

引用格式: 谭典佳, 马运强, 李志忠, 靳建辉, 邹晓君. 天山北麓河流下游冲积平原沉积记录的中晚全新世环境演变[J]. 山地学报, 2023, 41(3): 307-321.

TAN Dianjia, MA Yunqiang, LI Zhizhong, JIN Jianhui, ZOU Xiaojun. Environmental evolution of middle-late Holocene verified by sedimentary evidences in the alluvial plain in the northern foothills of the Tianshan Mountains, China [J]. Mountain Research, 2023, 41(3): 307-321.

天山北麓河流下游冲积平原沉积记录的中晚全新世环境演变

谭典佳^a, 马运强^a, 李志忠^{a, b*}, 靳建辉^{a, b}, 邹晓君^a

(福建师范大学 a. 地理科学学院; b. 湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室, 福州 350117)

摘要: 天山北麓河流下游冲积平原与古尔班通古特沙漠交汇带, 沉积环境独特, 对全球气候变化响应敏感。囿于年代校正不确定性、代用指标的多解性以及地形地貌格局等因素的影响, 该区域全新世时期沉积环境演变过程和气候演化模式研究, 尚存在不同认识。重建该区域的中晚全新世环境演变历史及其对气候变化的响应过程, 有助于加深对天山北麓冲积平原沉积环境演化时空特征的认识。本文选取天山北麓中部河流下游冲积平原四个典型冲积-湖积-风积地层剖面为研究材料, 以光释光(OSL)测年确定地层绝对年代, 综合沉积构造特征、沉积物粒度参数和石英砂表面微结构特征分析, 探讨河流下游中晚全新世冲积-湖积平原沉积序列的演变过程和驱动因素。结果表明: (1) 研究剖面主要由黏土、粉砂和极细砂含量较高的河湖相沉积构成, 靠近北部沙漠边缘以极细砂、细砂为主的风成砂层明显增多, 形成以冲积相、湖沼相和风沙相交替叠覆的沉积序列, 其沉积相组合具有明显的时空变化特征; (2) 沉积物石英颗粒表面常见冰川、流水、风力等多种外营力作用的痕迹, 表明河流下游平原沉积物主要来源于山区冰川搬运、磨蚀的碎屑物质, 并经流水和风力分选后成为古尔班通古特沙漠的重要物源; (3) 7.59~6.0 ka 河流活动频繁, 广泛发育河湖相沉积, 为相对暖湿气候期; 6.0~4.25 ka 期间, 多地出现风沙活动, 气候短暂转干, 湿度有所降低; 4.25 ka 以来, 发育冲洪积、湖积和风成沙交互沉积, 气候“温湿-凉干”周期性波动。本文各剖面沉积序列综合揭示中全新世以来的沉积环境演变过程既有全球气候变化影响的共性特征, 又有干旱区山麓地带大地貌控制的区域特点, 这对预测未来沙漠边缘风沙活动变化趋势、合理利用淡水资源, 从而构建区域生态安全屏障具有重要意义。

关键词: 冲积平原; 沉积序列; 中晚全新世; 环境演变; 天山

中图分类号: K903

文献标志码: A

干旱区河流冲积-湖积物及其地貌形态是岩石圈、水圈、大气圈和生物圈等诸多圈层相互作用的联结点, 承载了河流的侵蚀与堆积历史, 记录了大尺度地貌环境中气候干湿变化信息^[1-3]。在较小的时空

尺度上, 岩石风化剥蚀、气候变化和河流水文变迁会直接影响山麓冲积平原沉积环境和地貌的发展演变, 这为重建区域沉积环境和气候演化的研究提供了可靠的原始素材^[4]。

收稿日期 (Received date): 2022-12-21; **改回日期** (Accepted date): 2023-06-02

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金(42071011); 福建师范大学 2023 年度研究生科研创新基金。[National Natural Science Foundation of China (42071011); Research and Innovation Fund Project for Postgraduates of Fujian Normal University in 2023]

作者简介 (Biography): 谭典佳(1999-), 广西贺州人, 硕士研究生, 主要研究方向: 地貌过程与第四纪环境演变。[TAN Dianjia(1999-), male, born in Hezhou, Guangxi province, M. Sc. candidate, research on geomorphic processes and quaternary environmental evolution] E-mail: 343792703@qq.com

* **通讯作者** (Corresponding author): 李志忠(1962-), 四川绵阳人, 教授, 博士, 主要研究方向: 风沙地貌与环境演变。[LI Zhizhong(1962-), male, born in Mianyang, Sichuan province, Ph. D., professor, research on aeolian geomorphology and environmental evolution] E-mail: lizz@fjnu.edu.cn

中国西北干旱区东西跨度大,受到东亚夏季风和西风环流的共同影响,在全新世不同时期,东西区域干湿变化趋势不同,湿润与干旱持续时间、干湿波动幅度也存在明显的区域分异。对巴丹吉林沙漠南缘冲积-湖积序列 OSL 测年和沉积特征的研究表明^[5]:在全新世中期,气候环境相对湿润,湖泊水位较高,期间发生多次河流沉积和暂时性流水形成的洪泛沉积。石羊河流域中游地层剖面表明^[6]:在 8.5 ~ 6.1 ka 期间流域气候湿润,以河湖相沉积为主;6.0 ~ 5.5 ka 发育浅湖-风成沉积相;4.4 ~ 3.4 ka 气候转干,流域基本干涸。根据南疆克里雅河尾间沉积序列^[7],在 17 ~ 11 ka、5.0 ~ 2.0 ka 时段,该地区较湿润,这与北半球升温 and 太阳辐射增强共同导致山区冰雪融水增加有关,也可能受北极涛动增强驱动西风带南移,进而导致周边山地雨雪增加的影响。

天山北麓河流下游冲积平原与古尔班通古特沙漠交汇带沉积环境独特,对全球气候变化响应敏感。囿于年代校正不确定性、代用指标的多解性以及地形地貌格局等因素的影响,对该区域全新世时期沉积环境演变和气候演化过程,认识存在较大差异。有研究者从流域尺度得出古尔班通古特沙漠南缘及周边地区全新世以来气候趋于冷干的结论^[8]:玛纳斯河下游冲积平原在 8.0 ~ 4.0 ka 气候较为暖湿,晚全新世转为冷干气候,间有短暂湿润波动;邻近的蘑菇湖地层剖面记录了全新世以来区域沉积环境共经历“河流注入-封闭湖泊-湿地沼泽-逐渐干涸”四个干湿变化阶段,气候趋于冷干^[9-10]。但也有研究者发现,该区域全新世气候变化整体呈现暖干的特点:通过分析古尔班通古特沙漠南缘丘间地钻孔沉积物,在 6.0 ~ 7.0 ka 区域气候环境存在一次明显的偏湿波动,但整体仍以温暖干旱为主^[11]。此外,也有研究认为,区域气候环境经历了湿度周期性波动、冷暖交替变化的过程:东道海子多个冲积-湖积剖面反映乌鲁木齐河流下游约 4.9 ka 以来气候变化极不稳定,“冷湿-凉干”交替变化频繁^[12-15]。目前,毗邻区域越来越多的证据,例如湖泊、泥炭等河湖沉积记录显示,沙漠南缘 6.0 ka 以来普遍存在湖泊扩张,气候逐渐湿润,晚全新世时达到湿度最优状态^[16]。尽管不少学者基于不同原始数据解读了天山北麓冲积平原区的沉积环境及气候演化模式,但上述研究所反映的区域古环境变化过程及温湿匹配关系仍呈现出明显的阶段性差异,亟需更多的数据

支持。高精度重建该区域的中晚全新世环境演变历史及其对气候变化的响应过程,有助于加深认识天山北麓冲积平原沉积环境演化时空特征。

本文选取天山北麓中部呼图壁河和塔西河下游冲积平原干流方向的四个冲积-湖积-风积地层剖面为研究材料,以光释光 (Optically Stimulated Luminescence, OSL) 测年方法确定剖面绝对年代,综合分析剖面沉积结构和构造、沉积物粒度参数和石英砂表面微结构特征,反演研究区外营力搬运、沉积变化历史;以绝对年代为标尺,对比和划分区域地层,建立区域沉积序列年代学框架,探讨天山北麓中段河流下游中全新世以来冲积-湖积平原的演变过程和驱动因素,为天山北麓和北疆荒漠盆地生态安全评价提供科学数据支撑。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

本研究区位于天山北麓冲积平原与古尔班通古特沙漠南缘交汇地带(图 1),为呼图壁河和塔西河下游冲积平原。这两条河流发源于北天山依连哈比尔尕山,全长约 258 km 和 120 km,年平均径流量分别为 $4.56 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $2.32 \times 10^8 \text{ m}^3$,由冰川融水补给,是天山北麓中段代表性河流^[17]。第四纪以来,天山北麓受新构造运动的挤压作用形成三排近东西走向的褶皱,并向准噶尔盆地中心推进 30 ~ 40 km,众多河流下游的平原曲流带也北移至少 10 km 以上^[18-19]。两条河流切割北天山吐谷鲁断裂-背斜带后,在地势平缓的冲积平原上沉积一定厚度的、以亚砂土与亚黏土为主的第四纪沉积物,并在沙漠南缘断流^[17,20]。流域属典型大陆性干旱气候,春夏时节降水较多。由于流域降水稀少和蒸发旺盛,在相对低洼封闭的扇缘曲流带及河道尾间地区常淀积易溶盐类,使得地表聚积各种形态的盐渍土、石膏土和碱土^[17]。

1.2 剖面岩性特征

本文研究剖面共四个:芳草湖南(SFC)、北(NFC)剖面位于呼图壁河下游芳草湖总厂北部;玛纳斯林场管护站(MG)剖面及西古城(XM)剖面位于沙漠西南莫索湾地区,其中 MG 剖面地处呼图壁河尾间丘间低地, XM 剖面处在塔西河下游尾间古河道附近。四个剖面顶部均不整合发育现代灌丛沙丘和沙垄(图 1、图 2)。各剖面岩性特征描述如下:

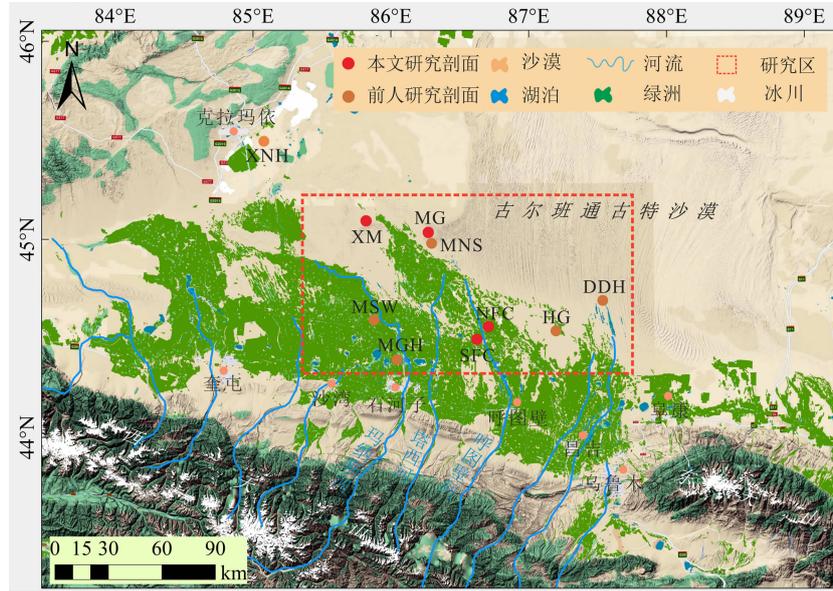


图1 研究区和采样点位置

Fig. 1 Location map of study area and sampling points

注:剖面 MSW 来源于文献[8];剖面 MGH 来源于文献[9];剖面 DDH 来源于文献[15];剖面 HG、MNS 来源于文献[21];剖面 XNH 来源于文献[22]。

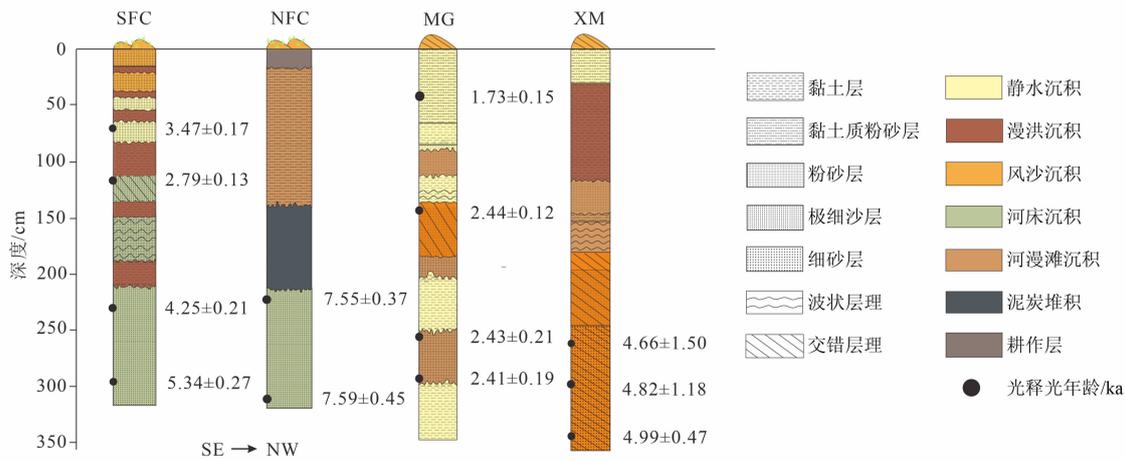


图2 剖面岩性和沉积序列

Fig. 2 Lithology and sedimentary sequence of studied profiles

(1) SFC 剖面总厚 320 cm, 自上而下:

0 ~ 25 cm: 灰黄色粉沙层, 质地较为松散, 块状构造。

25 ~ 100 cm: 浅红褐色亚黏土层与灰黄色粉沙层交互层, 有少量含炭屑植物根孔。

100 ~ 130 cm: 青灰色极细沙层, 质地较为紧实, 具明显交错层理。

130 ~ 190 cm: 青灰色粉沙层, 紧实; 夹多层红褐色亚黏土层, 胶结坚硬。

190 ~ 200 cm: 红褐色亚黏土层, 胶结坚硬, 质地紧实, 连续性较好。

200 ~ 320 cm: 青灰色极细沙层, 质地紧实, 块状构造, 不显层理, 未见底。

(2) NFC 剖面总厚 290 cm, 自上而下:

0 ~ 20 cm: 耕作层, 未采样。

20 ~ 130 cm: 灰褐色黏土质粉沙层, 胶结坚硬, 顶部发育少量植物根系。

130 ~ 180 cm: 灰黑色泥炭层, 紧实, 块状构造,

含较多植物根孔根管和螺壳遗骸。

180~300 cm:青灰色极细沙层,紧实,不显层理,大量红褐色铁锰锈斑,未见底。

(3)MG 剖面总厚 365 cm,自上而下:

0~70 cm:浅红褐色亚黏土层,胶结坚硬,质地紧实,块状构造;

70~130 cm:浅红褐色亚黏土层与灰黄色粉沙层交互层,质地紧实;

130~185 cm:灰黄色极细沙层,较疏松,显交错层理,上部夹黏土碎块;

185~235 cm:灰黄色粉沙层与浅红褐色亚黏土层交互层,质地坚硬;

235~295 cm:灰黄色极细沙层与浅红褐色亚黏土层交互层,水平层理,略显波状层理;

295~365 cm:浅红褐色亚黏土层,胶结坚硬,质地紧实,块状构造,未见底。

(4)XM 剖面总厚 355 cm,自上而下:

0~30 cm:淡黄色黏土质粉沙层,胶结坚硬,略显波状层理;

30~115 cm:浅红褐色亚黏土层,坚硬紧实,呈近水平层理,见少量植物根孔;

115~145 cm:淡灰绿色粉沙层,显水平层理,底部夹厚约 10 cm 的褐色黏土质粉沙层;

145~240 cm:淡灰绿色粉沙层,紧实,上部见叠覆波状层理,下部显交错层理;

240~355 cm:青灰色细沙层,含中沙及粗沙,较松散,低倾角交错层理,未见底。

1.3 野外采样和实验方法

在野外清理剖面后,按第四纪地质学野外工作规范进行剖面观察描述并采集样品。在剖面刻槽中间隔 10 cm 采集环境代用指标样品,四个剖面共采集样品 161 件;使用直径 5 cm、长 20 cm 的不锈钢钢管打入新鲜刻槽中采集 OSL 样品并密封编号,共计 13 个。

在室内进行 OSL 测年实验,NFC、SFC、MG 剖面光释光测年样品在中国地震局地壳应力研究所光释光实验室测试完成,XM 剖面光释光测年样品的年代测定在福建师范大学湿润亚热带山地生态国家重点实验室完成。根据剖面岩性特点和沉积相分析结果,SFC、NFC、MG 三个剖面样品选取 90~150 μm 石英颗粒、XM 剖面样品选取 63~125 μm 石英颗粒,采用单片再生剂量法 (Single-aliquot

Regenerative-dose, SAR) 在丹麦 Risø DA-20-C/D 型热/光释光自动测量系统测定等效剂量 (D_e)^[23-24],样品 U、Th 含量用 NexION300D 等离子体质谱仪测定,K 含量用 Z-2000 石墨炉原子吸收分析仪测定,进而计算各样品所吸收的环境剂量率;XM 剖面样品经前处理后送往中国原子能科学研究院采用中子活化法 (Neutron Activation Analysis, NAA) 测得 U、Th、K 含量。干旱区沉积物含水量随时间变化难以准确测定,结合采样地点的实际情况,统一采用 5%;为了反映整个埋藏时期的平均含水量,本文引入 5% 的变化量。最后经 OSL 测年法的公式进行年龄计算:

$$A = D_e / D \quad (1)$$

式中,A 为地层沉积时的埋藏年代 (ka); D_e 为样品的等效剂量 (Gy); D 为样品的环境剂量率 (Gy/ka)。

沉积物粒度测定通过 Mastersizer 2000 激光衍射粒度仪完成,碎屑粒级根据 Uden-Wentworth (标准) 划分,并依据 Folk 和 Ward 公式计算获得平均粒径 (M_z)、分选系数 (σ)、偏度 (SK) 和峰态 (K_g)^[23]。典型层位的石英颗粒表面微形态观察与照片拍摄采用日本电子株式会社生产的 JCM-6000PLUS 型扫描电子显微镜完成。这两项实验均在福建师范大学湿润亚热带山地生态国家重点实验室完成。

2 结果分析

2.1 OSL 测年结果

各个剖面 OSL 测年结果基本符合下老上新的地层层序律 (表 1)。SFC、NFC、MG 剖面光释光样品主要是以细砂与极细砂为主的冲-洪积物,黏土含量少,基本不含中粗砂,故选用 90~150 μm 粗颗粒组分进行样品前处理和样片制备。从剖面沉积相和粒度特征来看,大部分沉积物在沉积时水动力较弱,分选较好,沉积环境相对稳定,由此推断沉积物在埋藏前经历了较长时间的搬运和沉积,曝光充分,测年结果是可靠的;XM 剖面测年样品属风成沙,其在埋藏之前晒退应较为良好,释光信号清零。值得注意的是,SFC 剖面上部的 SFC01 和 SFC02 号样品出现年代倒置,且是中晚全新世以来的沉积,而近期有研究者运用钾长石多步升温法测定沙漠南缘的 FK、HG、MNS 剖面上段黏土质粉砂样品的年龄时也同样出现此情形^[21],其年龄倒置可能反映晚全新世时

表 1 样品光释光年代及相关参数值

Tab. 1 Optically stimulated luminescence (OSL) ages and values of associated parameters

样品 编号	埋深/ m	U/ ppm	Th/ ppm	K/%	含水率/ %	测片数/ 个	剂量率/ (Gy/ka)	等效剂量/ Gy	年龄/ ka
SFC01	0.70	2.26 ± 0.02	8.73 ± 0.07	2.08 ± 0.01	5 ± 5	24	3.26 ± 0.13	11.30 ± 0.29	3.47 ± 0.17
SFC02	1.15	2.02 ± 0.03	7.60 ± 0.05	2.11 ± 0.02	5 ± 5	26	3.14 ± 0.13	8.75 ± 0.16	2.79 ± 0.13
SFC03	2.40	1.45 ± 0.01	7.28 ± 0.05	2.08 ± 0.02	5 ± 5	26	2.93 ± 0.12	12.45 ± 0.33	4.25 ± 0.21
SFC04	3.00	1.53 ± 0.03	6.30 ± 0.03	2.02 ± 0.02	5 ± 5	29	2.81 ± 0.12	15.01 ± 0.43	5.34 ± 0.27
NFC01	1.90	1.78 ± 0.01	7.84 ± 0.07	2.10 ± 0.02	5 ± 5	26	3.07 ± 0.13	23.18 ± 0.59	7.55 ± 0.37
NFC02	2.90	1.81 ± 0.03	8.10 ± 0.11	2.05 ± 0.02	5 ± 5	25	3.02 ± 0.13	22.93 ± 0.97	7.59 ± 0.45
MG02	0.40	3.57 ± 0.04	12.3 ± 0.15	2.45 ± 0.02	5 ± 5	26	5.04 ± 0.37	8.74 ± 0.40	1.73 ± 0.15
MG05	1.55	2.54 ± 0.05	9.52 ± 0.09	2.07 ± 0.02	5 ± 5	30	3.34 ± 0.14	8.15 ± 0.18	2.44 ± 0.12
MG07	2.50	2.27 ± 0.04	7.78 ± 0.15	2.06 ± 0.02	5 ± 5	29	3.72 ± 0.28	9.06 ± 0.39	2.43 ± 0.21
MG08	2.00	2.57 ± 0.04	8.50 ± 0.16	2.05 ± 0.02	5 ± 5	28	3.88 ± 0.29	9.33 ± 0.20	2.41 ± 0.19
XM04	2.65	1.44 ± 0.05	5.47 ± 0.03	2.08 ± 0.05	5 ± 1	30	2.82 ± 0.11	12.95 ± 4.17	4.66 ± 1.50
XM05	3.00	1.37 ± 0.05	4.74 ± 0.05	2.06 ± 0.03	5 ± 1	31	2.74 ± 0.11	13.04 ± 3.19	4.82 ± 1.18
XM06	3.50	1.43 ± 0.05	4.98 ± 0.03	2.09 ± 0.01	5 ± 1	24	2.19 ± 0.09	13.81 ± 1.29	4.98 ± 0.47

期干湿变化的频繁转换。

综合测年结果分析,NFC 剖面自 7.59 ka 开始沉积,SFC 剖面是 5.34 ka 以来的沉积序列,XM 和 MG 两个剖面分别是 4.98 ka 和 2.5 ka 以来的沉积序列,其年龄相对年轻。四个沉积序列相互补充,综合记录了呼图壁河和塔西河下游区域中全新世以来的沉积环境演变过程。

2.2 沉积相与沉积环境

沉积相是特定沉积环境的产物^[26-28]。根据上述剖面观察,本文选取四个剖面 NFC、SFC、MG、XM 均位于古河道附近,主要发育河流相沉积,包括河床亚相、河漫湖泊微相、河漫滩微相及漫洪相,其次为风沙相沉积,各剖面沉积相与沉积特征如下:

SFC 剖面上段为胶结坚硬的薄层浅红褐色亚黏土层与质地松散的厚层灰黄色粉沙层交互沉积,间夹有显水平层理的薄层淡黄色风成沙层(图 3a),总体属河流洪泛期发育的河漫滩沉积,薄层风成沙层则反映河流间歇期相对活跃的风沙活动。下段以青灰色细砂、极细砂为主,质地紧实,块状构造,为水动力较强时发育的边滩微相沉积(图 3b)。

NFC 剖面上段为灰褐色黏土质粉砂层与浅红棕色黏土层交互沉积构成的二元沉积旋迴(图 3c),应是区域在水流动力较弱的条件下形成以细粒物

质为基质的泥质粉砂厚层河漫滩沉积,多层浅红棕色水平薄层代表河流多次加积作用后所形成的沉积物经历了相对短暂的干燥氧化环境,因而这种河漫滩沉积更接近于静水沉积。中段发育泥炭堆积,灰黑色有机质较多;下段见少量碳化的植物根茎和大量灰黄色铁锰锈斑,具备较多小型螺壳遗骸及浅水生物的爬行与穴居痕迹等生物扰动构造(图 3d),反映湖沼沉积环境,属较浅的河漫湖泊沉积。

MG 剖面上段以粉砂和亚黏土为主,呈厚层浅红褐色亚黏土层与薄层风沙层交互沉积,反映静水沉积与风沙沉积交替转换的环境。中段(130 ~ 185 cm)风砂层顶部发育迁移型叠覆波状层理(图 3e),属河漫滩沉积。同时,剖面下部(235 ~ 295 cm)呈近水平层理、略显波状层理的灰黄色沙层,粒度以极细砂为主(图 3f),可能为风成沙混入河流所致,且尾间水流量不稳定,沙粒未经过充分还原。

XM 剖面上段沉积相变化与 NFC、SFC、MG 剖面上段类似,显近水平层理的亚黏土和黏土质粉砂层互层沉积,属漫洪沉积和河漫滩沉积(图 3g)。下段顶部见叠覆波状层理,下伏沙层以青灰色极细砂、细砂和中粗砂为主,质地疏松,发育低倾角交错层理,为典型风成沉积物,该沉积序列组合特征指示了风沙环境向间歇性流水沉积环境的过渡。

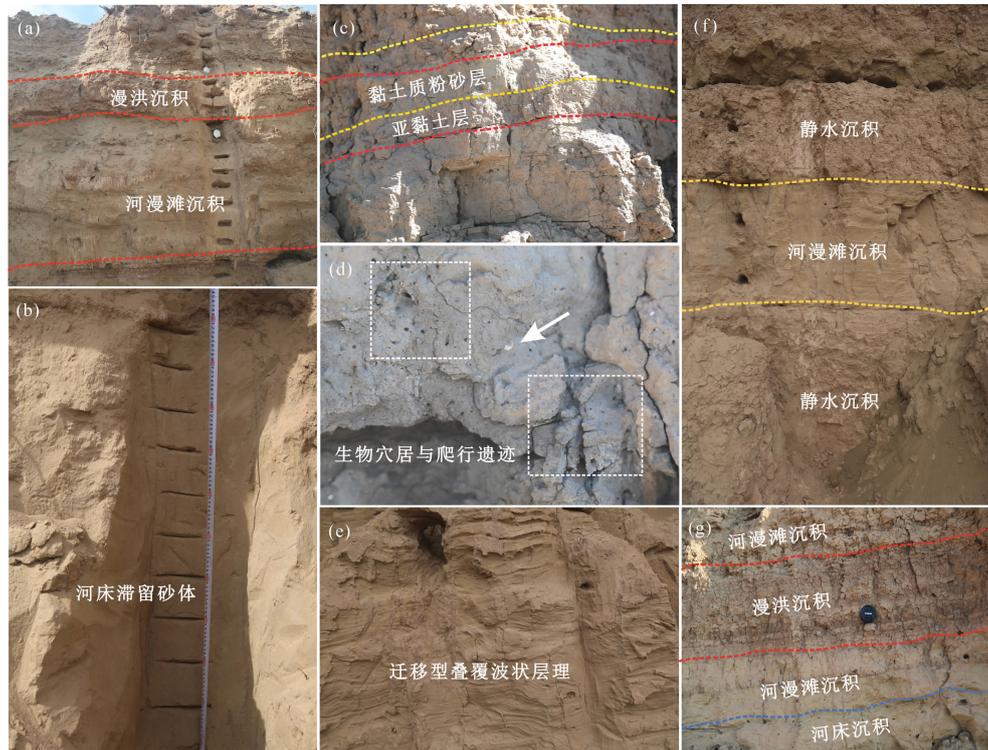


图 3 剖面沉积构造与沉积相例证:(a)SFC 剖面上段;(b)SFC 剖面下段边滩沉积;(c)NFC 剖面上段的漫洪沉积与黏土质粉砂互层;(d)NFC 剖面下段浅水生物的爬行遗迹与螺壳遗骸;(e)MG 剖面中段的波状层理及水下沙波纹;(f)MG 剖面下段;(g)XM 剖面上段

Fig. 3 Examples of sedimentary structure and sedimentary facies of the studied profile: (a) upper section of the SFC profile; (b) lower section SFC of profile concave floodplain deposit; (c) diluvial deposit and clay silt interbed in the upper section of the NFC profile; (d) crawling relics and *Turritella* shell remains of shallow water organisms in the lower section of the NFC profile; (e) wavy bedding and underwater ripple marks of the middle section of the MG profile; (f) lower section of the MG profile; (g) upper section of the XM profile

2.3 沉积物粒度特征

通过沉积物粒度特征分析可以准确有效辨识外动力类型和性质,有效提取区域沉积环境变化的信息^[25, 29]。综合沉积相、各类型沉积物的粒度频率分布曲线、含量百分比和粒度参数(M_z 、 M_d 、 σ 、 SK 、 K_g)分析,各剖面粒度特征如下:

SFC 剖面(图 4a、图 5a)上段属河漫滩沉积与漫洪沉积交互层,0~30 cm 深度有近 40% 极细砂和细砂混入,粒径范围 200~240 μm ,整体偏粗,为河流搬运的碎屑物于丘间地沉积而成,或受风成砂稀释作用的影响。河漫滩沉积与漫洪沉积具有相似的粒度特征,呈较宽的多峰分布,分选较差,但漫洪沉积(107~187 μm)较河漫滩沉积(221~300 μm)颗粒更细。下段边滩微相沉积(图 4a),呈尖窄的正态单峰,分选系数 0.49~0.86,说明在流水冲积作用下细粒组分显著流失,为典型的辫状河道冲积砂。砂粒大小十分均匀,暗示水动力环境比较稳定。

NFC 剖面(图 4b、图 5b)上段棕褐色河漫滩沉

积的粒度以亚黏土和粉砂为主,平均粒径 76~168 μm ,频率曲线波状起伏,粗、细组分皆有,不稳定组分多,分选较差,呈负偏宽峰。中段泥炭层粒度以粉砂和极细砂为主,频率曲线末端波状起伏,反映粉砂的混入,分选较差,介于棕褐色漫洪沉积和河漫滩沉积之间。下段河漫滩沉积(图 4b)粒度以粉砂、极细砂为主,兼有一定比例的细砂,平均粒径 280~319 μm ,应是由曲流河河床中水流的侧向加积所形成;呈尖窄的单峰,表明分选较好;其颜色青灰反映沉积物在厌氧环境下经历了水下还原过程。

MG 剖面(图 4c)上段、下段均以静水沉积与河漫滩堆积互层为主,0~30 cm 深度有较大比重的中粗砂汇入,应是受到上覆沙垄沙的影响;静水沉积相比于河漫滩沉积有近 20% 细砂混入,峰值更高、分选较好,粒径更粗,均以亚黏土、粉砂为主。中段风沙沉积频率曲线变化大、分布范围广,呈现尖窄单峰,反映风沙活动有所增强,同时也具宽矮的单峰,

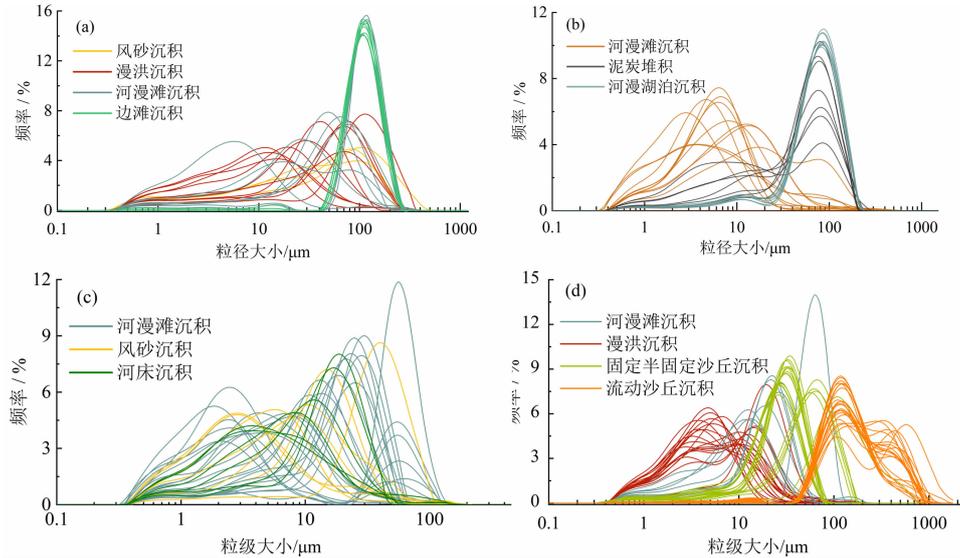


图4 剖面各沉积类型粒度分布频率曲线:(a)SFC剖面;(b)NFC剖面;(c)MG剖面;(d)XM剖面

Fig. 4 Grain size frequency distribution curve of each sedimentary type in each profile:

(a) SFC profile; (b) NFC profile; (c) MG profile; (d) XM profile

应为河流改造所致。自下而上,从沉积物的分选变差、颗粒变细的趋势来看,应为流动沙丘沉积转为植被覆盖度较好的半固定沙丘沉积。

XM剖面(图4d)上段为棕褐色漫洪沉积与河漫滩沉积互层沉积,漫洪沉积以亚黏土为主,与NFC上段棕褐色亚黏土、粉砂层的粒度变化特征类似,而河漫滩沉积则以粉砂居多,正偏单峰,分选较好。下段上部沙层属河床沉积,粒度以粉砂为主,呈尖窄单峰,分选较好,说明曲流河尾间较弱的水动力环境;下段底部沙层的细砂、中粗砂组分显著增多,质地松散,分选较好,属典型的风成沙沉积。

2.4 石英砂表面微形态特征

沉积物搬运过程中,石英颗粒经受不同外力作用的冲刷、滚动、撞击后会留下典型特征标志。而根据颗粒磨圆度,可以判别同一动力作用下沉积物的搬运距离、动力条件和作用力强度^[30-32]。

剖面各沉积亚相中石英砂形态和表面微结构如图6所示。SFC01号样取自SFC剖面顶部风沙层,石英颗粒近圆状,磨圆度较好,砂粒表面分布较多麻坑、较大的碟形坑和坑间曲脊,说明砂粒经受较强风力作用的机械撞击,并因长期磨蚀导致其圆化。SFC16号样取自剖面上段漫滩相地层,砂粒磨圆度较差,具较大V形坑和曲长裂隙,说明其经历较强流水作用。SFC24号样则取自剖面下段河床相地层,次棱状,具明显刻槽、长度不等的擦痕及平整解

理面,表明其受到冰川刻蚀作用及高强度水动力作用。NFC05号样取自剖面上段漫洪沉积层,次棱状,颗粒表面黏附大量外来细小颗粒和形成众多较小的不规则溶蚀坑,颗粒边缘已被部分溶蚀,表明该层位一定程度上受到后期成岩过程中的胶结与溶蚀作用的影响;NFC25号样取自剖面下段的河漫湖泊微相沉积,磨圆度较好,砂粒表面光滑,散布直径约几十微米的小三角坑,应是长期流水磨蚀和颗粒间的相互撞击所致。

MG05号样取自MG剖面上段静水沉积层,次棱状,颗粒外层包裹大量硅质沉淀及形成形状各异的溶蚀坑,随着表面沉淀物的破裂而形成细微裂纹,说明颗粒经历长期化学溶蚀作用,并在沉积埋藏后处于偏湿环境。XM36号样属剖面下段半固定沙丘沉积,次棱角状,颗粒表明发育V形刻槽及贝壳状断口,同时具硅质沉淀,指示早期冰川搬运过程中的挤压作用和后期化学溶蚀作用。XM62号样取自剖面下段流动沙丘沉积层,近圆状,砂粒表面分布不规则撞击坑及小麻坑,为较强风力作用下砂粒间剧烈碰撞与摩擦所致。

综合来看,天山北麓河流下游冲积平原沉积物样品石英颗粒呈现出流水和风力共同作用的特征,其中来自冲积层的部分样品表面常见冰川刻蚀痕迹,大部分石英颗粒表面还发育有硅质球及硅质沉淀,说明区域沉积物深受化学作用的影响。

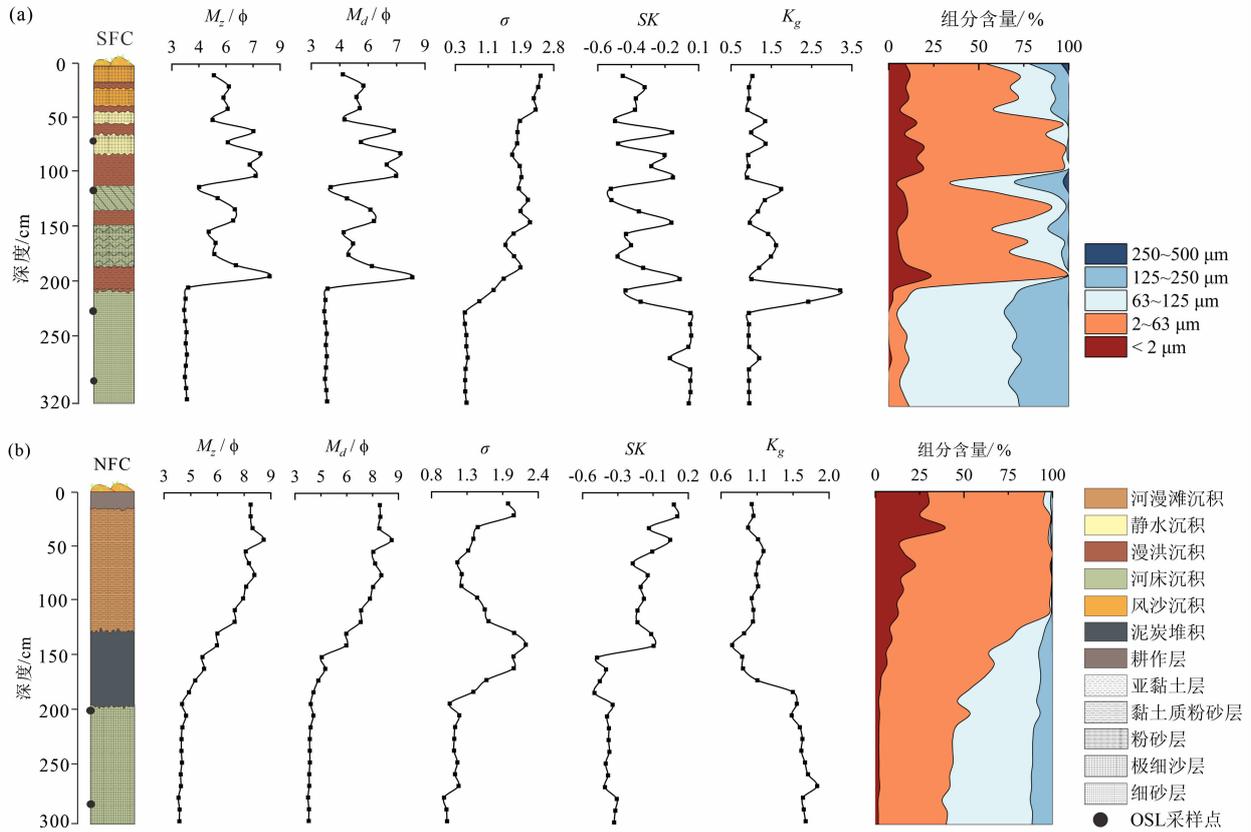


图 5 剖面粒度参数及组分含量百分比: (a)SFC 剖面; (b)NFC 剖面

Fig. 5 Particle size parameters of profile and percentage of component content: (a) NFC profile; (b) SFC profile

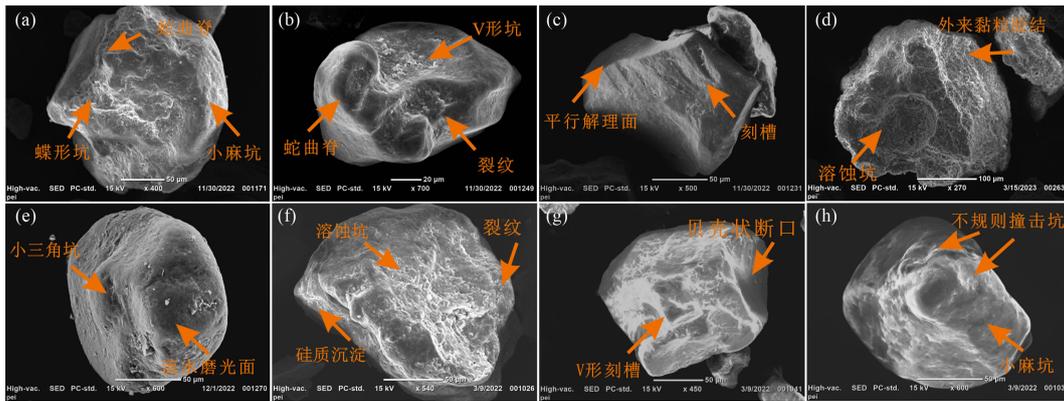


图 6 石英砂颗粒微形态特征标志:

(a) SFC01; (b) SFC16; (c) SFC24; (d) NFC05; (e) NFC25; (f) MG05; (g) XM36; (h) XM62

Fig. 6 Micromorphological characteristics of quartz sand particles in the horizon:

(a) SFC01; (b) SFC16; (c) SFC24; (d) NFC05; (e) NFC25; (f) MG05; (g) XM36; (h) XM62

3 讨论

3.1 地层剖面沉积记录的区域沉积环境特征及其成因

以上四个剖面的沉积序列以及沉积物特征,是

在天山北麓和古尔班通古特沙漠之间的独特沉积环境中发育形成的。南部天山中高山区风化剥蚀的碎屑物质经由发源于山区的河流侵蚀搬运后堆积于北部河流下游冲积平原曲流带,发育冲积-湖积-风积地层序列。在盆地冲积扇缘地带冲积-湖积层厚度较大,而向盆地中心、沙漠边缘及干流两侧逐渐变薄

(图 7)。

天山北麓河流下游大尺度的钻孔资料对比显示,由天山向盆地中心沉积物颗粒逐渐细化,由砂、砾石沉积逐渐转变为亚砂土、亚黏土沉积^[33]。如玛纳斯河下游的 MGH、MSW、MNS 剖面皆由晚全新世以来的极细砂、粉砂交互沉积组成^[8-9, 21];位于克拉玛依市兴农湖附近的 XNH 剖面呈灰绿色黏土和灰白色粉砂互层的岩性特征^[22];采集于三屯河下游 5.4 m 深、以厚层冲积黏土和粉砂为主的 HG 地层剖面也佐证了这一点^[21]。而位于塔西河下游的 MG、XM 剖面以及乌鲁木齐河下游尾间湖的东道海子(DDH)剖面,地处古尔班通古特沙漠丘间地,夹有厚度不一的风沙沉积^[15]。

北天山河流下游冲积平原上发育的众多曲流河坡降低、曲率高,在河流侧向加积作用下易形成边滩、天然堤及河漫亚相等沉积类型^[26, 28]。在 3 ~ 5 m 深度内,地层剖面上段普遍发育厚度不均的河

漫滩沉积,夹多个薄层的漫洪沉积、厚层河漫滩沉积层构成二元沉积旋回,这些沉积物具有类似的粒度和石英砂颗粒特征(图 4、图 5、图 6)。此外,曲流带因处扇缘末端位置,流速和水深骤减,因此这种漫洪沉积应是洪积扇发育时直接向泛滥平原填充的席状砂质沉积^[34-35],例如 MG 剖面上段厚层黏土质粉砂层。而 MG 剖面交替发育的河漫滩沉积和静水沉积,指示河流尾间水量的极不稳定,随着河流水量持续减小、流速减缓,转为缓流搬运悬移质泥沙堆积,易成静水沉积。

本文所研究地层剖面下段,多见厚度较大的河床沉积、静水沉积及河漫湖泊沉积等多元类型的沉积相变化,应指示一个相对湿润、下游河湖沉积广泛发育的时期(图 3、图 7)。例如 NFC、XNH 等剖面下段的河漫湖泊微相和湖相沉积,应是河流水动力较强时漫溢河道两侧低地、长期积水形成的河漫沼泽,水量持续增大时,沼泽连片、汇成河漫湖泊。河流水

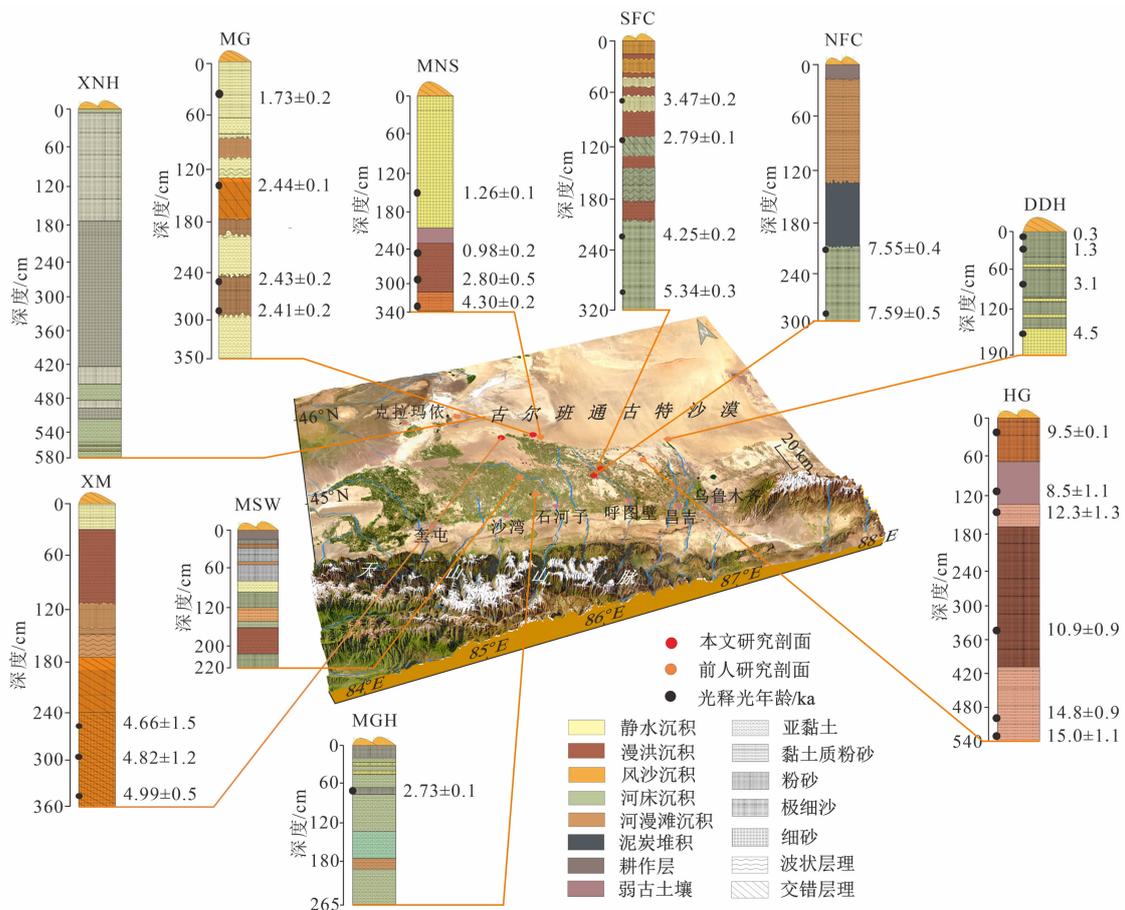


图 7 天山北麓地貌及河流下游冲积平原代表地层记录

Fig. 7 Representative stratigraphic records of geomorphology and alluvial plain at the northern piedmont of the Tianshan Mountains in China

流稳定时,发育河床沉积,譬如 XM、SFC、XNH、MGH 及 MSW 剖面中的下段河湖相沉积(图 7),反映相对暖湿气候期天山冰雪融水、山区雨量增多导致河流径流量的增加。而 NFC 剖面中段泥炭层的发育,说明此前环境经历一段较湿润时期后湿度降低,沼泽淤泥滋生水生植物。

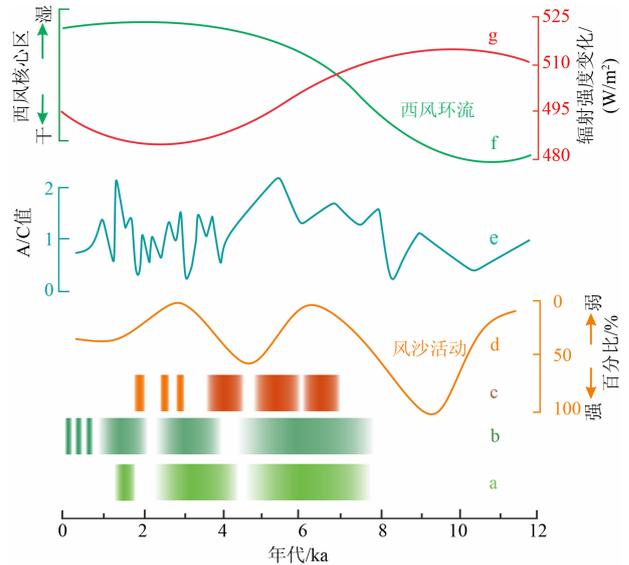
综上所述,天山北麓河流下游冲积平原带沉积物以黏土、粉砂和细砂层为主,在北部的沙漠边缘、河流尾间地层剖面中多见厚层风成砂沉积,且横向分布不延续,自南而北表现出同期异相和同相异期特点,沉积序列随河湖消长与风沙进退呈风水两相的多次旋回交替变化。

3.2 中全新世以来天山北坡河流下游区域气候变化及环境演变

根据以上四个剖面的沉积相和沉积环境特征,在绝对年代标尺上对比前人在毗邻区域风积序列和湖积序列研究结果综合分析(图 8),中全新世以来研究区沉积环境和气候演变历史总体上可划分为以下三个阶段:

(1) 7.59 ~ 6 ka,全新世大暖期(HO),天山北麓河流下游冲积平原发育河漫湖泊沉积、河漫滩沉积及泥炭沼泽,反映沉积环境较为湿润。此时,石河子北郊蘑菇湖剖面 6.2 ka 之前的黏土矿物中高岭石含量较高,伊利石和蒙皂石含量相对较低,反映区域温暖湿润的气候环境^[9]。其中,7.5 ~ 6.2 ka,莫索湾沙垄剖面发育有两层砂质古土壤,年代分别为 7.0 ka 和 6.1 ka,砂质古土壤的厚度、颜色和气候代用指标分析结果,皆显示其成壤程度较高,气候较温暖湿润^[36]。玛纳斯湖在约 6.0 ka 前花粉沉积速率持续跃升,藜科数量增加,湖水位达到全新世以来最高状态^[37],说明在北半球较强的夏季太阳辐射控制下,北疆地区进入中全新世后温度总体上升,同时伴随天山冰川融水增加、天山北麓众多河流流量增大,流域湿度大幅增加,在河流下游冲积平原普遍发育河湖相沉积。

(2) 6 ~ 4.25 ka,全新世大暖期(HO)中后期,即进入由暖湿转凉干的过渡期,气温波动式下降。SFC 剖面下段发育河床沉积,说明在强烈的蒸发和渗透条件下,呼图壁河河流水量仍能漫溢至此,气候仍具温凉湿润特征。同时,XM 剖面下段发育厚层风沙沉积,这与剖面处于河流尾间、沙漠边缘的位置有关,流域局部风沙活动增强、沙丘前移阻塞河道发



a 为本研究中全新世以来的湿润记录;b 为临近区域中全新世以来的湿润记录^[9-10];c 为莫索湾沙垄剖面发育古土壤序列(深褐色表砂质古土壤,浅褐色表弱古土壤)^[36];d 为古尔班通古特沙漠及其周边区域风沙活动强度^[16];e 为玛纳斯湖钻孔孢粉的藜蒿比 A/C 值^[37];f 为西风环流强度变化^[38];g 为 45°N 夏季太阳辐射强度变化^[39-40]。

图 8 天山北麓河流下游冲积平原及毗邻区域不同载体记录的气候变化过程

Fig. 8 Climate change processes recorded by different carriers in the alluvial plain and its adjacent areas in the lower reaches of the Tianshan Mountains

育^[16],反映了一次短暂的、相对冷干的气候波动。在 6.2 ~ 3.6 ka 期间,北郊蘑菇湖剖面黏土矿物中的高岭石含量相对较低、伊利石和蒙皂石的含量相对升高^[9];莫索湾剖面也在 6.1 ~ 4.8 ka 期间古土壤沉积间断,发育薄层风成砂沉积^[36];玛纳斯湖藜科数量增加,A/C 值降低,形成了荒漠植被环境^[37]。

(3) 4.25 ka ~ 至今,研究区主要发育河漫滩、河漫湖沼和风成沙交互沉积,反映了下游河流改道与水系变迁、“洪泛事件”和风沙活动之间的反复转换,可能是受控于夏季太阳辐射的减弱和西风环流的增强,在晚全新世沉积环境呈现河湖消长与风沙进退之间的交替变化。同期,沙漠南部的沙垄剖面在 4.85 ~ 2.34 ka 期间交替发育 3 层弱古土壤和 2 层古风成沙层^[36];玛纳斯湖水位在 4 ~ 2.5 ka 期间出现高湖面,但花粉沉积速率不稳定、出现多个谷峰旋回^[37, 41];乌鲁木齐河下游尾间湖泊东道海子剖面的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 等元素比值记录区域 4.07 ~

2.57 ka期间气候经历“温干-冷湿”交替演变^[15];玛纳斯河中游洪积扇台地 DFS 剖面在约 4.12 ka 发生厚层黄土堆积^[42]。近 300 年以来,区域干湿波动变化更加剧烈^[13, 43-45],但不同时期气候变化的驱动因素有所差异。18 世纪中期至 19 世纪中叶,下游地区的温度和降水变化是控制河道变迁的主导因素;而 20 世纪中期后,水利工程技术、农业耕地开发等人类活动成为河道发展演变的主要影响因素^[43, 46]。

4 结论

通过对天山北麓河流下游冲积平原地区四个冲积-湖积-风积交互地层剖面进行光释光测年建立年代标尺,综合沉积相和各环境代用指标分析,本研究得到以下初步结论:

(1) 沉积相和沉积物粒度特征反映天山北麓河流下游冲积平原地区沉积主要以黏土、粉砂和极细砂为主,靠近北部沙漠边缘则以极细砂、中细砂居多。其中,河流沉积和风沙沉积分选最好,颗粒最粗;河漫滩沉积分选最差,多种组分兼有,与漫洪沉积和弱发育古土壤具相似的粒度变化特征,但粒径较漫洪相粗。

(2) 石英颗粒表面残留早期冰川作用、后期流水作用和风力作用多次改造的痕迹特征,表明冲积平原区的河湖相沉积物可能来源于北天山风化剥蚀、冰川侵蚀的碎屑物质,并在后期河流搬运过程中受到流水作用改造,沉积在河流尾间区域、沙漠边缘,经由风力分选成为古尔班通古特沙漠的重要物源之一。

(3) 天山北麓河流下游冲积平原浅层沉积序列以河流沉积为主,发育湖沼沉积、泥质漫洪沉积和风沙沉积。在空间变化上,从平原南部到北部沙漠边缘,冲积层和湖沼相沉积厚度减薄、风积层厚度增加;自下而上,沉积序列中的冲积-湖积层的厚度变薄、纵向上沉积相更替变化加快、沉积间断增多,横向上沉积相变化频率有增加趋势。

(4) 中全新世以来,区域沉积和气候环境经历了由大暖期相对暖湿气候向全新世晚期的相对温干-凉湿气候的波动转变过程。其中,7.59 ~ 6 ka, 河流活动频繁,区域广泛发育的河湖相沉积,为暖湿

气候期;6 ~ 4.25 ka 区域经历了由河流环境向风沙环境的转变过程,湿度明显降低,为短暂的气候干燥期;4.25 ka 至今,地层多发育薄层冲洪积和风成沙交互沉积,区域沉积环境和干湿交替变化频率加快,气候呈周期性地“温湿-凉干”波动变化。

参考文献 (References)

- [1] NI Hantao, WANG Yong, TIAN Fei, et al. Holocene climate evolution: Information from the Lacustrine-Fluvial sediment in north China [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2022, **68**(1): 71 - 89. DOI: 10.1007/s10933-021-00190-0
- [2] CARACCILO L, CHEW D, ANDÒ S. Sediment generation and sediment routing systems [J]. *Earth Science Reviews*, 2020, **207**: 103221. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103221
- [3] MARRIOTT S B, HILLIER R D. Fluvial style in the Lower Old Red Sandstone: Examples from southwest Wales, UK [J]. *Proceedings of the Geologists' Association*, 2014, **125**(5-6): 534 - 547. DOI: 10.1016/j.pgeola.2014.04.002
- [4] ALLEN P A. Sediment routing systems: The fate of sediment from source to sink [M]. Britain: Cambridge University Press, 2017: 108 - 130. DOI: 10.1017/9781316135754
- [5] 姜高磊, 聂振龙, 刘哲, 等. 巴丹吉林沙漠南缘冲洪积物的光释光年代及其水文学意义 [J]. *地球科学*, 2021, **46**(5): 1829 - 1839. [JIANG Gaolei, NIE Zhenlong, LIU Zhe, et al. OSL ages and its hydrological implications of alluvial-diluvial deposits from the southern margin of Badain Jaran Desert [J]. *Earth Science*, 2021, **46**(5): 1829 - 1839] DOI: 10.3799/dqkx.2020.148
- [6] 李育, 王岳, 张成琦, 等. 干旱区内陆河流域中游地区全新世沉积相变与环境变化——以石羊河流域为例 [J]. *地理研究*, 2014, **33**(10): 1866 - 1880. [LI Yu, WANG Yue, ZHANG Chengqi, et al. Changes of sedimentary facies and Holocene environments in the middle reaches of inland rivers, arid China: A case study of the Shiyang River [J]. *Geographical Research*, 2014, **33**(10): 1866 - 1880] DOI: 10.11821/dlyj201410008
- [7] 杨小平, 梁鹏, 张德国, 等. 中国东部沙漠/沙地全新世地层序列及其古环境 [J]. *中国科学:地球科学*, 2019, **49**(8): 1293 - 1307. [YANG Xiaoping, LIANG Peng, ZHANG Deguo, et al. Holocene aeolian stratigraphic sequences in the eastern portion of the desert belt (sand seas and sandy lands) in northern China and their palaeoenvironmental implications [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2019, **49**(8): 1293 - 1307] DOI: 10.1007/s11430-018-9304-y
- [8] 李智佩, 岳乐平, 郭莉, 等. 全新世气候变化与中国北方沙漠化 [J]. *西北地质*, 2007, **40**(3): 1 - 29. [LI Zhipei, YUE Leping, GUO Li, et al. Holocene climate change and desertification in northern China [J]. *Northwestern Geology*, 2007, **40**(3): 1 - 29] DOI: 10.3969/j.issn.1009-6248.2007.03.001

- [9] 史兴民, 李有利, 杨景春. 新疆玛纳斯河蘑菇湖沉积物中粘土矿物及其环境意义[J]. 干旱区地理, 2007, **30**(1): 84-88. [SHI Xingmin, LI Youli, YANG Jingchun. Environmental significance and clay mineral characteristics of Mogu lake sediment of Manas River [J]. Arid Land Geography, 2007, **30**(1): 84-88] DOI: 10.3321/j.issn:1000-6060.2007.01.014
- [10] 史兴民, 李有利, 杨景春, 等. 新疆玛纳斯河石河子北郊剖面的沉积环境研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, **21**(3): 99-104. [SHI Xingmin, LI Youli, YANG Jingchun, et al. Study on sediment environment of Zhuanchang section near Manas River [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, **21**(3): 99-104] DOI: 10.3969/j.issn.1003-7578.2007.03.021
- [11] 黄强, 周兴佳. 晚更新世晚期以来古尔班通古特沙漠南部的气候环境演化[J]. 干旱区地理, 2000, **23**(1): 55-60. [HUANG Qiang, ZHOU Xingjia. The climate-environment changes in the south of Gurbantunggut desert since 80ka BP [J]. Arid Land Geography, 2000, **23**(1): 55-60] DOI: 10.3321/j.issn:1000-6060.2000.01.010
- [12] 李树峰, 阎顺, 孔昭宸, 等. 乌鲁木齐东道海子剖面的硅藻记录与环境演变[J]. 干旱区地理, 2005, **28**(1): 81-87. [LI Shufeng, YAN Shun, KONG Zhaochen, et al. Diatom records and environmental changes of the Dongdaohaizi area in Urumqi, Xinjiang [J]. Arid Land Geography, 2005, **28**(1): 81-87] DOI: 10.3321/j.issn:1000-6060.2005.01.015
- [13] 阎顺, 李树峰, 孔昭宸, 等. 乌鲁木齐东道海子剖面的孢粉分析及其反映的环境变化[J]. 第四纪研究, 2004, **24**(4): 463-468. [YAN Shun, LI Shufeng, KONG Zhaochen, et al. The pollen analyses and environment changes of the Dongdaohaizi area in Urumqi, Xinjiang [J]. Quaternary Sciences, 2004, **24**(4): 463-468] DOI: 10.3321/j.issn:1001-7410.2004.04.013
- [14] 马妮娜, 穆桂金, 阎顺. 中全新世以来乌鲁木齐东道海子 B 剖面沉积物源探讨与分析[J]. 干旱区地理, 2005, **28**(2): 188-193. [MA Nina, MU Guijin, YAN Shun. Grain-size analyses and detrital sediment discuss of the B profile of Dongdaohaizi in Urumqi since the Middle Holocene [J]. Arid Land Geography, 2005, **28**(2): 188-193] DOI: 10.3321/j.issn:1000-6060.2005.02.010
- [15] 何冬. 乌鲁木齐东道海子沉积记录的中全新世以来气候变化研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2016: 47-53. [HE Dong. Study on climate change since Middle Holocene recorded by Haizi sediments in Dongdao, Urumqi [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2016: 47-53]
- [16] 徐宇杰, 刘冰, 孙爱军, 等. 古尔班通古特沙漠及周边区域全新世环境演变研究进展[J]. 干旱区地理, 2023, **46**(4): 550-562. [XU Yujie, LIU Bing, SUN Aijun, et al. Research progress on Holocene environmental evolution of the Gurbantunggut Desert and its surrounding areas [J]. Arid Land Geography, 2023, **46**(4): 550-562] DOI: 10.12118/j.issn.1000-6060.2022.306
- [17] 中国科学院新疆综合考察队. 新疆地貌[M]. 北京: 科学出版社, 1978: 227-231. [Xinjiang comprehensive investigation team of Chinese Academy of Sciences. Xinjiang landform [M]. Beijing: Science Press, 1978: 227-231]
- [18] 崔卫国, 穆桂金, 文倩, 等. 玛纳斯河山麓冲积扇演化及其对区域构造活动的响应[J]. 水土保持研究, 2007, **14**(1): 161-163. [CUI Weiguo, MU Guijin, WEN Qian, et al. Evolution of alluvial fans and reaction to the regional tectonic activity at rage-front of Manas River valley [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, **14**(1): 161-163] DOI: 10.3969/j.issn.1005-3409.2007.01.051
- [19] LU Honghua, WU Dengyun, ZHANG Huiping, et al. Spatial patterns of Late Quaternary river incision along the northern Tian Shan foreland [J]. Geomorphology, 2020, **357**: 107100. DOI: 10.1016/j.geomorph.2020.107100
- [20] 陈曦, 胡汝骥, 姜逢清, 等. 中国干旱区自然地理[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 8-42. [CHEN Xi, HU Ruji, JIANG Fengqing, et al. Physical geography of arid areas in China [M]. Beijing: Science Press, 2010: 8-42]
- [21] ZONG Haoran, FU Xiao, LI Zaijun, et al. Multi-method pIRIR dating of sedimentary sequences at the southern edge of the Gurbantunggut Desert, NW China and its palaeoenvironmental implications [J]. Quaternary Geochronology, 2022, **70**: 101300. DOI: 10.1016/j.quageo.2022.101300
- [22] 史兴民, 李有利, 钱蟒. 新疆玛纳斯河农兴湖沉积物特征反映的古环境探讨[J]. 干旱区资源与环境, 2007, **21**(9): 62-67. [SHI Xingmin, LI Youli, QIAN Mang. Analysis on the sedimentary environment of Xingnong Lake section of Manas River [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, **21**(9): 62-67] DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2007.09.007
- [23] MURRAY A S, WINTLE A G. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol [J]. Radiation Measurements, 2000, **32**(1): 57-73. DOI: 10.1016/S1350-4487(99)00253-x
- [24] MURRAY A, ARNOLD L J, BUYLAERT J P, et al. Optically stimulated luminescence dating using quartz [J]. Nature Reviews Methods Primers, 2021, **1**(1): 72. DOI: 10.1038/s43586-021-00068-5
- [25] FOLK R L, WARD W C. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters [J]. Journal of Sedimentary Research, 1957, **27**(1): 3-26. DOI: 10.1306/74D70646-2B21-11D7-8648000102C1865D
- [26] 任明达, 王乃梁. 现代沉积环境概论[M]. 北京: 科学出版社, 1981: 77-103. [REN Mingda, WANG Nailiang. Introduction to modern sedimentary environment [M]. Beijing:

- Science Press, 1981: 77 – 103]
- [27] READING H G. Sedimentary environments and facies [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications Press, 1985: 20 – 79.
- [28] BLAIR T C, MCPHERSON J G. Processes and forms of alluvial fans [M]. Dordrecht: Springer Press, 2009: 413 – 467. DOI: 10.1007/978-1-4020-5719-9_14
- [29] SCHOLLE P A, SPEARING D. Sandstone depositional environments [M]. Oklahoma: The American Association of Petroleum Geologists, 1981: 11 – 138. DOI: 10.1306/M31424
- [30] 谢又予. 中国石英砂表面结构性图谱[M]. 北京: 海洋出版社, 1984: 148 – 176. [XIE Youyu. Atlas of quartz sand surface textural features of China micrographs [M]. Beijing: Ocean Press, 1984: 148 – 176]
- [31] MAHANEY W C, DIRSZOWSKY R W, MILNER M W, et al. Quartz microtextures and microstructures owing to deformation of glaciolacustrine sediments in the northern Venezuelan Andes [J]. Journal of Quaternary Science, 2004, **19**(1): 23 – 33. DOI: 10.1002/jqs.818
- [32] 任明达, 缪昕. 石英砂表面的微结构——一种沉积环境标志[J]. 地质论评, 1984, **30**(1): 36 – 41. [REN Mingda, MIAO Xin. Surface microtextures of quartz sand grains: A guide to sedimentary environments [J]. Geological Review, 1984, **30**(1): 36 – 41] DOI: 10.3321/j.issn:0371-5736.1984.01.005
- [33] 史兴民, 李红帅. 新疆玛纳斯河冲积平原的沉积与演化[J]. 干旱区资源与环境, 2010, **24**(12): 128 – 133. [SHI Xingmin, LI Hongshuai. Sediment and evolution of Manas River pluvial plain in Xinjiang [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, **24**(12): 128 – 133] DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2010.12.012
- [34] 余宽宏, 金振奎, 李桂仔, 等. 天山北缘辫状河型洪积扇沉积特征及其对准噶尔盆地西北缘古代洪积扇油气勘探的指导意义[J]. 高校地质学报, 2015, **21**(2): 288 – 299. [YU Kuanhong, JIN Zhenkui, LI Guizai, et al. Sedimentary characteristics of braided alluvial fan in north Tianshan Mountain and its significance for oil-gas exploration of ancient alluvial fans in northwest Junggar Basin [J]. Geological Journal of China Universities, 2015, **21**(2): 288 – 299] DOI: 10.16108/j.issn1006-7493.2014137
- [35] 武登云, 任治坤, 吕红华, 等. 冲积扇形态与沉积特征及其动力学控制因素: 进展与展望[J]. 地球科学进展, 2020, **35**(4): 389 – 403. [WU Dengyun, REN Zhikun, LYU Honghua, et al. Morphology and dynamics of alluvial fan and its research prospects [J]. Advances in Earth Science, 2020, **35**(4): 389 – 403] DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2020.038
- [36] 陈惠中, 金炯, 董光荣. 全新世古尔班通古特沙漠演化和气候变化[J]. 中国沙漠, 2001, **21**(4): 18 – 24. [CHEN Huizhong, JIN Jiong, DONG Guangrong. Holocene evolution processes of Gurbantunggut Desert and climatic changes [J]. Journal of Desert Research, 2001, **21**(4): 18 – 24] DOI: 10.3321/j.issn:1000-694X.2001.04.004
- [37] 林瑞芬, 卫克勤, 程致远, 等. 新疆玛纳斯湖沉积柱样的古气候古环境研究[J]. 地球化学, 1996, **25**(1): 63 – 72. [LIN Ruifen, WEI Keqin, CHENG Zhiyuan, et al. A palaeoclimatic study on lacustrine cores from Manas Lake, Xinjiang, western China [J]. Geochimica, 1996, **25**(1): 63 – 72] DOI: 10.19700/j.0379-1726.1996.01.007
- [38] CHEN Fahu, JIA Jia, CHEN Jianhui, et al. A persistent Holocene wetting trend in arid central Asia, with wettest conditions in the late Holocene, revealed by multi-proxy analyses of loess-paleosol sequences in Xinjiang, China [J]. Quaternary Science Reviews, 2016, **146**: 134 – 146. DOI: 10.1016/j.quascirev.2016.06.002
- [39] BERGER A, LOUÏRE M F. Insolation values for the climate of the last 10 million years [J]. Quaternary Science Reviews, 1991, **10**(4): 297 – 317. DOI: 10.1016/0277-3791(91)90033-q
- [40] JIA Jia, CHEN Jianhui, WANG Zhiyuan, et al. No evidence for an anti-phased Holocene moisture regime in mountains and basins in Central Asian: Records from Ili loess, Xinjiang [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2021, **572**: 110407. DOI: 10.1016/j.palaeo.2021.110407
- [41] 史兴民, 李有利, 杨景春. 新疆玛纳斯湖变迁的气候和构造分析[J]. 地理科学, 2008, **28**(2): 266 – 271. [SHI Xingmin, LI Youli, YANG Jingchun. Climatic and tectonic analysis of Manas Lake changes [J]. Scientia Geographica Sinica, 2008, **28**(2): 266 – 271] DOI: 10.3969/j.issn.1000-0690.2008.02.024
- [42] 葛本伟, 刘安娜. 天山北麓黄土剖面的光释光测年分析[J]. 干旱区研究, 2016, **33**(4): 869 – 876. [GE Benwei, LIU Anna. Optical dating of aeolian Loess in northern slope of the Tianshan Mountains, China [J]. Arid Zone Research, 2016, **33**(4): 869 – 876] DOI: 10.13866/j.azr.2016.04.25
- [43] 高卫东, 袁玉江, 张瑞波, 等. 树木年轮记录的天山北坡中部过去 338 a 降水变化[J]. 中国沙漠, 2011, **31**(6): 1535 – 1540. [GAO Weidong, YUAN Yujiang, ZHANG Ruibo, et al. The recent 338-year precipitation series reconstructed from tree-ring in northern slope of Tianshan Mountains [J]. Journal of Desert Research, 2011, **31**(6): 1535 – 1540]
- [44] 吴敬禄, 王苏民, 王洪道. 新疆艾比湖全新世以来的环境变迁与古气候[J]. 海洋与湖沼, 1996, **27**(5): 524 – 530. [WU Jinglu, WANG Sumin, WANG Hongdao. Characters of the evolution of climate and environment of Holocene in Aibi Lake basin in Xinjiang [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1996, **27**(5): 524 – 530]
- [45] 陈峰, 袁玉江, 魏文寿, 等. 呼图壁河流域过去 313 a 春季平均最高气温序列及其特征分析[J]. 中国沙漠, 2009, **29**(1): 162 – 167. [CHEN Feng, YUAN Yujiang, WEI Wenshou, et al. Spring mean maximum temperature series and its variation

- properties in Hutubi river basin during the last 313 years [J].
Journal of Desert Research, 2009, 29(1): 162 – 167]
- [46] 张莉, 鲁思敏. 近 250 年新疆呼图壁河中下游河道演变及其影响因素分析[J]. 西域研究, 2020(3): 80 – 93. [ZHANG Li,

LU Simin. The evolution of the middle and lower reaches of Hutobi River and its influencing factors over the past 250 years [J]. The Western Regions Studies, 2020(3): 80 – 93]DOI: 10.16363/j.cnki.xyyj.2020.03.009

Environmental Evolution of Middle-Late Holocene Verified by Sedimentary Evidences in the Alluvial Plain in the Northern Foothills of the Tianshan Mountains, China

TAN Dianjia^a, MA Yunqiang^a, LI Zhizhong^{a, b*}, JIN Jianhui^{a, b}, ZOU Xiaojun^a

(*a. College of Geographical Sciences; b. Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-geographical Process, Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China*)

Abstract: The sedimentary environment of the confluence zone between the alluvial plain and the Gurbantungut Desert at the northern foot of the Tianshan Mountains is unique and sensitive to global climate change. Due to the complexity of factors such as the uncertainty of age correction, the multi-solution of proxy indicators, and the topographical and geomorphological pattern, there were different understandings of the evolution process of the sedimentary environment and the climate evolution model during the Holocene period in this region. It is quite necessary for science to reconstruct the sedimentary evolution history of the middle-late Holocene in this area and its response to climate change, which would be helpful to deepen the understanding of the geo-environment of the northern Tianshan Mountains.

In this study, four typical alluvial-lacustrine-eolian stratigraphic profiles in the alluvial plain formed by rivers in the northern foothills of the Tianshan Mountains were examined by optically stimulated luminescence (OSL) dating for determination of their absolute age of strata; then the evolution process and driving factors of these sedimentary sequences in the profiles were concluded after comprehensively analyzing their sedimentary structure characteristics, sediment grain size parameters, and quartz sand surface microstructure characteristics.

It has the following findings: (1) The examined sedimentary profiles were mainly composed of fluvial and lacustrine deposits with high content of clay, silt, and very fine sand. Near the edge of the northern desert, the aeolian sand layer was dominated by very fine sand and fine sand increased significantly, forming a sedimentary sequence of alluvial facies, lake-marsh facies, and wind-sand facies alternately overlapping, and its sedimentary facies combination had obvious spatial and temporal variation characteristics. (2) Traces of glaciers, running water, wind, and other external forces could be identified on the surface of sediment quartz particles, indicating that the sediments downstream were mainly derived from the debris transported and eroded by glaciers in mountainous areas, and then became a general source of the Gurbantungut Desert after sorted by running water and wind. (3) From 7.59 ka to 6.0 ka, it had been a relatively warm and wet climate period with frequent fluvial activities, and extensive fluvial-lacustrine sediments to be formed; in the period of 6.0 ka ~ 4.25 ka, wind-sand activities occurred in many places, accompanied by a dry climate for a short time with decreased humidity; since 4.25 ka, alluvial, lacustrine and eolian sand have been deposited alternately, and the climate fluctuates

periodically from dry-warm to wet-cold.

The sedimentary sequences at all four profiles in this study comprehensively reveal that the evolution of the sedimentary environment since the Middle Holocene has not only the common characteristics of the influence of global climate change but also the regional characteristics of large geomorphology control in the piedmont of arid areas. This is of great scientific significance for predicting the future trend of wind and sand activities at the desert edge, rationally managing freshwater resources, and thus building a regional ecological security barrier. This study is also a solid reference for evaluating the ecological security of the northern Tianshan Mountains and the northern desert basin.

Key words: alluvial plain; sedimentary sequence; middle and late Holocene; environmental evolution; the Tianshan Mountains

(责任编辑 钟雨倩)