

文章编号: 1006-6616 (2010) 04-0372-11

鹤庆盆地湖相岩心磁化率记录 及其古环境意义

徐新文^{1,2}, 强小科¹, 安芷生¹, 李续斌^{1,2}, 李 鹏^{1,2}, 孙玉芳^{1,2}

(1. 中国科学院地球环境研究所, 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 陕西 西安 710075;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 鹤庆盆地位于受印度季风影响的中国西南地区, 沉积连续, 厚度大, 是古环境研究的理想场所。本文主要通过对鹤庆湖相岩心磁化率记录的分析研究, 并结合碳酸盐、烧失量和粒度特征对古环境变化的响应机理, 探讨了沉积物中磁化率的古环境指示意义。本研究发现, 磁化率与碳酸盐和烧失量具有显著的相反变化; 而与粒度的关系较为复杂。磁化率与指示粗颗粒变化的中值粒径在含砂(砾)层具有较好的正相关关系; 与指示细颗粒变化的 $<4\mu\text{m}$ 颗粒的相对含量, 在湖相粘土沉积中具有较为明显的正相关关系, 表明湖相沉积物中的亚铁磁性矿物主要来自于外源带入的粘土粒级碎屑物中。通过分析磁化率对古环境变化的响应机制, 并结合碳酸盐含量、烧失量和粒度变化特征, 本研究认为鹤庆盆地湖相岩心的磁化率记录可以用来反映水动力对物源区地表的侵蚀强度和搬运状况, 与流域内植被覆盖和降雨量密切相关。在干旱的冰期, 植被覆盖度较低, 地表侵蚀加剧, 带入湖泊的粘土粒级碎屑含量增加, 磁化率增高; 在湿润的间冰期, 植被覆盖度较高, 地表侵蚀减弱, 粘土粒级碎屑物的带入量减少, 磁化率降低。

关键词: 鹤庆盆地; 磁化率; 古环境意义

中图分类号: P66

文献标识码: A

磁化率在湖泊沉积物研究中扮演着举足轻重的作用^[1-10], 但是其具体的古环境指示意义却不尽相同。由于湖泊所处地理位置、当地地质地貌条件和气候系统的不同, 磁化率可以用来反映以下三个方面的变化: 首先, 磁化率可以用来反映湖泊沉积物物源条件的波动^[11-13]。当物源随着环境气候的变化而改变时, 碎屑物的来源也会发生变化, 带入湖泊内的磁性矿物的磁学特征不同, 沉积物的磁化率不同。对于大多数湖泊而言, 陆源碎屑物的带入都是沉积物的主要来源, 湖内沉积物的磁学性质在很大程度上取决于碎屑来源物质中亚铁磁性矿物的磁学性质。其次, 磁化率也可以用来指示湖泊周围地表水动力侵蚀/搬运条件的变化^[14-18]。在物源相对稳定的地区, 碎屑物来源不变, 湖泊内沉积物的磁学性质主要取决于陆源营力对碎屑物的分选和搬运。当物源区植被覆盖度较低时, 水动力对地表的侵蚀强烈, 带入湖泊内

收稿日期: 2009-01-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40572109)、国家重点基础研究发展规划项目 (2004CB720205)、黄土与第四纪地质国家重点实验室自主部署项目 (LQ0701) 和国家自然科学基金创新研究群体科学基金 (40121303) 资助。

作者简介: 徐新文 (1981-), 男, 硕士研究生, 第四纪地质学与全球环境变化专业, E-mail: xuxinwen@ieecas.cn。

的碎屑物多，沉积物的磁化率较高；反之，当物源区植被覆盖度较高时，水动力对地表的侵蚀减弱，碎屑物的带入量将减少，沉积物的磁化率较低。最后，磁化率还可以用于探讨湖泊沉积环境的差异^[19-22]。大量研究表明，富营养的湖泊中，在生物活动和细菌作用的影响下^[23,24]，有机质分解并消耗大量氧，形成稳定的还原环境，软磁性细颗粒的磁铁矿会被分解，湖内沉积物中细颗粒亚铁磁性矿物的含量减少，磁化率降低^[4,25,26]。上述三种有关磁化率对环境变化的响应机制，是前任通过大量实际研究总结而来，具有普遍性意义，因此磁化率记录可以作为古气候、古环境变化良好的替代性指标^[4,27-29]。

鹤庆盆地位于云贵高原西北部，属西南季风区，沉积厚度大、连续性好，是研究西南季风的理想区域^[29-35]。随着湖泊研究的不断深入，鹤庆盆地的研究也取得了大量成果，显示出西南季风明显有别于东亚季风^[29-32]，但这些研究主要集中在1 Ma以来，对整个西南季风的演化历史尚显不足。为了更进一步研究西南季风演化的过程和规律，由国家科技部和中国科学院联合支持的“中国大陆环境钻探计划”将云南鹤庆盆地作为首个深钻地点，累计钻取垂直岩心665.83 m，以湖相沉积为主。通过对该岩心的研究，前人和我们课题组已经取得了不少成果^[33-34,36]，探讨了晚更新世以来鹤庆盆地的古环境演化特征。本为主要通过磁化率强弱变化的分析，同时结合碳酸盐、烧失量和粒度特征对古环境变化的响应机理，对比分析造成磁化率强弱变化的主要因素，进而探讨了磁化率具体的古环境指示意义，并得出了较为合理的解释。

1 研究区概况

鹤庆盆地位于云南鹤庆县西北部（ $25^{\circ}51' \sim 26^{\circ}42' N$ ， $100^{\circ}06' \sim 100^{\circ}29' E$ ）为构造断陷盆地，大地构造上位于青藏高原隆起带的边缘部位，属滇西北高原横断山余脉，自晚新生代以来持续沉积，厚度大^[37]。盆地四周环山，周围山峰海拔均在2500 m以上。鹤庆盆地的东西两侧是连续而较高峻的山地，南面山地稍低，而北面是相隔约40 km的玉龙雪山（5596 m）。盆地面积约144 km²，呈南北长条形展布，与构造带走向一致（图1），南北长约22 km，东西宽约5~10 km，盆地地势低平，海拔2193~2240 m，北高南低，坡度约1~3°。盆地四周有小溪、小河汇入，中部低洼地积水形成草海。盆地中部有发源于玉龙雪山的漾弓江自北向

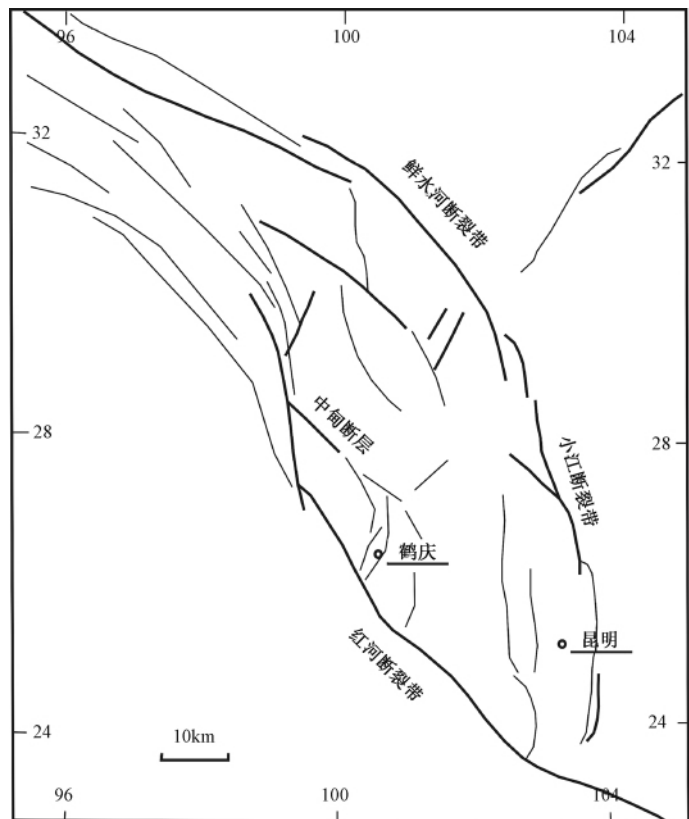


图1 鹤庆盆地地理位置和构造简图

Fig. 1 Sketch map of tectonic setting of Heqing Basin

南流过,出盆地后折向东流入金沙江^[31]。

盆地位于西南季风区,夏季主要受来自孟加拉湾的暖湿气流影响,冬季受南支西风急流控制,另外还兼受青藏高原局地气候的影响,年均温 13.5℃,1 月均温 6.3℃,7 月均温 19.2℃,年降水量 900~1000 mm。气候特点为冬季偏凉干,夏季偏温湿,温度年较差小,无严冬无酷暑^[34]。

鹤庆深钻钻孔位置 26°33′43.1″N,100°10′14.2″E,井口海拔为 2200 m,孔深 737.72 m。本次钻探首次在国内采用内衬管取心的方法,确保了岩心不受外力作用而发生扭曲、变形,全井取芯率高达 96.7%。所获得的 665.83 m 岩心除底部 37 m 为河床沉积外,其余岩心全部为连续的湖相沉积,岩性为灰色、灰绿色、灰褐色粘土和粉沙质泥,层理清晰,是我国迄今为止最长之一,也是理想的研究环境演化的湖泊沉积岩心之一。钻孔岩心在岩性特征上表现为 3 个大的沉积旋回:下部(665.83~372.66 m)、中部(372.66~195.45 m)和上部(195.45~0 m)都是从含砾石泥沙层到粉砂质粘土和粘土的沉积旋回。

2 采样方法及测试

在钻孔岩心中以大约 50 cm 的间距,共采集了 1369 块样品。测试之前,所有样品放入烘箱中在 35℃ 的条件下进行低温干燥。实验在中国科学院地球环境研究所环境磁学实验室完成,使用英国 Bartington 公司生产的 MS2 磁化率仪进行了低频(475 Hz)磁化率的测试。整个测试过程中每个样品的磁化率都测试两遍,背景值介于 ±0.3 (SI) 之间,单个样品的重量基本上都处于 8.5~11.0 g 之间。

以下数据来自于南京地理与湖泊研究所已发表文章^[33]。实验全部由南京地理与湖泊研究所湖泊沉积与环境重点实验室完成,碳酸盐采用酸碱中和滴定法测定,重复误差 1% 以内;烧失量为 550℃ 条件下将样品放入马弗炉中,灼烧 5 小时后计算失重的百分含量,多次测量误差小于 2%;粒度测定由 Mastersizer-2000 激光粒度仪完成,测量误差小于 2%。

3 数据的分析和讨论

磁性矿物颗粒的搬运、沉积和转化与沉积环境的变化和古气候的演化密切相关,矿物的磁学性质可以作为环境变化和气候过程的替代指标^[1-10,38,39]。作为沉积物中最重要的磁学性质之一,磁化率主要受控于亚铁磁性矿物的种类、含量和粒度。通过对整套沉积序列的描述可知,磁化率的变化通常和岩性的变化存在着明显的联系,磁化率的峰值与含砂(砾)层位具有很好的对应性。本文将结合碳酸盐含量、烧失量和粒度特征来综合分析和讨论鹤庆盆地湖相岩心中磁化率变化的古环境指示意义。为了方便对比分析及增加数据的可靠性,碳酸盐、烧失量和粒度数据均以磁化率数据的深度为依据进行挑选(在岩心深度上误差小于 5 cm)(图 2)。

3.1 磁化率与碳酸盐含量、烧失量的关系

已有研究指出,湖泊沉积物中碳酸盐含量可以用来反映降水的强弱变化^[3,9,29,33]。湖泊沉积物中碳酸盐主要有内源和外源两种,其中前者主要有湖水化学沉淀产生和生物作用引起;后者则主要通过地表径流以陆源碎屑物的形式带入湖内。

鹤庆湖相岩心碳酸盐总体含量较高,最大值 83.35%,最小值 0.29%,平均值

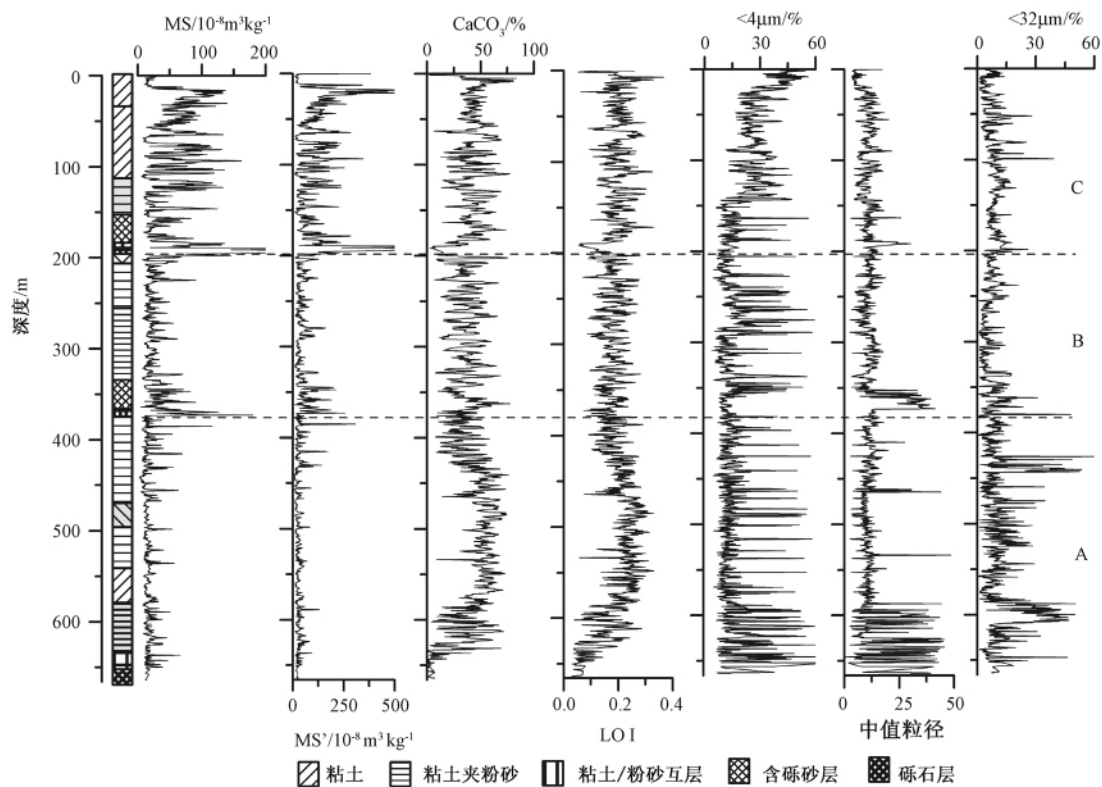


图2 鹤庆盆地湖相岩心磁化率 (MS), 碳酸盐, 烧失量 (LOI), 中值粒径, $<4\mu\text{m}$ 和 $>32\mu\text{m}$ 颗粒的相对含量随深度的变化情况。出于作图的匀称, 其中磁化率采用对数坐标

Fig. 2 Changes with depth of Magnetic Susceptibility, Carbonate Content, LOI, Middle Grain, Contents of $<4\mu\text{m}$ and $>32\mu\text{m}$ in Heqing Core lacustrine sediments

41.11%, 且变化幅度比较大, 表现出明显的周期性变化。通过观察岩心可知, 沉积物的颗粒度普遍比较细小, 出现含 (砾) 砂层时碳酸盐含量通常比较低 (表1)。同时, 湖泊中外源碳酸盐的增多不利于湖内有机质的保存, 并会冲淡有机质的含量^[4, 29], 但在整套沉积序列中二者具有很好的一致性, 因此岩心中碳酸盐的沉积主要有生物等湖内自生因素产生或引起的。

表1 鹤庆盆地湖相岩心中砾石段的碳酸盐含量

Table 1 Carbonate Content of the Gravels layer in Heqing Core lacustrine

回次	深度 /m	CaCO ₃ /%
HQ108	191.17 ~ 192.19	4.89
HQ109	193.05 ~ 193.48	5.71
HQ211	364.25 ~ 365.91	50.65
HQ214	368.61 ~ 370.42	34.52
HQ355	593.39 ~ 594.96	19.93
HQ359	599.63 ~ 600.96	12.1
HQ361	602.51 ~ 603.31	28.34
HQ366	609.68 ~ 610.73	9.02
HQ406	661.42 ~ 661.81	7.25
HQ408	663.28 ~ 664.46	5.14

在整套沉积序列中,碳酸盐含量和磁化率呈较为明显的相反变化,当磁化率达到峰值时,碳酸盐含量通常形成谷值。由底部向上,磁化率可以依据其平均值和变化幅度划分为3个阶段,与先前研究中关于碳酸盐含量的阶段划分具有很好的一致性^[33]。A阶段(665.83~372.66 m),岩心磁化率低,平均值为 $15.83 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$,碳酸盐含量在整套沉积序列中较高。根据二者的相对变化可以进一步划分为3个亚段:665.83~574.99 m亚段,磁化率较大,平均值 $18.63 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$,碳酸盐含量较低,平均值29.93%,向上呈逐渐升高的趋势:574.99~466.89 m亚段,磁化率低,平均值 $15.71 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$,为整套沉积序列的最小值,碳酸盐含量高,达到了55.18%;466.89~372.66 m亚段,磁化率变化幅度增强,平均值升高为 $16.62 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$,碳酸盐含量呈显著降低趋势,平均值为40.11%。B阶段(372.66~195.45 m),磁化率开始趋于稳定,平均值升高为 $26.05 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$,碳酸盐含量平均值为36.49%,呈现较大幅度的变化。C阶段(195.45~0 m),与前一阶段相比,磁化率的平均值显著的升高,达到了 $50.90 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$,碳酸盐含量升高为42.24%,二者的变化幅度都有显著的增强。

碳酸盐为抗磁性物质,其磁化率值在仪器测量时显示负值,在湖泊研究中认为对磁化率具有稀释作用,降低了亚铁磁性矿物的浓度^[27,29]。有图2可知,在对磁化率做了去碳酸盐影响的处理后(所使用的公式为 $MS' = MS / (1 - \text{CaCO}_3\%)$),其中 MS' 表示去除碳酸盐影响后的磁化率值, MS 为初始磁化率值^[29],并没有改变磁化率的变化趋势和变化幅度,因此,碳酸盐的稀释作用不是引起磁化率变化的主要因素,磁化率的强弱变化并非直接受控于降水量的多少。

烧失量可以用来反映沉积物中有机质的含量^[4,33]。整套沉积序列中烧失量较大,平均值为19%,最大值可达36%。由图2和表2可知,在任意岩性段,磁化率与烧失量都呈现负相关变化。在还原环境或富营养的湖泊中,有机质被分解并消耗了大量的氧,形成了稳定的缺氧环境。由于具有较大的比表面积,碎屑成因的磁颗粒磁铁矿还原分解,沉积物中亚铁磁性矿物的浓度降低,磁化率降低^[4,25,26]。但也有研究指出了相反的变化,即在较强的缺氧环境中,有机质的还原分解作用极强,首先铁氧化物被还原分解,然后硫酸盐也会被还原,形成硫化氢和甲烷。新生成的硫化氢和铁离子反应,形成磁黄铁矿和胶黄铁矿等铁的硫化物。在沉积速率持续较低且有机质含量较高时,新生成的亚铁磁性的铁的硫化物能够保存下来,成为控制沉积物磁学性质的主要因素^[3,9]。在本研究中,岩心的磁化率平均值为 $29.91 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$,且与烧失量呈负相关关系。因此,鹤庆古湖中亚铁磁性矿物应该以外源带入为主,有机质通过还原分解细颗粒的亚铁磁性矿物降低了沉积物的磁化率。综上所述,鹤庆湖相岩心中,湖泊内的还原成岩作用对磁化率的影响十分明显,但并不是磁化率强弱变化的主控因素。

3.2 磁化率与粒度特征的关系

湖泊沉积物的粒度特征受多种因素影响,物源区的岩性、地理环境,以及河流水动力作用和湖水水位都可能是控制粒度分异的主导因素^[17,40-43]。有图2可知,整套沉积序列中,磁化率和粒度特征密切相关,但是变化关系较为复杂,为了更进一步分析二者的联系,做了不同深度各粒度特征和磁化率的相关性分析(见表2)。从表中可知,在372.66~665.83 m岩心中,二者的相关性较差,磁化率与 $<4\mu\text{m}$ 颗粒的相对含量弱的正相关,与 $>32\mu\text{m}$ 颗粒的相对含量为弱的负相关。因此,认为该阶段沉积物含有的亚铁磁性矿物赋存于细颗粒碎屑中的相对较多,磁化率与陆源粘土级碎屑物的带入量有关^[6,9]。372.66 m以上的岩心中,磁化

表2 鹤庆湖相岩心中磁化率(MS)与碳酸盐, 中值粒径, $<4\mu\text{m}$ 和 $>32\mu\text{m}$ 颗粒的相对含量之间相关系数随深度的变化情况

Table 2 The correlation between Magnetic Susceptibility (MS) and Carbonate Content, LOI, Middle Grain, Contents of $<4\mu\text{m}$ and $>32\mu\text{m}$ Grains in Heqing Core lacustrine sediments

Depth (m)		CaCO ₃	LOI	d (0.5)	$<4\mu\text{m}$	$>32\mu\text{m}$
0 ~ 18 G	MS	-0.13993	-0.0144	0.61727	-0.5344	0.154743
18 ~ 153.14	MS	-0.19	-0.07411	-0.3338	0.3684	-0.1371
153.14 ~ 195.45 G	MS	0.35617	-0.61117	0.56367	-0.0931	0.4317
195.45 ~ 345	MS	-0.23922	-0.52135	-0.1036	0.19379	0.09389
345 ~ 372.66 G	MS	0.41521	-0.16848	0.35191	-0.1105	-0.2098
372.66 ~ 585	MS	-0.60831	-0.18792	0.01407	0.05186	-0.0717
585 ~ 665.83 G	MS	-0.2447	0.208177	-0.126	0.00494	-0.1073
0 ~ 665.83 W	MS	-0.06956	-0.02068	0.04044	0.18465	-0.0478

注: G表示为含砾石层位, W表示整个沉积序列。

率和粒度特征随着岩性的变化表现为不同的相互关系, 在含砂(砾)质层, 中值粒径和磁化率表现为很好的正相关, $<4\mu\text{m}$ 颗粒的相对含量则与磁化率显示弱的负相关; 在稳定的湖相粘土沉积中, 中值粒径和磁化率表现为负相关, $<4\mu\text{m}$ 颗粒的相对含量则与磁化率表现为较好的正相关。由此可见, 在湖盆变化剧烈或湖水水位较低时, 沉积物中的亚铁磁性矿物主要来源于粗颗粒碎屑物的带入, 受水动力的搬运能力控制^[43]; 而湖泊较为稳定时, 沉积物中的亚铁磁性矿物主要来源于细颗粒碎屑物的带入量, 与侵蚀强度密切相关^[6]。在整套沉积序列, 磁化率与中值粒径为弱的正相关, 与 $<4\mu\text{m}$ 颗粒的相对含量为正相关, 与 $>32\mu\text{m}$ 颗粒的相对含量为弱的负相关。因此认为在湖泊演化过程中, 沉积物磁化率的变化主要与 $<4\mu\text{m}$ 颗粒碎屑物的带入量有关。

3.3 讨论

在湖泊研究中, 沉积物含有的磁性矿物主要来源于地表营力对外源碎屑物的分选和搬运^[2,3]。鹤庆盆地流域内物源较为单一, 基岩主要以三叠纪灰岩和古近纪石灰质角砾岩为主^[29,38], 除底部的河床沉积外, 整个湖相沉积序列岩性变化较小。因此, 物源的变化不是引起湖内沉积物磁学性质变化的主要因素。去除碳酸盐没有改变磁化率的变化趋势和变化幅度, 碳酸盐的稀释作用不是引起磁化率变化的主要因素。有机质与磁化率较好的负相关表明还原成岩作用对岩心中磁学性质的影响十分显著, 但不是主控因素。通过比较磁化率和粒度特征的关系说明沉积物中的磁性矿物主要赋存于 $<4\mu\text{m}$ 颗粒中, 磁学性质由 $<4\mu\text{m}$ 颗粒中碎屑物的带入量决定^[6,9]。 $<4\mu\text{m}$ 颗粒的相对含量可以指示粘土粒级碎屑物的含量^[42]。Oldfield^[5]认为, 当水动力对流域内地表侵蚀较强时, 粘土粒级的碎屑物对湖泊沉积物磁学性质的贡献要远大于砂。因此, 本研究认为当湖盆稳定时, 鹤庆古湖中亚铁磁性矿物主要来源于水动力带入的粘土粒级碎屑物, 沉积物的磁化率由水动力对流域内侵蚀作用的强度决定。

对鹤庆古湖而言, 在间冰期时, 气候相对湿润, 降水量大, 地表径流搬运能力强, 更多的粗颗粒碎屑物进入湖中, 同时流域内植被发育, 土壤化作用较强, 水动力对地表的侵蚀强度较弱, 带入湖中的粘土粒级碎屑物较少, 细颗粒亚铁磁性矿物受有机质的分解较强烈^[4,25,26], 沉积物的磁化率较低; 另一方面, 在冰期时, 气候相对干旱, 降水量小, 地表径

流搬运能力弱,粗颗粒的带入量减少,同时流域内植被覆盖度低,土壤化作用较弱,水动力对地表的侵蚀强度大,带入湖内的粘土粒级碎屑物增多,湖内有机质的分解作用较弱,沉积物中磁化率较高^[3-6,9]。

依据整套沉积序列中磁化率、碳酸盐含量、烧失量和粒度的变化特征,同时结合岩性特征,将鹤庆盆地的古环境、古气候演化自下而上划分为3个阶段(图2)。

A阶段(665.83~372.66 m):665.83~627.35 m的砾石堆积和627.25~585 m的粘土夹多层砂表明沉积物由河流相渐变为湖相,湖泊水位逐渐升高。585 m向上岩性变为稳定的青灰色、灰绿色粘土、粉砂质泥,湖泊趋于稳定,磁化率较小,烧失量和碳酸盐含量高。该阶段气候较为湿润,流域内植被发育,土壤化作用强,地表侵蚀强度较低,带入湖内的陆源碎屑物少,同时湖水较深,湖内生物发育,还原成岩作用较强。

B阶段(372.66~195.45 m):372.66~332.96 m为含砾红褐色砂与粘土夹多层红砂,中值粒径达到峰值,表明碎屑物的带入量急剧增多,可能指示了构造运动或强烈的气候变化事件。332.96~195.45 m为稳定的粘土沉积,与A阶段相比磁化率较高,变化幅度显著加强,碳酸盐和烧失量的变化幅度也有所加强, $<4\mu\text{m}$ 颗粒的相对含量略有增加,表明该阶段气候变化幅度增强,流域内植被演替较快,地表侵蚀加剧,湖泊水位波动增多。

C阶段(195.45~0 m):195.45~153.14 m为含砾红褐色砂与粘土夹多层红砂,中值粒径的峰值较窄,可能指示了强烈的气候转型事件。153.14~0 m为稳定的粘土沉积,颜色较浅,磁化率达到整个沉积序列的极大值,各项指标的变化幅度均问整个序列中最强, $<4\mu\text{m}$ 颗粒的相对含量显著增加。表明该阶段湖盆较为稳定,但气候变化较为强烈,流域内植被演替频繁,地表侵蚀非常剧烈,湖泊沉积物记录对环境变化的响应显著加强。18~0 m为湖泊结束的时期,外源碎屑物的带入中断, $<4\mu\text{m}$ 颗粒的相对含量达到峰值。

4 结论

通过对比磁化率与碳酸盐含量、烧失量和粒度特征的相互关系,分析各指标对环境变化的响应机制,本文取得了以下两点认识:

1. 鹤庆盆地湖相岩心的磁化率记录与碳酸盐含量、烧失量和粒度特征在阶段变化上具有较好的相关性,是探讨盆地古环境演化历史较好的替代性指标;
2. 沉积物的磁化率记录可以用于反映水动力对盆地周围地表的侵蚀状况,与流域内植被覆盖和降水量密切相关。

致谢:感谢孙有斌和金章东研究员、常宏副研究员对文章内容和相关问题上的指导。感谢审稿人蒋复初研究员对论文提出建设性修改意见。

参 考 文 献

- [1] Thompson R , Battarbee RW , O'Sullivan PE , et al. Magnetic susceptibility of lake sediments [J]. *Limnology and Oceanography* , 1975 , 20 (5) .
- [2] Thompson R , Morton DJ. Magnetic susceptibility and particle-size distribution in Recent sediments of the Loch Lomond drainage basin , Scotland [J]. *GeoRef* , 1979 , 49 : 801 ~ 811 .
- [3] Thompson R , Oldfield F. *Environmental magnetism* [M]. Allen & Unwin , 1986 .
- [4] Evans ME , Heller F , Ioemendal JB , et al. Natural Magnetic Archives of Past Global Change [J]. *Surveys in Geophysics* , 1997 , 8 : 183 ~ 196 .
- [5] Oldfield F , Barnosky C , Leopold EB , et al. Mineral magnetic studies of lake sediments [J]. *Hydrobiologia* , 1983 , 103 : 37 ~ 44 .
- [6] Oldfield F , Maher BA , Donoghue J , et al. Particle-size related , mineral magnetic source sediment linkages in the Rhode River catchment , Maryland , USA [J]. *Geological Soc London* , 1985 , 142 : 1035 ~ 1046 .
- [7] Oldfield F , Dearing JA. The role of human activities in past environmental change [J]. *IGBP Global Change Series* , 2003 , 143 ~ 162 .
- [8] Anderson NJ , Clarke A , Juhler RK , et al. Coring of laminated lake sediments for pigment and mineral magnetic analyses , Sondre Stromfjord , southern West Greenland [J]. *Geology of Greenland Survey Bulletin* , 2000 , 186 : 83 ~ 87 .
- [9] Smol JP , Last WM. Tracking Environmental Change Using Lake Sediments [J]. *Physical and Geochemical Methods* , 2001 .
- [10] Yu L , Oldfield F , Wu YS , et al. Paleoenvironmental implications of magnetic measurements on sediment core from Kunming Basin , Southwest China [J]. *Journal of Paleolimnology* , 1990 , 3 : 95 ~ 111 .
- [11] Dearing JA. Changing patterns of sediment accumulation in a small lake in Scania , southern Sweden [J]. *Hydrobiologia* , 1983 , 103 : 59 ~ 64 .
- [12] Boës X , Piotrowska N , Fagel N. High-resolution diatom/clay record in Lake Baikal from grey scale , and magnetic susceptibility over Holocene and Termination I [J]. *Global and Planetary Change* , 2005 , 46 : 299 ~ 313 .
- [13] Fagel N , Thamó-Bózsó E , Heim B. Mineralogical signatures of Lake Baikal sediments : Sources of sediment supplies through Late Quaternary [J]. *Sedimentary Geology* , 2007 , 194 : 37 ~ 59 .
- [14] Williamson D , Jelinowska A , Kissel C , et al. Mineral-magnetic proxies of erosion/oxidation cycles in tropical maar-lake sediments (Lake Tritrivakely , Madagascar) : paleoenvironmental implications [J]. *Earth and Planetary Science Letters* , 1998 , 155 : 205 ~ 219 .
- [15] Ross J , Gilbert R. Lacustrine sedimentation in a monsoon environment : the record from Phewa Tal , middle mountain region of Nepal [J]. *Geomorphology* , 1999 , 27 : 307 ~ 323 .
- [16] Appleby PG , Dearing J , Oldfield F. Magnetic studies of erosion in a Scottish lake catchment. 1. Core chronology and correlation [J]. *Limnol. Oceanogr* , 1985 , 30 : 1144 ~ 1153 .
- [17] Wang HY , Liu HY , Cui HT , et al. Terminal Pleistocene/Holocene Palaeoenvironmental changes revealed by mineral-magnetism measurements of lake sediments for Dali nor area , southeastern Inner Mongolia Plateau , Chian [J]. *Palaeogeography , Palaeoclimatology , Palaeoecology* , 2001 , 170 : 115 ~ 132 .
- [18] 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 : 75 ~ 84 .
Yang XQ , Li HM. The susceptibility characteristics of the typical sections of the Nihewan Basin and its implication [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology* , 1999 , 19 : 75 ~ 84 .
- [19] Dearing JA , Boyle JF , Appleby PG , et al. Magnetic properties of recent sediments in Lake Baikal. Siberia [J]. *Journal of*

- Paleolimnology, 1998, 20: 163 ~ 173.
- [20] Sandgren P, Risberg J, Thompson R. Magnetic susceptibility in sediment records of Lake Adran, eastern Sweden: correlation among cores and interpretation [J]. Journal of Paleolimnology, 1990, 3: 129 ~ 141.
- [21] Pavlov VE, Bagin VI. Diagenesis of magnetic minerals in sediments of the Lakes Pleshcheyevo and Glubokoye [J]. Physics of The Solid Earth, 1995, 31: 59 ~ 65.
- [22] 殷勇, 方念乔, 王倩, 等. 云南中甸纳帕海湖泊沉积物的磁化率及环境意义 [J]. 地理科学, 2002, 22: 413 ~ 419.
Yin Y, Fang NQ, Wang Q, et al. Magnetic susceptibility lacustrine sediments and its environmental significance: Evidence from Napahai lake, Northwestern Yunnan, China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22: 413 ~ 419.
- [23] Snowball IF. Bacterial magnetite and the magnetic properties of sediments in a Swedish lake [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1994, 126: 129 ~ 142.
- [24] Snowball I, Zillén L, Sandgren P. Bacterial magnetite in Swedish varved lake-sediments: a potential bio-marker of environmental change [J]. Quaternary International, 2002, 88: 13 ~ 19.
- [25] Snowball I. Mineral magnetic properties of Holocene lake sediments and soils from the Karsa valley, Lappland, Sweden, and their relevance to palaeoenvironmental reconstruction [J]. Journal of quaternary science, 1993, 5: 258 ~ 270.
- [26] Anderson NJ, Rippey B. Diagenesis of magnetic minerals in the recent sediments of a eutrophic lake [J]. Limnol. Oceanogr, 1988, 33: 1476 ~ 1492.
- [27] Peck JA, King JW, Colman SM, et al. A rock-magnetic record from Lake Baikal, Siberia: evidence for Late Quaternary climate change [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1994, 122: 221 ~ 238.
- [28] Hodell DA, Brenner M, Kanfoush SL, et al. Paleoclimate of Southwestern China for the Past 50000 yr Inferred from Lake Sediment Records [J]. Quaternary Research, 1999, 52: 369 ~ 380.
- [29] Hu S, Goddu SR, Appel E, et al. Palaeoclimatic changes over the past 1 million years derived from lacustrine sediments of Heqing basin (Yunnan, China) [J]. Quaternary International, 2005, 136: 123 ~ 129.
- [30] 童国榜, 刘志明, 王苏民, 等. 云南鹤庆盆地近 1Ma 的气候序列重建初探 [J]. 第四纪研究, 2002, 22 (4).
Tong GB, Liu ZM, Wang SM, et al. Reconstruction of climatic sequence of the past 1 Ma in the Heqing Basin, Yunnan Province [J]. Quaternary Sciences, 2002, 22 (4).
- [31] 蒋雪中, 刘志明, 王苏民, 等. 云南鹤庆盆地的孢粉记录及 1.0Ma 以来的构造抬升与气候变迁 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22 (2).
Jiang XZ, Liu ZM, Wang SM, et al. Pollen records and environmental evolution of Heqing Basin of Yunnan province since 1.0 Ma [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2002, 22 (2).
- [32] Hu S, Goddu SR, Appel E, et al. Fine-tuning of age integrating magnetostratigraphy, radiocarbon dating, and carbonate cyclicity: Example of lacustrine sediments from Heqing Basin (Yunnan, China) covering the past 1 Myr [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2007, 30: 423 ~ 432.
- [33] 肖霞云, 沈吉, 王苏民, 等. 鹤庆深钻孢粉记录揭示的 2.78 Ma 以来的植被演替与气候变迁 [J]. 中国科学 (D 辑), 2007, 37 (06): 778 ~ 788.
Xiao XY, Shen J, Wang SM, et al. Palynological evidence for vegetational and climatic changes from the HQ deep drilling core in Yunnan Province, China [J]. Science in China series D: Earth Sciences, 2007, 50 (8): 1189 ~ 1201.
- [34] 肖海丰, 沈吉, 肖霞云, 等. 云南鹤庆钻孔揭示的古生产力轨道尺度演化 [J]. 湖泊科学, 2006, 18 (6): 615 ~ 620.
Xiao HF, Shen J, Xiao XY, et al. The orbital scale evolution of the paleoproductivity reflected by Heqing Core in Yunnan Province [J]. Journal of Lake Science, 2006, 18 (6): 615 ~ 620.
- [35] 蒋雪中, 王苏民, 羊向东. 云南鹤庆盆地 30 Ka 以来的古气候与环境变迁 [J]. 湖泊科学, 1998, 10 (2): 10 ~ 16.
Jiang XZ, Wang SM, Yang XD. Paleoclimatic and environmental changes over the last 30000 years in Heqing Basin,

- Yunnan Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1998, 10 (2): 10 ~ 16.
- [36] 卢凤艳, 安芷生. 鹤庆钻孔沉积物总有机碳、氮含量测定的前处理方法及其环境意义 [J]. *地质力学学报*, 2010, 16 (4): 393 ~ 401.
- Lu FY, An ZS. Pretreatment methods for analyzing the total organic carbon and nitrogen contents of Heqing core sediments and their environmental significances [J]. *Journal of Geomechanic*, 2010, 16 (4): 393 ~ 401.
- [37] 夏斌, 耿庆荣, 张玉泉. 滇西鹤庆地区六合透辉石正长斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其意义 [J]. *地质通报*, 2007, 26 (2): 692 ~ 697.
- Xia B, Geng QR, Zhang YQ. Zircon SHRIMP U-Pb age of diopside syenite-porphyry at Liuhe Heqing, Western Yunnan, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26 (2): 692 ~ 697.
- [38] 蒋复初, 吴锡浩, 孙东怀, 等. 中原邙山黄土地层 [J]. *地质力学学报*, 1998, 4 (4): 12 ~ 18.
- Jiang FC, Wu XH, Sun DH, et al. On Mangshan loess stratigraphy in China central plains [J]. *Journal of Geomechanic*, 1998, 4 (4): 12 ~ 18.
- [39] 蒋复初, 吴锡浩, 肖国华, 等. 郑州邙山桃花峪高分辨率晚更新世黄土地层 [J]. *地质力学学报*, 1997, 3 (2): 11 ~ 17.
- Jiang FC, Wu XH, Xiao GH, et al. The high resolution late Pleistocene loess stratigraphy in Taohuayuan, Mangshan, Zhengzhou [J]. *Journal of Geomechanic*, 1997, 3 (2): 11 ~ 17.
- [40] Menking KM, Bischoff JL, Fitzpatrick JA, et al. Climatic/Hydrologic Oscillations since 155, 000 yr BP at Owens Lake, California, Reflected in Abundance and Stable Isotope Composition of Sediment Carbonate [J]. *Quaternary Research*, 1997, 48: 58 ~ 68.
- [41] 陈敬安, 万国江, 张峰, 等. 不同时间尺度下的沉积物环境记录—以沉积物粒度为例 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 2003, 33 (6).
- Chen JA, Wan GJ, Zhang F, et al. Environmental records of lacustrine sediments in different time scales: Sediment grain size as an example [J]. *Science in China series D: Earth Sciences*, 2004, 47 (10): 954 ~ 960.
- [42] Torres CV, Vandenberghe J, Hooghiemstra H. An environmental reconstruction of the sediment infill of the Bogota basin (Colombia) during the last 3 million years from abiotic and biotic proxies [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 226: 127 ~ 148.
- [43] 迟振卿, 闵隆瑞, 王志明, 等. 河北省阳原盆地井儿洼钻孔磁化率、粒度反映的环境意义 [J]. *地质力学学报*, 2003, 8 (1): 87 ~ 96.
- Chi ZQ, Min LR, Wang ZM, et al. Environmental significance of magnetic susceptibility and grain size in Jingerwa Core, Yangyuan Basin [J]. *Journal of Geomechanic*, 2003, 8 (1): 87 ~ 96.

MAGNETIC SUSCEPTIBILITY OF HEQING DRILL CORE AND ITS PALAEOENVIRONMENTAL IMPLICATIONS

XU Xinwen^{1,2}, QIANG Xiaoke¹, AN Zhisheng¹, LI Xubin^{1,2}, LI Peng^{1,2}, SUN Yufang^{1,2}

(1. *State Key Laboratory and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Science, Xi'an 710075, China*; 2. *Graduated University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China*)

Abstract: Located in southwestern China, the Heqing Basin received continuous lacustrine sediments of great thickness, which could be an excellent continental record for Indian monsoon. In this study, we choose the lake sediments from Heqing drill core to analyze the paleoenvironmental significance of magnetic susceptibility. By analyzing the magnetic susceptibility in combination with the response of carbonate content, Loss on Ignition (LOI), and grain size to paleoenvironmental changes, we get some useful information: 1) magnetic susceptibility increase when carbonate and LOI decrease; 2) magnetic susceptibility increase with increase of $<4\mu\text{m}$ grains in lacustrine clayey sediments, and with increase of middle grain size in sections containing sands and pebbles. Based on comparison between these proxies, we conclude that magnetic minerals got into the lake mainly together with clay-sized terrestrial detritus, and magnetic susceptibility is related to the vegetation cover and rainfall in the watershed and therefore could be considered to be a good indicator for monsoon-induced erosion around lake catchments. In the warm-humid interglacial periods, due to well-developed vegetation cover in the catchment area, erosion is relatively weak and clay-sized terrestrial detritus transported into the lake are reduced, so sediments have low concentration of magnetic minerals and low magnetic susceptibility. In the cold-arid glacial periods, however, because of the vegetation development is restricted, erosion is relatively strong and more clay-sized sediments are transported into the lake, the sediments have high concentration of magnetic minerals and high magnetic susceptibility.

Key words: Heqing basin, magnetic susceptibility, paleoenvironmental implications