

西伯利亚南部黄土沉积物的磁学性质

朱日祥^① A. Kazansky^② G. Matasova^② 郭斌^① V. Zykina^②
E. Petrovsky^③ N. Jordanova^③

①中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100101; ②俄罗斯科学院西伯利亚分院地质研究所, 俄罗斯, 新西伯利亚;
③捷克科学院地球物理研究所, 捷克, 布拉格. Email: rxzhu@mail.c-geos.ac.cn

摘要 对西伯利亚南部 Kurtak 剖面末次间冰期以来黄土-古土壤序列进行了较为详细的岩石磁学研究, 实验结果表明该剖面磁化率变化特征与阿拉斯加风成沉积物相同, 与中国黄土完全相反. Kurtak 剖面黄土和古土壤的频率磁化率值基本一致, 这表明其成土作用较弱. 磁化率随温度的变化特征以及等温剩磁测定结果揭示出黄土和古土壤的磁性矿物都是以磁铁矿为主, 只含有极少的磁赤铁矿和赤铁矿. 磁化率各向异性研究表明, Kurtak 地区黄土沉积时的古风向是变化的.

关键词 西伯利亚 黄土 岩石磁学 古气候

对中国黄土的研究引起极大关注, 特别是由于中国黄土-古土壤序列的磁化率与海洋沉积物氧同位素的变化存在相关性, 因此磁化率被广泛用作过去全球和区域环境变化的指标^[1-4]. 相比之下, 目前对其他地区的黄土沉积物(如西伯利亚、阿拉斯加和捷克等)还缺乏深入的研究. 基于已有的研究结果^[5-8], 本文对西伯利亚南部 Kurtak (55.1°N, 91.4°E)剖面末次间冰期以来黄土-古土壤序列进行较为详细的岩石磁学研究, 通过与中国和阿拉斯加风成沉积物进行对比, 讨论 Kurtak 地区黄土的沉积环境和区域气候变化特征.

1 地质简述与样品采集

原生和次生黄土覆盖着西伯利亚南部北纬 50°~59° 和东经 65°~97° 约 700 000 km² 的范围(图 1), 大部分地区黄土沉积厚度可达 100 m 左右^[9-11]. 由于晚上新世至早更新世西伯利亚南部构造抬升的影响, 沿鄂毕河谷和叶尼塞河谷的黄土与河流冲积物交替沉积. 本文主要对末次间冰期以来的黄土-古土壤序列进行研究, 在 Kurtak 剖面这一时段的沉积物由黄土层 LE1 和 LE2 以及古土壤层 SO1 和 SO2 组成(图 2(a)). 古土壤层 SO1 是由 5 层弱发育的腐殖层和黄土层构成, 其中腐殖层含有次生碳, 说明其形成时的气候条件可能是草原和半干旱环境; 而古土壤层 SO2 则由 3 层相对发育较好的腐殖层和黄土层构成, 这表明 SO2 中腐殖层形成时的气候环境可能相对温暖和潮湿. ¹⁴C 和热释光测年表明, SO1 和 SO2 分别是在 20~35 和 70~130 ka 之间形成的^[9,12]. Kurtak 剖面的古土壤层 SO1 和 SO2 分别对应于中国黄土-古土壤层 L1SS1 和 S1, 黄土层 LE1

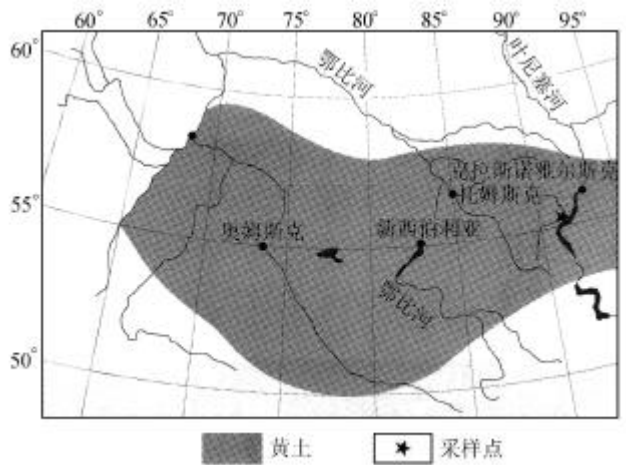


图 1 西伯利亚南部地理简图和采样位置

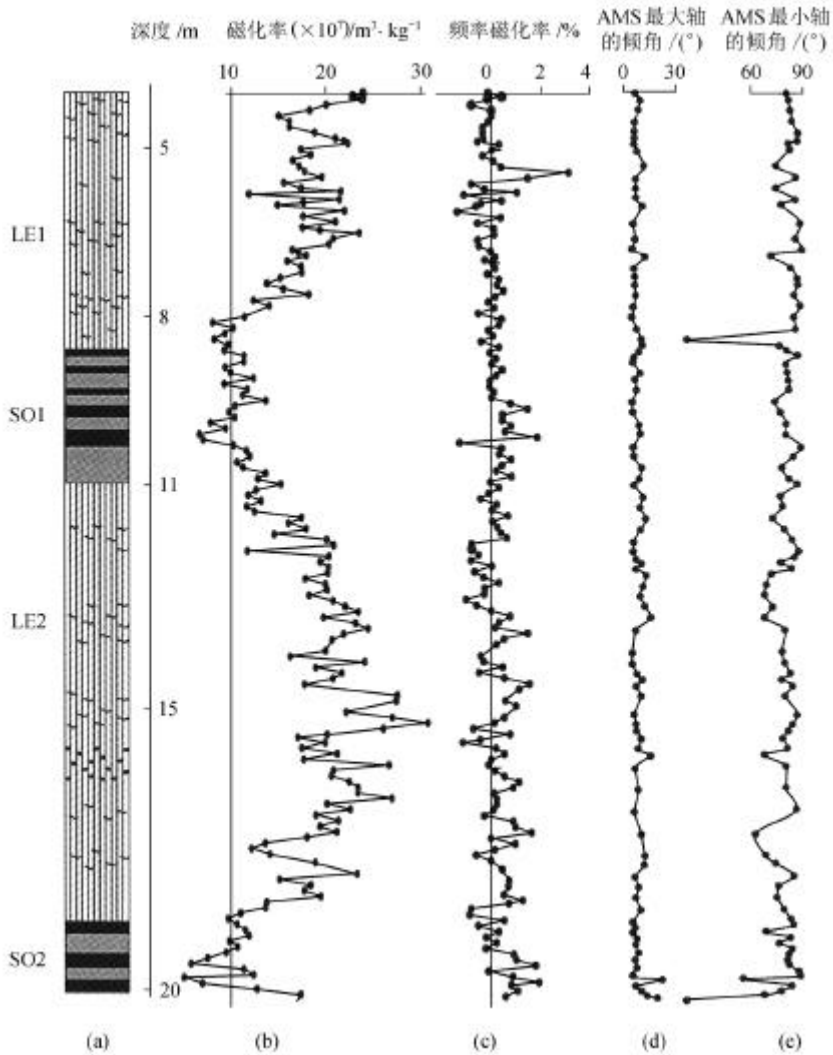


图 2 西伯利亚南部 Kurtak 剖面岩石磁学参数随深度的变化

和 LE2 分别对应于中国黄土-古土壤层 L1L1 和 L1L2.

为了详细研究末次间冰期以来 Kurtak 剖面黄土-古土壤序列的磁学性质及其古气候意义, 我们首先清除了野外露头表面厚约 30 cm 的风化浮土, 然后从地表以下 4~20 m 连续采集 10 cm \times 10 cm \times 10 cm 大块定向古地磁标本. 在室内将大块标本先加工成截面积为 2 cm \times 2 cm, 垂直厚度为 10 cm 的两套定向岩芯, 然后再使用电锯加工成 2 cm \times 2 cm \times 2 cm 的古地磁定向样品, 以便对同一个地层面进行综合研究.

2 实验结果

所有的测量在中国科学院地球物理研究所古地磁实验室和捷克科学院地球物理研究所完成, 剩磁测量用 2G 超导岩石磁力仪完成, 整个实验在零磁空间中进行. 用英国产的 Bartington

MS-2 磁化率仪对所有样品的测量揭示出磁化率随深度的变化与沉积物是黄土还是古土壤密切相关, 即黄土层对应于磁化率高值, 而古土壤层对应于磁化率低值(图 2(b)). 腐殖层磁化率最低值和平均值分别为 5×10^{-7} 和 $10 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$, 黄土层磁化率最高值和平均值分别为 31×10^{-7} 和 $20 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$. 由此可见, Kurtak 地区的风成沉积物黄土-古土壤与中国黄土-古土壤磁化率的变化特征完全相反, 而与阿拉斯加黄土磁化率则有相同的变化特征^[7,8,13]. 该剖面的一个显著特点是黄土层的磁化率比中国和阿拉斯加黄土层的磁化率都要高, 目前我们还无法确定其原因. 另一方面, 黄土和古土壤层的频率磁化率值都接近于零(图 2(c)), 这可能表明即使在古土壤沉积时该地区的风化作用也很弱, 基本没有超顺磁颗粒形成, 这与中国黄土高原古土壤的磁学性质差别很大^[14,15].

磁化率各向异性(AMS)不仅可以监测沉积物是否发生倾斜或局部扰动, 而且可以提供颗粒沉积时受力的方向. 我们利用 KLY-3s Kappa 桥对 Kurtak 剖面的 AMS 进行了测量并用 Jelinek 方法计算了 AMS 张量^[16]. 通常用磁化率椭球体的三轴表示 AMS, 即最大轴 K_{\max} , 中间轴 K_{int} 和最小轴 K_{\min} . K_{\max}/K_{int} 和 K_{int}/K_{\min} 分别表示磁线理(L)和磁面理(F). Kurtak 剖面的磁线理小于磁面理, 这说明磁化率椭球体为压扁形的. Kurtak 剖面黄土和古土壤层磁化率椭球体最大轴 K_{\max} 的倾角很低, 基本没有变化(图 2(d)); 而绝大多数样品磁化率椭球体最小轴 K_{\min} 的倾角大于 75° (图 2(e)). 黄土层 LE1 和 LE2 磁化率椭球体最大轴 K_{\max} 的偏角显示了明显的优选性, 而古土壤层磁化率椭球体最大轴 K_{\max} 的方向则比较分散(图 3).

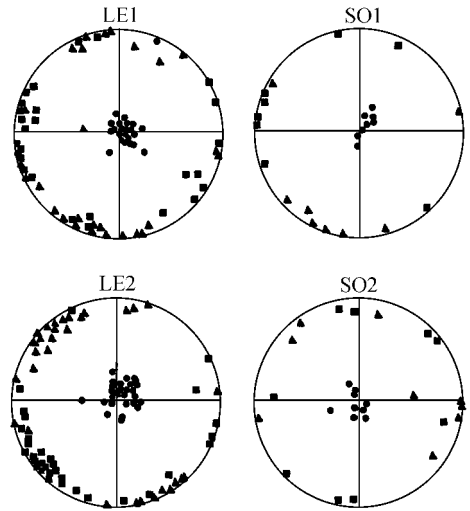


图3 Kurtak 剖面 AMS 轴的分布
方块、三角和圆圈分别表示 AMS 的最大、中间和最小轴方向

最大强度为 2.7 T 的连续可变强磁场(H)下获得的等温剩磁曲线表明, Kurtak 剖面黄土和古土壤在 400 mT 时即可获得饱和等温剩磁(SIRM)的 90% (图 4(a)). 黄土和古土壤 SIRM 的剩磁矫顽力分别为 45 和 60 mT(图 4(b)). 这些结果表明, 黄土和古土壤的主要载磁矿物为一些

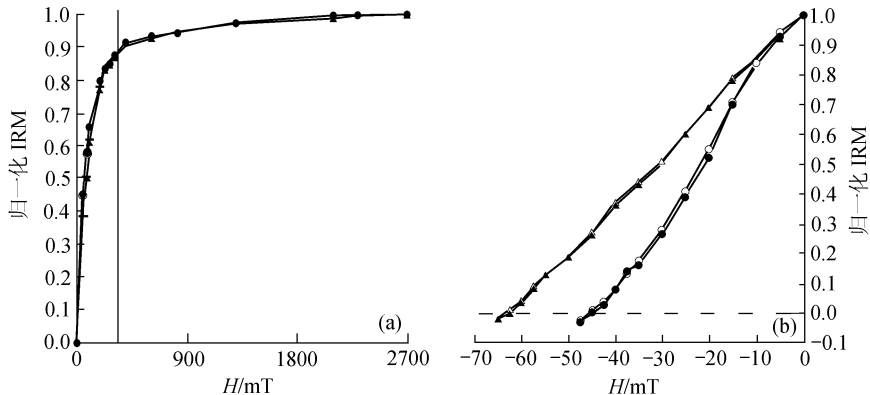


图4 SIRM 获得曲线(a)和 IRM 矫顽力谱曲线(b)
圆圈表示黄土, 三角表示古土壤

低矫顽力矿物, 如磁铁矿或磁赤铁矿. 相对于黄土而言, 古土壤可能含有较多的高矫顽力磁性矿物.

为了进一步确定 Kurtak 剖面黄土-古土壤的磁学性质, 利用 KLY-3s Kappa 桥的温度系统

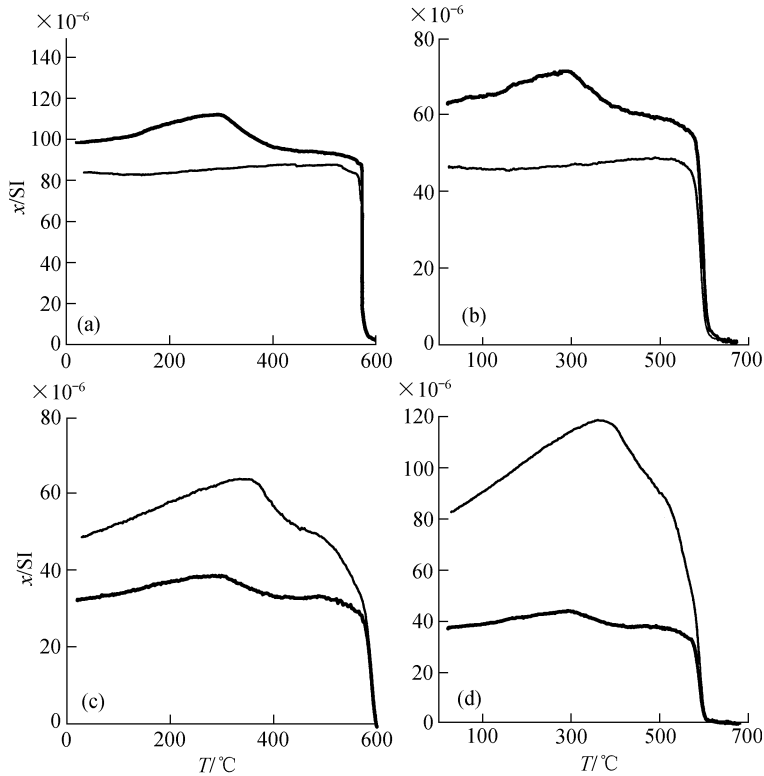


图 5 磁化率-温度曲线

(a)和(b)为黄土样品, (c)和(d)为古土壤样品. 粗(细)线表示加热(冷却)过程

测定了全岩的磁化率随温度变化特征(图 5). 黄土和古土壤磁化率在 580°C 显著下降表明其主要磁性矿物为磁铁矿; 在 300°C 左右磁化率出现的次级峰可能揭示了磁赤铁矿的存在, 并转变为 CD 形的磁铁矿. 值得注意的是, 加热到 600 或 700°C 后冷却过程中黄土的磁化率低于初始磁化率(图 5(a)和(b)), 而冷却过程中古土壤的磁化率却高于初始磁化率(图 5(c)和(d)). 这可能说明了一些磁赤铁矿甚至硅酸盐或粘土矿物转变为磁铁矿.

为了识别加热过程中磁性矿物的变化特征, 我们测定了 SIRM 二次热退磁谱. 由图 6 可见, 黄土和古土壤 SIRM 的热磁谱基本相同, 二者的剩磁强度在 200~350°C 之间都明显下降, 但在二次加热过程中这一现象就消失了, 这进一步说明了磁赤铁矿

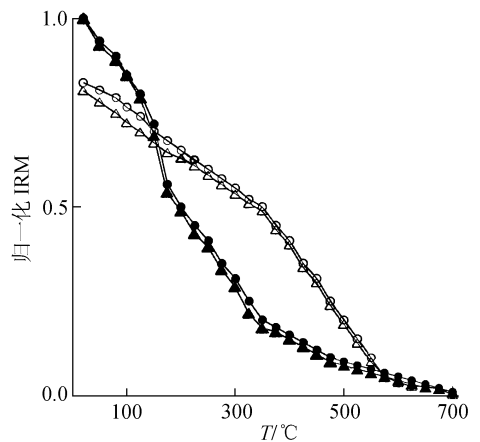


图 6 SIRM 的热磁谱

实圈(实三角)表示黄土(古土壤)第 1 次热处理, 空圈(空三角)表示黄土(古土壤)第 2 次热处理

的存在. 另外, 剩磁强度在 580°C 下降了 97%, 表明磁铁矿为主要剩磁载体, 或许还有极少的赤铁矿.

3 讨论和结论

Kurtak 剖面磁化率变化特征与阿拉斯加黄土相同, 但黄土层的磁化率是阿拉斯加黄土磁化率的 3 倍, 这可能证实了阿拉斯加风成沉积物的磁化率值是由风的强度控制的. 当然, 这一模型并没有考虑颗粒沉积之后的成土作用.

频率磁化率(c_{fd})反映了磁性矿物粒度的变化^[17], 对中国黄土和古土壤而言, c_{fd} 分别为 2%~7%和 7%~11%, 即成土过程生成的超顺磁颗粒对古土壤的磁化率具有重要的贡献^[18~21]. 相反, Kurtak 剖面黄土和古土壤的 c_{fd} 都接近于零, 这可能意味着该地区黄土和古土壤中的磁性矿物主要为风成起源而非成壤化作用的产物, 与中国黄土-古土壤序列存在很大的差别.

从统计上来说, Kurtak 剖面黄土层 LE1 磁化率椭球体最大轴 K_{max} 的方向集中在西北-东南, 而黄土层 LE2 则在西南-东北方向上相对集中, 即二者形成时的古风向可能存在差异. 虽然古土壤层 SO1 磁化率椭球体最大轴 K_{max} 的方向比较分散, 从统计上来说仍显示了与 LE1 相似的特征; 同样古土壤层 SO2 磁化率椭球体最大轴 K_{max} 的分布与 LE2 也有一定的相似性. 这可能意味着 Kurtak 地区的黄土和古土壤都保存了沉积时古风向的信息. 与此相反, 一些洪积物磁化率椭球体最大轴 K_{max} 的分布则完全是随机的. 最近对中国黄土高原马兰黄土磁化率各向异性的研究则表明, 在六盘山以西马兰黄土 AMS 可指示古风向, 而六盘山以东马兰黄土磁化率椭球体最大轴 K_{max} 的分布则基本是随机的^[22]. 上述研究说明, 由大气传输的颗粒在地表的沉积过程是很复杂的, 我们不仅需要考虑到重力的作用, 还必须考虑到边界层和颗粒的跃迁等因素.

Kurtak 地区磁化率的变化与阿拉斯加和阿根廷风成沉积物具有相似性, 而与中国、塔吉克斯坦和捷克黄土则完全相反. 这可能意味着西伯利亚和美洲大陆风成沉积物具有某些共性, 而与欧亚地区的风成沉积物则存在较大的差别. Kurtak 剖面黄土和古土壤的磁学性质基本相同, 都是以磁铁矿为主, 含有少量磁赤铁矿, 或许还有极少量的赤铁矿. 磁化率的变化主要受控于磁铁矿含量和粒度的大小. 但黄土和古土壤的非磁矿物存在一定的差别, 这导致了加热到 700°C 时, 黄土和古土壤的磁化率出现了明显的差别(图 5), 我们认为这主要起因于古土壤含有较多的有机质.

致谢 本工作为国家自然科学基金(批准号: 49425405)和俄罗斯科学院国际合作 (RFBR-NFNS Grant 99-05-39077)资助项目.

参 考 文 献

- 1 Heller F, Liu T S. Magnetism of Chinese loess deposits. *Geophys J R astr Soc*, 1984, 77: 125~141
- 2 Hunt C P, Singer M L, Kletetschka G, et al. Effect of citrate-bicarbonate-dithionite treatment on fine-grained magnetite and maghemite. *Earth Planet Sci Lett*, 1995, 130: 87~94
- 3 Fine P, Verosub K L, Singer M J. Pedogenic and lithogenic contributions to the magnetic susceptibility record of the Chinese loess/paleosol sequence. *Geophys J Int*, 1995, 122: 97~107
- 4 Liu X M, Hesse P, Liu T S, et al. High resolution climate record from the Beijing area during the last glacial-interglacial cycle. *Geophys Res Lett*, 1998, 25(3): 349~352
- 5 Pospelova G A. Paleomagnetic investigations and stratigraphy of Pliocene-Pleistocene strata of Near-Ob Plateau. In: Fotiadi

- E E, eds. Earth Crust of Folded Areas in Siberia. Novosibirsk: Russian Academy of Sciences, 1971. 62~96
- 6 Pospelova G A. Paleomagnetism of Pliocene-Pleistocene sedimentary rocks of Near-Ob Plateau, profile near Shelabolikha village. In: Fotiadi E E, ed. Methods and Results of Paleomagnetic Investigations of Cenozoic Sedimentary Formations in Siberia. Novosibirsk: Russian Academy of Sciences, 1973. 30~44
- 7 Chlachula J, Evans M E, Rutter N W. A magnetic investigation of a late Quaternary loess/palaeosol record in Siberia. *Geophys J Int*, 1998, 132 (1): 128~132
- 8 Chlachula J, Rutter N W, Evans M E. A late Quaternary loess-Paleosol record at Kurtak, southern Siberia. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1997, 34 (5): 679~686
- 9 Volkov I A, Zykina V S. Stratigraphy of the Quaternary loess deposits of the Novosibirsk Priobie. In: Arkhipov V S, ed. Proceedings of the 11th INQUA Congress. Novosibirsk: Russian Academy of Sciences, 1982. 17~21
- 10 Zydin A N, Nikolaev C V, Galkina L I, et al. The stratigraphic substantiation of the Neogene and Quaternary deposits in the Kurtak hollow. In: Arkhipov V S, ed. Proceedings of the 11th INQUA Congress. Novosibirsk: Russian Academy of Sciences, 1982. 133~149
- 11 Drozdov N I, Laukhin S A, Chekha V P, et al. Kurtak Archaeological Region, V 1-3, Preprint to International Symposium (Palaeoecological Aspect). Krasnoyarsk: Russian Academy of Sciences, 1999. 16~27
- 12 Orlova L A, Panychev V A. The reliability of radiocarbon dating buried soils Punning, Jaan-Mati, Applications of radiocarbon dating in Eastern Europe and Siberia. *Radiocarbon*, 1993, 35(3): 369~377
- 13 Beget J E, Stone D B, Hawkins D B. Paleoclimatic forcing of magnetic susceptibility variations in Alaskan loess during the late Quaternary. *Geology*, 1990, 18(1): 40~43
- 14 Zhu R X, Laj C, Mazaud A. The Matuyama-Brunhes and Upper Jaramillo transitions recorded in a Loess Section at Weinan, North-central China. *Earth Planet Sci Lett*, 1994, 125: 143~158
- 15 Zhu R X, Zhou L P, Laj C, et al. The Blake geomagnetic polarity episode recorded in Chinese Loess. *Geophys Res Lett*, 1994, 21(8): 697~700
- 16 Jelinek V. The statistical theory of measuring anisotropy of magnetic susceptibility of some igneous and metamorphic rocks. In: *Geofyzika*, 88. Brno: Czech Republic, 1977. 5~16
- 17 Thompson R, Oldfield F. *Environmental Magnetism*. London: George Allen and Unwin, 1986. 72~87
- 18 Zhou L P, Oldfield F, Wintle A G, et al. Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese Loess. *Nature*, 1990, 346: 737~739
- 19 刘秀铭, 刘东生, Heller F, 等. 黄土频率磁化率与古气候冷暖变换. *第四纪研究*, 1990, (1): 42~50
- 20 朱日祥, 吴汉宁, 李景春, 等. 中国黄土磁学性质与古气候意义. *中国科学, D辑*, 1994, 24(9): 992~997
- 21 Zhu R X, Lin M, Pan Y X. History of the temperature-dependence of susceptibility and its implications: Preliminary results along an E-W transect of the Chinese Loess Plateau. *Chinese Sci Bull*, 1999, 44(supp): 81~86
- 22 Zhu R X. History of anisotropy of the magnetic susceptibility and its implications: Preliminary results along an E-W transect of the Chinese Loess Plateau. *Geophys Res Abs*, 2000, 2: 226

(2000-02-24 收稿)