文章编号：1006-6616（2017）04-0612-05

宁武天池干海湖泊沉积物的部分非磁滞剩磁研究

张淑伟[1,2]，刘青松[3]，王喜生[1]，Cioppa Maria[4]，霍俊杰[2]，
吕义清[2]，乔彦松[1]，赵　越[1]

（1. 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081；
2. 太原理工大学矿业工程学院，山西 太原 030024；
3. 深圳南方科技大学海洋科学和工程学院，广东 深圳 518055；
4. Department of Earth and Environmental Sciences，University of Windsor，Windsor，ON N9B 3P4，Canada）

摘　要：应用部分非磁滞剩磁（pARM）谱，对山西宁武天池干海湖泊沉积物携带的磁信息研究表明，粗磁铁矿颗粒（MD）是主要载磁矿物颗粒，其 pARM 谱在低矫顽力区间（AF < 20 mT）达到最高值；而细磁铁矿颗粒（PSD-SD）为次要载磁颗粒，其 pARM 谱在高矫顽力区间（AF > 20 mT）稍有突起。但是，剖面三个层位具有不同特征，上层（大约 7.3 ~ 4.0 ka）的粗磁性矿物颗粒含量最高，下层（大约 12.0 ~ 13.0 ka）次之，而中层（大约 12.0 ~ 7.3 ka）相对最低；中层的细磁性颗粒含量最高，下层和上层的细磁性颗粒含量次之。pARM 谱分析结果与磁滞曲线测量获得的磁畴结果一致。在较高的交变磁场区间获得的 pARM 可以有效地压抑粗磁颗粒的信息，进而使细磁颗粒的信号增强。应用 pARM 谱分析，能有效判别样品中磁性矿物的磁畴状态，有助于沉积物的古气候、岩石磁学和古地磁学研究。

关键词：部分非磁滞剩磁；磁颗粒；湖泊沉积物；宁武；岩石磁学
中图分类号：P318.41　　**文献标识码：**A

0　引言

自然界岩石和沉积物样品中的磁信息取决于所含磁性矿物的种类、大小和含量，而这些磁性矿物（例如：铁磁性矿物，反铁磁性矿物）具有很宽的磁性粒度分布。为了精确地解释沉积物记录的环境和气候变化的信号，必须对这些磁性矿物所携带的磁性信息进行有效分离。

部分非磁滞剩磁（pARM）谱分析可以有效分离岩石样品中不同粒径的磁性矿物，从而识别矫顽力分布范围[1~3]。实验室中，非磁滞剩磁（ARM）是在一个衰减的交变场中施加一个偏置直流场的条件下获得。pARM 是在不连续的交变场中施加一个偏置直流场的条件下获得[2,4]，与设定的交变场区间对应的磁性矿物颗粒将会获得 ARM，而其它磁性颗粒将会被退磁[2]。ARM 对单畴磁颗粒的变化非常敏感[5~9]，因此被广泛用于沉积物的古气候研究。

1　区域概况和背景

干海（38°53′N、112°11′E，见图 1a）位于宁武县城西南 20 km 东庄乡境内的分水岭海子背山顶的夷平面上，平均海拔约 1854 m。干海与天池为邻，位于天池之东北约 1 km 处，水面积 0.04 km^2，水深 < 2 m，主要由降雨积水造成，系季节性封闭湖泊（见图 1b）。因面积较小，蒸发量大且容易干涸，故而得名。干海一带草甸发育，灰褐色至深灰黑色草炭、黑色泥炭层厚达 2.1 m，含介形和孢粉化石，并常见成层植物叶片。泥炭层之下灰褐色粘土层厚约 0.6 m，含有螺、介形和孢粉化石。

收稿日期：2017-02-06
基金项目：国家自然科学基金青年基金项目（41204052）；国家博士后基金（2014M550780）；山西省自然基金（2014011032-2）；山西省回国留学人员基金（2014-021）
作者简介：张淑伟（1974-），女，博士，岩石磁学和环境磁学专业，从事环境磁学和古气候变化研究。E-mail：zhang. shuwei@ 163. com

下层是黑褐色、黄绿色砂砾石层，厚度约 0.26 m，其下覆盖的是沙层。干海湖泊剖面是华北西部和黄土高原东部全新世最好的剖面之一[10]，将为研究华北地区第四纪高山湖泊演化、气候变化、古地理变迁及第四系湖相地层划分等提供了有利的佐证[10]。

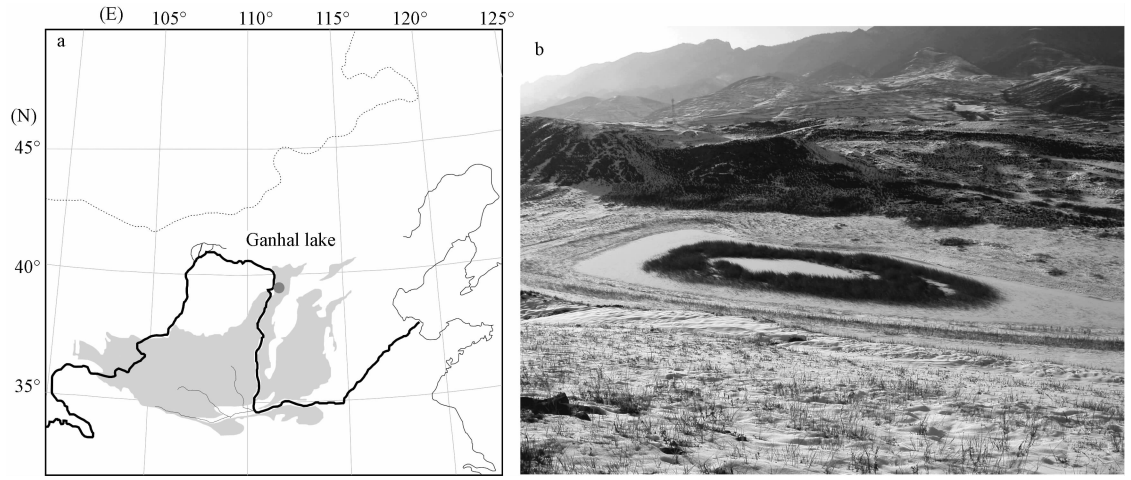

图 1　干海湖泊地质位置和全貌图[11]

Fig. 1　Location and detail map of Ganhai Lake indicated by a blue circle

2　实验样品和测试方法

实验所用样品是来自山西宁武天池干海剖面湖泊沉积物，根据磁滞曲线测量结果得知其主要载磁矿物是多畴磁铁矿。在湖泊剖面上、中、下三层分别取样：上层 5 个（约 7.3 ~ 4.0 ka；0.15 ~ 0.95 m），主要是泥炭、草炭和有机泥，并常见大量植物残体；中层 9 个（约 12.0 ~ 7.3 ka；0.95 ~ 3.55 m），主要是深黑色富含有机质的泥和浅灰色泥，常见植物残叶；下层 3 个（约 12.0 ~ 13.0 ka；3.55 ~ 4.10 m），主要包含碎屑沉积物，细粒度的沙、粉沙和粘土，有大粒度的砾岩和鹅卵石出现，偶尔可见植物残体。每个样品质量均为 10 g，一般可认为高 pARM 值对应的磁铁矿颗粒在样品中含量也高。这三组样品具有不同的沉积特征，因而可以指示不同湖泊沉积环境。目前，还没有关于宁武高山湖泊的非磁滞剩磁谱分析方面的研究，本文应用这三组具有代表性的样品进行实验分析。

所有测量在加拿大温莎大学古地磁实验室完成。ARM 获得是用 Sapphire 交变退磁仪（SI-4）完成，交变场区间 0 ~ 100 mT，偏置直流外加场 0.05 mT，而最大交变场 110 mT。pARM（AF_1、AF_2）是在两个交变场 AF_1 和 AF_2 之间获得（$AF_2 > AF_1$），为了获得 pARM 谱，交变场需要逐步增加，本文设定 $AF_2 - AF_1 = 10$ mT，即：0 ~ 10 mT，10 ~ 20 mT，20 ~ 30 mT，……，90 ~ 100 mT。虽然 ARM 对细磁性颗粒（SD）的变化很敏感[5~9]，但是颗粒间的磁性相互作用会强烈影响颗粒的磁响应，所以 ARM 也会受到颗粒间磁性相互作用的影响[12~13]。

3　实验结果

图 2—图 4 分别显示了上层、中层和下层沉积物的 pARM 矫顽力谱，在任何一个交变场区间获得的 pARM 与 ARM 的比值（pARM/ARM），是该区间内获得的 pARM 的归一化值，中部立柱的高度指示样品在该区间内获得归一化后的 pARM。细磁性矿物颗粒（如 SD）具有较高矫顽力（AF > 20 mT），因而具有较高的 pARM。然而，粗磁性颗粒（如 MD）具有较低的 pARM，因为 MD 磁性物质具有较低矫顽力（AF < 20 mT）。很显然，粒径不同的磁铁矿颗粒，其获得 ARM 的物理机制存在一定差异性[3]。假单畴（PSD）磁颗粒实际上是 SD 和 MD 的混合物，在此不做更多研究。

其中，上层沉积物（全新世中晚期）的 pARM 谱特征（见图 2）：pARM 归一化值在 10 ~ 20 mT 的区间内最高（约 0.22 ~ 0.24），暗示该层沉积物主要含有粗磁铁矿颗粒（MD），这与刘青松等[3]研究的多畴磁性颗粒的 pARM 归一化值 0.31 ~

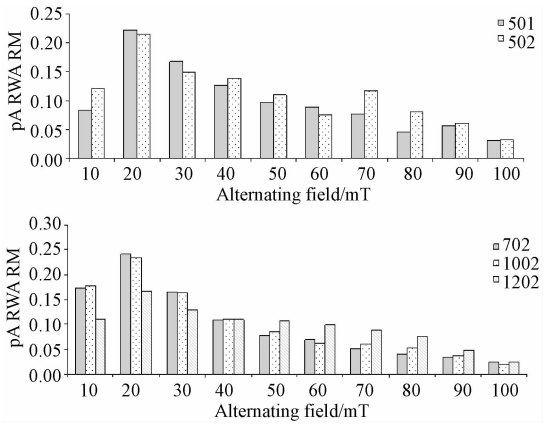

图 2 干海湖泊剖面上层沉积物样品的 pARM 谱变化规律

Fig. 2 Variations in pARM spectra for samples from the uppermost level

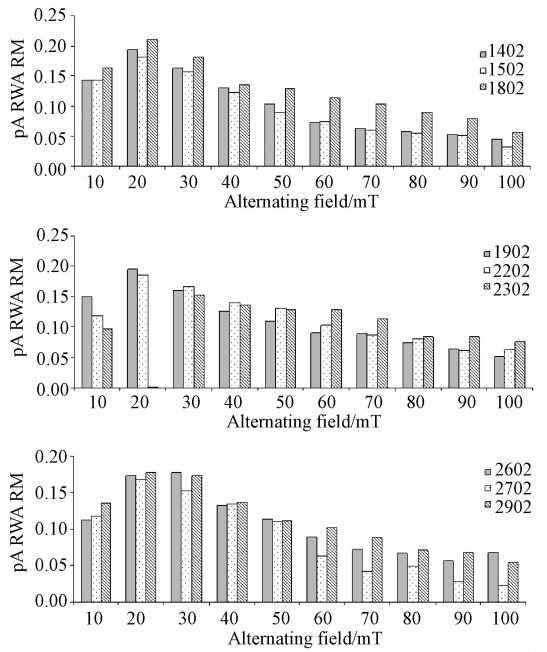

图 3 干海湖泊剖面中层沉积物样品的 pARM 谱变化规律

Fig. 3 Variations in pARM spectra for samples from the middle level

0.33 相近，根据 Jackson 等[2]对不同粒径磁铁矿颗粒的矫顽力模型，判定这些主要磁铁矿颗粒粒径大小为 3 ~ 6 μm。其次，在交变区间 70 ~ 80 mT，pARM 归一化值有较高突起（0.11 ~ 0.14），暗示该层沉积物含少量 SD 磁铁矿颗粒，粒径大约是 0.1 ~ 0.5 μm，或者含有较少量硬磁矿物，例如：赤铁矿、磁赤铁矿、胶黄铁矿、针铁矿。

中层沉积物（全新世中期）的 pARM 谱特征

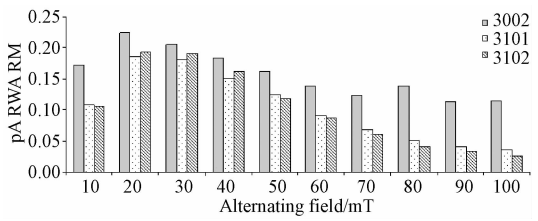

图 4 干海湖泊剖面下层沉积物样品的 pARM 谱变化规律

Fig. 4 Variations in pARM spectra for samples from the lowermost level

（见图 3）：总体来说，该层沉积物的 pARM 谱分布较宽，pARM 归一化值降低较缓。在 10 ~ 20 mT 的区间内，pARM 归一化值显示最高（0.17 ~ 0.20），在交变区间 0 ~ 10 mT 和 20 ~ 30 mT 内，pARM 归一化值较高，分别为 0.12 ~ 0.15 和 0.15 ~ 0.17。随着交变磁场增大，在交变区间 30 ~ 40 mT、40 ~ 50 mT 和 50 ~ 60 mT 内，pARM 归一化值降低缓慢、基本保持恒定值 0.11 ~ 0.12。这些特征暗示该层沉积物中的磁性矿物颗粒是混合物，如：较多的 MD 磁铁矿颗粒、较少量的较细 PSD、微量的 SD 磁铁矿颗粒（或者硬磁矿物颗粒），主要磁铁矿颗粒（MD）粒径大小为 <5 μm，次要磁性颗粒（PSD）粒径大约是 0.1 ~ 0.5 μm[2]。

下层沉积物（全新世早期）的 pARM 谱特征（见图 4）：与上层和中层相比，下层沉积物的 pARM 谱分布相对较宽，pARM 值降低较缓。在交变区间 10 ~ 20 mT、20 ~ 30 mT、30 ~ 40 mT、40 ~ 50 mT、50 ~ 60 mT、60 ~ 70 mT 内，pARM 归一化值分别为 0.09 ~ 0.10、0.18 ~ 0.19、0.18 ~ 0.19、0.16 ~ 0.17、0.12 ~ 0.13、0.08 ~ 0.10、0.05 ~ 0.07，这些数值相对于上层和中层沉积物的 pARM 归一化值来说，有所降低，暗示下层沉积物中的磁性矿物颗粒是混合物，包括 MD 磁铁矿颗粒、小的 PSD、微量的 SD 磁铁矿颗粒，或者硬磁矿物颗粒。下层沉积物中的粗磁铁矿粒径大约是 1 ~ 6 μm，次要磁铁矿颗粒粒径大约是 0.1 ~ 0.5 μm[2]。但是，该层的磁铁矿颗粒比中层的粒径要大，而比上层的粒径要小。此外，如图 4 所示样品 3002，来自于中层和下层转换薄层，具有宽缓且高的 pARM 归一化值，大 MD 磁铁矿颗粒（1 ~ 5 μm）为主，虽然细 PSD 磁铁矿颗粒（0.1 ~ 0.5 μm）或者硬磁颗粒是次要矿物，但是其含量相对较高。

总之，在宁武干海湖泊沉积物剖面样品中，

不同层位的 pARM 谱有共同特征，即显示粗的磁铁矿颗粒（MD；AF < 20 mT）是主要载磁矿物，而细的磁铁矿颗粒（PSD-SD；AF > 20 mT）为次要载磁矿物，这与我们的磁滞结果（MD）是一致的。此外，三个层位具有各自不同的特征，上层的粗 MD 磁铁矿颗粒含量最高，下层次之，而中层相对最低；中层的 PSD-SD 磁铁矿颗粒含量最高，下层和上层的 PSD-SD 颗粒含量次之。

4　分析讨论

天然岩石样品是多种磁性矿物颗粒的混合物，SD 和 MD 颗粒含量不同，根据刘青松等[3]的分析模型，我们假定 SD 颗粒相对于样品中总磁性矿物颗粒的质量百分比含量为：$P = M_{SD}/(M_{SD} + M_{MD})$。随着样品的 P 值增大，SD 颗粒对外加磁场的反映相对增强，pARM 谱会逐渐向高矫顽力方向移动。同时，样品的 ARM 值、pARM 值、pARM 归一化值都会相应增加。如果样品中不含 SD 颗粒，而是含有大量 MD 颗粒，其 ARM 值（0 ~ 100 mT）不会为零，因为 ARM 反映粗颗粒和细颗粒的共同贡献，粗的 MD 颗粒浓度高，会在低矫顽力区间（0 ~ 10 mT）内产生相对较高的数值，此时粗颗粒对 ARM 的贡献不能忽略。对于 pARM 谱来说，如果样品中 SD 颗粒含量为零，pARM 值在与 SD 颗粒对应的高矫顽力区间（如 30 ~ 80 mT）会很低，此时 MD 颗粒对 pARM（30 ~ 80 mT）没有贡献；然而，如果 MD 颗粒浓度较高，其 pARM（< 30 mT）会大于零，因为粗颗粒（MD）对 pARM（< 30 mT）有贡献。由此可见，pARM 谱分析对细磁颗粒（SD 颗粒）反映灵敏，通过用不同矫顽力区间，可以有效地识别粗磁颗粒的贡献，并减弱其对细颗粒的影响，进而突出细磁颗粒的作用。

不论岩石样品还是沉积物样品，应用 pARM 谱分析，并结合其它磁学参数，例如：S_{ratio}、磁滞性质参数、硬磁矿物含量参数（HIRM）等，就能有效判别样品中磁性矿物类型、含量、磁畴状态[3]。虽然 ARM 会受到矿物颗粒之间磁性相互作用的影响，但是自然样品中的磁性矿物含量很低，一般小于几个百分比，因此矿物颗粒之间的磁性相互作用可以忽略不计。硬磁矿物具有较大矫顽力，所以在较低的矫顽力区间（< 60 mT）很难获得 ARM，所以硬磁矿物对 pARM 的影响可以忽略不计。研究海相[14]和湖相[15~16]沉积物的地球物理方法很多，并由此可以研究古气候变化[14,17]，在此不一一例举。基于以上优点，pARM 谱分析有助于沉积物的古气候、岩石磁学、古地磁学研究[3,14]，并具有广泛的应用前景。

参考文献/References

[1] Dankers P. Relationship between median destructive field and remanent coercive forces for dispersed natural magnetite, titanomagnetite and hematite [J]. Geophysical Journal International, 1981, 64 (2): 447 ~ 461.

[2] Jackson M, Gruber W, Marvin J, et al. Partial anhysteretic remanence and its anisotropy: applications and grainsize-dependence [J]. Geophysical Research Letters, 1988, 15 (5): 440 ~ 443.

[3] 刘青松, YU Yongjae, 潘永信, 等. 单畴和多畴磁铁矿合成样品的部分非磁滞剩磁研究 [J]. 科学通报, 2005, 50 (20): 2267 ~ 2270.
LIU Qingsong, YU Yongjae, PAN Yongxin, et al. Partial anhysteretic remanent magnetization (pARM) of synthetic single-and multidomain magnetites and its paleoenvironmental significance [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50 (20): 2381 ~ 2384.

[4] Everitt C W F. Thermoremanent magnetization. Ⅰ. Experiments on single domain grains [J]. Philosophical Magazine, 1961, 6 (66): 713 ~ 726.

[5] Sugiura N. ARM, TRM and magnetic interactions: concentration dependence [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1979, 42 (3): 451 ~ 455.

[6] Yamazaki T, Ioka N. Cautionary note on magnetic grain-size estimation using the ratio of ARM to magnetic susceptibility [J]. Geophysical Research Letters, 1997, 24 (7): 751 ~ 754.

[7] Liu Q S, Banerjee S K, Jackson M J, et al. Grain sizes of susceptibility and anhysteretic remanent magnetization carriers in Chinese loess/paleosol sequences [J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109 (B3): B03101, doi: 10.1029/2003JB002747.

[8] Wang X S, Løvlie R, Su P, et al. Magnetic signature of environmental change reflected by Pleistocene lacustrine sediments from the Nihewan Basin, North China [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2008, 260 (3/4): 452 ~ 462.

[9] Booth C A, Walden J, Neal A, et al. Use of mineral magnetic concentration data as a particle size proxy: a case study using marine, estuarine and fluvial sediments in the Carmarthen Bay area, South Wales, U. K. [J]. Science of the Total Environment, 2005, 347 (1/3): 241 ~ 253.

[10] 朱大岗, 孟宪刚, 邵兆刚, 等. 山西宁武地区高山湖泊全新世湖相地层划分及干海组的建立 [J]. 地质通报, 2006, 25 (11): 1303 ~ 1310.
ZHU Dagang, MENG Xiangang, SHAO Zhaogang, et al.

Holocene lacustrine deposits in mountain lakes in Ningwu, Shanxi, China and establishment of the Ganhai Formation [J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25 (11): 1303 ~ 1310.

[11] 孟宪刚, 朱大岗, 邵兆刚, 等. 山西宁武万年冰洞形成机制及其环境意义 [R]. 国土资源大调查项目, 北京: 中国地质科学院地质力学研究所, 2005, 005 ~ 03.
MENG Xiangang, ZHU Dagang, SHAO Zhaogang, et al. Formation regime and its environmental significance of the Ten Thousand Ice Cave in Ningwu, Shanxi Province [R]. The national land and resources survey item plan, Beijing: Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, 2005, 005 ~ 003.

[12] Muxworthy A, Williams W, Virdee D. Effect of magnetostatic interactions on the hysteresis parameters of single-domain and pseudo-single-domain grains [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108 (B11): 2517, doi: 10.1029/2003JB002588.

[13] Evans M E, Krása D, Williams W, et al. Magnetostatic interactions in a natural magnetite-ulvöspinel system [J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111 (B12): B12S16, doi: 10.1029/2006JB004454.

[14] 张淑伟, 杨振宇, 王喜生, 等. 磁化率各向异性的原理及应用实例 [J]. 地质力学学报, 2017, 23 (1): 135 ~ 140.
ZHANG Shuwei, YANG Zhenyu, WANG Xisheng, et al. Anisotropy of magnetic susceptibility: theory and case studies [J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23 (1): 135 ~ 140.

[15] 曾庆猛, 刘成林, 马寅生, 等. 电磁资料在柴达木盆地东部地区石炭系勘探中的应用 [J]. 地质力学学报, 2017, 23 (1): 125 ~ 134.
ZENG Qingmeng, LIU Chenglin, MA Yansheng, et al. Electromagnetic data application in carboniferous exploration of eastern Qaidam Basin [J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23 (1): 125 ~ 134.

[16] 张淑伟. 环境磁学在加拿大伊利湖西盆地北岸 Cedar 滩的应用 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2010, 225.
ZHANG Shuwei. Application of environmental magnetism to Cedar Beach, western Lake Erie, Canada [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2010, 225.

[17] 李建峰, 赵越, 裴军令, 等. 塔里木盆地新生代海相沉积问题 [J]. 地质力学学报, 2017, 23 (1): 141 ~ 149.
LI Jianfeng, ZHAO Yue, PEI Junling, et al. Cenozoic marine sedimentation problem of the Tarim Basin [J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23 (1): 141 ~ 149.

[18] Yu Y, Dunlop D J, Özdemir Ö. Partial anhysteretic remanent magnetization in magnetite 2. Reciprocity [J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107 (B10): 2245, doi: 10.1029/2001JB001269.

A STUDY ON PARTIAL ANHYSTERETIC REMANENCE IN SEDIMENTS FROM GANHAI LAKE, NINGWU TIANCHI

ZHANG Shuwei[1,2], LIU Qingsong[3], WANG Xisheng[1],
Cioppa Maria[4], HUO Junjie[2], LV Yiqing[2], QIAO Yansong[1], ZHAO Yue[1]

(1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100081, *China*;
2. *College of Mining Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan* 030024, *Shanxi, China*;
3. *Department of Ocean Science and Engineering, South University of Science and Technology, Shenzhen* 518055, *Guangdong, China*;
4. *Department of Earth and Environmental Sciences, University of Windsor, Windsor, ON N9B 3P4, Canada*)

Abstract: A study of partial anhysteretic remanent magnetization (pARM) spectra in samples from a sediment profile of Ganhai Lake (38°53′N, 112°11′E) shows variations in effective magnetic grain sizes of the lake sediment magnetite particles, consistent with the hysteresis results. Within the full profile, most magnetite particles are of coarse, multi-domain (MD) size, as shown by the dominant low coercivity (AF < 20 mT) spectra, with a few samples showing finer single domain (SD) -pseudo-single domain (PSD) particles with higher coercivity (AF > 20 mT). The uppermost level (~7.3 ~ 4.0 ka) contains more coarse MD magnetite grains due to higher pARM peaks than the middle (~12.0 ~ 7.3 ka) and the lowermost level (~13.0 ~ 12.0 ka) that shows lower peaks. The middle level shows slight more fine SD-PSD magnetite grains than both the uppermost and lowermost level. High-field pARM spectrum can effectively identify fine PSD-SD magnetite grains and reduce effects of MD grains. Therefore, pARM spectrum analysis can be utilized to quickly and effectively determine the relative amount of fine magnetic grains in the samples, which is helpful to the study of the paleo-climate, rock magnetism and paleomagnetism of the lake sediments.

Key words: pARM; magnetic grains; lake sediments; Ningwu; rock magnetism