)、细和极细粉砂($4\sim 16\mu\text{m}$)、中粉砂($16\sim 31\mu\text{m}$)、粗粉砂($31\sim 63\mu\text{m}$)、砂($>63\mu\text{m}$)。由图 3 可知，张家村组粒度以粘土以及细和极细粉砂为主，平均含量分别为 37% 和 40%，且自下而上整体不断升高；中粉砂平均含量为 11%，垂向上变化不大；粗粉砂平均占到 7%，总

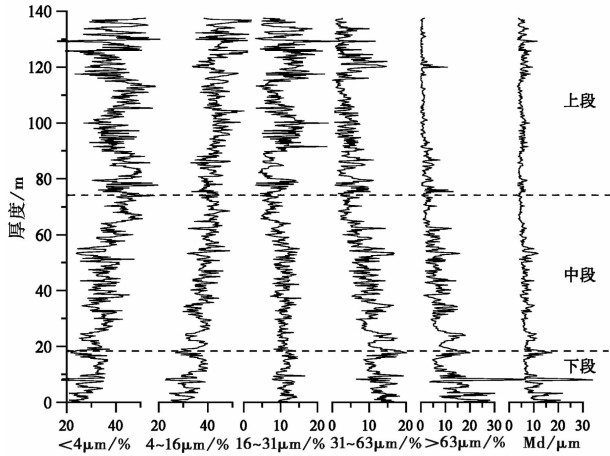


图3 张家村组各粒级百分含量与中值粒径变化

Fig. 3 Grain size parameters as a function of depth for the Zhangjiacun Formation

体呈现降低趋势;砂含量平均为 5%,且从底至顶由约 20%降低到 0 左右。张家村组平均中值粒径 (Md) 为 $6.3\mu\text{m}$,其中下段(0~18m)中值粒径总体较高且波动大,中上段(18~138m)中值粒径较小且波动小。综合来看,张家村组沉积岩粒度偏细,且从底到顶总体变细。

3.2 粒度图解与沉积动力环境分析

频率分布曲线能简单、直观地反映沉积物的粒度分布特征^[29],而概率累积曲线可以用来识别沉积物的搬运方式,划分滚动、跳跃和悬浮组分,从而判别沉积动力条件^[5]。通常,滚动和跳跃组分的截点在 2ϕ ($250\mu\text{m}$) 左右^[5,30]、跳跃和悬浮组分的截点在 3.3ϕ ($100\mu\text{m}$) 左右^[5],然而各组分间的截点并不固定,它取决于搬运介质的动力强度^[5,31,32]。张家村组下段样品的粒度频率分布曲线(图 4a)有明显的双峰特

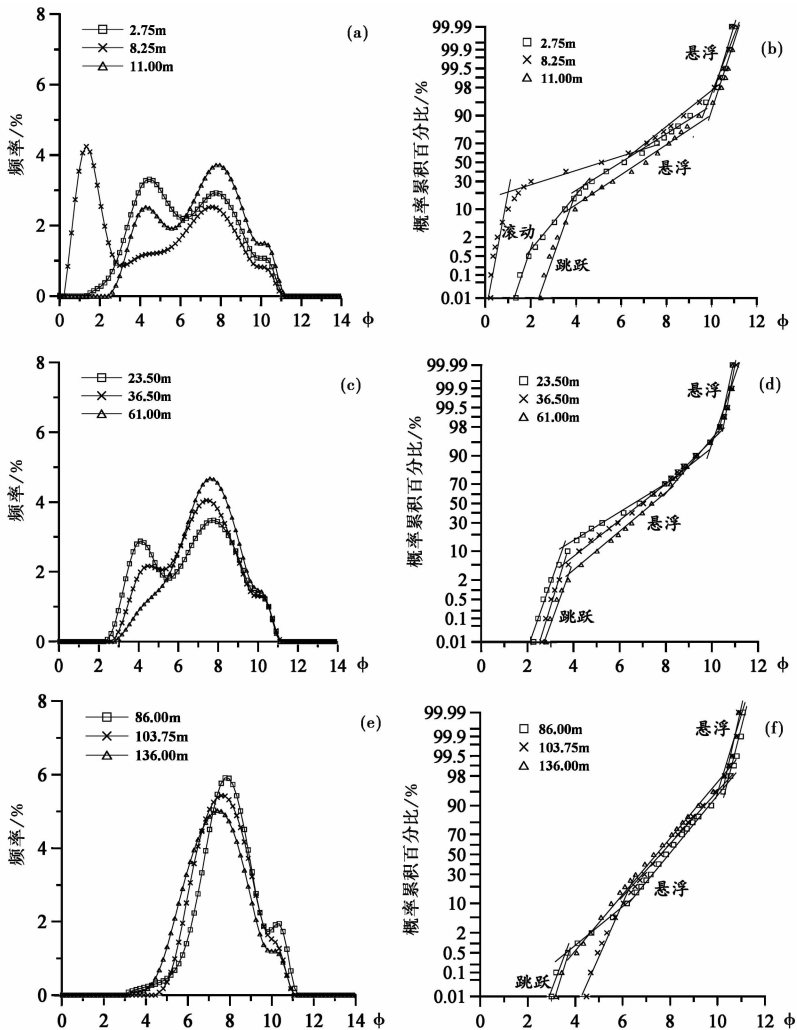


图4 张家村组代表样品的粒度频率分布曲线和概率累积曲线

Fig. 4 Grain-size frequency distribution and probability cumulative curves of some representative samples from the Zhangjiacun Formation

征,众数分别为 7.6ϕ ($5\mu\text{m}$)、 4.3ϕ ($50\mu\text{m}$) 或 1.3ϕ ($400\mu\text{m}$); 概率累积曲线(图 4b)显示颗粒主要由悬浮、跳跃组分组组成,深度 8.25m 附近的样品显示了滚动组分的存在,概率累积曲线坡度较缓,反映了沉积岩颗粒较差的分选。张家村组中段 23.50m 和 36.50m 样品粒度频率分布曲线(图 4c)也具有明显的双峰特征,众数分别在 7.6ϕ ($5\mu\text{m}$) 和 4.3ϕ ($50\mu\text{m}$) 左右,而 61.00m 处的样品显示为明显的单峰特征,众数为 7.5ϕ ($5.6\mu\text{m}$); 概率累积曲线(图 4d)显示颗粒主要为悬浮组分,含少量的跳跃组分,几乎不含滚动组分,反映了弱的沉积动力环境,曲线坡度相对张家村组下段概率累积曲线陡,分选相对张家村组下段好。张家村组上段粒度频率分布曲线(图 4e)为明显的单峰特征,众数在 7.6ϕ ($5\mu\text{m}$) 左右; 概率累积曲线(图 4f)表明颗粒几乎为悬浮组分,极少含跳跃组分,不含滚动组分,曲线斜率较陡,分选相对较好。整体来看,张家村组粒度频率分布曲线从底到顶由双峰特征过渡到单峰特征,具体表现众数为 4.3ϕ ($50\mu\text{m}$) 和 1.3ϕ ($400\mu\text{m}$) 左右的组分含量不断减少直到消失。值得注意的是,几乎所有样品都有粒径为 $10\sim 11\phi$ 左右的细粒悬浮组分,在河湖相沉积^[33,34]和黄土沉积^[35-37]中亦有该组分存在,其原因可能是大量的悬浮微粒以颗粒集合体的形式搬运和沉积,而粒度测量前的化学分散和超声波震荡处理使得这些集合体得以分散成单个颗粒,从而形成这一细粒组分^[33,37]。

3.3 粒度参数分析

粒度参数可以用来反映沉积物的粒度分布特征^[12]。常用的粒度参数统计分析方法有两种,一为图解法^[12],二为矩法^[14]。本文采用矩法来计算粒度参数,包括平均粒径(\bar{X})、标准偏差(σ)、偏度(S)和峰度(K),具体的计算由 GRADISTAT 软件完成^[13]。

平均粒径(\bar{X})表示粒度分布的集中趋势,可以反映沉积介质的平均动力能^[29]。由图 5 可知,张家村组平均粒径由底部的 6ϕ ($16\mu\text{m}$) 左右减小到顶部的 8ϕ ($4\mu\text{m}$) 左右,颗粒总体上由粗变细,反映了沉积动力由强变弱。标准偏差 σ 反映沉积物的分选程度。张家村组 σ 呈现从高到低的变化趋势,表明分选变好,由分选很差逐渐变为分选差^[13]。张家村组偏度值虽有起伏,但总体上接近于 0,为近对称分布^[13],这种近对称分布特点在图 4 中的频率分布曲线中有清楚、直观地反映。张家村组粒度的近对称

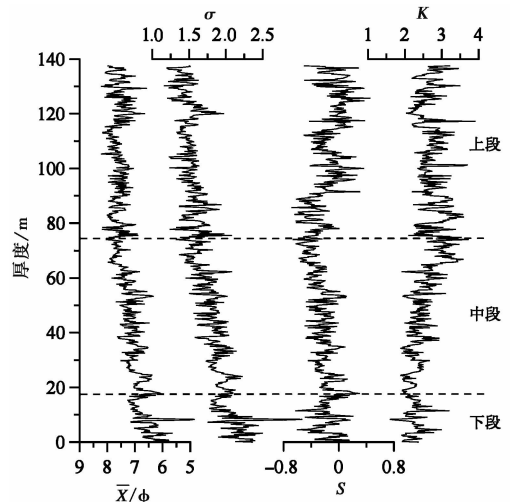


图 5 张家村组粒度参数变化

Fig. 5 Changes in mean grain size (\bar{X}), sorting (σ), skewness (S) and kurtosis (K) for the Zhangjiacun Formation

分布特征显然不同于风成黄土和红粘土粒度的正偏分布特征^[35,36],而更接近于河湖相沉积的粒度分布特征^[34,38]。张家村组峰度值在中下段相对较低,主要为宽峰态;上段相对较高,接近于 3,为中等峰态。峰度值垂向上的变化在图 4 频率分布曲线中亦有直观、明显的反映。

3.4 C-M 图反映的动力环境

C-M 图可以反映沉积物搬运动力和沉积过程^[4,15,16]。从图 6 可知,张家村组下段(0~18m)样品点较散乱地分布在图中的相对右上方,其 M 值(中值粒径)大多 $>10\mu\text{m}$,C 值(累积曲线上由粗到细累积到 1% 时的粒径)可达 $500\mu\text{m}$ 以上,显示了跳跃组分乃至滚动组分的存在,反映了相对强的沉积动力。张家村组中段(18~74m)样品点呈带状较密集地分布在图中的中部,总体上平行于 $C=M$ 基线,M 值集中在 $4\sim 10\mu\text{m}$,几乎所有 C 值小于 $200\mu\text{m}$,反映了较弱的沉积动力。张家村组上段(74~138m)的样品点较为集中地落在图中相对左下方,M 值几乎在 $3\sim 10\mu\text{m}$ 之间,C 值绝大多数 $<100\mu\text{m}$,颗粒几乎为悬浮组分,反映了更弱的沉积动力。总之,C-M 图进一步反映了张家村组下段到上段颗粒总体变细、搬运和沉积动力减弱的变化过程。

4 讨论

粒度参数分析和粒度图解综合反映了张家村组不同段之间的粒度特征以及沉积动力条件,为沉积环境的分析提供了重要的参考。

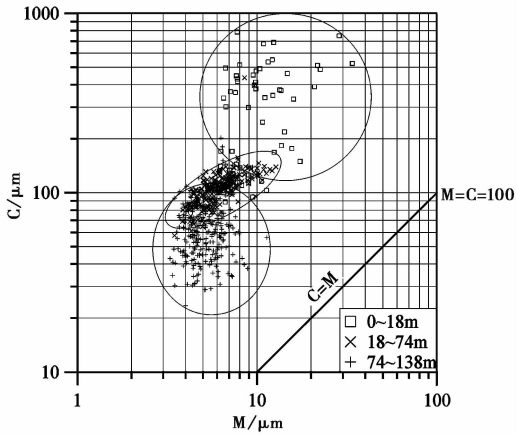


图6 张家村组粒度的 C-M 图

Fig. 6 C-M diagram for all samples from the Zhangjiacun Formation

张家村组下段(0~18m)岩性上为紫红色粉砂岩夹灰绿色砂岩或砾岩层(图2),野外一共识别了8个砂岩或砾岩层,厚度一般不超过50cm。粒度分析表明该段颗粒相对偏粗,以悬浮、跳跃组分为主,并含有滚动组分,分选很差。因此,该段沉积是在相对强且不稳定的动力条件下形成的,显示了河流沉积的特征。已有研究表明,对于河流沉积,其通常包含两个粒度组分,即众数粒径为200~400 μm 的跳跃中砂组分以及众数粒径为10~15 μm 的悬浮细粉砂组分,且前者具有较好的分选,后者分选较差^[31,32,36,39,40],张家村组下段8.25m附近的砂层样品,基本符合这一特征,表明其为河流沉积。而主体的粉砂岩层则可能为水动力相对较弱的堤岸或漫滩沉积。总之,张家村组下段整体可能形成于河流环境。

张家村组中段(18~74m)沉积岩颗粒总体上很细,平均粒径为约6.5~8.0 ϕ (4~11 μm),且随厚度增加有变细的趋势,粒度以悬浮组分为主,含少量或不含跳跃组分,没有滚动组分,砂含量低于张家村组下段且往上逐渐降低并接近于0。以上粒度特征反映张家村组中段形成于相对弱的动力环境。张家村中段和中上段紫红色粉砂岩中多见灰绿色斑块,推测与滞水还原条件下氧化铁的转化和迁移有关^[41~43]。这种斑块状构造一般发育在河漫滩和湖泊的泥岩或泥灰岩层^[42,44,45]。张家村组中段沉积岩主体为红色,表明其沉积后长时间处于暴露或浅水的氧化环境。据此,张家村组中段可能为河漫滩相或滨湖相沉积。

张家村组上段(74~138m)沉积岩粒度亦很细,

平均粒径约在7~8 ϕ (4~8 μm)之间,砂含量接近于0,粒度整体比张家村组中段更细,表明了更弱的沉积动力。C-M图表明该段颗粒几乎为静水悬浮沉积。总之,粒度特征反映张家村组上段可能为湖相沉积。岩性上,张家村组上段为红色粉砂岩与灰绿色泥质灰岩不等厚互层,旋回特征明显,亦具有湖相沉积的特征^[45]。张家村组上段岩性的这种交替变化很可能反映了湖面的周期性波动,其中红色粉砂岩形成于氧化条件下的滨湖环境,对应于湖面收缩阶段,而灰绿色泥质灰岩为还原条件下的浅湖相沉积,对应于湖面扩张阶段。

粒度和岩性特征反映了张家村组从底到顶由河流相沉积逐渐变为湖相沉积。张家村组沉积可能记录了卢氏古湖逐渐形成的过程。然而,对张家村组沉积环境的恢复和判别还需要结合其他方面的研究,如沉积构造、古生物等。

5 结论

通过对卢氏盆地张家村组粒度特征和沉积环境分析得出以下结论:

(1)从底到顶,张家村组沉积岩粒度总体上由粗变细,平均粒径由约6 ϕ (16 μm)减小到8 ϕ (4 μm)左右,砂含量由约20%减小到0左右,指示沉积动力由强到弱的变化。

(2)粒度频率分布曲线整体为近对称分布,且从底到顶由双峰逐渐变为单峰特征,具体表现为众数为4.3 ϕ (50 μm)和1.3 ϕ (400 μm)左右的组分含量不断减少直到消失。张家村组粒度分布特征明显不同于风成黄土和红粘土的粒度分布特征。

(3)结合野外观察,张家村组下段为河流相沉积,中段为河漫滩相或滨湖相沉积,上段为滨湖或浅湖相沉积。张家村组沉积可能记录了卢氏古湖逐渐形成的过程。

致谢 感谢董欣欣博士和郭利成博士在粒度测试和数据分析中的指导和帮助;成文过程中唐自华副研究员、陈祚伶博士以及顾宁博士提出了有益的建议,在此表示感谢;感谢杨美芳编辑和审稿专家提出的建设性修改意见。

参考文献 (References)

- 1 河南省地质矿产局. 河南省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1989. 258~279
Bureau of Geology and Mineral Resources of Henan Province.

- Regional Geology of Henan Province. Beijing: Geological Publishing House, 1989. 258~279
- 2 杨俊峰, 卢书炜, 刘 伟等. 河南卢氏盆地古近纪气候环境及地层时代探讨. 地质调查与研究, 2005, **28**(3): 151~159
Yang Junfeng, Lu Shuwei, Liu Wei *et al.* Paleocene climate and stratigraphic era based on the sporopollen in Lushi basin, Henan Province. *Geological Survey and Research*, 2005, **28**(3): 151~159
 - 3 Sam Boggs J. Principles of Sedimentology and Stratigraphy. New Jersey: Upper Saddle River, 2005. 51~73
 - 4 Passega R. Texture as characteristic of clastic deposition. *Bulletion of the American Association of Petroleum Geologists*, 1957, **41**(9): 1952~1984
 - 5 Visher G S. Grain size distributions and depositional processes. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1969, **39**(3): 1074~1106
 - 6 范佳伟, 肖举乐, 温锐林等. 内蒙古达里湖全新世有机碳氮同位素记录与环境演变. 第四纪研究, 2015, **35**(4): 856~870
Fann Jiawei, Xiao Jule, Wen Ruilin *et al.* Holocene environment variations recorded by stable carbon and nitrogen isotopes of sedimentary organic matter from Dali Lake in Inner Mongolia. *Quaternary Sciences*, 2015, **35**(4): 856~870
 - 7 姜 韬, 曾志刚, 南青云等. 全新世以来冲绳海槽北部 S9 孔粒度变化特征及其古气候响应. 第四纪研究, 2015, **35**(2): 307~318
Jiang Tao, Zeng Zhigang, Nan Qingyun *et al.* The grain size characteristics of the core S9 sediments in the northern Okinawa Trough and their paleoclimate response since Holocene. *Quaternary Sciences*, 2015, **35**(2): 307~318
 - 8 李 渊, 强明瑞, 王刚刚等. 晚冰期以来共和盆地更尔海碎屑物质输入过程与气候变化. 第四纪研究, 2015, **35**(1): 160~171
Li Yuan, Qiang Mingrui, Wang Ganggang *et al.* Processes of exogenous detrital input to Genggahai Lake and climatic changes in the Gonghe basin since the Late Glacial. *Quaternary Sciences*, 2015, **35**(1): 160~171
 - 9 刘世昊, 丰爱平, 李培英等. 现代黄河三角洲地区晚更新世以来高分辨率沉积粒度特征及动力沉积环境演化. 第四纪研究, 2015, **35**(2): 291~306
Liu Shihao, Feng Aiping, Li Peiying *et al.* High-resolution grain size distribution and evolution of the sediment-dynamic environment in the modern Yellow River delta since the Latest Pleistocene. *Quaternary Sciences*, 2015, **35**(2): 291~306
 - 10 刘亚生, 常风琴, 张虎才等. 云南腾冲青海湖沉积物物化参数的特点、环境意义及末次冰消期以来气候环境变化. 第四纪研究, 2015, **35**(4): 922~933
Liu Yasheng, Chang Fengqin, Zhang Hucai *et al.* Environmental significance of physicochemical parameters of sediment and climate changes since the Late Glacial at Qinghai Lake of Tengchong County, Yunnan Province. *Quaternary Sciences*, 2015, **35**(4): 922~933
 - 11 郑旭峰, 王安春, 万世明等. 冲绳海槽中全新世的浊流沉积及其控制因素. 第四纪研究, 2014, **34**(3): 579~589
Zheng Xufeng, Li Anchun, Wan Shiming *et al.* The turbidity events in Okinawa Trough during Middle Holocene and its potential dominating mechanisms. *Quaternary Sciences*, 2014, **34**(3): 579~589
 - 12 Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1957, **27**(1): 3~26
 - 13 Blott S J, Pye K. GRADISTAT: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, **26**(11): 1237~1248
 - 14 Friedman G M, Sanders J E. Principles of Sedimentology. New York: John Wiley & Sons, 1978. 70~81
 - 15 Passega R. Grain size representation by CM patterns as a geological tool. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1964, **34**(4): 830~847
 - 16 Passega R. Significance of CM diagrams of sediments deposited by suspensions. *Sedimentology*, 1977, **24**(5): 723~733
 - 17 薛祥煦, 张云翔, 毕 延等. 秦岭东段山间盆地的发育及自然环境变迁. 北京: 地质出版社, 1996. 1~181
Xue Xiangxu, Zhang Yunxiang, Bi Yan *et al.* The Development and Environmental Changes of the Intermontane Basins in the Eastern Part of Qingling Mountains. Beijing: Geological Publishing House, 1996. 1~181
 - 18 马丽芳, 乔秀夫, 闵隆瑞等. 中国地质图集. 北京: 地质出版社, 2002. 230~231
Ma Lifang, Qiao Xiufu, Min Longrui *et al.* Geological Atlas of China. Beijing: Geological Publishing House, 2002. 230~231
 - 19 李悦言. 秦岭东部几个新化石产地. 中国地质学会志, 1938, **18**(3): 227~240
Li Yueyan. Several new fossil localities in the eastern Qinling Mountain. *Bulletin of the Geological Society of China*, 1938, **18**(3): 227~240
 - 20 周明镇, 李传夔, 张玉萍. 河南、山西晚始新世哺乳类化石地点与化石层位. 古脊椎动物与古人类, 1973, **11**(2): 165~181
Zhou Mingzhen, Li Chuankui, Zhang Yuping. Late Eocene mammalian faunas of Henan and Shanxi with notes on some vertebrate fossils collected therefrom. *Vertebrata Palasiatica*, 1973, **11**(2): 165~181
 - 21 童永生, 王景文. 河南一尤因他兽头骨化石. 古脊椎动物与古人类, 1981, **19**(3): 208~213
Tong Yongsheng, Wang Jingwen. A skull of *Uintatherium* from Henan. *Vertebrata Palasiatica*, 1981, **19**(3): 208~213
 - 22 金 迅. 河南卢氏盆地的中兽化石. 古脊椎动物学报, 2005, **43**(2): 151~164
Jin Xun. Mesonychids from Lushi Basin, Henan Province, China. *Vertebrata Palasiatica*, 2005, **43**(2): 151~164
 - 23 周明镇, 齐 陶. 山东新泰中始新世化石哺乳类新材料. 古脊椎动物与古人类, 1982, **20**(4): 302~313
Zhou Mingzhen, Qi Tao. Mammals from the Middle Eocene Kuanchuang Formation of Xintai, Shandong. *Vertebrata Palasiatica*, 1982, **20**(4): 302~313
 - 24 齐 陶. 内蒙古呼和浩特和陡坎晚始新世伊尔丁曼哈层及其哺乳动物群. 古脊椎动物与古人类, 1980, **18**(1): 28~32

- Qi Tao. Irindmanha Upper Eocene and its mammalian fauna at Huhebolhe cliff in central Inner Mongolia. *Vertebrata Palasiatica*, 1980, **18**(1): 28~32
- 25 杜恒俭, 程捷, 马安成等. 河南西部及其邻近地区早第三纪生物地层特征与中国早第三纪生物古地理区系划分概要. *地质学报*, 1991, (3): 285~298
- Du Hengjian, Cheng Jie, Ma Ancheng *et al.* Palaeogene biostratigraphy of western Henan and its neighbouring areas—With a discussion on Palaeogene palaeobiostratigraphic provinces of China. *Acta Geologica Sinica*, 1991, (3): 285~298
- 26 童永生. 中国始新世中、晚期哺乳动物群. *古生物学报*, 1989, **28**(5): 663~682
- Tong Yongsheng. A review of Middle and Late Eocene mammalian faunas from China. *Acta Palaeontologica Sinica*, 1989, **28**(5): 663~682
- 27 童永生, 郑绍华, 邱铸鼎. 中国新生代哺乳动物分期. *古脊椎动物学报*, 1995, **33**(4): 290~314
- Tong Yongsheng, Zheng Shaohua, Qiu Zhuding. Cenozoic mammal ages of China. *Vertebrata Palasiatica*, 1995, **33**(4): 290~314
- 28 Wang Y Q, Meng J, Ni X J *et al.* Major events of Paleogene mammal radiation in China. *Geological Journal*, 2007, **42**: 415~430
- 29 姜在兴. *沉积学*. 北京: 石油工业出版社, 2003. 72~73
- Jiang Zaixing. *Sedimentology*. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003. 72~73
- 30 Fuller A O. Size characteristics of shallow marine sands from Cape of Good Hope, South Africa. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1961, **31**(2): 256~261
- 31 Middleton G V. Hydraulic interpretation of sand size distributions. *The Journal of Geology*, 1976, **84**(4): 405~426
- 32 Ashley G M. Interpretation of polymodal sediments. *The Journal of Geology*, 1978, **86**(4): 411~421
- 33 He Q, Walling D. An investigation of the spatial variability of the grain size composition of floodplain sediments. *Hydrological Processes*, 1998, **12**(7): 1079~1094
- 34 Xiao J L, Chang Z G, Fan J W *et al.* The link between grain-size components and depositional processes in a modern clastic lake. *Sedimentology*, 2012, **59**(3): 1050~1062
- 35 Yang S L, Ding Z L. Comparison of particle size characteristics of the Tertiary ‘red clay’ and Pleistocene loess in the Chinese Loess Plateau; Implications for origin and sources of the ‘red clay’. *Sedimentology*, 2004, **51**(1): 77~93
- 36 Sun D H, Bloemendal J, Rea D K *et al.* Grain-size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and aeolian environments, and numerical partitioning of the sedimentary components. *Sedimentary Geology*, 2002, **152**(2002): 263~277
- 37 Qiang M, Lang L, Wang Z. Do fine-grained components of loess indicate westerlies: Insights from observations of dust storm deposits at Lenghu (Qaidam Basin, China). *Journal of Arid Environments*, 2010, **74**(10): 1232~1239
- 38 殷志强, 秦小光, 吴金水等. 中国北方部分地区黄土、沙漠沙、湖泊、河流细粒沉积物粒度多组分分布特征研究. *沉积学报*, 2009, **27**(2): 343~351
- Yin Zhiqiang, Qin Xiaoguang, Wu Jinshui *et al.* The multimodal grain-size distribution characteristics of loess, desert, lake and river sediments in some areas of North China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, **27**(2): 343~351
- 39 Bennett S, Best J. Mean flow and turbulence structure over fixed, two-dimensional dunes: Implications for sediment transport and bedform stability. *Sedimentology*, 1995, **42**(3): 491~513
- 40 Kranck K, Smith P, Milligan T. Grain-size characteristics of fine-grained unflocculated sediments I: ‘one-round’ distributions. *Sedimentology*, 1996, **43**(3): 589~594
- 41 Simonson G, Boersma L. Soil morphology and water table relations: II. Correlation between annual water table fluctuations and profile features. *Soil Science Society of America Journal*, 1972, **36**(4): 649~653
- 42 Kraus M J, Aslan A. Eocene hydromorphic paleosols: Significance for interpreting ancient floodplain processes. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1993, **63**(3): 453~463
- 43 Bouma J. Hydrology and soil genesis of soils with aquic moisture regimes. In: Wilding L P, Smekc N E, Hall G F eds. *Pedogenesis and Soil Taxonomy*. Amsterdam: Elsevier, 1983. 253~281
- 44 Tucker M E. *Sedimentary Rocks in the Field*. Chichester: John Wiley & Sons, 2003. 79~82
- 45 Reading H G. *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy*. Oxford: Blackwell, 1996. 53~68

GRAIN SIZE CHARACTERISTICS AND SEDIMENTARY ENVIRONMENT OF THE ZHANGJIACUN FORMATION IN THE LUSHI BASIN, HENAN PROVINCE

Li Chao^{①②} Yang Shiling^① Li Yangyang^{①②} Huang Xiaofang^{①②} Jiang Wenying^①

(^①Key Laboratory of Cenozoic Geology and Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029;

^②University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract

The Lushi Basin, located in the eastern Qinling Mountains, is filled with Paleogene sediments, which contain the Zhangjiacun Formation, Lushi Formation and Dayu Formation from base to top. The Zhangjiacun Formation (138m in thickness) is composed of red siltstone interbedded with conglomerate/sandstone in the lower part and red siltstone in the middle and upper part. In order to study the sedimentary facies/environment of the Zhangjiacun Formation, 551 samples were collected at an interval of 25cm in the Lushi section (34.07°N, 111.16°E), which is located in the eastern part of the Lushi Basin. The grain size analysis is carried out for all samples by Mastersizer 3000 Laser Diffraction Particle Size Analyzer at the Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences.

Grain-size results show that the Zhangjiacun Formation has relatively fine grain-size distributions, with an average median grain size of 7.3 ϕ (6.3 μm). The mean grain size increases gradually from 6 ϕ at the bottom to 8 ϕ at the top, indicating an upward weakening trend of hydrodynamic conditions. In addition, the grain-size frequency distribution curves show a bimodal pattern in the lower part but a unimodal pattern in the upper part. The majority of samples have symmetrical grain size distributions, which are different from the positively skewed loess-red clay samples from Northern China. Moreover, the probability cumulative curves and C-M plot combine to indicate that the lower part of the Zhangjiacun Formation formed in a relatively strong hydrodynamic environment, while the middle and upper parts formed under weak hydrodynamic conditions. Finally, almost all samples have a fine fraction with modal sizes of 10~11 ϕ , which is also observed in grain size distribution curves of the eolian loess and red clay on the Chinese Loess Plateau. The occurrence of this fine component may be caused by the dispersion of aggregates during chemical and physical pretreatments for grain size analysis.

In conclusion, particle size characteristics, combined with lithological evidence, suggest that (1) the lower part of the Zhangjiacun Formation formed in a fluvial environment; (2) the middle part was deposited in a floodplain or lake shore environment; and (3) the upper part is lake shore and shallow lake deposits.

Key words grain size, sedimentary environment, Zhangjiacun Formation, Lushi Basin