

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202008062

粒度指标指示的坝上御道口地区 8 000 a B. P. 环境变化

黄劭康¹, 贾红娟², 武俊叶¹, 张昊¹, 殷志强³

(1. 河北地质大学资源学院, 河北 石家庄 050031; 2. 河北地质大学实验实践教学中心, 河北 石家庄 050031; 3. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 承德坝上御道口地区是对气候变化非常敏感的生态环境脆弱带, 认识本区气候变化对未来增温背景下采取应对措施有重要意义。粒度是气候环境变化敏感代用指标, 粒度分析结果可推测沉积物形成条件和环境。文章对御道口地区 YDK 剖面沉积物进行粒度测试。通过对粒度数据进行组分分离和敏感粒级的提取, 利用 AMS¹⁴C 测年结果建立年代框架, 探讨了坝上御道口地区 8000 a B. P. 以来的古气候古环境变化。结果显示气候变化经历了三个阶段: (1) 8 000 ~ 6 100 a B. P., 粒度指标指示此时段动力较大, 粉尘距源区较近, 风沙活动较强, 携带较多粗颗粒物造成粒径较粗, 估计此时段气候干燥, 区域植被较差。(2) 6 100 ~ 1 700 a B. P., 此时段粒度指标指示动力较小, 粉尘距源区较远, 粗颗粒物减少, 估计此时段气候湿润, 区域植被较好, 风沙活动减弱。(3) 1 700 a B. P. 至今, 动力较大, 粉尘距源区较近, 估计此时段气候变干, 区域植被较差, 风沙活动强。

关键词: 全新世; 坝上地区; 御道口; 粒度; 环境变迁

中图分类号: P534.63⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)06-0074-07

Environment Changes revealed by grain size from Yudaokou in Bashang area since 8000 a B. P.

HUANG Shaokang¹, JIA Hongjuan², WU Junye¹, ZHANG Hao¹, YIN Zhiqiang³

(1. College Resources, Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031, China; 2. Experiment and Practice Teaching Center, Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031, China; 3. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract: Bashang Yudaokou area belongs to a fragile eco-environmental zone that is very sensitive to climate change. It is of great significance to understand the climate change background in this area. Grain size is sensitive to climate and environment changes. The results of grain size can infer sediment formation and environment conditions. The chronological was established by five AMS¹⁴C dating. The grain size samples were collected from 2.8 m section to reconstruct environment variability since 8 000 a B. P. The chronology of the section was determined based on five accelerator mass spectrometry (AMS) ¹⁴C dating. The studied section encompasses the periods of 8 000 ~ 180 a B. P.. Environmental changes can be divided into three stages since 8 000 a B. P. in the Yudaokou area: (1) 8 000 ~ 6 100 a B. P., the grain size indicates that the power is greater in this period, the dust is closer to the source area, the wind and sand activity is stronger. It is estimated that the climate is dry during this period and the regional vegetation is poor. (2) 6 100 a B. P. ~ 1 700 a B. P.. At this stage, the grain size indicates that the energy is small, the dust is farther from the

收稿日期: 2020-08-21; 修订日期: 2020-09-12

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20190310); 中国科学院战略性先导科技专项 (B 类) (XDB26020302); 河北省重点研发计划项目 (19224205D)

第一作者: 黄劭康 (1995-), 男, 硕士研究生, 专业为第四纪地质学。E-mail: 582968962@qq.com

通讯作者: 贾红娟 (1970-), 女, 博士, 教授, 从事第四纪地质学教学与科研工作。E-mail: jhjzjw@sina.com

source area, and the coarse matter is reduced. It is estimated that the climate is humid during this period, the regional vegetation is better, and the wind and sand activity is weakened. (3) 1 700 a B. P. ~ So far, the energy is relatively large, and the dust is relatively close to the source area. It is estimated that the climate is dry during this period, the regional vegetation is poor, and the sandstorm activity is strong.

Keywords: Holocene; Bashang area; Yudaokou; grain size; environment change

河北坝上地区承担着“为京津涵水源、阻沙源、提供生态支撑”的重大历史使命,是京津冀地区抵御浑善达克沙地南侵的最后一道防线。坝上地区位于季风区与非季风区交汇带,对气候变化非常敏感^[1],可较好地揭示未来可能增温背景下环境和生态系统对气候变化的响应。近几十年坝上地区植被退化、土地沙化、盐碱化面积不断增大,草原生态环境脆弱,自然湿地萎缩干化为碱滩、沼泽,永久湿地变为季节性湿地趋势明显,水源涵养保障能力弱化,旅游经济受到影响。坝上地区以人工林为代表的人工植被建设正面临一个严峻问题——土壤干旱化,认识本区气候变化对未来增温背景下采取应对措施有重要意义。

前人对该区环境有过一些研究,研究结果存在较多分歧,最主要的分歧是全新世湿润期的结束时间及温湿匹配。御道口牧场剖面研究显示此区 6 000 a 来经历 7 次明显变化^[2],但深 150 cm 的剖面只有 2 个年龄控制,7 个阶段年龄划分有欠缺。孙建中等^[3]研究显示 8 200 ~ 5 700 a B. P. 为湿润气候,5 700 ~ 4 600 a B. P. 为干冷气候,4 600 ~ 4 000 a B. P. 为温湿气候,4 000 ~ 3 500 a B. P. 为冷干环境,3 500 ~ 3 000 a B. P. 气候暖湿,3 000 a B. P. 以来气候干旱。齐惠慧等^[4]对安固里淖的研究结果表明:8 000 ~ 3 200 a B. P. 气候偏湿,3 200 ~ 0 a B. P. 气候干旱。邱维理等^[5]研究结果表明 6 230 ~ 5 300 a B. P. 是安固里淖湖面快速下降期,5 300 a B. P. 以来湖面波动性下降,此剖面 6000 年来只有 2 个年龄。翟秋敏等^[6]对安固里淖的研究结果显示:7 453 ~ 4 617 a B. P. 以湿润气候为主,但是存在相对干旱的时段(5 137 ~ 4 617 a B. P.);4 617 ~ 574 a B. P. 以干冷气候为主;574 a B. P. 以来,前期气候向湿润方向发展,但是在 383 a B. P. 以后又转为干旱。另外同一剖面不同代用指标结果相互矛盾,阳小兰等^[7]研究结果显示安固里淖 5 000 ~ 1 070 a B. P. 是气候相对湿润阶段,中世纪温暖期(1 070 ~ 620 a B. P.)气候干旱化明显,小冰期(620 ~ 45 a B. P.)干旱化及寒冷程度进一步加剧。刘林敬等^[8]对同一剖面的研究结果则显示:在 5 030 ~ 3 070 a B. P. 时期气候相对湿润;在 3 070 ~ 1 120 a B. P. 期间温暖指数逐渐

升高,降水减少;1 120 ~ 800 a B. P. 期间,较高的温暖指数指示气候相对温暖,降水量增加;800 ~ 270 a B. P. 期间,温暖指数的显著降低,降水减少。

综观这些研究,发现造成这些分歧的主要原因是剖面年龄数据少、分辨率低,不同研究者利用相同指标或不同指标数据解释存在差异,因此在未来可能增温的背景下,环境变化需进一步研究。本研究采用较高分辨率年代数据重建了御道口地区 8 000 a B. P. 以来的环境变迁。

1 研究区概况

御道口剖面(YDK 剖面:北纬 42°07′14.04″东经 117°00′47.94″,见图 1)位于河北承德市围场县西北部的坝上地区。此区属大陆性季风气候,据塞罕坝气象站多年气象数据,1 月平均气温 -21.76 ℃,7 月平均气温 16.28 ℃,年降水量在 258 ~ 652 mm 之间。该地区地貌上属内蒙古高原的东南边缘与冀西北山地的交汇带,在地质构造上为内蒙高原背斜面,属大兴安岭余脉^[9]。

2019 年 5 月,在水平方向选择第四系沉积物,垂直方向以 2.5 cm 间距,共采样 112 个。剖面深度及岩

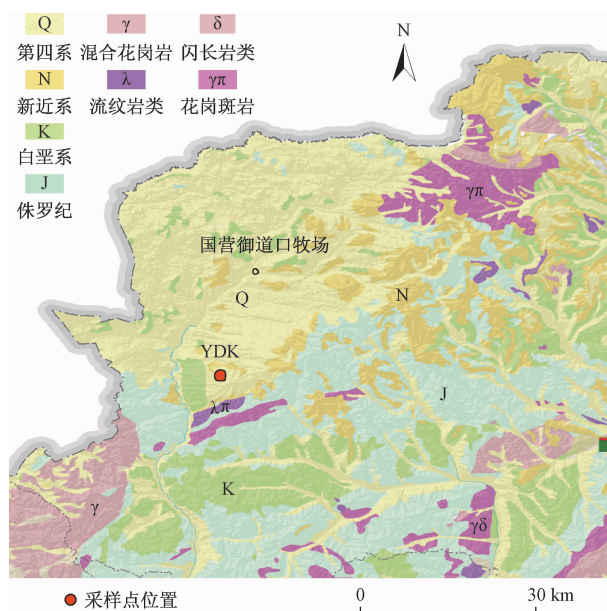


图 1 YDK 剖面位置

Fig. 1 Location of YDK section

性见图 2。

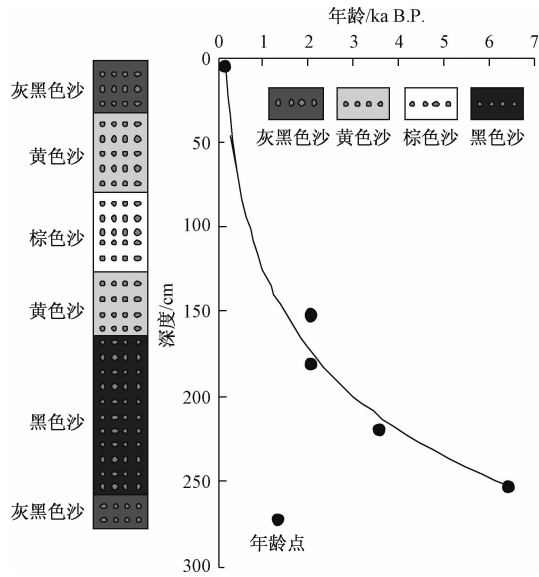


图 2 YDK 剖面岩性柱和年代-深度曲线

Fig. 2 Lithology, age-depth curve of YDK section

2 研究方法

2.1 粒度分析测试

根据样品粗细不同称取 0.1 ~ 1.5 g 放入 500 mL 干净烧杯中,加入 10 mL 30% 的 H_2O_2 摇匀。之后静置 1 ~ 2 h 使其充分反应,去除有机质。另加入 10 mL 10% 的 HCl 去除样品中碳酸盐,静置 12 h 后,抽去上层清液备用。加入 5 ~ 10 mL 1 mol/L $NaPO_3$ 超声振荡 10 min,用英国 Malvern 公司 Mastersizer3000 激光粒度仪分析。为保证实验精确性,将每个样品测量时的遮光度都控制在 2% ~ 20% 之间,并多次进行测量。粒度组分用 Grain Analysis 2013-01 软件进行提取^[10]。

2.2 年龄分析

剖面年龄标尺由 5 个 $AMS^{14}C$ 年龄控制,用全岩沉积物有机质进行 $AMS^{14}C$ 年代测定。测试工作由美国 Beta 实验室完成,结果见表 1,并对获得的年代通过 BetaCal3. 21;HPD method;INTCAL13 进行日历年校正。

表 1 YDK 剖面年龄测试结果

Table 1 Age result of YDK section

测年方法	深度/cm	测年材料	年龄/a B. P.
$AMS^{14}C$	6	有机沉积物	190 ± 30
$AMS^{14}C$	154	有机沉积物	$2\ 130 \pm 30$
$AMS^{14}C$	182	有机沉积物	$2\ 160 \pm 30$
$AMS^{14}C$	220	有机沉积物	$3\ 400 \pm 30$
$AMS^{14}C$	254	有机沉积物	$5\ 620 \pm 30$

剖面年龄框架通过采用回归插值法建立(方程为 $y = 177.68e^{0.0141x}$, $R^2 = 0.9873$)。校正后 YDK 剖面年龄跨度范围 184 ~ 8 000 cal. a B. P。

3 结果与分析

3.1 粒度分布曲线

御道口剖面粒度分布曲线主要有 a、b 两种类型(图 3)。每种分布图由不同的粒度组分组成,C1 粒径 $< 2\ \mu m$ 、C2 粒径 $2 \sim 15\ \mu m$ 、C3 粒径 $15 \sim 70\ \mu m$ 、C4 粒径 $70 \sim 700\ \mu m$ 。a 类型有 C1、C2、C3、C4 四种不同的组分;b 类型有 C2、C3、C4 三种不同的组分。

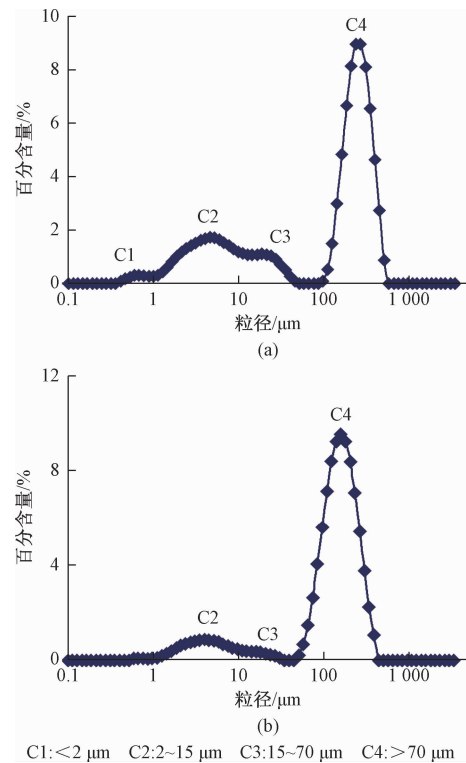


图 3 YDK 剖面主要粒度曲线类型及组分

Fig. 3 The main types and five components of grain-size distribution of the YDK section

3.2 各粒级标准偏差

在 $0.01 \sim 3\ 500.00\ \mu m$ 量程的基础上,利用对数划分方法,分出 100 个粒级,并计算出每个粒级含量在剖面上的标准偏差,绘制出粒级-标准偏差曲线图(图 4)。就整体而言,御道口剖面标准偏差曲线图中有三个峰值,分别在 $0.2\ \mu m$ 、 $8\ \mu m$ 、 $309\ \mu m$ 左右,最突出的峰值是 $309\ \mu m$,表明此组分可较好地指示剖面环境变化。

3.3 粒度对环境的指示意义及对环境变化敏感的粒径范围

粒度是沉积物机械组成的一个重要参数,粒度因

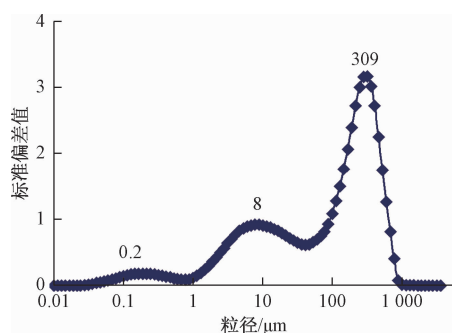


图4 YDK剖面粒级-标准偏差曲线图

Fig. 4 Grain size-standard deviation curve of YDK section

其明确的环境指示意义,成为恢复古气候、古环境的重要代用指标之一^[11]。不同粒级沉积物和沉降受不同的搬运力控制,因此实测的沉积物粒度数据可按照粒径区间进行划分,反过来作为沉积动力环境研究的重要依据。

一般情况下,较强的动力条件能搬运较大颗粒,反之只能搬运细颗粒。风成粉尘的大气动力学理论计算和实际观测都表明,几个微米以下的细粒组分可上升到几千米以内的任一高度作长距离的悬移,高空长距离悬浮是它的主要搬运方式。10~70 μm的粉砂组分则主要以短距离悬移方式搬运,砂和粉砂级粗粒组分(>70 μm)每次起动只能上升到近地表的几厘米到几米的高度,并在水平方向上跃移同样量级的距离,形成风成沙^[12]。

剖面沉积物粒径分布共有4个组分,分别为C1、C2、C3和C4,其中值粒径范围,C1粒径<2 μm、C2粒径2~15 μm、C3粒径15~70 μm、C4粒径70~700 μm。组分C1、C2代表了在流体介质中长期悬浮搬运组分和中粒悬浮组分,与湍流强度有关;C3是粉尘中重力沉降主导的粗粒悬浮组分;C4属粗粒跳跃组分^[13]。C1、C2、C3含量高地面植被好,能捕捉较多的悬浮颗粒,因此反映气候湿润;C4含量高说明悬浮颗粒少、跳跃颗粒多,反映地面植被差,指示气候干旱。

剖面所有样品同一粒级百分含量的标准偏差可指示该粒级含量的波动强度,标准偏差越大,表明该粒级颗粒含量在整个剖面中的变化幅度越大,可作为指示沉积特征变化的敏感组分^[14-15]。整体而言,剖面标准偏差曲线图中有三个峰值,分别在0.2, 8, 309 μm左右,最突出的峰值是309 μm,表明此组分可较好地指示剖面环境变化。剖面粗颗粒含量高,指示风力较大气候干旱,反之细颗粒含量高,指示风力较小气候湿润。

4 御道口地区 8 000 a B. P. 环境变化与区域对比

根据中值粒径(Md)、粒级-标准偏差、粒度分布、各粒级百分含量变化可将剖面划分为三个阶段(图5):

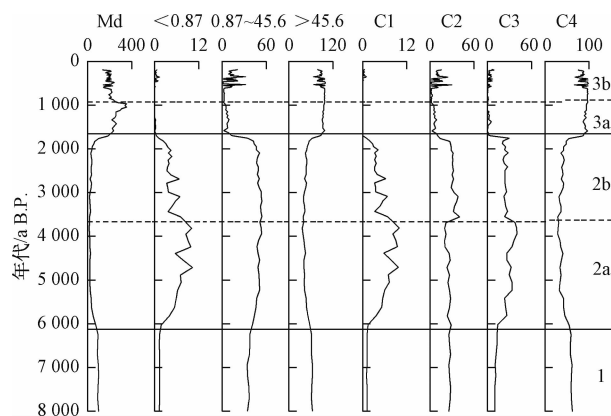


图5 御道口 YDK 剖面沉积物粒度指标特征随年代的变化

Fig. 5 Changes of the characteristics of sediment grain index with age in YDK section

第1阶段(8 000~6 100 a.B.P.)气候干旱:此时段粒度分布曲线主要为a型,Md值较大,波动较小,<0.87 μm百分含量较少,0.87~45.6 μm和>45.6 μm百分含量较多,各粒级百分含量变化不大。此时段C1、C3含量少,C2、C4含量高。此时段动力较大,粉尘距源区较近,风沙活动较强,携带较多粗颗粒物造成粒径较粗,气候干燥,区域植被较差。

此时段区域研究结果存在较大分歧,孙建中等通过研究坝上地区赋存的黄土与古土壤,古沙丘与古土壤和湖泊沉积物中的环境变化信息得出8 200~5 700 a.B.P.气候冷湿润^[3]。安固里淖研究结果显示8 000~6 000 a.B.P.以森林草原植被为主,气候湿润^[4]。呼伦湖重建降水量较高(图6e)^[16]。此阶段有些记录结果相反,达里湖 $\delta^{13}\text{C}$ 呈增加趋势,指示湖区大气湿度逐渐降低(图6g)^[17]。三江平原风沙含量8 000~6 200 a.B.P.较高,指示相对干旱^[18](图6h)。翁牛特磁化率值低,呈上升趋势,指示降水量少^[19](图6i)。

第2阶段(6 100~1 700 a.B.P.)为湿期:此阶段粒度分布线类型为a型,与第I阶段相比,Md减小,为剖面最低阶段,且减小的幅度较大,从90~100 μm减小到20 μm左右;<0.87 μm百分含量增加,从2%增长到7%左右;0.87~45.6 μm百分含量增加,为剖面

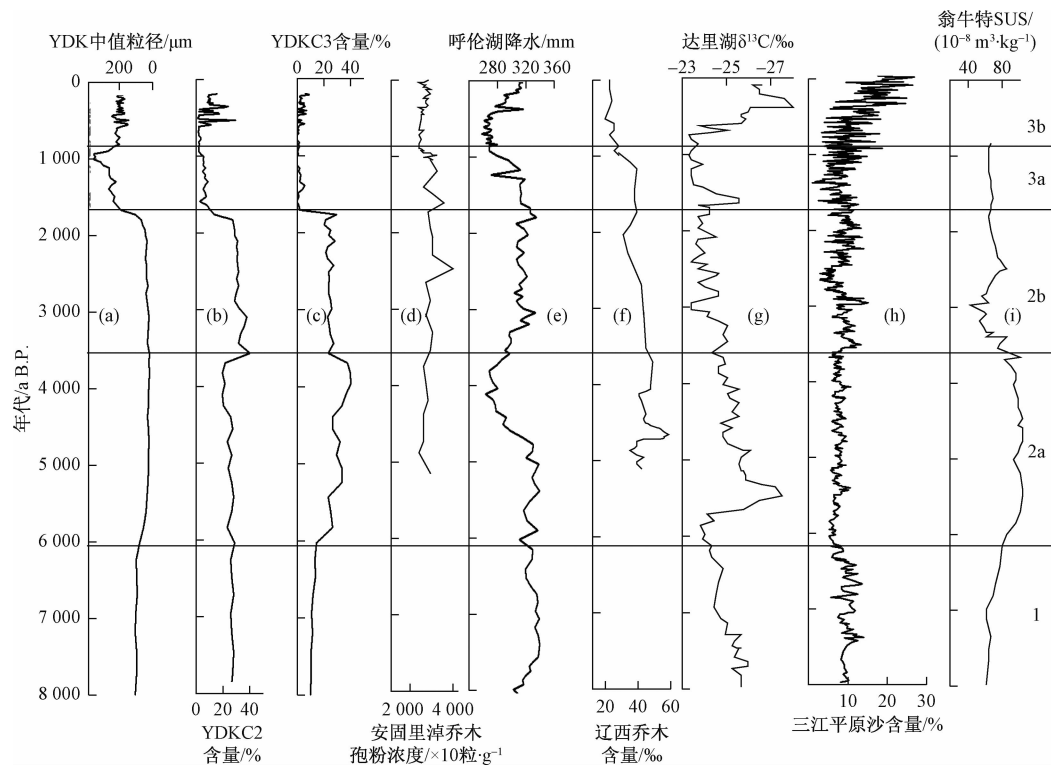


图6 YDK 剖面中值粒径和其他记录对比

Fig. 6 Comparison of the Md of this study with other records

最大阶段; $>45.6 \mu\text{m}$ 百分含量减小,含量减少了约 10%,为剖面最小阶段。此时段 C1、C2、C3 含量高,C4 含量低。此时段动力较小,粉尘距源区较远,粗颗粒物减少,估计此时段气候湿润,区域植被较好,风沙活动减弱。此时段以 3 700 a B.P. 为界可划分为两个亚段,2a 比 2b 小于 $0.87 \mu\text{m}$ 、C1、C3 含量高,Md 较小,应该更湿润。

此时段刘永慧等^[2]研究显示御道口地区 5 692 ~ 5 356 a B.P. 气候凉略湿,5 356 ~ 4 684 a B.P. 气候特征为凉干,4 684 ~ 947 a B.P. 气候变得相对略湿或湿。阳小兰等^[7]研究结果显示安固里淖 5 000 ~ 1 070 a B.P. 是气候相对湿润阶段(图 6d)。孙建中等^[3]研究结果显示此时段气候有多次波动,5 700 ~ 4 600 a B.P. 为干冷气候,4 600 ~ 4 000 a B.P. 为温湿气候,4 000 ~ 3 500 a B.P. 为冷干环境,3 500 ~ 3 000 a B.P. 气候暖湿,3 000 a B.P. 以来干旱。辽西地区 5 000 a B.P. 以来环境演变显示此时段乔木含量较高相对湿润,期间存在气候波动,5 000 ~ 4 400 a B.P. 环境为冷干,4 400 ~ 2 750 a B.P. 环境以温暖湿润为主,2 750 ~ 1 200 a B.P. 环境为冷干^[20](图 6f)。内蒙古呼伦湖定量重建降水量 6 100 ~ 1 700 a B.P. 大部分时间较高,4 400 ~ 3 350 a B.P.,湖区耐旱的藜科植物大量生

长,荒漠化十分严重,降水和温度都明显降低(图 6e)^[16]。内蒙古达里湖 $\delta^{13}\text{C}$ 指示湖区大气湿度较高,自高位波动下降^[17](图 6g)。三江平原风沙含量 6 200 ~ 1 700 a B.P. 较低,指示此时段相对湿润^[20](图 6h)。翁牛特 6 000 ~ 3 900 a B.P. 磁化率值高,指示植被覆盖好,气候相对湿润,3 900 a B.P. 之后磁化率降低^[19](图 6i)。内蒙古辉腾锡勒 5 390 ~ 3 300 a B.P. 气候偏湿,3 300 ~ 2 380 a B.P. 气候偏干,2 380 ~ 1 160 a B.P. 气候凉湿^[21]。内蒙古巴汗淖湖 6 100 ~ 3 400 a B.P. 气候温暖湿润,3 400 ~ 2 700 a B.P. 气候向干旱化方向发展,2 700 a B.P. 以来气候进一步变干^[22]。

尽管有些研究年代相差较远,但较高分辨率研究显示此时段大部分时间相对湿润。

第 3 阶段(1 700 a B.P. 至今)为干期:Md 为剖面最大阶段,Md 及各粒级百分含量波动明显,可以分为两个子阶段:

3a 阶段:(1 700 ~ 900 a B.P.):此时段粒度分布曲线主要为 b 型,1 700 a B.P. Md 迅速增大,由 $20 \mu\text{m}$ 增长到 $356 \mu\text{m}$ 左右, $<0.87 \mu\text{m}$ 百分含量为剖面最低, $0.87 \sim 45.6 \mu\text{m}$ 由 10% 下降到 3% 左右, $>45.6 \mu\text{m}$ 百分含量在 90% ~ 96% 之间,波动幅度不

大。此时段 C1、C2、C3 含量减少, C4 含量增加。

3b 阶段(900 a B. P. 至今): 此时段粒度分布曲线主要为 a 型, Md 与上一阶段比明显下降, 总体在 130 μm ~ 245 μm 之间波动。 <0.87 μm 百分含量仍较低, 大部分都在 2% 以内, 0.87 ~ 45.6 μm 和 >45.6 μm 两个粒级百分含量变化呈负相关, 含量比上一阶段增加。此时段 C1 含量少, C2、C3 含量增加, C4 高位波动。1 700 a B. P. 至今动力较大, 粉尘距源区较近, 估计此时段气候变干, 区域植被较差, 风沙活动强。

从区域研究结果看虽然年代略有差异但总体来说均显示此时段干旱。刘永慧等^[2]御道口牧场的研究结果显示 947 a B. P. 至今的气候总体为凉略干。阳小兰等^[7]认为安固里淖 1 000 a B. P. 以来, 干旱程度加剧(图 6d)。辽西地区 1 200 a B. P. ~ 现在环境干旱^[20](图 6f)。内蒙古辉腾锡勒 1160 a B. P. 以来气候向温凉偏干转变^[21]。呼伦湖最近 1 700 年里降水先减少后增加, 孢粉谱中伴人植物花粉藜科和禾本科同时大量出现, 而最近的 500 年里湖区气候逐渐向暖湿的方向发展^[16](图 6e)。藜科孢粉指示干旱, 其增长说明气候变干, 御道口剖面 900 年以来中值粒径比 1 700 ~ 900 a B. P. 小, 说明这一阶段是干旱时段里湿度略增阶段。达里湖 $\delta^{13}\text{C}$ 指示湖区大气湿度呈先低后高趋势(图 6g)和 YDK 剖面中值粒径变化趋势一致。三江平原风沙含量先减少后呈增加趋势指示气候逐渐变干。

5 结论

本文利用 5 个 AMS¹⁴C 年龄建立御道口剖面年代框架, 根据 112 个样品粒度数据, 重建了河北坝上御道口地区 8 000 a B. P. 以来的古环境古气候, 并把这 8 000 年分成 3 个阶段:

第一阶段: 8 000 ~ 6 100 a B. P., 此时段中值粒径较大, 细颗粒物百分含量低, 粗颗粒百分含量高, 各粒级百分含量变化不大。粒度指标指示此时段动力较大, 粉尘距源区较近, 风沙活动较强, 携带较多粗颗粒物造成粒径较粗, 估计此时段气候干燥, 区域植被较差。

第二阶段: 6 100 ~ 1 700 a B. P., 此时段中值粒径值为剖面最小阶段, 悬浮组分含量高, 粗颗粒物减少, 指示动力较小, 粉尘距源区较远, 估计此时段气候湿润, 区域植被较好, 风沙活动减弱。区域对比结果看此时段大部分时间湿润。

第三阶段: 1 700 a B. P. 至今, 中值粒径为剖面最大阶段, C4 含量高, 悬浮颗粒少、跳跃颗粒多, 动力较大, 粉尘距源区较近, 估计此时段气候变干, 区域植被较

差, 风沙活动强。从区域研究结果看虽然年代略有差异但总体来说近年来研究结果显示气候趋向于干旱。

参考文献 (References):

- [1] 孙建中, 杨明华. 河北坝上地区脆弱生态环境特征[J]. 中国沙漠, 1994, 14(4): 37 - 46. [SUN J Z, YANG M H. Fragile eco-environment characteristics in Bashang region, Hebei Province[J]. Journal of Desert Research, 1994, 14(4): 37 - 46. (in Chinese)]
- [2] 刘永慧, 田冶, 刘敖然, 等. 河北围场御道口地区中全新世以来古植被与古气候演变[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(1): 69 - 72. [LIU Y H, TIAN Y, LIU A R, et al. Variation of Paleovegetation and Paleoclimate since the Mid-Holocene in the Yudaokou area of Weichang County, Hebei Province[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(1): 69 - 72. (in Chinese)]
- [3] 孙建中, 盛学斌, 刘云霞. 坝上地区一万年来环境变化[J]. 第四纪研究, 2000, 20(3): 298. [SUN J Z, SHENG X B, LIU Y X. Environmental change during 10, 000 years in Bashang area [J]. Quaternary Sciences, 2000, 20(3): 298. (in Chinese)]
- [4] 齐惠慧, 刘兴起, 李华淑, 等. 河北安固里淖孢粉记录的晚冰期以来的植被演替与气候变化[J]. 第四纪研究, 2018, 38(5): 1203 - 1211. [QI H H, LIU X Q, LI H S, et al. The vegetation and climate changes since the late glacial period inferred from pollen record of a sediment core in Anguli-Nuur lake, Hebei Province [J]. Quaternary Sciences, 2018, 38(5): 1203 - 1211. (in Chinese)]
- [5] 邱维理, 翟秋敏, 扈海波, 等. 安固里淖全新世湖面变化及其环境意义[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 1999, 35(4): 542 - 548. [QIU W L, ZHAI Q M, HU H B, et al. Holocene water level changes of Angulinao lake and their environmental significance [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 1999, 35(4): 542 - 548. (in Chinese)]
- [6] 翟秋敏, 郭志永. 坝上高原安固里淖全新世沉积地球化学特征与环境变化[J]. 古地学报, 2002, 4(4): 55 - 61. [ZHAI Q M, GUO Z Y. Geochemical characters and environmental changes of Holocene sediments of Angulinao lake in Bashang Plateau [J]. Journal of Palaeogeography, 2002, 4(4): 55 - 61. (in Chinese)]
- [7] 阳小兰, 张茹春, 张振, 等. 安固里淖湖近 5 000 年来环境变化的孢粉及地球化学沉积记录[J]. 第四纪研究, 2017, 37(1): 130 - 142. [YANG X L,

- ZHANG R C, ZHANG Z, et al. Environmental change since 5000 cal. a B. P. in the Anguli-Nuur lake area based on Palynological and Geochemical records[J]. *Quaternary Sciences*, 2017, 37 (1): 130 – 142. (in Chinese)]
- [8] 刘林敬, 李长安, 介冬梅, 等. 中-晚全新世以来安固里淖气候演变的植硅体记录[J]. *地球科学*, 2018, 43(11): 4138 – 4148. [LIU L J, LI C A, JIE D M, et al. Paleoclimate recorded by Phytolith in Anguli-Nuur lake since Mid-Late Holocene [J]. *Earth Science*, 2018, 43(11): 4138 – 4148. (in Chinese)]
- [9] 唐海萍, 孙林, 李薇, 等. 河北省御道口牧场气候生产潜力估算[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2007, 43(2): 199 – 202. [TANG H P, SUN L, LI W, et al. Evaluation of the climatic potential productivity of Yudaokou pasture in Hebei Province [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2007, 43(2): 199 – 202. (in Chinese)]
- [10] QIN X G, CAI B G, LIU T S. Loess record of the aerodynamic environment in the east Asia monsoon area since 60,000 years before present[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(B1): B01204.
- [11] 贾红娟, 汪敬忠, 秦小光, 等. 罗布泊地区晚冰期至中全新世气候特征及气候波动事件[J]. *第四纪研究*, 2017, 37(3): 510 – 521 [JIA H J, WANG J Z, QIN X G, et al. [JIA H J, WANG J Z, QIN X G, et al. Climate and abrupt events recorded in the Lop-Nur Region from Late Glacial to the Middle Holocene[J]. *Quaternary Sciences*, 2017, 37 (3): 510 – 521. (in Chinese)]
- [12] PYE K. *Aeolian dust and dust deposits* [M]. London, Academic Press, 1987: 29 – 117.
- [13] 殷志强, 秦小光, 吴金水, 等. 中国北方部分地区黄土、沙漠沙、湖泊、河流细粒沉积物粒度多组分分布特征研究[J]. *沉积学报*, 2009, 27(2): 343 – 351. [YIN Z Q, QIN X G, WU J S, et al. The multimodal grain-size distribution characteristics of loess, desert, lake and river sediments in some areas of Northern China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27 (2): 343 – 351. (in Chinese)]
- [14] 孙有斌, 高抒, 李军. 边缘海陆源物质中环境敏感粒度组分的初步分析[J]. *科学通报*, 2003, 48(1): 83 – 86. [SUN Y B, GAO S, LI J. Primary analysis on the sensitive grain size of terrigenous sediment to environments in marginal sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(1): 83 – 86. (in Chinese)]
- [15] 肖尚斌, 李安春. 东海内陆架泥区沉积物的环境敏感粒度组分[J]. *沉积学报*, 2005, 23(1): 122 – 129. [XIAO S B, LI A C. A study on environmentally sensitive grain-size population in Inner Shelf of the East China Sea [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(1): 122 – 129. (in Chinese)]
- [16] 温锐林, 肖举乐, 常志刚, 等. 全新世呼伦湖区植被和气候变化的孢粉记录[J]. *第四纪研究*, 2010, 30(6): 1105 – 1115. [WEN R L, XIAO J L, CHANG Z G, et al. Holocene vegetation and climate changes reflected by the Pollen record of Hulun Lake, North Eastern inner Mongolia [J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(6): 1105 – 1115. (in Chinese)]
- [17] 范佳伟, 肖举乐, 温锐林等. 内蒙古达里湖全新世有机碳氮同位素记录与环境演变[J]. *第四纪研究*, 2015, 35(4): 856 – 871. [FAN J W, XIAO J L, WEN R L, et al. Holocene environment variations recorded by stable carbon and nitrogen isotopes of sedimentary organic matter from Dali lake in Inner Mongolia [J]. *Quaternary Sciences*, 2015, 35 (4): 856 – 871. (in Chinese)]
- [18] ZHANG Z Q, YAO Q, LIU K et al. Hydrological regime responses to Holocene East Asian summer monsoon circulation in marshes of the Sanjiang Plain, NE China [J]. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(2): 240 – 251.
- [19] MU Y, QIN X G, ZHANG L, et al. A preliminary study of Holocene climate change and human adaptation in the Horqin region [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(6): 1784 – 1791.
- [20] 张小咏. 5000 a B. P. 以来辽西地区环境演变与人类关系研究 [D]. 大连: 辽宁师范大学, 2003. [ZHANG X Y. Environmental evolution and the human-environment relationship in western Liaoning since 5000 a B. P. [D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2003. (in Chinese)]
- [21] 赵志丽, 王永, 迟振卿, 等. 内蒙古辉腾锡勒全新世中晚期环境变迁的孢粉记录[J]. *地质力学学报*, 2011, 17(1): 103 – 110 [ZHAO Z L, WANG Y, CHI Z Q, et al. Environmental changes recorded by pollen since mid to late Holocene in Huitengxile lake, Inner Mongolia [J]. *Journal of Geomechanics*, 2011, 17(1): 103 – 111. (in Chinese)]
- [22] 黄昌庆. 巴汗淖湖孢粉记录的鄂尔多斯全新世环境演化 [D]. 兰州: 兰州大学, 2007. [HUANG C Q. Holocene Palaeo environment changes in the Ordos Plateau recorded by pollen of Baahar Nuur lake [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2007. (in Chinese)]