

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2016.03.015

泥河湾盆地麻地沟遗址地层易溶盐沉积及其环境意义

李潇丽¹, 贾真秀^{2,3}, 裴树文², 马东东^{2,3}

(1. 北京自然博物馆, 北京 100050; 2. 中国科学院 脊椎动物演化与人类起源重点实验室, 中国科学院古脊椎动物与古人类研究所, 北京 100044; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:麻地沟遗址地处泥河湾盆地东部岑家湾台地古人类活动集中区,是近年来新发现和发掘的早更新世古人类活动遗址之一。对遗址湖滨相沉积物易溶盐类的测试和分析表明,此剖面代表的泥河湾古湖易溶盐为 $\text{SO}_4^{2-}-\text{Na}^+-\text{HCO}_3^--\text{Cl}^-$ 型,剖面平均含盐量为 11.41%,属于半咸水湖,处于半干旱区湖泊演化中后期的硫酸盐湖向氯化物湖的过渡阶段。 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 等 6 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。地层含盐量的变化和沉积物中细颗粒含量变化具有一致性,细颗粒含量较高对应含盐量相对较高时期。根据含盐量和各主要离子比值并结合平均粒径和磁化率的变化将湖泊气候演化划分为 5 个阶段,古人类在该遗址活动时期对应于湖泊演化的第 2—4 阶段,处于气候相对较为温湿、动植物资源丰富、湖水含盐量较低时期。该项研究对探讨麻地沟遗址利用者的生存行为与环境的关系具有重要意义。

关键词: 易溶盐; 人类活动; 早更新世; 麻地沟遗址; 泥河湾盆地

中图分类号: P595

文献标识码: A

文章编号: 0256-1492(2016)03-0151-09

泥河湾盆地位于华北平原与内蒙古高原的过渡地带(图 1),盆地内发育了良好的晚新生代地层并含有丰富的哺乳动物化石和早更新世古人类活动遗址^[1-5],其在第四纪地质学、古生物学、旧石器时代考古学及早期人类演化等研究领域占有举足轻重的地位。该盆地是受边缘断裂控制的晚新生代断陷盆地,湖盆的发育始于上新世晚期,经历了早—中更新世,到晚更新世,随着地块抬升和溯源侵蚀的加剧,湖水外泄,湖相地层停止发育^[6-7]。

易溶盐是指湖泊沉积物中易溶于水的盐类,包括 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 和 Cl^- 等 8 类离子,占天然水离子总量的 95%~99%^[8]。对于内陆湖泊来说,湖盆成为流域内地表盐分的聚集地,湖水的化学特征受气候条件的控制,同时易溶盐的含量反映湖水的化学特征^[9]。因此,通过测试湖泊沉积物中的易溶盐含量,不仅可以重建古湖水的性质和变化过程,亦可揭示古环境变化信息。近年来,易溶盐作为一种反映气候和环境变化的替代性指标之一,已广泛应用于内陆湖泊沉积物的研究中^[10-11]。李容全等^[12]曾利用易溶盐分析对泥河湾古湖的性质、演化阶段和古环境进行研究,

李潇丽等^[13]也利用地层剖面的易溶岩含量分析了东谷坨遗址古人类活动与环境的关系,这表明易溶盐分析是进行泥河湾层沉积和环境演化研究的一项重要手段。

麻地沟遗址是泥河湾盆地近年来发现和发掘的早更新世重要遗址之一,在研究古人类早更新世在泥河湾盆地的扩散和技术交流方面具有重要意义^[14]。相关研究表明,古人类活动于泥河湾古湖的湖滨环境^[15],沉积期的气候环境变化与古人类活动密切相关。本文运用易溶盐分析并结合粒度和磁化率含量测试,揭示了古人类活动阶段的古湖性质和环境变化过程。

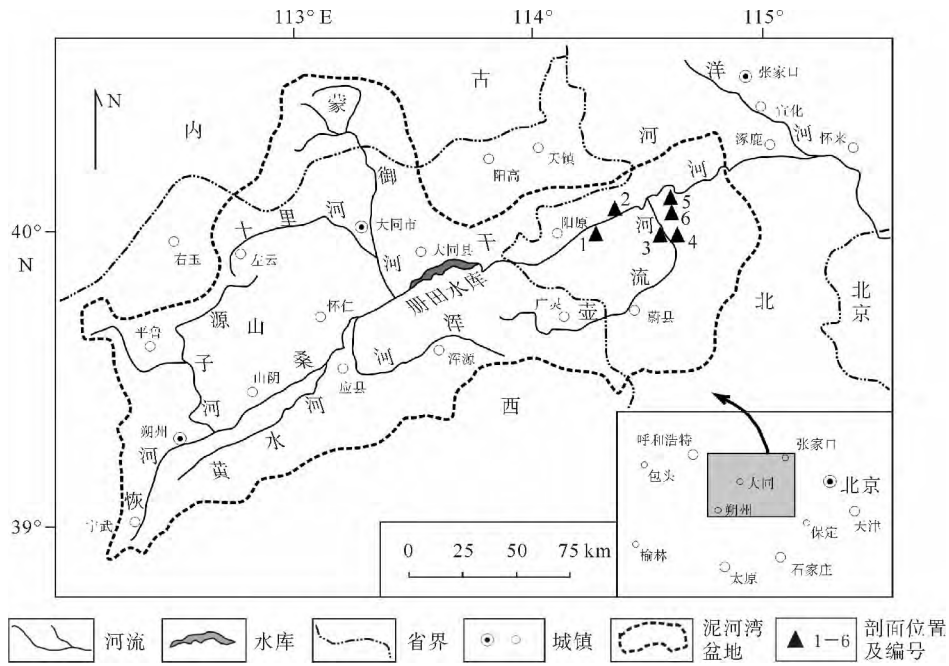
1 麻地沟遗址剖面特征

泥河湾古湖属于半干旱区内陆断陷湖泊,湖泊发育晚期在盆地边缘地带由于断层活动使湖相沉积的地块整体抬升,形成相对高度约 120 m 的湖积台地,位于盆地东部边缘的岑家湾台地^[1],是盆地内湖相地层最典型、研究最早和最多的湖积台地^[16-17],麻地沟遗址剖面就位于该台地的边坡地带。麻地沟遗址位于河北省阳原县大田洼乡东谷坨村西北,地理坐标 $40^{\circ}13'07''-16''\text{N}$ 、 $114^{\circ}39'58''-40'18''\text{E}$ (图 1),发掘剖面位于麻地沟遗址的东北侧,东北与东谷坨遗址相距约 400 m,文化遗物产出于高出桑干河水面约 123 m、距大田洼台地表面深为 40 m 的泥河湾层

基金项目:国家自然科学基金项目(41372032);北京市自然科学基金项目(8163047)

作者简介:李潇丽(1969—),女,副研究员,主要从事第四纪地质学研究,E-mail:lixiaoli2002@sohu.com

收稿日期:2016-01-22;改回日期:2016-03-31. 文凤英编辑



1-井儿洼;2-雪儿沟;3-红崖南沟;4-铺路;5-东谷坨遗址;6-麻地沟遗址

图1 泥河湾盆地麻地沟遗址地理位置(修改自文献[13])

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

中,主体堆积为湖滨相的灰白—灰绿—褐黄色粉砂、砂及黏土。麻地沟剖面总厚 54.5 m,主体为湖相地层(厚 47 m),湖相地层之上依次覆盖着末次间冰期古土壤(厚 5~7.5 m)和末次冰期黄土(厚 1~5 m),湖相地层之下未出露基岩。麻地沟遗址位于剖面下部,厚度在 9.2 m 以上,古人类活动文化层分布在剖面下部的棕灰色—棕黄色含砾粉砂质细砂层内,厚度在 4 m 以上(图 2)。

麻地沟遗址剖面泥河湾层的总体沉积为粉砂、粉砂质黏土和细砂,个别层位发育斜层理表明存在较强的水流作用,大部分粉砂层和黏土层内发育弱的波状层理和水平层理,表明本段沉积总体受到地表水流的影响,属于湖滨相沉积环境。古人类活动留下的文化遗物主要分布在剖面第 14、16、19-22 层。

麻地沟剖面的泥河湾层出露完好,文化层处在 TBS(Thick Brown Sands)层位以下,该层位被测定为 Brunhes/Matuyama 界限层位,其正处在小长梁、东谷坨和飞梁遗址的中间地带,周边的年代测定基础较好,因此古地磁方法也被用于测定文化层对应的古人类活动的相对年代。古地磁测定表明麻地沟文化层处在 Matuyama 反极性期 Cobb Mountain (1.19~1.215 Ma)和 Bjorn(1.255 Ma)^[18] 漂移事件之间,对应层位的大致时间为 1.20 Ma^[15],与飞

梁遗址的年代(1.20 Ma)^[19]相当,稍早于东谷坨遗址(1.10 Ma)^[20],但晚于小长梁遗址(1.36 Ma)^[21]。

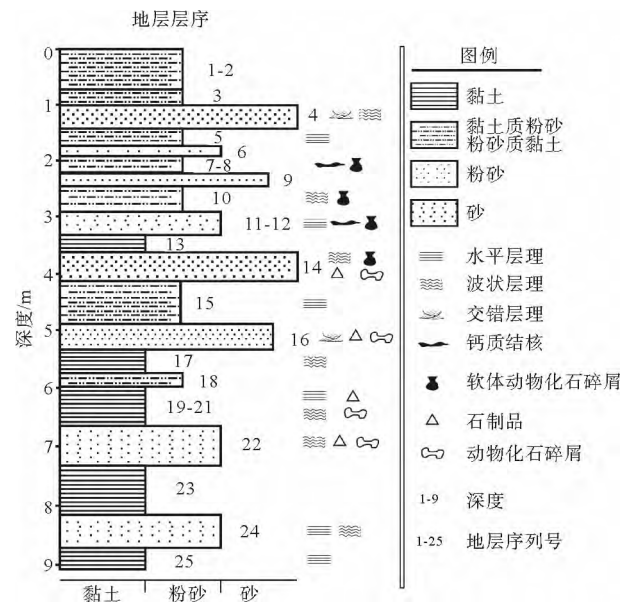


图2 麻地沟遗址剖面(修改自文献[15])

Fig.2 Column section at the Madigou site

2 样品采集与测试

作者自发掘剖面(图2)顶部开始向下以5~10

cm 为间隔连续采取土样,共采集 134 个样品,全部进行粒度、磁化率和易溶盐含量测试。

2.1 粒度测试过程

取样品 3~5 g,放入 100 mL 的烧杯中,注入 10 mL 浓度为 2:1 的双氧水溶液(双氧水:水体积比 1:2),进行加热,注入蒸馏水防止烧干,待溶液中不出现小气泡时注入 10 mL 浓度为 2:1 的盐酸溶液(盐酸:水体积比 1:2),然后注入蒸馏水防止烧干,待溶液沸腾时取下。烧杯降温后,注入 50 mL 左右的蒸馏水,静止 12 h,抽取上部分清液,剩余 20 mL 左右,完成以上步骤后注入 10 mL(36 g/1 000 mL)的偏磷酸钠分散剂,搅拌均匀,将烧杯置于超声波振荡仪中,震荡十分钟左右,功率 50%,然后进行测试。测试采用 Malvern2000 激光粒度仪进行全岩粒度测定(控制光学系统及送样器,每个样品测量 3 次,第 2 次和第 3 次分别加超声波 30 s),仪器测试范围为 0.01~2 000 μm 。

2.2 磁化率测试过程

样品测试前进行了预处理,采用对样品的磁参数稳定性影响很小的风干法,在自然条件下让样品自然干燥。对经过干燥处理的样品在不损伤颗粒结构的前提下进行研磨。然后每个样品称重 10 g,用保鲜膜包好,最后放入仪器内进行测试。实验室采用的磁化率测试仪器为英国 Bartington 公司生产的 MS2 型高低频磁化率仪,该仪器产生的交变磁场强度约为 80 A/m。工作频率选择低频(0.47 kHz)和高频(4.7 kHz),分别测得样品的低频磁化率和高频磁化率。为保证测试精度,高、低频磁化率均重复测试 6 次,并求出其算术平均值。最后用低频磁化率和高频磁化率计算出频率磁化率。

2.3 易溶盐测试过程

称取 20 g 土壤样品放入装有 100 mL 去离子水的 200 mL 聚乙烯塑料瓶中,剧烈震荡 20 min(摇床,速度为 250 次/min)后静置 2 h 以上,移取 5 mL 泥浆液,10 000 r/min 离心分离 2~3 h,得到澄清液。随后移取澄清液 25 mL 进行 pH 值测定,采用 DZ/T0064.49-1993 玻璃电极法测定 pH 值,滴定法测定碳酸根、重碳酸根和氢氧根,DZ/T0064.51-1993 离子色谱法测定氯离子、氟离子、溴离子、硝酸根和硫酸根,DZ/T0064.28-1993 离子色谱法测定钾、钠、镁和钙。易溶盐离子的浓度以 mg/L 表示。

3 易溶盐测试结果分析

3.1 实验结果分析

从实验分析数据来看(表 1),麻地沟遗址剖面所指示的泥河湾古湖属于 $\text{SO}_4^{2-}-\text{Na}^+-\text{HCO}_3^- -\text{Cl}^-$ 型。易溶盐总体上阴离子主要以 SO_4^{2-} 为主,含量为 8.87~955 mg/L,平均值达到 202.16 mg/L,其次为 HCO_3^- 和 Cl^- ,平均含量分别为 89.78 mg/L 和 84.50 mg/L,样品未检测出 CO_3^{2-} 的存在;阳离子以 Na^+ 为主,含量为 33.6~540 mg/L,平均值 147.67 mg/L, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 相对较少,平均含量分别为 20.51 和 11.53 mg/L, K^+ 含量最少,平均值仅为 3.52 mg/L。剖面含盐量在 2.92‰~56.62‰ 之间,平均值为 11.41‰。按照湖盆盐度 <0.3‰ 为淡水湖,0.3‰~24‰ 为半咸水湖,>24‰ 为咸水湖的标准^[22],麻地沟遗址所对应的泥河湾古湖应属于半咸水湖。相关研究表明,湖泊沉积物中的含盐量可以反映湖水的化学特征和演化阶段,一般来说,随着气候的不断干旱化,湖水浓缩,主要离子发生如下规律性变化:从以 $\text{Ca}^{2+}-\text{HCO}_3^- -\text{CO}_3^{2-}$ 为主变化到以 $\text{Mg}^{2+}-\text{Ca}^{2+}-\text{SO}_4^{2-}$ 为主,再到以 $\text{Na}^+-\text{K}^+-\text{Cl}^-$ 为主^[23]。该剖面易溶盐总体特点表明该剖面所指示的泥河湾古湖处于湖泊演化的中后期,属于硫酸盐湖向氯化物湖的过渡阶段。李容全等^[12]对泥河湾古湖浅湖区的井儿洼和雪儿沟剖面的易溶盐测试表明,早期是微咸水-半咸水湖,古湖水性质以 $\text{SO}_4^{2-}-\text{Ca}^{2+}-\text{Mg}^{2+}$ 为主,晚期为半咸水湖,易溶盐则以 $\text{Cl}^- -\text{Na}^+-\text{K}^+$ 为主。处于湖滨区的红崖南沟和铺路剖面,由于受河川和湖水水位的变化其易溶盐数

表 1 易溶盐主要离子含量特征

Table 1 Eigenvalues of dominant ions' content in soluble salt

主要离子	最小值 /mg·L ⁻¹	最大值 /mg·L ⁻¹	平均值 /mg·L ⁻¹	标准 偏差
CO_3^{2-}	0	0	0	
HCO_3^-	18.3	170	89.78	33.75
Cl^-	2.51	551	84.50	106.54
SO_4^{2-}	8.87	955	202.16	192.45
Na^+	33.60	540	147.67	94.51
K^+	1.37	13.4	3.52	2.27
Ca^{2+}	4.27	193	20.51	29.61
Mg^{2+}	1.47	137	11.53	21.36

值变化较为复杂。处于湖滨区的东谷坨遗址剖面含盐量仅为 $0.64 \text{ mg/g}^{[13]}$ 。与东谷坨遗址相距仅 400 m 的麻地沟遗址剖面的易溶盐平均含量为 11.41 mg/g ，虽高于东谷坨遗址剖面的易溶盐含量，但仍低于李容全等人研究的 4 个剖面，这可能是由于麻地沟与东谷坨遗址处于泥河湾古湖边缘地带，比较靠近湖岸，沉积颗粒总体偏粗，吸附盐分能力差所致；此外，旱季湖滩显露易使湖滩表层盐碱化，雨季湖滩表层的盐分被降水冲洗并携带至浅及深湖区聚集，而湖滨区的含盐量较低。

剖面的泥河湾层 pH 值介于 $7.20 \sim 8.45$ 之间，平均 7.98 ，偏碱性。陈茅南^[24]对泥河湾层的 pH 值的测定结果显示，整个沉积介质是介于 $6.95 \sim 9.72$ 之间，总体趋向偏碱性。麻地沟遗址的 pH 值平均值比东谷坨遗址 pH 平均值 (8.7) 略低，也略低于较近的小渡口泥河湾层的 pH 平均值 8.6 。

从不同离子和含盐量沿剖面的纵向变化趋势 (图 3) 来看， K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 等 6 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；而 HCO_3^- 离子含量变化与上述离子呈现负相关关系，离子总量在该剖面处于一个较低的水平而波动，后期进一步降低，表明湖泊发育已经越过碳酸盐阶段，处在硫酸盐湖向氯化物湖的过渡阶段。

3.2 古湖性质与变化过程

半干旱区内陆湖泊蒸发作用超过降水的补给，蒸发与降水的补给改变着 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的构成关系以及盐分

含量的变化，各种离子含量沿剖面的变化与湖泊的演化阶段有关^[12]。从图 3 所示的不同离子随剖面深度的变化曲线来看，可以将麻地沟遗址剖面所代表的泥河湾古湖易溶盐演化划分为 A→E 共 5 个阶段。第 A 阶段处于剖面的 7.3 m 以下，该阶段含盐量表现为一个逐渐升高的趋势， K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 等 5 类离子均与含盐量一样由低到高并达到一个相对的高峰值并快速降低， Na^+ 则表现为缓慢升高的状态，而 HCO_3^- 的含量则有一个相对高值快速降低而保持一个相对低值，末期快速升高。第 B 阶段处于剖面的 $5.6 \sim 7.3 \text{ m}$ ，该段含盐量和 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 处于一个相对稳定低值，而 HCO_3^- 离子表现为由高到低缓慢的变化过程并存在较大波动。第 C 阶段处于剖面的 $4.1 \sim 5.6 \text{ m}$ ，该段含盐量和 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 等 6 类离子的变化与 A 阶段相似，表现为由低到高的变化过程，后期快速降低；而 HCO_3^- 则表现为一个由高到低的缓慢降低过程，末期快速升高。第 D 阶段处在剖面 $2.8 \sim 4.1 \text{ m}$ ，该段含盐量和 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 等 6 类离子变化趋势一致，总体呈现由低到高再降低的过程，但变化幅度相对较小；而 HCO_3^- 则表现为一个总体由高到低且频繁波动的变化趋势。第 E 阶段处在剖面的 2.8 m 以上，该阶段含盐量和 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 等 6 类离子总体表现为一个由低到高的变化过程，除 Cl^- 外均达到剖面的峰值，而 HCO_3^- 则表现为由高到低的变化过程，并达到剖面的最低值。从各类离子的纵向变化来看，随着时间的变化，含盐量总体呈现一个由低到高的变化趋势，

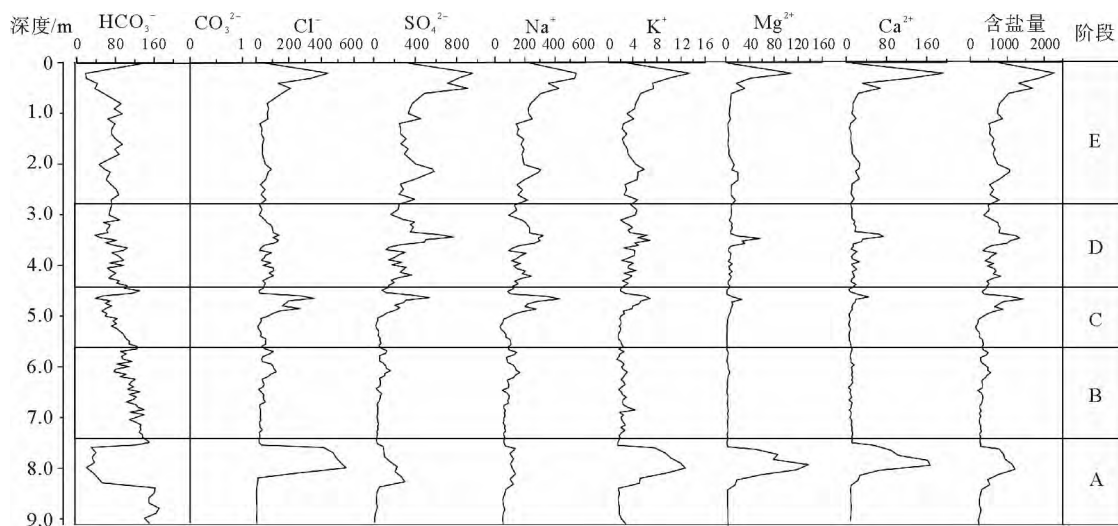


图 3 麻地沟遗址剖面易溶盐含量变化曲线(离子含量单位为:mg/L)

Fig. 3 Vertical distribution of soluble salts (ions content unit: mg/L)

后期达到剖面峰值; HCO_3^- 总体波动较大,除第 A 阶段保持一个相对的低值以后,总体表现为一个由高到低的变化过程;在 E 阶段后期又达到剖面的最低值; Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等 6 类离子,除 Na^+ 在第 A 阶段处在一个相对的低值外,其余离子在 A 阶段均存在一个相对的高值,此后 6 类离子总体处于一个相对的低值且在 C 和 D 期间存在一定波动,E 阶段表现为由低到高的缓慢变化趋势,并在后期均达到剖面的峰值。

4 古人类活动时期的环境变化

麻地沟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的地段,反映环境变化比湖心区更敏感。作者根据各类离子的变化,同时结合平均粒径和磁化率值,探讨古人类活动时期古气候及湖水化学性质变化过程。

4.1 湖泊沉积物代用指标的意义

在半干旱区,粒度组成和磁化率强度是沉积物特征的重要指标,作为古环境的代用指标常被应用到第四纪环境的研究中^[25-26]。近年来,对泥河湾盆地沉积物磁化率与粒级组分的相关性研究表明,在以外源碎屑输入为主的沉积物中,磁化率变化主要受控于外缘铁磁性矿物,蕴涵着特定的古气候信息,多年平均温度和降水量与磁化率都有较好的正相关关系^[27]。

含盐量的变化反映了半干旱区湖面蒸发量与补给对比关系的变化,同时揭示了古气候变化干与湿的气候旋回^[12]。 Cl^- 离子是封闭湖盆中对流域气候变化非常敏感的离子,具有反映气候变化的范围宽和受侵蚀原岩类型影响小等优点。一般来说,随流域降水量增多,湖水位上升,大量氯化物溶解于水,仅少量 Cl^- 保存于湖底沉积物中;如果流域变干,湖水浓缩,水中 Cl^- 的浓度增大,保存于沉积物中的 Cl^- 增多^[28]。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,可以反映优势阳离子。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^[11]。 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 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;淡水湖中以 Ca^{2+} 离子为主,随着盐度的增高, Mg^{2+} 离子会增高,湖水中高盐度会对应于 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 比值的低值^[12]。

4.2 湖水化学性质变化

综合各主要指标纵向上含量的变化,可将剖面划分为 5 个阶段(图 4)。

第 1 阶段处于剖面的第 23—25 层,为黏土夹粉砂层。 pH 值有一个相对的高值快速降低,显示湖水碱性降低;含盐量逐渐升高, $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})/(\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ 比值由剖面的峰值快速降至最低值,而 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值由剖面最低值快速升为峰值, $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 比值也由相对高值降至低值,表明该阶段湖水咸化程度升高。

第 2 阶段的沉积物对应于剖面的第 17—22 层,以黏土夹粉砂沉积为主。 pH 值处于一个相对的高值,表明湖水碱性较大;含盐量由前一阶段的高值迅速降低并保持相对的低值, $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})/(\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ 比值相对前一阶段后期略高, Cl^- 和 SO_4^{2-} 处于相对的低值, $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 比值在一个相对的高值波动,表明湖水咸化程度相对前一阶段降低而相对较弱。

第 3 阶段对应于剖面的第 15—16 层,主要为砂夹粉砂质黏土, pH 值处于一个相对的高值并略有降低,湖水呈弱碱性;含盐量保持在低值,中间短暂升高, $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})/(\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ 和 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值处于低值, Cl^- 含量由低到高, $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 比值略有降低,表明湖水咸化程度总体较低,但存在波动。

第 4 阶段相当于剖面第 10—14 层,沉积物主要为砂夹粉砂和黏土, pH 值处于一个相对的高值而波动,表明湖水呈弱碱性;含盐量较前一阶段略有升高但仍处于一个相对的低值, $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})/(\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ 和 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值仍处于一个低值, $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 比值相对前一阶段较高,表明湖水咸化程度相对较低。

第 5 阶段为剖面的第 1—9 层,沉积物主要为粉砂质黏土夹砂和粉砂, pH 值由一个相对的高值而降低,表明湖水的碱性程度降低;含盐量由低而升高至剖面的峰值, $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})/(\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ 和 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 比值仍处于一个低值, $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 比值在一个相对的低值而波动, Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量与含盐量一样由低升高至剖面的峰值,表明湖水咸化程度升高而达到剖面的峰值。

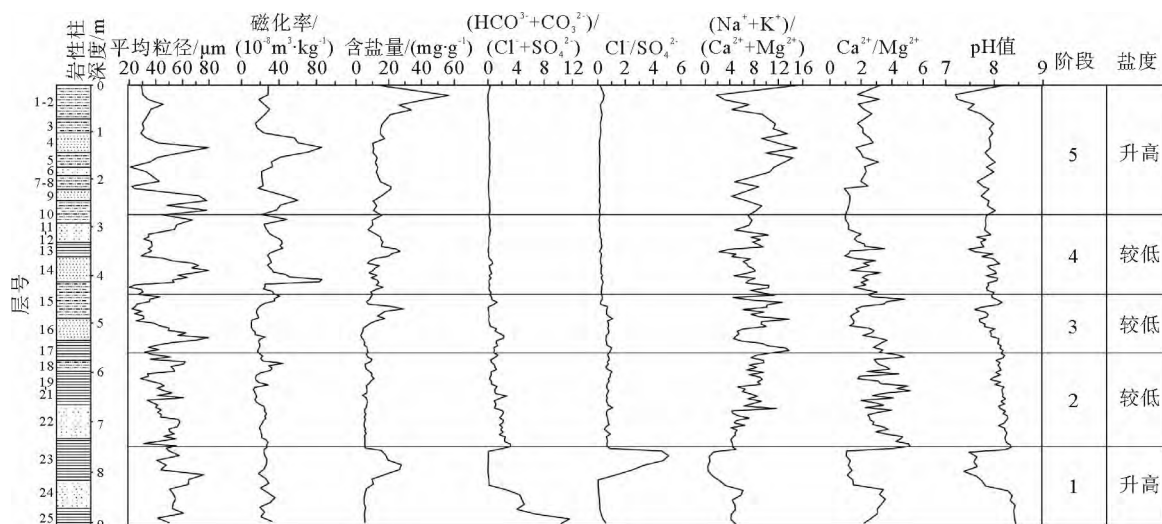


图4 麻地沟遗址剖面平均粒径、磁化率和易溶盐指标变化曲线
 Fig. 4 Curves of average grain size, susceptibility, and soluble salt indicators

4.3 古气候变化

从麻地沟遗址剖面平均粒径、磁化率和易溶盐主要指标的变化曲线(图4,图例参见图2)来看,沉积物平均粒径大小和含盐量的变化呈负相关关系,即粗颗粒含量较高对应含盐量低值,相反细颗粒含量较高对应含盐量相对较高时期。这可能与细颗粒吸附离子较强有关。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5个阶段,分别对应不同的古气候特征。

第1阶段:平均粒径波动较大,磁化率维持在一个相对的低值,Cl⁻离子含量由低而快速升高,反映区域降水量较少而蒸发作用相对增强。在此阶段,由于蒸发作用增强,使得湖水含盐量升高。

第2阶段:平均粒径较第1阶段略有降低,磁化率处于一个相对的低值,Cl⁻和Cl⁻/SO₄²⁻比值处于相对的低值,(Na⁺+K⁺)/(Ca²⁺+Mg²⁺)存在波动并缓慢升高,表明降水量仍然较少,与前一阶段相比,气候总体处于相对较干的状况但干旱程度降低。

第3阶段:平均粒径减小,磁化率仍较低,Cl⁻相对较低但之间出现高值的波动,(Na⁺+K⁺)/(Ca²⁺+Mg²⁺)在一个相对的低值而波动,表明降水量和湿度相对前一阶段略有增加,气候总体有朝温湿变化的趋势。

第4阶段:平均粒径和磁化率较前一阶段略有增加且波动较大,Cl⁻相对较低,(Na⁺+K⁺)/(Ca²⁺+Mg²⁺)比值处在一个相对的低值而存在较大的波动,表明气候存在一定的波动,湿度相对较高,含盐量处在一个相对的低值。

第5阶段:平均粒径和磁化率经历一个由低到高再到低的过程,含盐量和Cl⁻由低而升高至剖面峰值,(Na⁺+K⁺)/(Ca²⁺+Mg²⁺)比值升高而存在较大波动,表明气候在该阶段总体朝干旱化方向发展且存在较大波动,气候变干,蒸发作用相对变强,含盐量升高。

对干旱一半干旱区内陆湖泊安固里淖的研究表明,易溶盐含量高的阶段对应于沉积物中黏粒含量相对较高的阶段,即气候湿润阶段对应于湖水浓缩阶段^[11]。麻地沟遗址剖面的含盐量的峰值出现在剖面最后阶段,此外在开始的第一阶段后期出现过相对的峰值,均为颗粒相对较细的黏土或粉砂质黏土沉积,与上述研究基本吻合。考虑到麻地沟遗址剖面处于湖滨区,受区域局部小气候的影响较多,且剖面仅包含了该遗址周围泥河湾层的下部沉积,因此,易溶盐含量在探讨气候变化方面存在一定局限性,揭示泥河湾古湖总体性质的演化方面尚需进一步完善。

4.4 古人类活动时期环境变化特征

泥河湾盆地的孢粉分析表明,在早更新世开始阶段气候总体表现为相对开阔的干冷荒漠草原环境,在大约2.0~0.8 Ma而逐渐向相对温湿的方向转变,动植物资源丰富,为古人类生存提供了充足的食物资源^[7,29]。从易溶盐和平均粒径及磁化率变化所反映的古气候及环境变化信息来看,麻地沟遗址剖面总体属于湖滨相沉积,期间经历了大致5个气候变化阶段。在沉积期开始的第1阶段,气候相对较干,降水量相对较少,未见有人类活动遗物的发

现。在第 2—4 阶段,气候较第 1 阶段干旱程度降低,略显温湿,动植物资源也相对要丰富些。考古发掘表明,第 2 阶段的地层内发现古人类活动留下的石制品,表明古人类开始在麻地沟遗址从事石器制作活动;在第 3 阶段的地层中发现古人类活动留下的丰富石制品和动物化石,是古人类在该遗址活动的集中期,表明该阶段古人类不仅在该遗址有石器打制活动,而且可能有生活行为的发生;在第 4 阶段的地层内发现了多数较大的砾石和石制品伴生,表明古人类在该阶段主要从事原料采办和简单的石器制作活动。随后进入第 5 阶段,气候总体向较干的方向发展,古人类远离麻地沟遗址而没有留下遗物。

5 结论

(1)麻地沟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 $\text{SO}_4^{2-}-\text{Na}^+-\text{HCO}_3^--\text{Cl}^-$ 型,属于半咸水湖,处于半干旱区湖泊演化中后期硫酸盐湖向氯化物湖演化过渡阶段。

(2) K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- 等 6 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→E 共 5 个阶段,代表了湖泊演化的不同阶段。

(3)根据离子比值、总盐量变化并结合样品平均粒径、磁化率特征分析了湖泊演化的 5 个阶段的湖水性质变化和古气候特征。古人类活动时期对应于第 2—4 阶段,处于气候相对较为温湿、动植物资源丰富、湖水易溶盐含量较低阶段。

致谢:样品易溶盐的测试在核工业地质分析测试研究中心完成,中国地质科学院水文地质环境地质研究所(国土资源部地下水科学与工程重点实验室)承担了样品的粒度和磁化率测试,作者致以衷心的感谢。

参考文献 (References)

[1] Barbour G B, Licent E, Teilhard de Chardin P, Geological study of the deposits of the Sangkanho basin[J]. Bulletin of the Geological Society of China, 1927, 5(2-4): 263-278.
 [2] 卫奇,谢飞. 泥河湾研究论文选编[M]. 北京: 文物出版社, 1989. [WEI Qi, XIE Fei. Selected Publications of Nihewan [M]. Beijing: Cultural Relics Press, 1989.]
 [3] 谢飞. 泥河湾[M]. 北京: 文物出版社, 2006. [XIE Fei. Nihewan[M]. Beijing: Cultural Relics Press, 2006.]

[4] 邱占祥. 泥河湾哺乳动物群与中国第四系下限[J]. 第四纪研究, 2000, 20(2): 142-154. [QIU Zhanxiang. Nihewan fauna and Q/N boundary in China[J]. Quaternary Sciences, 2000, 20(2): 142-154.]
 [5] 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, 2007, 27(6): 922-944. [ZHU Rixiang, DENG Chenglong, PAN Yongxin. Magnetostratigraphy of the fluvio-lacustrine sequences in the Nihewan basin and its implications for early human colonization of Northeast Asia [J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(6), 922-944.]
 [6] 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 during the accumulation of the Nihewan series [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1984, 4(3): 101-110.]
 [7] 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. [ZHOU Tingru, LI Huazhang, LIU Qingsi, et al. Study on the Cenozoic Paleogeography of the Nihewan Basin [M]. Beijing: Science Press, 1991.]
 [8] 王晓蓉. 环境化学[M]. 江苏南京: 南京大学出版社, 1993. [WANG Xiaorong. Environmental Chemistry [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1993.]
 [9] Hakanson L, Jansson M. Principles of Lake Sedimentology [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1983.
 [10] Björck S, Olsson S, Evans C E, et al. Late Holocene palaeoclimatic records from lake sediments on James Ross Island, Antarctica[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1996, 121: 195-220.
 [11] 翟秋敏. 全新世安固里淖尔易溶盐沉积与环境[J]. 古地理学报, 2001, 3(1): 91-96. [ZHAI Qiumin. Holocene soluble salt sediments of Angulinuo Lake and its environment [J]. Journal of Palaeogeography, 2001, 3(1): 91-96.]
 [12] 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, 30(2): 148-158. [LI Rongquan, QIAO Jianguo, QIU Weili, et al. Soluble salt deposit in the Nihewanbeds and its environmental significance [J]. Science in China Series D (Earth Science), 2000, 30(2): 148-158.]
 [13] 李潇丽,裴树文,马宁,等. 泥河湾盆地东谷坨遗址剖面易溶岩沉积及其环境意义[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.]
 [14] 裴树文,马宁,李潇丽. 泥河湾盆地东端 2007 年发现的旧石器地点[J]. 人类学学报, 2010, 29(1): 33-43. [PEI Shuwen, MA Ning, LI Xiaoli. A report on the discovery of some Palaeolithic localities on the eastern part of Nihewan Basin in 2007 [J]. Acta Anthropologica Sinica, 2010, 29(1): 33-43.]
 [15] 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.
- [16] 卫奇. 泥河湾盆地考古地质学框架[C]// 见:童永生,张银运,吴文裕,等编. 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]// In: TONG Yongsheng, ZHANG Yinyun, WU Wenyu, et al. (Eds.). Evidence for Evolution Essays in Honor of Prof. Chungchien Young on the Hundredth Anniversary of His Birth. Beijing: Ocean Press, 1997:193-207.]
- [17] 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. [YUAN Baoyin, XIA Zhengkai, NIU Pingshan. Nihewan Rift and Early Man [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011.]
- [18] Channell J E T, Mazaud A, Sullivan P, et al. Geomagnetic excursions and paleointensities in the Matuyama Chron at Ocean Drilling Program Sites 983 and 984 (Iceland Basin) [J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107, 2114, doi:2110.1029/2001JB000491.
- [19] Deng C L, Xie F, Liu C C, et al. Magnetochronology of the Feiliang Paleolithic site in the Nihewan Basin and implications for early human adaptability to high northern latitudes in East Asia[J]. Geophysics Research Letters, 2007, 34: L14301, doi: 10.11029/2007GL030335.
- [20] Wang H Q, Deng C L, Zhu R X, et al. Magnetostratigraphic dating of the Donggutuo and Maliang Paleolithic sites in the Nihewan Basin, North China [J]. Quaternary Research, 2005, 64: 1-11.
- [21] Zhu R X, Hoffman K A, Potts R, et al. Earliest presence of humans in northeast Asia[J]. Nature, 2001, 413: 413-417.
- [22] 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. [Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soil Physico-chemical Properties Analysis [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1978.]
- [23] 刘东生. 中国第四纪环境概要[M]// 见:刘东生等编译. 第四纪环境. 北京:科学出版社, 1997: 189-239. [LIU Tongsheng. Outline of the Quaternary Environment in China [M]// In: LIU Tongsheng, ed. Quaternary Environment. Beijing: Science Press, 1997, 189-239.]
- [24] 陈茅南. 泥河湾层的研究[M]. 北京:海洋出版社, 1988. [CHEN Maonan. Study on the Nihewan Beds [M]. Beijing: China Ocean Science Press, 1988.]
- [25] Ding Z L, Rutter N W, Sun J M, et al. Re-arrangement of atmospheric circulation at about 2.6 Ma over northern China: evidence from grain size records of loess-paleosol and red clay sequences[J]. Quat. Sci. Rev., 2000, 19: 547-558.
- [26] George K, Friedrich H. Pleistocene climate in China dated by magnetic susceptibility[J]. Geology, 1988, 16:811-814.
- [27] 杨小强,李华梅. 泥河湾盆地沉积物粒度组分与磁化率变化相关性研究[J]. 沉积学报, 2002, 20(4):675-67. [YANG Xiaoliang, LI Huamei. The correlation between the content of the different grain size and magnetic susceptibility in lacustrine sediments, Nihewan Basin [J]. Acta Sedimentol Sinica, 2002, 20(4): 675-679.]
- [28] 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, 8(2): 125-133. [XI Xiaoxia, MU Defen, FANG Xiaomin, et al. Variation of Cl⁻ content in Paleo-Dongshanlake during Early Pleistocene and monsoonal evolution [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 8(2): 125-133.]
- [29] 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.]

SOLUBLE SALT IN THE SEDIEMNTS AT THE MADIGOU SITE, NIHEWAN BASIN AND ITS ENVIRONMENTAL IMPLICATIONS

LI Xiaoli¹, JIA Zhenxiu^{2,3}, PEI Shuwen^{2,3}, MA Dongdong^{2,3}

(1. Beijing Museum of Natural History, Beijing 100050; 2. Key Laboratory of Vertebrate Evolution and Human origins,

Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: The Madigou site lies on the northeast margin of the Nihewan Basin, North China. It is one of the newly discovered Early Pleistocene archaeological site in the Basin. The Madigou site is dominated by lake deposits located at the lower part of the Madigou section. Based on a well constructed soluble salts sequence of the section, the processes of hydrochemical and environmental evolution as well as human activities are studied by the authors. Results show that the Nihewan lake near the Madigou site was characterized by SO_4^{2-} , Na^+ , HCO_3^- and Cl^- ions, and the average content of the total soluble salts reaches 11.41‰, suggesting that the paleo-lake belonged to the kind of brackish water lake between the sulphate and the chloride lake in terms of lake evolution phase in a semi-arid area. The variation in K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , and Cl^- and the total content of soluble salts are well correlated. Upon the basis, five paleoclimatical stages were recognized according to the changes in mean grain size, susceptibility content, total soluble salt and soluble salt indicators in the profiles, which indicate the corresponding changes of lake environment. The middle stages of 2, 3 and 4, which were relatively warm and wet, are the periods dominated by active paleoanthropological activities. There were rich animal and plant resources in these periods and the salinity of the lake was relatively low. The results bear great significances in the research of the adaptive environment and behaviors of the early humans at the Madigou site.

Key words: soluble salt; human activity; Early Pleistocene; section of Madigou site; Nihewan basin