

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2020.04.002

伊犁盆地三道河河流阶地沉积物粒度特征 及其古气候响应

李建刚^{1,2,3}, 刘晓燕^{1,2*}, 袁四化^{1,2}, 陈诗哲^{1,2}, 李瑛³, 赵振宏³, 姜纪沂^{1,2}

(1. 防灾科技学院, 河北 三河 065201; 2. 河北省地震动力学重点实验室, 河北 三河 065201;

3. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054)

摘要: 河流成因沉积物中携带了古气候变化和古环境变迁的关键信息。笔者利用三道河剖面的粒度、磁化率特征及光释光(OSL)年龄对其沉积环境进行了探讨。结果表明: 粒度频率曲线包括单峰和双峰 2 种, 频率累积曲线以三段式为主, 粒度特征反映三道河一级阶地沉积经历了由低能湖泊相→高能河流相→中高能河流相的演变过程; 磁化率结果显示 H1 期间存在最低值, 在 B-A 暖期迅速升高, 在 YD 期间降低-升高-降低。三道河一级阶地形成于晚更新世—全新世早期, 完整记录了末次冰消期以来的 YD、B-A 以及 H1 三次重大气候变化事件。

关键词: 伊犁盆地; 粒度分析; 沉积环境; 古气候

中图分类号: P54

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2020)04-0011-09

Grain-size Characteristics and Paleoclimate Response of Terrace Sediments in Sandaohe River of Yili Basin

LI Jiangang^{1,2,3}, LIU Xiaoyan^{1,2*}, YUAN Sihua^{1,2}, CHEN Shizhe^{1,2}, LI Ying³,
ZHAO Zhenhong³, JIANG Jiyi^{1,2}

(1. Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China; 2. Hebei Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Sanhe 065201, Hebei, China; 3. Xi'an Center of China Geological Survey, CGS Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Fluvial sediments carry some key information on paleoclimate and paleoenvironment changes. In this paper, the sedimentary environment of the Sandaohe section is discussed according to the grain size, magnetic susceptibility and OSL age. The results show that the frequency curve of the grain size includes single peak and double peak, and the accumulation frequency curve is mainly three-section type. The characteristics of grain size reflect that the deposition of the first terrace has experienced the evolution process from low-energy lake facies, high-energy river facies to medium-high energy river facies. The results of magnetic susceptibility show that a minimum value appears in H1, a rapid increase in B-A warm period and a decrease-increase-de-

收稿日期: 2019-10-09; **修回日期:** 2020-06-21

基金项目: 国家自然科学基金项目“新生代伊犁盆地与周缘山脉耦合关系研究”(41772200), 中国地质调查局项目“伊犁河谷西部平原区 1:5 万水文地质调查”(121201011000150021, No. DD20190351), 防灾科技学院地貌与第四纪地质学精品课程建设项目(JPJS2018005)联合资助

作者简介: 李建刚(1995-), 男, 硕士, 构造地质学专业。E-mail: 1061916371@qq.com

* **通讯作者:** 刘晓燕(1982-), 女, 讲师, 主要从事第四纪与新构造运动研究。E-mail: xiaoyanliu818@126.com

crease in YD period. The first terrace of Sandaohe formed in late Pleistocene to early Holocene, being the evidence of three major climate change events (YD, B-A and H1) since the last deglaciation.

Keywords: Yili basin; grain-size analysis; sedimentary environment; paleoclimate

沉积物的粒度特征主要受到地形地貌、搬运介质(流水、大气、冰川等)和搬运距离的影响(陈敬安等,2003;殷志强等,2008)。因此,沉积物的粒度反映了沉积物沉积时的水动力和气候特征,对于恢复古气候和重建古环境具有关键意义(BLOTT, et al., 2001;刘智荣等,2016)。目前,在第四纪地层对比、洪水沉积研究、沉积环境变化、粉尘等问题上均有很成熟的研究(张璞等,2005; PENG, et al., 2005;杨晓燕等,2005; SONG, et al., 2017;汤文坤等,2017;林钟扬等,2019;李越等,2019)。伊犁河谷地处中亚腹地,是研究中亚地区粉尘来源、亚洲内陆干旱化以及第四纪气候变化的关键区域(宋友桂等, 2010; SONG, et al., 2017)。目前,该地区研究成果多以伊犁黄土作为研究对象,对其矿物、粒度、 X_{fd} (频率磁化率)、地球化学、孢粉、物源进行了广泛分析,当前研究表明,末次冰期以来,伊犁河谷气候具有明显的西风模式(叶玮等,1998;李志忠等,2010;陈秀玲等,2010;李传想等,2011;姜修洋等,2011;曾蒙秀等,2013;李平等,2018)。对博尔博松河河流阶地的最新研究表明,伊犁河谷千年到百年尺度的气候事件与北半球其他古气候记录有很好的相关性,且可能起源于相同的机制(LI, et al., 2011; ZHAO, et al., 2013)。笔者以霍城平原区的三道河一级河流阶地为研究对象,其沉积物类型丰富,对探究霍城平原形成和发展过程以及中亚气候变化与沉积物堆积的耦合关系具有重要的参考价值。

1 地理概况与研究剖面

伊犁河流经伊犁盆地向西注入中亚的巴尔喀什湖,中国境内河流长 442 km,流域面积 5.6 万 km^2 。三道河发源于科古琴山,流经霍城平原注入伊犁河。剖面位于三道河注入伊犁河的河口地带,位置为 $43^{\circ}53'38.89''\text{N}$, $80^{\circ}41'05.56''\text{E}$,剖面高 9.7 m(图 1)。剖面颜色、成分、粒度变化明显,沉积物主要以砂、粉砂和黏土为主,岩性分为 10 层(图 2)。除顶层植被覆盖层未采集样品外,粒度和磁化率样品按

照约 5 cm 的采样间距,共采集样品 172 个,光释光(OSL)年龄样品 3 个。粒度分析和 OSL 年龄测试在河北省地震动力学重点实验室完成,采用 LA-950V2 型激光粒度分析仪完成粒度分析,测量范围为 $0.01\sim 3\ 000\ \mu\text{m}$ 。OSL 年龄测试采用细颗粒石英法完成,3 个样品的年龄分别为 $(20.3\pm 1.2)\ \text{ka BP}$ (距离顶部 8.8 m)、 $(15.5\pm 1.7)\ \text{ka BP}$ (距离顶部 3.8 m)、 $(8.4\pm 0.6)\ \text{ka BP}$ (距离顶部 0.5 m),属晚更新世晚期和全新世早期沉积。磁化率测试在西北大学古地磁实验室测试,仪器为 Kappabridge MFK1-FA 磁力仪,测量频率为 976 Hz。

剖面各层描述如下。

- SDH-1: 9.70~9.20 m, 棕色粉砂质黏土, 结构较疏松, 未见底
- SDH-2: 9.20~6.95 m, 灰白色粉砂, 在多处可见红褐色铁锈斑点, 7.4 m 可见处灰白色钙质黏土条带, 质地紧密; 8.2 m 处可见含有红褐色铁质条带, 在 8.8 m 处采集 OSL 样品(SDH1-OSL)
- SDH-3: 6.95~6.45 m, 白色钙质黏土层, 风化面泛白, 与上下层分界明显
- SDH-4: 6.45~4.35 m, 黄色、灰黄色、灰色粉砂质黏土, 发育斜层理和少量水平层理, 4.90 m 位置处发育透镜体砂层
- SDH-5: 4.35~3.85 m, 灰白色钙质黏土, 4.20 m 位置处发育粉砂透镜体
- SDH-6: 3.85~3.00 m, 灰色砂砾石层, 砾径 2~10 cm 不等, 磨圆较好, 砾石主要为花岗岩、暗色火山岩、及少量碎屑岩, 其中可见砂层透镜体, 在 3.8 m 处采集 OSL 样品 SDH2-OSL
- SDH-7: 3.00~1.30 m, 黄色砂层, 其间夹有薄层砾石, 砾石成分为石英质、花岗质等
- SDH-8: 1.30~0.60 m, 灰白色钙质黏土层, 1.10 m 位置处夹有 7 cm 厚的细砂层
- SDH-9: 0.60~0.20 m, 灰色砂, 结构疏松, 在 0.5 m 处采集 OSL 样品(SDH3-OSL)
- SDH-10: 0.20~0 m, 疏松的土壤层, 含植物根系

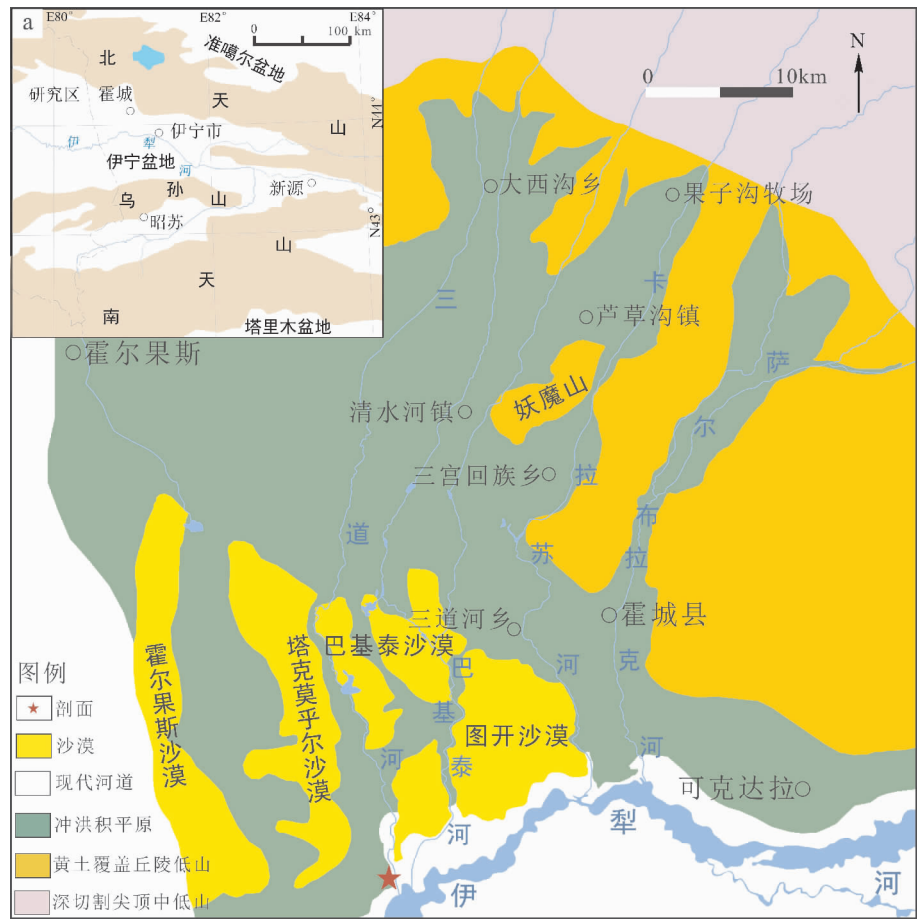


图 1 (a)研究区位置和(b)地貌类型图

Fig. 1 (a)Location and (b)geomorphic types of the study area

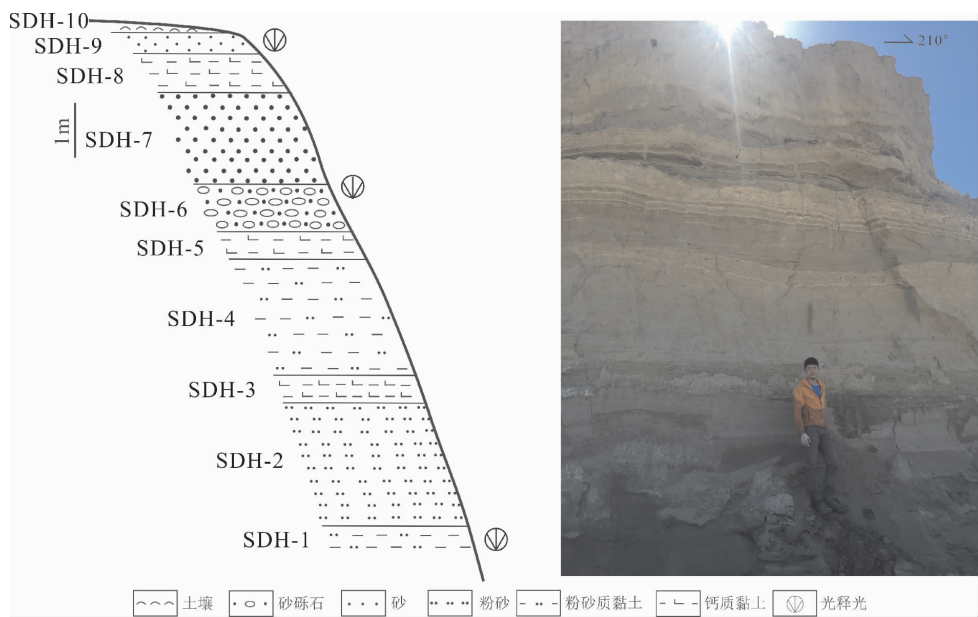


图 2 三道河一级河流阶地剖面图

Fig. 2 Profile of first terrace in Sandaohe river

2 分析结果

2.1 粒度参数

笔者选用中值(Md)、平均粒径(Mz)、标准偏差(σ)、偏度(Sk)、峰度(Kg)5种粒度参数对剖面进行分析(表1)。剖面中值粒径存在3次大的波动,在0.5~1.8 m显著减小,在3.85~3.00 m砂砾石沉积期间显著增大,在5.3~7.4 m表现为先增大后减小。平均粒径为4.35~7.05 φ ,平均值为5.71 φ ,

主要为细粉砂、中细粉砂、细砂和粉砂质黏土,含少量粗砂及黏土物质。标准偏差值为-1.77~-0.66,多数为-2~-1(155件样品),其次为-1~0(17件),平均值为-1.24,沉积物的分选性总体较好。偏度值为-2.24~9.38,平均值为1.67。可以看出,样品正偏态,负偏态均有分布,底部多为负偏态,到顶部为正偏态。峰度值为0.80~6.42,平均值为3.02。峰度尖锐,沉积物粒径分布集中。图3为三道河一级河流阶地粒度参数垂向变化曲线。

表 1 各层粒度参数特征及水动力条件判断表

Tab. 1 Characteristics of particle size parameters and judgement of hydrodynamic conditions in Sandaohe					
地层单元	平均粒径 φ	标准偏差 σ	偏度 Sk	峰度 Kg	水动力条件判断
SDH-10	较粗	较差	很正偏	很尖锐	中高能
SDH-9	中等	中等	很正偏	很尖锐	中高能
SDH-8	较粗	较差	很正偏	很尖锐	高能
SDH-7	较粗	较差	很正偏	很尖锐	高能
SDH-6	细	较好	正偏	尖锐	中能
SDH-5	较粗	中等	正偏	很尖锐	高能
SDH-4	细	好	微正偏	中等	低能
SDH-3	中等	较好	近对称	尖锐	低能
SDH-2	中等	较好	微负偏	尖锐	低能
SDH-1	中等	较好	近对称	尖锐	低能

2.2 频率分布曲线和概率累积曲线

三道河一级河流阶地样品粒度频率变化较大,粒度峰值主要集中于15 μm 、30 μm 和50 μm ,多数成正态分布,以单峰和双峰为主(图4a),其中呈单峰态的样品有92件,主要集中在SDH-1、SDH-2、SDH-4三个沉积单元中,样品为粉砂、粉砂质黏土,代表以湖泊为主的沉积环境;呈双峰态的样品有80件,集中在剩下的7个沉积单元中,岩性主要是黏土、砂和砂砾石,是湖泊和河流相互作用的结果。

概率累计曲线反映了沉积物搬运方式与粒度之间的关系(VISHER,1969)。三道河一级阶地剖面粒度样品概率累积曲线表现为三段式:即牵引、跳跃和悬浮3类(图4b)。牵引和跳跃成分的截点集中在1~2 φ ,牵引组分的直线段斜率基本为1,指示分选中等;跳跃与悬浮组分的截点集中在6~7 φ ,牵引组分直线段斜率大于跳跃组分,反映牵引组分分选好于跳跃组分。而牵引组分斜率略小于悬浮组分,

说明悬浮组分分选优于牵引组分。沉积物整体粒径位于0~9 φ ,分布范围较宽,主要以黏土、粉砂、细砂为主,粗粒成分占比增大,指示沉积环境由低能转变为高能。

2.3 磁学参数

χ 可以有效反映样品中亚铁磁性矿物质量分数的变化规律(夏敦胜等,2006)。三道河剖面的 χ 值为 $8.875 \times 10^{-8} \sim 128 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,其中SDH-1的 χ 的平均值 $34.417 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,SDH-2的 χ 的平均值 $45.435 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,SDH-3的 χ 的平均值 $37.66 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,SDH-4的 χ 的平均值 $20.002 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,SDH-5的 χ 的平均值 $48.903 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,SDH-6的 χ 的平均值 $42.867 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,SDH-7的 χ 的平均值 $63.92 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,SDH-8的 χ 的平均值 $54.027 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,SDH-9的 χ 的平均值 $40.02 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,

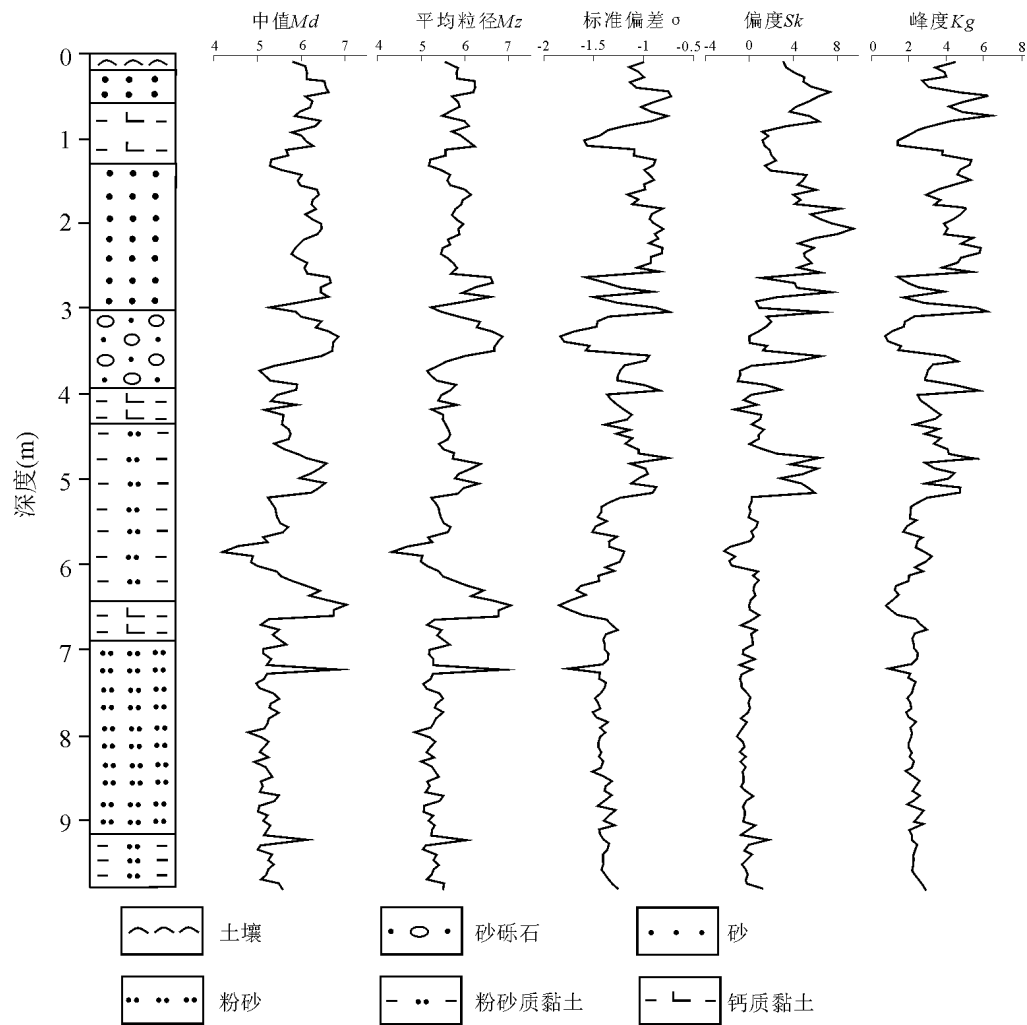


图 3 粒度参数垂向变化曲线图

Fig. 3 Vertical change curves of grain size parameters

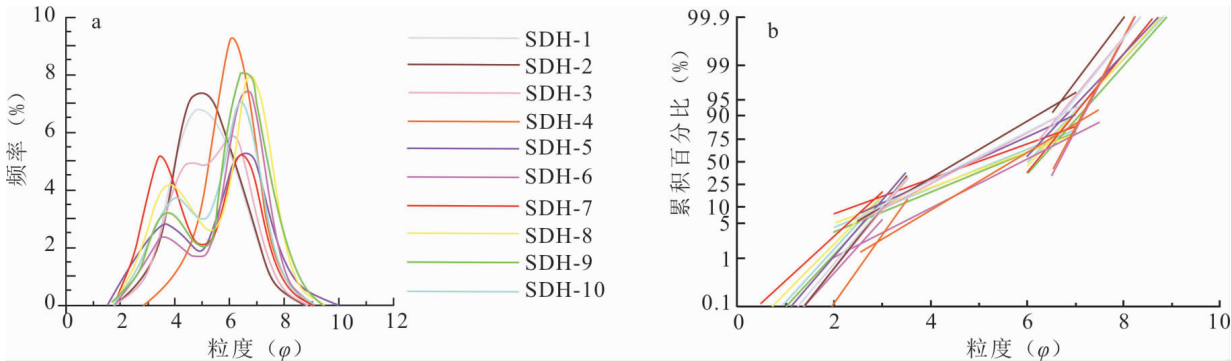


图 4 频率分布曲线和概率累积曲线图

Fig. 4 Frequency-distribution diagrams and accumulation curves in Sandaohe section

SDH-10 的 χ 的平均值 $46.458 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。整个剖面的 χ 最高值出现在 SDH-7 砂层中的 3.8~3.4 m (15.5~14.7 ka), 指示环境中磁性矿物增多, 这与 B-A 暖期气候变好有关, χ 最低值出现在 6.95~6.90 m, 指示 H1 时期气候恶化。

4 讨论

末次冰消期(19~11.7 ka)以来,地球气候系统经历了 3 次剧烈具有全球意义的气候变化事件,依次是 Younger Dryas 冷期(YD,12.9~11.5 ka)、Bølling-Allerød 暖期(B-A,14.7~12.9 ka)和 Heinrich 事件(H1,17.5~16 ka)(BOND, et al., 1997;ALLEY, et al.,1999),且在伊犁黄土中均有明确记录(叶玮等,2000;李传想等,2011;张文翔等,2015;LI, et al.,2017;SONG, et al.,2018)。通过对三道河剖面的环境指标系统分析发现,这 3 次气候事件在三道河剖面的粒度和磁化率均有明显记录,并可与格陵兰 GISP2 冰心的¹⁸O 同位素记录进行对应(图 5)。剖面 0.5~1.8 m 的沉积对应 YD 事件,表现为磁化率和中值粒径减小、增大再减小,这与博尔博松河流阶地的研究结果相一致,即 YD 早期(12.9~12.6 cal kyr BP)干燥、YD 中期(12.6~12.0 cal kyr BP)潮湿和 YD 晚期(12.0~

11.7 cal kyr BP)干燥(ZHAO, et al.,2013);剖面 1.8~3.5 m 的沉积,对应 B-A 事件,在磁化率上表现更为明显,其曲线波动特征与 δ¹⁸O 曲线完全吻合,而中值粒径曲线,虽有波动,但幅度较小;剖面 5.3~7.4 m 的沉积对应 H1 事件,表现为磁化率和中值粒径先增大后减小。对比地层柱状图可知,在气候寒冷期,细粒物质增加较为明显,对应 6.45~4.35 段和 1.30~0.60 m 段;在气候转暖期,粗粒物质明显增加,这与水动力条件增强相关,对应 3.85~3.00 m(砂砾石)、3.00~1.30 m(中砂)2 个层位。综合三道河一级阶地的频率曲线、粒度参数,判别出剖面自下而上经历了低能湖泊相沉积(SDH-1~SDH-4)→高能河流相沉积(SDH-5~SDH-8)→中高能河流相沉积(SDH-9~SDH10)的演化过程(表 2)。三道河一级阶地湖泊相沉积物主要为粉砂、黏土类的细粒物质,颜色以褐色、灰白色为主,河流相沉积主要为含黏土粉砂、粉砂、中砂、砾石,颜色以红褐色、灰黄色、黄色为主。

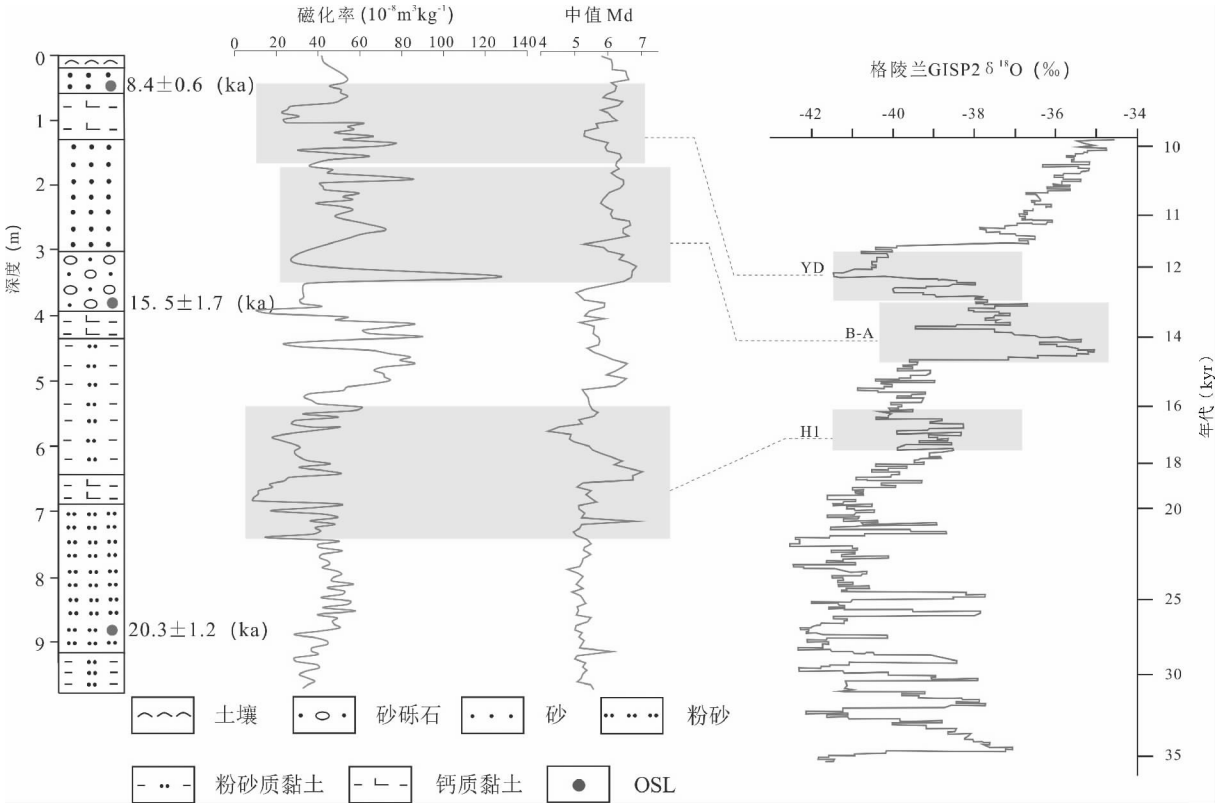


图 5 剖面磁化率、中值粒径的时间曲线(δ¹⁸O 引自 DANSGAARD, et al.,1993)

Fig. 5 The time series of magnetic susceptibility and median size parameters of Sandaohe(δ¹⁸O quoted from DANSGAARD, et al.,1993)

表 2 各层水动力条件判断表

Tab. 2 Judgement of hydrodynamic conditions in Sandaohe

地层单元	深度(m)	频率曲线分析	粒度参数	综合判断
SDH-10	0.20~0	中高能	中高能	中高能
SDH-9	0.60~0.20	中高能	中高能	中高能
SDH-8	1.30~0.60	高能	高能	高能
SDH-7	3.00~1.30	高能	高能	高能
SDH-6	3.85~3.00	中能	中能	中能
SDH-5	4.35~3.85	高能	高能	高能
SDH-4	6.45~4.35	低能	低能	低能
SDH-3	6.95~6.45	中低能	低能	低能
SDH-2	29.20~6.95	低能	低能	低能
SDH-1	9.70~9.20	中低能	低能	低能

在 20.3~17.5 ka BP 期间,其平均沉积速率为 0.05 cm/a;17.5~16 ka BP 期间,其平均沉积速率为 0.14 cm/a;16~15.5 ka BP 期间,其平均沉积速率为 0.3 cm/a;15.5~14.7 ka BP 期间,其平均沉积速率为 0.037 5 cm/a;14.7~12.9 ka BP 期间,其平均沉积速率为 0.094 cm/a;12.9~11.5 ka BP 期间,其平均沉积速率为 0.079 cm/a;11.5~8.4 ka BP 期间,存在 3.1 ka 的沉积间断,且在 12.9 ka 以后其沉积速率明显下降,湖泊相的沉积速率高于河流相的沉积速率,这与晚更新世末期霍城平原新构造抬升密切相关(LI, et al., 2019)。晚更新世末期,霍城平原伴随天山山脉的隆升同步抬升,平原区南部湖泊消失,随后转变为沙漠(袁四化等, 2016; LI, et al., 2019)。三道河剖面记录了沉积相的改变,由于地处河口地带,沙漠相已被改造为河流相。因此,本研究认为气候和构造共同控制了伊犁盆地霍城平原区沉积环境的演变。

5 结论

(1)地层剖面形成于晚更新世到全新世早期, 8.8~0.5 m 形成于 20.3~11.5 ka BP,0.5 m 之上形成于 8.4 ka 以后,其中由于晚更新世末期构造抬升存在 3.1 ka 的沉积间断。

(2)剖面沉积水动力经历由低能→高能→中能→高能→中高能的全过程,沉积相由湖泊相演变河流相。

(3)剖面完整记录了末次冰消期以来的 YD、B-A 以及 H1 三次重大气候变化事件。

参考文献(References):

陈敬安,万国江,张峰,等. 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), 2003,33(6):563-568.

CHEN Jingan, WAN Guojiang, ZHANG Feng, et al. Environmental Records of Lake Sediments at Different Time Scales, Taking Sediment Grain Size As An Example[J]. Science in China(Series D), 2003, 33 (6): 563-568.

陈秀玲,李志忠,凌智永,等. 新疆伊犁河谷晚全新世以来的风砂沉积与环境演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010,30(6):35-42.

CHEN Xiuling, LI Zhizhong, LING Zhiyong, et al. Holocene Aeolian Deposits and Environmental Evolution in Yili Valley, Xinjiang[J]. Marine Geology&Quaternary Geology, 2010, 30(6): 35-42.

姜修洋,李志忠,陈秀玲,等. 新疆伊犁河谷风沙沉积晚全新世孢粉记录及气候变化[J]. 中国沙漠, 2011, 31(4): 855-861.

JIANG Xiuyang, LI Zhizhong, CHEN Xiuling, et al. Late Holocene Climate and Environment Changes Inferred from Pollen Recorded in Takelmukul Desert in Yili Valley of Xinjiang, China[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(4): 855-861.

李传想,宋友桂,千琳勃,等. 中亚昭苏黄土剖面粒度记录的末次冰期以来气候变化历史[J]. 沉积学报, 2011, 29

- (6):1170-1179.
- LI Chuanxiang, SONG Yougui, QIAN Linbo, et al. History of Climate Change Recorded by Grain Size at the Zhaosu Loess Section in the Central Asia since the Last Glacial Period[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(6): 1170-1179.
- 李越, 宋友桂, 宗秀兰, 等. 伊犁盆地北部山麓黄土粒度端元指示的粉尘堆积过程[J]. *地理学报*, 2019, 74(1): 162-177.
- LI Yue, SONG Yougui, ZONG Xiulan, et al. Dust Accumulation Processes of Piedmont Loess Indicated by Grain-size End Members in Northern Ili Basin[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(1): 162-177.
- 李志忠, 凌智永, 陈秀玲, 等. 新疆伊犁河谷晚全新世风沙沉积粒度旋回与气候变化[J]. *地理科学*, 2010, 30(4): 613-619.
- LI Zhizhong, LING Zhyong, CHEN Xiuling, et al. Late Holocene Climate Changes Revealed by Grain-size Cycles in Takemukul Desert in Yili of Xinjiang[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(4): 613-619.
- 林钟扬, 赵旭东, 金翔龙, 等. 长江三角洲平原 BZK03 孔更新世以来古环境演变及多重地层划分对比[J]. *西北地质*, 2019, 52(4): 115-126.
- LIN Zhongyang, ZHAO Xudong, JIN Xianglong, et al. Palaeoenvironmental Evolution and Multi-stratigraphic Division and Correlation of Yangtze River Delta Plain since Pleistocene: Evidence from BZK03 Borehole[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(4): 115-126.
- 刘智荣, 沈军, 黄静宜, 等. 河北三河晚更新世地层粒度特征分析[J]. *地质学报*, 2016, 90(05): 997-1005.
- LIU Zhirong, SHEN Jun, HUANG Jingyi, et al. Grain Size Analysis of the Late Pleistocene Sediments in Sanhe County, Hebei Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(05): 997-1005.
- 宋友桂, 史正涛, 方小敏, 等. 伊犁黄土的磁学性质及其与黄土高原对比[J]. *中国科学(D辑)*, 2010, 40(1): 61-72.
- SONG Yougui, SHI Zhengtao, FANG Xiaomin, et al. Loess magnetic properties in the Ili Basin and their correlation with the Chinese Loess Plateau[J]. *Science in China (Series D)*, 2010, 40(1): 61-72.
- 汤文坤, 王永, 董进, 等. 海南北部近 2000 年气候环境变化——来自双池玛珥湖高分辨率沉积记录[J]. *西北地质*, 2017, 50(1): 291-300.
- TANG Wenkun, WANG Yong, DONG Jin, et al. High Resolution Palaeoenvironmental Evolution Revealed by a Lacustrine Sediment Sequence in Shuangchi Maar Lake during Past 2000 Years in North Hainan Island[J]. *Northwestern Geology*, 2017, 50(1): 291-300.
- 夏敦胜, 马剑英, 王冠, 等. 环境磁学及其在西北干旱区环境研究中的问题[J]. *地学前缘*, 2006, 43(6): 168-179.
- XIA Dunsheng, MA Jianying, WANG Guan, et al. Environmental magnetism concepts and their application to environment studies in arid regions, Northwest China[J]. *Earth Science Frontier*, 2006, 43(6): 168-179.
- 杨晓燕, 夏正楷, 崔之久. 黄河上游全新世特大洪水及其沉积特征[J]. *第四纪研究*, 2005, 25(1): 80-85.
- YANG Xiaoyan, XIA Zhengkai, CUI Zhijiu. Holocene Extreme Floods and its Sedimentary Characteristic in the Upper Reaches of the Yellow River[J]. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(1): 80-85.
- 叶玮, 董光荣, 袁玉江, 等. 新疆伊犁地区末次冰期气候的不稳定性[J]. *科学通报*, 2000, 45(6): 641-646.
- YE Wei, DONG Guangrong, YUAN Yujiang, et al. The Climate Instability of the Last Glacier in the Yili Area, Xinjiang[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(6): 641-646.
- 殷志强, 秦小光, 吴金水, 等. 湖泊沉积物粒度多组分特征及其成因机制研究[J]. *第四纪研究*, 2008, 28(2): 345-353.
- YIN Zhiqing, QIN Xiaoguang, WU Jinshui, et al. Multimodal Grain-size Distribution Characteristics and Formation Mechanism of Lake Sediments[J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(2): 345-353.
- 袁四化, 白相东, 梁文天, 等. 新疆伊犁盆地西北缘红山嘴断裂特征与最新活动[J]. *地质通报*, 2016, 35(1): 117-122.
- YUAN Sihua, BAI Xiangdong, LIANG Wentian, et al. Characteristics and Latest Activity of Hongshanzui Fault in Northwestern Yili Basin, Xinjiang Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2016, 35(1): 117-122.
- 张璞, 陈建强, 田明中, 等. 沉积物粒度分析在厦门市第四纪环境研究和地层划分对比中的应用[J]. *地球科学与环境学报*, 2005, 27(1): 88-94.
- ZHANG Pu, CHEN Jianqiang, TIAN Mingzhong, et al. Application of Sediments Grain-size Analysis in Quaternary Environmental Research and its Stratum Compartmentalization and Contrast Function in Xiamen Island, Fujian province[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2005, 27(1): 88-94.
- 张文翔, 史正涛, 张虎才, 等. 中国西风区伊犁盆地塔勒得黄土-古土壤元素地球化学特征及环境意义[J]. *第四纪研究*, 2011, 31(5): 812-821.

- ZHANG Wenxiang, SHI Zhengtao, ZHANG Hucai, et al. Geochemical characteristics and environmental significance of the Taledo loess-paleosol sequence in westerly area of China[J]. *Quaternary Sciences*, 2011, 31(5): 812-821.
- 曾蒙秀, 宋友桂. 新疆伊犁昭苏黄土剖面中的矿物组成及其风化意义[J]. *地质评论*, 2013, 59(3): 575-586.
- ZENG Mengxiu, SONG Yougui. Mineral Composition and Their Weathering Significance of Zhaosu Loess-Paleosol Sequence in the Ili Basin, Xinjiang[J]. *Geological Review*, 2013, 59(3): 575-586.
- 李平, 刘红旭, 丁波, 等. 伊犁盆地南缘琼博拉二长花岗岩锆石年代学及形成动力学机制[J]. *中国地质*, 2018, 45(4): 720-739.
- LI Ping, LIU Hongxu, DING Bo, et al. The Zircon U-Pb geochronology and dynamics mechanism for the formation of monzonitic granite in the Qiongbola area, south of Yili basin[J]. *Geology in China*, 2018, 45(4): 720-739 (in Chinese with English abstract).
- ALLEY R B, CLARK P U. The deglaciation of the northern hemisphere: A global perspective[J]. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 1999, 27: 149-182.
- BLOTT S J, PYE K. Gradistat: A Grain Size Distribution and Statistics Package for the Analysis of Unconsolidated Sediments[J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2001, 26(11): 1237-1248.
- BOND G C, SHOWERS W, CHESEBYM, et al. A Pervasive Millennial-scale Cycle in the North Atlantic Holocene and Glacial Climate[J]. *Science*, 1997, 278: 1257-1265.
- DANSGAARD W, JOHNSEN S J, CLAUSEN H B, et al. Evidence for General Instability of Past Climate from a 250 kya Ice-core Record[J]. *Nature*, 1993, 364: 218-220.
- LI Jiangang, YUAN Sihua, LIU Yongjiang, et al. Tectonic Uplift of the Yili Basin during the Last Stage of the Late Pleistocene: Evidence from ESR and OSL Dating of Sediments in the Huocheng Area, Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 93(5): 1219-1227.
- LI Xiaoqiang, ZHAO Keliang, Dodson J, et al. Moisture dynamics in central Asia for the last 15 kyr: new evidence from Yili Valley, Xinjiang, NW China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2011, 30(23-24): 3457-3466.
- PENG Yanjia, XIAO Jule, NAKAMURA T, et al. Holocene East Asian Monsoonal Precipitation Pattern Revealed by Grain-size Distribution of Core Sediments of Daihai Lake in Inner Mongolia of North-central China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 233: 467-479.
- SONG Yougui, ZENG Mengxiu, CHEN Xiuling, et al. Abrupt Climatic Events Recorded by the Ili Loess During the Last Glaciation in Central Asia: Evidence from Grain-size and Minerals[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 155: 58-67.
- XIAO Jule, CHANG Zhigang, SI Bin, et al. Partitioning of the Grain-size Components of Dali Lake Core Sediments: Evidence for Lake-level Changes During the Holocene[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2009, 42: 249-260.
- VISHER G S. Grain Size Distributions and Depositional Processes[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1969, 39(3): 1074-1106.
- ZHAO Keliang, LI Xiaoqiang, Dodson J, et al. Climate instability during the last deglaciation in central Asia, reconstructed by pollen data from Yili Valley, NW China[J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2013, 189: 8-17.