

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020081701

泥河湾盆地吉家庄遗址地层易溶盐沉积记录的古气候信息

李潇丽

北京自然博物馆, 北京 100050

摘要: 泥河湾盆地发育晚新生代河湖相沉积并记录了华北更新世人类活动历史。近年来的发现表明, 作为盆地重要组成部分, 蔚县盆地是解读中更新世古人类行为演化与环境适应的关键区域。吉家庄遗址地处蔚县盆地东部吉家庄-黄梅台地古人类活动集中区, 是近年来新发现和发掘的中更新世古人类活动遗址之一。对遗址湖滨相沉积物易溶盐的测试和分析表明, 此剖面代表的泥河湾古湖易溶盐为 HCO_3^- - SO_4^{2-} - Na^+ 型, pH 值平均为 8.93, 偏碱性; 剖面平均含盐量为 0.67%, 属于半咸水湖, 指示半干旱区湖泊演化由碳酸盐湖向硫化物湖过渡阶段。 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等 5 类离子的变化曲线与剖面沉积物易溶盐总含量变化大体一致。依据易溶盐主要离子比值和碳酸盐碳、氧稳定同位素含量, 并结合沉积物特点将湖泊气候演化划分为 4 个阶段, 记录了气候由相对冷湿→凉干→相对温暖湿润的变化过程, 古人类在该遗址活动时期对应于湖泊演化的第 2 阶段早期, 处在古湖水水位降低且气候向干凉转变的湖滨环境。该项研究对探讨泥河湾古湖的演化以及蔚县盆地吉家庄遗址利用者的生存行为与气候关系具有重要意义。

关键词: 易溶盐; 人类活动; 中更新世; 吉家庄遗址; 泥河湾盆地

中图分类号: P532

文献标识码: A

Paleoclimatic evidence inferred from soluble salt deposits in the Pleistocene sediments at Jijiazhuang site, Nihewan Basin

LI Xiaoli

Beijing Museum of Natural History, Beijing 100050, China

Abstract: The Nihewan Basin, a Late Cenozoic basin in North China filled by fluvio-lacustrine deposits, preserves a large number of Pleistocene archaeological sites, which well recorded the occupation history of early hominins. The Yuxian Basin, as a major part of the Nihewan Basin (*sensu lato*), is a key region for study of such a relationship between early hominin evolution and climatic changes during Middle Peistocene. The Jijiazhuang site is a newly discovered site complex of human occupation, located in the center of the Jijiazhuang-Huangmei fluvio-lacustrine platform in the northeast Yuxian Basin. It was discovered in 2003 and excavated three years later. The Jijiazhuang-B section (JJZ-B), a key section of the Jijiazhuang site complex, is located along a lake shore. The section includes the fluvio-lacustrine fine sand, silt, and clay of brown-grey, brown-yellow, grey-green, dark-grey in color, capped by loess, with a total thickness of more than 20 m. Based on the soluble salts and stable C-O isotopes from carbonate deposits of the section, the studies of hydro-chemical and climatic evolution as well as human activities are carried out by the author. The results suggest that the Paleo-Nihewan lake at the section of JJZ-B site is characterized by HCO_3^- - SO_4^{2-} - Na^+ ions, and the average content of the total soluble salts is around 0.67%, which indicate a brackish paleo-lake in a carbonate and sulphate phase of lake evolution in a semi-arid area. The variation and distribution patterns of SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} are well correlated with the total content of soluble salts. Upon the basis and by the changes in total soluble salt and soluble salt indicators as well as the content of carbonate $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$, four paleo-climatic stages corresponding to paleohydro-climatic changes of the lake were recognized: 1) the stage relatively cold and humid with a high lake water level; 2-3) the stages relatively cool and dry with a low lake water level and 4) the warm and humid stage with relatively high lake water level. The period occupied by early hominins corresponds to the early episode of stage 2 after the recession of the lake level evidenced by the sporadic lithic artifacts discovered, and the possible behaviors of animal dismemberment and

资助项目: 国家自然科学基金项目“蔚县盆地吉家庄遗址古人类技术与行为特征及其环境适应”(41872029); 中国科学院战略性先导科技专项(B类)“关键地史时期生物与环境演变过程及其机制”(XDB26000000); 科技部国家重点研发计划“以泥河湾盆地为重点的华北早期人类演化与适应研究”(2020YFC1521500)

作者简介: 李潇丽(1969—), 女, 研究员, 第四纪地质专业, E-mail: lixiaoli2002@sohu.com

收稿日期: 2020-08-17; **改回日期:** 2020-09-03. 文凤英编辑

utilization. In conclusion, the results bear great significance to the research of the adaptive environment and behaviors adopted by early hominins at the Jijiazhuang site and even the Yuxian Basin.

Key words: soluble salt; human occupation; Middle Pleistocene; Jijiazhuang site; Nihewan Basin

1 区域地质概况

早期人类活动区域的湖泊古气候-水文环境变化与古人类活动密切相关。泥河湾盆地(广义)地处黄土高原东北部边缘,蒙古高原向华北平原过渡地带,属大陆性季风气候。盆地属汾渭裂谷东北端的一个晚新生代断陷盆地^[1-2],地理范围西起山西朔州-大同,向东延伸至河北阳原和蔚县,包括大同盆地、泥河湾盆地[(狭义,也称阳原盆地)]和蔚县盆地^[3](图1a)。蔚县盆地地处泥河湾盆地的东南部,近年来的调查和发掘显示,该区域是早期人类活动的重要区域,其中盆地东北部的吉家庄-黄梅一带聚集了大量早期人类活动遗址,是研究泥河湾盆地(广义)乃至华北中更新世环境变化与人类适应行为的重要地区^[4-5]。在晚新生代漫长的地质历史中,蔚县盆地曾构成了泥河湾古湖的一部分,自早更新世初期,通过壶流河地堑与北侧的阳原盆地,共同组成一个较大的湖^[6-7]。盆地在早更新世至晚更新世早期一直保存有湖水,并发育河湖相地层;晚更新世早期以后,受控于构造抬升和溯源侵蚀,湖水逐渐消失,河湖相地层停止发育,上部覆盖了马兰期黄土沉积^[8-9]。

湖泊是陆地水圈的重要组成部分,与大气圈、

生物圈和岩石圈有密切联系。湖泊沉积物岩性和多种化学指标的变化,记录了其形成、发展和消亡的过程,被认为是过去环境变化的信息库。以 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 和 Cl^- 等8类离子为主的易溶于水的盐类,占天然水离子总量的95%以上,且常保存在湖泊沉积物中^[10]。一般来讲,湖水的化学性质多受区域气候条件的影响,易溶盐的含量常可反映湖水的化学特征^[11]。因此,湖泊沉积物中的易溶盐含量特征,不仅可以重建古湖水的性质,而且可揭示古水文特征与气候变化。碳酸盐是湖泊沉积物的重要化学组分之一,在沉积物中含量较高且分布广泛,其碳和氧稳定同位素组成对气候变化较为敏感,是揭示湖泊气候变化的理想指标^[12-13]。近年来,在内陆湖泊沉积物研究领域,易溶盐常作为一种替代性指标,在揭示湖泊气候和环境变化领域效果明显^[14-16]。在对泥河湾古湖的性质、演化阶段和古环境研究过程中,易溶盐发挥了重要作用^[17];同时,以探讨泥河湾古湖性质和古水文状况与人类活动关系为出发点,易溶盐含量在揭示东谷坨遗址^[18]与麻地沟遗址^[19]的研究中同样取得了理想的结果。因此,易溶盐分析在揭示泥河湾古湖气候、环境演化与人类活动关系方面是一项重要手段。

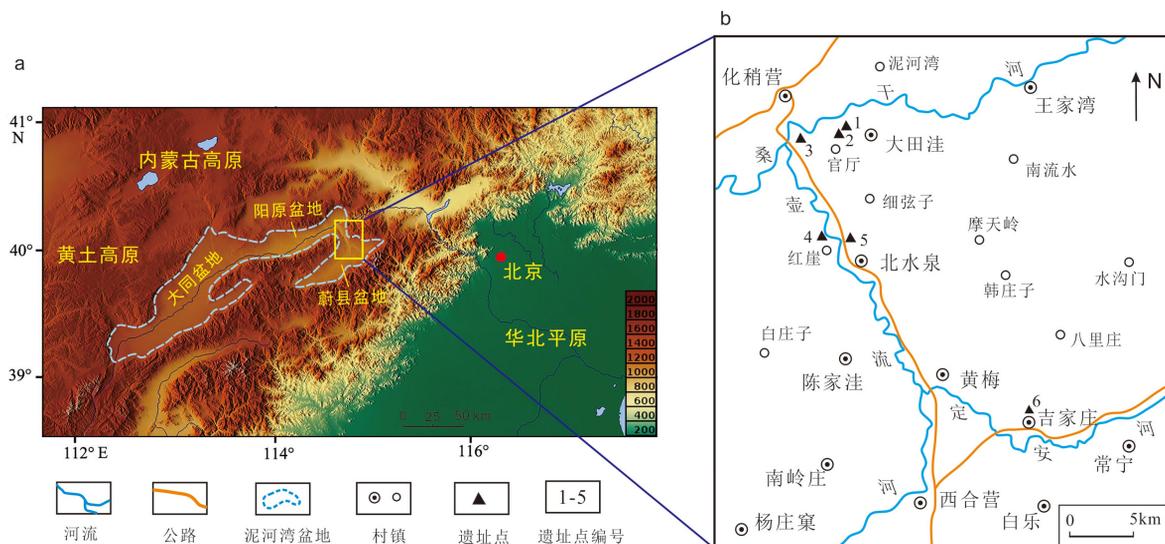


图1 泥河湾盆地吉家庄遗址-B地点地理位置图

1-东谷坨遗址, 2-麻地沟遗址, 3-小渡口, 4-红崖南沟, 5-铺路, 6-吉家庄遗址。

Fig.1 Geographic map of the Jijiazhuang site, Nihewan basin

1-Donggutuo site, 2-Madigou site, 3-Xiaodukou, 4-Hongya Nankou, 5-Pulu, 6-Jijiazhuang site.

吉家庄遗址位于蔚县吉家庄镇北侧的河湖相地层内,地理坐标为 $40^{\circ}01'18''\sim 21^{\circ}N$ 、 $114^{\circ}51'01''\sim 47^{\circ}E$,海拔910~920 m(图1b),是近年来发现和发掘的重要古人类活动遗址,对揭示蔚县盆地中更新世古人类演化、生存行为及其环境适应具有重要的学术价值^[4]。野外发掘显示,泥河湾古湖的湖滨相沉积保留了丰富的古人类活动遗物^[5],沉积物蕴含的气候变化信息对古人类活动产生了重要影响。因此,本文对遗址剖面地层进行易溶盐与碳酸盐碳氧稳定同位素分析,揭示吉家庄遗址中更新世古人类活动阶段的古水文状况、气候变化及其与早期人类活动的关系。

2 吉家庄遗址地层与年代

2.1 地层

蔚县盆地为四面环山的山间断陷盆地,总面积约4315 km²。盆地地势在西合营一带最低,向四周逐渐升高,海拔高度为880~980 m。壶流河自山西广灵自西向东横贯蔚县盆地西部,在西合营向北经北水泉于阳原县小渡口汇入桑干河。作为壶流河的支流,定安河自盆地东部的逐鹿县大堡向西流经蔚县桃花,在吉家庄折向西北,在黄梅乡小枣碾汇入壶流河(图1a、b)。作为泥河湾古湖的重要组成部分,蔚县盆地在早—中更新世属于内陆断陷湖泊,断层活动的作用导致湖泊发育晚期盆地边缘地带整体抬升^[6-7],湖水逐渐消亡。目前,盆地内壶流河-定安河以南为小五台山山前冲洪积扇,地形相对平缓;壶流河-定安河东北为洪积-湖积台地^[5]。定安河和壶流河的下切使得该台地的泥河湾河湖相堆积出露,其中吉家庄-黄梅-北水泉区域河湖相地层出露良好,是以往开展地质和古生物研究相对较多的区域,吉家庄遗址就位于这个区域。

吉家庄遗址位于河北省蔚县吉家庄镇北侧的河湖相地层陡坎内,定安河支流长沟切割河湖相沉积,形成高约20 m的剖面。遗址由A、B、C、D和E共5个地点组成,其中吉家庄B(JJZ-B)地点揭露典型河湖相地层,出土早期人类活动留下的石制品和动物化石,是揭示古人类生存行为和环境适应的关键遗址^[5]。遗址周边地层主体为河湖相沉积,由灰-灰绿-灰黄色细砂、粉砂和黏土组成,顶部为后期马兰期黄土覆盖,厚度超过20 m。其中JJZ-B地点揭露地层厚度12 m,地层剖面自上而下依次为(图2):

① 褐黄色黄土,发育柱状节理,层内可见钙

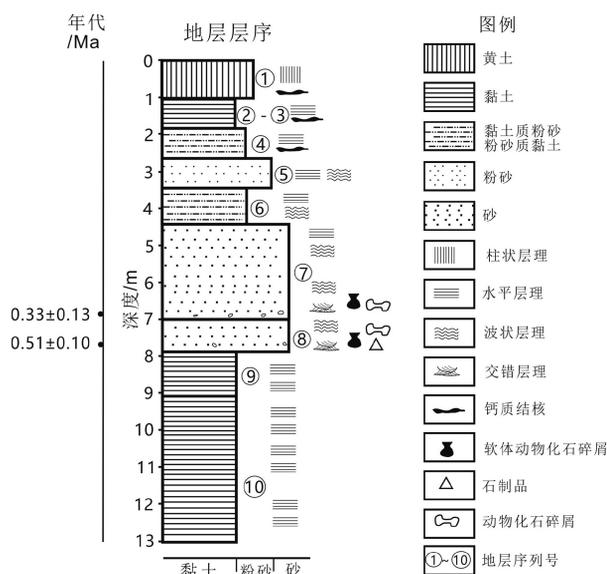


图2 吉家庄遗址-B地点地层剖面

Fig.2 JJZ-B section at the Jijiazhuang-B site

质结核,结构疏松,顶面为农田和果树,与下伏地层不整合接触,厚2.0~3.0 m。

② 棕灰色黏土,致密坚硬,钙质结核零星分布于层内,层内可见水平层理,与下伏地层整合接触,厚0.3~0.4 m。

③ 灰黑—灰绿色黏土,结构致密,胶结坚硬,发育水平层理,本层横向分布稳定,与下伏地层整合接触,厚0.4 m。

④ 棕红—棕黄色粉砂质黏土,结构致密,胶结坚硬,上部夹厚约10 cm的钙质结核层,层内发育弱的水平层理,与下伏地层整合接触,厚0.8~1.0 m。

⑤ 灰红—棕黄色粉砂,结构致密,胶结坚硬,层内发育黄色铁质浸染锈斑,层内可见弱的波状层理和水平层理,与下伏地层整合接触,厚0.8~1.0 m。

⑥ 棕黄色粉砂质黏土,致密坚硬,黄色锈斑浸染呈条带状分布于下部层位,层内发育弱的水平层理和波状层理,与下伏地层整合接触,厚1.0~1.2 m。

⑦ 棕灰色细砂,粒度均一,层内偶见黄色锈斑条带,发育弱的水平层理和波状层理。底部偶见粗砂,可见小规模斜层理,对下伏地层有冲刷现象,接触面可见泥砾,出土零星哺乳动物化石和螺类化石碎屑,厚2.4~2.6 m。

⑧ 棕灰—棕黄色砂层,层内发育黄色锈斑,波状层理和交错层理可见,螺类化石碎屑不均匀分布在层内,与下伏地层接触面起伏不平,有冲

刷改造现象。石制品和动物化石出土于本层下部,厚0.7~0.9 m。

⑨ 灰黄—棕灰—灰绿色黏土,结构致密,胶结坚硬,层内发育黄色锈斑,层内可见弱的水平层理,与下伏地层整合接触,厚1.0~1.5 m。

⑩ 灰绿—灰黑色黏土,结构致密,层内偶见黄色锈斑,发育弱的水平层理,未见底,厚度>3.0 m。

JJZ-B地点剖面揭露的泥河湾河湖相地层总体沉积物为细砂、粉砂和黏土,粗颗粒的砂层常发育斜层理,指示地层沉积过程中曾有较强水流的参与;在粉砂层和黏土层内常可见弱的波状层理和水平层理,指示此类沉积物堆积时水动力条件较弱;同时,地层内发育黄色铁质浸染的锈斑,显示湖滨沉积环境的特点。在剖面第8层下部出土丰富的古人类活动遗物。

2.2 年代

泥河湾盆地以出露华北第四纪河湖相堆积为学术界所关注,河湖相地层上部为马兰期黄土覆盖。吉家庄周边的河湖相堆积出土丰富的哺乳动物化石,显示中更新世动物群的特点,以披毛犀、草原野牛、马和鹿等食草类动物群成员居多。在发掘过程中,我们用铝铍埋藏测年法对遗址剖面采集了样品, $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ 测年的初步结果显示,古人类在该遗址活动的年代大致为 $(0.33\pm 0.13)\sim(0.51\pm 0.10)$ MaBP,属中更新世。

3 样品采集与测试

发掘过程中,作者清除剖面上部松散沉积物,以10 cm为样品间距,自上而下连续采集第1至9层地层样品(图2)。本剖面共采集样品85个,均进行易溶盐含量测试。

样品的易溶盐和pH值的检测过程按照相关实验室测定标准进行^[17-19],易溶盐离子的浓度单位以mg/L表示。

样品碳氧稳定同位素测试首先用玛瑙研钵将含有碳酸盐胶结物的样品研磨至200目,烘箱105℃温度烘烤样品2 h,去除吸附水。在75℃下烘烤Gasbench在线制样设备的样品管,烘干后将含有约0.2 mg碳酸盐胶结物的样品放入样品管中并封盖。用高纯氦气将样品管中的空气排出。用酸泵酸针向样品管中加过量的100%磷酸。在25℃时磷酸与样品中的方解石反应产生 CO_2 气体,用高

纯氦气将生成的 CO_2 气体带入MAT253质谱仪测试方解石的C、O同位素组成。然后再进行排空气步骤,在75℃时磷酸与样品中的白云石反应产生 CO_2 气体,用质谱测量白云石的C、O同位素组成。每5个样品加入一个标准,用参考气对其比对测试,测量结果以PDB为标准,记为 $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ (精度优于0.1‰), $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}$ (精度优于0.2‰)。碳酸盐样品的标准为GB04416($\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}=(1.61\pm 0.03)\%$; $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}=(-11.59\pm 0.11)\%$)及GB04417($\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}=(-6.06\pm 0.06)\%$; $\delta^{18}\text{O}_{\text{VPDB}}=(-24.12\pm 0.19)\%$)。

在室内分析过程中,考虑到上部1 m为后期的马兰期黄土堆积,并非湖相沉积,故本文仅对第②—⑨层的数据进行分析,以解释泥河湾古湖的化学性质和古气候信息。

4 测试结果

4.1 易溶盐实验结果

从表1所示实验分析数据来看,吉家庄B地点所代表的剖面指示的泥河湾古湖总体属于 HCO_3^- - SO_4^{2-} - Na^+ 型,剖面总含盐量为66.7~490.0 mg/L,平均值为133.4 mg/L。碳酸氢根离子(HCO_3^-)为易溶盐主要的阴离子,含量为43.1~96.2 mg/L,平均值为69.1 mg/L,硫酸根离子(SO_4^{2-})和氯离子(Cl^-)次之,平均含量分别为24.9和13.0 mg/L,碳酸根离子(CO_3^{2-})含量最低,平均值仅为7.9 mg/L。阳离子以 Na^+ 为主,含量为9.9~73.1 mg/L,平均值达到22.3 mg/L, Mg^{2+} 、 K^+ 和 Ca^{2+} 相对较少,但含量相差不大,平均值分别为10.4、9.9和8.2 mg/L。剖面含

表1 吉家庄B地点地层剖面易溶盐各离子含量
Table 1 Dominant ions in soluble salt from JJZ-B site

主要离子	最小值/ (mg/L)	最大值/ (mg/L)	平均值/ (mg/L)	标准偏差
HCO_3^-	43.1	96.2	69.1	4.7
CO_3^{2-}	2.5	13.65	7.95	3.1
Cl^-	1.5	78.15	13.0	8.9
SO_4^{2-}	2.2	225.0	24.9	80.6
Na^+	9.9	73.1	22.3	28.1
K^+	5.1	12.6	9.2	0.8
Ca^{2+}	3.7	28.1	8.2	5.9
Mg^{2+}	4.4	42.6	10.4	3.7
含盐量	66.7	490.0	133.4	135.3

盐量(以 mg/kg 计算)为 0.33%~2.45%, 平均值为 0.67%。按照湖盆盐度指示不同湖水性质的标准(盐度<0.3%为淡水湖, 0.3%~24%为半咸水湖, >24%则为咸水湖^[20])来看, 吉家庄遗址所对应的泥河湾古湖属于半咸水湖。此外, 湖泊沉积物中的含盐量常可指示湖水的化学特征及湖泊演化阶段, 随着气候向干旱化方向发展, 湖水逐渐浓缩, 主要离子常呈现以 Ca^{2+} - HCO_3^- - CO_3^{2-} 为主→以 Mg^{2+} - Ca^{2+} - SO_4^{2-} 为主→以 Na^+ - K^+ - Cl^- 为主的演化过程^[21]。因此, 吉家庄 B 地点剖面易溶盐总体特征(HCO_3^- - SO_4^{2-} - Na^+ 型)指示该剖面所示的泥河湾古湖属于碳酸盐湖向硫酸盐湖的过渡阶段。相关研究表明, 泥河湾古湖浅湖区古湖水性质以 SO_4^{2-} - Ca^{2+} - Mg^{2+} 为主, 早期是半咸水湖, 以井儿洼和雪儿沟剖面(图 1c)为代表(平均含盐量分别为 44.3 和 22.1 mg/g), 晚期易溶盐则以 Cl^- - Na^+ - K^+ 为主, 指示湖水盐度增加^[17]。而湖滨区由于受河川和湖水位的变化影响, 其易溶盐数值较低且存在波动, 以红崖南沟和铺路剖面(图 1b)为代表(平均盐量分别为 17.2‰和 17.9‰)。从古人类活动遗址的剖面来看, 处于湖滨区的东谷坨遗址剖面含盐量(图 1b)仅为 0.6 mg/g^[18], 与东谷坨遗址相距仅 400 m 的麻地沟遗址剖面(图 1b)的易溶盐平均含量为 11.4 mg/g^[19]; 吉家庄 B 地点代表的泥河湾古湖盐度与东谷坨遗址剖面的易溶盐含盐量接近, 此现象可能是由于两处遗址同处于泥河湾古湖边缘地带, 属于湖滨环境, 沉积颗粒总体较浅湖区偏粗, 颗粒比表面积较小, 造成颗粒吸附盐分能力降低所致; 同时, 湖滨区常有地表降水补给和径流发育, 对沉积物含盐量有稀释作用, 也可能

是导致浅湖区含盐量较低的原因。

吉家庄 B 地点剖面所揭示的泥河湾层 pH 值为 8.1~9.5, 平均 8.9, 偏碱性。陈茅南^[20]对整体泥河湾层的 pH 值的测定结果为 6.9~9.7, 总体趋于偏碱性。吉家庄遗址一带的泥河湾古湖 pH 值均高于阳原盆地东部的麻地沟遗址平均值(8.0)和东谷坨遗址 pH 平均值(8.7)^[18-19], 也高于阳原盆地东部岑家湾台地西缘的小渡口泥河湾层(图 1b)的 pH 平均值 8.6^[22]。鉴于吉家庄遗址的年代处在中更新世中后期, 已属于泥河湾古湖演化的晚期, 因此推测古湖演化后期碱性有增加的趋势。

4.2 古湖易溶盐诸离子纵向变化特征

半干旱区内陆湖泊蒸发作用常超过大气降水的补给, 蒸发与降水的补给关系改变着 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 等主要离子的构成以及含盐量的变化, 各离子含量沿剖面的纵向变化特征与湖泊的演化密切相关^[17]。图 3 为不同离子与含盐量沿剖面的纵向变化趋势, 其中 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等 5 类离子的变化曲线与总含盐量的变化呈现较大的一致性; 但 HCO_3^- 离子含量变化与上述离子却呈现负相关, 该离子总量在该剖面整体处于一个较高值而波动, 后期进一步降低。

从图 3 所示的不同离子随剖面深度的变化曲线来看, 吉家庄遗址剖面所揭示的泥河湾古湖易溶盐演化可大致划分为 A→D 共 4 个阶段。A 阶段为剖面的 7.8 m 以下沉积, 此阶段剖面含盐量总体处于一个相对较低的阶段, 且表现为一个逐渐降低的趋

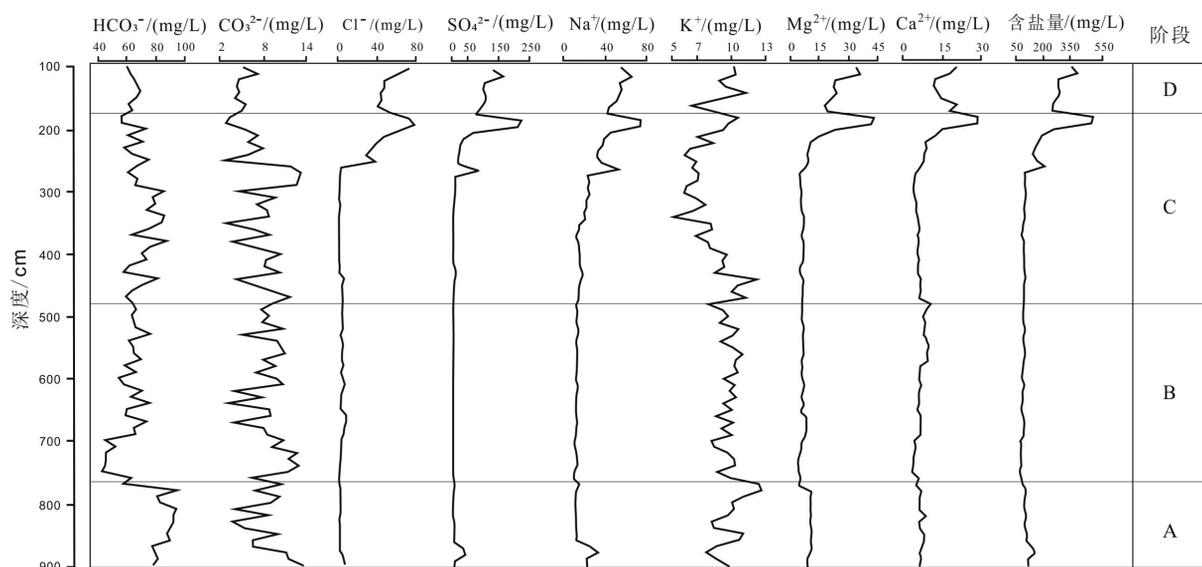


图 3 吉家庄遗址地层剖面易溶盐各离子含量变化曲线

Fig.3 Vertical distribution patterns of soluble salts along the section of JJZ-B site

势, 优势阴离子 HCO_3^- 处于高值而波动, SO_4^{2-} 和 Cl^- 处于剖面的低值且保持稳定; 阳离子 Na^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 均处于剖面的相对低值且保持稳定, 而 K^+ 处于相对的低值且波动明显。B 阶段处于剖面的 4.9~7.8 m, 该阶段含盐量和 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 等离子处于相对低值且含量较为稳定; 优势阴离子 HCO_3^- 由剖面的最低值而缓慢升高, 但波动明显, 其他离子除含量低的 CO_3^{2-} 和 K^+ 离子处于剖面的相对高值而波动明显外, 其他离子包括 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 均处于剖面的最低值且保持稳定。C 阶段处于剖面的 1.8~4.9 m, 该阶段含盐量与 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 等 5 类离子的变化相似, 表现为由低到高的变化过程, 后期达到剖面的最高值; 优势阴离子 HCO_3^- 在相对高值波动, CO_3^{2-} 离子则表现为由高到低的急剧波动并缓慢降低; K^+ 离子表现为由高到低再升高的波动变化趋势。D 阶段为剖面的 1.0~1.8 m 沉积, 该段含盐量与 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 等 5 类离子变化趋势总体一致, 呈现由低到高的过程, 但变化幅度相对较小, 后期未达到 C 阶段后期的剖面最高值; K^+ 离子表现为由低到高的波动趋势, 而 HCO_3^- 则表现为一个由高而缓慢降低的变化趋势, CO_3^{2-} 离子处于一个相对的低值而缓慢升高。

总之, 从优势阴离子 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 离子的变化趋势来看, 前者较高、波动明显, 至后期降低, 而后者前期较为稳定, 至后期升高至相对的高值; 同时, CO_3^{2-} 和 Cl^- 离子的变化也表明, CO_3^{2-} 逐渐降低, Cl^- 和 SO_4^{2-} 离子逐渐升高。优势阳离子的变化表明, 除 Na^+ 离子的含量缓慢升高达到剖面的最大值外, 其他阳离子的含量则相对较低, 不及优势阴离子的含量。上述演化趋势表明湖水性质处于自碳酸盐湖向硫酸盐湖演化的过渡阶段, 由于 Cl^- 离子的总体含量较低, 推测该时期的泥河湾古湖尚未达到氯化物湖阶段。

5 古人类活动时期的气候变化

吉家庄遗址剖面处于泥河湾古湖湖滨环境, 是地表水和湖水交互作用频繁区域。根据各主要离子比值与沉积物碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 含量, 并结合沉积物特点, 作者尝试解读古人类活动时期古气候及湖水化学性质变化过程。

5.1 湖泊沉积物代用指标的意义

内陆半干旱区湖泊沉积物中含盐量变化反映

了区域内湖面蒸发量与补给的关系, 同时指示了古气候变化与干湿的气候轮回^[15-17]。 Cl^- 离子对封闭湖盆气候变化非常敏感, 随流域降水量增多, 湖水位上升, 大量氯化物溶解于水, 导致少量 Cl^- 保存于沉积物中, 其含量较低; 反之, 若流域变干, 湖水浓缩, 水中 Cl^- 的浓度增大, 保存于沉积物中的 Cl^- 增多^[23]。阴离子 $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}) / (\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ 和 $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$ 可以反映优势阴离子, $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 和 $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$ 相结合, 常反映优势阳离子。一般来讲, 淡水中的阴离子以 $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ 为主, 随着盐度的增高, $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ 会逐渐成为优势阴离子, $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}) / (\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ 的比值降低可反映湖水的咸化; 随着湖水盐度的增高, Cl^- 相对于 SO_4^{2-} 会增高, $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$ 比值的增高可反映湖水的咸化^[15]。 K 和 Na 属碱性元素, 化学性质最为活跃, 在干旱气候条件下最易富集^[24], 因此, $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 能反映区域降水的变化, 高的比值代表气候相对干旱, 降水量相对较小; Ca 和 Mg 是活动性中等的元素, 在半干旱—半湿润的气候条件下, 常较多地被溶解和迁移, 一般来说, Ca^{2+} 离子含量越高指示气候环境相对干冷^[25-26]; 淡水湖中以 Ca^{2+} 离子为主, 随着盐度的增高, Mg^{2+} 离子会相对增高, 湖水中高盐度会对应于 $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$ 比值的低值^[19]。

湖泊自生碳酸盐能指示区域环境的变化, 其碳、氧稳定同位素含量的高低可以有效指示湖水的咸化与淡化, 从而反映气候的变化^[13]。研究表明, 湖泊水体析出的碳酸盐氧同位素的变化可以指示湖水温度的变化, 湖泊 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化进而可以反映湖泊汇水区的气温变化。低 $\delta^{18}\text{O}$ 值常反映较高的湖水温度和较为温暖的气候阶段, 而高 $\delta^{18}\text{O}$ 值反映较低的湖水温度和较为寒冷的气候阶段^[27-29]; 同时, $\delta^{18}\text{O}$ 值高指示湖泊水体处于蒸发期, 湖泊水体盐度较高, 反之则为浓缩期^[30]。湖泊自生碳酸盐碳同位素的含量主要受湖水的盐度影响, 盐度高, 湖水含有溶解大气 CO_2 量少, 碳酸盐富集碳同位素^[27]。对于处于碳酸盐沉积阶段的湖泊而言, 湖水盐度的高低指示湖泊水体的蒸发浓缩程度, 蒸发作用强对应湖水盐度相对较高, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值也高, 低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值常反映湖水蒸发作用相对较弱, 盐度较低^[12, 30]。

5.2 湖水化学性质变化

综合各主要指标纵向上含量的变化, 对应易溶盐各离子的变化过程, 可将剖面划分为 4 个化学性质与气候变化阶段(图 4)。

第 1 阶段处于剖面的第 9 层, 为灰—灰黑色黏

土, 偶夹粉砂层。pH 值为 8.5~9.1, 平均值 8.9, 处在一个相对的低值并显示一个由高到低再升高的过程, 显示湖水碱性的波动趋势。沉积物的含盐量为 98.9~157.0 mg/L, 平均值为 112.4 mg/L, 处在剖面的相对低值, 但存在进一步降低的过程。 $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}) / (\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ 比值由剖面的低值快速升高, 而 $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$ 比值由剖面的相对高值快速降低又升高, $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$ 比值在相对的低值波动。碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值处于剖面的相对高值, 显示蒸发作用相对较强。上述变化表明湖水的盐度和咸化程度相对较高。

第 2 阶段的沉积物对应于剖面的第 7 层中下部至第 8 层, 以砂层偶夹粉砂沉积为主。pH 值为 8.3~9.5, 平均值 9.1, 处在剖面的最高值, 从纵向变化趋势来看, pH 值由剖面的最高值逐渐降低并存在较大波动, 表明湖水碱度增大, 后期微弱下降且存在波动。沉积物的含盐量为 6.7~98.0 mg/L, 平均值 86.3 mg/L, 较前一阶段降低, 处在剖面的最低值, 且含量稳定。 $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}) / (\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ 比值相对前一阶段逐渐降低且存在较小的波动, Cl^- 和 SO_4^{2-} 处于相对的低值, 但 $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$ 比值由低快速升高至剖面的峰值后缓慢降低; $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$ 比值则缓慢升高至剖面的峰值, 后期微降, 且存在波动。碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值由剖面的低值小规模升高后又降低并保持稳定, 显示蒸发浓缩程度减弱。上述变化显示, 本阶段湖水盐度相对前一阶段降低, 湖水咸化程度也处于剖面的最低阶段。

第 3 阶段对应于剖面的第 4 至第 7 层上部, 主要为粉砂质黏土夹砂层。pH 值为 8.1~9.3, 平均值 8.9, 较前一阶段略低且在波动中逐渐降低, 表明湖

水的碱性降低。沉积物的含盐量为 79.0~490.0 mg/L, 平均值为 140.1 mg/L, 较前一阶段升高; 从纵向的变化来看, 含盐量由低值逐渐升高, 在后期达到剖面的峰值。 $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}) / (\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ 比值在早期快速升高至剖面的峰值, 后期逐渐减低; $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$ 比值变化与 $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}) / (\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ 比值变化正好相反, 由剖面的低值快速升高, 后期略有降低; 含盐量由低到高, $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$ 比值则是一个缓慢降低的过程, 且存在微弱的波动。碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值相对前一阶段升高, $\delta^{18}\text{O}$ 值由剖面的低值缓慢升高, 后期达到剖面最高值, 显示蒸发程度增强。此阶段的上述指标变化表明, 湖水咸化程度和盐度均逐渐增强至剖面的最高值。

第 4 阶段相当于剖面第②—③层, 沉积物主要为黏土。pH 值为 8.5~8.8, 平均值 8.7, 较前一阶段继续降低, 表明湖水碱性降低, 呈弱碱性。沉积物含盐量为 255.0~400.0 mg/L, 平均值 305.9 mg/L, 虽总体上较前一阶段要高, 但同前一阶段的峰值相比则表现为一个相对的低值且有缓慢升高的趋势。 $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}) / (\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ 和 $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$ 比值均处于低值且较为稳定, $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$ 比值从相对的高值快速降低, 并维持在一个较低的水平。碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值相对前一阶段降低, $\delta^{18}\text{O}$ 值由前一阶段快速降低并存在较大波动, 指示湖泊蒸发作用降低。本阶段的指标变化显示, 湖水的盐度和咸化程度处于相对较高时期。

5.3 古气候变化

从吉家庄遗址剖面沉积特点和易溶盐主要指标的变化曲线(图 4)来看, 沉积物颗粒粗细和含盐

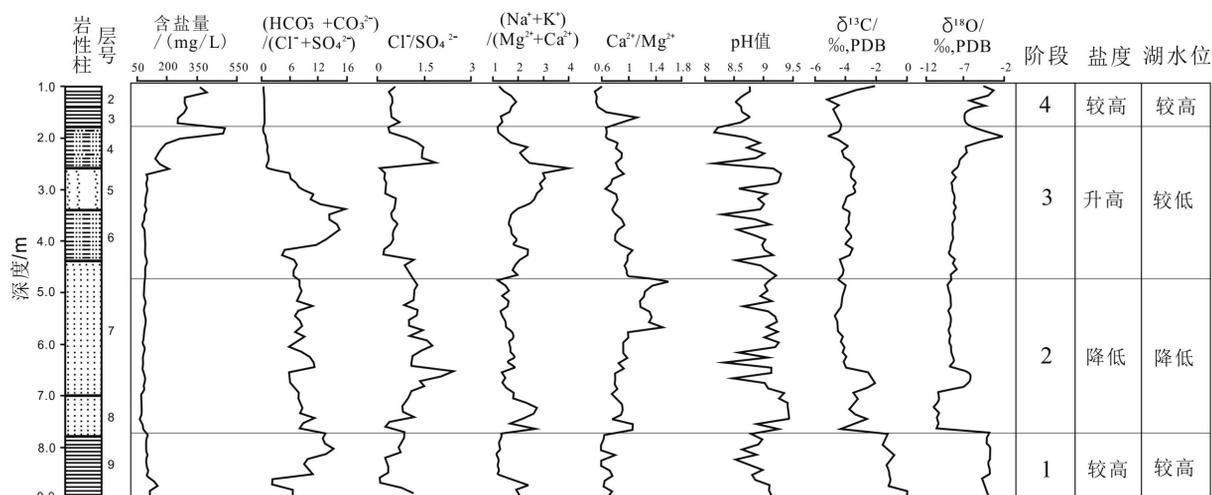


图 4 吉家庄遗址地层易溶盐指标变化曲线

Fig.4 Soluble salt indicator curves from Jijiazhuang site

量的变化呈负相关关系,即粗颗粒含量较高层位(砂层)对应含盐量低值,而细颗粒含量较高层位(黏土层)对应含盐量相对较高时期,这可能与细颗粒的吸附能力较强有关^[15-17]。结合各主要指标纵向上含量的变化,相应地也可将剖面划分为4个阶段,分别对应不同的古气候特征。

第1阶段:本阶段相当于易溶盐含量的A阶段,沉积物主要为黏土。 Cl^- 离子含量处于相对的低值,反映气候相对较湿; $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 比值由剖面的中低值快速降至剖面的最低值并保持稳定,反映区域降水较多; $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$ 比值同样处于剖面的最低值波动,表明气候相对湿润。碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 值处于剖面的最高值,表明温度较低; $\delta^{13}\text{C}$ 值处于相对高值,显示蒸发作用较强。在此阶段,气候总体特点表现为冷湿,湖水位相对较高。

第2阶段:本阶段对应易溶盐含量的B阶段,沉积物以砂为主,颗粒较前一阶段增大。 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 比值由前一阶段的低值快速升高并缓慢降低,后期略微升高,且存在一定的波动,反映区域降水减少而蒸发作用相对变强; $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$ 比值由低值在波动中升高至剖面的峰值,后期略微降低,表明气候向干凉转变。碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 值由剖面的最低值而升高,表明温度较前一阶段升高; $\delta^{13}\text{C}$ 值表现由高到低的变化,显示蒸发作用逐渐降低,盐度也随之降低。在此阶段,气候特点表现为向干凉的方向转变,但气候波动较大,湖水位降低。

第3阶段:本阶段对应易溶盐含量的C阶段,沉积物以粉砂质黏土夹砂为主,颗粒较前一阶段减小。 Cl^- 离子含量由剖面的低值缓慢升高,在后期达到剖面的峰值,指示气候变干的趋势加剧; $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 比值表现为由相对的低值快速升高至剖面的峰值,后期又进一步降低,总体波动较大,反映区域降水逐渐减少,后期有增多的趋势; $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$ 比值则表现为由高到低的缓慢波动,表明气候总体较前一阶段的干凉程度加剧。碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 值由剖面的低值而升高,表明温度转凉; $\delta^{13}\text{C}$ 值较前一阶段稍高,显示蒸发作用变强,盐度升高。在此阶段,气候总体表现为干凉,后期湿度和降雨增加,对应湖水位由低而缓慢升高。

第4阶段:本阶段对应易溶盐含量变化的D阶段,沉积物主要为黏土,与第1阶段一致。 Cl^- 离子含量较前一阶段降低,后期缓慢升高,表明气候向潮湿的方向转变; $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 比值处于相对的低值,表明区域降水增多; $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$ 比值则快速下降并保持相对的低值,表明气候相对

温湿。碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 值在剖面的高值降低并存在波动,表明温度转暖; $\delta^{13}\text{C}$ 值处于相对低值,显示蒸发作用较弱,盐度降低。本阶段气候总体上相对温暖湿润,湖水位较高。

5.4 古人类活动时期环境变化特征

在早期人类起源与演化过程中,古人类栖息地湖泊的演化与人类活动密切相关,湖泊扩张和收缩而带来的湖水面变化直接影响着早期人类活动范围;同时,湖泊沉积物所揭示的气候与环境变化对早期人类的活动范围与适应方式亦产生重要影响,被视为古人类演化过程的重要环境要素^[31-32]。泥河湾盆地广泛发育的湖相地层与早期人类活动遗存,为揭示华北古人类演化与环境关系提供了理想的前提^[33-35]。

相关研究表明,泥河湾裂谷发育并接受沉积大约在3.5~3.0 MaBP^[36-37],随着新生代构造的抬升,泥河湾古湖开始阶段性地发育,湖水存在较大波动。至早更新世的1.9~1.8 Ma,古湖显著扩张,首次形成稳定的湖泊,这可能与此时的东亚夏季风相关^[38];此时,早期人类开始扩散至泥河湾盆地并开始占据这个高纬度的环境^[39-41]。泥河湾盆地东部和蔚县盆地的古湖演化研究表明,大约1.9 MaBP,壶流河地堑开始发育,蔚县盆地和阳原盆地构成了统一的古湖^[6-7,38]。在泥河湾古湖演化过程中,中更新世气候转型期(Middle Pleistocene Climatic Transition)曾出现一次显著的震荡扩缩期;古湖第二次显著扩张发生在中更新世,中更新世晚期的300 ka前后古湖出现第二次收缩并在中—晚更新世之交最终消亡^[6-7,9,38,42]。

泥河湾盆地早期人类活动遗址的分布和古湖演化有密切关系,其中早更新世的遗址均分布在桑干河和壶流河交汇处东南侧的岑家湾湖积台地^[41,43-44],古人类活动遗址均分布在湖滨环境,显示了早期人类对水资源的依赖。中更新世的地层则以蔚县盆地的吉家庄-黄梅湖积台地较为发育;近期的研究工作表明,古人类仍多活动于湖滨环境^[4-5]。吉家庄遗址剖面记录了中更新世沉积序列,从沉积体系、易溶盐和碳酸盐碳氧同位素指标的变化所反映的古气候信息来看,遗址剖面总体属于湖滨相沉积,期间经历了大致4个气候变化阶段。在剖面下部的第⑨—⑩层的第1阶段,气候相对冷湿,区域降水量相对较多,湖水面较高,未见有人类活动遗物的发现。在第2至3阶段,气候较第1阶段变得干凉,湖水位下降,遗址一带为湖滨环境,季节性片

流发育,在第2阶段早期地层保存了丰富的石制品和动物化石,表明湖水位退去后,古人类在遗址进行频繁的石制品制作,同时可能有动物肢解与消费行为;在第3阶段由于干旱加剧,湖水位进一步萎缩,古人类远离遗址。在剖面记录的古气候变化第4阶段,气候向相对温暖湿润转变,但尚未有古人类活动遗物的发现。

6 结论

(1)吉家庄遗址地层的易溶盐分析表明,此剖面代表的泥河湾古湖属于 $\text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{Na}^+$ 型, pH 值平均为 8.9, 偏碱性;剖面平均含盐量为 0.67%, 属于半咸水湖,处于半干旱区湖泊演化过程中碳酸盐湖向硫酸盐湖演化的过渡阶段。

(2) SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 这 5 类离子的变化曲线表现出较大的相似性,且它们与含盐量的变化大体一致。各主要离子的纵向变化大致划分为 A→D 共 4 个阶段,代表了湖泊演化的不同阶段。

(3)根据离子比值、碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 含量变化并结合剖面沉积特点,将湖泊沉积物所揭示的气候演化划分为 4 个阶段,对应湖水性质变化和古气候及古水文特征。古人类活动时期对应于第 2 阶段早期古湖水位降低且相对干凉的湖滨环境。

(4)古人类在湖滨活动期集中在水位降低、气候向干凉转变阶段。该环境条件利于水分蒸发、湖泊边缘含盐量上升。泥河湾盆地^[38]和西伯利亚地区等古人类活动遗址^[45]曾发现此类线索,吉家庄遗址的后期工作还可开展更广视野的区域对比和学科交叉研究。

致谢: 遗址的野外发掘由中国科学院古脊椎动物与古人类研究所裴树文研究员主持,样品采集得到该单位研究生马东东和徐哲的协助;易溶盐和碳酸盐碳、氧稳定同位素的测试在核工业地质分析测试研究中心完成,作者致以衷心的感谢!

参考文献 (References)

- [1] 周廷儒,李华章,刘清泗,等. 泥河湾盆地新生代古地理研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 1-162. [ZHOU Tingru, LI Huazhang, LI Rongquan, et al. Study on the Cenozoic Paleogeography of the Nihewan Basin[M]. Beijing: Science Press, 1991: 1-162.]
- [2] 袁宝印, 同号文, 温锐林, 等. 泥河湾古湖的形成机制及其与早期古人类生存环境的关系[J]. 地质力学学报, 2009, 15(1): 77-87. [YUAN Baoyin, TONG Haowen, WEN Ruilin, et al. The formation mechanism of the Nihewan paleo-lake and its relationship with living environment for early ancient human [J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15(1): 77-87.]
- [3] 卫奇. 泥河湾盆地考证[J]. 文物春秋, 2016(2): 3-11. [WEI Qi. Examination on the Nihewan Basin [J]. Stories of Relics, 2016(2): 3-11.]
- [4] 裴树文. 泥河湾盆地南部(蔚县盆地)发现一处重要古人类活动遗址群[J]. 人类学学报, 2017, 36(1): 26. [PEI Shuwen. A newly discovered Paleolithic site complex in the south part of the Nihewan basin (Yuxian basin) [J]. Acta Anthropologica Sinica, 2017, 36(1): 26.]
- [5] 裴树文, 马东东, 贾真秀, 等. 蔚县盆地吉家庄旧石器遗址发掘报告[J]. 人类学学报, 2018, 37(4): 510-528. [PEI Shuwen, MA Dongdong, JIA Zhenxiu, et al. A preliminary report on excavation of the Jijiazhuang Paleolithic site in the Yuxian Basin, North China [J]. Acta Anthropologica Sinica, 2018, 37(4): 510-528.]
- [6] 白振平. 对蔚县盆地发育过程的初步认识[M]//卫奇, 谢飞. 泥河湾研究论文选编. 北京: 文物出版社, 1989: 466-474. [BAI Zhenping. Preliminary understanding of the development history of Yuxian basin[M]//WEI Qi, XIE Fei. Selected Publications of Nihewan. Beijing: Cultural Relics Press, 1989: 466-474.]
- [7] 夏正楷. 大同-阳原盆地的新生代沉积和环境演变[M]//王乃樑, 杨景春, 夏正楷, 等. 山西地槽系新生代沉积与构造地貌. 北京: 科学出版社, 1996: 1-72. [XIA Zhengkai. Cenozoic geology and environmental change of Datong-Yangyuan Basin[M]//WANG Nailiang, YANG Jingchun, XIA Zhengkai, et al. Cenozoic deposits and Tectonic Geomorphology of Shanxi Graben. Beijing: Science Press, 1996: 1-72.]
- [8] 夏正楷, 刘锡清. 泥河湾层古地理环境的初步认识[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1984, 4(3): 101-110. [XIA Zhengkai, LIU Xiqing. On paleogeography of the Nihewan basin during the accumulation of Nihewan series [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1984, 4(3): 101-110.]
- [9] 吉云平, 王贵玲. 泥河湾盆地第四纪古湖最终消亡过程研究[J]. 地球学报, 2017, 38(S1): 38-42. [JI Yunping, WANG Guiling. Final disappearing process of ancient lake during Quaternary in Nihewan Basin [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38(S1): 38-42.]
- [10] Håkanson L, Jansson M. Principles of Lake Sedimentology[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1983: 1-174.
- [11] 王晓蓉. 环境化学[M]. 南京: 南京大学出版社, 1993. [WANG Xiaorong. Environmental Chemistry[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1993: 1-360.]
- [12] 吴敬禄, 王苏民. 若尔盖盆地RM孔自生碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 记录所揭示的环境演化特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1997, 17(4): 63-71. [WU Jinglu, WANG Sumin. Environmental characteristics showed by $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ of authcarbonate in core RM from Zoige basin [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1997, 17(4): 63-71.]
- [13] Bowen R. Isotopes and Climates[M]. London: Elsevier Applied Science, 1991: 140-175.
- [14] Björck S, Olsson S, Ellis-Evans C, et al. Late Holocene palaeoclimatic records from lake sediments on James Ross Island, Antarctica [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1996, 121(3-4): 195-220.

- [15] 翟秋敏. 全新世安国里淖易溶盐沉积与环境[J]. 古地理学报, 2001, 3(1): 91-96. [ZHAH Qiumin. Holocene soluble salt sediments of Angulino lake and its environment [J]. Journal of Palaeogeography, 2001, 3(1): 91-96.]
- [16] 张洪, 靳鹤龄, 肖洪浪, 等. 东居延海易溶盐沉积与古气候环境变化[J]. 中国沙漠, 2004, 24(4): 409-415. [ZHNAG Hong, JIN Heling, XIAO Honglang, et al. Soluble salt sediments of East Juyan Lake and its indicating palaeoclimate environment Changes [J]. Journal of Desert Research, 2004, 24(4): 409-415.]
- [17] 李容全, 乔建国, 邱维理, 等. 泥河湾层内易溶盐沉积及其环境意义[J]. 中国科学(D辑), 2000, 43(5): 464-479. [LI Rongquan, QIAO Jianguo, QIU Weili, et al. Soluble salt deposit in the Nihewan beds and its environmental significance [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2000, 43(5): 464-479.]
- [18] 李潇丽, 裴树文, 马宁, 等. 泥河湾盆地东谷坨遗址剖面易溶盐沉积及其环境意义[J]. 古地理学报, 2010, 12(3): 307-314. [LI Xiaoli, PEI Shuwen, MA Ning, et al. Soluble salt sediments and its environmental significance at the Donggutuo site, Nihewan Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2010, 12(3): 307-314.]
- [19] 李潇丽, 贾真秀, 裴树文, 等. 泥河湾盆地麻地沟遗址地层易溶盐沉积及其环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(3): 151-159. [LI Xiaoli, JIA Zhenxiu, PEI Shuwen, et al. Soluble salt in the sediments at the Madigou site, Nihewan basin and its environmental implications [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2016, 36(3): 151-159.]
- [20] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 1-161. [Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soil Physico-chemical Properties Analysis[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1978: 1-161.]
- [21] 刘东生. 中国第四纪环境概要[M]//WILLIAMS M A J, DUNKERLEY D L, DE DECKKER P, 等. 第四纪环境. 刘东生, 等译. 北京: 科学出版社, 1997: 189-239. [LIU Dongsheng. Outline of the Quaternary environment in China[M]//WILLIAMS M A J, DUNKERLEY D L, DE DECKKER P, et al. Quaternary Environment. LIU Dongsheng, et al., trans. Beijing: Science Press, 1997: 189-239.]
- [22] 陈茅南. 泥河湾层的研究[M]. 北京: 海洋出版社, 1988: 1-145. [CHEN Maonan. Study on the Nihewan Beds[M]. Beijing: China Ocean Science Press, 1988: 1-145.]
- [23] 奚晓霞, 穆德芬, 方小敏, 等. 早更新世东山古湖氯离子含量变化与季风演化[J]. 冰川冻土, 1996, 18(2): 125-133. [XI Xiaoxia, MU Defen, FANG Xiaomin, et al. Variation of Cl⁻ content in Paleo-Dongshan lake during Early Pleistocene and monsoonal evolution [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18(2): 125-133.]
- [24] 李徐生, 杨达源, 鹿化煜. 皖南风尘堆积序列氧化物地球化学特征与古气候记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(4): 75-82. [LI Xusheng, YANG Dayuan, LU Huayu. Oxide-geochemistry features and paleoclimatic record of the aeolian-dust depositional sequence in southern Anhui [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1999, 19(4): 75-82.]
- [25] 吴立, 王心源, 莫多闻, 等. 巢湖东部含山凌家滩遗址地层元素地球化学特征研究[J]. 地层学杂志, 2015, 39(4): 443-453. [WU Li, WANG Xinyuan, MO Duowen, et al. Elemental geochemistry of the Lingjiatan site in Hanshan, East Chaohu Lake Basin [J]. Journal of Stratigraphy, 2015, 39(4): 443-453.]
- [26] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 238-256. [LIUDongsheng. Loess and Environment[M]. Beijing: Science Press, 1985: 238-256.]
- [27] 蓝江湖, 徐海, 刘斌, 等. 湖泊沉积中碳酸盐、有机质及其同位素的古气候意义[J]. 生态学杂志, 2013, 32(5): 1326-1334. [LAN Jianghu, XU Hai, LIU Bin, et al. Paleoclimate implications of carbonate, organic matter, and their stable isotopes in lacustrine sediments: A review [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(5): 1326-1334.]
- [28] 沈吉, 吴瑞金, 羊向东, 等. 大布苏湖沉积剖面碳酸盐含量、氧同位素特征的古气候意义[J]. 湖泊学报, 1997, 9(3): 217-222. [SHEN Ji, WU Ruijin, YANG Xiangdong, et al. Paleoclimatic change inferred from $\delta^{18}\text{O}$ and carbonate content of the section in Dabusu lake [J]. Journal of Lake Sciences, 1997, 9(3): 217-222.]
- [29] 雷国良, 张虎才, 朱云, 等. 湖泊沉积碳酸盐氧同位素影响因素的定量评估[J]. 第四纪研究, 2015, 35(1): 143-151. [LEI Guoliang, ZHANG Hucui, ZHU Yun, et al. Quantitative evaluation for driving factors of carbonate Oxygen isotope composition in lake sediments [J]. Quaternary Sciences, 2015, 35(1): 143-151.]
- [30] 曾承. 湖泊自生碳酸盐碳同位素在环境变化中的应用[J]. 盐湖研究, 2010, 18(2): 1-6. [ZENG Cheng. Carbon isotopic records from lacustrine authigenic carbonates as environmental change indicators [J]. Journal of Salt Lake Research, 2010, 18(2): 1-6.]
- [31] Maslin M A, Brierley C M, Milner A M, et al. East African climate pulses and early human evolution [J]. Quaternary Science Reviews, 2014, 101: 1-17.
- [32] Lepre C J. Early Pleistocene lake formation and hominin origins in the Turkana-Omo rift [J]. Quaternary Science Reviews, 2014, 102: 181-191.
- [33] 卫奇. 泥河湾盆地考古地质学框架[C]//童永生, 张银运, 吴文裕, 等. 演化的实证: 纪念杨钟健教授百年诞辰论文集. 北京: 海洋出版社, 1997: 193-208. [WEI Qi. The framework of archaeological geology of the Nihewan Basin[C]//TONG Yongsheng, ZHANG Yinyun, WU Wenyu, et al. Evidence for Evolution Essays in Honor of Prof. Chungchien Young on the Hundredth Anniversary of His Birth. Beijing: Ocean Press, 1997: 193-208.]
- [34] 袁宝印, 夏正楷, 牛平山. 泥河湾裂谷与古人类[M]. 北京: 地质出版社, 2011: 1-257. [YUAN Baoyin, XIA Zhengkai, NIU Pingshan. Nihewan Rift and Early Man[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011: 1-257.]
- [35] 朱日祥, 邓成龙, 潘永信. 泥河湾盆地磁性地层定年与早期人类演化[J]. 第四纪研究, 2002, 27(6): 922-944. [ZHU Rixiang, DENG Chenglong, PAN Yongxin. Magnetochronology of the fluvio-lacustrine sequences in the Nihewan basin and its implications for early human colonization of Northeast Asia [J]. Quaternary Sciences, 2002, 27(6): 922-944.]
- [36] Deng C L, Zhu R X, Zhang R, et al. Timing of the Nihewan formation and faunas [J]. Quaternary Research, 2008, 69(1): 77-90.
- [37] Ao H, Dekkers M J, An Z S, et al. Magnetostratigraphic evidence of a mid-Pliocene onset of the Nihewan Formation - implications for early

- fauna and hominid occupation in the Nihewan Basin, North China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 59: 30-42.
- [38] 唐锐桦, 葛俊逸, 庞海娇, 等. 泥河湾黑土沟剖面磁组构特征及古湖水文环境变化[J]. *科学通报*, 2020, 65(11): 1027-1045. [TANG Ruiping, GE Junyi, PANG Haijiao, et al. Paleohydro-climatic changes revealed by anisotropy of magnetic susceptibility at the Heitugou section, Nihewan Basin, and its influences on human's occupation [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(11): 1027-1045.]
- [39] 吴文祥. 试论早期人类占据泥河湾盆地的时代[J]. *地球学报*, 2002, 23(3): 249-253. [WU Wenxiang. A tentative discussion on the age of the ancient human occupation of the Nihewan Basin [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2002, 23(3): 249-253.]
- [40] 卫奇, 裴树文, 贾真秀, 等. 泥河湾盆地黑土沟遗址[J]. *人类学学报*, 2016, 35(1): 43-62. [WEI Qi, PEI Shuwen, JIA Zhenxiu, et al. Heitugou Paleolithic site from the Lower Pleistocene in the Nihewan Basin, Northern China [J]. *Acta Anthropologica Sinica*, 2016, 35(1): 43-62.]
- [41] Yang S X, Deng C L, Zhu R X, et al. The Paleolithic in the Nihewan Basin, China: Evolutionary history of an Early to Late Pleistocene record in Eastern Asia [J]. *Evolutionary Anthropology*, 2020, 29(3): 125-142.
- [42] 夏正楷. 大同-阳原盆地古泥河湾湖的岸线变化[J]. *地理研究*, 1992, 11(2): 52-59. [XIA Zhengkai. The study of the change of ancient lake shore in the Datong-Yangyuan basin [J]. *Geographical Research*, 1992, 11(2): 52-59.]
- [43] 裴树文, 李潇丽, 刘德成, 等. 泥河湾盆地东谷坨遗址古人类生存环境探讨[J]. *科学通报*, 2009, 54(21): 3896-3904. [PEI Shuwen, LI Xiaoli, LIU Decheng, et al. Preliminary study on the living environment of hominids at the Donggutuo site, Nihewan Basin [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(21): 3896-3904.]
- [44] Li X L, Pei S W, Jia Z X, et al. Paleoenvironmental conditions at Madigou (MDG), a newly discovered Early Paleolithic site in the Nihewan Basin, North China [J]. *Quaternary International*, 2016, 400: 100-110.
- [45] 武仙竹, 哈连维奇·弗拉基米尔, 阿给莫娃·伊莲娜. 西伯利亚特罗伊茨卡亚季节性古营地遗址研究[J]. *第四纪研究*, 2017, 37(4): 805-812. [WU Xianzhu, Харевич В М, Акимова Е В. Research on an seasonal ancient camp site at ТРОИЦКАЯ, Siberia [J]. *Quaternary Sciences*, 2017, 37(4): 805-812.]