

文章编号: 1000-0550(2011)01-0143-08

# 青藏高原腹地湖泊沉积物磁化率及其环境意义<sup>①</sup>

田庆春 杨太保 张述鑫 石培宏 张俊辉 范喆

(兰州大学资源环境学院 西部环境教育部重点实验室 兰州 73000)

**摘要** 通过青藏高原腹地可可西里边缘地区 BDQ0608 钻孔岩芯分析,表明其岩性主要为浅绿色湖相沉积物,其中夹杂部分较薄的氧化色层段。热退磁表明:BDQ0608 钻孔中磁性矿物主要有磁铁矿、磁赤铁矿、针铁矿和胶黄铁矿,赤铁矿表现不太明显,其组分含量直接控制磁化率值的大小;并且对样品进行了磁化率、粒度、总有机碳及色度的测定。磁化率的大小与黏土含量呈正相关,可能是由于沉积物后期形成的胶黄铁矿及砂性沉积物中磁性矿物被破坏的缘故。并且将磁化率值与总有机碳及色度  $a^*$  值对比,发现它们都呈正相关,但内部出现不同的波动形式,说明磁化率值的高低变化并不是与其它指标有完全一一对应的关系,而受沉积时期的环境条件所影响。因此,我们认为磁化率作为环境代用指标能很好的反映环境的变化,但在恢复古环境古气候的过程中要慎重使用,并且要结合其它高精度的环境指标使用,以提高对过去环境恢复的精度。

**关键词** 磁化率 湖泊沉积 可可西里地区

**第一作者简介** 田庆春 男 1982 年出生 博士研究生 湖泊沉积与环境演变 E-mail: tianqch06@lzu.cn

**中图分类号** P932 **文献标识码** A

近几十年来,地磁学在地球科学和环境科学研究中的广泛应用,形成一个独立的新的研究领域,即环境地磁学,它的潜在作用,已引起越来越多的注意和重视。在中国黄土沉积记录的研究中,磁化率是一个被广泛用来反映夏季风强度变化的气候代用指标,反映了受东南季风控制的成壤强度和降水量的变化。由于湖泊特有的区域性,对湖泊沉积物磁化率的环境磁学机制的认识还比较困难。目前在不同地质岩性、不同气候类型带的几十个湖泊的数百孔沉积物岩芯的研究中成功地得到了应用。虽然国内学者对太湖、呼伦湖、滇池等湖泊沉积物的磁性特征及其反映的区域古气候古环境变迁进行了较深入的研究<sup>[1-4]</sup>,但其结果存在着很大的差异,甚至得出相反的结论。因此利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及其影响因素的理解是必不可少的。笔者选取青海可可西里作为研究区,通过对古湖泊沉积钻孔 BDQ0608 磁化率的研究,结合粒度、TOC、色度等环境指标,探讨了湖泊沉积物磁化率的环境意义,并初步分析了该区湖泊沉积物磁化率变化的影响因素。

## 1 研究区概况

青海可可西里地区处于青藏高原腹地,其南北边

缘分属于唐古拉山脉和昆仑山脉,东至青藏公路沿线,西抵省界,中部广大地区为可可西里山等山地及其相间的宽谷盆地。可可西里地区面积约达  $8.2 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,平均海拔 4 800 ~ 5 000 m,大气含氧量约为  $170 \text{ g/m}^3$ (仅为海平面含氧量的 60% 左右),年均气温  $-4^\circ\text{C}$ ,年大风日数大于 100 d。可可西里地区水系补给来源主要依靠冰雪融水,其次为泉水。在降水量较大的年份,也可能造成季节性洪水泛滥。

课题组于 2006 年 8 月在可可西里东部边缘区古湖泊体上( $35^\circ 13' 05''\text{N}$ ,  $93^\circ 55' 52.2''\text{E}$ )取得一沉积岩芯,编号为 BDQ0608,岩芯长 106 m,取芯率在 90% 以上。该钻孔距青藏公路约 30 km,紧靠昆仑山垭口盆地(图 1)。岩芯在野外用塑料布进行密封,然后运回实验室按 2 cm 间距分样,以备进行实验分析。岩芯深度均为校正到钻孔的地层深度,岩性主要为浅绿色湖相沉积,其中夹杂部分较薄的氧化色层段。沉积岩芯的颜色变化主要为:浅绿色(灰绿色、青绿色)沉积—黄色(褐色、铁锈色、黑色和灰色)—浅绿色(灰绿色、青绿色)沉积,即浅色沉积与深色沉积交替出现,各段沉积深度均不相同,浅色沉积层厚度明显大于深色沉积层厚度。

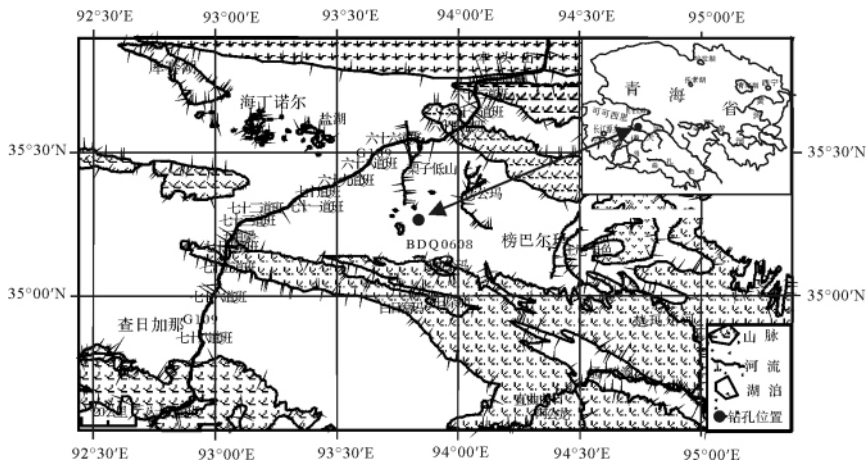


图 1 BDQ0608 钻孔位置示意图

Fig. 1 Location of Core BDQ0608

## 2 实验方法

**样品干燥** 按 10 cm 间距进行磁化率、粒度、总有机碳和色度的测定,并以 10~20 cm 间距进行古地磁测试。

**磁化率** 测试样品 1 003 个,样品在室温条件下自然风干,在不损坏自然颗粒结构前提下捣碎磨细,装入 2 cm × 2 cm × 2 cm 见方的无磁塑料盒中,压实后称重。使用英国 Bartington 公司生产的 MS2 型便携式双频磁化率仪进行测试。该仪器产生的交变磁场强度约为 80 A/m。在远离干扰磁场的情况下对低频(0.47 kHz)和低频(4.7 kHz)磁化率各测试三次,取其平均值。

**粒度** 粒度分析利用英国 Malvern Instruments 公司生产的 Mastersizer2000 激光粒度仪完成。首先对样品进行前期处理,利用 10% 的过氧化氢去除样品中的有机质,10% 的盐酸去除无机碳(主要是钙质胶结物),然后进行分散、测定。Mastersizer2000 激光粒度仪测量粒径范围为 0.02~2 000 μm,可以保证获得完整的粒度分布曲线。

**总有机碳** 总有机碳(TOC)的测试采用重铬酸钾容量法—外加热法分析<sup>[5]</sup>。

**色度** 样品在常温下自然风干、研磨(保持样品颗粒在固结成团前的原始大小)。取经过预处理的样品 2~3 g 放于白色参照板上,压实、压平后,随机选取三个区域用 X-Rite948 型分光光度计进行测量,测试参数为 CIE D<sup>65</sup> 标准光源(色温为 6 500 K),观察视野为 10°,孔径为 8 mm。仪器自动求出三次

测量的  $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$  的平均值。

**古地磁** 古地磁实验主要的实验仪器为 2G 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 d,根据样品的磁性状况,经过 10~13 步的热退磁进行逐步退磁,共测试样品 453 个。

## 3 实验结果

经实验分析,BDQ0608 钻孔样品的质量磁化率的量值较低(图 2),在  $n \times 10^{-8} \sim 10n \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  之间。当质量磁化率( $\chi$ )小于  $20 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$  时,频率磁化率主要反映的是测试误差,这种情况下给出的频率磁化率通常是不可信的<sup>[6]</sup>。因此,下面仅讨论低频质量磁化率(简称磁化率  $\chi$ )。

通过对整个岩芯磁化率值分析发现,磁化率峰值多出现在沉积颜色较深多为黄色、浅褐色、红褐色等氧化色的层段。并且磁化率高值一般与高  $a^*$  值相对应(在色度中予以讨论)。从图 2 中可以看出,磁化率值的波动曲线和  $<4 \mu\text{m}$  粒径组分的百分含量之间有很好的对应关系,尤其是经过 Log 以 10 为底的函数转换后对应关系更加明显,只是在波动幅度上有一定的差异。钻孔岩芯的总有机碳含量都较低,只有在几个层位出现峰值。最高值为  $66.98 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,最低值为  $0.79 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,平均值为  $6.67 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。从整个岩芯色度曲线来看,色度  $a^*$  值峰谷变化比较小,在 -2.11 到 13.01 之间变化,平均值为 0.52,总体在一个较低的水平上变化。且岩芯中高  $a^*$  值大都对应于颜色发红(铁锈色、褐色和黄色)的沉积物。

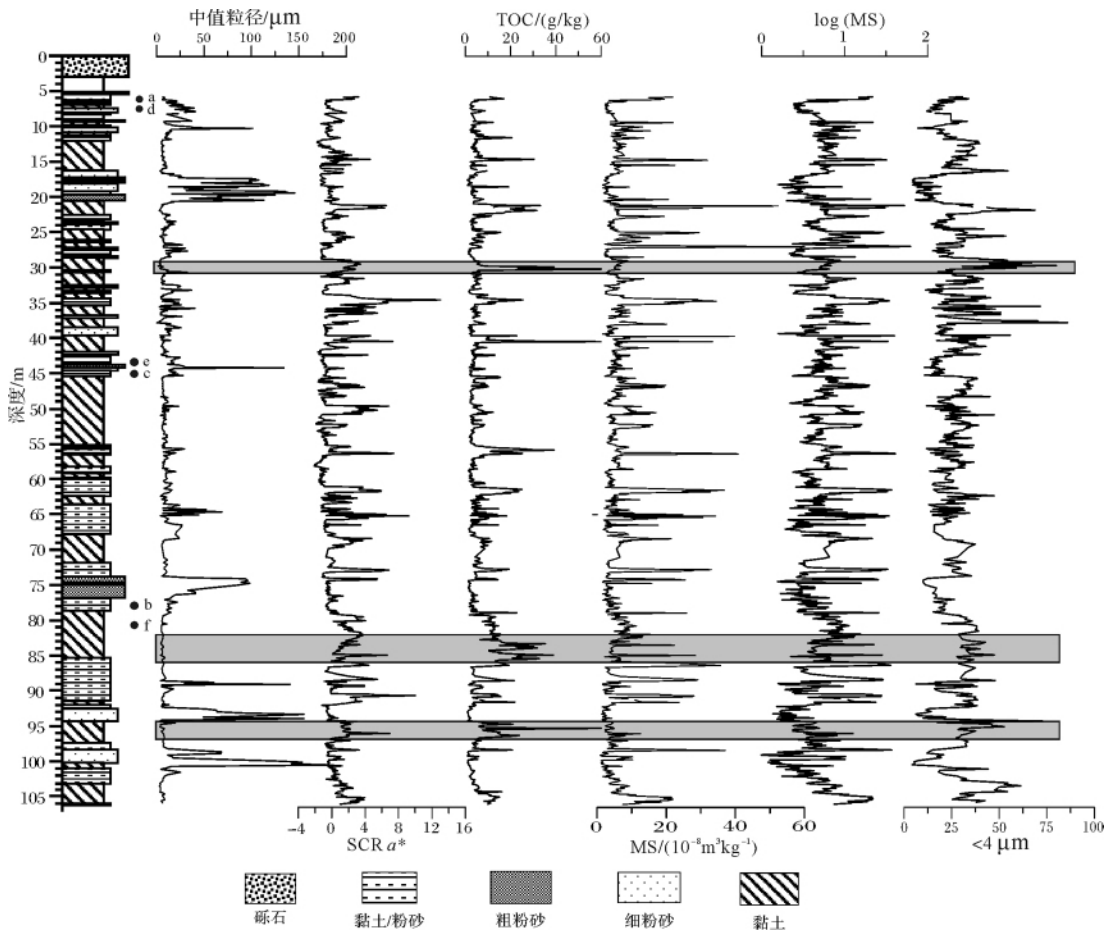


图 2 BDQ0608 钻孔各环境指标随深度的变化  
 Fig. 2 Comparisons of all environmental proxies from Core BDQ0608

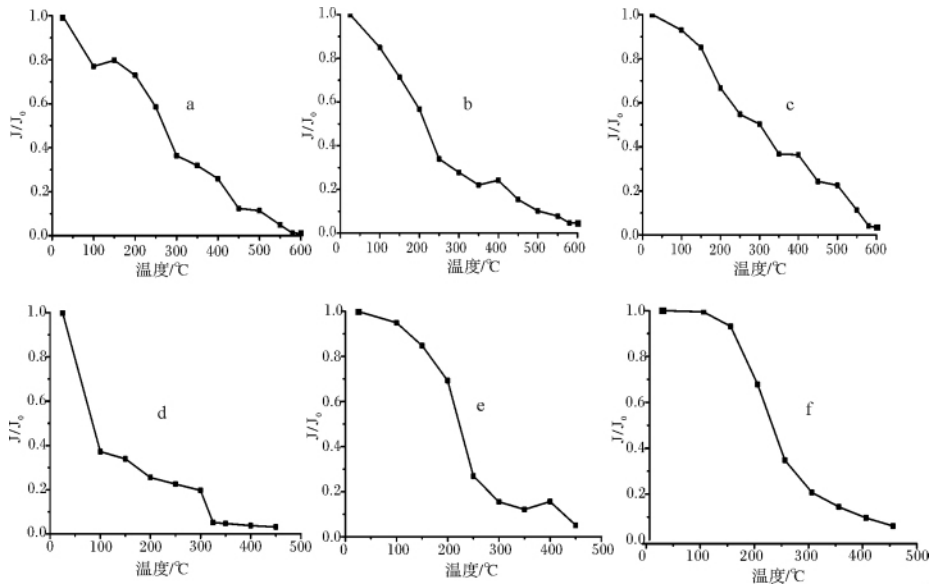


图 3 代表性样品的热退磁曲线  
 Fig. 3 Thermal demagnetization curves of the typical samples

表 1 环境代用指标的相关性分析

Table 1 Correlation analyses on environmental proxies from Core BDQ0608

	$\chi$	$<4 \mu\text{m}$	$4 \sim 63 \mu\text{m}$	$>63 \mu\text{m}$	TOC	SCR $a^*$
$\chi$	1	0.211/0.03	0.019/0.10	-0.124/0.10	0.477/0.001	0.644/0.001
$<4 \mu\text{m}$		1	-0.052/0.01	-0.503/0.001	0.308/0.001	0.335/0.001
$4 \sim 63 \mu\text{m}$			1	-0.757/0.001	-0.017/0.10	-0.109/0.10
$>63 \mu\text{m}$				1	-0.161/0.10	-0.116/0.10
TOC					1	0.525/0.001
SCR $a^*$						1

注:表中“/”后数字为置信水平。相关分析样本数在文中括号内标出。

热退磁分析可知,磁铁矿解阻主要在两个温度段略高于  $300^\circ\text{C}$  和  $580^\circ\text{C}$  左右。大部分泥质样品在略高于  $300^\circ\text{C}$  附近解阻(图 3d、e、f),砂质样品大都在  $580^\circ\text{C}$  附近解阻(图 3a、b、c),图 2 中标出所选代表性的退磁样品的位置。

## 4 分析与讨论

为了解影响磁化率与其它环境指标之间的关系,对磁化率( $\chi$ )、 $<4 \mu\text{m}$  粒级组分、 $4 \sim 63 \mu\text{m}$  粒级组分、 $>63 \mu\text{m}$  粒级组分、总有机碳(TOC)、色度(SCR  $a^*$ )进行相关分析(表 1)。相关分析结果表明:磁化率同  $<4 \mu\text{m}$  粒级组分、总有机碳和色度  $a^*$  值呈正相关关系,与后两个相关性较好。同时  $<4 \mu\text{m}$  粒级组分与总有机碳和色度  $a^*$  值均呈正相关关系。下面将它们之间的关系进行简单讨论。

### 4.1 磁化率与磁性矿物

铁磁性矿物含量和种类是控制沉积物磁化率高低的主要因素。因此,我们在研究磁化率的过程中有必要对沉积物所含的磁性矿物做出鉴定。BDQ0608 钻孔位置紧靠昆仑山垭口盆地,位于垭口的东侧。葛道凯等研究表明垭口盆地物源于北北东方向的三叠系变质岩系。据此可推测本湖泊沉积物与垭口盆地的沉积物相同或相近。宋春晖<sup>[6,7]</sup>等人认为垭口盆地沉积物携带特征剩磁的矿物可能主要有磁赤铁矿、磁铁矿和赤铁矿。而本钻孔是否含有这些磁性矿物还有待进一步鉴定。比如,可以用磁性矿物随温度或者磁场强度的变化性质来推断沉积物所赋存的磁性矿物种类及其颗粒的大小<sup>[8,9]</sup>。胡守云等人认为逐步热退磁方法则有助于识别磁性矿物的种类<sup>[10]</sup>。由热退磁分析可知(图 3),样品磁性矿物的解阻主要在两个温度段略高于  $300^\circ\text{C}$  和  $580^\circ\text{C}$  附近。由此我们可以认为一种磁性矿物的贡献者,显然是磁铁矿,它在  $580^\circ\text{C}$  附近解阻,主要集中在砂质样品。在退磁过程中另外一种表现明显的磁性矿物可能是铁磁性硫

化物铁矿(胶黄铁矿、或磁黄铁矿)。该成分在略高于  $300^\circ\text{C}$  的温度中解阻<sup>[11]</sup>,这部分样品主要为泥质样品。Snowball 和 Thompson 认为,在富含有机质及硫酸盐的还原条件下,胶黄铁矿通过原地自生作用所形成,载有次生化学剩磁,且滞后于沉积物的沉积时间<sup>[12]</sup>。从图 2 中我们可以看出本岩芯中有一定含量的总有机碳,这就为铁磁性硫化铁的生成提供了条件。并且磁化率与总有机碳呈正相关变化,引起它们呈正相关变化的最有可能就是在富含有机质的还原环境中生成的铁磁性的硫化铁。在  $300^\circ\text{C}$  解阻的磁性矿物还有磁赤铁矿,根据其物源的分析认为该磁性矿物存在于沉积物中。但磁赤铁矿与有机质没有直接的关系,由此说明引起磁化率与总有机碳同步变化的最有可能就是铁磁性的硫化铁。另外,样品在加热到  $100^\circ\text{C}$  时,剩磁显著减小,指示达到了针铁矿的居里点( $120^\circ\text{C}$ );岩芯部分层位出现氧化的铁锈色,说明磁性矿物中可能含有赤铁矿,可能因其含量较少而在退磁过程中表现不太明显。赤铁矿可能来自流域的碎屑,也有可能是在后期的氧化环境中生成的。岩芯部分层位出现氧化的铁锈色是由赤铁矿染色的缘故。而且由于赤铁矿的存在还引起了色度  $a^*$  值高低的变化(在色度中予以讨论)。

综上所述,我们认为 BDQ0608 钻孔沉积物磁性矿物主要有磁铁矿、磁赤铁矿、针铁矿、铁磁性硫化物铁矿和赤铁矿。磁铁矿和磁赤铁矿广泛存在于所有砂质及泥质样品中,认为来源于流域的碎屑矿物,它是整个岩芯磁化率的主要贡献者。而赤铁矿和针铁矿是在后期氧化和氧化还原条件下生成的低磁性矿物,对磁化率贡献较小<sup>[13]</sup>。在泥质样品中另外还存在着占主导磁性地位的铁磁性硫化铁,它导致了泥质样品的磁化率远远高于砂质样品的磁化率。砂质沉积物一般都属于滨岸带和靠近滨岸带的水体较小的环境,水和空气介质的反复改造和分选,促使磁铁矿和磁赤铁矿被机械破碎和化学分解。因此,本钻孔中

砂质样品中磁化率低的原因可能是由于磁铁矿和磁赤铁矿在搬运和分选过程中被分解和破坏。

#### 4.2 磁化率与粒度特征关系

磁化率与沉积物粒度参数的关系非常密切,通过对泥河湾研究发现,磁化率值与较粗物质呈正相关关系<sup>[14]</sup>。青海湖的磁化率研究表明由集水盆地侵蚀所得的碎屑物质比细粒更加富含磁性矿物<sup>[15]</sup>。崔建新等<sup>[16]</sup>研究河北任丘剖面发现,磁化率记录了与降水和湖面相关的水文变化信息,对于以外源碎屑输入为主的湖泊,磁化率值往往与粒度成正比。据此可以认为在以外源碎屑输入为主的湖泊中,沉积物磁化率变化主要受控于外源铁磁性矿物,它反映了湖水面的升降,蕴含着一定的古气候信息。而本文研究结果来看, BDQ0608 钻孔与此正好相反,从图 2 中可以看出, BDQ0608 磁化率的深度曲线和  $< 4 \mu\text{m}$  粒级组分的百分含量之间呈正相关关系(相关系数  $r = 0.211$ ,  $n = 702$ ) (表 1),尤其是经过 Log 以 10 为底的函数转换后对应关系更加明显,只是在波动幅度上有一定的差异,而且磁化率与  $4 \sim 63 \mu\text{m}$  粒级组分的百分含量基本上不相关(相关系数  $r = 0.019$ ,  $n = 702$ ),与  $> 63 \mu\text{m}$  粒级组分的百分含量成弱的负相关(相关系数  $r = -0.124$ ,  $n = 702$ ),说明磁化率值的变化主要受细颗粒沉积物的影响。虽然,它们之间的相关系数较小,但它们的波动趋势较为一致。吴瑞金<sup>[17]</sup>指出对湖泊沉积物来说,磁化率与频率磁化率的意义不在于其绝对量值的大小,而主要在于其相对变化(幅度、周期、频率等)所反映的古气候、古环境信息。磁化率高值对应细粒沉积物(粉砂质泥、泥质粉砂),这与呼伦湖研究一致,当气候干旱时,沉积物较粗,主要为细砂,此时湖泊水位较低,磁化率值亦低;而当气候湿润时,沉积物相对较细,主要为粉砂质泥,或泥质粉砂,此时湖泊水位较高,相应磁化率值亦升高<sup>[18~20]</sup>。王心源等<sup>[21]</sup>对安徽巢湖的研究也发现低频磁化率值与黏土含量呈正相关,相关系数  $r = 0.782$ ,而与粉砂组分百分比含量成负相关( $r = 0.785$ )。俞立中等<sup>[3,22]</sup>曾对云南滇池钻孔(草 2 孔)据推测,砂质样品磁性低,是由于受近岸带水和空气介质的反复分解和破坏,磁性矿物被机械破碎和化学分解,或分选出去;而形成于开阔湖的泥质沉积物,处于较稳定环境,磁性矿物易于保存。由以上分析认为, BDQ0608 钻孔沉积物磁化率与粒度呈反相关关系,相关系数较小(表 1),说明磁化率不仅受沉积过程中水动力大小的影响,而在沉积后受后期的沉积环境(温度、水分等)

影响较大。粗颗粒磁化率较小,可能是由于其所含磁性矿物被机械破碎和化学分解,或分选出去,从而使沉积物粗颗粒磁化率为低值。而黏土沉积物磁化率含量较高,一方面由于黏土沉积为气候湿润湖泊水体较大,磁性矿物受到较小的破坏保存较好,另一方面还有可能由于湖泊水体较大形成相对还原的环境有利于铁磁性硫化物铁矿生成的缘故。

#### 4.3 沉积物磁化率与总有机碳(TOC)关系

青藏高原现代遥感影像与气候数据的分析结果表明,整个高原近 20 年植被净初级生产力(NPP)变化趋势与年均温的变化趋势比较一致,其相关性达到显著性水平<sup>[23]</sup>。因此,高海拔湖泊沉积中有机碳含量的变化更能敏感地反映水体和环境的冷暖变化<sup>[24~26]</sup>。黄麒等<sup>[27]</sup>通过对察尔汗盐湖近 750 ka 气候演化研究表明,沉积剖面有机碳高值段对应暖期,低值段对应冷期。青藏高原 RH 孔的研究也得出相同的结论<sup>[28]</sup>。当气候温暖湿润时,陆生植物和水生生物较繁盛,导致总有机碳含量增大;当气候寒冷时,陆生植物减少,湖泊原始生产力降低,使总有机碳含量下降。而且 TOC 与色度  $a^*$  值呈正相关关系,相关性较好(表 1),表明在高有机质段温度可能较高。前人研究结果显示,大量的有机质混入,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>[29]</sup>。通过对整个岩芯总有机碳含量的分析来看(图 2),我们认为本岩芯中总有机碳对磁化率的冲淡作用较小或者不存在冲淡作用。只是在某些层位沉积了较高的总有机碳可能会对磁化率有一定的稀释作用,分别出现在 28.5 ~ 30 m、82 ~ 86 m 和 94 ~ 96 m。从图 2 中我们可以看出,磁化率与总有机碳含量呈正相关关系(相关系数为  $r = 0.477$ ,  $n = 972$ )。磁化率升高可能是由于温度大幅升高时,湖泊水体增加,湖面增高,湖泊中大量的微生物活动,高湖面使湖泊还原面积扩大,有利于自生的铁细菌产生具有较强磁性的莓球状黄铁矿<sup>[31]</sup>。胡守云等<sup>[10]</sup>认为,磁铁矿系来自湖泊流域的碎屑矿物,次生的铁磁性硫化铁是在相对还原、富有机质环境中自生生成。热退磁分析中我们也认为铁磁性矿物中有铁磁性硫化铁的存在。因此我们认为总有机碳含量高值段磁化率值也较高,其原因可能因为在高有机质段有利于铁磁性硫化物铁矿生成的缘故。还有可能高的总有机碳一般都对应气候温暖湿润的高湖面,使磁性矿物易于保存,使它不至被分解和破坏。但从图 2 中可以看出,它们的波动幅度又有一定的差异,说明它们在沉积过

程中还受到其它不同因素的影响。进一步表明湖泊沉积物磁化率作为气候代用指标的复杂性。在应用过程中不能简单的套用已有的结论,要充分考虑区域气候的特征及湖泊的沉积环境。

#### 4.4 沉积物磁化率与色度关系

20 世纪 90 年代后,在 ODP 对大西洋的海洋沉积物研究中,逐渐引入了 CIE/ $L^* a^* b^*$  表色系,用于研究千年尺度的气候环境变化<sup>[31-32]</sup>。在 CIE 表色系中, $L^*$  表示亮度,受控于沉积物的碳酸盐和有机质含量变化; $a^*$  为红—绿彩度,主要受控于碳酸镁含量及二价与三价铁矿物的组成; $b^*$  为黄—蓝彩度,主要受控于不同价态的铁的氢氧化物的含量<sup>[31]</sup>。Scheffer 等<sup>[33]</sup> 人发现只需 1.7% 的赤铁矿就可使土壤变成红色。通过对整个岩芯研究发现,整个岩芯中色度  $a^*$  值都比较低,最大值为 13.01。平均值为 0.52。并且高  $a^*$  值大都对应于颜色发红(铁锈色、褐色和黄色)的层位,由磁性矿物的物源分析可知磁性矿物中可能含有赤铁矿,也有部分可能是后期的氧化环境中生成的。但从色度的值来看不论赤铁矿是后期氧化生成的还是通过各种应力从流域带来的其含量都比较低致使在热退磁过程中该成分表现不明显。李才林等<sup>[34]</sup> 也认为彩度( $a^*$  和  $b^*$ ) 代表了当时环境下的氧化—还原程度,铁的氧化物可能为其颜色的主要贡献者。岩芯的颜色发红(铁锈色、褐色和黄色)可能由于赤铁矿的染色的缘故。由此我们认为本岩芯磁性矿物中含有赤铁矿,色度  $a^*$  值主要受赤铁矿含量的控制,高  $a^*$  值指示相对较强氧化环境,温度较高。色度  $a^*$  值与磁化率呈很好的正相关关系(相关系数  $r = 0.644$   $n = 972$ ) (表 1),赤铁矿含量的多少可以对磁化率值高低的变化起到一定的贡献,但它主要是控制沉积物红度(色度  $a^*$  值)的变化,而色度  $a^*$  值与磁化率曲线的变化呈良好的正相关关系,说明它们的变化受相同的环境因素控制

## 5 结论

本文对青藏高原腹地可可西里地区 BDQ0608 钻孔进行了磁化率的测量,同时分析了粒度、总有机碳和色度。并且对样品进行了热退磁分析。得出如下几点结论:

(1) 通过热退磁及岩性分析表明,影响磁化率高低磁性矿物主要有磁铁矿、磁赤铁矿、针铁矿和铁磁性硫化物,赤铁矿表现不太明显。它们的含量多少直接影响磁化率的高低变化。

(2) 沉积物磁化率与沉积物黏土的含量呈正相关关系。磁性矿物在粉砂—黏土质沉积物中较为富集。其形成原因主要是与湖泊保存条件有关。

(3) 磁化率的大小与总有机碳含量呈正相关关系,可能主要受温度和湿度的控制,一方面高的总有机碳一般都对应气候温暖湿润的高湖面,使磁性矿物易于保存,使它不至被分解和破坏,另一方面又由于高有机碳的湖泊可以有利于铁磁性硫化物的生成。

(4) 沉积物色度  $a^*$  值与磁化率呈明显的正相关关系,色度  $a^*$  值主要受赤铁矿含量控制,其高低主要反映当时氧化作用的强弱。

文章只是简单从环境代用指标与磁化率之间的关系进行了简单的分析,至于它们对磁化率影响的贡献究竟有多大,还有待磁性矿物含量多少的测定和结合其它物理、化学、生物等多种指标的辅助研究。

致谢 鄂崇毅参加野外打钻工作,在成文过程中课题组的其他同学提出宝贵的意见,在此深表谢意。

## 参考文献(References)

- 俞立中,许羽,许世远,等. 太湖沉积物的磁性特征及其环境意义[J]. 湖泊科学,1995,7(2): 141-150 [Yu Lizhong, Xu Yu, Xu Shiyuan, et al. Paleoenvironmental implication of magnetic measurements on sediment cores from Taihu lake, east China [J]. Journal of Lake Sciences, 1995, 7(2): 141-150]
- 胡守云,吉磊,王苏民,等. 呼伦湖地区扎赉诺尔晚第四纪湖泊沉积物的磁化率变化及其影响因素[J]. 湖泊科学,1995,7(1): 33-40 [Hu Shouyun, Ji Lei, Wang Sumin, et al. Change and influence factors of magnetic susceptibility of the late Quaternary lacustrine sediments in Jula nur, Hulun lake area [J]. Journal of Lake Sciences, 1995, 7(1): 33-40]
- Yu Lizhong, Oldfield F, Wu Yushu, et al. Paleoenvironmental implication of magnetic measurements on sediment core from Kunming Basin, Southwest China [J]. Journal of Paleolimnology, 1990, 3: 95-111
- 朱立平,陈玲,陈平中,等. 环境磁学反映的藏南沉槽地区 13000 年来冷暖变化[J]. 第四纪研究,2001,(6): 520-527 [Zhu Liping, Chen Ling, Chen Pingzhong, et al. Cold/warm fluctuations of the last 1300 years reflected by environmental magnetism in the Chencuo, southern Tibet [J]. Quaternary Sciences, 2001, 21(6): 520-527]
- 王苏民,李建仁. 湖泊沉积—研究历史气候的有效手段[J]. 科学通报,1991,36: 54-56 [Wang Sumin, Li Jianren. Lacustrine sediments—an effective way to research the historical climatic variation [J]. Chinese Science Bulletin, 1991, 36(1): 54-56]
- 宋春晖,高东林,方小敏. 青藏高原昆仑山垭口盆地晚新生代高精度磁性地层及其意义[J]. 科学通报,2005,50(19): 2145-2154 [Song Chunhui, Gao Donglin, Fang Xiaomin. Late Cenozoic high-resolution magnetic stratigraphy and its significance in Kunlun pass basin of Tibetan plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(19):

- 2145-2154]
- 7 张振, 宋春晖, 张平. 青藏高原昆仑山垭口盆地晚上新世以来沉积物磁化率与气候变化[J]. 江苏地质, 2007, 31(3): 192-199 [Zhang Zhen, Song Chunhui, Zhang Ping, *et al.* Magnetic susceptibility of lacustrine sediments and climatic change in Kunlun pass basin of Tibetan plateau since late Pliocene[J]. *Jiangsu Geology*, 2007, 31(3): 192-199]
  - 8 Laj C, Kissel C, Mazaud A, *et al.* North Atlantic paleointensity stack since 75ka (NAPIS-75) and the duration of the Laschamp event[J]. *Philosophical Transactions Royal Society London A, Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 358, 2000, 358: 1009-1025
  - 9 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]. *Geophysic Research Letter*, 2000, 27(22): 3715-3718
  - 10 胡守云, 邓成龙, Appel E 等. 湖泊沉积物磁学性质的环境意义[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]
  - 11 Andrew P R. Magnetic properties of sedimentary greigite ( $Fe_3S_4$ ) [J]. *Earth Planet Science Letters*, 1995, 134: 227-236
  - 12 Snowball I, Thompson R. A stable chemical remanence in Holocene sediments[J]. *Geophysical Research*. 1990, 95: 4471-4479
  - 13 杨胜利, 方小敏, 李吉均, 等. 表土颜色和气候定性至半定量关系研究[J]. 中国科学: D 辑, 2001, 31(增刊): 175-181 [Yang Shengli, Fang Xiaomin, Li Jijun, *et al.* Transformation functions of soil color and climate[J]. *Science in China: series D*, 2001, 31(S1): 175-181]
  - 14 杨晓强, 李华梅. 泥河湾盆地典型剖面沉积物磁化率特征及其意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(1): 75-84 [Yang Xiaoqiang, Li Huamei. The magnetic susceptibility characteristics of the typical sections of the Nihewan basin and its implication [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1999, 19(1): 75-84]
  - 15 余俊清, Kelts K. 末次冰消期晚期青藏高原东北部气候变化[J]. 第四纪研究, 2002, 22(5): 413-423 [Yu Junqing, Kelts K. Climatic change in the northeast Tibetan plateau during the late glacial/Holocene transition[J]. *Quaternary Sciences*, 2002, 22(5): 413-423]
  - 16 崔建新, 周尚哲, 韩海涛, 等. 河北任丘剖面河湖相沉积及全新世水文气候事件[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(4): 107-113 [Cui Jianxin, Zhou Shangzhe, Han Haitao, *et al.* Fluvial-lacustrine sediments and Holocene climatic and hydrologic events in the Renqiu section, Hebei province[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2005, 25(4): 107-113]
  - 17 吴瑞金. 湖泊沉积物的磁化率、频率磁化率及其古气候意义[J]. 湖泊科学, 1993, 5(2): 128-135 [Wu Ruijin. Magnetic susceptibility and frequency dependent susceptibility of lacustrine sediments and their paleoclimate implication[J]. *Journal of Lake Sciences*, 1993, 5(2): 128-135]
  - 18 王苏民, 吉磊, 羊向东, 等. 呼伦湖——古湖泊学研究[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1995 [Wang Sumin, Ji Lei, Yang Xiangdong, *et al.* The Research about Ancient Lake: The Case of Hulun Lake [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1995]
  - 19 Wang Sumin, The record of Younger Dryas event in the lake sediment from Jalai Nur, Inner Mongolia [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1994, 39(10): 831-835
  - 20 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性制[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]
  - 21 王心源, 吴力, 张广胜, 等. 安徽巢湖全新世湖泊沉积物磁化率与粒度组合的变化特征及其环境意义[J]. 地理科学, 2008, 28(4): 548-553 [Wang Xinyuan, Wu Li, Zhang Guangsheng, *et al.* Characteristics and environmental significance of magnetic susceptibility and grain size of lacustrine sediments since Holocene in Chaohu lake, Anhui province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2008, 28(4): 548-553]
  - 22 张树夫, 肖家仪, 俞立忠, 等. 湖泊沉积物矿物磁性矿物测量在古环境研究中的应用[J]. 地理科学, 1993, 5(2): 28-493 [Zhang Shufu, Xiao Jiayi, Yu Lizhong, *et al.* Mineral magnetic measurement of lacustrine sediments and its environmental implication[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1993, 5(2): 128-193]
  - 23 周才平, 欧阳华, 王勤学, 等. 青藏高原主要生态系统净初级生产力的估算[J]. 地理学报, 2004, 59(1): 74-79 [Zhou Caiping, Ou Yanghua, Wang Qinxue, *et al.* Estimation of net primary productivity in Tibetan plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(1): 74-79]
  - 24 沈吉, 张恩楼, 夏威岚. 青海湖近千年来气候环境变化的湖泊沉积记录[J]. 第四纪研究, 2001, 21(6): 508-513 [Shen Ji, Zhang Enlou, Xia Weilan. Records from lakes sediments of the Qinghai Lake to mirror climatic and environmental changes of the past about 1000 years[J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(6): 508-513]
  - 25 李世杰, 王小天, 夏威岚, 等. 青藏高原鲁鲁错湖泊沉积记录的小冰期气候变化[J]. 第四纪研究, 2004, 24(5): 578-584 [Li Shijie, Wang Xiaotian, Xia Weilan, *et al.* The Little Ice Age climate fluctuations derived from lake sediments of Goulucuo, Qinghai Xizang Plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(5): 578-584]
  - 26 吴敬禄, 刘建军, 王苏民. 近 1500 年来新疆艾比湖同位素记录的气候环境演化特征[J]. 第四纪研究, 2004, 24(5): 585-590 [Wu Jinglu, Liu Jianjun, Wang Sumin. Climatic change record from stable isotopes in Lake Aibi, Xinjiang during the past 1500 years[J]. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(5): 585-590]
  - 27 黄麒, 孟昭强, 刘海玲, 等. 柴达木盆地查尔汗盐湖区古气候波动模式的初步研究[J]. 中国科学: B 辑, 1990, 6(6): 652-663 [Huang Qi, Meng Zhaoqiang, Liu Hailing, *et al.* The preliminary study of ancient climate fluctuation patterns of Qarhan salt lake, Qaidam Basin [J]. *Science in China: Series B*, 1990, 6(6): 652-663]
  - 28 张平中, 王先彬, 陈践发, 等. 青藏高原 RH 孔沉积有机质  $\delta^{13}C$  和氢指数记录[J]. 中国科学(B 辑), 1995, 6: 450-463 [Zhang Pingzhong, Wang Xianbin, Chen Jianfa, *et al.* The records about organic matter,  $^{13}C$  and Hydrogen index in the RH core of Tibetan plateau

- [J]. Science in China( Series B) ,1995 ,(6) : 450-463]
- 29 John Hilton. A simple model for the interpretation of magnetic records in lacustrine and ocean sediments [J]. Quaternary Research ,1987 , 27: 160-166
- 30 曹洁, 张家武, 张成君, 等. 青藏高原北缘哈拉湖近 800 年来湖泊沉积及其环境意义 [J]. 第四纪研究, 2007, 27(1) : 100-107 [Cao Jie, Zhang Jiawu, Zhang Chengjun, et al. Environmental changes during the past 800 years recorded in lacustrine sediments from Hala lake in the northern Tibetan plateau [J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(1) : 100-107]
- 31 Seiya Nagao, Satoru Nakashima. The factors controlling vertical color variations of north Atlantic Maderia abyssal plain sediments [J]. Marine Geology, 1992, 109(1-2) : 83-94
- 32 Jan P Helmke, Michael Schulz, Henning A Bauch. Sediment-color record from the Northeast Atlantic reveals patterns of millennial-scale climate variability during the past 500000 years [J]. Quaternary Research, 2002, 57: 49-57
- 33 Scheffer f, Welte E, Zur Flage der Eisinoxidhydrate im Boden [J]. Chm Erde, 1958, 19: 51-64
- 34 李才林. 江淮平原末次冰消期以来环境变化的钻孔记录 [D]. 南京师范大学, 2007 [Li Cailin. The core records about environmental change in Jianghuai plain since last deglaciation [D]. Nanjing Normal University, 2007]

## Magnetic Susceptibility and Its Environmental Significance of Lake Sediments in Tibet Plateau

TIAN Qing-chun YANG Tai-bao ZHANG Shu-xin SHI Pei-hong ZHANG Jun-hui FAN Zhe

( College of Resources and Environment , Key Laboratory of West China's Environmental

Systems , Ministry of Education , Lanzhou University , Lanzhou 730000)

**Abstract** A 106 m long sediment core named BDQ0608 was drilled from the Hohxil area in hinterland of the Tibet Plateau, and the lithology is mostly reseda lake sediments with part of a thin oxide color layer. The thermal demagnetization indicates that magnetic mineral in BDQ0608 core mainly includes magnetite, maghemite, goethite, melnikovite, and trace hematite. Magnetic susceptibility was directly related to the composition of magnetic mineral. Magnetite, which abounds in sandy and argillaceous samples, was considered to derive from the detrital minerals in the basin and be a major contributor to magnetic susceptibility of the whole core. The hematite and goethite generated under post-oxidation and oxidation-reduction conditions are both low-magnetic minerals, so they have relatively little contributions to the magnetic susceptibility. Furthermore, it should be specially pointed out that ferromagnetic iron sulfide which dominates magnetism of sediments in the argillaceous sediments would induce much higher magnetic susceptibility than the others. In addition, magnetic susceptibility, grain size, TOC and color reflectance were analyzed at 10 cm intervals. The positive correlation between magnetic susceptibility and clay content is attributed to the destruction of the mucus pyrite formed late and magnetic minerals from sand sediments. Meanwhile, comparing magnetic susceptibility with TOC and color reflectance  $a^*$  separately, the results indicated that there are both positive correlation between them, which may be mainly affected by temperature and humidity. On the one hand, high TOC content implied that the climate during this period was warm and humid corresponding to high lake water level, which could avoid destroying magnetic minerals in the sediments. On the other hand, it was beneficial to the generation of ferromagnetic sulfide in the lakes with high TOC content. The amount of hematite could have a certain contribution to the change of magnetic susceptibility, but it mainly dominated red degrees value (color reflectance  $a^*$  values) of sediments. So, low color reflectance values of the sediments show less hematite content, but it may also be the reason for the poor performance of the thermal demagnetization process of hematite. The good positive correlation between color reflectance  $a^*$  values and the changes in magnetic susceptibility curve showed that the varieties of them were subjected to the same environmental factors. Nevertheless, the fluctuation of magnetic susceptibility is not in line with other proxies, and influenced by ambient environment condition during the period of sediment formation. Although as an environmental proxy magnetic susceptibility can reflect environmental changes well, we must combine with other high accurate environmental proxies to improve the accuracy of paleoenvironmental reconstruction.

**Key words** magnetic susceptibility; lake deposit; Hohxil area