

“巫山黄土”的磁组构特征及成因

张玉芬¹, 李长安^{2,3}, 邵磊³, 罗昊¹, 蒋维杰¹, 牛志军⁴, 赵小明⁴, 涂兵⁴

1. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学生物地质与环境地质教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

4. 武汉地质矿产研究所, 湖北武汉 430205

摘要: 为了探讨“巫山黄土”的成因类型, 对新近发现的“巫山黄土”进行了磁组构测试和磁化率主轴特征分析, 并与长江现代沉积物以及长江中游一带分布的风积黄土和“砂山”的磁组构特征进行了对比。结果表明: (1) “巫山黄土”的 κ 、 P 、 F 、 L 、 E 值与风积黄土和“砂山”接近, 却明显低于长江现代沉积物的相应值; (2) 在磁组构参数 $F-L$ 关系图上, “巫山黄土”的数据点多集中于坐标原点附近, 与长江中游一带风积黄土和“砂山”的特征也类似, 均指示了沉积动力相对比较弱的沉积环境。而长江现代河流沉积物的数据点却主要分布于 F 轴附近, 反映长江现代河流沉积物的 F 较 L 发育; (3) “巫山黄土”的磁化率最大主轴特点也与长江中游风积黄土和“砂山”的接近, 偏角的方向比较分散, 长轴的倾角为 $36^\circ \sim 38^\circ$, 短轴的倾角为 $37^\circ \sim 39^\circ$, 而长江现代河流沉积物的磁化率最大主轴偏角的方向比较稳定, 并且长轴的倾角一般小于 10° , 短轴的倾角大于 80° ; (4) “巫山黄土”样品的 T 值介于 $-1 \sim 1$ 之间, 而长江现代河流沉积物的 T 值却主要以大于 1 为主。综合看来, “巫山黄土”的磁组构特征与长江中游一带的风积黄土和“砂山”接近, 指示了其风积成因的特点。

关键词: 长江中上游; “巫山黄土”; 磁组构特征; 风积成因。

中图分类号: P642

文章编号: 1000-2383(2010)05-0885-06

收稿日期: 2010-05-31

Magnetic Fabric Characteristics and Implications for Its Origin of “Wushan Loess”

ZHANG Yu-fen¹, LI Chang-an^{2,3}, SHAO Lei³, LUO Hao¹, JIANG Wei-jie¹, NIU Zhi-jun⁴, ZHAO Xiao-ming⁴, TU Bing⁴

1. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. Wuhan Institute of Geological and Mineral Resources, Wuhan 430205, China

Abstract: In this paper we present the magnetic fabric and magnetic susceptibility characters of one newly found “Wushan Loess” Section, which was also compared with the modern Yangtze River sediments and aeolian loess and “Sand-Dune” sediments distributed at the Middle Yangtze River. The results are as follows. (1) The κ , P , F , L , E values of the “Wushan Loess” are close to those of the aeolian loess and “Sand-Dune” sediments, however these values are obviously lower than those of the modern Yangtze River sediments. (2) Shown on the $F-L$ graph, data of the “Wushan Loess” converge upon the origin of coordinates, similar to the aeolian loess and “Sand-Dune” sediments distributed at the Middle Yangtze River, which reveals sedimentary environment with relatively lower power. Data of the modern Yangtze River sediments lies around the F -axis, showing more dominance of F rather than L . (3) Maximum magnetic principal axis of the “Wushan Loess” is similar to that of the aeolian loess and “Sand-Dune” sediments distributed at the Middle Yangtze River, with the direction of declination relatively dispersing and the inclination of long axis varying between 36° and 38° and the inclination of the short axis varying between 37° and 39° . However the direction of maximum magnetic principal axis declination of the modern Yangtze River is relatively stable with inclination of the long axis smaller than 10° and short axis bigger than 80° . (4) T values of the “Wushan Loess” vary between -1 and 1 while T values of the modern Yangtze River are mainly higher than 1. Generally, magnetic fabric characters are similar to aeolian loess

and “Sand-Dune” sediments distributed at the Middle Yangtze River, revealing its aeolian origin.

Key words: Middle and Upper Yangtze River; “Wushan Loess”; magnetic fabric character; aeolian origin.

“巫山黄土”是指分布于长江三峡地区的第四纪黄土状堆积物。由于中国北方黄土在第四纪古气候和古环境重建中的独特效果(刘东生, 1985; 丁仲礼等, 1989; 安芷生等, 1994; 陈骏等, 2001), 引起第四纪工作者对黄土高原以外黄土(状)堆积物发现与研究的极大关注。由于黄土的成因是用于第四纪古气候和古环境研究的基础, “巫山黄土”的成因自然成了学者研究的重要内容。尽管其成因研究已达半个世纪之久, 但至今依然存在着风成和水成两种不同的观点(刘兴诗, 1983; 沈玉昌, 1986; 谢明, 1991; 张芸等, 2001; 柯于义等, 2007; 王健明等, 2009)。导致分歧的原因, 一是与剖面的典型性有关, 另一方面是与研究方法有关。2008—2009 年笔者在三峡地区进行第四纪地质调查时, 新发现一处工程开挖剖面, 剖面厚度达 15 m, 从出露条件和厚度来看, 这是迄今为止研究“巫山黄土”最理想的剖面。本文主要从环境磁学的角度, 对“巫山黄土”进行成因研究, 这也是首次基于磁组构参数及磁化率主轴的变化特征“巫山黄土”成因研究。

1 剖面岩性特征

“巫山黄土”剖面位于巫山县客运港附近的长江左岸(图 1), 该剖面为建筑工地人工新开挖的露头剖面, 厚度 15 m, 剖面不但新鲜, 且顶底清楚, 出露完整。从出露条件和厚度来看这是迄今为止研究“巫

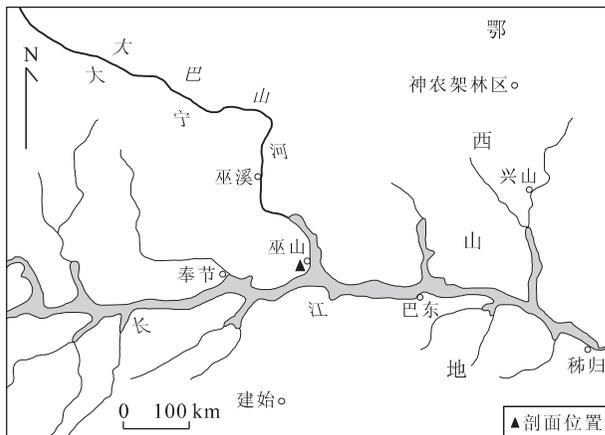


图 1 研究剖面位置

Fig. 1 Map showing the geography and section position of the research area

山黄土”最理想的剖面。剖面的岩性较均一, 主要由褐黄色和黄色的粉砂和砂质黏土组成, 含有少量的钙质结核; 剖面无层理, 垂直节理发育, 大孔隙明显, 未见明显的古土壤层。

2 样品的采集和测试

为了研究该黄土剖面沉积物形成的时代、成因以及其形成时的古气候和古环境变化特征和规律, 笔者分别采集了年代学、沉积学和环境磁学等样品, 并对样品进行了测试和分析, 主要对磁学样品的磁组构特征进行分析和讨论。对该剖面从上到下, 以 10 cm 间隔连续取样, 共采集磁组构定向样品 146 组。样品采集方法为: 用直径 2.5 cm、高 2.2 cm 的圆柱状无磁性塑料样品盒取样, 并用胶布密封, 以防样品失水和变形。样品测量是在中国地质大学(武汉)古地磁实验室的 HKB-3 型卡帕桥(其灵敏度为 2×10^{-8} SI)上进行的。对部分样品进行了重复测量, 重复测量误差 $\leq \pm 0.5 \times 10^{-3}$ 。对每个样品测量 15 个方位的磁化率值, 并计算出磁化率椭球体的最大、中间和最小 3 个主轴 (κ_{\max} 、 κ_{int} 、 κ_{\min}) 的数值及方向。其他磁组构参数都是根据此 3 个主轴的大小计算而得。参照大多数学者的观点(Hroudá, 1982; 阎桂林, 1996; 陈庆强等, 1998), 将磁组构参数定义为: (1) 磁化率各向异性度 $P = \kappa_{\max} / \kappa_{\min}$; (2) 磁面理度 $F = \kappa_{\text{int}} / \kappa_{\min}$; (3) 磁线理度 $L = \kappa_{\max} / \kappa_{\text{int}}$; (4) 磁基质颗粒度 $q = 2(\kappa_{\max} - \kappa_{\text{int}}) / (\kappa_{\max} + \kappa_{\text{int}} - 2\kappa_{\min})$; (5) 磁化率椭球体的扁率 $E = \kappa_{\text{int}}^2 / (\kappa_{\max} \times \kappa_{\min})$; (6) 磁化率椭球体的形状因子 $T = (2\ln\kappa_{\text{int}} - \ln\kappa_{\max} - \ln\kappa_{\min}) / (\ln\kappa_{\max} - \ln\kappa_{\min})$; (7) 水流速度函数 $F_s = \kappa_{\max} / (\kappa_{\text{int}} \times \kappa_{\min})$, 各参数的物理意义见文献(潘永信和朱日祥, 1998; 张玉芬等, 2004, 2008)。

3 结果与讨论

为了较科学地评价“巫山黄土”的成因, 除了对新近发现的“巫山黄土”剖面进行了磁组构测试和磁化率主轴特征进行分析判断, 笔者还对长江现代沉积物以及长江中游一带分布的风成黄土和风成“砂山”的磁组构特征进行了比较分析。现将分析和比较研究结果论述如下。

表 1 不同沉积类型的磁组构参数
Table 1 Magnetic fabric analysis parameters of different deposit types

沉积类型与沉积环境	采样地点	样品数	$\kappa(10^{-6} \text{ SI})$	P	F	L	q	T	E	$I_{\max}(^\circ)$	$I_{\min}(^\circ)$		
水成沉积	现代河流	长江宜昌	34	2 009.1	1.027 6	1.022 5	1.005 1	0.225 5	0.608 4	1.017 3	8.50	74.7	
		长江夔州湾	305	1 538.7	1.046 0	1.038 1	1.007 6	0.257 0	0.593 0	1.030 3	9.50	74.3	
		长江武汉	47	1 403.3	1.039 2	1.036 4	1.002 7	0.121 9	0.821 6	1.033 6	5.80	80.5	
		汉江仙桃	66	708.2	1.072 9	1.062 9	1.009 5	0.167 9	0.716 2	1.052 9	7.70	80.6	
		高位砾石层	李家院砾石层	8	1 504.3	1.024 4	1.016 9	1.007 3	0.347 1	0.406 1	1.009 4	9.30	71.4
		白洋渡砾石层	26	355.0	1.025 5	1.021 1	1.004 3	0.202 8	0.644 9	1.016 7	6.00	80.1	
		溃口扇	长江夔州湾	307	782.2	1.041 2	1.028 1	1.010 3	0.400 1	0.361 6	1.015 3	17.90	68.4
风成沉积		武汉青山	312	657.0	1.016 4	1.010 7	1.005 7	0.535 6	0.214 2	1.005 0	21.30	55.9	
	风尘砂	岳阳君山	53	106.0	1.006 1	1.003 0	1.003 1	0.739 7	0.012 0	0.999 8	29.00	42.0	
		江西新港	430	38.5	1.028 6	1.015 5	1.012 9	0.628 5	0.097 8	1.002 7	24.20	45.1	
	风尘黄土	武汉青山	48	750.0	1.008 6	1.005 0	1.003 5	0.653 0	0.091 1	1.001 6	22.00	54.0	
		江西新港	116	161.4	1.015 9	1.008 9	1.006 9	0.589 1	0.155 0	1.003 0	16.00	54.2	
本文研究的“巫山黄土”		146	361.4	1.007 3	1.004 0	1.003 4	0.672 1	0.049 9	1.000 4	37.34	38.0		

注：参数 κ ，平均磁化率(总磁化率)； P ，各向异性度； F ，磁面理； L ，磁线理； q ，磁基质颗粒度； T ，形状因子； E ，扁率； I_{\max} 和 I_{\min} 分别为最大、最小主轴的倾角。

3.1 单个磁组构参数特征对比分析

表 1 为“巫山黄土”样品与长江中游地区部分典型的水成和风成沉积物样品磁组构参数分析结果，由表 1 可见“巫山黄土”样品的磁组构参数值与长江一带风积成因的“砂山”的磁组构极为相近，而与长江现代河流沉积物的磁组构却存在着较大的差异。如：“巫山黄土”样品的 κ 、 P 、 F 、 L 值分别为 361.4 (10^{-6} SI)、1.007 3、1.004 0、1.003 4，分布于长江一带的风成“砂山”(武汉青山)的分别为 657 (10^{-6} SI)、1.016 4、1.010 7、1.005 7。而长江现代河流沉积物(长江宜昌段)的却分别为 2 009.08 (10^{-6} SI)、1.027 6、1.022 5、1.005 1。一般来说水成沉积物的 P 和 F 值多数大于 1.02， E 值绝大多数大于 1.01，而风成沉积物的 P 和 F 值多数小于 1.02， E 值小于 1.01(张玉芬和李长安，2003；张玉芬等，2008)。本文测试的 146 个“巫山黄土”样品的 P 和 F 值均小于 1.02， E 值均小于 1.01，且全部样品的平均值仅为 1.007 3、1.004 0 和 1.000 4 左右。它们与长江中游一带风成砂和风成黄土的 P 、 F 和 E 值非常接近(表 1)。从表 1 还可见本文测试的“巫山黄土”的 q 值(平均值为 0.672 1)与长江一带风成沉积物的 q 值(0.535 6~0.739 7)比较接近，而与长江现代河流沉积物的 q 值(0.121 9~0.400 1)差异

较大，也反映出“巫山黄土”可能为风积成因。

3.2 磁组构参数组合特征对比分析

多个磁组构参数比单一参数能更为确切地反映沉积物的动力沉积状况，进而反映其成因类型。图 2 为长江中游风成沉积、水成沉积和“巫山黄土”磁组构参数组合关系，从图 2 可见：“巫山黄土”样品的分布规律(图 2c)与武汉青山的风成黄土(下蜀土)(图 2b)的分布规律是一致的。在 F - L 组合图上(图 2b、2c)，它们的 F 、 L 值都很小，主要集中于坐标原点附近(所有的值都小于 1.02)。在 P - T 组合图上，它们的 P 以小于 1.02 为主， T 介于 -1~1 之间。在 F_s - q 组合图上，它们的 F_s 值均小于 1.02， q 值的变化范围都较大。表明两者可能具有相同的沉积类型和沉积环境。由图 2 还清楚地看到，研究的“巫山黄土”样品的磁组构参数组合特征与长江现代河流沉积物的特征具有明显的差异。长江现代河流沉积物样品的数据点主要集中于 P 、 F 和 T 的高值区、 L 和 q 的低值区(图 2a)。在 F - L 组合图上，数据点主要分布于 F 轴附近(F 大于 L)，在 P - T 组合图上主要分布于 T 的正半轴，反映了水成沉积物的 F 较 L 发育(沉积层理发育)的特点。

3.3 磁化率各向异性量值椭圆主轴的特点

磁化率各向异性(anisotropy of magnetic sus-

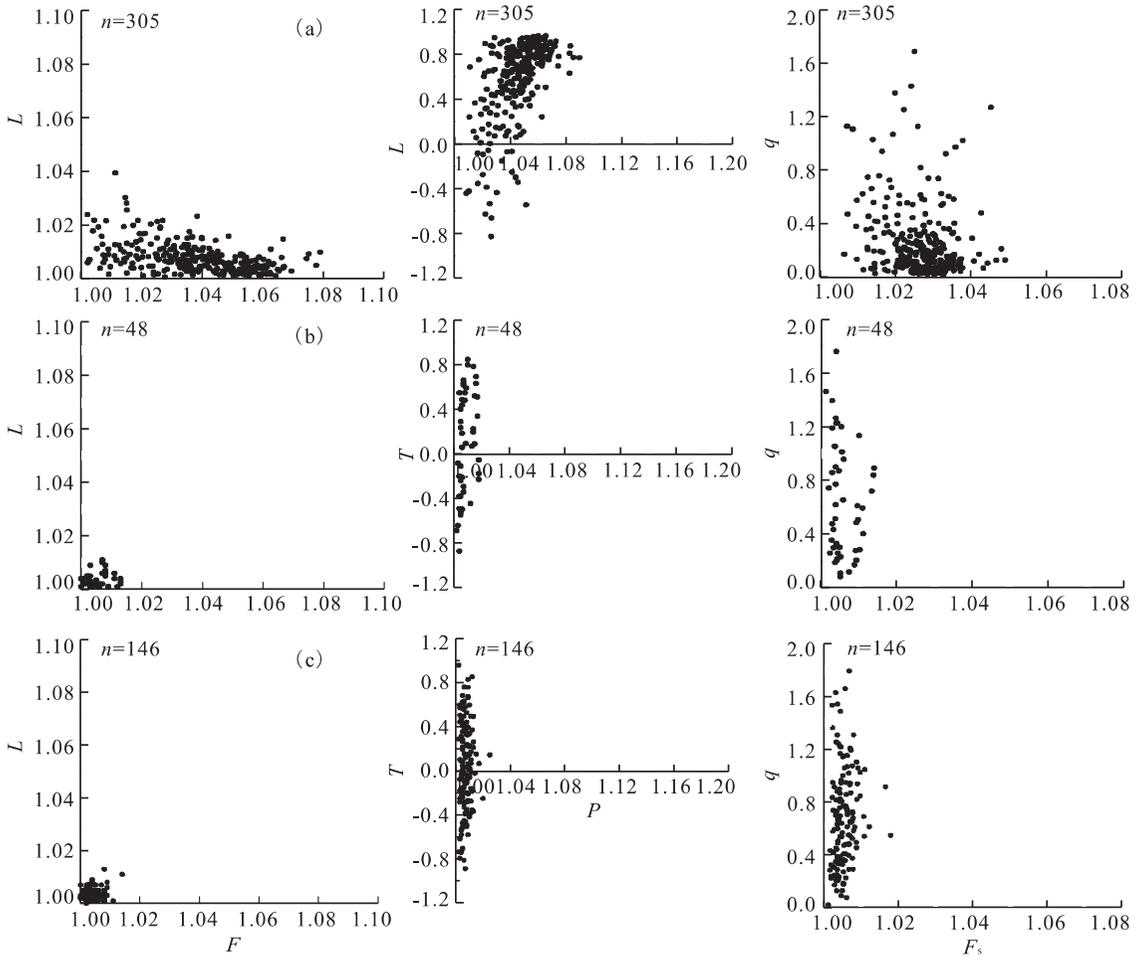


图 2 长江中游部分沉积物磁组构参数

Fig. 2 Combination diagrams of magnetic fabric parameters of sediments in the Middle reach of Yangtze River

a. 长江现代河漫滩沉积(张玉芬等, 2008); b. 武汉青山风成黄土(下蜀黄土); c. 文中“巫山黄土”; 图中 n 是样品数

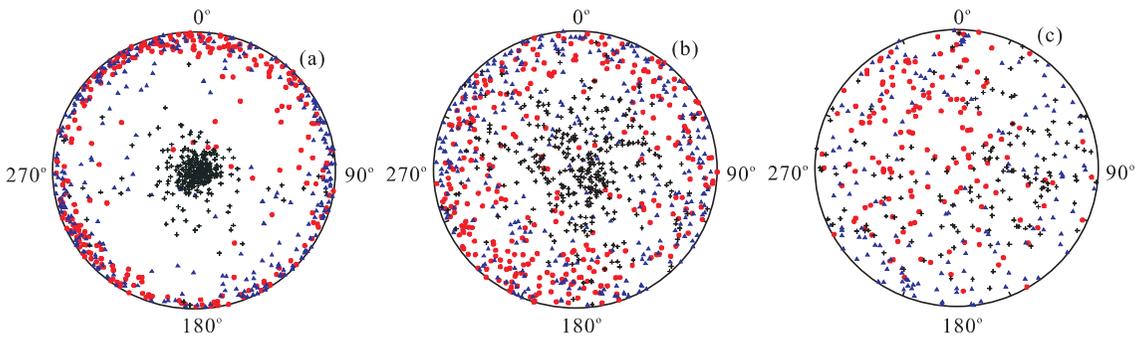


图 3 不同沉积类型的 AMS 主轴等面积赤平投影

Fig. 3 Stereographic projection of anisotropy of magnetic susceptibility ellipsoids of some sediment types

a. 武汉长江河漫滩($n=305$); b. 武汉青山风成砂($n=313$); c. 本文研究的“巫山黄土”($n=146$); ●, K_{\max} ; ▲, K_{int} ; *, K_{\min}

ceptibility, AMS) 椭球体三主轴空间分布的等面积赤平投影点能够更直观地反映出沉积物中颗粒的有序分布, 可以被用来区别不同环境的沉积物(吴汉宁和岳乐平, 1997; 吴海斌等, 1998; 吴能友等, 1998)。图 3 为“巫山黄土”样品与长江武汉江段河流沉积物

以及武汉青山“砂山”样品的磁化率各向异性量值椭球主轴的赤平投影。由图 3 可知: “巫山黄土”样品的磁化率椭球体轴向分布规律性较差且与武汉市青山区“砂山”的特征类似, 而与长江河流沉积的特征不同。不论是“巫山黄土”还是武汉青山“砂山”沉积物,

其 κ_{\max} 、 κ_{int} 和 κ_{\min} 分布都比较散乱, 倾角变化也较大(图 3c, 3b), 表明它们的沉积物颗粒有序性较差, 这一特征也正好说明风的搬运能力远小于水的搬运能力, 且常伴有气旋涡流导致风向不稳定的特点。

已有研究表明(张玉芬等, 2008), 风成沉积比较正常的水成沉积而言, 不仅具有磁化率最大主轴偏角的方向比较分散的特点(图 3), 而且还具有长轴的倾角偏大、短轴的倾角偏小的特点(表 1)。由表 1 可见“巫山黄土”样品的最大主轴的倾角 I_{\max} 的平均值约为 37.4° , 最大主轴的倾角 I_{\min} 的平均值约为 38.0° , 与长江一带风成沉积比较接近(表 1)。而与水成沉积的磁化率最大主轴偏角的方向比较稳定、一般长轴的倾角小于 10° 、短轴的倾角约 80° (表 1) 的特征差别较大。

综上所述, “巫山黄土”样品的测试结果, 无论是单个磁组构参数特征, 还是磁组构参数组合特征以及磁化率各向异性椭球体主轴特征, 均反映出其成因类型为风成。

4 结论

“巫山黄土”样品的磁组构测试结果以及与长江中游一些典型成因类型沉积物的磁组构参数对比分析显示出巫山黄土具有如下的特点。

(1) “巫山黄土”样品的磁组构参数 P 、 F 、 L 值分别为 1.007 3、1.004 0、1.003 4, 与分布于长江一带的风成“砂山”和风成黄土的值比较接近, 却明显低于长江现代沉积物的相应值; (2) 在磁组构参数 F - L 关系图上, “巫山黄土”样品的 F 、 L 值都很小, 数据点主要集中于坐标原点附近。在 P - T 组合图上, P 以小于 1.02 为主, T 介于 $-1 \sim 1$ 之间。在 F_s - q 组合图上, F_s 值均小于 1.02, q 值的变化范围都较大。与长江一带典型的风成沉积物的磁组构组合特征类似, 而与长江现代河流沉积物的特征却明显不同; (3) 在磁化率各向异性椭球体等面积赤平投影图上, “巫山黄土”样品的磁化率最大主轴具有偏角的方向比较分散, 长轴的倾角较大, 短轴的倾角较小等特点。一般来说, 水成沉积的 κ_{\min} 近于直立, κ_{\max} 和 κ_{int} 近水平分布, 椭球体轴向分布积聚性较好, 而风成沉积的磁化率椭球体轴向分布规律性差。上述特点也正好说明了“巫山黄土”系风积成因。

总之, 磁组构研究表明, “巫山黄土”为风积成因, 与李长安等(2010)粒度分析的研究结果一致。

致谢: 研究生王节涛、江华军和孙习林参加了野

外样品的采集, 周耀、何禹、周稠和严玲琴等参加了室内样品的测试, 在此一并表示感谢。

References

- An, Z. S., Porter, S. C., Chappell, J., et al., 1994. Accumulation of the Luochuan loess over the 130 ka and records of Greenland ice-core. *Chinese Science Bulletin*, 39(24): 2254—2256 (in Chinese).
- Chen, J., Wang, Y. J., Chen, Y., et al., 2001. Rb and Sr geochemical characterization of the Chinese loess and its implications for palaeomonsoon climate. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 259—266 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Q. Q., Li, C. X., Cong, Y. Z., 1998. The study of relation between magnetic fabric of sediment and character of dynamic deposit. *Chinese Science Bulletin*, 43(10): 1106—1109 (in Chinese).
- Ding, Z. L., Liu, D. S., Liu, X. M., et al., 1989. The 37 climate cycles since 2.5 MaBP. *Chinese Science Bulletin*, 34(19): 1494—1496 (in Chinese).
- Hrouda, F., 1982. Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. *Surveys in Geophysics*, 5(1): 37—82. doi:10.1007/BF01450244
- Ke, Y. Y., Yin, H. G., Guo, F., et al., 2007. Origin of the “Wushan Loess” at the Three Gorges area. *Yangtze River*, 38(9): 72—73, 76 (in Chinese).
- Li, C. A., Zhang, Y. F., Yuan, S. Y., et al., 2010. Grain size characteristics and origin of the Wushan Loess at Wushan area. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(5): 879—884 (in Chinese with English abstract).
- Liu, D. S., 1985. Loess and environment. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Liu, X. S., 1983. Quaternary system of the Sichuan basin. Sichuan Science and Technology Publishing House, Chengdu, 95—97 (in Chinese).
- Pan, Y. X., Zhu, R. X., 1998. The recent progress in magnetic fabrics. *Progress of Geophysics*, 13(1): 52—59 (in Chinese with English abstract).
- Shen, Y. C., 1965. Valley landform of Upper Yangtze River. Science Press, Beijing, 97—146 (in Chinese).
- Wang, J. M., Wang, Y., Wang, J. L., 2009. Research on granular characteristics of Quaternary deposit in Wushan County. *Yangtze River*, 40(13): 13—15 (in Chinese).
- Wu, H. B., Chen, F. H., Wang, J. M., et al., 1998. A study on the relationship between magnetic anisotropy of modern eolian sediments and wind direction. *Chinese Journal of Geophysics*, 41(6): 811—817 (in Chinese).

with English abstract).

Wu, H. N., Yue, L. P., 1997. The anisotropy of magnetic susceptibility of aeolian dust sediment; the paleowind field in Chinese loess plateau. *Chinese Journal of Geophysics*, 40 (4): 487—494 (in Chinese with English abstract).

Wu, N. Y., Duan, W. W., Liu, J., 1998. Preliminary discussion on Late Quaternary paleocurrent and paleoclimate history of the Bransfield Strait, Antarctica; the magnetic fabric method. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 18(1): 77—88 (in Chinese with English abstract).

Xie, M., 1991. Loessal deposits in the Three-Gorge area of the Changjiang (Yangtze) River. *Geochimica*, 9 (3): 292—300 (in Chinese).

Yan, G. L., 1996. The application of magnetic susceptibility anisotropy of rocks in geology. China University of Geosciences Press, Wuhan, 8—70 (in Chinese).

Zhang, Y. F., Li, C. A., 2003. Magnetic fabric parameter character of modern fluvial deposit in the Middle Reaches of Yangtze River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 12 (4): 370—376 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Y. F., Li, C. A., Chen, L., et al., 2008. Magnetic fabric of aqueous and aeolian sediments in the Middle Yangtze River. *Acta Geologica Sinica*, 82(6): 857—863 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Y. F., Li, C. A., Yan, G. L., et al., 2004. A comparative study of magnetic fabric characters between flooded sediments and normal river sediments. *Chinese Journal of Geophysics*, 47(4): 639—645 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Y., Zhu, C., Zhang, Q., et al., 2001. Sedimentary environment and eolian deposits in past 3 000 a in Daning valley of the Three Gorges of the Yangtze River. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 21(4): 83—88 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

安芷生, Porter, S. C., Chappell, J., 等, 1994. 最近 130 ka 洛川黄土堆积序列与格陵兰冰心记录. *科学通报*, 39 (24): 2254—2256.

陈骏, 汪永进, 陈晞, 等, 2001. 中国黄土地层 Rb 和 Sr 地球化学特征及其古季风气候意义. *地质学报*, 75 (2):

259—266.

陈庆强, 李从先, 丛友滋, 1998. 沉积物磁组构与其动力沉积特征对应关系研究. *科学通报*, 43(10): 1106—1109.

丁仲礼, 刘东生, 刘秀铭, 等, 1989. 250 万年以来的 37 个气候旋回. *科学通报*, 34(19): 1494—1496.

柯于义, 尹华刚, 郭峰, 等, 2007. 三峡库区“巫山黄土”成因研究. *人民长江*, 38(9): 72—73, 76.

李长安, 张玉芬, 袁胜元, 等, 2010. “巫山黄土”粒度特征及其对成因的指示. *地球科学——中国地质大学学报*, 35 (5): 879—884.

刘东生, 1985. *黄土与环境*. 北京: 科学出版社.

刘兴诗, 1983. *四川盆地的第四系*. 成都: 四川科学技术出版社, 95—97.

潘永信, 朱日祥, 1998. 磁组构研究现状. *地球物理学进展*, 13 (1): 52—59.

沈玉昌, 1965. *长江上游河谷地貌*. 北京: 科学出版社, 97—146.

王建国, 王勇, 王建力, 2009. 巫山第四纪沉积物粒度特征研究. *人民长江*, 40(13): 13—15.

吴海斌, 陈发虎, 王建民, 等, 1998. 现代风成沉积物磁化率各向异性与风向关系的研究. *地球物理学报*, 41 (6): 811—817.

吴汉宁, 岳乐平, 1997. 风成沉积物磁组构与中国黄土区第四纪风向变化. *地球物理学报*, 40(4): 487—494.

吴能友, 段威武, 刘坚, 1998. 南极布兰斯菲尔德海峡晚第四纪沉积物磁组构特征及其古环境学意义. *海洋地质与第四纪地质*, 18(1): 77—88.

谢明, 1991. 长江三峡地区的第四纪沉积物. *地球化学*, 9(3): 292—300.

阎桂林, 1996. 岩石磁化率各向异性在地学中的应用. 武汉: 中国地质大学出版社, 8—70.

张玉芬, 李长安, 2003. 长江中游现代河流沉积物磁组构参数特征研究. *长江流域资源与环境*, 12(4): 370—376.

张玉芬, 李长安, 陈亮, 等, 2008. 长江中游水成沉积与风成沉积磁组构特征. *地质学报*, 82(6): 857—863.

张玉芬, 李长安, 阎桂林, 等, 2004. 长江中游地区洪泛沉积物与正常河流沉积物磁组构特征对比研究. *地球物理学报*, 47(4): 639—645.

张芸, 朱诚, 张强, 等, 2001. 长江三峡大宁河流域 3 000 年来的沉积环境和风尘堆积. *海洋地质与第四纪地质*, 21 (4): 83—88.