

吕 镔, 刘秀铭, 陈渠等. CBD 方法对天然样品磁性矿物影响. 地球物理学报, 2012, 55(9): 3077-3087, doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 09. 025.

Lü B, Liu X M, Chen Q, et al. Effects of CBD treatment on magnetic minerals of natural samples. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(9): 3077-3087, doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 09. 025.

CBD 方法对天然样品磁性矿物影响

吕 镔¹, 刘秀铭^{2,3*}, 陈 渠^{1,4}, 赵国永¹, 陈家胜¹, 毛学刚⁵, 郭雪莲¹

1 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000

2 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007

3 Department of Environment and Geography, Macquarie University, Sydney NSW 2109, Australia

4 Institute of Geophysics, ETH Zurich, Zurich 8092, Switzerland

5 Institut für Geophysik, Ludwig-Maximilians-Universität, Munich, 80333, Germany

摘 要 本研究选择川西高原、天山和西伯利亚 Kurtak 剖面的黄土古土壤样品及亚热带非风成样品进行 CBD 处理, 系统测量并对比处理前后的磁学参数, 包括低频磁化率、频率磁化率、非磁滞剩磁、饱和等温剩磁、剩磁矫顽力和热磁曲线($J-T$ 曲线), 分析处理前后磁性矿物种类、含量和磁畴的变化. 结果表明, CBD 方法对于磁性矿物的溶解并无明显的选择性, 在温度与反应时间一定的条件下, 磁性矿物的溶出量主要受控于其粒径分布. CBD 方法可以非常有效地去除具有更大比表面积的细粒($< 1 \mu\text{m}$)磁性矿物, 同时溶解粗粒($> 1 \mu\text{m}$)磁性矿物外缘, 使其粒径变细. CBD 处理后磁化率变化存在多种可能, 对于成土作用较强的古土壤, CBD 方法可以较为准确地提取成土成因的磁性信息; 而干旱和过度湿润条件下的风积黄土, 不宜使用 CBD 方法区分原生与次生磁性矿物.

关键词 CBD 技术, 黄土古土壤, 磁性矿物, 磁学特征, 环境磁学

doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 09. 025

中图分类号 P318

收稿日期 2011-10-20, 2011-12-19 收修定稿

Effects of CBD treatment on magnetic minerals of natural samples

LÜ Bin¹, LIU Xiu-Ming^{2,3*}, CHEN Qu^{1,4}, ZHAO Guo-Yong¹,
CHEN Jia-Sheng¹, MAO Xue-Gang⁵, GUO Xue-Lian¹

1 Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

2 College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

3 Department of Environment and Geography, Macquarie University, Sydney NSW 2109, Australia

4 Institute of Geophysics, ETH Zurich, Zurich 8092, Switzerland

5 Institut für Geophysik, Ludwig-Maximilians-Universität, Munich, 80333, Germany

Abstract Loess-paleosol sequences are good archives in paleoclimate research over the last 2.5 million years and even earlier. Magnetic susceptibility of loess-paleosol sequences has been used extensively as a proxy for paleoclimate interpretations. Magnetic minerals in loess/paleosols are of lithogenic (allochthonous) origin or pedogenic (authigenic) origin. It is of great significance in loess magnetism study to separate magnetic signals and investigate whether it is magnetite or maghemite that mainly contributes to magnetic susceptibility enhancement in paleosol. Though the combination of CBD (Citrate-Bicarbonate-Dithionite) procedure with loess magnetism shed

基金项目 国家自然科学基金(40830105, 41021091, 41072124, 41210002)、中央高校基本科研业务费专项资金(lzujbky-2010-179)及甘肃省自然科学基金(0710KJZA024)资助.

作者简介 吕镔, 男, 1985 年生, 博士研究生, 主要从事环境磁学与第四纪环境研究. E-mail: lvb07@lzu.edu.cn

* **通讯作者** 刘秀铭, 男, 1956 年生, 教授, 主要从事风积地层与环境磁学方面的研究. E-mail: xliu@fjnu.edu.cn

light on these questions, the CBD method is still in debate and its mechanism unclear. To better understand the effects of CBD method on magnetic minerals, in this paper, loess/paleosol samples from Western Sichuan plateau, Tianshan mountains and Kurtak, Siberia and non-aeolian samples from Subtropics were undergone CBD treatment. Magnetic parameters, including low-field magnetic susceptibility, frequency dependent magnetic susceptibility, anhysteretic remanent magnetization, saturation isothermal remanent magnetization and thermomagnetic curves ($J-T$ curves), were measured before and after CBD treatment. Changes in magnetic mineralogy, magnetic concentration and magnetic domain were analyzed. The results suggest that CBD method is not apparently selective in dissolving various magnetic minerals, the dissolving quantity is controlled by grain size distribution if the temperature and duration are given. CBD method can efficiently remove fine grains which have higher ratio between surface and volume, and dissolve a rim from the outside of the coarse grains resulting in finer grain size. There are multiple possibilities of changes in magnetic susceptibility after CBD treatment. CBD method can be used to obtain magnetic signal of pedogenic original. It is not advisable to use the method to separate lithogenic and pedogenic magnetic minerals in loess from arid or over-wet area.

Keywords CBD technique, Loess/paleosol, Magnetic minerals, Magnetic properties, Environmental magnetism

1 引言

风成黄土古土壤序列是古气候信息最为丰富的陆相沉积物^[1]. 过去二十多年来,黄土环境磁学和岩石磁学研究取得了许多重要进展^[2-6],磁化率因此被广泛地用来作为研究古气候变化的代用指标^[7-10]. 黄土中的磁性矿物按成因可以分为两类:岩石成因(原生)和成土成因(次生). 原生磁性矿物携带了源区和搬运动力的信息;次生磁组分是成土作用过程中形成的细小磁颗粒,与成土条件(如降水、温度)密切相关. 成土作用过程中形成的细小磁性颗粒是磁铁矿还是磁赤铁矿? 如何区分原生与次生磁性矿物所携带的古环境信息? CBD(Citrate-Bicarbonate-Dithionite)方法与黄土环境磁学相结合的研究为这些问题的解决开辟了新方向,然而也带来了许多争议^[11-22]. CBD技术是广泛应用于土壤学中一种除去土壤或粘土中铁氧化物/氢氧化物的化学方法^[23]. Verosub等^[13]采用CBD方法研究了洛川黄土和古土壤样品,基于以前美国加州两个土壤剖面的研究结论^[24]认为该方法彻底去除了次生磁赤铁矿,而不触及磁铁矿,由此得出了成土过程中形成的磁赤铁矿是造成古土壤磁化率增强的重要原因的结论. 随后的研究^[15]认为CBD处理不仅能够有效去除磁赤铁矿,同时也溶解了细粒的磁铁矿,而对粗颗粒磁性

矿物几乎没有影响,并进一步假设如果大多数成土成因的磁性矿物颗粒足够小($< 1 \mu\text{m}$),大多数岩石成因的磁性矿物足够大($> 1 \mu\text{m}$),CBD方法可以用来区分岩石成因和成土成因的磁性矿物. 但是Maher等^[20]认为磁赤铁矿对古土壤磁化率增强的作用远不如Verosub等指出的那么重要. Liu等^[22]选取了粗颗粒人工合成磁铁矿样品进行CBD处理,发现CBD方法可以溶解大颗粒磁铁矿并与反应持续的时间有关. Oorschot等^[21]探讨了反应温度与反应时间对磁性矿物溶出量的影响,发现溶出量与反应温度和时间存在着良好的正相关关系. 上述研究对CBD方法区分岩石成因和成土成因的磁性矿物的有效性提出了质疑. 归纳起来,关于CBD方法的争议主要集中在以下三个方面^[19]:1)CBD可溶强磁性矿物主要是磁铁矿还是磁赤铁矿? 2)CBD是否选择性溶解成土成因磁性矿物? 3)CBD是否只溶解细颗粒($< 1 \mu\text{m}$)磁性矿物而不触及粗颗粒($> 1 \mu\text{m}$)磁性矿物?

目前风成黄土的CBD研究主要集中于中国黄土高原,有必要选择不同类型风积黄土的实验结果进行对比分析. 据此,本研究选择黄土高原以外的风成黄土古土壤样品及两个亚热带样品进行CBD处理,运用岩石磁学方法分析了CBD处理前后磁性参数的变化,以期更深入了解CBD方法对磁性矿物的影响,进而探讨其应用于区分岩石成因和成土成因磁性矿物的可行性.

2 实验样品和方法

本研究的黄土古土壤样品来自 1) 四川省金川县马厂剖面(样品编号 MC)、2) 新疆天山(样品编号 TS)和 3) 西伯利亚西南部的 Kurtak 剖面(样品编号 KR)。上述三个剖面分别代表了不同环境条件下形成的黄土: 川西高原的黄土形成于半湿润条件下, 磁化率增强机制与黄土高原类似, 磁化率在古土壤中获得高值, 在黄土中获得低值^[25]; 天山黄土形成于干旱的条件下, 古土壤极不发育, 磁化率主要反映搬运风力大小^[26-28]; 西伯利亚 Kurtak 地区黄土形成于湿润条件下, 磁化率增强机制与黄土高原相反, 磁化率在黄土中获得高值, 在古土壤中获得低值^[29-30]。非风成样品共两个, 分别为亚热带红色风化壳(采自福建省泉州市、样品编号 QZ)和亚热带红壤(采自福建省福州市、样品编号 FZ)。

CBD 柠檬酸钠-重碳酸钠-连二亚硫酸钠方法的基本原理^[19]是: 连二亚硫酸钠($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$)溶解铁氧化物/氢氧化物, 并将 Fe^{3+} 还原成 Fe^{2+} , 柠檬酸钠($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)与 Fe^{2+} 发生螯合作用, 形成稳定的螯合物存在于溶液中。碳酸氢钠(NaHCO_3)作为缓冲剂, 使溶液的 pH 值保持在 7.3 左右。具体实验操作严格按照文献^[23]所述步骤进行。实验过程中配制溶液与清洗离心管均使用蒸馏水, 每次离心后所得清液均收集、标定。

将经过干燥后的样品(包括 CBD 处理前和处理后)轻轻研磨成粉末, 用塑料薄膜包紧装入专用样品盒, 分别测量下述各项磁学参数。使用 Bartington MS2 型磁化率仪测量低频磁化率(χ_{lf})和高频磁化率(χ_{hf}), 频率分别为 470 Hz 和 4700 Hz, 计算出百分比频率磁化率 $\chi_{\text{fd}}\% = 100 \times (\chi_{\text{lf}} - \chi_{\text{hf}}) / \chi_{\text{lf}}$; 使用 DTECH 交变退磁仪和 Molspin Minispin 旋转磁力仪测量非磁滞剩磁(ARM), 交变场峰值为 100 mT, 直流场为 $50 \mu\text{T}$, 计算出非磁滞磁化率(χ_{ARM}); 使用 MMPM10 强磁仪对样品施加强磁场, 等温剩磁和饱和等温剩磁在 Molspin Minispin 旋转磁力仪上测量, 剩磁矫顽力(H_{cr})由 $\text{IRM}_{-x\text{mT}}$ 线性内插获得; 在空气环境中使用 VFTB(Variable Field Transition Balance)居里称测量典型样品的热磁曲线。

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

3.1 磁化率(χ_{lf})

磁化率是度量物质在外加磁场下被磁化能力的一个物理量, 室温下的磁化率大小与样品中磁性矿物的种类、含量、磁畴及外加磁场和观测频率有关^[10, 31]。本研究中的样品在同样的外加磁场和频率下测量, 磁化率的大小反映了样品磁学性质。CBD 处理后, 磁化率表现出不同的变化。MC 剖面样品初始磁化率值介于 $(23.5 \sim 228.4) \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$ 之间, 平均值为 $86.38 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$; CBD 处理后的磁化率值在 $(9.08 \sim 21.12) \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$ 之间, 平均值为 $13.75 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$ 。磁化率最大减少率为 94.05% (MC17 样品), 最小减少率为 26.05% (MC23 样品), 分别对应初始磁化率最大值和最小值。CBD 处理后, 磁化率平均减少了 79.3%, 对比 MC 剖面 25 个样品, 可以发现磁化率的损失率与 CBD 处理前的磁化率成正比(图 1a)。TS 剖面样品经 CBD 处理之

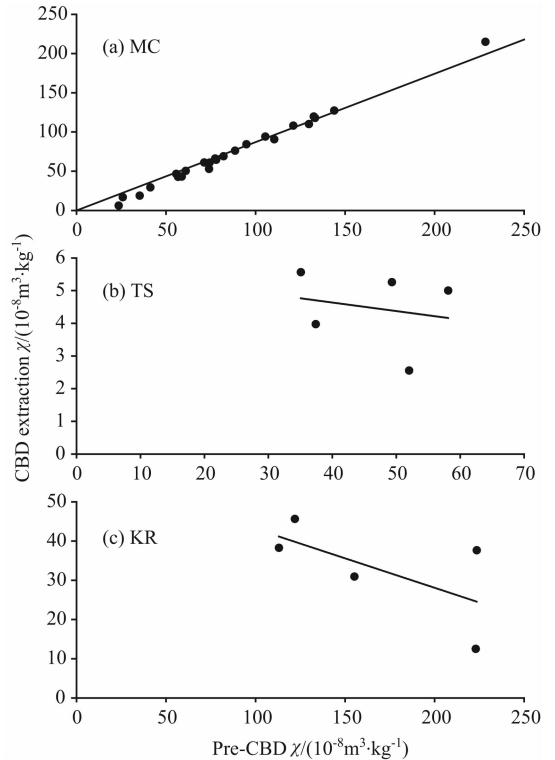


图 1 CBD 溶解磁化率与初始磁化率关系图

(a) 马厂黄土; (b) 天山黄土; (c) 西伯利亚黄土。

Fig. 1 Correlation between CBD extraction magnetic susceptibility and initial magnetic susceptibility

(a) MC loess; (b) TS loess; (c) KR loess.

表 1 CBD 方法处理前后的常温磁学参数对比
Table 1 Magnetic parameters of all samples before and after CBD treatment

| 编号 | $\chi_{if}/(10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$ | | $\chi_{fd}\%/(%)$ | | $\chi_{ARM}/(10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$ | | SIRM/ $(10^{-5} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1})$ | | H_{cr}/mT | |
|------|--|---------|-------------------|------|---|--------|---|---------|--------------------|-------|
| | Pre | Post | Pre | Post | Pre | Post | Pre | Post | Pre | Post |
| MC1 | 133.20 | 15.36 | 10.96 | 2.54 | 696.62 | 16.49 | 748.75 | 77.30 | 24.86 | 33.85 |
| MC2 | 143.90 | 16.62 | 10.01 | 1.52 | 689.96 | 16.98 | 828.82 | 89.67 | 25.42 | 33.52 |
| MC3 | 129.80 | 19.86 | 10.25 | 1.46 | 644.95 | 28.79 | 740.44 | 135.30 | 26.73 | 39.74 |
| MC4 | 110.40 | 19.77 | 10.33 | 1.45 | 537.74 | 30.48 | 662.89 | 145.12 | 27.46 | 41.13 |
| MC5 | 74.00 | 21.12 | 9.05 | 2.04 | 386.68 | 23.83 | 566.86 | 147.28 | 34.92 | 36.36 |
| MC6 | 58.80 | 15.77 | 8.67 | 2.70 | 317.89 | 19.16 | 428.41 | 104.67 | 36.14 | 38.67 |
| MC7 | 82.10 | 13.07 | 9.62 | 1.03 | 548.68 | 17.23 | 544.95 | 79.99 | 29.48 | 37.45 |
| MC8 | 94.90 | 10.59 | 10.85 | 2.53 | 613.82 | 11.14 | 503.62 | 46.80 | 28.29 | 37.25 |
| MC9 | 71.30 | 10.21 | 9.12 | 1.28 | 450.00 | 11.30 | 453.76 | 45.68 | 27.97 | 42.11 |
| MC10 | 61.00 | 10.62 | 10.16 | 2.67 | 321.89 | 17.91 | 365.07 | 79.11 | 27.25 | 48.05 |
| MC11 | 35.30 | 16.49 | 6.23 | 1.61 | 144.17 | 19.70 | 360.16 | 102.62 | 49.10 | 41.55 |
| MC12 | 56.70 | 13.90 | 7.94 | 1.92 | 297.31 | 16.92 | 405.85 | 89.54 | 32.61 | 40.53 |
| MC13 | 25.80 | 9.08 | 6.20 | 6.15 | 96.37 | 5.33 | 135.26 | 33.89 | 27.89 | 43.00 |
| MC14 | 77.40 | 11.36 | 9.95 | 1.15 | 407.31 | 13.18 | 409.95 | 48.36 | 31.12 | 41.82 |
| MC15 | 74.30 | 13.46 | 9.69 | 1.05 | 392.37 | 29.71 | 469.29 | 120.07 | 29.82 | 48.32 |
| MC16 | 121.10 | 13.01 | 10.49 | 3.13 | 690.36 | 20.67 | 588.13 | 86.75 | 25.73 | 43.97 |
| MC17 | 228.40 | 13.57 | 10.90 | 4.08 | 1118.63 | 25.30 | 976.86 | 74.93 | 23.08 | 43.67 |
| MC18 | 132.50 | 12.84 | 10.19 | 4.65 | 657.62 | 23.41 | 643.16 | 81.57 | 31.60 | 42.85 |
| MC19 | 78.00 | 13.58 | 9.74 | 0.93 | 428.92 | 16.77 | 478.06 | 72.20 | 31.28 | 34.15 |
| MC20 | 55.70 | 9.21 | 10.23 | 4.17 | 443.84 | 14.42 | 334.87 | 36.92 | 27.04 | 44.66 |
| MC21 | 56.30 | 11.22 | 9.59 | 1.14 | 334.93 | 12.12 | 318.23 | 44.59 | 32.99 | 38.00 |
| MC22 | 41.20 | 11.87 | 8.01 | 3.53 | 181.45 | 19.73 | 292.85 | 96.64 | 38.97 | 45.20 |
| MC23 | 23.50 | 17.37 | 5.11 | 2.59 | 63.45 | 21.76 | 267.56 | 148.33 | 57.61 | 46.91 |
| MC24 | 88.50 | 12.43 | 10.73 | 2.27 | 510.12 | 18.58 | 460.90 | 73.16 | 27.49 | 42.71 |
| MC25 | 105.40 | 11.36 | 10.25 | 4.71 | 647.10 | 20.63 | 514.51 | 57.83 | 25.56 | 47.14 |
| TS1 | 58.13 | 53.13 | 0.75 | 0.53 | 123.28 | 67.79 | 1214.52 | 634.86 | 61.36 | 44.46 |
| TS2 | 35.07 | 29.51 | 1.71 | 1.97 | 109.90 | 41.74 | 737.29 | 354.75 | 66.56 | 52.11 |
| TS3 | 37.40 | 33.43 | 1.78 | 0.84 | 101.14 | 35.74 | 588.22 | 234.46 | 57.87 | 44.04 |
| TS4 | 52.00 | 49.45 | 1.28 | 1.68 | 107.81 | 53.97 | 844.42 | 397.78 | 53.27 | 35.83 |
| TS5 | 49.33 | 44.08 | 0.68 | 0.94 | 102.86 | 50.26 | 816.31 | 356.07 | 54.01 | 40.90 |
| KR1 | 223.51 | 185.85 | 2.44 | 3.92 | 282.65 | 179.27 | 1806.08 | 674.71 | 44.32 | 23.26 |
| KR2 | 222.96 | 210.47 | 1.56 | 0.07 | 313.23 | 159.58 | 1852.23 | 1411.54 | 45.09 | 33.02 |
| KR3 | 121.98 | 76.36 | 2.97 | 3.72 | 351.06 | 85.75 | 1317.70 | 319.56 | 57.81 | 26.85 |
| KR4 | 113.06 | 74.79 | 0.77 | 1.89 | 515.58 | 254.82 | 1212.93 | 427.17 | 54.63 | 31.80 |
| KR5 | 155.16 | 124.22 | 0.33 | 2.06 | 318.12 | 155.84 | 1944.02 | 614.70 | 54.47 | 28.15 |
| QZ | 1451.43 | 1544.83 | 0.99 | 0.53 | 304.21 | 327.24 | 3365.06 | 3474.68 | 28.46 | 22.58 |
| FZ | 60.80 | 34.55 | 2.19 | 1.50 | 313.66 | 56.16 | 2161.35 | 569.18 | 67.92 | 43.41 |

注:Pre(Post)分别表示 CBD 处理前(后).

后磁化率值下降幅度很小, 5 个样品中最大减少率为 15.86%, 最小为 4.91%, 平均下降了 10.13%。KR 剖面样品磁化率减少率介于 MC 剖面与 TS 剖面之间, 平均减少了 21.71%。TS 与 KR 剖面样品存在一个共同点, 即磁化率损失率与初始磁化率成反比 (图 1b, 1c)。QZ 样品在 CBD 处理后, 磁化率反而升高了 6.43% (表 1)。

3.2 百分比频率磁化率 ($\chi_{fd} \%$)

颗粒度接近超顺磁 (SP) 与单畴 (SD) 界线 (尤其是 20~25 nm) 的磁铁矿颗粒磁化率随外加磁场频率的增大而减小, 通常用百分比频率磁化率 ($\chi_{fd} \%$) 来估算 SP 磁性矿物的相对含量^[32-33]。CBD 处理后, MC 剖面的 $\chi_{fd} \%$ 由初始的 9.37% 下降到 2.49%, 表明 CBD 方法溶解了大量的 SP 磁性颗粒。其他样品的初始 $\chi_{fd} \%$ 大多在 3% 以下, 说明这些样品几乎不含 SP 颗粒亚铁磁性矿物^[34], 经 CBD 处理后, $\chi_{fd} \%$ 基本没有变化 (表 1)。

3.3 非磁滞磁化率 (χ_{ARM})

χ_{ARM} 强烈依赖磁性矿物的颗粒度, 对稳定单畴 (SSD) 和较细的假单畴 (PSD) 的磁铁矿尤其敏感, 可以用来指示样品中单畴颗粒的含量^[10, 31]。CBD 处理后, MC 剖面样品的 χ_{ARM} 平均减少了 94.1%, 高于磁化率的平均减少率 79.3%, 与磁化率变化相似, χ_{ARM} 减少率与初始值成正比。TS 剖面与 KR 剖面的 χ_{ARM} 分别减少了 54.56% 和 49.92% (平均值), 均高于磁化率的平均减少量 (分别为 10.13% 和 21.71%)。QZ 样品的 χ_{ARM} 升高了 7.57% (表 1)。

3.4 饱和等温剩磁 (SIRM)

SIRM 主要由亚铁磁性矿物中的单畴颗粒贡献, 通常将外加磁场为 1 T 的等温剩磁 (IRM) 定义为 SIRM^[31]。CBD 处理后, MC 剖面样品的 SIRM 平均减少了 81.15%, 稍大于磁化率减少率 79.3%。TS 剖面与 KR 剖面的 SIRM 分别减少了 53.8% 和 58.6% (平均值), 均高于磁化率的减少量。QZ 样品的 SIRM 同样没有减小, 反而升高了 3.26% (表 1)。

3.5 剩磁矫顽力 (H_{cr})

H_{cr} 是指使 SIRM 减少到零所需施加的反向磁场值, 由于不同的磁性矿物 H_{cr} 不同, 软磁矿物 (如磁铁矿、磁赤铁矿) 的 H_{cr} 较小, 硬磁矿物 (如赤铁矿、针铁矿) 的 H_{cr} 较大, 因此 H_{cr} 可以用来估算样品中软硬磁矿物的比例^[31]。CBD 处理后, MC 剖面样品除了 MC11 和 MC23 样品 (对应发育最弱的黄土层), H_{cr} 均升高; 而 TS 剖面与 KR 剖面及另外两个非风成土壤样品的 H_{cr} 不同程度地降低 (表 1)。

3.6 典型样品的热磁曲线 ($J-T$ 曲线)

热磁分析是鉴定磁性矿物种类的有效方法, 磁化强度随温度变化曲线 ($J-T$ 曲线) 反映样品加热过程中的磁性矿物相变和居里点, 据此可以鉴定样品中载磁矿物的种类^[31, 35-37]。图 2a—2d 是 MC5 处理前后的 $J-T$ 曲线。CBD 处理前 (图 2a) 的样品 (样品质量 330 mg) 加热到 120 °C 后磁化强度稍有增加, 一般认为是针铁矿转化成磁赤铁矿的特征^[6], 300~450 °C 之间, 磁化强度随温度升高快速下降, 在曲线上形成谷, 通常认为这是由热不稳定的强磁性矿物

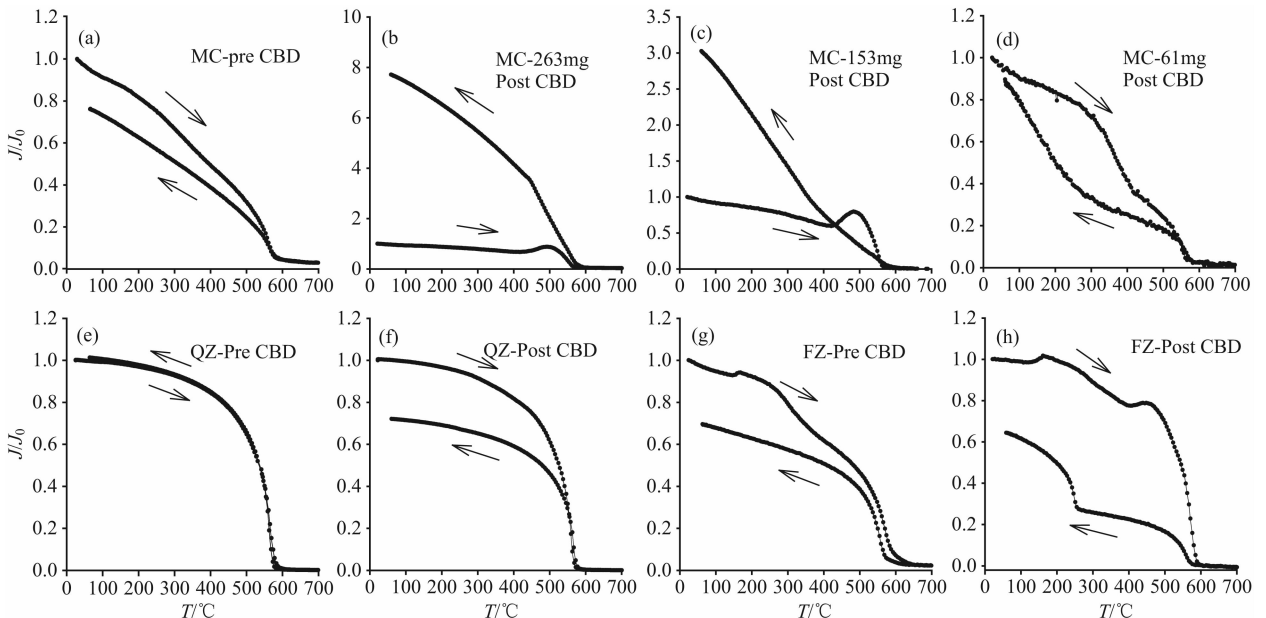


图 2 典型样品 CBD 处理前后的热磁曲线

Fig. 2 The $J-T$ curves of typical samples before and after CBD treatment

磁赤铁矿转化为热稳定的弱磁性矿物赤铁矿所致^[38]. 磁化强度在580 °C基本下降到零,指示了磁铁矿的存在. 冷却曲线位于加热曲线下方,可能是由于磁赤铁矿转变成赤铁矿而失去了部分磁化强度. 图2b—2d为CBD处理后样品的 $J-T$ 曲线,由于CBD处理后样品中或多或少地残留了柠檬酸钠(有机酸盐),增加了样品的有机质含量,考虑到氧化还原环境对热磁鉴定的影响,对CBD处理后的样品进行三次测量,使用的样品量分别为263、153、61 mg. 样品质量的减少有利于样品更充分地与空气接触. 结果表明使用不同样品量所测得的热磁曲线存在很大差异,主要体现在1)冷却曲线与加热曲线的相对位置,2)510 °C前后的峰(图2b—2d). 就形态而言,CBD处理前后的 $J-T$ 加热曲线并不存在很大的差异. 热磁分析表明CBD处理后样品中残留的磁性矿物并非仅仅是磁铁矿.

QZ样品CBD处理前后的热磁曲线如图2e、2f所示;CBD处理前的 $J-T$ 曲线中的加热与冷却曲线基本可逆,并显示580 °C的居里点(图2e). 结合 $\chi_{fd}\%$ (0.99%)、 χ_{ARM}/χ_{if} (0.21)及样品类型,可以确定该样品所含磁性矿物几乎为多畴磁铁矿. CBD处理后的冷却曲线位于加热曲线下方,磁化强度减少了28%(图2f),可能是CBD处理将部分多畴磁铁矿颗粒溶解至更细的粒级,这些细粒磁铁矿粒径足够小以至于在加热过程中被氧化成赤铁矿.

FZ样品CBD处理前后的加热曲线在形态上也存在差异(图2g、2h). 处理前样品的加热曲线形态与典型弱发育黄土非常相似,皆有针铁矿、热不稳定磁赤铁矿存在,不同之处在于FZ样品的居里点稍高于580 °C,可能指示一种相对热稳定的磁赤铁矿的存在^[39]. CBD处理后的加热曲线上120 °C附近磁化强度增大,可能暗示了CBD方法未能完全去除针铁矿;居里点约为600 °C,稍高于磁铁矿的居里点580 °C. 冷却曲线出现了两个明显的居里点,580 °C和265 °C,意味着样品经过高温后生成了新的磁性矿物,可能为铁的硫化物,其生成可能是连二亚硫酸钠残留于样品中所致,然而其他样品并没有出现这种情况,具体原因需要进一步研究.

4 讨论

4.1 CBD方法对强磁性矿物的影响

中国黄土高原古土壤磁化率增强是因为成土过程形成了磁铁矿和磁赤铁矿,但是究竟是哪一种或

者还是两者兼有? 由于这两矿物晶体结构相似,在实验室中很难将两者区分开来. CBD方法应用于黄土研究试图解决这一问题,然而CBD能否选择性地溶解磁赤铁矿而几乎不触及磁铁矿却存在着争议.

先前的许多研究认为CBD更易于溶解磁赤铁矿,而只溶解细小颗粒的磁铁矿,然而本文的实验结果并不支持这一看法. 从热磁加热曲线上可以观察到CBD处理后的MC、TS样品的磁化强度在300~450 °C均有明显下降,下降的幅度甚至大于CBD处理前的样品,这表明磁赤铁矿的存在. 前人的研究中并没有观察到这一现象,可能与热磁测量的氧化还原环境有关. Sun等^[17]对西宁、西峰和佳县的黄土古土壤样品进行了CBD研究,使用卡帕桥测量磁化率随温度变化曲线,发现所有经CBD处理后样品在400~510 °C均出现一个峰值,并认为可能是由于CBD过程改变了磁铁矿的结构或溶解了磁铁矿颗粒的外层而使得Hopkinson效应更为明显. 本研究的 $J-T$ 曲线上也存在这一现象,磁化强度与磁性矿物的颗粒度无关^[4、6],因此400~500 °C的峰值难以用Hopkinson效应来解释,说明加热过程中生成了新的磁性矿物. 当测量的样品量减少时,冷却时生成的磁性矿物相对减少,样品量为61 mg时,冷却曲线位于加热曲线下方,表明没有新的强磁性矿物生成. CBD处理方法所使用的柠檬酸钠是一种有机盐,或多或少地残留于样品中而增加了样品的有机质含量. 一定量的有机质存在对热磁测量造成影响^[40-42],有机质在加热过程中燃烧消耗空气中的氧气,形成了局部的还原环境使得三价铁转变为二价铁. Hanesch等^[40]发现在有机质存在的情况下,赤铁矿在400 °C以上开始转化为磁铁矿. 因此我们认为有机质含量太高时,强磁性的生成掩盖了磁赤铁矿的信号. 通过减少样品量可以让样品更充分地接触空气,这种更为氧化的环境减少了三价铁转变为二价铁的可能性. 通过这种方法,我们观察到CBD处理后的样品加热曲线上仍存在300~450 °C的谷,这是磁赤铁矿转化成赤铁矿的特征. 理论上,这种转变会使样品失去部分磁化强度,然而冷却后的磁化强度与加热前相当. 我们对该样品进行加热到450 °C的热磁实验,发现冷却后样品失去了一部分磁化强度(图3),表明CBD处理未能完全去除磁赤铁矿. 至于700 °C的加热冷却循环磁化强度基本没有变化可能是由于在更高的温度(450 °C以上)生成了另一种强磁性的铁硫化物(样品中残留连二亚硫酸钠).

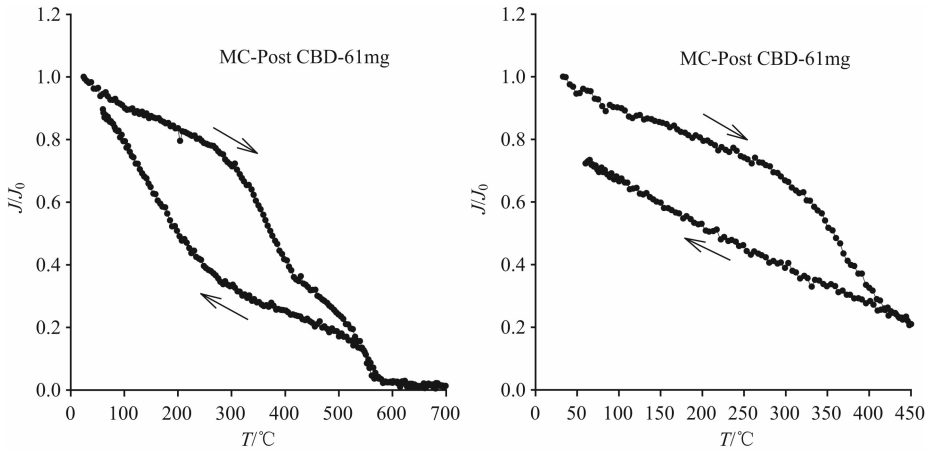


图 3 MC 样品 CBD 处理后的热磁曲线

Fig. 3 The J - T curves of MC sample after CBD treatment

Liu 等^[22]曾将加热至 700 °C 与未加热的洛川黄土古土壤进行 CBD 处理,发现处理后的样品饱和磁化强度分别减少了 74% 和 75%。加热过的样品中的磁赤铁矿已经转化为赤铁矿,而其 CBD 处理磁化强度减少程度几乎与未加热的样品一样,表明 CBD 方法对磁铁矿有很强溶解作用。亚热带土壤(FZ 样品)在高温高湿的条件下经历了更强的风化作用形成了更加热稳定的磁赤铁矿,CBD 处理后居里点约为 600 °C,高于磁铁矿居里点,暗示 CBD 方法不能完全去除亚热带红壤中的磁赤铁矿,为上述分析提供了佐证。Goulart 等^[43]关于巴西暗红色氧化土的 CBD 研究结果也表明 CBD 方法优先去除赤铁矿,而使磁赤铁矿和钛铁矿物相对富集。以上的分析说明 CBD 方法并非选择性地溶解磁赤铁矿,CBD 处理后磁化率下降是由于磁铁矿和磁赤铁矿溶解共同引起的。即便土壤磁化率增强主要由磁赤铁矿贡献,CBD 方法的结果也不能作为支持这一观点的证据。

4.2 CBD 对不同颗粒度磁性矿物的影响

CBD 方法是否选择性溶解细粒($< 1 \mu\text{m}$)磁性矿物而几乎不溶解粗粒($> 1 \mu\text{m}$)磁性矿物是 CBD 技术引入黄土磁学以来存在的另一个争议。CBD 方法可以有效去除细粒磁性颗粒基本上已经达成共识,争议的焦点在于 CBD 对粗粒磁性矿物的影响程度。QZ 样品主要含有多畴磁铁矿,经过 CBD 处理后的热磁曲线形态不同于处理前,表现为加热后失去了部分磁化强度,而 CBD 处理前的样品加热曲线与冷却曲线基本可逆。如果 CBD 处理对于粗颗粒磁铁矿没有影响,那么 CBD 处理前后的热磁曲线形态应该没有差别。我们认为 CBD 溶解了粗颗粒磁铁矿外层使得粒径变小,部分磁颗粒已经足够小以至于

在氧化环境中加热转化成赤铁矿而失去了磁化强度。

$\chi_{\text{fd}}\%$ 和 χ_{ARM} 是用来指示细颗粒磁性矿物含量的指标,风成样品 MC, TS, KR 的 $\chi_{\text{fd}}\%$ 和 χ_{ARM} 均减小,表明 CBD 方法可以非常有效地溶解细粒磁性矿物。然而百分比频率磁化率并未下降到零,说明 CBD 处理后的样品可能依然存在着 20~25 nm 的磁性矿物颗粒;MC 剖面的 χ_{ARM} 减少的百分比与成土作用成正比,最发育的古土壤 χ_{ARM} 减少了 98.18%,最不发育的黄土 χ_{ARM} 仅减少了 65.7%。TS 剖面与 KR 剖面的 χ_{ARM} 分别减少了 54.56% 和 49.92%(平均值)。 χ_{ARM} 对稳定单畴的磁铁矿最为敏感,如果 CBD 方法只溶解 $< 1 \mu\text{m}$ 的磁颗粒,那么黄土和古土壤 χ_{ARM} 减少的比率应该是相等的。实验数据表明对于风成样品而言,粗颗粒相对含量越高的样品其 χ_{ARM} 减少的百分比越少,那么似乎也就只有一种解释可以说明这个问题,即 CBD 溶解了粗粒磁性矿物的外缘,使其粒径变小到单畴甚至超顺磁范围。强发育的古土壤样品中小于 $1 \mu\text{m}$ 的磁性颗粒占主导地位,细小的磁颗粒被完全溶解而失去了几乎所有的 χ_{ARM} 。Liu 等^[22]用不同粒度的人工合成磁铁矿进行了 CBD 实验,所有溶出液中均含有亚铁离子,且溶出量与磁铁矿的粒度成反比,证明了 CBD 可以溶解 355~500 μm 的磁铁矿。事实上,同一种磁性矿物粗细颗粒组分晶体结构并没有差别。CBD 处理粗颗粒与细颗粒组分同时参加反应,由于细粒组分具有更大的比表面积而更易于溶解,粗粒组分经过多次 CBD 处理也可以被完全溶解。

4.3 CBD 处理后磁化率变化分析

磁化率是环境磁学研究中最常用的指标,尤其

是在黄土古气候方面. 磁化率大小与颗粒度并不是简单的线性关系, $0.03 \mu\text{m}$ 以下的超顺磁(SP)颗粒具有最高的磁化率, $10 \mu\text{m}$ 以上的多畴(MD)颗粒次之, 介于两者之间的稳定单畴(SSD)和假单畴(PSD)磁化率最小, 在曲线上呈不对称“V”形, 相同质量的 SP 颗粒的磁化率是 SD 颗粒的 3~4 倍^[32]. 本节在 4.2 节的基础上讨论 CBD 处理后磁化率变化问题. 多畴磁铁矿颗粒经过 CBD 处理, 处理后的磁化率值取决于其被溶解至何粒级范围, 如果被完全溶解则磁化率为零, 而如果只是溶解了颗粒外缘, 那么磁化率的变化则显得比较复杂. 天然样品中磁性矿物颗粒分布较宽, 比如古土壤中含有 SP, SD, 以及少量的 MD 颗粒. 前人的研究^[15]已经证明 CBD 可以非常有效地去除 $< 1 \mu\text{m}$ 的磁性颗粒, 这部分磁性矿物被完全溶解后对磁化率不再有贡献; 粗颗粒被溶解为更细的磁性颗粒后磁化率变化非常复杂, 需要考虑其初始粒度和溶解程度. CBD 处理前后的磁化率的变化是不同粒级磁颗粒变化的综合体现. 当样品中细粒颗粒占主导时, 磁化率会有很大程度的下降; 而粗颗粒占主导时, 一方面由于溶解量更少, 另一方面残留的磁颗粒对磁化率仍有贡献, 磁化率只有较小程度的下降甚至可能上升.

本文中的 MC 剖面磁化率平均下降了 79.3%, KR 剖面下降了 21.71%, TS 剖面下降了 10.13%, QZ 样品没有下降反而上升了 6.43%. 样品经 CBD 处理后磁化率上升的情况在前人的研究中也曾出现. Hunt 等^[15]对 $55 \mu\text{m}$ 和 $14 \mu\text{m}$ 的磁铁矿进行一次或两次的 CBD 处理后的磁化率均有稍微上升, 说明 MD 颗粒经过 CBD 处理之后可能有一部分被溶解至 SP 颗粒. MC、KR、TS、QZ 样品的磁性矿物粒度依次增大, CBD 处理之后的磁化率减少百分比依次减少, 说明磁化率的相对减少量与磁颗粒度之间存在负相关关系, 实验结果符合理论上的分析.

4.4 CBD 方法分离原生和次生磁组分的可行性和局限性

CBD 方法可以用来区分黄土古土壤中岩石成因(原生)和成土成因(次生)磁性矿物的前提条件是 CBD 方法非常有效地去除细粒磁性矿物, 而对粗粒磁矿物基本没有影响. 邓成龙等^[19]的陕西交道黑垆土 CBD 研究结果表明 CBD 方法溶解了一部分岩石成因的磁性矿物, Vidic 等^[44]运用了数学分析方法与 CBD 结果对比, 认为 CBD 方法高估了次生磁性矿物的含量.

本文的研究表明, CBD 可以将粗粒磁性矿物溶

解到更小的粒级, 因此 CBD 在区分原生与次生磁化率信号的应用上存在着局限性. 黄土高原强发育的古土壤中细粒磁颗粒占主导地位, CBD 方法可以较为准确地估算次生磁化率, 成土强度越强则估算值越准确. 对于风化程度弱的黄土样品, CBD 方法则不适于估算次生磁性矿物的含量, 因为黄土形成于冰期, 较强的风力或较近的源区使得黄土中含有更多的 MD 磁铁矿, MD 磁铁矿经 CBD 处理后的磁化率变化复杂, 对整体磁化率变化影响较大. 先前的研究认为 CBD 处理后只余留下多畴的磁铁矿, 我们的研究不支持这种观点, 至少还有少量的磁赤铁矿和高矫顽力磁性矿物残留. 磁赤铁矿和针铁矿显然不是干旱源区的主要磁性矿物. 虽然 CBD 处理后的黄土古土壤样品的磁化率为 $(10 \sim 20) \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, 这与通过频率磁化率计算得出的背景磁化率值较为接近^[45-46], 但是如果将 CBD 处理后的磁化率作为代表风力和源区信息的指标来进行古气候重建则存在着较大的误差. 原因至少有如下三点: 1) CBD 方法使 MD 颗粒轻微溶解影响磁化率值; 2) 粉尘沉积后经历的后期作用改变了原生磁性矿物的特征, 如低温氧化甚至溶解; 3) 沉积后的碳酸盐淋溶与淀积作用改变了黄土层与古土壤层磁性矿物的百分含量. 后期的成土作用使磁铁矿低温氧化, 在颗粒的表面形成磁赤铁矿^[47], 在高湿度的环境下磁性矿物将被溶解^[30], CBD 方法无法恢复这些被改造或被破坏的信息. 即使不考虑后期作用对原生磁性矿物的影响, 碳酸盐淋溶与淀积作用也会对 CBD 处理后的磁化率能否反映原生信息造成干扰. 在中国黄土高原, 古土壤的碳酸盐含量低于黄土, 相当于富集了磁性矿物, 这也是古土壤磁化率增强原因之一. 如果将古土壤 CBD 处理后的磁化率视为原生磁性矿物的磁化率, 实际上因碳酸盐淋溶向下迁移而被夸大了.

目前黄土高原以外的风成沉积的 CBD 研究较少. 本研究发现, 川西高原 MC 剖面的 CBD 结果与黄土高原非常类似, 说明二者在磁化率增强机制、磁性颗粒分布上可以划归为一个类型. 天山黄土和西伯利亚黄土代表另外两种不同环境下的风成沉积, 天山地区位于亚洲大陆中心, 干旱程度高于黄土高原, 其磁化率增强可能主要是由于沉积前风力增强或源区扩大引起的. 西伯利亚则是湿润地区(降水量大于蒸发量), 磁化率增强受“风速论”与还原成土模式共同控制^[29-30], 何者为主导尚不清楚. CBD 处理之后的天山黄土样品磁化率平均减少了 10.13%, 但是未经 CBD 处理的样品加热到 $700 \text{ }^\circ\text{C}$ 后再冷却

到室温磁化强度减少了 20% 以上, 说明热不稳定强磁矿物的含量至少在 20% 以上. 这一数值高于 CBD 处理后磁化率减少百分比, 更进一步说明以粗粒磁性矿物占主导的近源黄土不适于使用 CBD 方法提取次生磁性矿物信息. 西伯利亚黄土的 CBD 结果同样说明了磁化率的变化与磁性矿物的颗粒分布有关, 其磁化率受控于风力变化和还原环境的程度, 使得情况更为复杂. 已有的研究证明西伯利亚古土壤层中的原生强磁性矿物被还原为弱磁性矿物, 成土作用导致磁化率降低^[30]. 说明不可能利用 CBD 方法研究西伯利亚原生与次生磁性矿物的相对含量, 因为 CBD 方法不能恢复被破坏了的原生磁性矿物信息.

通过上述分析, 我们认为运用 CBD 方法分离原生和次生磁组分具有一定的可行性, 但也存在着局限性. 类似黄土高原氧化环境下的强发育古土壤可以应用该方法来估算次生磁性矿物含量; 对于细颗粒磁性矿物不占主导的样品, 使用该方法得到的结果误差较大; 而对于还原条件下的剖面, CBD 方法不能用来区分原生与次生磁信号.

5 结 论

通过分析上述样品 CBD 处理前后的磁学参数变化, 我们得出了以下几点结论:

(1) CBD 方法并不能选择性溶解磁赤铁矿.

(2) CBD 处理同时作用于粗颗粒与细颗粒磁性矿物, 但由于细颗粒磁性矿物具有更大的比表面积, 先于粗颗粒被溶解. 粗颗粒磁性矿物经 CBD 处理后, 粒径变小.

(3) CBD 处理后的磁化率是各粒级磁性矿物变化的综合体现, 存在多种可能.

(4) 运用 CBD 方法分离风成沉积中的原生和次生磁组分具有一定的可行性, 但也存在着局限性. 对于成土作用较强的古土壤, CBD 方法可以较为准确地提取成土成因的磁性信息. 干旱和过度湿润条件下的风积黄土, 不宜使用 CBD 方法区分原生与次生磁性矿物.

致 谢 感谢两位匿名审稿人对本文提出了宝贵的意见.

参考文献 (References)

[1] 刘东生. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985: 1-251.

Liu T S. Loess and the Environment (in Chinese). Beijing,

Science Press, 1985: 1-251.

[2] Heller F, Evans M E. Loess magnetism. *Rev. Geophys.*, 1995, 33(2): 211-240.

[3] Evans M E, Heller F. Magnetism of loess/palaeosol sequences: Recent developments. *Earth-Sci. Rev.*, 2001, 54(1-3): 129-144.

[4] Liu Q S, Deng C L, Torrent J, et al. Review of recent developments of mineral magnetism of the Chinese loess. *Quat. Sci. Rev.*, 2007, 26(3-4): 368-385.

[5] Tang Y J, Jia J Y, Xie X D, et al. Records of magnetic properties in Quaternary loess and its paleoclimatic significance: A brief review. *Quat. Int.*, 2003, 108(1): 33-50.

[6] 邓成龙, 刘青松, 潘永信等. 中国黄土环境磁学. 第四纪研究, 2007, 27(2): 193-209.

Deng C L, Liu Q S, Pan Y X, et al. Environmental magnetism of Chinese loess-paleosol sequences. *Quaternary Sci.* (in Chinese), 2007, 27(2): 193-209.

[7] Heller F, Chen C D, Beer J, et al. Quantitative estimates of pedogenic ferromagnetic mineral formation in Chinese loess and palaeoclimatic implications. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1993, 114(2-3): 385-390.

[8] Maher B A, Thompson R, Zhou L P. Spatial and temporal reconstructions of changes in the Asian palaeomonsoon—a new mineral magnetic approach. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1990, 125(1-4): 461-471.

[9] Liu X M, Rolph T, Bloemendal J, et al. Quantitative estimates of palaeoprecipitation at Xifeng in the loess plateau of China. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 1995, 113(2-4): 243-248.

[10] 刘青松, 邓成龙. 磁化率及其环境意义. 地球物理学报, 2009, 52(4): 1041-1048.

Liu Q S, Deng C L. Magnetic susceptibility and its environmental significances. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(4): 1041-1048.

[11] Xie Q Q, Chen T H, Xu H F, et al. Quantification of the contribution of pedogenic magnetic minerals to magnetic susceptibility of loess and paleosols on Chinese Loess Plateau: Paleoclimatic implications. *J. Geophys. Res.*, 2009, 114: B09101, doi: 10.1029/2008JB005968.

[12] Liu Q S, Torrent J, Morras H, et al. Superparamagnetism of two modern soils from the northeastern Pampean region, Argentina and its paleoclimatic indications. *Geophys. J. Int.*, 2010, 183(2): 695-705.

[13] Verosub K L, Fine P, Singer M J, et al. Pedogenesis and paleoclimate: interpretation of the magnetic susceptibility record of Chinese Loess-paleosol sequences. *Geology*, 1993, 21(11): 1011-1014.

[14] Fine P, Singer M J, Verosub K L, et al. New evidence for the origin of ferrimagnetic minerals in loess from China. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, 57(6): 1537-1542.

[15] Hunt C P, Singer M J, Kletetschka G, et al. Effect of citrate-

- bicarbonate-dithionite treatment on fine-grained magnetite and maghemite. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1995, 130(1-4): 87-94.
- [16] Singer M J, Bowen L H, Verosub K L, et al. Mössbauer spectroscopic evidence for citrate-bicarbonate-dithionite extraction of maghemite from soils. *Clays Clay Miner.*, 1995, 43(1): 1-7.
- [17] Sun W W, Banerjee S K, Hunt C P. The role of maghemite in the enhancement of magnetic signal in the Chinese loess paleosol sequence: an extensive rock magnetic study combined with citrate bicarbonate dithionite treatment. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1995, 133(3-4): 493-505.
- [18] Deng C L, Vidic N J, Verosub K L, et al. Mineral magnetic variation of the Jiaodao Chinese loess/paleosol sequence and its bearing on long-term climatic variability. *J. Geophys. Res.*, 2005, 110: B03103, doi: 10.1029/2004JB003451.
- [19] 邓成龙, 袁宝印, 朱日祥等. 陕西交道全新世黄土-黑垆土磁化率的 CBD 研究. *地球物理学报*, 2000, 43(4): 505-514.
Deng C L, Yuan B Y, Zhu R X, et al. Magnetic susceptibility of Holocene loess-black loam sequence from Jiaodao, Shaanxi before and after citrate-bicarbonate-dithionite extraction. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2000, 43(4): 505-514.
- [20] Maher B A, Thompson R, Liu X M, et al. Pedogenesis and paleoclimate: interpretation of the magnetic susceptibility record of Chinese Loess-paleosol sequences: comments. *Geology*, 1994, 22: 857-859.
- [21] Van Oorschot I H M, Dekkers M J. Dissolution behaviour of fine-grained magnetite and maghemite in the citrate-bicarbonate-dithionite extraction method. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1999, 167(3-4): 283-295.
- [22] Liu X M, Rolph T, Bloemendal J. The Citrate-Bicarbonate-Dithionite (CBD) removable magnetic component of Chinese loess. *Quat. Proc.*, 1995, (4): 53-58.
- [23] Mehra O P, Jackson M L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays Clay Miner.*, 1960, 7(1): 317-327.
- [24] Singer M J, Fine P. Pedogenic factors affecting magnetic susceptibility of Northern California soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1989, 53(4): 1119-1127.
- [25] 乔彦松, 赵志中, 王燕等. 川西甘孜黄土-古土壤序列的地球化学演化特征及其古气候意义. *科学通报*, 2010, 55(3): 255-260.
Qiao Y S, Zhao Z Z, Wang Y, et al. Variations of geochemical compositions and the paleoclimatic significance of loess-soil sequence from Ganzi County of western Sichuan Province, China. *Chin. Sci. Bull.*, 2009, 54: 4697-4703.
- [26] 方小敏, 史正涛, 杨胜利等. 天山黄土和古尔班通古特沙漠发育及北疆干旱化. *科学通报*, 2002, 47(7): 540-545.
Fang X M, Shi Z T, Yang S L, et al. Loess in the Tianshan and its implications for the development of the Gurbantunggut Desert and drying of northern Xinjiang. *Chin. Sci. Bull.*, 2002, 47(16): 1381-1387.
- [27] 宋友桂, 史正涛, 方小敏等. 伊犁黄土的磁学性质及其与黄土高原对比. *中国科学*, 2010, 40(1): 61-72.
Song Y G, Shi Z T, Fang X M, et al. Loess magnetic properties in the Ili Basin and their correlation with the Chinese Loess Plateau. *Sci. China Earth. Sci.*, 2010, 53(3): 419-431.
- [28] 郭雪莲, 刘秀铭, 吕镔等. 天山黄土区与黄土高原表土磁性特征对比及环境意义. *地球物理学报*, 2011, 54(7): 1854-1862.
Guo X L, Liu X M, Lü B, et al. Comparison of topsoil magnetic properties between the loess region in Tianshan Mountains and Loess Plateau, China, and its environmental significance. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(7): 1854-1862.
- [29] 朱日祥, Kazansky A, Matasova G 等. 西伯利亚南部黄土沉积物的磁学性质. *科学通报*, 2000, 45(11): 1200-1205.
Zhu R X, Kazansky A, Matasova G, et al. Rock-magnetic investigation of Siberia loess and its implication. *Chin. Sci. Bull.*, 2000, 45(23): 2192-2198.
- [30] 刘秀铭, 刘东生, 夏敦胜等. 中国与西伯利亚黄土磁化率古气候记录——氧化和还原条件下的两种成土模式分析. *中国科学 D 辑 (地球科学)*, 2007, 37(10): 1382-1391.
Liu X M, Liu T S, Xia D S, et al. Two pedogenic models for paleoclimatic records of magnetic susceptibility from Chinese and Siberian loess. *Sci. China Earth Sci.*, 2008, 51(2): 284-293.
- [31] Thompson R, Oldfield F. *Environmental Magnetism*. London: Allen and Unwin, 1986: 1-166.
- [32] Maher B A. Magnetic properties of some synthetic sub-micron magnetites. *Geophys. J. Int.*, 1988, 94(1): 83-96.
- [33] Liu Q S, Jackson M J, Banerjee S K, et al. Mechanism of magnetic susceptibility enhancements of the Chinese loess. *J. Geophys. Res.*, 2004, 109(B12): B12107, doi: 10.1029/2004JB003249.
- [34] Dearing J. Magnetic susceptibility. // Walden J, Oldfield F, Smith J P eds. *Environmental Magnetism: A Practical Guide, Technical Guide*. London: Quaternary Research Association, 1999: 35-62.
- [35] Deng C L, Zhu R X, Jackson M J, et al. Variability of the temperature-dependent susceptibility of the Holocene eolian deposits in the Chinese Loess Plateau: A pedogenesis indicator. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, 26(11-12): 873-878.
- [36] 敖红, 邓成龙. 磁性矿物的磁学鉴别方法回顾. *地球物理学进展*, 2007, 22(2): 432-442.
Ao H, Deng C L. Review in the identification of magnetic minerals. *Prog. Geophys.* (in Chinese), 2007, 22(2): 432-442.
- [37] 田莉丽, 邓成龙. 岩石的磁学性质. *地球物理学进展*, 2001, 16(2): 109-117.
Tian L L, Deng C L. A brief introduction to rock magnetism. *Prog. Geophys.* (in Chinese), 2001, 16(2):

- 109-117.
- [38] Liu X M, Hesse P, Rolph T. Origin of maghemite in Chinese loess deposits; Aeolian or pedogenic? *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1999, 112(3-4): 191-201.
- [39] 刘秀铭, Shaw J, 蒋建中等. 磁赤铁矿的几种类型与特点分析. 中国科学 D 辑, 2010, 40(5): 592-602.
Liu X M, Shaw J, Jiang J Z, et al. Analysis on variety and characteristics of maghemite. *Sci. China. Earth. Sci.*, 2010, 53(8): 1153-1162.
- [40] Hanesch M H, Petersen S N. Thermomagnetic measurements of soil iron minerals; the role of organic carbon. *Geophys. J. Int.*, 2006, 165(1): 53-61.
- [41] Zhang C X, Liu Q S, Huang B C, et al. Magnetic enhancement upon heating of environmentally polluted samples containing hematite and iron. *Geophys. J. Int.*, 2010, 181(3): 1381-1394.
- [42] 吴文芳, 李金华, 张春霞等. 有机质对纳米级磁铁矿热稳定性的影响. 地球物理学报, 2010, 53(10): 2427-2434.
Wu W F, Li J H, Zhang C X, et al. Effects of organic matter on thermal stability of nanometer-sized magnetite. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(10): 2427-2434.
- [43] Goulart A T, Fabris J D, Fesus M F, et al. Iron oxides in a soil developed from basalt. *Clays Clay Miner.*, 1998, 46(4): 369-378.
- [44] Vidic N J, TenPas J D, Verosub K L, et al. Separation of pedogenic and lithogenic components of magnetic susceptibility in the Chinese loess/palaeosol sequence as determined by the CBD procedure and a mixing analysis. *Geophys. J. Int.*, 2000, 142(2): 551-562.
- [45] 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. Geophys. Res.*, 2004, 109(B3): B03101, doi: 10.1029/2003JB002747.
- [46] 王喜生, 杨振宇, Reidar L 等. 黄土高原东南缘黄土-古土壤序列的环境磁学结果及其古气候意义. 科学通报, 2006, 51(13): 1575-1582.
Wang X S, Yang Z Y, Reidar L, et al. Environmental magnetism and paleoclimatic interpretation of the Sanmenxia loess-paleosol sequence in the southeastern extremity of the Chinese Loess Plateau. *Chin. Sci. Bull.*, 2006, 51(22): 2755-2762.
- [47] 刘青松, Banerjee S K, Jackson M J 等. 低温氧化作用对中国黄土记录剩磁的影响. 科学通报, 2003, 48(2): 193-198.
Liu Q S, Banerjee S K, Jackson M J, et al. Effects of low-temperature oxidation on natural remanent magnetization of Chinese loess. *Chin. Sci. Bull.*, 2002, 47(24): 2100-2105.

(本文编辑 何 燕)