

文章编号: 1000-0550(2010)04-0790-08

# 柴达木盆地察尔汗盐湖 CH0310 钻孔沉积物磁化率及其影响因素分析<sup>①</sup>

张俊辉<sup>1 2</sup> 杨太保<sup>1</sup> 李永国<sup>3</sup> 张述鑫<sup>1</sup>

(1. 兰州大学资源与环境学院 西部环境教育部重点实验室 兰州 730000;  
2. 宝鸡文理学院 陕西宝鸡 721007; 3. 青海省地质调查院 西宁 810012)

**摘 要** 通过对长为 523 m 的柴达木盆地察尔汗盐湖 CH0310 钻孔沉积物岩性、磁性特征、高频质量磁化率、低频质量磁化率、频率磁化率和总有机碳(TOC)的实验分析,结果表明:CH0310 钻孔中磁铁矿是沉积物磁化率的主要贡献者;由于受气候和环境的影响与控制,以弱氧化环境为主,CH0310 钻孔中沉积物的磁化率与粗砂粒级含量成正相关与粘土级含量反相关关系;进一步对磁化率和 TOC 的相关性分析发现,在不同的沉积层磁化率和 TOC 的相关性表现出正负差异,这反映了磁化率对气候与环境的响应模式在 CH0310 钻孔不同层位并不完全相同,揭示出湖泊磁化率影响因素的复杂性和它作为气候代用指标的不确定性,因此认为对于地处高原干旱区沉积速率快、沉积层特别厚的湖泊来说,如果用单一的磁化率指标来反映或恢复古气候和古环境的变化需要特别慎重。

**关键词** 磁化率 TOC 岩性 沉积环境 察尔汗盐湖

**第一作者简介** 张俊辉 男 1979 年出生 讲师 环境演变与全球变化 E-mail: bwlzjh@126.com

**中图分类号** P534.63 **文献标识码** A

磁化率为我们提供了有关环境物质的矿物学和地球化学信息,从矿物组成我们往往能推知物质的来源或其环境化学等信息,而物质来源又进一步给出了矿物生成的环境条件等信息,环境条件千差万别,从而生成各种各样的矿物,其磁化率测值极为迥异。自从 20 世纪 70 年代 Thompson 和 Oldfield 创立环境磁学以来,磁化率作为一个重要的环境指标,已经在不同类型沉积物如:黄土、冲积物、湖积物、风沙堆积和南方红土等古气候、古环境研究领域得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。

在我国,人们对不同地域、不同类型及不同时间尺度的湖泊沉积物磁化率的磁性特征、影响因素及其所反映的区域古气候古环境变化也进行了较深入的分析研究,研究显示湖泊沉积物的磁化率记录可以反映气候的变化,磁化率可以作为恢复气候和环境变化的重要环境代用指标<sup>[2~8]</sup>。但是由于湖泊沉积物磁化率、频率磁化率的影响因素比较复杂,湖泊流域物质的磁性特征及沉积环境对湖泊中的磁性矿物的富集、保存、自生生成或反磁性矿物作用等均对磁化率会产生影响<sup>[2,9]</sup>,使得地域、类型和尺度不同的湖泊其沉积物磁化率形成机制亦不相同,进而对气候的

指示意义也有差别,因此用湖泊沉积物磁化率来解释气候和环境变化时,对湖泊沉积物磁化率特点和影响因素做研究就显得很有必要。

通过对柴达木盆地察尔汗盐湖 CH0310 钻孔的沉积物质量磁化率、频率磁化率、磁性矿物以及 TOC 等指标分析,探讨了察尔汗盐湖沉积物中主要的磁性载体、磁化率特点以及磁化率、沉积物岩性和 TOC 的关系,明确了影响察尔汗盐湖沉积物磁化率的物质来源及磁化率形成的沉积环境和气候条件等。

## 1 研究区地质地理概况

察尔汗盐湖发育于柴达木盆地东南部古老构造基底的中、新生代中央凹陷带上。湖区北侧为涩北、盐湖、哑叭尔等背斜构造,形成丘陵地带;西北为平缓隆起;东北为埃姆尼克山山前洪积、冲积扇;东、南、西三面为昆仑山山前洪积、冲积平原,这样的构造使得察尔汗盐湖成为柴达木盆地最大的汇水中心<sup>[10]</sup>。根据区域地址调查和钻探结果显示,察尔汗盐湖是第四纪期间柴达木盆地沉降最强烈、沉积地层发育的地区,堆积的沉积层厚达 2 000~3 000 m<sup>[11,12]</sup>。

察尔汗盐湖西北为阿尔金山,东北为祁连山,南

<sup>①</sup>国家自然科学基金项目(批准号:40871057),创新群体项目(40721061)联合资助。  
收稿日期:2009-06-22;收修改稿日期:2009-08-06

为昆仑山,地理坐标为东经  $94^{\circ}15'56'' \sim 95^{\circ}14'45''$ ,北纬  $36^{\circ}42'09'' \sim 37^{\circ}12'26''$ ,东西长 168 km,南北宽 20~40 km,总面积 4704.8 km<sup>2</sup>,由西向东分为别勒滩、达布逊、察尔汗和霍布逊四个区段。察尔汗盐湖属高原温带极度干旱气候区,冬长夏短,多风少雨,蒸发强烈。根据察尔汗气象站资料,多年平均气温为 5.33℃,多年平均降水量为 24.24 mm,多年平均蒸发量可达 3564.4 mm,极度干燥。



图1 CH0310 钻孔位置示意图

Fig. 1 Sampling location of sediments in the CH0310 core

CH0310 孔打钻于 2003 年 10 月,该孔位于察尔汗盐湖的南部(图 1)地理坐标为北纬  $36^{\circ}37'59''$ ,东经  $95^{\circ}01'45''$ ,海拔高度 2703 m,钻孔深度 523 m。剖面自上而下地层连续沉积,沉积速率快,沉积厚度大,是研究第四纪以来的古气候、古环境变化的良好的信息载体。整个钻孔从钻孔底部开始,基本是细砂/粉砂与粘土/粉砂质粘土互层。粉砂、粘土层的厚度变化很大,从十几米、几米到几十厘米不等,这些细颗粒沉积层主要以土黄色和青灰色为主,整个钻孔中青灰色的湖相沉积厚度一般从数厘米到二十多厘米很不连续,其中最厚的一段出现在 393.47~400.63 m 处。

## 2 实验

CH0310 孔磁化率的测量采用英国 Bartington MS2 型双频磁化率仪进行。样品室温下自然风干,在不损坏自然颗粒前提下捣碎磨细,装入 2 cm × 2 cm × 2 cm 见方的无磁塑料盒中,压实后称重,在远离干扰磁场的情况下对低频(0.47kHz)和高频(4.7kHz)磁化率各测试三次,取其平均值。分别算出所需的低频质量磁化率、高频质量磁化率和频率磁化率。共测试样品 1643 个。本文后面提到的磁化率均指低频质量磁化率。

古地磁实验主要的实验仪器为岩石超导磁力仪

(2G—755R Magnetometer) 和热退磁仪(MMTD60)。测试前先将样品在零磁空间静置 15 天,经过 13 步的热退磁法进行逐步退磁,共测试样品 217 个。

总有机碳(TOC):①将样品磨细,风干称重(其值在 0.2~0.5 g 之间,精确到 0.0001),装入试管中,加入 0.8000N 重铬酸钾标准溶液 5 mL,再注入 5 mL 浓硫酸摇匀;②将试管放入预先温度升到 185~190℃石蜡油浴锅中加热,温度控制在 170~180℃,溶液沸腾再煮 5 分钟后取出;③冷却后将试管内溶液洗入 250 mL 三角瓶中,加邻苯氨基苯甲酸指示剂 5 滴,用 0.2 mol/L 硫酸亚铁溶液滴定,溶液由棕红色经过紫色突变到绿色即为终点;④在测定样品的同时做 2 个空白试验,取其平均值。最后计算出 TOC 的百分含量,共测试样品 1643 个。CH0310 钻孔的以上实验均在兰州大学西部环境教育部重点实验室完成。

## 3 实验结果

低频质量磁化率、高频质量磁化率具有相同的变化趋势(图 2)。低频质量磁化率的变化范围是  $4.74 \times 10^{-8} \sim 107.8 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ,平均值为  $18.91 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ 。高频质量磁化率的变化范围是  $4.43 \times 10^{-8} \sim 107.47 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ,平均值为  $18.75 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ 。低频质量磁化率值比高频质量磁化率值略高。质量磁化率最高值  $107.8 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ,最低值  $4.74 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ 。CH0310 钻孔的质量磁化率的量值较低,但是开始的 14~31 m 是整个钻孔磁化率平均值较高的一段。

察尔汗 CH0310 钻孔沉积物频率磁化率在整体矿物磁化率含量中比值最高为 11.03%,最低值为 -1.64%,平均值仅为 0.91%,表明其频率磁化率量值较低。

热退磁实验表明,有样品在加热到 120℃时,剩磁显著减小,在 300~400℃间有样品失去大部分磁性,380℃时完全解阻,继续加热到 500℃大部分样品失去 80%~90%的磁性,到 580℃时所测大部分样品完全解阻。

CH0310 钻孔 TOC 含量最高达到 2.65%,最少的趋于 0,平均含量仅为 0.41%,说明整个剖面 TOC 含量很低。其中 56.3~59.5 m 处、123~124.9 m 处、389.5~399.5 m 等以粘土和湖相沉积为主的沉积层中 TOC 含量较高。几个极高值均出现在湖相沉积物中,整体上青灰色湖相沉积物的 TOC 含量普遍比其它沉积物高。

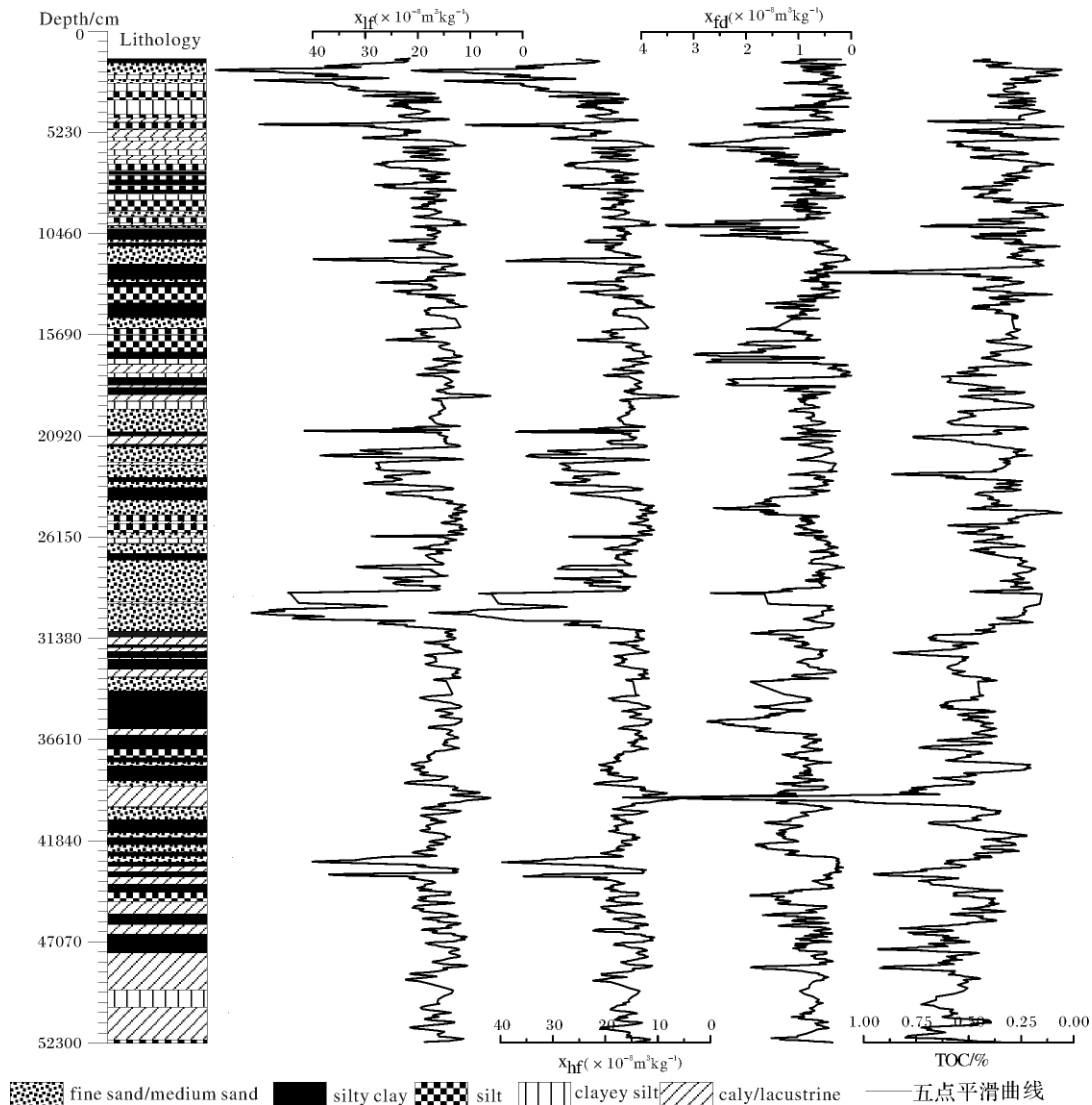


图2 CH0310 钻孔岩芯与低频质量磁化率、高频质量磁化率、TOC 对比图

Fig. 2 The sedimentary features and comparison of lithology, magnetic susceptibility and TOC in the CH0310 core

## 4 实验结果分析讨论

### 4.1 磁化率与岩性

在分析 CH0310 钻孔沉积物的岩性时,发现岩性与磁化率存在一些变化特点。从岩性与磁化率的对应关系来看(图2),砂质沉积物如:中砂/细砂甚至粉砂、粘土质粉砂的磁化率值整体相对较高,变化范围从  $12.01 \times 10^{-8} \sim 107 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ,最大值达到了  $107 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ,最大值与最小值的跨度范围特别大,将近一个数量级,主要数值段集中在  $20 \times 10^{-8} \sim 30 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ 。而细粒级沉积物如粉砂质粘土、粘土以及湖相沉积物的磁化率较低,磁化率值在  $4.74 \sim 38.31 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ,尤其粘土和湖相沉积物的磁

化率值明显低于其它,最低值  $4.74 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  的岩性是典型的湖相沉积物。中砂/细砂的磁化率平均值为  $23.98 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ,粉砂/粘土质粉砂的平均值为  $20.77 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ,粉砂质粘土/粘土的平均值为  $15.74 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ,而湖相沉积物的平均值仅为  $13.13 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ 。因此,似乎颗粒越粗,磁化率值越大,颗粒越细,磁化率值越小。这和匈牙利 Pannonian 盆地两个 500 m 钻孔研究结果极为相似<sup>[31]</sup>。

由于湖泊沉积物成因十分复杂,来源也并非单一,既有外源的,也有自生的,外源磁性矿物和沉积后的自生磁性矿物是一般湖泊沉积物中磁化率的主要物质载体。不同的物源,有不同的矿物组成,不同来

源的沉积物磁性大小也会不相同,而且不同来源之间沉积物的相对贡献的变化也会导致磁化率发生变化,CH0310 钻孔中粗粒和细粒物质的来源也是有差别的,柴达木盆地南部是高大的昆仑山,北边是祁连山,构成一个狭长地带,风向是以西风为主,根据 TM 遥感地质解译研究和察尔汗盐湖区碎屑物研究证明,盐湖中沉积的粉砂物质来源于风力从西部的搬运物,特别是粒度为  $10 \sim 50 \mu\text{m}$  的粗粉砂可能主要来源于风力搬运物<sup>[4,15]</sup>。察尔汗盐湖区粘土矿物是经风化、侵蚀、搬运到达湖盆沉积,沉积物中粘土矿物以伊利石为主,其次为绿泥石,蒙脱石和高岭石含量较少<sup>[16]</sup>。通过上面分析可以认为 CH0310 钻孔的沉积物主要以外源性为主。粗颗粒物质的搬运一般受到气候、风化和风力强弱等的影响,相对而言,气候干旱风力强盛的时期这些粗颗粒物质才有可能从柴达木盆地的西部通过大气携带而来,相对于粗颗粒沉积物形成的气候条件而言,粘土矿物生成的气候应该比较暖和湿润的,所以粘土矿物含量较高的沉积阶段反映当时的气候条件是较湿润的。湖泊内部的自身磁性矿物的产生主要是在还原条件下<sup>[17,18]</sup>,在水体较浅、处于弱氧化环境的海拔较高察尔汗盐湖很难生成和保存,所以物源以外源为主的 CH0310 钻孔沉积物就产生了磁化率与粗砂粒级的含量成正相关与粘土级的含量反相关的现象。

#### 4.2 磁化率与磁性矿物

铁磁性矿物含量是控制沉积物磁化率高低的的主导因素。磁性矿物的鉴定可以根据磁性矿物随温度或磁场强度变化的性质来推断沉积物中所赋存的磁性矿物的种类及其颗粒的大小<sup>[19-20]</sup>,逐步热退磁法则是判别磁性矿物种类的有效方法之一。文中选取 123 m 和 433 m 处岩性分别为粘土和粉砂质粘土的样品退磁曲线(图 3 A),通过热退磁实验分析认为:

CH0310 沉积物中最主要的磁性矿物是磁铁矿,磁铁矿在  $350 \sim 580^\circ\text{C}$  之间所载的剩磁约占全部剩磁的 20% 在  $580^\circ\text{C}$  附近解阻(如图 3 A)。另外,样品在加热到  $120^\circ\text{C}$  时,剩磁显著减小,指示达到了针铁矿的居里点( $120^\circ\text{C}$ );在  $300 \sim 380^\circ\text{C}$  温度范围内有样品完全解阻,证明沉积物可能含有磁黄铁矿和胶黄铁矿。磁黄铁矿存在于部分变质岩和基性岩中,对于察尔汗盐湖来说,盆地周边基岩及各时代的侵入岩、变质岩、沉积岩遭受强烈的剥蚀,碎屑物随着河水和洪水迁移至盆地,这些碎屑物成为察尔汗盐湖的沉积物<sup>[21-22]</sup>,这证明有磁黄铁矿存在的可能。但是胶黄铁矿常存在于高有机质产率的淡水湖泊中<sup>[23]</sup>或富含有机质及硫酸盐的还原沉积中<sup>[24]</sup>,察尔汗盐湖是咸水湖,整个湖泊的深水湖相沉积很少,仅有一些滨浅湖相沉积,而且很不连续,整个剖面平均 TOC 含量仅为 0.41%,有机质含量很低,说明湖泊生态系统的生产力应该很低,所以基本可以排除自生的胶黄铁矿的存在的可能。通过分析初步认为:在 CH0310 钻孔中沉积物不可能仅含有一种磁性矿物,应该是几种不同类型磁性矿物的自然混合体,磁铁矿、针铁矿、磁黄铁矿,可能还有赤铁矿的存在。磁铁矿几乎存在于整个剖面的泥性和砂性样品中,它是整个剖面磁化率的主要贡献者。磁化率值的高低变化则主要原因可能是因为磁性矿物的种类或含量不同而导致的,高值可能主要以磁铁矿的含量相对多一些,而低值样品中可能针铁矿和磁黄铁矿的含量则要稍多一些。

#### 4.3 质量磁化率与频率磁化率

察尔汗 CH0310 钻孔沉积物质量磁化率与频率磁化率曲线进行对比(图 2),可以看出两者的相关性较为复杂。察尔汗 CH0310 钻孔沉积物频率磁化率在整个剖面矿物磁化率含量中比值最高占 11.03%,最低值为  $-1.64\%$ ,平均值仅为 0.91%,有少量样品

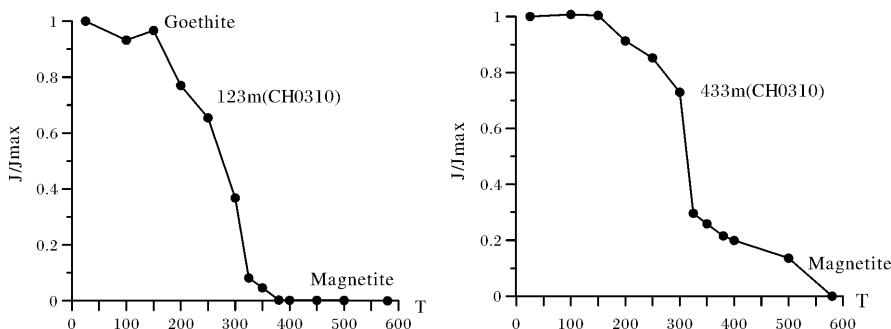


图3 代表性样品的热退磁曲线

Fig. 3 Thermal demagnetization curves of the typical samples

的频率磁化率表现为负值,其原因除测量误差外,最主要的可能与样品所含的超顺磁性颗粒少有关。由于超细( $<0.03\mu\text{m}$ )超顺磁性颗粒只对低频磁化率有贡献,所以频率磁化率可以用来鉴别超细超顺磁性亚磁铁矿物,作为超顺磁性颗粒含量多少的一种近似估算方法<sup>[25]</sup>,所以平均值仅为0.91%的含量可以表明CH0310钻孔中超顺磁性矿物很少,对沉积物磁化率的贡献很小。

#### 4.4 磁化率与 TOC 的关系

沉积物中影响磁化率值的另外一个因素是 TOC 的含量,而 TOC 对湖泊沉积物磁化率的影响表现为两方面。首先,高产率的 TOC 在沉积过程中,因为氧化作用而消耗大量的氧气,这种还原环境有利于自生磁性矿物的生成;其次,大量的 TOC 的混入,可以使因物源碎屑中带来的磁性矿物的相对含量降低,从而使磁化率降低<sup>[26]</sup>。CH0310 钻孔剖面沉积物 TOC 含量在沉积的不同阶段有明显的高低变化(图2),钻孔 TOC 平均含量仅为 0.41%,显示了整个剖面 TOC 含量很低、湖泊自身生产力很弱的特点,所以认为 CH0310 剖面所处环境变化以弱氧化环境为主,而湖泊内部的自生磁性矿物的生成主要是在还原条件下,在 CH0310 孔中比较难以生成,这与前面认为 CH0310 钻孔中磁性矿物沉积主要以外源为主的结论是一致的。而且根据对察尔汗盐湖的贝壳堤分子化石研究结果,证明察尔汗盐湖 TOC 主要为湖泊自身微生物的贡献<sup>[27]</sup>,这对进一步研究柴达木盆地区的古气候意义重大。通过岩心和 TOC 的比较发现(图2)除去几种岩性混合复杂的沉积层外,岩性相对单一的沉积层整体上 TOC 与岩性对应关系良好,

这种现象可能说明两种不同的沉积环境导致 TOC 和岩性的变化:当细粒沉积物堆积时,由于气候相对湿润,流域有一定植被覆盖,减少了粗碎屑物质供给,此时湖水处于相对还原的条件,适合水生生物生长,造成 TOC 含量偏高;另一方面该区所处气候带当受到强的西风影响时,气候干燥,不利于植物的生长,水生生物也极其贫乏,所以 TOC 比较难以生成和保存下来,致使沉积物中 TOC 值偏低。一般认为在 TOC 含量较高的湖泊中,TOC 的沉积会稀释磁性物质<sup>[26]</sup>,从而表现为磁化率与 TOC 呈负相关变化,但是在 CH0310 钻孔中,整个剖面的 TOC 平均含量很低,所以似乎不能将磁化率低全部归结为有机质稀释作用的结果,但是反过来,由于该剖面沉积速率大,TOC 由于陆源物质的稀释也会降低,导致 TOC 低的部位磁化率值要高一些,而 TOC 值高的沉积部位磁化率值则低一些。

通过对整个剖面 TOC 和磁化率做相关性分析发现,其相关性仅为 -0.20,这可能与剖面沉积速率大,不同沉积阶段岩性变化大,沉积环境相对复杂等都有关系,也可能与样品总数量太多有关。每个阶段的沉积岩性不同,表明沉积环境和气候条件的差异,某一湖泊沉积物磁学信号对于环境变化的响应模式往往不能直接用于其它湖泊,甚至同一湖泊的不同部位<sup>[28]</sup>,所以对 CH0310 整个剖面的磁化率和 TOC 做相关性分析并不能准确反映出各时期磁化率与 TOC 的关系。通过对 CH0310 钻孔不同层位的磁化率与 TOC 分层进行相关性分析发现:在不同沉积层,磁化率和 TOC 表现出的相关性是有差别的(表1)。

表1 察尔汗 CH0310 钻孔不同沉积层的磁化率与 TOC 的相关系数

Table 1 Correlation between magnetic susceptibility and TOC in different horizons in the CH0310 core

深度/cm	岩性	相关系数	样本数	深度/cm	岩性	相关系数	样本数
1403 ~ 1638	砂土	-0.57	10	17050 ~ 17512	粘砂/粉砂	0.57	15
1638 ~ 1859	细砂/粘土	-0.62	12	18777 ~ 19135	粘土	-0.67	11
1850 ~ 2185	细砂	-0.61	14	23551 ~ 24204	砂土/细砂	0.54	19
2467 ~ 3078	粘砂	-0.70	29	24204 ~ 24541	粉砂	0.86	12
3078 ~ 3372	粉砂	0.61	14	30968 ~ 32169	砂土/粘土	-0.56	35
4442 ~ 4994	粘土/粉砂	-0.57	29	32169 ~ 33280	砂土/粘土	-0.57	22
4994 ~ 5606	砂土/粘土	-0.58	32	35122 ~ 35863	砂土	-0.57	25
5606 ~ 6257	粘土	-0.60	29	35863 ~ 36365	粘土	-0.63	15
6850 ~ 7088	粉砂	-0.62	10	36815 ~ 37430	粘土	-0.62	15
7088 ~ 7422	砂土/粘土	-0.55	13	37430 ~ 38042	砂土/细砂	-0.56	16
9416 ~ 9756	细砂/砂土	-0.65	13	40828 ~ 41286	砂土/粉砂	-0.57	13
9756 ~ 10410	细砂/砂土	-0.55	28	41286 ~ 41685	中砂	0.76	11
12920 ~ 13266	砂土	-0.59	15	43931 ~ 45009	砂土/粉砂	-0.54	34
13266 ~ 13593	粉砂	-0.55	19	48448 ~ 48885	粘土	-0.55	13

总的说来,磁化率和 TOC 呈现良好负相关沉积层占很大比例,有少量沉积层磁化率与 TOC 有良好的正相关,但是还有些层位的相关性则不显著,高含量 TOC,且 TOC 与磁化率呈负相关性的沉积层所对应的沉积物岩性以细粒沉积物和粘土为主,其原因可能由于湖泊整体处于弱氧化环境,不利于磁性矿物的生成,而且还可能导致部分外源性磁性矿物会被溶解,所以磁化率会降低;而粗颗粒沉积物一般 TOC 值较低且 TOC 与磁化率呈正相关,其原因可能与沉积物主要以外源性粗粒物质为主导致磁化率偏高有一定关系。同时,磁化率、TOC 和岩性的相关关系表明磁化率与沉积物的粒度有关,表明沉积环境、沉积物来源对 TOC 和磁化率的影响是不能忽视的。CH0310 钻孔中磁化率和 TOC 在不同沉积层相关性的差异也说明在 CH0310 钻孔中磁化率指标对气候和环境的响应模式在不同沉积层位并不完全相同,这与黄土<sup>[29~32]</sup>甚至其他地域和类型的一些湖泊中磁化率对气候的指示意义是有区别的,进一步表明湖泊磁化率作为气候代用指标的复杂性,所以对地处高原干旱区这种沉积速率快、沉积层特别厚的湖泊来说,如果用单一的磁化率指标来反映或恢复古气候和古环境的变化需慎重,而结合其它物理、化学、生物等多种指标则似乎可靠,更准确。

## 5 结论

(1) CH0310 钻孔磁性沉积物主要以外源性为主,主要的磁性矿物有磁铁矿、针铁矿和磁黄铁矿,磁化率的变化主要是由于磁性矿物的种类和含量差别所导致的。

(2) 磁化率与岩性表现出良好的相关性,磁化率与粗砂粒级的含量成正相关与粘土级的含量反相关的现象,主要原因是物源和沉积环境对 CH0310 钻孔的磁化率变化有一定影响和控制作用,沉积物外源性为主,自生磁性矿物很难在弱氧化环境的察尔汗盐湖中生成,而细颗粒指示当时相对湿润的环境,粗颗粒表明环境比较干燥。

(3) 频率磁化率含量仅为 0.91%,表明 CH0310 钻孔中超细超顺磁性矿物含量很少,对沉积物磁化率的贡献很小。

(4) 对沉积物分层讨论其磁化率与 TOC 的关系发现:在不同沉积层,TOC 和磁化率的相关性是不同的,TOC 和磁化率呈负相关关系的沉积层以细颗粒沉积物为主,反之 TOC 和磁化率呈正相关关系的沉

积层以粗颗粒沉积物为主,表明在 CH0310 钻孔中磁化率对环境的响应模式在湖泊不同沉积层位并不完全相同,这与黄土甚至其他地域和类型的一些湖泊中磁化率对气候的指示意义是有区别的,进一步揭示出湖泊磁化率影响因素的复杂性和它作为气候代用指标的不确定性,因此对地处高原干旱区沉积速率快、沉积层特别厚的湖泊来说,如果用单一的磁化率指标来反映或恢复古气候和古环境的变化需要特别慎重,结合其它物理、化学、生物等多种指标则似乎可靠,更准确。

致谢 于永涛、范喆、宿星、鲁振宇参与了野外打钻采样工作,田庆春、石培宏、祝和勇、闫晶参与了实验工作,在此一并致谢!

## 参考文献(Reference):

- 1 吉云平,夏正楷. 不同类型沉积物磁化率的比较研究和初步解释 [J]. 湖泊科学, 2007, 28(6): 541-549 [Ji Yunping, Xia Zhengkai. Comparison and primarily interpretation of magnetic susceptibilities in different sediments [J]. Journal of Lake Sciences, 2007, 28(6): 541-549]
- 2 胡守云,王苏民, Appel E, 等. 呼伦湖湖泊沉积物磁化率变化的环境磁学机制 [J]. 中国科学: D 辑, 1998, 28(4): 334-339 [Hu Shouyun, Wang Sumin, Appel E, et al. Environmental magnetism in magnetic susceptibility of Hulun lake sediments [J]. Science in China: Series D, 1998, 28(4): 334-339]
- 3 吴瑞金. 湖泊沉积的磁化率、频率磁化率及其古气候意义——以青海湖、岱海近代沉积为例 [J]. 湖泊科学, 1993, 5(2): 128-135 [Wu Ruijin. Magnetic susceptibility and frequency dependent susceptibility of lake sediments and their paleoclimate implication—the case of recent sediments of Qinghai lake and Daihai lake [J]. Journal of Lake Sciences, 1993, 5(2): 128-135]
- 4 张振克,吴瑞金,王苏民. 岱海湖泊沉积物频率磁化率对历史时期环境变化的反映 [J]. 地理研究, 1998, 17(3): 297-302 [Zhang Zhenke, Wu Ruijin, Wang Sumin. Implication of magnetic frequency dependent susceptibility on susceptibility variation from lacustrine sediment in Daihai Lake [J]. Geographical Research, 1998, 17(3): 297-302]
- 5 张振克,吴瑞金,王苏民. 近 2600 年来内蒙古居延海湖泊沉积纪录的环境变化 [J]. 湖泊科学, 1999, 10(2): 44-51 [Zhang Zhenke, Wu Ruijin, Wang Sumin. Environmental changes recorded by Lake sediments from east Juyanhai lake in inner Mongolia during the past 2600 years [J]. Journal of Lake Sciences, 1999, 10(2): 44-51]
- 6 杨健强,崔之久,易朝露,等. 云南点苍山冰川湖泊沉积物磁化率的影响因素及其环境意义 [J]. 第四纪研究, 2004, 24(5): 591-597 [Yang Jianqiang, Cui Zhijiu, Yi Chaolu, et al. The influencing factors and environmental significance of magnetic susceptibility in the glacio-lacustrine sediments on the Diancang mountains, Yunnan province [J]. Quaternary Sciences, 2004, 24(5): 591-597]

- 7 罗攀,郑卓,杨晓强. 海南岛双池玛珥湖全新世磁化率及其环境意义[J]. 热带地理, 2006, 26(3): 211-217 [Luo Pan, Zheng Zhuo, Yang Xiaoqiang. Holocene magnetic susceptibility from Shuangchi Maar lake, Hainan island and its environmental significance [J]. Tropical geography, 2006, 26(3): 211-217]
- 8 曹希强,郑祥民,周立导,等. 洪湖沉积物的磁性特征及其环境意义[J]. 湖泊科学, 2004, 16(3): 22-232 [Cao Xiqiang, Zheng Xiangmin, Zhou Limin, et al. Paleoenvironmental implication of magnetic measurements on sediments core from Honghu lake [J]. Journal of Lake Sciences, 2004, 16(3): 227-232]
- 9 Hounslow M W, Maher B A. Source of the climate signal recorded by magnetic susceptibility variations in Indian Ocean sediments [J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104: 5047-5061
- 10 狄恒恕,王松贵. 柴达木盆地北缘中-新生代构造演化探讨[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 1991, 16(5): 533-539 [Di Hengshu, Wang Songgui. The study of the evolution of the Mesozoic and Cenozoic structures in the northeast margin of Qaidam basin [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1991, 16(5): 533-539]
- 11 Liu Zechun, Wang Yongjin, Chen Ye, et al. Magnetostratigraphy and sedimentologically derived geochronology of the Quaternary lacustrine deposits of a 3 000 m thick sequence in the central Qaidam Basin, Western China [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1998, 140(1-4): 459-473
- 12 青海省地质调查院. 柴达木盆地地下水资源及其环境问题调查评价报告[R]. 2008 [Geological Survey of Qinghai Province. The Report of Investigation and Assessment of Environmental Issues of Groundwater Resources in the Qaidam Basin [R]. 2008]
- 13 Nádor A, Lantos M, Tóth-Makk á, et al. Milankovitch-scale multiproxy records from fluvial sediments of the last 2.6 Ma, Pannonian Basin, Hungary [J]. Quaternary Sciences Review, 2003, 22, 2157-2175
- 14 张辉,韩凤清. 柴达木盆地中部盐湖环境遥感初步解译[J]. 盐湖研究, 2002, 10(1): 28-34 [Zhang Hui, Han Fengqing. The preliminary remote sensing interpretation of salt lake and its environments in the central Qaidam basin, Northwest China [J]. Journal of Salt Lake Research, 2002, 10(1): 28-34]
- 15 王俊达,王三学. 青海柴达木盆地晚新生代地质环境演化[M]. 北京: 科学出版社, 1986 [Wang Junda, Wang Sanxue. Late Cenozoic Evolution of the Geological Environment in Qaidam Basin, Qinghai [M]. Beijing: Science Press, 1986]
- 16 徐昶. 中国盐湖黏土矿物研究[M]. 北京: 科学出版社, 1993 [Xu Chang. Study of Clay Minerals in China Salt Lake [M]. Beijing: Science Press, 1993]
- 17 Hilton J, Lishman J P, Chapman J S. Magnetic and chemical characterization of a diagenetic mineral formed in the sediments of productive lakes [J]. Chemical Geology, 1986, 56: 325-335
- 18 胡守云, Appel E, Hoffmann V, Schmahl W, 等. 湖泊沉积物中胶黄铁矿的鉴定及其磁学意义[J]. 中国科学: D 辑, 2002, 32(3): 234-238 [Hu Shouyun, Appel E, Hoffmann V, Schmahl W, et al. Identity of pyrite and its magnetic significance in lake sediments [J]. Science in China: Series D, 2002, 32(3): 234-238]
- 19 Laj C, Kissel C, Mazaud A, et al. North Atlantic paleointensity stack since 75ka (NAPIS-75) and the duration of the Laschamp event [J]. Phil Trans R Soc Lond (A), 2000, 358: 1009-1025
- 20 Deng C L, Zhu R X, Verosub K L, et al. Paleoclimatic significance of the temperature-dependent susceptibility of Holocene loess along a north-south transect in the Chinese loess plateau [J]. Geophysics Research Letter, 2000, 27(22): 3715-3718
- 21 刘欢,刘永江,袁四化,等. 柴达木盆地西北部红三旱地区始新世—渐新世砂岩物源分析[J]. 地质通报, 2007, 26(1): 100-107 [Liu Huan, Liu Yongjiang, Yuan Sihua, et al. Provenance analysis of Eocene-Oligocene sandstones in the Hongsanhan area, northwestern Qaidam basin, Qinghai, China [J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(1): 100-107]
- 22 王春男,郭新华. 察尔汗盐湖钾镁盐矿成矿地质背景[J]. 西北地质, 2008, 41(1): 97-106 [Wang Chunnan, Guo Xinhua, Ma Mingzhu, et al. Ore-forming geology background of K-Mg salt in Qarhan Salt Lake [J]. Northwestern Geology, 2008, 41(1): 97-106]
- 23 Hilton J A, Lishman J P. The effect of redox change on the magnetic susceptibility of sediments from a seasonally anoxic lake [J]. Limnology and Oceanography, 1985, 30: 907-909
- 24 Snowball I F, Thompson R. The occurrence of greigite in sediments from Lomond [J]. Journal of Quaternary Science, 1988, 3: 121-125
- 25 Thompson R, Oldfield F. Environmental Magnetism [M]. London: George Allen & Unwin, 1986
- 26 John Hilton. A simple model for the interpretation of magnetic records in lacustrine and ocean sediments [J]. Quaternary Research, 1987, 27: 160-166
- 27 Zhang H C, Chang F Q, Li B, et al. Branched aliphatic alkanes of the Late Pleistocene paleolake deposits from the Qaidam basin, NE Tibetan plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(9): 1248-1256
- 28 胡守云,邓成龙, Appel E, 等. 湖泊沉积物磁化性质的环境意义[J]. 科学通报, 2001, 46(17): 1491-1494 [Hu Shouyun, Deng Chenglong, Appel E et al. Environmental magnetic studies of lacustrine sediments [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(17): 1491-1494]
- 29 刘东生,等著. 黄土与环境 [M]. 北京: 科学出版社, 1985 [Liu Dongsheng, et al. Loess and the Environment [M]. Beijing: Science Press, 1985]
- 30 安芷生, Kukla G, 刘东生. 洛川黄土地层学 [J]. 第四纪研究, 1989, (2): 157-168 [An Zhisheng, Kukla G, Liu Dongsheng. Loess stratigraphy in Luochuan of China [J]. Quaternary Sciences, 1989, (2): 157-168]
- 31 安芷生, Porter S, Kukla G, 等. 最近 13 万年黄土高原季风变迁的磁化率证据 [J]. 科学通报, 1990, 35(7): 529-532 [An Zhisheng, Porter S, Kukla G, et al. Magnetic susceptibility evidence of season winds changes on loess plateau during the late 130kyr [J]. Chinese Science Bulletin, 1990, 35(7): 529-532]
- 32 刘秀铭,安芷生, Heller F, 等. 黄土频率磁化率与古气候冷暖变换 [J]. 第四纪研究, 1990, (1): 42-50 [Liu Xiuming, An Zhisheng, Heller F, et al. Frequency-development susceptibility of loess [J]. Quaternary Science, 1990, (1): 42-50]

## Analysis on the Magnetic Susceptibility and Its Influence Factors of the Lake Sediments in the CH0310 Core of Qarhan Paleolake , Qaidam Basin

ZHANG Jun-hui<sup>1 2</sup> YANG Tai-bao<sup>1</sup> LI Yong-guo<sup>3</sup> ZHANG Shu-xin<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment , Key Laboratory of West China's Environmental Systems with the Ministry of Education , Lanzhou University , Lanzhou 730000;

2. Geography Department , Baoji University of Arts and Sciences , Baoji , Shaanxi 721007;

3. Institute of Geological Survey of Qinghai Province , Xining 810012)

**Abstract** By analyzing lithology , magnetic features , the high-frequency and the low-frequency quality magnetic susceptibility , frequency magnetic susceptibility and total organic matter ( TOC) of the sediments of the 523m CH0310 core in Qarhan paleolake , Qaidam Basin , the conclusion shows that magnetite is the main contributor to the magnetic susceptibility in the CH0310 core. Due to the impact and control of the climate and environment , magnetic susceptibility is positively correlated with coarse sand content and negatively correlated with the clay content in sediments from the weak oxidation environment-dominated CH0310 core. Based on the further analysis on the relevance of magnetic susceptibility and TOC , the results present that the relevance of magnetic susceptibility and TOC in the different sediment layers show the positive and negative differences , reflecting the different corresponding model of magnetic susceptibility to climate and environment in CH0310 different layers , revealing the complexity of the factors as well as the uncertainty of the lake magnetic susceptibility as a proxy indicator of climate. Therefore , for the lake which is located in the plateau and arid area and has the rapid sedimentation rate and thicker sediment layers , special care should be taken if using magnetic susceptibility as a single indicator to reflect and reconstruct the paleoclimatic and paleoenvironmental changes.

**Key words** magnetic susceptibility; TOC; lithology; depositional environment; Qarhan paleolake