

张玉芬,李长安,陈 亮等.长江中游砂山沉积物磁组构特征及其指示的古风场.地球物理学报,2009,52(1):150~156
Zhang Y F, Li C A, Chen L, et al. Magnetic fabric characters of sand-dune sediments and its paleowind field in the middle reaches of Yangtze River. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(1):150~156

长江中游砂山沉积物磁组构特征及其指示的古风场

张玉芬¹,李长安^{2,3},陈 亮¹,康春国³,胡思辉³,霍 炬³,严玲琴¹,程 旭¹

1 中国地质大学地球物理与空间信息学院,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,武汉 430074

3 中国地质大学地球科学学院,武汉 430074

摘 要 本文通过对新发现的江西九江新港砂山剖面沉积物磁化率各向异性测量和磁化率椭球体主轴的统计分析,揭示了该风成砂剖面磁组构参数在不同层位的变化特征,获得了古风向特征及其演变规律。(1)整个时期内该区的主导风向为 NW-SE 和 NNW-SSE 向,但在不同时期风向和风力强度又有所不同,变化最为剧烈的时期是砂 2 层,风向发生了根本性的改变,由原来的 NW-SE 为主,变为 NE-SW 向为主,且该阶段沉积环境相对比较稳定;(2)砂 2、砂 5、砂 6 层具有较大 P 、 F 、 L 和较小的 q 值,说明在其形成时气候最为寒冷,冬季风的风力最强、风速比较稳定,这与野外观察到的在这几层中大型板状斜层理发育,砂层粒度较粗,黏土含量较少的结果一致;(3)晚更新世末期长江中游的风成沙丘广泛发育,表明该时段是长江中下游地区气候最干冷、风力作用最强的时期,有着与北方沙漠—黄土区相类似的气候环境;(4)研究表明,AMS 主轴的等面积赤平投影法和玫瑰花图,可以用来分析古风向的变化规律,是一种简易有效的方法。

关键词 长江中游,新港风成砂剖面,磁组构特征,古风向

文章编号 0001-5733(2009)01-0150-07

中图分类号 P313

收稿日期 2008-01-18,2008-10-28 收修定稿

Magnetic fabric characters of sand-dune sediments and its paleowind field in the middle reaches of Yangtze River

ZHANG Yu-Fen¹, LI Chang-An^{2,3}, CHEN Liang¹, KANG Chun-Guo³,
HU Si-Hui³, HUO Ju³, YAN Ling-Qin¹, CHENG Xu¹

1 *Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*

2 *Key Laboratory 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*

Abstract Through the measurement of the susceptibility anisotropy and the statistical analysis of the susceptibility ellipsoid's major axis of the sand dune sediments recently found in Jiujiang, Xingang in Jiangxi Province, this papers uses the variation features of the magnetic fabric parameters in the different strata to obtain the patterns of paleowind direction and the rules governing its evolution. (1) During the whole period the dominant wind direction is NW-SE and NNW-SSE with some minor internal changes in wind direction and intensity. The most important change occurs in the second sand stratum when the wind direction shifted to NE-SW. That shows a relatively stable sedimentary environment. (2) In the second, fifth and sixth sand strata the

基金项目 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(2004CB720204)和国家自然科学基金项目(40672206,40372079,40771213,90411005)联合资助。

作者简介 张玉芬,女,1957年生,教授,博士生导师,1982年毕业于中国地质大学(武汉),主要从事地球物理勘探和环境磁学方面的教学与研究. E-mail: zhyfcug@163.com

values of P , F , and L are high, and the value of q is low. That corresponds to the coldest climate in the series. The intensity of the winter wind is the highest and the wind velocity is stable, corresponding to the development of large scale tabular and oblique bedding in these strata with coarser grain sizes and lower clay content. (3) During the Late Pleistocene, the extensive occurrence of aeolian sand dunes in the middle reaches of the Yangtze River correspond to the coldest and most dry climate, and also to the strongest wind energy, similar to that of the northern deserts and loess plateau regions. (4) This paper demonstrates that the hemispherical projection and the rose chart of the AMS major axis are easy and effective methods to analyze the variation patterns of the paleowind direction.

Keywords Middle Reaches of the Yangtze River, Aeolian sand profile in Xingang, Magnetic fabric characteristics, Paleowind direction

1 引言

由风化而形成的不规则磁性岩矿颗粒,在沉积的过程中,受搬运力的作用,使其长轴趋向于某一方向排列,从而形成沉积物磁化率各向异性,即磁组构。磁组构也称为磁化率各向异性,目前已广泛应用于研究沉积环境和判别沉积介质的动力方向^[1~7]。特别是孙继敏、丁仲礼^[3]、吴海滨等^[4]对典型的风成沉积物—中国黄土磁组构研究表明:黄土中磁性矿物颗粒椭球体的最大主轴方向与黄土沉积时的主导风向一致。根据风积物的这一磁组构特性,我们利用磁化率各向异性(The Anisotropy of Magnetic Susceptibility, AMS)特征对长江中游风积砂山形成时的古风场和沉积动力学过程进行了探索性研究。所得结果与野外观测到的砂山的宏观特征一致。

2 剖面特征与样品采集和测试

本文选取了位于江西九江市以东约 20 km 的新港镇附近新港砂山剖面作为研究对象。该剖面出露总厚度约 34 m,顶部为厚约 2 m 的现代土壤层(未取样)。根据剖面特征将其(从 2 m 处起算)共分为上(0~3.25 m)、中(3.25~26.2 m)、下(26.2~32 m)三大套地层。上部为黏土层,其中上段主要为黄色黏土层,下段主要为红褐色黏土层,黏土层紧实,垂直节理发育,在靠近该层底部 35cm 处出现钙质结核;中部为大套的松散的砂和古土壤化的亚黏土互层组成。该段地层厚度最大,其中发育 9 个亚黏土层和 9 个砂层,从下(老)到上(新)将砂层依次编号为砂 1~砂 9,每层亚黏土层的古土壤化程度

不同,并且由砂层到亚黏土层时,其沉积物粒径由粗到细是渐变的,而由亚黏土层到砂层时沉积物的粒径变化却是突变的。砂层以黄色砂为主,砂比较纯,以石英和长石为主,含有云母碎片,砂层中层理发育;下部为砂质黏土层,其中上段为红色砂质黏土层,中段以黄色砂与褐红色砂质黏土层互层为主,下段以土黄色砂为主,未见底。本文重点对中部(3.25~26.2 m)的大套砂层和亚黏土层进行了研究。

对发现的剖面砂层以 5 cm 间隔,亚黏土层以 2.5 cm 间隔连续取样,共采集磁化率定向样品 554 个。样品测量是在中国地质大学地球物理与空间信息学院岩石物性实验室完成,使用仪器为捷克产的 KLY-3S 型卡帕桥,其灵敏度为 2×10^{-8} (SI),部分样品重复测量误差 $\leq \pm 0.5\%$ 。

3 结果分析及讨论

3.1 磁组构参数特征及其古风向

常用磁组构参数用磁化率椭球体最大、中间和最小 3 个主轴(κ_{\max} 、 κ_{int} 、 κ_{\min})的量值来表示,其主轴方向反映了单个样品中铁磁性矿物的物理取向,并与沉积时的动力条件相关。对于水成沉积物,当沉积面较平,水流不太急时,最大主轴的偏角(D_{\max})指示了水流方向,而最大主轴的倾角(I_{\max})和最小主轴的倾角(I_{\min})则指示了是否为正常的沉积环境,一般最大主轴的倾角小和最小主轴的倾角大则指示为正常的沉积环境,反之反映沉积环境不稳定。研究表明对于风成沉积物具有相同的特点^[1,3,4]。其他磁组构参数都是根据此 3 个主轴的大小计算而得^[8,9]。对该剖面 9 个砂层和亚黏土层的磁组构参数进行了统计、分析,各参数在剖面上的特征及反映的环境意义如下。

(1)平均磁化率 $\kappa = (\kappa_{\max} + \kappa_{\text{int}} + \kappa_{\min})/3$ (单位 10^{-6} SI),其相对大小反映了沉积物中磁性矿物含量的多少及沉积环境的变化.本剖面亚黏土层中大多数样品的磁化率值分布在 $90 \sim 200 (10^{-6} \text{ SI})$ 范围内,其平均值约为 $143.27 (10^{-6} \text{ SI})$.砂层样品的磁化率值主要集中在 $12 \sim 30 (10^{-6} \text{ SI})$ 范围,其平均值约为 $21.81 (10^{-6} \text{ SI})$.说明砂层是较干冷、亚黏土层是较暖湿的气候环境下的产物.

(2)磁化率各向异性度 $P = \kappa_{\max}/\kappa_{\min}$, 主要反映

沉积动力的强弱和沉积环境的稳定性.一般来说,在能量高的稳定环境中形成的沉积物颗粒排列的有序程度高(即 P 值大).反之,则 P 值小,因此 P 与动力环境有关.在研究剖面中 9 个砂层的 P 值普遍较亚黏土层的 P 值大,且砂层 P 值的变化幅度较亚黏土层的也大(表 1).另外由表 1 还可看到,不同砂层其 P 值的大小也不相同,从而说明形成砂层时的风动力强度较形成亚黏土层时不仅大的多,而且其动力环境变化也较大,并且形成不同砂层时的风动力强

表 1 新港砂山剖面 9 个砂层磁组构参数统计

Table 1 The magnetic fabric parameters statistical average value of aeolian sands for Xingang sand-dune section in Jiujiang, Jiangxi province

层位/样品数	$\kappa(10^{-6} \text{ SI})$	P	F	L	q	T	E	比重/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
第 9 砂层/42	49.4	1.0136	1.0065	1.0067	0.7752	-0.0471	0.9997	1.382
第 8 砂层/64	20.88	1.0268	1.0138	1.0127	0.6622	0.0532	1.0012	1.338
第 7 砂层/56	14.39	1.0335	1.0163	1.0169	0.7209	-0.012	0.9993	1.294
第 6 砂层/29	22.02	1.0382	1.0242	1.0135	0.5874	0.1768	1.0108	1.354
第 5 砂层/14	16.51	1.0417	1.0232	1.0177	0.5734	0.1719	1.0056	1.325
第 4 砂层/28	13.74	1.03	1.0163	1.0135	0.654	0.0768	1.0028	1.319
第 3 砂层/28	27.24	1.0293	1.015	1.014	0.67	0.0663	1.0011	1.394
第 2 砂层/59	10.74	1.0415	1.0232	1.0179	0.6013	0.1444	1.0054	1.273
第 1 砂层/47	22.89	1.0344	1.0178	1.0163	0.6764	0.0544	1.011	1.286
亚黏土层/59	143.27	1.0121	1.008	1.004	0.323	0.4484	1.004	1.547

度也存在着明显的差异.

(3)磁面理 $F = \kappa_{\text{int}}/\kappa_{\min}$, 表示沉积物中磁性矿物面状发育程度.本研究剖面的砂层 F 值在 $1.0063 \sim 1.0242$ 之间(表 1),说明磁颗粒在砂山沉积中以面状平行排列.

(4)磁线理 $L = \kappa_{\max}/\kappa_{\text{int}}$, 其大小代表矿物颗粒呈线性排列程度高低.如果在较长的稳定沉积环境下,则 L 值较大.由表 1 可见本剖面的 L 值总体上较磁面理 F 值要偏小,但相差不是很大.说明该砂山沉积物的磁线理与磁面理具有相近的发育程度(表 1).反映了沉积环境不是太稳定.

(5)磁基质颗粒度 $q = 2(\kappa_{\max} - \kappa_{\text{int}})/(\kappa_{\max} + \kappa_{\text{int}} - 2\kappa_{\min})$,反映沉积作用与沉积过程.由于风对沉积物的搬运与水的作用有相似之处,沙粒在风的作用下形成的风成砂沉积物,其沉积作用主要有三种:滑塌、颗粒降落、跃移作用.判断其磁组构是正常沉积磁组构还是非正常沉积磁组构可以通过 q 值来确定.一般来说, q 值小于 0.5 表示沉积物是在正常的重力分异或逐粒沉积作用下沉降下来的,而 q 值大于 0.7 则表示沉积物是在非正常的重力分异作用下

沉降下来的.由于能量突然减弱,大量的颗粒大小混杂的沉积物同时沉降下来,即代表了事件沉积.本文重点研究的砂山剖面的 9 个砂层 q 的统计平均值均大于 0.5,部分样品的 q 值大于 1.0,说明事件沉积经常发生.长江中游砂山沉积物的 q 值普遍偏大,这还与砂山主要是近源产物,沉积物没有经过远距离搬运分选有关.在剖面中还可以看到 q 值曲线波动较厉害^[10],说明风动力条件处于一种动荡的环境中,正常与非正常沉积交替出现,风向和风力强度变化都较大.

(6)磁化率椭球体的形状因子 $T = (2\ln(\kappa_{\text{int}}) - \ln(\kappa_{\max}) - \ln(\kappa_{\min})) / (\ln(\kappa_{\max}) - \ln(\kappa_{\min}))$,其值的大小和变化一般反映了磁面理 F 和磁线理 L 的发育程度.当 $T = 0$ 时,磁面理和磁线理同等发育;当 $1 > T > 0$ 时,磁面理发育为主; $T = 1$ 时,仅有磁面理发育; $0 > T > -1$ 时,磁线理发育为主; $T = -1$ 时,仅有磁线理发育.本研究剖面中的 9 个砂层中除砂 7 和砂 9 层外,其余砂层 T 的平均值都大于 0,但量值较偏小,说明虽然该剖面砂层沉积物的磁面理 F 较磁线理 L 发育,但两者差异较小.

(7)磁化率椭球体的扁率 $E = \kappa_{\text{int}}^2 / \kappa_{\text{max}} \times \kappa_{\text{min}}$, 它的大小和变化一般反映了磁化率椭球体的压扁程度, 当 $E < 1$ 时磁化率椭球为拉长状的椭球; $E > 1$ 时磁化率椭球为压扁状的椭球. 由表 1 可知本研究剖面砂层的 E 值接近于 1, 反映该砂山沉积物的磁化率量值椭球比较复杂, 既有压扁状, 也有拉长状, 并且无论压扁和拉长的特征均不明显.

由表 1 我们还可看到, 9 个砂层的磁组构参数量值的统计值并不完全一样, 砂 2、砂 5、砂 6 层具有较大 P 、 F 、 L 、 T 和较小的 q 值, 而砂 3、砂 8、砂 9 层却具有较小的 P 、 F 、 L 、 T 值和较大的 q 值. 说明在形成砂 2、砂 5、砂 6 层时, 气候最为寒冷, 冬季风的风力最强、风速比较稳定, 导致 P 、 F 、 L 发育, 砂层的分选较好 (q 值较小). 在形成砂 3、砂 8、砂 9 层时, 气候相对来说较为暖和, 冬季风的风力较上述时段相对较弱, 导致 P 、 F 、 L 不发育, 砂层的分选相对较差 (q 值较大). 这与野外观察到的在砂 2、砂 6 层发育板状斜层理, 砂层粒度较粗, 以中-粗砂为主, 黏土含量较少, 而在砂 3、砂 8、砂 9 层时砂层粒度偏细, 以中~细砂为主, 黏土含量增多的结果一致.

3.2 磁化率各向异性椭球体主轴特征及其古风向讨论

在水成沉积物研究中, 目前国内外学者广泛利用沉积颗粒的磁化率各向异性 (AMS) 特征来确定沉积过程中的水动力方向^[6,7]. 然而, 作为承载磁性颗粒的载体风和水, 其流体性质有很大差别, 是否在风成沉积物研究中, 也可以利用其沉积物磁化率各向异性特征来确定沉积过程中的风动力方向, 一直是人们所关注的问题. 吴海斌等^[4]通过风洞实验证明: 风成沉积物磁化率各向异性长轴偏角的优势方向主要由风向所决定, 孙继敏等^[3]、吴海滨等^[4]对典型的风成沉积物——中国黄土磁组构研究也表明: 黄土中磁性矿物颗粒椭球体的最大主轴 (κ_{max}) 方向与黄土沉积时的主导风向 (即常年盛行风) 一致. 这些研究成果为我们利用磁化率各向异性椭球体主轴特征探索研究长江中游砂山形成时的古风场和其演化特点提供了可能. 图 1 是新港砂山剖面中砂层和亚黏土层样品的磁化率各向异性最大主轴的玫瑰花图, 由图 1 可见新港剖面中砂层样品最大主轴的偏角 (D_{max}) 总体上以 NW-SE 向为主, 说明当时形成砂山的这一时段, 本区的主体风向以北西向为主, 但伴随有其他方向的风的作用. 而亚黏土层样品最大主轴的偏角 (D_{max}) 的分布优势方位没有砂层明显 (图 1a, b), 它主要由 NW 向和 SSE 向两组主导风

向组成. 同时新港“砂山”中的亚黏土层与砂层相比, 具有磁化率值偏高 (成壤化作用伴随着新的细颗粒磁性矿物的形成和磁化率的增加) (表 1), 粒度偏细 (黏土含量增高) 的特点, 野外观测亚黏土层与北方黄土中古土壤具有类似的特征. 这些都说明了新港“砂山”剖面中的亚黏土层可能是在夏季风盛行、气候温暖湿润时、早期的风积砂层经过后期成壤化改造的结果.

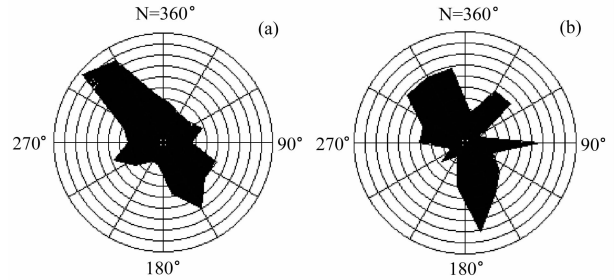


图 1 新港砂山最大主轴 (D_{max}) 玫瑰花图
(a) 砂层; (b) 亚黏土层.

Fig. 1 The rose diagram of declination of maximum susceptibility principal axis of sand dune sediment in Xingang
(a) Sand stratum; (b) Clayey stratum.

为了进一步讨论不同时段古风场的变化特征, 对 9 个砂层分别做了磁化率各向异性 (AMS) 三个主轴的赤平投影 (图 2) 和部分砂层的玫瑰花图 (图 3). 由图 2 和图 3 可见, 形成砂 1 层时其主风向为 NW-SE 向, 但此时最小主轴的倾角变化较大, 说明沉积环境不是太稳定. 可能有事件沉积. 在形成砂 2 层时风向发生了很大改变, 主风向由原来的 NW-SE 向为主, 变为 NE-SW 向为主, 并且最小主轴始终向 SE 方向倾斜, 说明此阶段沉积环境相对比较稳定, 这与利用磁组构参数得到的结论一致. 第 3 层风向回转到 NNW-SSE 方向, 但有些样品仍保持了砂 2 层时的 NE-SW 风向, 最小主轴向 NE 方向倾斜. 砂 4、砂 5 层的特点与砂 3 层相近, 主风向仍以 NNW-SSE 向为主, 但伴有其他风向, 总的特点是数据比较离散, 说明风力强度和风向都不是太稳定. 第 6 层主风向为 NW 向, 但磁化率椭球体最小轴的倾向由砂 5 层的 NE 向转为 SW 向, 方向也比较集中, 说明此时段, 古风场相对比较稳定. 从砂 7—砂 9 层, 主方向主要为 NW-SE 和 NNW-SSE 向, 但仍有其他方向的风的干扰, 尤其是砂 7 和砂 8 层的数据非常离散, 表现为 AMS 主轴倾角变化范围都较大, 说明在此期间无论是风力强度, 还是风向都很不稳定. 总体看来, 整个时期内的风向以 NW、NNW 向为主, 中

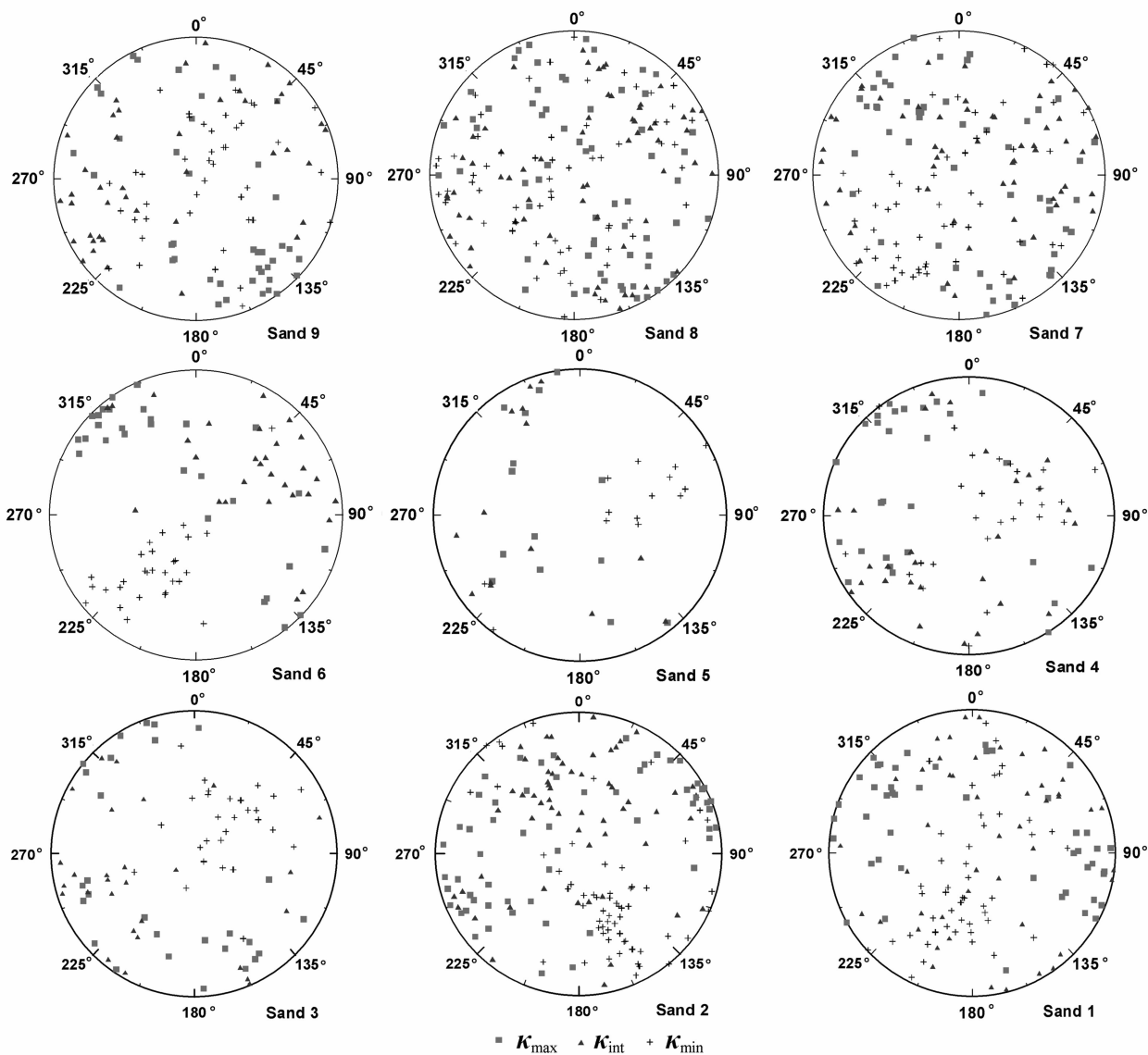


图 2 新港砂山剖面 9 个砂层 AMS 主轴等面积赤平投影图

Fig. 2 Stereographic projection of anisotropy of magnetic susceptibility ellipsoids of sand dune in Xingang

间夹杂干扰并未影响主体风向,变化最为剧烈的时期是第 2 层,风向发生了根本性的改变。

一般来说,风成沉积物的初始 AMS 主要由当时的地球引力和风力强度决定.地磁场和重力对风成沉积物磁化率各向异性影响较小^[2],从而各向异性主要受气流控制.长江中游广泛分布的砂山沉积主要受西北方向的冬季风和东南方向的夏季风的交替控制,一方面,寒冷的冬季风吹蚀江汉平原、赣江下游平原,使裸露的大片河湖滩地出现干旱化、“沙漠化”环境,河湖滩地上松散的沙物质被吹刮集聚,就近堆积(落在现今的湖滨—山前地带),形成砂丘堆积,即砂山.一方面,当夏季风盛行时,雨水充沛,气候温暖,使砂层经历成壤化作用.因此在剖面中会形成砂层和古土壤化的亚黏土层交替出现的现象。

4 结 论

通过对本剖面磁组构特征的研究,可以得出以下结论:

(1)新港风成砂剖面中砂层和亚黏土层的磁组构参数值具有较大的不同,砂层的 P 、 F 、 L 值明显大于亚黏土层的,但 κ 、 q 值小于亚黏土层的.砂层中 q 值较大(大多数 q 值都大于 0.5,少数大于 1.0)表明本区在形成砂层时,气候比较干冷,风力较强,风向也比较稳定.而发育黏土层时气候比较暖湿,风力较弱.同时砂层的物质来源为古长江及其支流赣江的河床沙,后经寒冷的偏北强风吹扬短距离搬运,在近岸地带堆积而成。

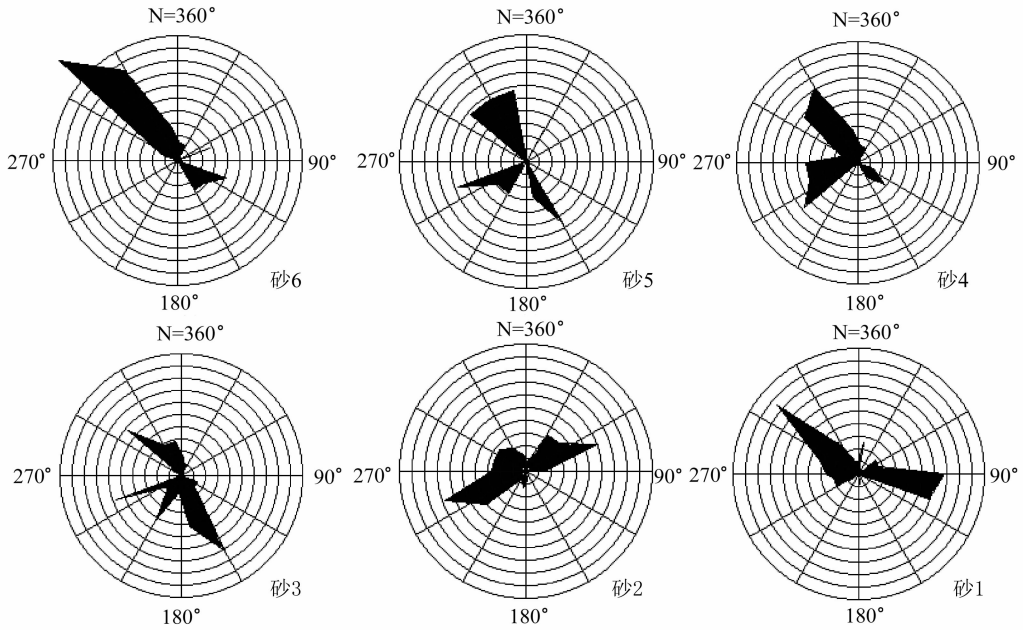


图 3 新港砂山剖面 1~6 个砂层的玫瑰花图

Fig. 3 The rose diagram of declination of maximum susceptibility principal axis of the sand dune sediment in Xingang

(2)不同的砂层其磁组构参数量值也不同,砂 2、砂 5、砂 6 层具有较大的 P 、 F 、 L 、 T 和较小的 q 值,砂 3、砂 8、砂 9 层却具有较小的 P 、 F 、 L 、 T 值和较大的 q 值.说明在形成砂 2、砂 5、砂 6 层时,气候最为寒冷,冬季风的风力最强、风速比较稳定,在形成砂 3、砂 8、砂 9 层时,气候较为温和,冬季风的风力较上述时段相对较弱.这与野外观察到的在砂 2、砂 6 层发育板状斜层理,砂层粒度较粗,以中-粗砂为主,黏土含量较少,而在砂 3、砂 8、砂 9 层时砂层粒度偏细,以中-细砂为主,黏土含量增多的结果一致.

(3)新港砂层比亚黏土层的磁化率各向异性椭球体最大主轴的偏角(D_{\max})具有一个较为明显的 NW-SE 的优势方向,说明当时形成砂山的这一时段,本区的主体风向比较稳定,风力较强,但伴随有其他方向的风的作用.

(4)新港砂山古风场的演变为:形成砂 1 层时其主风向为 NW-SE 向,沉积环境不是太稳定.可能伴随有事件沉积.在形成砂 2 层时主风向由原来的 NW-SE 向为主,变为 NE-SW 向为主,且该阶段沉积环境相对比较稳定.第 3 层风向回转到 NNW 方向,但有些样品仍保持了砂 2 层时的 NE-SW 风向.砂 4、砂 5 层的特点与砂 3 层相近,主风向仍以 NNW-SSE 向为主,但风向不如砂 3 层时稳定.第 6 层主风向仍为 NW 向为主,但部分样品为 SWW 向

分布,说明此时段,有两个不同方向的风力作用.从砂 7 到砂 9 层,主方向主要为 NW-SE 和 NNW-SSE 向,总体看来,整个时期内的风向以 NW、NNW 向为主,中间夹杂干扰并未影响主体风向,只有在第 2 砂层段,风向发生了根本性的改变.

(5)利用 AMS 主轴等面积赤平投影法,可以用来分析古风向的变化规律,从而为古气候研究提供了一种较简易有效的方法.

参考文献(References)

- [1] 黄孝刚,孙继敏.末次间冰期以来黄土-古土壤序列的磁组构特征及其指示的古风向.第四纪研究,2005,25(4):516~522
Huang X G, Sun J M. Study of magnetic fabrics in Chinese loess-paleosols since the last interglacial: implication of the paleowind direction. *Quaternary Sciences (in Chinese)*, 2005, 25(4): 516~522
- [2] 吴汉宁,岳乐平.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,1997,40(4):487~494
Wu H N, Yue L P. The anisotropy of magnetic susceptibility of aeolian dust sediment the paleowind field in Chinese loess plateau. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 1997, 40(4): 487~494
- [3] 孙继敏,丁仲礼,刘东生等.黄土与古土壤磁组构测定在重建冬季风风向上的初步应用.科学通报,1995,40(21):1976~1978
Sun J M, Ding Z L, Liu D S, et al. Primary application of magnetic susceptibility measurement of loess and paleosols for

- reconstruction of winter monsoon direction. *Chinese Sciences Bulletin (in Chinese)*, 1995, **40**(21):1976~1978
- [4] 吴海斌,陈发虎,王建民等. 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, 1998, **41**(6):811~817
Wu H B, Chen F H, Wang J M, et al. A study on the relationship between magnetic anisotropy of modern aeolian sediments and wind direction. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1998, **41**(6):811~817
- [5] 王建力,方小敏,张宇田等. 青藏高原东北边缘黄土磁化率各向异性揭示古风场的初步研究. 兰州大学学报(自然科学版), 1995, **31**(4):151~159
Wang J L, Fang X M, Zhang Y T, et al. The anisotropy of loess magnetic susceptibility in the Northeastern fringe of Qinghai-Xizang(Tibetan) plateau as an indicator of paleowind direction. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)* (in Chinese), 1995, **31**(4):151~159
- [6] 吴能友,段威武,刘 坚. 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, 1998, **18**(1):77~86
Wu N Y, Duan W W, Liu J. Preliminary discussion on Late Quaternary paleocurrent and paleoclimate history of the Bransfield strait, Antarctica: The magnetic fabric method. *Marine Geology & Quaternary Geology* (in Chinese), 1998, **18**(1):77~86
- [7] 侯红明,王宝贵,汤贤赞. 南极普里兹湾 NP93-2 柱样磁组构特征及其古气候意义. 地球物理学报, 1996, **39**(6):748~752
Hou H M, Wang B G, Tang X Z. Magnetic fabric characteristic of core NP93-2 from Prydz Bay, Antarctica and its paleoclimatic significance. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1996, **39**(6):748~752
- [8] Hroudá F. Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. *Geophys Survey*, 1982, **5**:37~82
- [9] 陈庆强,李从先,丛友滋. 沉积物磁组构与其动力沉积特征对应关系研究. 科学通报, 1998, **43**(11):1106~1109
Chen Q Q, Li C X, Cong Y Z. The study of relation between magnetic fabric of sediment and character of dynamic deposit. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 1998, **43**(11):1106~1109
- [10] 张玉芬,李长安,陈 亮等. 长江中游砂山的磁组构特征及古气候环境意义. 长江流域资源与环境(学报), 2008, **17**(3):481~485
Zhang Y F, Li C A, Chen L, et al. Magnetic fabric characteristics of aeolian sand-dune and its paleoclimatic and paleoenvironmental significance in the middle reaches of Yangtze river. *Resources and Environment in the Yangtze Basin* (in Chinese), 2008, **17**(3):481~485

(本文编辑 胡素芳)