

文章编号: 1000-0550(2025)03-1037-12

若尔盖盆地玛曲段末次冰期以来的沉积环境和地表过程

白鑫¹, 查小春¹, 黄春长¹, 周亚利¹, 庞奖励¹, 张玉柱², 王娜¹, 韩宜欣¹

1. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119

2. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西北大学城市与环境学院, 西安 710127

摘要 【目的】若尔盖盆地位于气候敏感区域, 地表环境十分复杂, 揭示若尔盖盆地末次冰期以来地表过程对环境变化的响应规律, 以及青藏高原环境变化与地表过程对全球变化的响应具有重要意义。【方法】通过广泛考察, 在若尔盖盆地玛曲河段的古冰水—洪积扇前缘高台地上, 发现一组沉积序列完整的地层剖面, 并进行系统采样。基于粒度特征分析以及光释光测年, 研究了若尔盖盆地末次冰期以来的沉积环境和地表过程变化。【结果】14.5 ka之前的末次冰期, 出自西倾山东端哇日河的冰水—山洪过程活跃, 在山麓快速堆积, 形成了厚层的古冰水—洪积扇砂砾石层; 14.5~11.7 ka的Bølling~Allerød暖期, 气候温暖湿润, 古冰水—洪积扇前缘的浅洼地形成的淤泥质沼泽环境, 发育了灰绿色砂质粉砂沉积物; 但在Younger Dryas时期气候恶化, 地表冻融作用使灰绿色泥沼土层上部发生了褶皱变形; 11.7~8.5 ka的全新世早期, 气候相对冷干, 风沙活动盛行, 在强劲高原面风动力作用下, 浅洼地堆积粗粉砂, 发育了风沙与泥沼土互层; 8.5~3.1 ka气候温暖湿润期, 成壤作用强烈, 沉积物中黏土含量明显增加并发育为古土壤; 3.1 ka以来的全新世晚期, 气候相对干旱, 风沙活动盛行, 沙尘暴堆积物在全新世晚期的后期, 因温度和湿度回升而被改造成为亚高山草甸黑土。【结论】末次冰期以来若尔盖盆地的沉积环境和地表过程响应了全球环境变化演变规律, 是揭示区域环境演化的重要信息载体。

关键词 若尔盖盆地; 玛曲段; 黄河; 末次冰期; 地表过程; 环境变化

第一作者简介 白鑫, 女, 1990年出生, 博士研究生, 资源开发与环境演变, E-mail: baixinz@126.com

通信作者 查小春, 男, 教授, E-mail: zhaxch@snnu.edu.cn

中图分类号 P532 文献标志码 A

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2023.110

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2023.110

0 引言

沉积地层作为地球表层系统与气候系统相互作用的产物, 是揭示区域地表过程、环境演化的重要信息载体^[1]。位于中纬度地区的青藏高原, 因其特殊的地理位置和下垫面性质形成了独特的环流系统, 对北半球的气候产生了极大的影响^[2]。地处青藏高原东缘的若尔盖盆地, 是季风环流(东亚季风、西风带)的交互地带, 对气候变化的响应极为敏感^[3-4]。第四纪初期, 若尔盖盆地曾发育了面积达10 000 km²的古湖^[5], 但在更新世晚期, 古湖泊的消亡以及黄河水系

的贯通, 成为青藏高原东部黄河水系格局形成与发展演变过程当中具有标志性的地貌与水文事件, 改变了整个黄河流域水文地貌格局和环境变化过程^[6]。一些学者通过钻孔岩心、泥炭沼泽、动物化石、植物孢粉、河流阶地沉积序列等材料研究了若尔盖古湖消亡以来的环境变化^[7-10]。综合来看, 围绕若尔盖古湖消亡及黄河贯穿古湖时间、机制的研究较多, 而通过地层序列来揭示古湖消亡以来的地表过程对第四纪气候演化的响应关系研究相对缺乏^[9]。为此, 通过对若尔盖盆地实地考察, 在黄河流出若尔盖盆地瓶颈河段的玛曲老桥北向东350 m处的高台地陡坎上,

收稿日期: 2023-06-28; 修回日期: 2023-11-07; 录用日期: 2023-11-23; 网络出版日期: 2023-11-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971116, 42271046, 42277449); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2020TS102) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41971116, 42271046, 42277449; Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. 2020TS102]

发现一处沉积序列完整、层位清晰的剖面。通过对地层沉积物粒度特征分析和光释光测年,研究了若尔盖盆地末次冰期以来的沉积环境和地表过程演化。该研究成果对于揭示若尔盖盆地末次冰期以来地表过程对环境变化的响应规律,以及青藏高原环境变化与地表过程对全球变化的响应具有重要意义。

1 研究区概况

地处青藏高原东缘的若尔盖盆地,是一个四面环山的断陷盆地,西起阿尼玛卿山、北临西倾山、东达岷山、南抵邛崃山^[10]。主体海拔高程介于3 400~3 450 m^[6](图1)。盆地内地貌以宽谷、缓丘为基本特征,发育低山、丘陵、河湖阶地、月牙形台地、河漫滩、冰川宽谷、湖群洼地、古风成沙丘等地貌类型^[5]。盆地整体地势相对舒缓开阔,河谷切割深,地形高差悬殊,地势险峻。黄河自采日玛乡流入盆地,在盆地中心的唐克镇自东南向西形成“U”型弯道,再由玛曲县流出若尔盖盆地^[11]。

若尔盖盆地属高原寒温带湿润季风气候,年平均气温为1.1℃~1.2℃,多年平均年降水量介于600~650 mm,主要集中在5—7月^[12]。由于全年气温较低,使得该区域内发育了大面积的沼泽湿地与冰川冻土。区域内全年平均起风日时数200 d^[13],多风沙活动,风向多变,其中以西、西北、东北方向为起风沙的主导风向^[14]。由于近年来气候变暖,在东亚季风、西风带的交互影响下,使得若尔盖盆地的沙漠化面积不断扩大;沙丘在盆地内呈破碎斑块状分布,主要分布在河道、退缩沼泽等区域^[15]。河流阶地、河漫滩、干涸的沼泽区,以及出露的古风沙沉积区成为风沙活动的主要源区^[16]。

黄河右岸的玛曲县城,处于若尔盖盆地与欧拉秀玛—玛曲的断陷宽谷草原接壤位置(图1a)。末次冰期,出自西倾山东端哇日河的冰水—山洪过程非常活跃,在山麓地带快速堆积,于玛曲县城所在位置形成了一处东西长10 km、南北宽5 km的巨大古冰水—洪积扇^[5]。深厚的古冰水—洪积扇砂砾石层,迫使黄河河槽向南侧移到阿米欧拉岩丘山麓,然后向西流出盆地。通过实地调查,发现若尔盖古湖消亡后,黄河在该河段切割古湖底,分别形成了T₁、T₂两级阶地和高低河漫滩。T₁阶地即玛曲水文站所在的台地,高出黄河平水位8~10 m,形成于全新世中期^[10,12,17];T₂阶地高出黄河平水位15~16 m,形成于末

次冰期^[6,18];而形成的高低河漫滩,分别高出黄河平水位3~5 m和1~3 m。

2 剖面选择

位于古冰水—洪积扇前沿的玛曲县黄河老桥北端水文站北侧的高台地(图1b,c),因道路扩展施工,而开挖暴露出一组沉积序列完整的地层剖面(即LQB剖面,图2)。将LQB剖面表层风化的沉积物进行清理后,野外详细观察其质地、颜色、结构、构造等特征,将LQB剖面从上向下划分出4个不同的地层单元,并在关键层位采集了5个释光样品。由于每一地层的质地和构造特征比较均一,因此分别在每一层的上、中、下典型部位各采集1个沉积样品,充分混合后,采用四分法获得了代表性沉积样品,最后共采集4个沉积样品。LQB剖面各层位的地层特征和释光测年样品采集描述如下。

(1) 现代草甸黑土层MS(LQB-1):0~50 cm,灰棕色(7.5YR5/2),湿润时为黑棕色(7.5YR2/1),细砂质粉砂质地,团粒构造,疏松多孔,含有密集的植物根系。

(2) 全新世古土壤层S₀(LQB-2):50~100 cm,棕灰色(7.5YR6/1),细砂质粉砂质地,团粒—团块构造,富含有机质,成熟度极高。下部含有锈黄色斑。在90~95 cm采集光释光测年样品OSL-1。

(3) 风沙与泥沼土互层(LQB-3):100~230 cm,淡黄橙色(10YR8/2)细砂质风成沙,与浊黄橙色(10YR7/3)粉砂质泥沼土互层,疏松易坍塌,有锈黄色斑。其中,泥沼土含有萝卜螺壳,反映出冰水洪积扇前沿的洼地上,曾经有淤泥质沼泽存在。风沙层与泥沼土层的厚度不均,风沙层厚度在2~5 mm之间,而泥沼土层厚度3~8 cm之间。在该层位顶部110~115 cm采集光释光测年样品OSL-2;在底部225~230 cm采集光释光测年样品OSL-3。

(4) 浅洼地灰绿色泥沼土层(LQB-4):230~400 cm,橄榄灰色(10Y6/2),粉砂与细砂质粉砂,水平层理,为古冰水—洪积扇前沿浅洼地淤泥质沼泽沉积物,其顶部有冻融褶皱现象。在该层位顶部230~235 cm采集光释光测年样品OSL-4;在底部390~395 cm采集光释光测年样品OSL-5。

(5) 古冰水—洪积扇砂砾石层:400 cm以下未见底,松散,大小混杂,分选较差,磨圆度为1级,碎屑颗粒呈次棱角状。

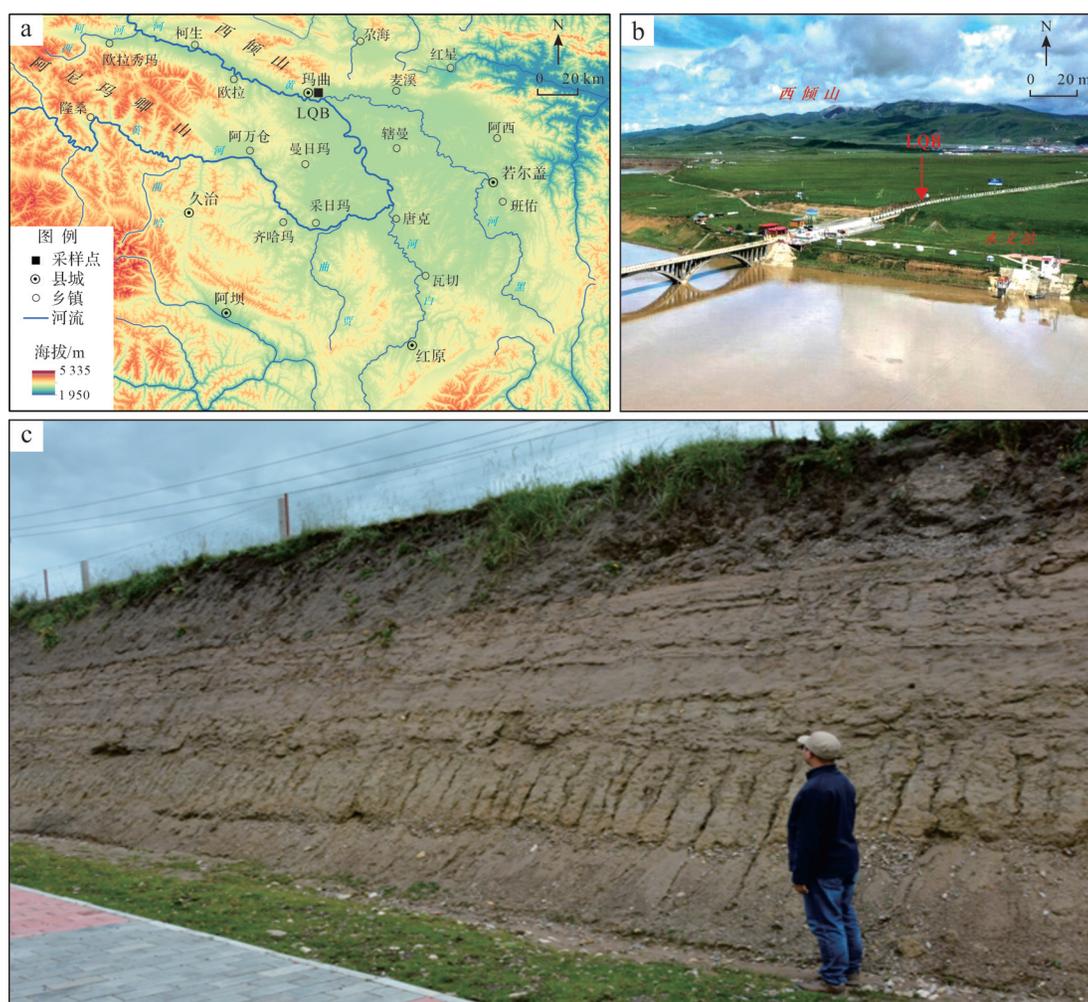


图1 (a)若尔盖盆地水系及研究地点位置;(b)玛曲老桥北研究地景观照片;(c)老桥北地层剖面照片
Fig.1 (a) Map showing the river system and study location in the Zoige Basin; (b) photo of the landscape at the study site; (c) the Laoqiaobei (LQB) sediment profile

3 研究方法

3.1 释光测年方法

野外垂直剖面切除30 cm厚的风化沉积物后,用长25 cm直径6 cm不锈钢钢管打入剖面层位,取出OSL样品后,马上用锡箔纸、黑色塑料袋等避光材料密封钢管两端,避免曝光和水分散失。在实验室内取钢管两端3 cm的样品,用于U、Th、K和含水量测试。剩余中间未曝光样品,放置于1 000 mL的烧杯中,分别加入10%的盐酸和30%的过氧化氢,去除碳酸盐和有机质,然后筛选出90~125 μm 粒径组的样品,用40%的氢氟酸(HF)刻蚀去除长石矿物和石英颗粒表面受 α 辐射影响的部分,并用10%的盐酸去除样品中的氟化物,最后用红外释光(IRSL)检测石英的提纯度^[19]。

样品的等效剂量De值采用单片再生剂量法(single aliquot regenerative dose protocol, SAR)^[20],在陕西师范大学TL/OSL释光断代实验室利用Riso-TL/OSL DA-20型全自动释光仪测定。考虑到风成沉积及水成沉积的石英矿物在最后一次被埋藏前晒退情况存在差异,为确保得到的年龄真实可靠,对测得的等效剂量De值做了晒退检验,分离出样品中的快速、中速、慢速组分分别进行分析,并利用Galbraith等^[21]提出年龄模型计算最终De值。

样品中的U、Th、K含量在西安地质调查中心测试,所用仪器为美国热电公司生产的iCAP 7400型全谱直读等离子体光谱仪(ICP-OES)和iCAP RQ型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)。对样品环境剂量率产生影响的宇宙射线,是基于样品经纬度、海拔、埋藏深度和样品密度计算获得。含水量则是在实验

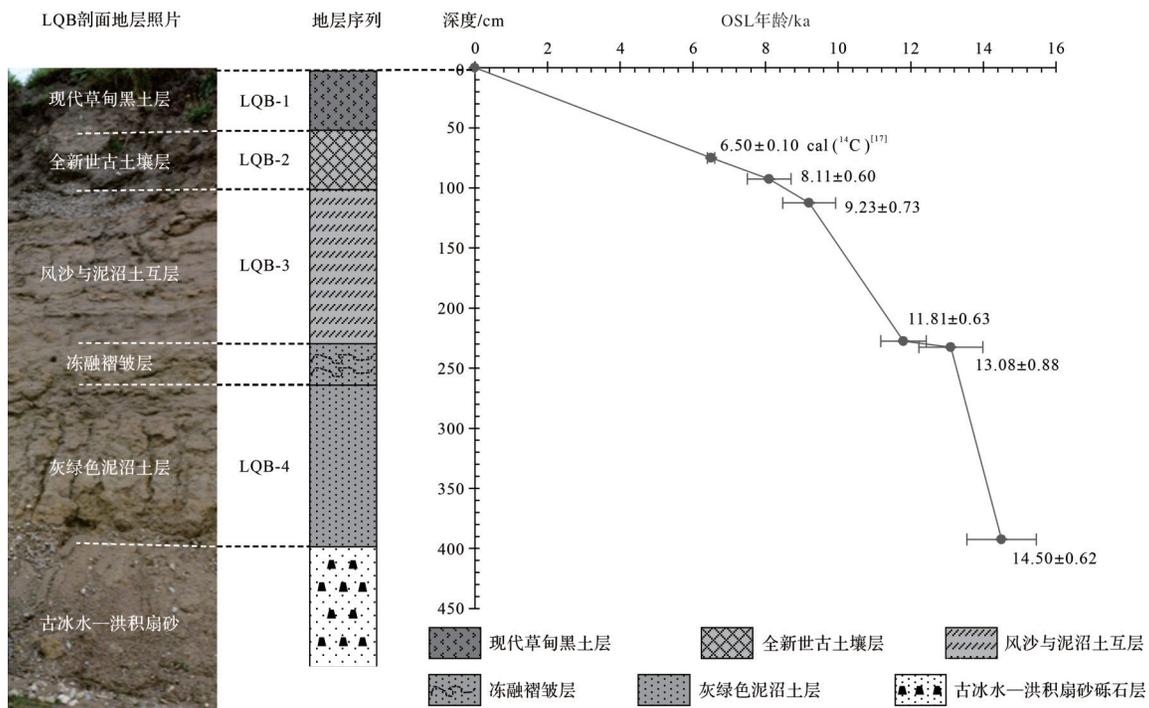


图2 若尔盖盆地LQB剖面沉积地层序列与深度—年代关系图

Fig.2 Stratigraphic sequence and the age-depth relationship of the LQB profile in Zoige Basin

室实测的基础上,结合研究区土壤水分研究结果进行校正获得。样品的环境剂量率由相关公式和转换系数得出,最后基于得出的环境参数和样品的等效剂量De值,计算得出样品的埋藏年龄^[22]。

3.2 粒度测试方法

沉积样品带回实验室进行自然风干后,称取适量风干沉积样品,用10%的过氧化氢和10%的盐酸去除有机质和碳酸盐后,将样品溶液用蒸馏水洗至中性。然后加入六偏磷酸钠(NaPO_3)₆溶液,在超声波振荡仪内充分震荡分散,采用美国Beckman公司生产的LS13320激光粒度仪测试,粒度范围介于0.02~2 000 μm ,遮光度介于8%~12%,相对误差小于4%,每个样品需要连续测试3次,取其平均测试结果进行分析。

4 结果与分析

4.1 测年结果

根据剖面地层深度与OSL测年结果可知(表1、图3),LQB剖面的年龄值从底部到顶部呈现逐层递减的特征,与地层序列对应良好,符合沉积学规律,说明样品的OSL测年结果合理可靠。

LQB剖面底部古冰水—洪积扇砂砾石层之上的

灰绿色泥沼土层LQB-4底界390~395 cm年的OSL龄为 14.50 ± 0.62 ka,玛曲县城西侧黄河右岸的ZHK剖面^[23]风成黄土底部的¹⁴C测年结果为 14.11 ± 0.10 cal. ka(图3),说明LQB剖面底部的古冰水—洪积扇沉积物形成于14.5 ka之前。

灰绿色泥沼土层LQB-4顶界230~235 cm的OSL测年结果为 13.08 ± 0.88 ka,风成沙与泥沼土互层LQB-3底部225~230 cm的OSL年龄为 11.81 ± 0.63 ka,说明LQB-4形成于14.5~11.7 ka之间。其中在该层顶部发现冻融褶皱变形,这一现象在若尔盖盆地西部的WQD剖面^[14]和DEQ-E剖面^[22]均存在,其冻融褶皱发育年代在12.7~11.7 ka之间。结合LQB剖面地层深度与OSL释光年代结果,推测泥沼土层顶部的冻融褶皱变形发生在12.7~11.7 ka期间。

风成沙与泥沼土互层LQB-3底部225~230 cm的OSL年龄为 11.81 ± 0.63 ka,这与潘保田等^[17]在黄河大桥附近盆地面砂砾石层上沼泽相沉积的¹⁴C测年 12.10 ± 0.15 ka结果基本一致。LQB-3顶部110~115 cm的OSL年龄为 9.23 ± 0.73 ka,LQB-2底部90~95 cm的OSL年龄为 8.11 ± 0.60 ka,表明该层形成于11.7~8.5 ka期间。

全新世古土壤层LQB-2底部90~95 cm的OSL年龄为 8.11 ± 0.60 ka,这与DEQ-E剖面中古土壤底部

表1 若尔盖盆地LQB剖面OSL测年结果
Table 1 OSL dating results for the LQB profile in the Zoige Basin

OSL测年样品编号	深度/cm	地层层位	U/ $\times 10^{-6}$	Th/ $\times 10^{-6}$	K/%	含水量/%	环境剂量率/Gy	OSL年龄及误差/ka
OSL-1	90~95	全新世古土壤层底部	2.06 \pm 0.3	10.27 \pm 0.7	1.69 \pm 0.04	20 \pm 3	2.69 \pm 0.08	8.11 \pm 0.60
OSL-2	110~115	风沙与泥沼土层顶部	1.97 \pm 0.3	9.91 \pm 0.6	1.64 \pm 0.04	22 \pm 3	2.58 \pm 0.08	9.23 \pm 0.73
OSL-3	225~230	风沙与泥沼土层底部	1.91 \pm 0.3	11.28 \pm 0.7	1.96 \pm 0.04	22 \pm 3	2.83 \pm 0.09	11.81 \pm 0.63
OSL-4	230~235	灰绿色泥沼土层顶界	2.04 \pm 0.3	10.86 \pm 0.7	1.82 \pm 0.04	23 \pm 3	2.74 \pm 0.08	13.08 \pm 0.88
OSL-5	390~395	灰绿色泥沼土层底界	2.22 \pm 0.3	11.84 \pm 0.7	2.09 \pm 0.04	23 \pm 3	2.99 \pm 0.09	14.50 \pm 0.62

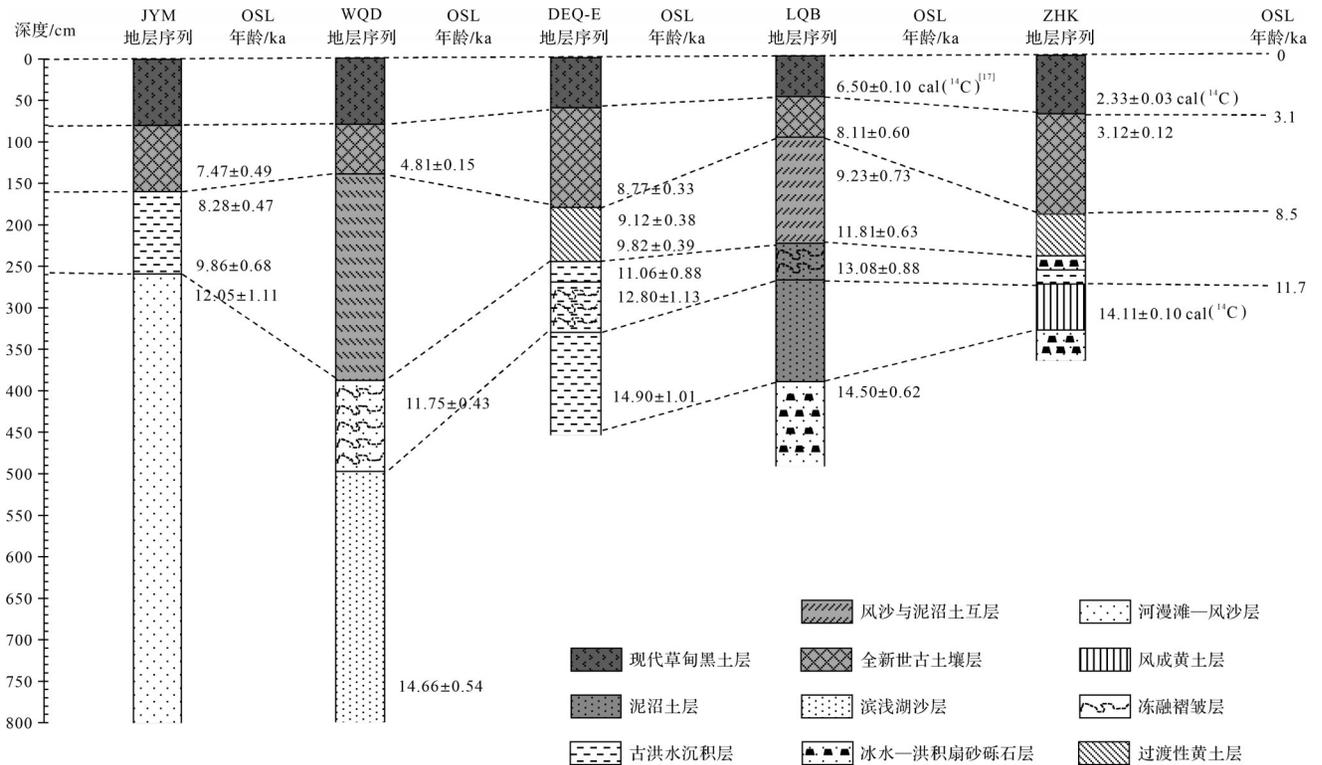


图3 若尔盖盆地JYM剖面^[9]、WQD^[14]剖面、DEQ-E^[22]剖面、ZHK^[23]剖面与LQB剖面地层与年龄对比图

Fig.3 Stratigraphic and chronological comparison of JYM^[9], WQD^[14], DEQ-E^[22], ZHK^[23] and LQB profiles in the Zoige Basin

OSL释光测年结果8.77 \pm 0.33 ka结果一致^[22]。潘保田等^[17]的黄河玛曲T₁阶地古土壤中部¹⁴C测年结果为6.50 \pm 0.10 cal. ka。通过与ZHK剖面^[23]的地层年代框架对比,认为古土壤发育形成于8.5~3.1 ka期间。3.1 ka之后,亚高山草甸黑土形成。

4.2 粒度特征分析

沉积物的粒度组成特征是判断沉积环境、揭示沉积动力的重要指标。根据LQB剖面粒度分布频率曲线(图4)和粒度组成特征(表2)可知,LQB-1与LQB-2的粒度分布频率曲线具有相似的特征,峰态偏正,呈双峰分布,峰度分别为0.90、0.88,为中等尖锐,其主峰的众数粒径落在粗粉砂区间的38~45 μ m;二者的主要粒径组分落在粗粉砂(16~63 μ m)和细粉砂(2~16 μ m)范围内,其中粗粉砂组分占比均大于

38%,细粉砂组分占比均大于30%,且相差较小,说明二者可能受到相同的沉积动力环境影响。同时,LQB-1和LQB-2的粒度分布频率曲线均在细粒端的5~12 μ m存在次峰,二者黏土含量较高,说明二者均受到一定程度的成壤改造作用。其中LQB-1的粒度组分中粗粉砂含量为42.70%明显高于LQB-2(38.07%),且LQB-2的中值粒径(14.49 μ m)和平均粒径(21.53 μ m)均低于LQB-1,表明LQB-2的成壤强度高于LQB-1。表明LQB-2的成壤强度高于LQB-1。结合野外观察发现,LQB-1具有团粒构造,疏松多孔,含有密集植物根系,而LQB-2具有团粒—团块构造,富含有机质,成熟度极高,下部含有锈黄色斑,说明LQB-2为古土壤,其成壤强度高于LQB-1的现代草甸黑土。

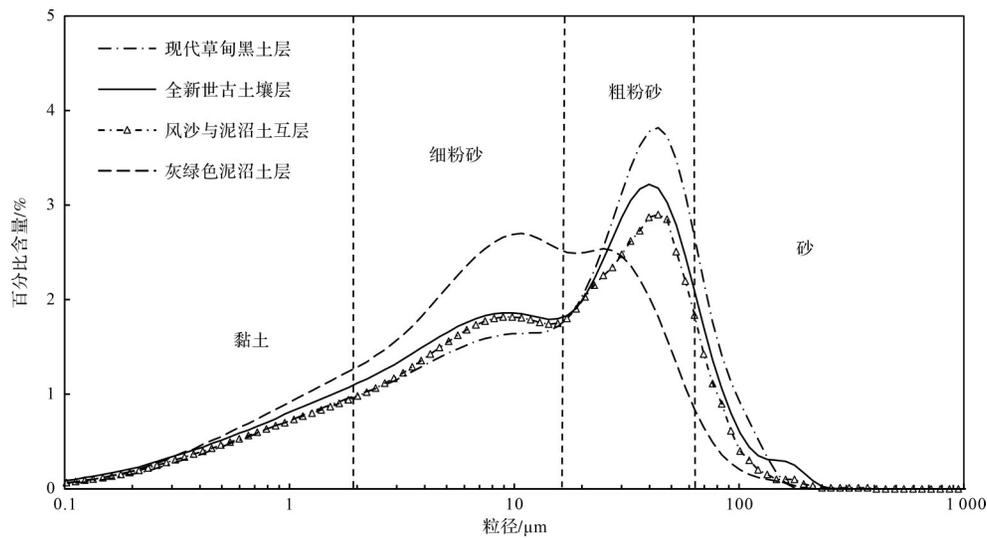


图4 若尔盖盆地LQB剖面粒度分布频率曲线

Fig.4 Grain-size distribution frequency curve of the LQB profile in the Zoige Basin

表2 若尔盖盆地LQB剖面沉积物粒度特征表

Table 2 Characteristic values of grain-size of the LQB profile in the Zoige Basin

样品编号	黏土 <2 μm/%	细粉砂 2~16 μm/%	粗粉砂 16~63 μm/%	砂 >63 μm/%	中值粒径 Md (μm/%)	平均粒径 Mz (μm/%)	峰度 K_g	标准偏差 δ	偏度 Sk
LQB-1	13.91	31.30	42.70	12.09	20.46	24.83	0.90	2.19	0.38
LQB-2	16.31	35.59	38.07	10.03	14.49	21.53	0.88	2.28	0.27
LQB-3	14.36	34.80	35.48	15.37	17.18	27.60	0.87	2.29	0.29
LQB-4	17.56	47.18	31.82	3.44	9.53	13.35	0.95	2.05	0.19

LQB-3的粒度分布频率曲线呈现明显的单峰型(图4),偏度为0.29,呈正偏态。主峰众数粒径落在粗粉砂(45~49 μm)范围内,同时,其粗粉砂含量为35.48%,黏土含量为14.36%,表明沉积物以粗粉砂为主。结合野外观察发现,该层沉积物呈现淡黄橙色(10YR8/2)风成沙与浊黄橙色(10YR/3)粉砂质沼泽土互层,风沙层与泥沼土层的厚度不均,风沙层厚度介于2~5 mm,而泥沼土层介于3~8 cm。其中在泥沼土层发现有萝卜螺壳存在,说明古冰水—洪积扇前沿浅洼地上,有淤泥质沼泽存在,但是沼泽的潜育化过程极弱。

LQB-4的粒度分布频率曲线特征与其他地层的粒度分布频率曲线区别较大(图4、表2),呈双峰马鞍状,主峰众数粒径处于9~16 μm,次峰的众数粒径范围落在细粉砂26~38 μm内,黏土(<2 μm)和细粉砂(2~16 μm)组分含量为整个剖面中最高,分别为17.56%和47.18%,表明该层沉积物的整体粒径偏细,属于细粉砂范畴。另外LQB-4的粒度分布频率

曲线呈现近正态分布,峰型较为平坦,标准偏差为2.05,指示LQB-4分选情况较差(图4),该层沉积物与静水环境有关。根据野外观察,该层沉积物具有水平层理,其下层为大小混杂、磨圆度较差的古冰水—洪积扇层;结合粒度特及其剖面所在的位置,推测LQB-4为古冰水—洪积扇前沿浅洼地较深水位、水动力较弱的沼泽环境下形成的沉积物。

5 讨论

沉积地层作为地球表层系统与气候系统相互作用的产物,是区域环境演化的重要信息载体,被广泛应用于地—气互馈耦合机制的研究中^[1]。若尔盖盆地受多种季风系统的交互影响,自然环境复杂脆弱,对气候变化响应极为敏感。多变的环境作用下形成了多样的地貌类型和沉积地层,成为研究区域环境变化与地表过程对气候变化响应的理想区域^[22]。基于本文研究结果,结合野外宏观特征、测年结果和粒度特征分析,LQB剖面沉积物记录了若尔盖盆地

14.5 ka以来地表过程的变化。

14.5 ka之前的末次冰期,全球气候整体寒冷,格陵兰冰芯及深海氧同位素对这一阶段的寒冷气候都有记录^[24-25];青藏高原地区在末次冰期覆盖大面积冰川,盛冰期阶段位于若尔盖盆地周边的阿尼玛卿山,冰川面积为现代冰川面积的7.5倍,温度较现代低约9℃^[26]。但是,根据Grootes *et al.*^[25]的研究结果,末次冰期特别是晚冰期,气候也存在频繁的冷暖突变,其中格陵兰冰芯揭示的7次剧烈变暖事件与青藏高原的古里雅冰芯记录一一对应^[27]。与此同时,若尔盖盆地RM钻孔的孢粉及RH钻孔的泥炭均捕捉到多次极强变暖事件,其频率和幅度明显大于北大西洋地区^[7-8,28]。在此气候背景下,若尔盖盆地高山冰川融化,山区冰融水引发山洪过程活跃,洪水携带的冰水—洪水沉积物在山麓快速堆积。发生于西倾山东端的哇日河的冰水—山洪过程,使黄河北侧玛曲县城所在地形成了面积约50 km²巨大的古冰水—洪积扇,沉积了厚层砂砾石层,迫使黄河向南侧移到阿米欧拉岩丘山麓,然后向西流出盆地^[5]。根据野外考察,我们发现这一地表过程不仅在黄河玛曲段LQB剖面中有记录,同时玛曲县城西侧黄河北岸的ZHK剖面底部也记录有同时期形成的古冰水—洪积扇地层^[23],表明这一时期冰水—山洪过程规模较大。同时,我们在野外考察中还发现在欧拉乡—柯生乡之间的黄河两岸,分布着高出河水位60~70 m冰水—洪积扇直立陡崖,这说明此时期来自西倾山与阿尼玛卿山的河流不仅来水量大,而且河流侵蚀动能也巨大。

14.5~11.7 ka为末次冰期的晚期,全球气温回暖,冰川融化、海平面回升,太阳辐射增强。Skinner *et al.*^[29]通过对浮游有孔虫和底栖有孔虫的¹⁴C测年发现,南极深层水对流活动在Bølling~Allerød暖期时有所加强;Blanchon *et al.*^[30]研究也记录了太平洋14.2 cal. ka、11.5 cal. ka(Bølling~Allerød暖期)冰融水脉冲事件;而长江入海口也在这一时期先后发育了河口湾和三角洲沉积体系^[31]。与此同时,Bølling~Allerød暖期青藏高原在多地区的湖泊(色林错、苟弄错、青海湖、扎仓茶卡等)出现低于MIS3阶段而高于全新世大暖期的次高湖面^[32-33]。古里雅冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 序列记录了青藏高原从Bølling期到Allerød期约2℃的温度上升^[34]。该时期若尔盖盆地对南亚季风的响应加强,冰川融水和降雨量的增加,导致若尔

盖盆地发生多期古洪水事件^[22,35],也使得湖水位上升,并在古冰水—洪积扇前沿的湖畔草地、洼地形成较深的积水环境,发育了灰绿色淤泥质沼泽沉积物。LQB剖面灰绿色细粉含量高达47.18%,粒度分布频率曲线呈双峰正态分布的特征,表明其为其形成于长期稳定的静水动力环境。

但由于末次冰期晚期Younger Dryas(YD)事件导致气候恶化、温度急剧降低,此时期各地山岳冰川再次扩展,雪线下降^[36-37]。格陵兰GRIP、GISP2冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 值较其他层位出现明显的低值^[25,34],大西洋冷期(Heinrich7~Heinrich1与YD期)时印度季风强度减弱^[38]。此时的青藏高原西北地区班公错介形类种类在11.5~10.0 ka期间急剧减少,甚至消失灭绝,有机碳、氢指数也处于低值^[39]。可可西里地区苟弄措湖泊沉积识别出“仙女木期”(13.0~9.8 ka)的3次气候颤动事件,这3次气候颤动事件均以干冷气候开始,湿冷气候结束^[40]。受YD事件的影响,青藏高原南亚季风减弱,冬季风盛行,处于冰缘环境的若尔盖盆地冻融作用增强,使灰绿色泥沼土层发生褶皱变形。野外观察发现,除LQB剖面以外,冻融褶皱事件在盆地西部的WQD剖面^[14]和DEQ-E剖面^[22]中均有所记录。

11.7 ka之后进入全新世早期,北半球温度有所回升,气候呈现回暖趋势。阿曼南部Qunf洞的石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素研究表明,全新世早期印度季风在中亚地区加强^[41];Leroy *et al.*^[42]对里海GS18钻孔研究表明,全新世早期气候变化呈现温暖但干旱的趋势。与此同时,青藏高原地区在11.0~9.0 ka期间印度季风和西风带交互作用明显,虽然西风带逐渐减弱后退,印度夏季风向北推进,但在全新世初期仍然呈现西风带主导模式^[42-43]。而青藏高原西北部的新疆地区温度和降水变化也表明,新疆地区全新世初期仍然受西风带的控制,并于8.0 ka以前长期处于干旱状态^[43]。因此,在西风带主导的气候模式下,若尔盖盆地高原面风力强劲,地表风沙活动盛行,黄河两岸的河漫滩沙为地表风沙活动提供了丰富的物源。位于古冰水—洪积扇前缘的浅洼地,进入全新世早期温度回升,气候有所改善,在古冰水—洪积扇前沿洼地上形成了沼泽环境,但积水深度较浅。由于此时气候总体干旱,若尔盖盆地高原面风力强劲,地表风沙活动盛行,大量的风沙沉积物被带到沼泽中,呈水平层理沉积,并与泥沼土形成互层。粒度分析结果也

表明这一时期的沉积物为粒径较粗的粗粉砂。盆地西部的ZHK^[23]、DEQ-E^[22]剖面在此时期沉积了约2 m厚的过渡性黄土地层,盆地东部唐克附近的JYM^[9]、WQD^[14]剖面在这一阶段发育了3~5 m厚的河漫滩与风沙互层沉积。

8.5~3.1 ka对应于全新世中期,诸多研究表明,全新世中期气候开始由干冷向温暖湿润转变,如处于中纬度阿拉伯地区的石笋研究表明印度夏季风降水在全新世中期明显加强^[41];南极冰盖西部Divide冰芯的研究结果也显示南极洲夏季温度从全新世早期开始上升并于4.1 ka达到峰值^[44]。青藏高原和黄土高原的炭屑、有机质、孢粉等环境指标均记录了全新世中期(9.0~3.8 ka)冬季风减弱,东亚夏季风明显增强的过程^[45-46]。在此时期,地处青藏高原北缘的猪野泽地区泥炭结果表明,在7.5~5.0 ka白碱湖出现了3次高湖面^[47]。若尔盖盆地RM、RH钻孔岩心中的孢粉记录揭示了全新世中期(8.2~5.8 ka)温暖湿润的特征^[7,45]。通过野外考察也发现若尔盖盆地不同地区(JYM^[9]、WQD^[14]、LQB、DEQ-E^[22]、ZHK^[23])多个剖面同时均发育约50~100 cm的古土壤沉积地层。因此,在温暖湿润的气候驱使下,古冰水—洪积扇前缘的LQB剖面风化成壤作用强烈,古土壤发育。

3.1 ka之后进入全新世晚期,全球气候变得较冷。敦德冰芯、董哥洞石笋、太阳辐射、孢粉等环境指标均反映全新世晚期气候相对较冷^[48-52]。青藏高原西北部多个湖泊介形类化石研究表明该时期气候向干旱化方向发展^[34]。若尔盖盆地的红原泥炭孢粉研究结果显示3.3 ka之后,乔木孢粉百分比含量明显下降^[45]。RM钻孔岩心的孢粉也记录了亚高山常绿针叶林的退缩,植被类型向冷干气候生态适应趋势演替^[52]。此时期青藏高原冬季风逐渐加强,夏季风减弱,降水减少,气候相对干旱,风沙活动盛行,搬运近源沙地的粗粉砂,在古冰水—洪积扇前缘堆积;但在全新世晚期的后期因温度和湿度回升^[6,12,18],生物风化成壤作用增强而被改造成为亚高山草甸黑土。

6 结论

(1) LQB剖面底部的古冰水—洪积扇沉积物形成于14.5 ka之前,其上的灰绿色泥沼土层在14.5~11.7 ka之间现状,其顶部的冻融褶皱变形发生在12.7~11.7 ka;在11.7~8.5 ka期间,风成沙与泥沼土互层形成;8.5~3.1 ka期间古土壤发育,3.1 ka之后,亚

高山草甸黑土发育形成。

(2) LQB剖面底部的泥沼土层沉积属于细粉砂质砂,具水平层理,为古冰水—洪积扇前沿浅洼地静水状态下的沼泽沉积;而覆盖其上的风沙与泥沼土互层,分选一般,以细粉砂为主,并受到单一的沉积动力环境影响,是强劲风力搬运作用形成的风成沙,在浅洼地堆积形成了风沙与泥沼土互层;剖面上部的古土壤与现代草甸土均为细砂质粉砂,但古土壤的中值粒径和平均粒径均低于现代草甸土,说明古土壤的成壤强度高于现代草甸土,指示了古土壤形成时的气候环境比现代温暖湿润。

(3) 14.5 ka之前的末次冰期,出自西倾山东端的哇日河的冰水—山洪过程活跃,在山麓快速堆积,形成了厚层的古冰水—洪积扇砂砾石层;14.5~11.7 ka的Bølling~Allerød暖期,冰川融化,古冰水—洪积扇前沿洼地形成了淤泥质沼泽环境,堆积发育了灰绿色砂质粉砂沉积物;其顶部的冻融褶皱发育于12.7~11.7 ka,对应于末次冰期YD寒冷事件,地表冻融作用使得地表灰绿色泥沼土层上部发生了褶皱变形;11.7~8.5 ka的全新世早期,地表风沙活动盛行,在强劲高原面风动力作用下,大量的风沙沉积物被带到沼泽中,形成了风沙与泥沼土互层;8.5~3.1 ka气候温暖湿润期,温度升高,降雨增加,地表沉积物风化成壤作用强烈,开始发育古土壤;3.1 ka以来,气候相对干旱凉爽,风沙活动再次盛行,但在全新世晚期的后期因温度和湿度回升,粗粉砂因生物风化成壤作用增强而被改造成为亚高山草甸黑土。

参考文献(References)

- [1] Reid W V, Chen D, Goldfarb L, et al. Earth system science for global sustainability: Grand challenges[J]. *Science*, 2010, 330(6006): 916-917.
- [2] Hu H P, Ye B S, Zhou Y H, et al. A land surface model incorporated with soil freeze/thaw and its application in GAME/Tibet[J]. *Science China Earth Sciences*, 2006, 49(12): 1311-1322.
- [3] 姚檀栋,朱立平. 青藏高原环境变化对全球变化的响应及其适应对策[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(5): 459-464. [Yao Tandong, Zhu Liping. The response of environmental changes on Tibetan Plateau to global changes and adaptation strategy[J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(5): 459-464.]
- [4] 陈豆,肖奇立,张玉柱,等. 黄河源玛曲段全新世风成黄土—古土壤序列风化成壤特征以及古气候演变[J]. *地理研究*, 2022, 41(8): 2277-2294. [Chen Dou, Xiao Qili, Zhang Yuzhu, et al. Weathering and pedogenesis of the Holocene aeolian loess-paleosol section and paleoclimate evolution in the Maqu reach in the

- Yellow River source area[J]. *Geographical Research*, 2022, 41(8): 2277-2294.]
- [5] 黄春长. 若尔盖盆地河流古洪水沉积及其对黄河水系演变问题的启示[J]. *地理学报*, 2021, 76(3): 612-625. [Hang Chunchang. Palaeoflood deposits in the Zoige Basin and the enlightening on the formation of the Yellow River drainage system on the Tibetan Plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(3): 612-625.]
- [6] Wang N, Zha X C, Huang C C, et al. Age and causes of the Yellow River dissecting the Zoige Basin in the eastern Tibetan Plateau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 857: 159481.
- [7] 沈才明,唐领余,王苏民,等. 若尔盖盆地RM孔孢粉记录及其年代序列[J]. *科学通报*, 2005, 50(3): 246-254. [Shen Caiming, Tang Lingyu, Wang Sumin, et al. Sporopollen records and time scale for the RM core of the Zoige Basin, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(3): 246-254.]
- [8] Zhang P Z, Wang X B, Chen J F, et al. $\delta^{13}\text{C}$ values and hydrogen index records in sediment organic matter of RH core of Zoige Basin, eastern Qing-Zang (Tibet) Plateau and their environmental significance[J]. *Science China Earth Sciences*, 1995, 38(8): 1015-1024.
- [9] 王兆春,黄春长,周亚利,等. 若尔盖盆地黄河第一湾河岸沉积地层序列及其成因研究[J]. *冰川冻土*, 2022, 44(4): 1175-1187. [Wang Zhaoduo, Huang Chunchang, Zhou Yali, et al. Formation of the sedimentary stratigraphy at the first bend of the Yellow River in the Zoige Basin[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2022, 44(4): 1175-1187.]
- [10] 柴佳楠,查小春,黄春长,等. 若尔盖盆地黄河辖曼段河岸沉积物成因判别[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2021, 57(5): 600-607. [Chai Jia'nan, Zha Xiaochun, Huang Chunchang, et al. Identification of the sediments on the riverbank of the Yellow River in the Xiaman reach of the Zoige Basin[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2021, 57(5): 600-607.]
- [11] Xiao Q L, Zhang Y Z, Wang N L, et al. Paleochannel of the Yellow River within the Zoige Basin and its environmental significance on the NE Tibetan Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 853: 158242.
- [12] 韩宜欣,查小春,黄春长,等. 若尔盖盆地黄河出口段一级阶地沉积序列及其环境变化研究[J]. *地理科学*, 2023, 44(5): 922-931. [Han Yixin, Zha Xiaochun, Huang Chunchang, et al. Sedimentary sequence and environment change of the first terrace in the outlet reach of the Yellow River in the Zoige Basin[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2023, 44(5): 922-931.]
- [13] 胡光印,董治宝,张正德,等. 若尔盖盆地起沙风况与输沙势特征[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(5): 20-24. [Hu Guangyin, Dong Zhibao, Zhang Zhengcai, et al. The regime of sand driving wind and sand drift potential in Zoige Basin[J]. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(5): 20-24.]
- [14] 周家和,周亚利,黄春长,等. 若尔盖黄河唐克段河岸沉积序列测年及地表过程变化[J]. *冰川冻土*, 2022, 44(4): 1188-1202. [Zhou Jiahe, Zhou Yali, Huang Chunchang, et al. Chronology of the sedimentary sequence and the changes in surface processes along the Tangke reach of the Yellow River in the Zoige Basin[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2022, 44(4): 1188-1202.]
- [15] Hu G Y, Yu L P, Dong Z B, et al. Holocene aeolian activity in the Zoige Basin, northeastern Tibetan Plateau, China[J]. *Catena*, 2018, 160: 321-328.
- [16] 王建兵,王素萍,汪治桂. 1971~2010年若尔盖湿地潜在蒸散量及地表湿润度的变化趋势[J]. *地理科学*, 2015, 35(2): 245-250. [Wang Jianbing, Wang Suping, Wang Zhigui. The variety characters of potential evapotranspiration and soil surface humidity index in the Zoige wetland in 1971-2010[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(2): 245-250.]
- [17] 潘保田,李吉均,周尚哲. 黄河最上游发育历史初步研究[C]//中国地理学会地貌与第四纪专业委员会. 地貌过程与环境. 北京:地震出版社, 1993: 17-21. [Pan Baotian, Li Jijun, Zhou Shangzhe. Geomorphological process and environment[C]//Study on the forming history of the upper-most Yellow River. The Geographical Society of China. *Geomorphological Process and Environment*. Beijing: Earthquake Press, 1993: 17-21.]
- [18] 王娜,查小春,黄春长,等. 青藏高原东部黄河切开若尔盖湖盆的沉积证据与年代研究[J]. *地理科学进展*, 2022, 41(8): 453-1466. [Wang Na, Zha Xiaochun, Huang Chunchang, et al. Sedimentary evidence and age of the Zoige Basin dissected by the Yellow River in eastern Tibetan Plateau[J]. *Progress in Geography*, 2022, 41(8): 453-1466.]
- [19] 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.
- [20] Prescott J R, Hutton J T. Cosmic ray contributions to dose rates for luminescence and ESR dating: Large depths and long-term time variations[J]. *Radiation Measurements*, 1994, 23(2/3): 497-500.
- [21] Galbraith R F, Roberts R G, Laslett G M, et al. Optical dating of single and multiple grains of quartz from Jinmium rock shelter, northern Australia: Part I, experimental design and statistical models[J]. *Archaeometry*, 1999, 41(2): 339-364.
- [22] 肖奇立,陈豆,张玉柱,等. 黄河源玛曲段末次冰消期以来古洪水事件与冻融褶皱现象研究[J]. *第四纪研究*, 2022, 42(4): 1010-1026. [Xiao Qili, Chen Dou, Zhang Yuzhu, et al. Palaeoflood events and periglacial involutions during the last deglaciation in the Maqu reach in the Yellow River source area[J]. *Quaternary Sciences*, 2022, 42(4): 1010-1026.]
- [23] Jia Y N, Zhang Y Z, Huang C C, et al. Late Pleistocene-Holocene aeolian loess-paleosol sections in the Yellow River source area on the northeast Tibetan Plateau: Chronostratigraphy, sediment provenance, and implications for paleoclimate reconstruc-

- tion[J]. *Catena*, 2022, 208: 10577.
- [24] 庞奖励, 黄春长. 青藏高原冰芯记录与黄土堆积和深海沉积记录之对比[J]. *高原气象*, 2000, 19(4): 504-511. [Pang Jiangli, Huang Chunchang. Correlation between climate change of ice-core on Qinghai-Xizang Plateau and loess-palaeosol sequence, marine isotope stage[J]. *Plateau Meteorology*, 2000, 19(4): 504-511.]
- [25] Grootes P M, Stuiver M, White J W C, et al. Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores[J]. *Nature*, 1993, 366(6455): 552-554.
- [26] 施雅风, 郑本兴, 姚檀栋. 青藏高原末次冰期最盛时的冰川与环境[J]. *冰川冻土*, 1997, 19(2): 97-113. [Shi Yafeng, Zheng Benxing, Yao Tandong. Glaciers and Environments during the Last Glacial Maximum (LGM) on the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1997, 19(2): 97-113.]
- [27] Yao T D, Thompson L G, Shi Y F, et al. Climate variation since the Last Interglaciation recorded in the Guliya ice core[J]. *Science China Earth Sciences*, 1997, 40(6): 662-668.
- [28] 王富葆, 阎革, 林本海. 若尔盖高原泥炭 $\delta^{13}\text{C}$ 的初步研究[J]. *科学通报*, 1993, 38(1): 65-67. [Wang Baofu, Yan Ge, Lin Benhai. Preliminary study on $\delta^{13}\text{C}$ of peat in Zoige Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(1): 65-67.]
- [29] Skinner L C, Fallon S, Waelbroeck C, et al. Ventilation of the deep southern ocean and deglacial CO_2 rise[J]. *Science*, 2010, 328(5982): 1147-1151.
- [30] Blanchon P, Shaw J. Reef drowning during the last deglaciation: Evidence for catastrophic sea-level rise and ice-sheet collapse[J]. *Geology*, 1995, 23(1): 4-8.
- [31] 张丹, 王张华, 李卫康, 等. 现代长江口的形成及末次冰消期以来沉积环境演变[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(2): 17-25. [Zhang Dan, Wang Zhanghua, Li Weikang, et al. Formation of modern Yangtze estuary and sedimentary environmental evolution since the Last Deglaciation[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(2): 17-25.]
- [32] 沈吉. 末次盛冰期以来中国湖泊时空演变及驱动机制研究综述: 来自湖泊沉积的证据[J]. *科学通报*, 2012, 57(34): 3228-3242. [Shen Ji. Spatiotemporal variations of Chinese lakes and their driving mechanisms since the Last Glacial Maximum: A review and synthesis of lacustrine sediment archives[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(34): 3228-3242.]
- [33] 胡东生, 张华京, 李炳元, 等. 青藏高原腹地湖泊沉积序列与古气候变化[J]. *地质学报*, 2000, 74(4): 364-371. [Hu Dongsheng, Zhang Jinghua, Li Bingyuan, et al. Lacustrine sedimentary sequences and palaeoclimatic change in the hinterland of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2000, 24(4): 364-371.]
- [34] 姚檀栋. 末次冰期青藏高原的气候突变: 古里雅冰芯与格陵兰 GRIP 冰芯对比研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 1999, 29(2): 175-184. [Yao Tandong. Abrupt climatic changes on the Tibetan Plateau during the Last Ice Age: Comparative study of the Guliya ice core with the Greenland GRIP ice core[J]. *Science China Earth Sciences*, 1999, 29(2): 175-184.]
- [35] 陈莹璐, 黄春长, 张玉柱, 等. 黄河源区玛曲段末次冰消期古洪水事件及其光释光测年研究[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(3): 549-562. [Chen Yinglu, Huang Chunchang, Zhang Yuzhu, et al. Study of the sedimentology and OSL dating of the Last Deglaciation paleoflood events along Maqu section in the source regions of the Yellow River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(3): 549-562.]
- [36] 潘保田, 邬光剑. 青藏高原东北部最近两次冰期降温幅度的初步估算[J]. *干旱区地理*, 1997, 20(2): 17-24. [Pan Baotian, Wu Guangjian. Preliminary estimation on the drop range in temperature during the last two glaciations in the northeastern Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Arid Land Geography*, 1997, 20(2): 17-24.]
- [37] 崔之久. 试论多年冻土的冰缘标志及冰川与冰缘作用的关系问题[J]. *冰川冻土*, 1980, 2(2): 1-6. [Cui Zhijiu. On the periglacial markers of permafrost and the relationship between glaciers and periglacial interaction[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1980, 2(2): 1-6.]
- [38] 鹿化煜, 周杰. Heinrich 事件和末次冰期气候的不稳定性[J]. *地球科学进展*, 1996, 11(1): 40-44. [Lu Huayu, Zhou Jie. Heinrich events and instability of palaeoclimate in Last Glacial Period[J]. *Advances in Earth Science*, 1996, 11(1): 40-44.]
- [39] 李元芳, 张青松, 李炳元, 等. 青藏高原西北部 17000 年以来的介形类及环境演变[J]. *地理学报*, 1994, 49(1): 46-54. [Li Yuanfang, Zhang Qingsong, Li Bingyuan, et al. Ostracod fauna and environmental changes during the past 17 000 years in the western Tibet[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1994, 49(1): 46-54.]
- [40] 胡东生, 张华京, 李炳元, 等. 青藏高原腹地湖泊沉积记录的"仙女木期"古气候颤动事件[J]. *地质学报*, 2002, 76(2): 272-278. [Hu Dongsheng, Zhang Huajing, Li Bingyuan, et al. Paleoclimatic oscillation events of the Dryas Period: Evidence from the record of lake records of lake sediments in the interior of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2002, 76(2): 272-278.]
- [41] Fleitmann D, Burns S J, Mudelsee M, et al. Holocene forcing of the Indian monsoon recorded in a stalagmite from southern Oman[J]. *Science*, 2003, 300(5626): 1737-1739.
- [42] Leroy S A G, López-Merino L, Tudryn A, et al. Late Pleistocene and Holocene palaeoenvironments in and around the Middle Caspian Basin as reconstructed from a deep-sea core[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 101: 91-110.
- [43] Ran M, Feng Z D. Holocene moisture variations across China and driving mechanisms: A synthesis of climatic records[J]. *Quaternary International*. 2013, 313-314: 179-193.
- [44] Tyler R. J, Kurt M. Cuffey et al. Seasonal temperatures in west Antarctica during the Holocene[J]. *Nature*. 2023, 613(7943): 292-297.
- [45] 孙广友, 罗新正, Turner R E. 青藏东北部若尔盖高原全新世泥

- 炭沉积年代学研究[J]. 沉积学报, 2001, 19(2): 177-181, 206. [Sun Guangyou, Luo Xinzheng, Turner R E. A study on peat deposition chronology of Holocene of Zorge Plateau in the north-east Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(2): 177-181, 206.]
- [46] 周卫建, 卢雪峰, 武振坤, 等. 若尔盖高原全新世气候变化的泥炭记录与加速器放射性碳测年[J]. 科学通报, 2001, 46(12): 1040-1044. [Zhou Weijian, Lu Xuefeng, Wu Zhenkun, et al. Peat record reflecting Holocene climatic change in the Zoigê Plateau and AMS radiocarbon dating[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(12): 1040-1044.]
- [47] 隆浩, 王乃昂, 李育, 等. 猪野泽记录的季风边缘区全新世中期气候环境演化历史[J]. 第四纪研究, 2007, 27(3): 371-381. [Long Hao, Wang Naiang, Li Yu, et al. Mid-Holocene climate variations from lake records of the east Asian monsoon margin: A multi-proxy and geomorphological study[J]. Quaternary Science, 2007, 27(3): 371-381.]
- [48] Wünnemann B, Yan D D, Andersen N, et al. A 14 ka high-resolution $\delta^{18}\text{O}$ lake record reveals a paradigm shift for the process-based reconstruction of hydroclimate on the northern Tibetan Plateau[J]. Quaternary Science Reviews, 2018, 200: 65-84, doi: 10.1016/j.quascirev. 2018. 09. 040.
- [49] 姚檀栋, Thompson L G. 敦德冰芯记录与过去 5ka 温度变化[J]. 中国科学: 地球科学, 1992, 22(10): 1089-1093. [Yao Tandong, Thompson L G. Doundland ice core records of temperature changes over the past 5ka [J]. Science China Earth Sciences, 1992, 22(10): 1089-1093.]
- [50] 张美良, 袁道先, 林玉石, 等. 贵州荔波董哥洞 3 号石笋的同位素年龄及古气候信息[J]. 沉积学报, 2001, 19(3): 425-432. [Zhang Meiliang Yuan Daoxian, Lin Yushi, et al. Isotopic ages and paleoclimatic implications of No. 1 stalagmite from Dongge Cave in Libo[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(3): 425-432.]
- [51] Laskar J, Fienga A, Gastineau M, et al. La2010: A new orbital solution for the long-term motion of the Earth[J]. Astronomy & Astrophysics, 2011, 532: A89, doi: 10.1051/0004-6361/201116836.
- [52] 刘光, 沈永平, 张平中, 等. 青藏高原若尔盖地区 RH 孔 800~150 ka. B. P. 的孢粉记录及古气候意义[J]. 沉积学报, 1994, 12(4): 101-109. [Liu Guang, Shen Yongping, Zhang Pingzhong, et al. Pollen record and its palaeoclimatic significance between 800-150 ka. B. P. from RH-core in Zoige Basin in Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 12(4): 101-109.]

Sedimentary Environment and Surface Process since the Last Glaciation in Maqu Reach of the Yellow River in the Zoige Basin

BAI Xin¹, ZHA XiaoChun¹, HUANG ChunChang¹, ZHOU YaLi¹, PANG JiangLi¹, ZHANG YuZhu², WANG Na¹, HAN YiXin¹

1. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

2. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China

Abstract: [Objective] The surface environment of the Zoige Basin is very complex, which is located in a climate-sensitive area. It is of great significance to reveal the response of the surface processes to environmental changes in the Zoige Basin since the last glaciation, as well as the response of environmental changes and surface processes on the Tibetan Plateau to global changes. [Methods] Through extensive investigation, a complete stratigraphic profile of sedimentary sequence was found and systematically sampled on the high platform in the front of the glacial-alluvial fan in Maqu reach of the Zoige Basin, and the sedimentary environment and surface process changes since the last glaciation in the Zoige Basin were studied by particle size analysis and optically stimulated luminescence (OSL) dating. [Results] During the last glacial period before 14.5 ka, the ice meltwater and flash flood process in the Warihe River at the east end of Xiqing Mountain was very active and accumulated rapidly in the foothills, forming a thick glacial-alluvial fan sand and gravel layer. During the Bølling-Allerød warm period of 14.5~11.7 ka, the climate was warm and humid, and the silty swamp environment formed in the depressions at the front of the glacial-alluvial fans and developed gray-green sandy sediments. However, during the Younger Dryas period, the climate suddenly worsened, and the upper part of the gray-green bog soil layer in the shallow depression was folded and deformed due to surface freeze-thaw action. In the early Holocene period from 11.7 ka to 8.5 ka, the climate was relatively dry and the aeolian sand was prevalent, the coarse silt accumulated in the shallow depression and the interbedded sedimentary facies of aeolian sand and bog soil developed under the strong wind power of the plateau surface. During the warm and humid period of 8.5 ka to 3.1 ka, the pedogenesis was strong, and the clay content in sediments increased significantly and developed into the paleosol. In the late Holocene from 3.1 ka, the climate was relatively dry and aeolian sand activities were prevalent. The coarse silt accumulated in the late Holocene was transformed into subalpine meadow black soil due to the rising temperature and humidity. [Conclusions] It indicated that the sedimentary environment and surface processes of the Zoige Basin since the last deglaciation are important information carriers to reveal regional environmental evolution, and responded to the evolution law of global environmental change.

Key words: Zoige Basin; Maqu reach; Yellow River; last Glacial; surface process; environment change