

杨劲松, 王永, 周赤华, 等. 萨拉乌苏河酒坊台剖面末次间冰阶以来的气候环境演化[J]. 中国地质, 2014, 41(6):2122-2131.

Yang Jinsong, Wang Yong, Zhou Cihua, et al. The climatic-environmental evolution since the interstadial epoch of the last glaciation along the Jiufangtai profile of the Salawusu River Valley[J]. Geology in China, 2014, 41(6): 2122-2131(in Chinese with English abstract).

萨拉乌苏河酒坊台剖面末次间冰阶以来的气候环境演化

杨劲松¹ 王永² 周赤华³ 江南² 董进²

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;
3. 内蒙古赤峰地质矿产勘查开发院, 内蒙古 赤峰 024005)

摘要:酒坊台剖面位于萨拉乌苏河流域下游, 其中末次间冰阶以来主要为风成砂沉积, 间夹砂质古土壤和湖沼相粘土层等, 对环境信息有良好的记录。OSL年龄结果表明该剖面顶部记录了末次冰期间冰阶(约52 ka B.P.)以来的气候演化历史。通过对剖面高精度的粒度和磁化率分析, 结合Rb、Sr元素含量及其比值综合分析, 表明末次冰期间冰阶以来该剖面自上而下可划分为3个主要层段, 对应了深海氧同位素MIS 1~3。同时在MIS 3阶段呈现出明显的MIS 3a、3b、3c亚段, 结合区域研究资料, 表明萨拉乌苏河流域在中-长时间尺度上, 对全球性和区域性气候事件有良好的沉积响应。

关键词:粒度; 磁化率; Rb和Sr; 末次间冰阶; 萨拉乌苏河

中图分类号: P534.63 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2014)06-2122-10

过去全球变化研究已成为近20年来地学领域最探讨热烈的课题之一。全球变暖、极端气候事件频发等越来越引起人们的注意和重视。重建过去气候变化过程, 揭示气候变化的规律及驱动机制对深入认识气候环境变化与人类活动的关系具有极其重要的意义^[1]。末次冰期间冰阶以来的气候变化包括了冰期-间冰期旋回, 新仙女木事件和Heinrich等气候突变事件等, 该时段对于我们了解古气候变化的波动周期、受控因素和全球变化的区域响应等重大科学问题都尤为重要。

位于毛乌素沙漠东南缘的萨拉乌苏河流域, 因其含有丰富的哺乳动物化石, 也是著名的“河套人”

(Ordos man)发现地, 同时流域内沉积了华北地区晚更新世标准地层——萨拉乌苏组, 受到第四纪地层学、考古学和全球变化科学的广泛关注。经过多年的积累, 流域内第四纪研究资料丰富, 但是在高分辨率古环境的研究中, 仍然存在一些关键的科学问题。目前, 对流域内第四纪的研究主要集中在滴哨沟湾剖面^[2,3]和米浪沟湾剖面^[4], 缺乏丰富的可对比资料和多指标综合分析。同时, 该区域是中国土地沙漠化最为严重的地区之一^[14], 通过末次间冰阶以来古气候的重建与研究, 可以为本区沙漠治理及环境改善提供一定的科学指导。为此, 笔者选取酒坊台顶部剖面进行取样分析, 在建立地层年代格架基

收稿日期: 2013-11-08; 改回日期: 2014-02-27

基金项目: 中国地质调查局地质大调查工作项目(1212011120118、12120113005600)和中国地质科学院水文地质环境地质研究所基本科研业务费项目(SK201201)共同资助。

作者简介: 杨劲松, 男, 1987年生, 硕士, 研究实习员, 第四纪地质学专业, 主要从事干旱区第四纪研究; E-mail: yjs607@163.com。

基础上,通过粒度、磁化率和Rb、Sr及其比值等多指标分析,重建了末次间冰阶以来流域内气候演变历史。本文的主要目的是探讨全球性气候变化的区域响应,丰富流域内第四纪研究素材,同时对北部非常规代用指标在古环境重建中的差异性。

1 研究区概况

研究区位于鄂尔多斯高原南部,属沙漠—黄土过渡带,整体地势相对低洼(图1)。流域内的研究工作始于 de Chardin T.P.(德日进)等^[6]。20世纪60—70年代至今,数位学者对地层和时代进行了划分,逐步明确了流域内两岸地层包括全新统大沟湾组和滴哨沟湾组,晚更新统城川组和萨拉乌苏组,中更新统离石组^[7-12]。近年来,很多学者尝试用不同的方法和手段研究流域内气候环境的变化,取得了显著的成果。其中,就末次间冰阶——相当于深海氧同位素3阶段(MIS3)而言,李保生等^[13]利用城川组中部地层中的腹足类动物化石重建了MIS3相对温暖的4个时期,并进行了区域性和全球性对比。温小浩等^[14-16]对该时段沉积物的粒度和地球化学元素进行分析,认为其指示了19次相对冷暖波动的旋

回。李后信等^[17]在MIS2阶段,通过主要氧化物分析,获得了流域内千年尺度下气候旋回资料,并记录了Heinrich等气候突变事件。CaCO₃和粒度等指标^[18]也得出了相似的研究结果。MIS1阶段,通过微量元素^[19]、主元素^[20]、磁化率^[21]、CaCO₃和粒度^[22]分析得出流域内至少存在11次明显的冬季风加强事件。此外,对流域内末次间冰阶以来的地层,也进行了较为系统的光释光年代学分析^[23-25]。

2 地层沉积特征及时代划分

酒坊台剖面(JFT)位于萨拉乌苏河流域下游,河流西岸。地理坐标为:37°46'14.06" N, 108°33'49.19" E,海拔高度为1283 m。该剖面总厚度约为60 m,地层堆积较为连续,层序相对完整,是研究对比流域内晚更新世以来地层及古环境变化的理想剖面。

本文选取酒坊台剖面顶部对应的地层(厚度0~13 m)作为研究对象。其岩性主要为风成砂夹粉砂质粘土层,这为研究流域内末次冰期间冰阶以来古气候变迁提供了良好的地质记录。其中上部全新统地层(0~280 cm)主要为粉砂质细砂,中部夹棕黑色古土壤层(120~125 cm),见有炭屑。下部属于城川组地层(280~1300 cm),主要为中—细砂和粉砂质细砂,下部为灰绿色粘土质粉砂与粘土夹层,上下具黄褐色锈斑,含腹足类化石及黑色炭屑,具明显的冻融褶皱。

在该剖面共采取了7个光释光(OSL)和5个¹⁴C年龄样品,其中光释光测年样品在中国地质科学院水文地质环境地质研究所使用Daybreak 2200(美国)光释光仪完成测试,¹⁴C年龄样品由北京大学加速器质谱(AMS)实验室测定。其中光释光测年结果详见表1。

由于下部沉积物多为风成砂,有机质含量很低,未能获得有效的¹⁴C年龄数据。仅顶部120~125 cm处砂质土壤层获得2个¹⁴C年龄,但其校正后年龄数据存在新老倒置,笔者首先予以排除。根据光释光年龄数据,利用线性回归和分段内插建立基本的年代格架(图2)。

3 代用指标分析

研究中采用常规指标综合分析,主要包括粒

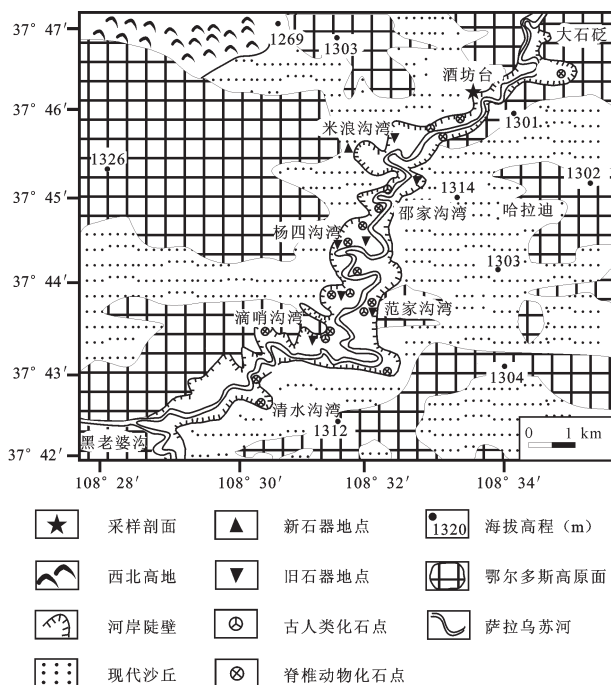


图1 酒坊台剖面地理位置图(据文献[13]修改)

Fig.1 Location and geographic map of the study area (modified after reference [13])

表 1 内蒙古萨拉乌苏河下游酒坊台剖面顶部光释光测年数据

Table 1 OSL ages and relative parameters of related horizons at the top of Jiufangtai section

样品编号	埋深/m	U/10 ⁻⁶	Th/10 ⁻⁶	K/ %	等效剂量	年剂量 Dy	含水量	光释光年龄
					E.D/Gy	/(Gy/ ka B.P.)	/ %	/(ka B.P.)
JFT01-175	1.75~1.8	1.05	4.15	1.68	6.18±0.04	2.65	1.64	2.3±0.1
JFT01-350	3.5~3.55	0.81	3.14	1.5	33.96±0.63	2.25	1.52	15.1±0.7
JFT01-570	5.7~5.75	0.98	4.52	1.5	40.68±0.82	2.42	2.14	16.8±0.8
JFT01-780	7.8~7.85	0.81	2.96	1.52	59.92±0.92	2.21	1.98	27.1±1.1
JFT01-845	8.45~8.5	0.96	3.81	1.6	70.82±1.15	2.39	4.3	29.6±1.3
JFT01-1000	10.0~10.05	0.77	3.03	1.55	91.47±0.09	2.2	2.66	41.6±1.7
JFT01-1145	11.45~11.5	1.01	3.1	1.82	111.43±4.46	2.55	2.87	43.6±2.5

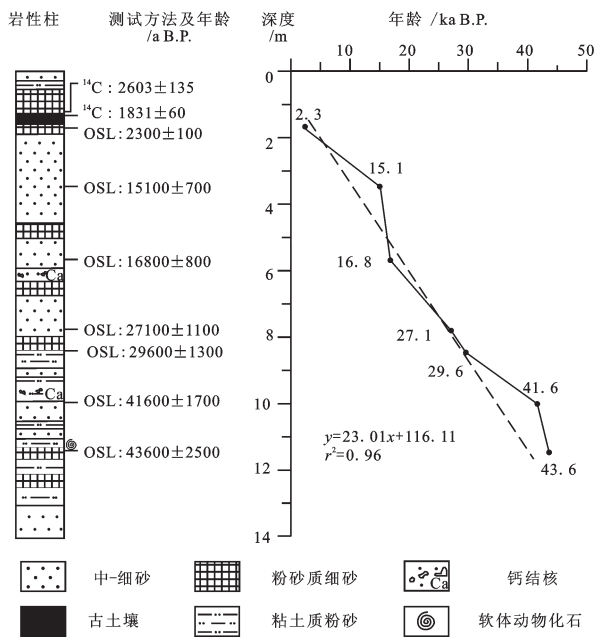


图 2 酒坊台剖面顶部岩性柱和时间标尺
Fig.2 Sediment sequence and time scale of the top of Jiufangtai section

度,磁化率,Rb、Sr及其比值等。其中粒度样品取样间隔为 5 cm,室内使用英国 Malvern Instrument 公司生产的 Mastersize 2000 激光粒度仪完成粒度测试,测试范围为 0.02~2000 μm,实验误差小于 5%。磁化率取样间隔为 5 cm,首先将样品置于 2 cm×2 cm×2 cm 的取样盒中压实、称重,其次分别用 0.47 kHz 和 4.7 kHz 的频率在英国 Bartington 公司生产的 MS2 型磁化率仪上进行测试,获得样品的低频磁化率(X_{lf})和 高频磁化率(X_{hf})。微量元素取样间隔为

20 cm,样品采用等离子质谱仪(X-Series)对其进行分析测试。

3.1 粒度

沉积物粒度变化主要受搬运介质、搬运方式和沉积环境等因素控制,在第四纪古环境重建中具有一定的指示意义。根据 Udden—Wentworth 粒度分级标准^[29],将沉积物划分为粘土(<3.9 μm)、粉砂(3.9~63 μm)、极细砂(63~125 μm)、细砂(125~250 μm)、中砂(250~500 μm)和粗砂(500~1000 μm)。同时,粒度参数能较好地反映沉积物特征,进而可以推断沉积环境^[30]。主要的粒度参数包括平均粒径(M_Z)、标准偏差(σ)、偏度(Sk₁)和峰态(K_G)。将酒坊台剖面的粒度分级及参数分别成图对比(图 3)。通常,研究区内沉积物粒度主要是受东亚冬夏季季风的影响。细颗粒含量越丰富,指示夏季风相对较强,同时有一定的成壤作用;相反,粗颗粒含量越多,表明当时冬季风较强。而粒度参数结合频率曲线变化可较好地反应沉积物类型及分选情况^[26]。

从图 3 可以看出,整个剖面岩性主要以中—细砂为主,砂含量(d>63 μm)的总体变化范围为 0.17%~100%,平均含量为 84.95%。粗砂含量极少,粉砂的含量变化较大,平均为 12.89%,粘土为 2.13%。沉积物的平均粒径在 2~6 Φ;标准偏差变化范围在 0.53~2.46;偏度在 -0.16~3.33,主要为正偏态;峰度为 1.67~22.50,对应概率频率曲线表现为十分尖锐。其中顶部 0~120 cm 以细砂为主,夹极细砂和中砂。120~155 cm 以粘土和粉砂为主,为区域上广泛发育的黑垆土层。155~800 cm 中粗粒沉积物为主,

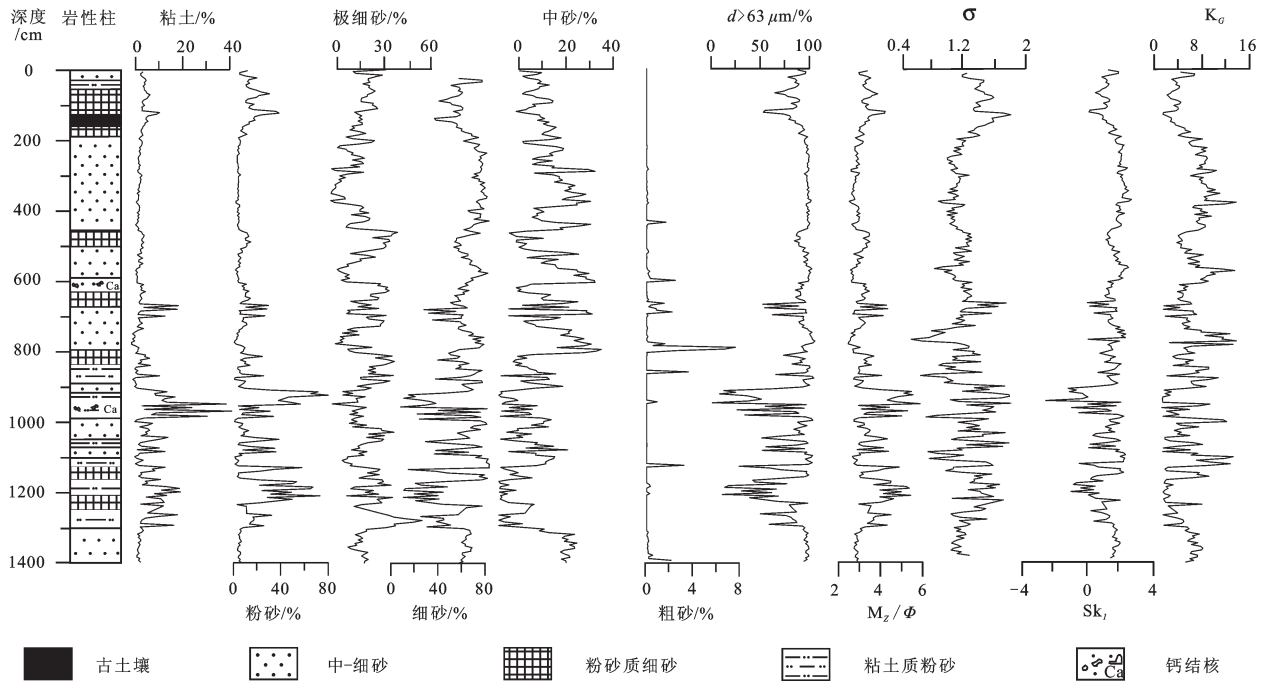


图3 酒坊台剖面顶部沉积物粒度分析
Fig.3 Variations of the grain-size distribution at the top of Jiufangtai section

$d > 63 \mu m$ 平均含量达到97.1%, 细砂占绝对优势, 不含粘土。800~950 cm 沉积物粒径有一定波动, 粘土、粉砂向下明显增加, 砂的含量逐渐减少。并在940 cm 附近, 粘土和粉砂含量达到最大值, 分别为20.73%和79.09%, 砂含量对应为最小值(0.17%)。950~1150 cm 沉积物主要为砂, 其中细砂增加明显, 粘土和粉砂相对较低。1150~1165 cm 沉积物粒径略有波动, 显示出一定的过渡关系。1165~1300 cm, 粉砂和粘土含量剧烈增加, 粗颗粒含量锐减。

粒度频率曲线是指示沉积过程中动力条件的重要指标之一。该剖面以3种频率曲线为主: 其一为相对粗粒沉积物的典型曲线图(图4-a), 众数主要集中在细砂粒级, 280~800 cm 几乎全为此曲线类型; 其二为众数集中在粉砂或粘土, 峰态较平缓的频率曲线图(图4-c), 多见于顶部的古土壤层(120~155 cm)和底部湖沼相沉积物(1150~1300 cm); 其三为风成砂与粘土层之间砂质粘土层的频率曲线(图4-b), 众数为粉砂, 但在 $d < 10 \mu m$ 处有一个明显的平台, 这与典型的黄土频率曲线图极为相似^[31], 指示了两者在成因上可能有一定的联系。

3.2 磁化率

磁化率是衡量沉积物中磁性矿物特征的物理

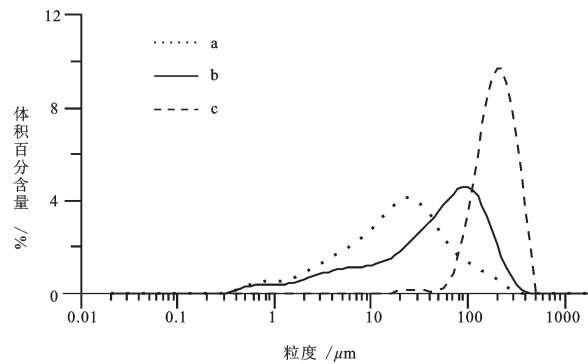


图4 酒坊台剖面顶部沉积物粒度频率曲线图
Fig.4 Frequency curve of sediment grain sizes at the top of Jiufangtai section

量, 而磁性矿物对当时形成环境有较为灵敏的反映。同时由于测试便捷, 对样品无损伤, 使得其在古环境分析中得到广泛运用。

统计分析可以看出, 高频磁化率为 $2.69 \times 10^{-8} \sim 25.48 \times 10^{-8} m^3/kg$, 平均值为 $10.26 \times 10^{-8} m^3/kg$, 标准差4.28; 低频磁化率范围为 $2.03 \times 10^{-8} \sim 24.46 \times 10^{-8} m^3/kg$, 平均值为 $9.88 \times 10^{-8} m^3/kg$, 标准差为4.16。高频磁化率和低频磁化率的变化趋势基本一致。顶部(0~280 cm)磁化率在砂质土壤层附近表现为最大值, 向下逐渐降低, 趋于平缓。中部(280~800 cm)

整体磁化率相对较高,变化频繁且剧烈,与同阶段粒度参数相对稳定存在明显差异。但常在粗粒沉积物中表现为低值,相对细粒沉积物中表现为高值。剖面底部(800~1300 cm)呈现明显的2个峰值夹1个低值段。

在0~280 cm,磁化率值常在相对成壤化的细粒沉积物中表现为高值。在280~800 cm,磁化率变化趋势与其他指标有一定的相关性,但变化程度更为剧烈。该层段主要为风成砂沉积,矿物成分多为石英。石英一般为逆磁性矿物,其对应磁化率值相对较低。但是流域内地势相对低洼^[2],有利于磁性矿物从粗粒物质中淋滤下来并相对富集在细粒沉积物中。风成砂受后期雨水淋滤等作用,从而使得铁磁性矿物局部富集,磁化率值升高,且变化幅度较其他指标更为明显^[32]。在800~1150cm段,主要为过渡相带。磁化率变化与粒径呈明显的反相关关系。1150~1300 cm段,高频磁化率均值为 $6.39 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,低频磁化率均值为 $6.25 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,并在近底部呈现各自最低值,说明在湖沼相沉积中,磁化率整体为低值。结合粒度分析,可以看出湖沼相沉积中磁化率变化与风成相不同。总体而言,流域内磁化率变化特征与其他典型陆相盆地沉积区^[33]的变化机制有一定差别。

3.3 Rb、Sr含量及其比值

在表生地球化学中,Rb离子半径较大,与K离子相当。所以Rb离子常吸附于含K离子的粘土中,较难迁移。而Sr离子半径较小,与Ca离子相似,活动性比Rb强,不容易被吸附,因此Sr更容易被地表水或地下水淋滤带走。在第四纪古环境研究中,Rb、Sr及其比值常被用来反映东亚夏季风的强度^[34]。

酒坊台顶部剖面,Rb平均值为 62.42×10^{-6} ,变化范围为 $54.85 \times 10^{-6} \sim 70.02 \times 10^{-6}$; Sr平均值为 146.47×10^{-6} ,范围为 $117.76 \times 10^{-6} \sim 273.58 \times 10^{-6}$,两者的相关系数为0.612。Sr含量的变化程度较Rb更为剧烈。这主要是由于Sr为较强活动性元素,在沉积过程中相对于稳定性元素Rb对环境变化更为敏感。Rb/Sr平均值为0.43,范围为0.23~0.49,与Rb相关系数为-0.45,Sr的相关系数为-0.96,说明Rb/Sr含量变化主要受控于Sr含量的变化。剖面中Rb、Sr含量多为同相位变化关系,且在细粒沉积物中,Rb/Sr表现为低值,对应Rb和Sr为高值。这与典型的

黄土—古土壤序列中研究有明显区别。在黄土高原的研究中,Sr在成壤作用较弱的黄土中相对较高。而在古土壤层中,随着表生地球化学作用增强,Sr作为较活泼元素不断被淋滤而含量减少,但Rb作为相对稳定元素相对富集,Rb/Sr随之增加^[34]。前人研究^[27,28]也发现这一差异,并指出这与元素地球化学特征和流域独特的古地理位置和沉积环境影响有关。在干旱—半干旱气候条件下形成的风成砂,当降水充沛,气候适宜条件下,Sr开始在相对低洼地区淋滤富集,Rb、Sr含量在一定程度表现为同步富集。同时Rb/Sr主要受控于Sr含量变化,对应为低值,总体表现为有别于黄土高原的环境指示意义。

4 讨 论

根据测年数据,结合岩性变化特征,运用分段内插的方法建立该段地层基本的时间标尺。其中280 cm作为全新统底界,对应年龄约为11 ka B.P.; 800 cm、950 cm和1125 cm,分别获得OSL年龄为28 ka B.P.、38 ka B.P.和43 ka B.P.。同时结合线性外推,获得1300 cm年龄约为52 ka B.P.。我们选取平均粒径(Mz)和沙漠—黄土过渡带有代表意义的粗粒径指标($d > 63 \mu\text{m}$)^[35,36],结合磁化率和Rb、Sr等数据进行分段综合讨论。据此可将流域内末次冰期间冰阶以来的古环境变化划分为MIS1、2、3等三个主要阶段(图5)。

4.1 MIS 3

对应年代为28~52 ka B.P.(深度为800~1300 cm)。磁化率均值相对较低,对应的沉积物平均粒径为 3.68Φ , $d > 63 \mu\text{m}$ 的含量为70.87%。Rb/Sr的平均比值为0.41,也相对较低。粒度、磁化率及Rb/Sr等指标呈现明显的相关性,整体对应了较为温暖湿润的气候条件。同时从不同的气候指标可以看出,存在较明显的3个亚阶段气候波动。

MIS 3c(43~52 ka B.P.,对应深度为1125~1300 cm)。岩性主要为粉砂和粘土,磁化率呈现相对峰值,平均粒径为 4.09Φ ,粒度参数中存在4次沉积旋回的波动,或可指示了毛乌素沙漠当时存在扩张与萎缩。另一方面,由于在磁化率和Rb、Sr分析中并未有明显的体现,说明当时的总体气候环境仍应为有利于成壤固沙的相对暖湿阶段。

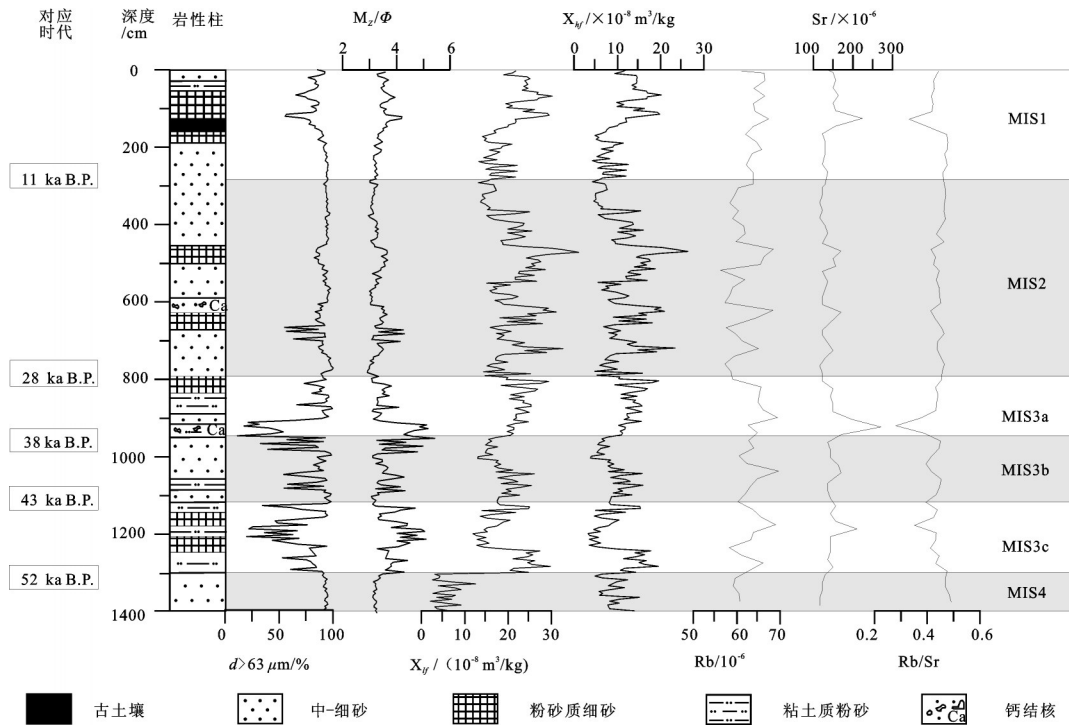


图5 酒坊台剖面末次间冰阶以来粒度、磁化率和Rb、Sr曲线对比图
 Fig.5 Comparison of grain-sizes, magnetic susceptibilities and Rb, Sr since the last interstadial epoch

MIS 3b (38~43 ka B.P., 对应深度为 950~1125 cm)。岩性主要为细砂, 向下渐变为粉砂。磁化率为该时段内最低值, 平均粒径均值为 3Φ , 沉积物中 $d > 63 \mu\text{m}$ 的沉积物含量为 90.08%。这主要与毛乌素沙漠受东亚冬季风加强导致沙漠—黄土过渡带逐步南移有关, 细砂含量显著增加。Rb 含量达到最大值, Sr 相对降低。此外, 粒度参数和 Rb、Sr 值在顶部发生突变, 说明 MIS 3b 向 MIS 3a 转变过程中存在古环境突变事件。

MIS 3a (28~38 ka B.P., 对应深度为 800~950 cm)。沉积物以粘土质粉砂和细粉砂为主, 下部钙质胶结现象明显。沉积物粒度参数中, 标准偏差平均值为 1.27, 分选性较差; 偏度均值为 1.08, 呈较明显的正偏; 高频磁化率和低频磁化率均值为剖面最大值, 分别为 $12.48 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 $11.96 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$; Sr 含量达到最大值, Rb/Sr 比值出现最低值, 与粒度参数同步变化, 指示当时的表生地球化学作用较为强烈。同样在流域内其他剖面, 也有相似记录, 并发现有喜温湿的螺类现生种^[13]。在酒坊台剖面中, 各指标均为末次间冰阶以来的最值, 指示当时条件有利于湖沼相形成, 甚至可能存在毛乌素沙漠中的

大湖期^[23]。这与全球变化在末次冰期气候以 MIS 3c 为最佳阶段有一定差异^[37], 但施雅风等^[38,39]在青藏高原及周边的古气候研究中发现该段时间对应了“特强夏季风事件”和“高温大降水事件”, 说明萨拉乌苏河流域的古气候变化受区域背景影响明显。

4.2 MIS 2

对应年代 11~28 ka B.P. (深度为 280~800 cm)。岩性主要为厚层的细砂。就该阶段整体而言平均粒径为 2.53Φ , 标准偏差和偏度的均值分别为 0.72 和 0.52, 均为剖面最低值; Rb 和 Sr 的均值为 60.36×10^{-6} 和 133.95×10^{-6} , 对应最低值, Rb/Sr 为 0.45, 达到最大均值。结合粒度变化和 Rb、Sr 特征分析(图 5), 可以看出该时期整体气候较为干旱寒冷, 但在部分时段也存在细微的环境变化, 如在 465~505 cm 和 610~655 cm。这说明了该时段为毛乌素沙漠的相对扩张期, 同时也叠加了更次一级的气候波动^[40]。李后信等^[17]通过主量元素分析认为流域内存在千年尺度上的古气候变迁, 同时在地层中发现的鸵鸟蛋壳和腹足类化石也证明了这一点。此外, 在各参数对比分析中, 磁化率波动尤为频繁, 显示出对环境变化的较强敏感性。但由于磁化率用于重建风成

砂中古环境变化尚缺乏直接的对应关系,对于风成砂中磁化率波动情况是否能够灵敏地记录当时古环境事件尚不能定论。

4.3 MIS 1

对应深度为0~280 cm(约11 ka B.P.至今)。顶部为现代风成沙丘,中部为稳定发育的黑垆土,下部为细砂质粉砂。高频和低频磁化率均值为 $10.26 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 $10.00 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, Rb和Sr含量均值为 64.02×10^{-6} 和 149.11×10^{-6} ,基本参数变化均与MIS 3b阶段有很好的相似性,说明了较为相似的气候条件。从图5可以看出,全新世初期主要为干旱气候条件,中后期存在相对温湿阶段,之后气候往复波动,近现代沙丘开始快速堆积。全新世中期的气候变化特征与全球背景下的全新世大暖期有一定差别。实际上,在同为沙漠黄土过渡带的糜地湾剖面^[41]和毛乌素沙漠中的盐海子^[42]的古环境变化中,在全新世大暖期中同样存在相对干旱的时期,与典型的季风区存在明显的反相位关系^[43]。这说明萨拉乌苏河流域受地理环境影响,对区域性气候变化有较好的响应。

在115~135 cm, 1.5~1.8 ka B.P.,发育有流域内较为稳定的黑垆土层,有机质含量相对较高,对应的磁化率为峰值,同时Sr相对富集,Rb/Sr出现低谷。在上游米浪沟湾的古土壤中发现的现生种螺类化石,反映当时应为温暖湿润的水域或陆地草丛环境^[19]。这说明该段时间毛乌素沙漠向北退缩,整体气候条件相对温暖湿润,在流域广泛发育有黑垆土层,此后快速堆积了现代风成沙。这与Liu Kai等^[24]在大沟湾中进行年代学研究中得出的现代萨拉乌苏河形成并开始快速下切的时间基本相符。通过历史时期的考古研究^[44]也得到了类似的结果。因此,可以明确该段时间内整体相对温暖,降雨量充沛,有利于成壤作用,同时现代意义上的萨拉乌苏河开始形成并快速切割两岸地层。

5 结 论

本文通过多指标综合分析,酒坊台剖面顶部沉积物的古环境记录与末次冰期间冰阶以来对应的深海氧同位素阶段可以进行很好的对比,反映了在中—长时间尺度上,位于沙漠黄土过渡带的萨拉乌苏河流域对全球变化有一定的沉积响应。MIS3阶

段(28~52 ka B.P.)整体相对温暖湿润,但也存在MIS3b相对干冷的时期。其中MIS3a阶段为末次冰期以来该区域气候最适宜期,这与区域上的古环境记录相符合。MIS2阶段(11~28 ka B.P.)虽存在个别细微波动,但气候环境整体相对较为平稳,当时应为冬季风加强,沙漠扩张的时期。MIS1阶段(0~11 ka B.P.)整体上古气候环境与MIS3b阶段相当,其中黑垆土层在流域内广泛发育,其上开始堆积现代风成砂丘,说明现代萨拉乌苏河在最近1.5~1.8 ka B.P.形成,并迅速下切形成河谷。

值得注意的是,各代用指标还不能准确地定量恢复和重建古气候变化,同一指标在不同沉积环境下的分析也存在一定差异。因此,在第四纪的古环境研究中,应综合多指标讨论,具体问题具体分析,系统考虑物源区、沉积区和沉积过程等多方面因素。

致谢: 陈兴强、赵志丽参与了部分野外取样工作,在此深表感谢!

参考文献(Reference):

- [1] Mörlen A. Global Change: the last millennia [J]. *Global and planetary change*, 1993, 7(1/3): 211–217.
- [2] 董光荣, 李保生, 高尚玉. 由萨拉乌苏河地层看晚更新世以来毛乌素沙漠的变迁[J]. *中国沙漠*, 1983, 3(2): 13–18.
Dong Guangrong, Li Baoshen, Gao Shangyu. The case study of the vicissitude of Mu Us sandy land since the Late Pleistocene according to the Salawusu River strata[J]. *Journal of Desert Research*, 1983, 3(2): 13–18 (in Chinese with English abstract).
- [3] 靳鹤龄, 董光荣, 左昕昕. 滴哨沟湾地层沉积特征记录的毛乌素沙漠变迁[J]. *中国沙漠*, 2008, 28(6): 1064–1072.
Jin Heling, Dong Guangrong, Zuo Xinxin. Vicissitude of Mu Us Desert recorded by stratigraphical characteristics of Disaogouwan Section in Southern Erdos Plateau[J]. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(6): 1064–1072(in Chinese with English abstract).
- [4] 李保生, 靳鹤龄, 吕海燕, 等. 150 ka以来毛乌素沙漠的堆积与变迁过程[J]. *中国科学(D辑)*. 1998, 28(1): 85–90.
Li Baosheng, Jin Heling, Lv Haiyan, et al. Processes of the deposition and vicissitude of Mu Us Desert, China since 150 ka B. P. [J]. *Science in China (Series D)*, 1998, 41(3): 248–254.
- [5] 张莉, 王飞跃, 张铁军. 陕北榆林地区沙漠化土地类型及时空变化分析[J]. *中国地质*, 2002, 29(4): 426–430.
Zhang Li, Wang Feiyue, Zhang Tiejun. Types and temporal-spatial change of desertized land in the Yulin area, northern Shaanxi[J]. *Geology in China*, 2002, 29(4): 426–430(in Chinese with English abstract).
- [6] De Chardin P T, Licent E. On the discovery of a Paleolithic industry in Northern China[J]. *Bulletin of the Geological Society*

- of China, 1924, 3(1): 45–50.
- [7] 袁宝印. 萨拉乌苏组的沉积环境及地层划分问题[J]. 地质科学, 1978, (3): 220–234.
Yuan Baoyin. Sedimentary environment and stratigraphical subdivision of Sjara–Osso–Gol Formation [J]. Scientia Geologica Sinica, 1978, (3): 320–334(in Chinese with English abstract).
- [8] 李保生, 董光荣, 吴正, 等. 我国北方上更新统城川组的建立[J]. 地质论评, 1993, 39(2): 91–100.
Li Baosheng, Dong Guangrong, Wu Zheng, et al. The establishment of the upper Pleistocene Chengchuan Formation in northern China[J]. Geological Review, 1993, 39(2): 91–100(in Chinese with English abstract).
- [9] 李保生, 靳鹤龄, 祝一志, 等. 萨拉乌苏河流域第四系岩石地层及其时间界限[J]. 沉积学报, 2004, 22(4): 676–682.
Li Baosheng, Jin Heling, Zhu Yizhi, et al. The Quaternary lithostrata in Salawusu River Valley and their geochronology[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(4): 676–682(in Chinese with English abstract).
- [10] 闵隆瑞, 朱关祥, 关友义. 内蒙古萨拉乌苏河流域第四系更新统上部萨拉乌苏阶基本特征剖析[J]. 中国地质, 2009, 36(6): 1208–1217.
Min Longrui, Zhu Guanxiang, Guan Youyi. An analysis of the basic characteristics of the Upper Pleistocene Salawusuan Stage in the Salawusu River Valley, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 2009, 36(6): 1208–1217(in Chinese with English abstract).
- [11] 裴文中, 李有恒. 萨拉乌苏河系的初步探讨[J]. 古脊椎动物与古人类, 1964, 8(2): 99–118.
Pei Wenzhong, Li Youheng. Some tentative opinions on the problem of “Sjara–Osso–Gol Series” [J]. Vertebrata Palasiatica, 1964, 8(2): 99–118(in Chinese with English abstract).
- [12] 郑洪汉. 中国北方晚更新世河湖相地层与风积黄土[J]. 地球化学, 1989, (4): 343–351.
Zheng Honghan. Late Pleistocene fluvo–lacustrine deposits and aeolian loess in North China[J]. Geochimica, 1989, (4): 343–351 (in Chinese with English abstract).
- [13] 李保生, 陈德牛, 章典, 等. 萨拉乌苏河流域 MGS3 地层段腹足类动物化石种类及气候环境[J]. 中国科学(D 辑), 2007, 37(12): 1625–1633.
Li Baosheng, Chen Deniu, Zhang Davidian, et al. Fossil gastropods from the MGS3 stratigraphic segment in the Salawusu River Valley and their climatic and environmental implications[J]. Science in China (Series D), 2008, 51 (3): 339–348.
- [14] 温小浩, 李保生, 章典, 等. 萨拉乌苏河流域末次间冰阶气候——以米浪沟湾剖面为例[J]. 地质学报, 2007, 81(4): 553–562.
Wen Xiaohao, Li Baosheng, Zhang Davidian, et al. Megainterstadial Climate of the Salawusu River Valley—Milanggouwan Stratigraphical Section[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(4): 553–562(in Chinese with English abstract).
- [15] 温小浩, 李保生, 章典, 等. 萨拉乌苏河流域米浪沟湾剖面主元素记录的末次间冰阶气候波动[J]. 中国沙漠, 2009, 29(5): 835–844.
Wen Xiaohao, Li Baosheng, Zhang Dian, et al. Climate fluctuations during marine isotope stage 3 suggested by major element records in The Milanggouwan stratigraphical section in Salawusu River Valley, Inner Mongolia, China[J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(5): 835–844(in Chinese with English abstract).
- [16] Wen Xiaohao, Li Baosheng, Zheng Yanming, et al. Climate variability in the Salawusu River valley of the Ordos Plateau (Inner Mongolia, China) during Marine Isotope Stage 3[J]. Journal of Quaternary Science, 2008, 24(1): 61–74.
- [17] 李后信, 李保生, 温小浩, 等. 萨拉乌苏河流域 MGS2 层段主要氧化物变化及其指示的气候波动[J]. 中国沙漠, 2010, 30(4): 808–815.
Li Houxin, Li Baosheng, Wen Xiaohao, et al. Primary oxides change in MGS2 in Salawusu River Valley and indicated climatic change[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(4): 808–815(in Chinese with English abstract).
- [18] Wang Fengnian, Li Baosheng, Wang Jianglong, et al. Pleniglacial millennium–scale climate variations in northern China based on records from the Salawusu River Valley[J]. Journal of Arid Land, 2012, 4(3): 231–240.
- [19] 牛东风, 李保生, 温小浩, 等. 萨拉乌苏河流域 MGS1 层段微量元素记录的全新世千年尺度的气候变化[J]. 地质学报, 2011, 85(2): 300–308.
Niu Dongfeng, Li Baosheng, Wen Xiaohao, et al. The holocene ka–scale climate variation indicated by trace elements of the MGS1 segment in the Salawusu River Valley, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(2): 300–308(in Chinese with English abstract).
- [20] Niu Dongfeng, Li Baosheng, Du Shuhuan et al. Cold events of holocene indicated by primary elements distribution of the high–resolution sand dunes in the Salawusu River Valley [J]. Journal of Geographical Sciences, 2008, 18(1): 26–36.
- [21] Lu Yingxia, Li Baosheng, Wen Xiaohao, et al. Millennial –centennial scales climate changes of holocene indicated by magnetic susceptibility of high resolution section in Salawusu River Valley, China[J]. Chinese Geographical Science, 2010, 20(3): 243–251.
- [22] 王丰年, 李保生, 牛东风, 等. 萨拉乌苏河流域 MGS1 层段粒度与 CaCO₃ 记录的全新世千年尺度的气候变化[J]. 中国沙漠, 2012, 32(02): 331–339.
Wang Fengnian, Li Baosheng, Niu Dongfeng, et al. Holocene millennial scale climate variations from records of grain size and CaCO₃ in MGS1 segment of Milanggouwan section in the Salawusu River Valley, China [J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(02): 331–339(in Chinese with English abstract).
- [23] 刘凯, 赖忠平, 樊启顺, 等. 萨拉乌苏地区末次冰期酒坊台剖面光释光年代及其环境意义[J]. 盐湖研究, 2010, 18(3): 1–8.

- Liu Kai, Lai Zhongping, Fan Qishun, et al. OSL chronology and palaeoenvironment implications of Jiufangtai section from the Salawusu area during the last glaciation[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2010, 18(3): 1-8(in Chinese with English abstract).
- [24] Liu Kai, Lai Zhongping. Chronology of holocene sediments from the archaeological Salawusu site in the Mu Us Desert in China and its palaeoenvironmental implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 45: 247-255.
- [25] Li Shenghua, Sun Jimin, Li Bo. Holocene environmental changes in central Inner Mongolia revealed by luminescence dating of sediments from the Sala Us River valley[J]. *The Holocene*, 2011, 22(4): 1-8.
- [26] 余雪飞, 李保生, 靳鹤龄, 等. 末次间冰期全球变化区域响应的粒度旋回——萨拉乌苏河流域米浪沟湾剖面记录[J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2004, (1): 129-135.
- Yu Xuefei, Li BaoSheng, Jin Heling, et al. Grain size cycles during the last interglacial period in the Salawusu River Valley responding to the past Global Change[J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2004, (1): 129-135 (in Chinese with English abstract).
- [27] 刘宇飞, 李保生, 杨艺, 等. 末次间冰期我国半干旱盆地Rb、Sr的迁移聚集规律与环境演变——以萨拉乌苏河流域米浪沟湾剖面研究结果为例[J]. *中国沙漠*, 2006, 26(3): 341-344.
- Liu Yufei, Li Baosheng, Yang Yi, et al. Moving and accumulating law of Rb, Sr with environment evolving in semiarid basin of China during the last interglacial—Reflected by study result on Milanggouwan stratigraphic section in the Salawusu River Valley[J]. *Journal of Desert Research*, 2006, 26(3): 341-344(in Chinese with English abstract).
- [28] Du Shuhuan, Li Baosheng, Niu Dongfeng, et al. Age of the MG55 segment of the Milanggouwan stratigraphical section and evolution of the desert environment on a kiloyear scale during the Last Interglacial in China's Salawusu River Valley: Evidence from Rb and Sr contents and ratios[J]. *Chemie der Erde—Geochemistry*, 2011, 71(1): 87-95.
- [29] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments[J]. *The Journal of Geology*, 1922, 30(5): 377-392.
- [30] 殷志强, 秦小光. 末次冰期以来松嫩盆地东部榆树黄土堆积及其环境意义[J]. *中国地质*, 2010, 37(1): 212-222.
- Yin Zhiqiang, Qin Xiaoguang. The Yushu loess deposition in eastern Songnen Basin since the last glacial period and its environmental significance[J]. *Geology in China*, 2010, 37(1): 212-222(in Chinese with English abstract).
- [31] 孙东怀, 鹿化煜, Rea D, 等. 中国黄土粒度的双峰分布及其古气候意义[J]. *沉积学报*, 2000, 18(3): 327-335.
- Sun Donghuai, Lu Huayu, Rea D, et al. Bimode grain size distribution of Chinese Loess and its paleoclimate implication[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(3): 327-335(in Chinese with English abstract).
- [32] 靳鹤龄, 李明启, 苏志珠, 等. 220 ka以来萨拉乌苏河流域地层磁化率与气候变化[J]. *中国沙漠*, 2006, 26(5): 680-686.
- Jin Heling, Li Mingqi, Su Zhizhu, et al. Climatic change reflected by stratigraphical magnetic susceptibility in Salawusu River Basin, North China since 220 ka BP[J]. *Journal of Desert Research*, 2006, 26(5): 680-686 (in Chinese with English abstract).
- [33] 柏道远, 李长安, 陈渡平, 等. 化学风化指数和磁化率对洞庭盆地第四纪古气候变化的响应[J]. *中国地质*, 2011, 38(3): 779-785.
- Bai Daoyuan, Li Chang'an, Chen Duping, et al. Chemical weathering index and magnetic susceptibility of deposits and their responses to the Quaternary climate in Dongting Basin[J]. *Geology in China*, 2011, 38(3): 779-785(in Chinese with English abstract).
- [34] Chen Jun, An Zhisheng, John H. Variation of Rb/Sr ratios in the loess-paleosol sequences of central China during the last 130,000 years and their implications for monsoon paleoclimatology [J]. *Quaternary Research*, 1999, 51(3): 215-219.
- [35] 鹿化煜, 安芷生. 洛川黄土粒度组成的古气候意义[J]. *科学通报*, 1997, 42(1): 66-69.
- Lu Huayu, An Zhisheng. Paleoclimate significance of Luoquan loess grain size composition[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(1): 66-69(in Chinese).
- [36] 丁仲礼, 孙继敏, 刘东生. 联系沙漠-黄土演变过程中耦合关系的沉积学指标. *中国科学(D辑)*, 1999, 29(1): 82-87.
- Ding Zhongli, Sun Jimin, Liu Dongsheng. A sedimentological proxy indicator linking changes in loess and deserts in the Quaternary[J]. *Science in China (Series D)*, 1999, 42(2): 146-152.
- [37] Imbrie J, Hays J D, Martinson D G, et al. The orbital theory of Pleistocene climate: support from a revised chronology of the marine $\delta^{18}\text{O}$ record [C]//Berger A, Imbrie J, Hays J, et al(eds.). *Milankovitch and Climate: Understanding the Response to Astronomical Forcing*. Boston:Reidel Publishing Company, 1984, 269-305.
- [38] 施雅风, 刘晓东, 李炳元, 等. 距今 40-30 ka 青藏高原特强夏季风事件及其与岁差周期关系[J]. *科学通报*, 1999, 44(14): 1475-1480.
- Shi Yafen, Liu Xiaodong, Li Binyuan, et al. A very strong summer monsoon event during the 30-40 ka BP in the Qinhai-Xizang (Tibet) Plateau and its relation to precessional cycle[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(20): 1851-1857.
- [39] 施雅风, 贾玉连, 于革, 等. 40-30 ka BP 青藏高原及邻区高温大降水事件的特征、影响及原因探讨[J]. *湖泊科学*, 2002, 14(1): 1-11.
- Shi Yafeng, Jia Yulian, Yu Ge, et al. Features, impacts and causes of the high temperature and large precipitation event in the Tibetan Plateau and its adjacent area during 40-30 ka BP[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2002, 14(1): 1-11(in Chinese with English abstract).

- [40] 孙继敏, 尹功明, 陈杰, 等. 榆林剖面的热释光测年及其对这一地区干旱事件的讨论[J]. 中国沙漠, 1997, 17(1): 3-10.
Sun Jimin, Yin Gongming, Chen Jie, et al. Thermoluminescence chronology of aeolian sequences in Yulin and the arid episodes of this region[J]. Journal of Desert Research, 1997, 17 (1): 1-8(in Chinese with English abstract).
- [41] Zhou Weijian, Donahue D J, Porter S C, et al. Variability of monsoon climate in East Asia at the end of the last glaciation [J]. Quaternary Research, 1996, 46(3): 219-229.
- [42] Chen A C T, Lan H C, Lou J Y, et al. The dry Holocene megathermal in Inner Mongolia [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2003, 193(2): 181-200.
- [43] Chen Fahu, Yu Zicheng, Yang Meilin, et al. Holocene moisture evolution in arid central Asia and its out of phase relationship with Asian monsoon history [J]. Quaternary Science Reviews, 2008, 27: 351-364.
- [44] 胡珂, 莫多闻, 王辉, 张翼飞. 萨拉乌苏河两岸宋(西夏)元前后的环境变化与人类活动[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2011, 47(3): 466-474.
Hu Ke, Mo Duowen, Wang Hui, et al. Environmental changes and human activities on both sides of Sarah Wusu River, in Song (Xixia) and Yuan Dynasty[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2011, 47(3): 466-474(in Chinese with English abstract).

The climatic-environmental evolution since the interstadial epoch of the last glaciation along the Jiufangtai profile of the Salawusu River Valley

YANG Jin-song¹, WANG Yong², ZHOU Ci-hua³, JIANG Nan², DONG Jin²

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, Hebei, China; 2. Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China; 3. Chifeng Institute of Geology and Mineral Exploration and Development of Inner Mongolia, Chifeng 024005, Inner Mongolia, China)

Abstract: The Salawusu River Valley, located in the transition zone between the loess plateau and the Mu Us desert, has kept sensitive records of paleoclimate since the last interglacial period. The profile which contains the aeolian sand with some interbeddings of sandy soil and limnetic paleosol facies in the downstream part of the valley was recently termed Jiufangtai Stratigraphic Section. In this paper, the authors focused the study on the top section since the interstadial epoch of the last glaciation and employed a series of geological methods, such as the AMS-¹⁴C, OSL dating method, grain size, magnetic susceptibility, Rb, Sr elements and their ratios. Based on the data obtained and the climatic-stratigraphic comparison with the relative marine isotope stage, the authors further divided the strata into the following sequences: (1) the MIS 1 sequence (0~11 ka B.P.), which was a mainly dry period at the beginning of the Holocene, consistent with records from the arid-semiarid transition zones in other places. And the 1.5~1.8 cal ka B.P. was a wet phase when the modern Salawusu River formed; (2) MIS 2 sequence (11~28 ka B.P.), which was a lasting and stable dry and cold period; (3) MIS 3 sequence (28~52 ka B.P.), which mainly contained 2 warm and humid periods (MIS 3a and MIS 3c), and a cold period (MIS 3b), similar to things of MIS 1. The lacustrine facies in MIS3 sequence was similar to the particular warm and wet stage in the Tibetan Plateau and its adjacent areas, which recorded the strong summer monsoon event during 30~40 ka B.P.. It is concluded that the paleoclimatic records had a comparable sedimentary response to the global and regional climate events. Thus, the valley is an ideal zone for studying climate changes in China. In addition, some comprehensive analysis should be conducted in the reconstruction of the valley paleoenvironment history, because there are varying degrees of limitations in different assumptions.

Key words: grain size; magnetic susceptibility; Rb and Sr elements; interstadial epoch of the last glaciation, Salawusu River Valley

About the first author: YANG Jin-song, male, born in 1987, research assistant, mainly engages in the study of Quaternary geology in the arid and semiarid area; E-mail: yjs607@163.com.