

湖南衡阳盆地东缘白垩系风成沉积的发现及其古环境意义

黄乐清¹, 黄建中², 罗来¹, 王先辉¹, 刘耀荣¹, 梁恩云¹, 马慧英¹

1. 湖南省地质调查院, 长沙 410116

2. 湖南省地质矿产勘查开发局, 长沙 410011

摘要 首次报道了湘中南衡阳盆地东缘上白垩统红花套组中的风成沉积, 重新认识了该地区晚白垩世时期的古地理环境。研究区红花套组主要出露一套紫红色块状中-细粒长石石英砂岩、岩屑石英砂岩, 普遍见指示风成沙漠环境的巨型板状、楔状交错层理、双向交错层理、平行层理以及典型的风棱石; 镜下不含泥质、云母等悬移组分, 电镜下可见碟形坑、新月形撞击坑、上翻(平坦)节理片等, 综合分析后确认该套砂岩为风成沉积。该套风成砂岩具有重要的古环境意义: 风成砂岩的发现, 指示该时期为干热气候, 沙漠化、盐湖化明显, 食物的短缺可能导致衡阳盆地一带恐龙的迁徙; 依据沙丘前积纹层倾向特征, 恢复了湘中南乃至湖南地区的地表风带特征, 为佐证衡阳盆地与其周缘红盆相连通提供一种新的依据。该发现为湖南省的风成沉积领域提供了宝贵的研究材料。

关键词 风成沉积; 古气候; 白垩纪; 红花套组; 衡阳盆地

第一作者简介 黄乐清, 男, 1985年出生, 工程师, 区域地质调查, E-mail: 289773254@qq.com

中图分类号 P539 **文献标志码** A

“温室效应”已经成为当代科学界所面临的一个重大科学问题, 而地质历史时期的古气候反演及其所产生的环境与生物效应的研究能够为当代“温室效应”的影响和结果提供事实依据。白垩纪是地球历史中距今最近的温室效应活动期, 是了解在地球温室效应下气候状态的最佳时代, 是研究地球“温室气候”的典型范例。近年来日益受到国际地球科学界的广泛关注^[1-9]。

前人通过岩石相、同位素地化、古生物以及水文地质等多种分析手段对白垩纪时期的古气候展开了一系列研究, 已经在黏土矿物、孢粉化石、膏盐沉积、古土壤、冰川泥石流、冰筏沉积、大洋红层及缺氧事件等方面取得了一系列进展^[8,10-14], 这些研究指标有个共同特点, 均属于无向地质标志, 只能间接地反映古气候特征。部分学者从古气候模拟的角度对白垩纪古气候进行研究, 但模拟的结果与实际差别较大甚至结论相悖, 主要原因是由于白垩纪陆相古气候模拟的关键边界条件尚未完全确定^[4,15]。而沙漠沉积作为大气环流直接作用的产物, 所记录的沉积旋回、

水循环和风向变化等是最直接的有向地质标志, 可作为气候变化的直接证据^[16]。因此, 沙漠沉积的研究不仅是验证大气环流模拟结果的可靠地质记录, 还有可能获取古气候模拟的关键边界条件。此外, 风成沉积除对气候有精确的指示意义外, 对构造隆升与剥蚀也有重要反映。如Chen *et al.*^[17]利用Nd、Sr同位素追踪风尘来源并识别祁连山与阿勒泰山不同的物质贡献, 进而分析两者不同的隆升速率。

国内对古沙漠沉积的报道和研究相比沉积学其他方向要薄弱很多, 其研究的时代主要集中在白垩纪及古近纪。以江新胜等^[18-23]、梅冥相等^[24-27]学者为代表, 主要研究了塔里木盆地、甘肃酒泉盆地、鄂尔多斯盆地、四川盆地、云南思茅盆地、苏北盆地及江西信江盆地等地的风成沙漠沉积。截至目前, 尚未见衡阳盆地风成沉积的报道。笔者在对湘中衡阳盆地白垩系地层展开调查中发现了规模宏大的风成沙丘, 本文从白垩纪风成沙丘的野外实际出发, 综合岩石薄片、粒度、电镜等实验分析手段, 对晚白垩世时期衡阳盆地的古地理及其与沉积型矿产的关系、古

收稿日期: 2018-08-16; 收修稿日期: 2018-10-20

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2017JJ3139); 中国地质调查局项目(DD20160032-09) [Foundation: National Natural Science Foundation of Hunan, No.2017JJ3139; The Project of China Geological Survey, No.DD20160032-09]

风向、大气环流样式等方面进行初步研究,下面一一展开讨论。

1 区域地质概况

在中侏罗世末期燕山运动的强烈作用下,湖南省内普遍褶皱上升成陆,接受剥蚀、夷平,至白垩纪中晚期,进入裂解阶段,由此形成了一系列NE—NNE方向的断陷盆地^[28]。衡阳盆地、醴攸盆地便是这一系列宽窄不等的断陷相间排列盆地的其中之一。衡阳盆地面积约5 200 km²,大地构造区位上位于扬子准地台江南台隆东段与华南褶皱系的结合部位,东北部与湘东燕山块断带相邻,南部为未临南北带和阳明山—塔山隆起带,是新华夏系多字型构造与南北向构造、祁阳山字型构造复合的结果,为一内陆湖相沉积型盆地^[29-32]。衡阳盆地白垩系多角度不整合于前白垩系之上,盆地充填序列自下而上可分为石门组、东井组、栏垅组、神皇山组、红花套组、戴家坪组、

车江组等7个岩石地层单位,其中,红花套组为本文的研究目的层位。

本次研究区位于衡阳盆地东缘,研究剖面位于安仁县渡口乡(图1),西距衡阳市约60 km。研究层位属上白垩统红花园组,以大套出现紫红色块状长石石英砂岩为特征。依据近年来湖南省地质调查院1:5万区调项目(铁丝塘项目)的最新调查成果,本组可进一步细分为下、中、上3个岩性段,其中下段岩性为紫红色厚—块状细粒长石石英砂岩、不等粒长石石英砂岩夹复成份砾岩透镜体为主,偶见膏盐假晶;中段岩性为紫红色薄—中层状泥岩、泥质粉砂岩为主,夹薄层细粒长石石英砂岩;而上段岩性为紫红色块状细—中粒长石石英砂岩、块状不等粒长石石英砂岩为主,见大型楔状、板状交错层理及羽状交错层理(图2)。由于剖面顶部缺失,使风成砂岩段厚度不详,可见厚度约80 m。

区域上,该组分布较广泛,除玩麻盆地外,湖南省内诸盆地皆有存在。各处所见岩性大体与研究区

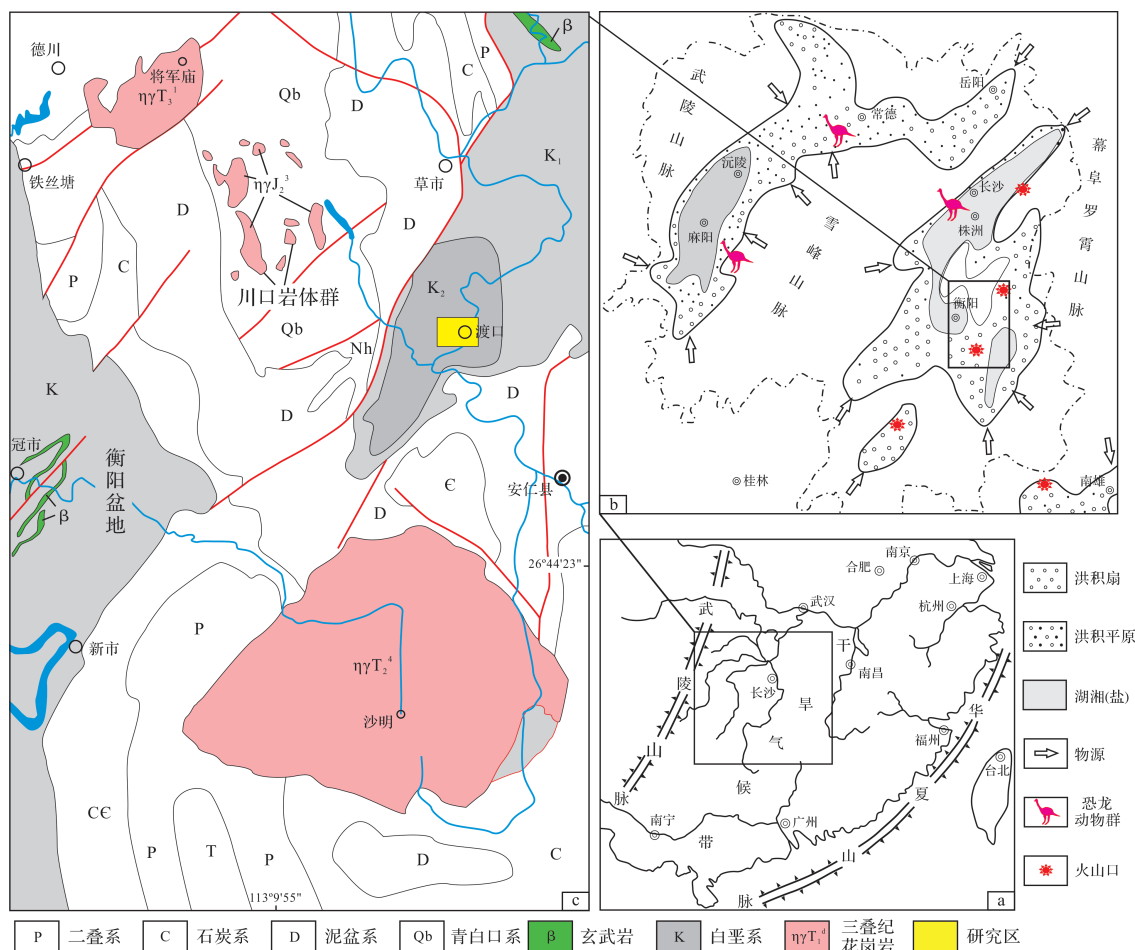


图1 研究区位置及区域地质特征

Fig.1 Location and regional geological characteristics of the research area

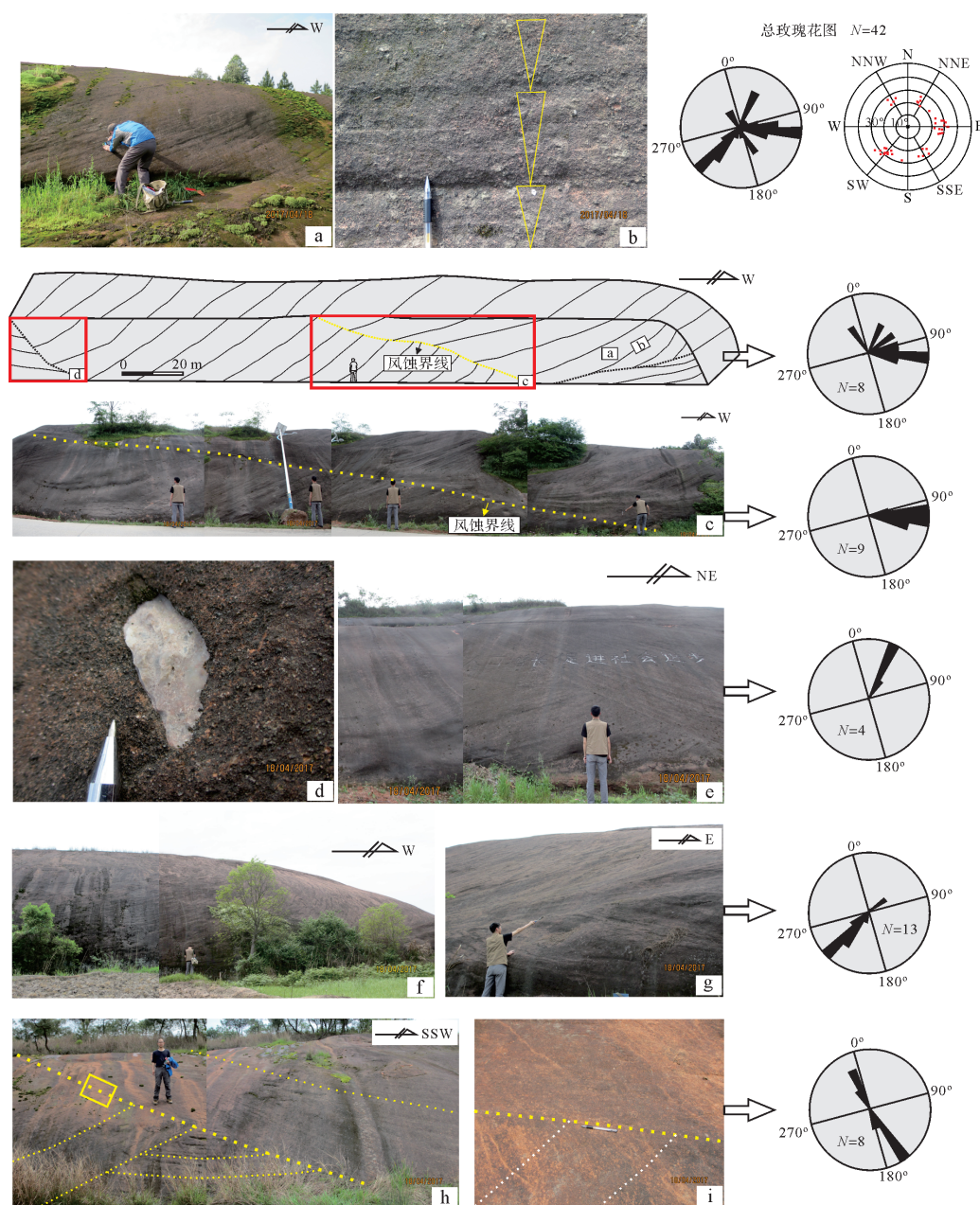


图2 湖南衡阳盆地东缘渡口地区风成沙丘特征及其古风向玫瑰花图

a. 沙丘侧面大型板状交错层理,前积层倾向E,为横向沙丘;b. 条纹码砂岩特征,呈反粒序,加积型,照片为平行前积层方向摄制;c,e. 沙丘侧面大型横切剖面特征,可见露头距离达百余米,见大型风蚀界面,为横向沙丘;d. 风棱石,成分为石英脉石,棱线分明;f. 巨型横向沙丘宏观特征,高度达30余米,前积层倾向E,自上而下稳定展布;g. SW前积层倾向的沙丘叠置在前积层倾向E的巨型沙丘之上;h. 多向沙丘叠置在巨型沙丘之上,从左至右,上部沙丘前积层分别倾向NE,SSW,下部沙丘倾向E;i. 风蚀界面,g的局部放大,平直,粒度均匀,无砾石

Fig.2 Characteristics of eolian dunes and rose diagrams of the paleowind directions at the eastern margin of the Hengyang Basin, Hunan province

剖面相同,其上下以砂岩为主,中部夹较多的粉砂岩及泥岩,值得注意的是,该组在衡阳盆地东南部(研究区一带)厚度较大,厚达1 000余米(湖南省区域地质志,2013)。另外,该组在江陵凹陷亦广泛分布,并发现具有大型板状交错层理的风成砂和风棱石等沙漠沉积标志^[33-35]。

2 沉积构造

2.1 沉积构造特征

风成沉积的沉积构造与水成沉积均具有明显的区别,是判别风成和水成环境的最有效的标志^[23]。通过野外剖面观测,渡口乡地区上白垩统红花套组发育

风成沉积,主要发育沙丘相。可识别的沙丘形态有:横向沙丘、新月形沙丘,另见少量抛物线沙丘及纵向沙丘等,规模宏大,单个沙丘绵延几百米至上千米,沉积特征稳定,符合大型沙丘、巨型沙丘的特点。

露头宏观尺度上,剖面中普遍可见大型、巨型平板状、楔板状交错层理,层理类型复杂(图2)。在沙源丰富背景下形成的横向沙丘中,交错层系呈平板状,前积层产状较陡,一般约 $22^{\circ}\sim 30^{\circ}$ (图2a~c,e),亦见可达 33° 的前积角,近于休止角(34°);研究区单个沙丘高度可达25 m以上,且前积纹层连续性非常好,延展长度达150 m以上,具有较好的观赏价值(图2f);在沙丘顶部追踪前积纹层走向极为稳定,其前积层展开角很小(图2a),是本次研究盛行风向及风能的最佳对象;另外的横向沙丘亚类中,多数沙丘前积层倾向展开角小于 145° ,个别为 65° ,根据MeKee^[36]的研究表明,为新月形沙丘;除上述之外,局部见少量大型羽状交错层理或多向“人”字形交错层理,单个交错层理厚度极大,前积层产状相对平缓,一般约 $15^{\circ}\sim 24^{\circ}$ (图2g)。反向沙丘中明显见两组不同倾向的前积纹层,相互截切,往返交替,构造复杂(图2g,h),其中楔形交错层组要比平板状的多,显示受相反方向的两组风的控制(可能是季节性的)。在渡口乡石冲村一带(X: $26^{\circ}47'01''$, Y: $113^{\circ}13'11''$, Z: 78 m),可见横向上两个沙丘相邻排列,沙丘、丘间砂席沉积特征清晰可见,单个沙丘可见高度约15~26 m,丘间两侧砂层倾向相反(图2h)。

米级尺度上,常见有韵律构造,并见有典型的风棱石。韵律构造是由于砂质颗粒堆积在沙丘顶部,在重力滑塌作用下,形成砂岩颗粒粗—细递变的韵律依次叠置而成,俗称“条形码”砂岩,单个条形码韵律厚约4~20 cm(图2b),这是水成沉积中无法见到的^[23-24]。风棱石主要有石英脉石构成,大小约2 cm×4 cm,棱线分明,呈刀口边,各磨光面交线呈直线状(图2d);另外,丘间沉积较薄,发育平行层理,单层厚度约为18~30 cm,水平展布,多被沙丘截切,为反粒序的风成沙席沉积,且少见水道改造,越靠近盆地中心越加明显。

以上这些特征,均与众多资料描述的风成沙丘交错层理特征相吻合,尤其是沙丘的规模宏大,前积纹层快速变向,陡倾角等是水成沉积构造所不具备的,本文认为该套沙丘砂体应属于典型的风成沙丘沉积无疑。

2.2 前积层方位及韵律特征

参照江新胜等^[19]的研究方法,本文不考虑小型床沙的沙波纹等敏感性沉积构造,采用大型床沙形成的巨型沙丘和中型床沙形成的沙丘的运移方向即前积层倾向测量作为恢复古风向的依据。在此前提下,依据朱日祥等^[37]的古地磁研究结果,白垩纪以来中国经历过大规模的顺时针旋转。因此,在玫瑰花图投点前对所有数据进行了逆时针旋转 15° 作为权衡校正值处理。同时,所测剖面地层倾角平缓,一般均小于 5° ,不须作赤平投影校正。

据研究,大、巨型平板状交错层理多出现在横向沙丘之中,且横向沙丘的脊走向与风向垂直的,最能精确反映风向。因此,本次统计的主要沙丘对象为横向沙丘及新月形沙丘。在统计之前,需提示:沙丘的前积纹层在平面上并不规则,存在弯曲,选择中央部位倾向、倾角;其次,对纵向沙丘、反向沙丘也进行统计;其三,按矢量的原则对过于发散的风向进行合并。笔者在区内共测量剖面2条,地质点9个,倾向数据42个。

从数据所投的玫瑰花图(图2)来看,研究区古风向以东向矢量为主,占统计数据的40%~50%以上,西南向矢量次之,少量北北西向和南南东向矢量,另还有特别的一组倾向北东方向($20^{\circ}\sim 35^{\circ}$)。且笔者在野外注意到:北北西向和南南东向矢量多出现在反向沙丘中,成对出现,该多向沙丘常叠置在巨型沙丘(前积层东倾)之上(图2g),其形成的控制因素将在本文后面章节做出解释。

3 岩石学特征

3.1 砂岩成分

研究区风成砂岩主要见于红花套组上段,主体岩性为中—细粒长石石英砂岩类,少量岩屑石英砂岩(图3)。镜下薄片显示,渡口地区风成沙丘以中—细粒结构为主,石英含量高,含量大于75%,长石普遍可见,一般约5%~16%,局部可达20%;岩屑类型丰富,主要有硅质岩、脉石英等稳定岩屑,少量低级变质岩岩屑(如千枚岩岩屑、板岩岩屑等)。重矿物主要见有电气石、锆石等。颗粒支撑结构,胶结物发育,主要为钙质胶结物和硅质胶结物,颗粒周边普遍可见铁锰质环边(图3),孔隙发育。钙质胶结物为方解石,呈细小粒状,沿颗粒表面分布,形成似珍珠状嵌边,为颗粒表面钙质薄膜重结晶而成。颗粒分

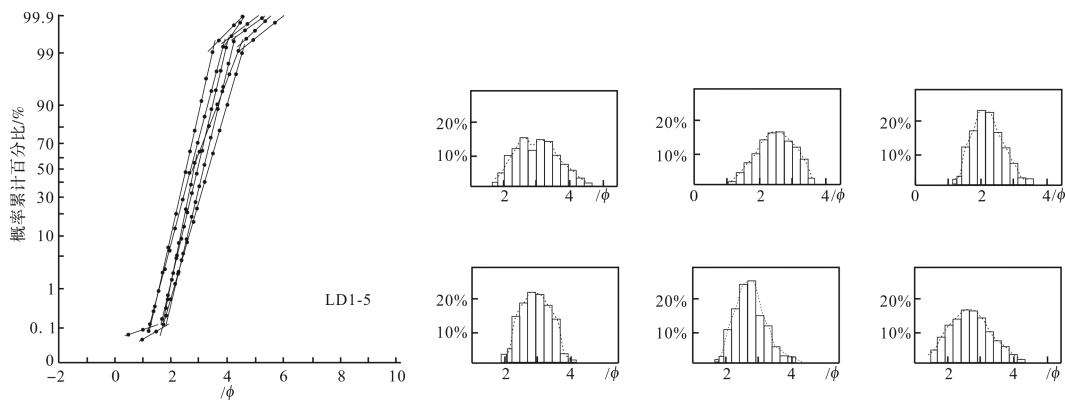


图3 湖南衡阳盆地东缘渡口地区风成砂岩粒度分布特征

Fig.3 Size distributions of eolian sandstones in the Dukou area, eastern margin of Hengyang Basin, Hunan province

选中等以上,次圆状,少量次棱角状。

3.2 粒度特征

沉积物的粒度是沉积物的重要特征之一,尤其对气候变化反映敏感,是反映碎屑颗粒搬运和沉积介质(水和风)的动力条件的一个重要标志^[38-39]。本文主要通过粒度分布概率直方图、累计曲线及萨胡函数公式来进行环境判别,分析测试在成都理工大学沉积地质研究院完成,仪器型号为NIKON ECLIPSE LV100POL。通过对研究区红花套组6个砂岩样品粒度分析资料的图解及数值计算,得出C值、中值M、平均粒径Mz、标准偏差σ₁、偏度Sk₁和峰度Kg几种粒度参数。样品粒度分析参数见表1。

可以看出,研究区风成砂颗粒平均粒径Mz主要集中在2.12~3.06 φ之间,平均值为2.64,属于中—细砂岩。标准偏差σ₁平均为0.81,主要集中在0.56~1.03之间,根据弗里德曼等^[40]的判别标准,分选性总体上较好,变化范围较小。粒度分布频率直方图上主要呈单峰态,少量双峰态,双峰态中,粗尾部分主峰粒径约1.83~2.5 φ(即0.18~0.28 mm),细粒主峰粒径约2.5~4.2 φ(即0.05~0.18 mm)。峰度Kg平均值为1.05,曲线尖锐程度属于中等,粒度样本服从正态分布。偏度Sk₁平均值0.07,介于区间-0.15~0.26,多数

为弱正偏态,近于对称。由分析结果中低标准差σ₁、近于对称的偏度及单峰性(图3),反映出搬运介质动力比较稳定,且砂质来源较为单一。

根据上述粒度分析参数值,对研究区砂岩绘制粒度概率累积曲线及其频率直方图,显示研究区以高斜无滚动二段式或三段式为主,基本不含滚动组分,跳跃总体含量高,部分具二个跳跃总体,斜率约70°~78°,含悬浮物少,与现代河道砂粒相区别;同时,由于滩坝与风成沙丘环境的砂不易区分,故需进一步用萨胡判别函数 $Y=-3.568M_z+3.7016\sigma_1^2-2.07665Sk_1+3.1135Kg$ 计算判别值,当Y<-2.741 1时为风成沙丘,且平均值约-3.097 3。反之则为滩坝,经计算(表1),其中1个样品值大于-2.741 1,5个小于-2.741 1。因此,初步判定衡阳盆地东缘渡口地区砂岩为风成砂,主要发育风成沙丘,可能部分砂体受到水体的改造。

3.3 颗粒表面特征

石英具有稳定的物理化学性能,在各种地质营力的搬运和沉积过程中形成的微观形貌特征能够得到较好地保存。这些表面形态特征可以用来反映沉积物的源区、搬运动力、沉积环境与演化历史等信息^[23,41-42]。长期以来,石英颗粒的磨圆度一直是判别古代风成砂

表1 衡阳盆地东缘渡口地区砂岩粒度分析参数

Table 1 Grain size parameters of sandstone in the Dukou area, eastern margin of Hengyang Basin, Hunan province

样品号	岩性	中值/mm	C值/mm	平均粒径Mz/φ	标准偏差σ ₁ /mm	偏度/Sk ₁	峰度/Kg	萨胡判别函数
LD1-1	中—细粒长石石英砂岩	0.14	0.29	2.84	0.75	0.04	1.18	-4.447 62
LD1-2	细粒岩屑石英砂岩	0.13	0.24	2.94	1.03	0.07	0.91	-3.887 16
LD1-3	中—细粒长石石英砂岩	0.16	0.34	2.64	0.67	0.26	1.05	-5.042 38
LD1-4	细—中粒长石石英砂岩	0.21	0.38	2.25	0.88	-0.15	1.04	-1.617 43
LD1-5	细粒岩屑石英砂岩	0.12	0.28	3.06	0.94	0.16	0.99	-4.893 3
LD1-6	细—中粒岩屑石英砂岩	0.23	0.37	2.12	0.56	0.06	1.13	-3.010 73

的重要标志之一,本文亦采用这类方法进行判定。

根据普通薄片分析结果,挑选了2件具有风成成因的砂岩样并做相应的处理。具体步骤为:取砂粒约15 g,并对其放入烘箱干燥、裂解;再加入浓度为30%的双氧水溶液静置48 h,然后进行加热处理,去除有机质,并反复用蒸馏水冲洗干净;在15%盐酸溶液中煮沸10分钟,除去碳酸盐和铁氧化物;接着至少洗用去离子水洗三次,直到倒出的水是清澈的,再将样品放入烤箱,设置60℃直至烘干;随机选取100~200个颗粒分制成4个样品,并均匀的粘到双面胶上。然后将样品放在金属托上均匀镀上钼合金,进行了扫描电镜分析和能谱测试分析,测试分析在成都市文物考古研究所完成,仪器型号为Phenom proX_EDS。详细操作步骤可见参考文献^[43-45]。在电镜实验开展前,在双目镜下可见石英颗粒表面具有毛玻璃化的“霜面”,砂质颗粒表面发育褐红色的铁质薄膜,显示风成砂岩的主要标志。

分析结果表明,石英颗粒磨圆度较好(图4a, c, d),个别颗粒具有中等浮雕(图4e),可见明显的碟形撞击坑、新月型撞击坑、上翻(平坦)解理薄片、贝壳状纹饰等机械成因特征(图4f);溶蚀沟、微洞及溶蚀裂缝等SiO₂溶解作用发育,同时,硅质球、硅质鳞片等硅质沉淀作用的化学成因特征均可见到(图4g);而附生物特征,主要为石英颗粒表面的红褐色的铁锰质薄膜(图4a),因此,综上所述,该砂岩样品具有典型的风成砂岩特征。与经典风成砂岩不同的是,研究区砂岩颗粒样品可见中等浮雕,表明其搬运时间和长距较短,在风中并未经过长期磨蚀,部分轮廓被保留,这也与区内砂岩样品中多含钾长石、成熟度中等的特征相吻合。

4 讨论

4.1 古地表风带及古气候指示

由于太阳辐射和地球自转,在南、北半球各出现了四个气压带(即赤道低压带、副热高压带、副极地低压带及极地高压带)和四个风带(即赤道无风带、东北/东南信风带、盛行西风带和极地东风带)^[46]。其中副热高压带盛行下沉气流,气候十分干旱,其两侧的西风与信风是地球中低纬度盛行风强烈活动带和沙漠多发带。相应的,北半球中低纬度地区以行星环流为主,主要为东北风和西风。全球最典型的例子为北非萨哈拉大沙漠。Google Earth遥感影像上显

示,萨哈拉大沙漠沙丘脊线连绵可达三千多公里,极为壮观,清楚地将西风/东北信风切变带展现出来(图5),沙丘的排列和运移方向亦清晰明了。

据前人研究成果,白垩纪时期为极端温室气候阶段,其古气温超过了地质历史上其他任何一个时期^[10]。而衡阳盆地在白垩纪时期正好处于副热高压带之上,由于这一叠加效应,造成了气候的异常炎热和干燥,这是导致衡阳盆地沙漠化的根本原因。

Cooke *et al.*^[48]及江新胜等^[18-22]研究了白垩纪和古近纪期间沙漠时空分布,并且探索了当时沙漠的纬带性分布、干旱气候成因等,其结果表明:晚白垩世东亚存在一个副热带高压带,当时以行星环流为主(一级环流),且存在气候带漂变,主要盛行东北风和西风。研究区所统计的古风向亦表明衡阳盆地在晚白垩世时期沙丘主要受西风和东北风控制。这与江新胜等^[18-22]研究同纬度的四川盆地、信江盆地白垩纪沙漠得出的古风向结论几乎完全相同,具有可靠的对比性。依据前人的研究结论,笔者推测,研究区绵延上公里、规模宏大的巨型横向沙丘,发育东倾向和南西倾向交错层理,这种沙丘同样是在长周期的行星环流格局的控制下形成的。

同时,叠置在巨型沙丘之上的近南北倾向(SSE—NNW)的多向沙丘(图2h),这又如何解释呢?笔者根据白垩世时期,地球上各大陆块、大洋的分布特点,推测可能是一种在季风影响下的砂丘改造。季风是由海陆分布、大气环流、大陆地形等因素造成的,以一年为周期的大范围的冬夏季节盛行风向相反的现象。作为中—低纬地区地球气候系统的重要组成部分,季风的形成演化和未来变化趋势一直是古气候和现代气候研究的重要内容^[49]。白垩纪时期,东冈瓦纳古陆大陆(包括大印度板块、马达加斯加陆块、南极洲板块和澳大利亚板块)向南漂移,与非洲板块分离,印度—马达加斯加板块顺时针旋转远离非洲,至晚白垩世,新特提斯洋呈东西向展布并朝东呈巨型喇叭状开口(图5),陆—海的不同季节受热不均容易形成近南北向运移的夏季风与冬季风(二级环流)。江新胜等^[18-20]提出白垩纪时期存在强烈的东南向及南北向季风作用,对行星环流格局产生了干扰。据此,笔者倾向于将发育近南北倾向的多向沙丘解释为近南—北向季风所控制,这也符合短期床沙移动形成的小型沙丘常叠置于长期床沙移动形成的巨型沙丘之上这一原理。

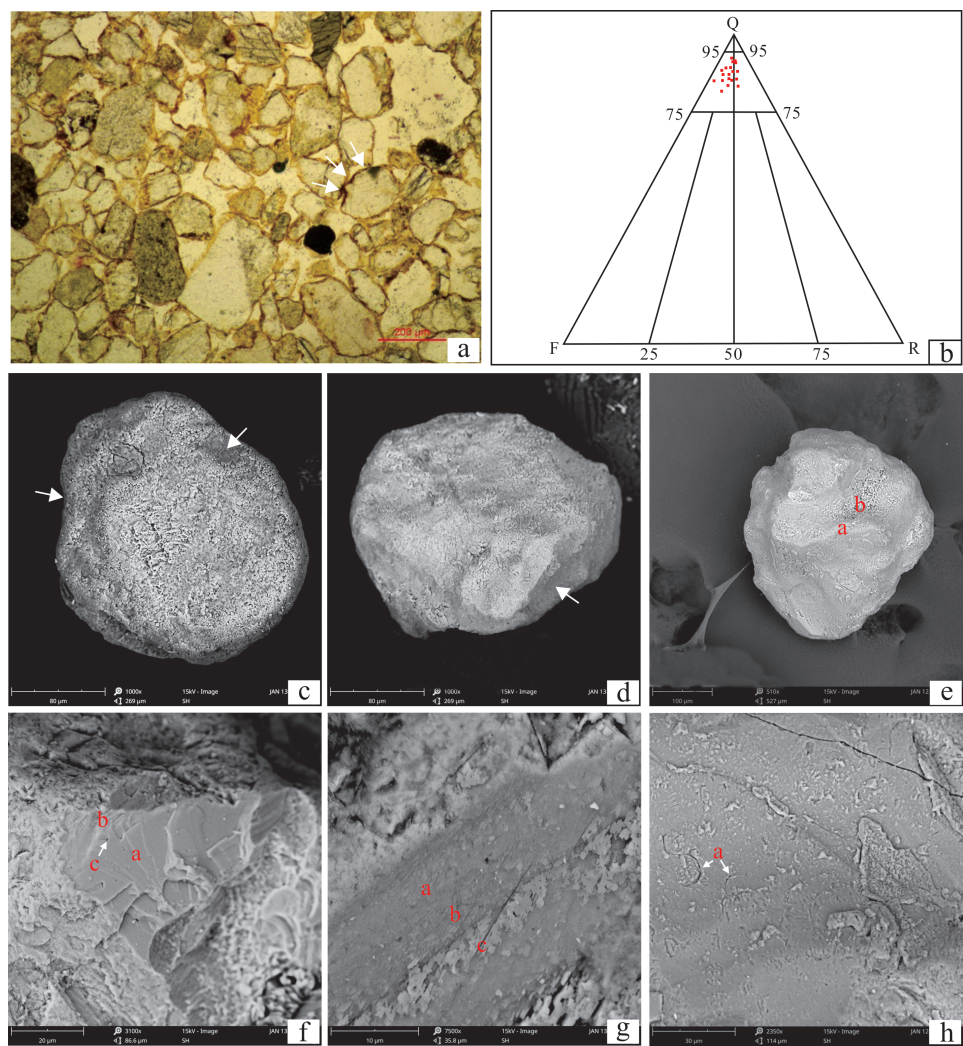


图4 湖南衡阳盆地东缘渡口地区红花套组砂岩类型及镜下微观特征

a. 颗粒间为点一线接触,中等分选,次圆状,单偏光,石英颗粒表面铁锰质环边胶结物(白色箭头),红花套组;b. 砂岩类型投点;c-h. 石英颗粒的显微照片;c, d. 圆形颗粒,有明显的弯曲凹槽(箭头),颗粒的磨砂外观与表面V形撞击及裂纹的存在有关;e. 河流沉积沙粒,带低浮雕和球根状边缘的圆形纹理;f. 贝壳状断口面的细节及其形成的弧形(a)和(b),(c)为溶蚀微孔,具有规则的圆形轮廓;g. 二氧化硅沉淀的细节。在二氧化硅快速沉淀的第一阶段,形成二氧化硅小球(a),当沉淀继续发生,小球开始聚集形成 SiO_2 的鳞片(b),并逐渐演变成 SiO_2 薄膜(c);h. 新月形撞击痕迹,指示该颗粒经历过风尘中运输

Fig.4 Thin-section micrograph and rock types of eolian sandstones of the Honghuatao province Formation, eastern margin of Hengyang Basin, Hunan province

另外,北东方向($20^{\circ}\sim 35^{\circ}$)前积层在研究区亦可见,是否由于衡阳盆地更靠近古太平洋,强烈的季风作用将破坏行星环流格局?亦或是与该时期东部沿海一带的海岸隆起古地形有关?还需做进一步的具体研究。总之,衡阳盆地白垩纪时期的盛行风以西风为主,东北风为次,可能间歇有东南—西北向风。研究区与四川盆地、信江盆地处于相同的古风带上,属于中国白垩纪沙漠带^[19]的东延部分。本文中风成沉积的发现,为衡阳盆地位于副热高压带及其气候带漂变提供了佐证资料,证实了东亚地区行星风系及季风环流格局的存在。

4.2 古地理展布及沉积模式

长期以来,湖南白垩系各个红盆都是作为独立湖盆看待。而笔者注意到衡阳残留盆地与醴攸残留盆地地表露头相隔最近处不足10 km(图1),在晚白垩世时期,是否属于两个完全独立相隔的盆地,值得讨论。这个问题直接关系到该时期湖盆规模的恢复,进而对其赋存的沉积型矿产储量存在认知上的巨大偏差。笔者通过相邻盆地两侧的实地路线地质调查,结合本次风成沉积的发现,认为这两个盆地至少在晚白垩世以前是相连通的。依据主要来自两个方面。1)证明的关键在于两者之间的川口隆起带是

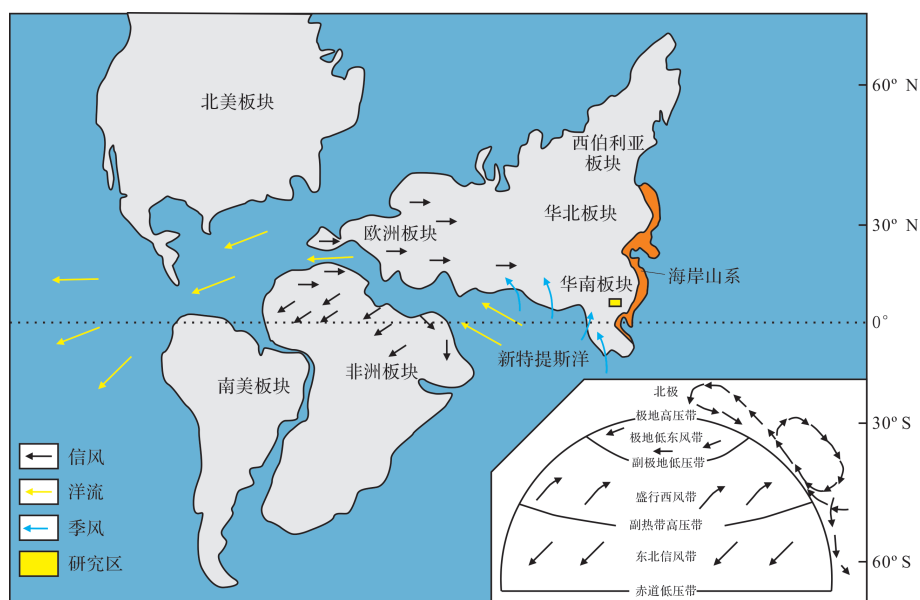


图5 白垩纪晚期海陆分布(距今约 100 ± 10 Ma, 据李江海等^[47], 有修改)

Fig.5 Global distribution of ocean and land in the Upper Cretaceous
(about 100 ± 10 Ma, modified from Li *et al.*^[47])

否在晚白垩世时期隆升(图1c),阻隔了白垩世时期衡阳大湖盆。在两个盆地之间的隆起带,分布有一系列将军庙岩体、川口岩体等岩体群。区域资料表明1,岩体群年龄介于 $(223.1 \pm 2.6) \sim (395.7 \pm 2.7)$ Ma之间,均不能反映白垩纪时期的抬升。2)本次风成沙丘的发现表明,横向空间上沙丘相与衡阳盆地的咸湖相沉积(戴家坪组)是连续的,符合瓦尔特相律;其次,从区域古地理来看,红花套组新发现的沙丘属于风成沙漠环境,延绵上公里的沙丘显示了古沙漠规模的宏大,反映出该时期较为宽阔的湖平面,给风的运移创造了有利条件。其三,风向研究表明,巨型沙丘砂质来源于西部。而现代沙漠研究表明,绝大部分沙漠砂砾迁移时距地面仅4 cm^[50],所以在我国北方用仅高20 cm、长宽1 m×1 m的草方格就可以用来固沙。虽然沙粒的移动与沙丘的移动有所区别,但是显然,如果中间存在拔地而起的隔档,则在靠近山脉的背风一侧难以形成规模如此大的横向沙丘(图2,6),这一现象在现代撒哈拉沙漠西部毛里塔尼亚的阿塔尔等地的山脉区也有表现。而且,笔者在醴攸盆地的西缘一带(所谓的川口隆起带周围)调查时,并没有发现明显的盆地边缘相(山麓相)沉积,而是靠近湖盆中心的戴家坪组钙质泥岩与断层直接接触。因此,笔者认为川口隆起带这一隔档山脊,在白垩世时期不存在的可能性较大,衡阳盆地与醴攸盆地极有可能是同一个古湖盆。规

模宏大的巨型沙丘等风成沉积的发现,佐证了衡阳盆地与醴攸盆地相互连通的认识^[51]。

此外,实测剖面过程中,于红花套组地层中发现了大量的滑坡型卷曲层理、递变层理及同生砾石等,且王伏泉^[52]、钟建华等^[53-54]均对这些特殊软沉积变形现象进行过深入报道,在此不作复述。那么,这些软沉积物变形是否能反映古隆起呢?从统计这些变形层理来看,其具有单层发育,变形强度不大,垂向沉积序列上不具有强烈进积特点。笔者认为其规模不构成古隆起响应,而更可能是在强烈湖平面下降过程中,三角洲斜坡上或同生断裂带的沉积物,在古地震等触发下发生滑动所致,亦有可能是近源短途河流暴发性的高密度洪水冲入湖底造成的。

4.3 与沉积型矿产及其他资源的关系

衡阳盆地及其周边地区矿产资源丰富。其中,沉积型矿床为该区常见矿床类型,有砂岩型铜铀矿、碳硅泥岩型铀矿、蒸发成因盐矿等^[54-56]。

风成沙漠沉积指示了异常干旱的气候环境,在这种地理环境下,常伴生有许多蒸发盐矿。如衡阳市著名的茶山坳盐矿,是中国特大型岩盐矿床之一。虽然这些盐矿已具规模,但其成矿背景却研究甚少。显然,盐矿的形成与本文研究的沙漠事件高度契合,在时间上是于干旱的沙漠时期之后,在空间上是紧邻于东部沙漠环境及其残余沙漠之旁。此次风成沉

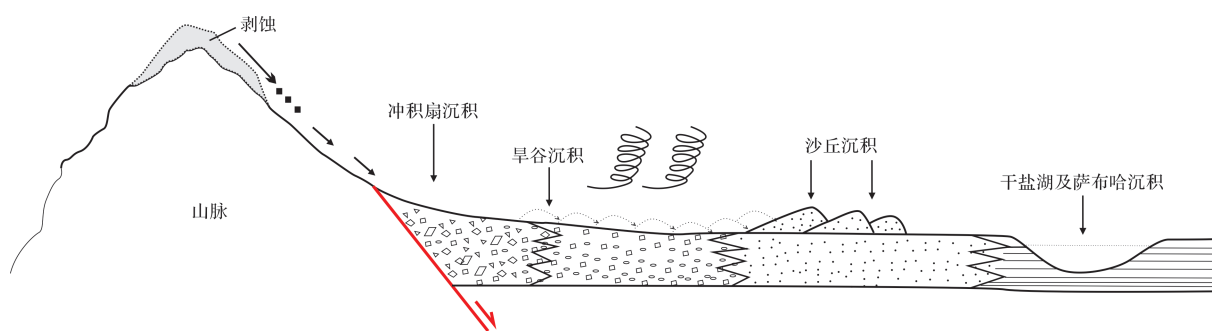


图6 衡阳盆地沙漠沉积体系剖面示意图(盆山型)

Fig.6 Desert depositional system, Hengyang Basin (basin-range type)

积的发现,提供了一种新的思路,有助于从气候带的分布和漂变角度,系统解释中南地区沙漠化和盐湖化的成因。

此外,据盐矿的成矿期次研究^[57-59],在蒸发盆地蒸发岩中,大陆盐湖膏盐类矿物的晶出次序大致为碳酸盐类→白云岩类→石膏→钙芒硝→石盐→钾盐。云南的思茅盆地发现了风成沉积,并且产出钾盐^[60-61],同样江汉盆地红花套组地层也发现了风成沙丘,并且盛产富含钾、锂、铷、铯、溴、碘、硼元素的卤水^[33-35,59]。那么,作为与之同时代、类似古地理条件的衡阳盆地,有没有可能富集钾盐矿资源呢?笔者从构造—地形、气候、物源条件3个方面对湖南地区中—新生代成盐成钾条件展开初步探讨。

1)构造—地形条件方面,在中生代特别是白垩纪时期,东亚地区包括华南陆块由于洋壳向陆俯冲周缘发育安第斯型高地,有效阻隔海洋暖湿气流的向陆输送。地形上,衡阳盆地及周缘各个次级盆地处于相对封闭状态,减少了盐类物质的带出。2)气候条件方面,在中生代晚期,副热带高压带由南向北迁移,控制华南陆块主要地区。气流下沉,气候干旱少雨,蒸发量强,本次在衡阳盆地首次大面积发现风成沉积,并且风带恢复指示西风和东北风就是强有力的证据。3)物源条件方面,以江陵凹陷、衡阳盆地对象。首先,该盆地周缘发育大面积加里东期、印支期岩体,邻区较大的岩体有关帝庙岩体、南岳岩体、将军庙岩体、五峰仙岩体及塔山岩体等(图1),具备丰富的K元素来源。如衡阳盆地周缘的将军庙花岗岩体 K_2O 、Li的高值分别可达5.42%、 220×10^{-6} ,K含量在 $3.47 \times 10^{-6} \sim 4.49 \times 10^{-2}$ 范围内^①,同时,盆地内白垩系红层中碱性玄武岩的多期喷发为盆地提供了大量的钾质来源。目前已发现与石盐矿体伴生的 K^+ 品位

为0.086%^[55]。总而言之,从构造—气候—物源三方面^①条件来说,湖南衡阳盆地具备较好的成盐成钾条件。当然,本文仅作初步推测,具体有没有钾盐,需要做进一步的调查和研究工作加以确认。

4.4 对古生态的影响

极端气候条件下形成的沙漠化必然对古生态环境产生影响。如许欢等^[62]研究发现风成砂体的发育对生物群的发展起制约作用,与燕辽生物群、热河生物群的演替过程呈耦合关系。白垩纪时期,食物链的最顶端当属(肉食性)恐龙动物群,其生活习性更容易受环境变迁的影响。统计白垩纪时期湖南的恐龙化石资源发现,衡阳盆地及其周缘晚白垩世时期有大量恐龙蛋化石产出^[63],在距研究区不足5 km的渡口乡石灰塘的同一套地层中,发现了一定数量的恐龙蛋化石: *Macroolithus yaotunensis*,说明衡阳盆地曾经是恐龙动物群生活的乐园。同时,该时期衡阳盆地内火山事件频发,玄武岩广布(图1),地层中见大量火山弹等^[64]。然而,在衡阳盆地同期的地层中却未见具有代表性的恐龙化石群,而与风成砂同一层位的株洲天元地区新发现有恐龙的集群埋藏,化石埋藏量巨大,经鉴定的有:霸王龙、虚骨龙、似鸟龙、兽脚类、鸟脚类、蜥脚类、鸭嘴龙和龟鳖类等。黄乐清等^[64]通过对株洲天元恐龙化石埋藏区的地质与化石的调查和研究,认为天元地区属于汇水盆地,植被相对繁盛(以区内出现大量植物化石为证,而湖南省其他地区的同期地层中未见报道),物源分析指示恐龙动物群生活在株洲天元地区的南边,为近源异地埋藏。株洲“恐龙公墓”的形成,可能是恐龙群为了争夺食物、水源或者栖息领地而迁徙,使分散的种群集中靠拢。但由于受埋藏区域的范围所限,未能对恐龙的迁徙提供更多的地质依据。

①湖南省地质调查院. 湖南1:5万铁丝塘幅区域地质矿产调查报告, 2017.

那么,从区域上古地理的角度能否支持这一认识呢?答案是有可能的。晚白垩世早期,湖南省内地壳活动的剧烈导致了强烈的火山及强地震活动的发生,这一系列事件使得恐龙赖以生存的优良生态环境发生剧变,导致许多地区已经不能适宜于恐龙生活。本文新发现的风成沙漠,无疑可以确认衡阳盆地东南缘一带,湖泊萎缩减小,湖泊周缘荒漠化、植被锐减等,已经不能满足植食型恐龙动物群的繁衍,必然导致向水源方向的迁徙。并且,气候的变化对动物群的迁徙是有大量记载的。如中国东部亚热带地区全新世期间的气候波动频繁,引起了哺乳动物群的多次迁徙^[65]。据白垩纪时期的古地理图来看,衡阳—株洲湖盆的中心在靠北一带,水及食物资源更为丰富。因此,恐龙有往北方向迁徙的可能性。风成沉积的发现,为研究湖南乃至华南地区恐龙的可能迁徙提供了一种新的地质依据。

5 结论

(1) 湘中衡阳盆地东缘发育风成沙漠沉积,普遍见指示风成沙漠环境的巨型板状、楔状交错层理、双向交错层理、平行层理及风棱石等。该套风成沉积为区域上首次发现,丰富了湖南省的沉积类型,为湖南省的风成沉积领域提供了珍贵的研究材料。

(2) 该套风成沙丘沉积具有特殊的古环境意义。沙漠事件的出现,表明极端干旱的气候条件,为恐龙动物群的可能迁徙提供依据;风成沉积的发现,佐证了衡阳盆地与醴攸盆地之间在白垩纪时期相互连通的认识。同时,在盆地及其周缘地质背景分析的基础上,认为衡阳盆地初步具备成钾盐的古环境基础。

(3) 古风向恢复结果表明衡阳盆地在晚白垩世时期受行星环流格局及古季风的控制明显,主要盛行西风 and 东北信风,其次为近南—北向季风环流,为东亚地区行星风系及季风环流格局的存在提供了更多的佐证材料。

致谢 柏道远研究员在论文成文过程中给予了建设性意见,在此表示最诚挚的谢意。

参考文献(References)

- [1] Huber B T, Norris R D, MacLeod K G. Deep-sea paleotemperature record of extreme warmth during the Cretaceous[J]. *Geology*, 2002, 30(2): 123-126.
- [2] Wilson P A, Norris R D, Cooper M J. Testing the Cretaceous

- greenhouse hypothesis using glassy foraminiferal calcite from the core of the Turonian tropics on Demerara Rise[J]. *Geology*, 2002, 30(7): 607-610.
- [3] Hu X M, Jansa L, Sarti M. Mid-Cretaceous oceanic red beds in the Umbria - Marche Basin, central Italy: Constraints on paleo-oceanography and paleoclimate[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 233(3/4): 163-186.
- [4] 曹珂,王猛. 沉积记录对白垩纪中国大陆古气候模拟的约束[J]. *地学前缘*, 2009, 16(5): 29-36. [Cao Ke, Wang Meng. Constraints of sedimentary records on Cretaceous paleoclimate simulation in China mainland[J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(5): 29-36.]
- [5] Wang C S, Hu X M, Huang Y J, et al. Cretaceous oceanic red beds as possible consequence of oceanic anoxic events[J]. *Sedimentary Geology*, 2011, 235(1/2): 27-37.
- [6] Wang Y D, Huang C M, Sun B N, et al. Paleoc- CO_2 variation trends and the Cretaceous greenhouse climate[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 129: 136-147.
- [7] Wendler J E, Wendler I. What drove sea-level fluctuations during the mid-Cretaceous greenhouse climate? [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 441: 412-419.
- [8] 王成善,王天天,陈曦,等. 深时古气候对未来气候变化的启示[J]. *地学前缘*, 2017, 24(1): 1-17. [Wang Chengshan, Wang Tiantian, Chen Xi, et al. Paleoclimate implications for future climate change[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(1): 1-17.]
- [9] Junium C K, Meyers S R, Arthur M A. Nitrogen cycle dynamics in the Late Cretaceous Greenhouse[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 481: 404-411.
- [10] 胡修棉,王成善. 白垩纪大洋红层:特征、分布与成因[J]. *高校地质学报*, 2007, 13(1): 1-13. [Hu Xiumian, Wang Chengshan. Cretaceous oceanic red beds: characters, occurrences, and origin[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(1): 1-13.]
- [11] Andrews E, White T, del Papa C. Paleosol-based paleoclimate reconstruction of the Paleocene-Eocene Thermal Maximum, northern Argentina [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, 471: 181-195.
- [12] Zhao L L, Hong H L, Liu J C, et al. Assessing the utility of visible-to-shortwave infrared reflectance spectroscopy for analysis of soil weathering intensity and paleoclimate reconstruction[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018, 512: 80-94.
- [13] Chen J H, Lv F Y, Huang X Z, et al. A novel procedure for pollen-based quantitative paleoclimate reconstructions and its application in China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60(11): 2059-2066.
- [14] 高远,王成善,黄永建,等. 大陆科学钻探开展古气候研究进展[J]. *地学前缘*, 2017, 24(1): 229-241. [Gao Yuan, Wang Chengshan, Huang Yongjian, et al. Progress in the study of paleoclimate change in continental scientific drilling projects[J].

- Earth Science Frontiers, 2017, 24(1): 229-241.]
- [15] 江新胜,潘忠习,傅清平. 四川盆地白垩纪沙漠风向变化规律及其意义[J]. 岩相古地理, 1999, 19(1): 1-11. [Jiang Xinsheng, Pan Zhongxi, Fu Qingping. The variations of palaeowind direction of the Cretaceous desert in the Sichuan Basin and their significance[J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 1999, 19(1): 1-11.]
- [16] 江新胜,潘忠习,谢渊,等. 鄂尔多斯盆地白垩纪沙漠旋回、风向和水循环变化:白垩纪气候非均一性的证据[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2004, 34(7): 649-657. [Jiang Xinsheng, Pan Zhongxi, Xie Yuan, et al. Regularity of paleowind directions of the Early Cretaceous desert in Ordos Basin and climatic significance[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2004, 34(7): 649-657.]
- [17] Chen Z, Li G J. Evolving sources of eolian detritus on the Chinese Loess Plateau since early Miocene: Tectonic and climatic controls[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2013, 371-372: 220-225.
- [18] 江新胜,李玉文. 中国中东部白垩纪沙漠的时空分布及其气候意义[J]. 岩相古地理, 1996, 16(2): 42-51. [Jiang Xinsheng, Li Yuwen. Spatio-temporal distribution of the Cretaceous deserts in central and eastern China and its climatic significance[J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 1996, 16(2): 42-51.]
- [19] 江新胜,潘忠习,付清平. 白垩纪时期东亚大气环流格局初探[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2000, 30(5): 526-532. [Jiang Xinsheng, Pan Zhongxi, Fu Qingping. Primary study on pattern of general circulation of atmosphere before uplift of the Tibetan Plateau in eastern Asia[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2000, 30(5): 526-532.]
- [20] 江新胜,潘忠习,徐金沙,等. 江西信江盆地晚白垩世风成沙丘的发现及其古风向[J]. 地质通报, 2006, 25(7): 833-838. [Jiang Xinsheng, Pan Zhongxi, Xu Jinsha, et al. Late Cretaceous eolian dunes and wind directions in Xinjiang Basin, Jiangxi province, China[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(7): 833-838.]
- [21] 江新胜,潘忠习. 中国白垩纪沙漠及气候[M]. 北京:地质出版社, 2005. [Jiang Xinsheng, Pan Zhongxi. The Cretaceous desert and climate in China[M]. Beijing: Geological Publishing Press, 2005.]
- [22] 江新胜,徐金沙,潘忠习. 鄂尔多斯盆地白垩纪沙漠石英沙颗粒表面特征[J]. 沉积学报, 2003, 21(3): 416-422. [Jiang Xinsheng, Xu Jinsha, Pan Zhongxi. Microscopic features on quartz sand grain surface in the Cretaceous desert of Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(3): 416-422.]
- [23] 江新胜,朱同兴,冯心涛,等. 藏南特提斯晚三叠世海岸风成沙丘的发现及其意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2003, 30(5): 447-452. [Jiang Xinsheng, Zhu Tongxing, Feng Xintao, et al. Discovery of the Late Triassic coastal aeolian dune in South Tibet tethys and its significance[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2003, 30(5): 447-452.]
- [24] 梅冥相,靳卫广,于炳松,等. 沙漠沉积体系的层序地层学研究:以新疆库车盆地白垩统为例[J]. 现代地质, 2003, 17(1): 59-67. [Mei Mingxiang, Jin Weiguang, Yu Bingsong, et al. Study on sequence stratigraphy of the desert system: Example from the lower series of Cretaceous in the Kuche Basin in Xinjiang[J]. Geoscience, 2003, 17(1): 59-67.]
- [25] 梅冥相,苏德辰. 青藏高原隆升的沉积学响应:来自甘肃酒泉地区新生代风成砂岩的启示[J]. 古地理学报, 2013, 15(3): 351-361. [Mei Mingxiang, Su Dechen. Sedimentological response to uplift of Qinghai-Tibet Plateau: A contribution from aeolian sandstones of the Cenozoic in Jiuquan area of Gansu province[J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(3): 351-361.]
- [26] 梅冥相,苏德辰. 甘肃张掖地区白垩系风成砂岩沉积序列:祁连山白垩纪隆升的沉积学响应[J]. 古地理学报, 2014, 16(2): 143-156. [Mei Mingxiang, Su Dechen. Cretaceous sedimentary succession of eolian sandstones in Zhangye region of Gansu province: Sedimentological response to the Cretaceous uplift of Qilian Mountains[J]. Journal of Palaeogeography, 2014, 16(2): 143-156.]
- [27] 梅冥相,于炳松,靳卫广. 塔里木盆地北缘库车盆地白垩系风成砂岩研究:以库车河剖面为例[J]. 地质通报, 2004, 23(12): 1221-1227. [Mei Mingxiang, Yu Bingsong, Jin Weiguang. Cretaceous eolian sandstones in the Kuqa Basin on the northern margin of the Tarim Basin: A case study of the Kuqa River section[J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(12): 1221-1227.]
- [28] 湖南省地质调查院. 中国区域地质志:湖南志[M]. 北京:地质出版社, 2017. [Hunan Institute of Geological Survey. The regional geology of China, Hunan province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017.]
- [29] 任纪舜. 中国大地构造及其演化[M]. 北京:科学出版, 1980. [Ren Jishun. Geodetic tectonics and its evolution in China[M]. Beijing: Science Press, 1980.]
- [30] 柏道远,汪永清,王先辉,等. 湖南衡阳燕山早期川口过铝花岗岩地球化学特征、成因与构造环境[J]. 沉积与特提斯地质, 2007, 27(2): 49-59. [Bai Daoyuan, Wang Yongqing, Wang Xianhui, et al. Geochemistry, petrogenesis and tectonic setting of the Early Yanshanian peraluminous granites in the Chuankou region, Hengyang, Hunan[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2007, 27(2): 49-59.]
- [31] 柏道远,周亮,马铁球,等. 湘东南印支期花岗岩成因及构造背景[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, 26(3): 197-212. [Bai Daoyuan, Zhou Liang, Ma Tieqiu, et al. Genesis and tectonic setting of indosinian granites in Southeast Hunan[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2007, 26(3): 197-212.]
- [32] 陈旭,覃金宁,姜必广. 衡阳盆地及其外围综合找矿潜力分析研究[J]. 世界有色金属, 2016(11): 64-66. [Chen Xu, Qin Jinning, Jiang Biguang. Analysis on the comprehensive prospect-

- ing potential of Hengyang Basin and its periphery [J]. *World Nonferrous Metals*, 2016(11): 64-66.]
- [33] 贺其川. 江陵凹陷白垩系红花套组风成沉积环境研究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2011, 8(6): 20-24. [He Qichuan. Desert depositional characteristics--by taking cretaceous Honghuatao Formation in Jiangling Depression for example[J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2011, 8(6): 20-24.]
- [34] 贺其川. 沙漠沉积特征: 以江陵凹陷白垩系红花套组为例[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2011, 33(7): 24-27. [He Qichuan. Desert depositional characteristics: by taking Cretaceous Honghuatao Formation in Jiangling Depression for example[J]. *Journal of Oil and Gas Technology (Journal of Jiaohanghan Petroleum Institute)*, 2011, 33(7): 24-27.]
- [35] 罗旋, 杨申谷, 张亮, 等. 江陵凹陷白垩系红花套组沙漠沉积相分析[J]. 石油地质与工程, 2012, 26(1): 7-9. [Luo Xuan, Yang Shengu, Zhang Liang, et al. Desert sedimentary facies analysis of Honghuatao Formation of Cretaceous system in Jiangling Sag[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2012, 26(1): 7-9.]
- [36] McKee E D. Structures of dunes at white sands national monument, New Mexico (and a comparison with structures of dunes from other selected areas) [J]. *Sedimentology*, 1966, 7(1): 3-69.
- [37] 朱日祥, 杨振宇, 吴汉宁, 等. 中国主要地块显生宙古地磁视极移曲线与地块运动[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 1998, 28(增刊): 1-16. [Zhu Rixiang, Yang Zhenyu, Wu Hanning, et al. Paleomagnetic constraints on the tectonic history of the major blocks of China during the Phanerozoic[J]. *Science China (Seri. D): Earth Sciences*, 1998, 28(Suppl.): 1-16.]
- [38] 袁桃, 吴驰华, 伊海生, 等. 云南思茅盆地景谷地区下白垩统曼岗组风成砂岩沉积学特征及其古气候意义[J]. 地质学报, 2015, 89(11): 2062-2074. [Yuan Tao, Wu Chihua, Yi Haisheng, et al. Sedimentology characteristics of eolian sandstones in the Lower Cretaceous Mangang Formation in the Jinggu area, Simao Basin, Yunnan and the paleoclimate significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(11): 2062-2074.]
- [39] 孔凡彪, 徐树建, 贾广菊. 山东淄博佛村黄土沉积多指标记录的气候环境演变过程[J]. 地球环境学报, 2017, 8(5): 407-418. [Kong Fanbiao, Xu Shujian, Jia Guangju. Climatic and environmental evolution with multi-index records of the loess in the Focun, Zibo, Shandong province[J]. *Journal of Earth Environment*, 2017, 8(5): 407-418.]
- [40] 弗里德曼 G M, 桑德斯 J E. 沉积学原理[M]. 徐怀大, 陆伟文, 译. 北京: 科学出版社, 1987. [Freedman G M, Sanders J E. *The principles of sedimentology*[M]. Xu Huaidda, Lu Weiwenn, trans. Beijing: Science Press, 1987.]
- [41] 丁圣, 林承焰, 马宝军, 等. 苏北陈堡油田风成砂岩沉积成岩特征及其找油意义[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010, 34(2): 8-12, 18. [Ding Sheng, Lin Chengyan, Ma Baojun, et al. Sedimentary and diagenetic characteristics of aeolian sandstones of Chenpu oilfield in northern Jiangsu and its petroleum searching significance[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2010, 34(2): 8-12, 18.]
- [42] 程涌, 文文明, 吴伟, 等. 场发射扫描电镜在现代河流沉积石英颗粒表面形态特征研究中的应用[J]. 电子显微学报, 2017, 36(5): 457-465. [Cheng Yong, Wen Yiming, Wu Wei, et al. The application of field emission scanning electron microscopy to the study of surface textures of quartz grains from modern fluvial deposits[J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2017, 36(5): 457-465.]
- [43] Vos K, Vandenberghe N, Elsen J. Surface textural analysis of quartz grains by scanning electron microscopy (SEM): From sample preparation to environmental interpretation [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 128: 93-104.
- [44] 龚政, 吴驰华, 伊海生, 等. 滇西思茅盆地景谷地区曼岗组石英颗粒表面特征及其指示意义[J]. 地质学报, 2015, 89(11): 2053-2061. [Gong Zheng, Wu Chihua, Yi Haisheng, et al. Surface features of quartz grains of the Mangang Formation in Jinggu area, Simao Basin, western Yunnan and their sedimentary significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(11): 2053-2061.]
- [45] Kalińska-Nartisa E, Stivrins N, Grudzinska I. Quartz grains reveal sedimentary palaeoenvironment and past storm events: A case study from eastern Baltic[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, 200: 359-370.
- [46] 高国栋, 陆渝蓉. 气候学[M]. 北京: 气象出版社, 1998. [Gao Guodong, Lu Yurong. *Climatology*[M]. Beijing: Meteorology Press, 1998.]
- [47] 李江海, 姜洪福. 全球古板块再造、岩相古地理及古环境图集[M]. 北京: 地质出版社, 2013. [Li Jianghai, Jiang Hongfu. *World atlas of plate tectonic reconstruction, lithofacies paleogeography and plaeoenvironment*[M]. Beijing: Geological Publishing Press, 2013.]
- [48] Cooke R, Warren A, Goudie A. *Desert geomorphology*[M]. London: UCL Press, 1993.
- [49] 郝青振, 张人禾, 汪品先, 等. 全球季风的多尺度演化[J]. 地球科学进展, 2016, 31(7): 689-699. [Hao Qingzhen, Zhang Renhe, Wang Pinxian, et al. Monsoons across multi-scales: summary of fourth conference on earth system science[J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(7): 689-699.]
- [50] 邱玉珏, 邹学勇, 张春来. 沙粒跃移轨迹参数的统计研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(4): 577-580. [Qiu Yujun, Zou Xueyong, Zhang Chunlai. Statistic study on trajectory parameters of saltating sand grains[J]. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(4): 577-580.]
- [51] 国家地质总局宜昌地质矿产研究所. 中南地区白垩纪—第三纪岩相古地理及含矿性[M]. 北京: 地质出版社, 1979: 1-130. [Yichang Institute of Geology and Mineral Resource. *Cretaceous to Early Tertiary lithofacies paleogeography of south cen-*

- tral China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1979: 1-130.]
- [52] 王伏泉. 衡阳盆地:下第三系中的浊流沉积[J]. 大地构造与成矿学, 1984, 8(2): 168-176. [Wang Fuquan. The turbidite of Cretaceous to Paleogene age in Hengyang sedimentary basin [J]. Geotectonica et Metallogenia, 1984, 8(2): 168-176.]
- [53] 钟建华, 张琴华. 衡阳盆地的准同生砾石与盆地构造反转[J]. 岩相古地理, 1995, 15(4): 43-46. [Zhong Jianhua, Zhang Qinhu. Synsedimentary boulders and basin structural inversion in the Hengyang Basin [J]. Lithofacies Palaeogeography, 1995, 15(4): 43-46.]
- [54] 钟建华, 李自安. 湖南车江铜矿的成因及成矿模式[J]. 矿床地质, 1997, 16(3): 244-253. [Zhong Jianhua, Li Zi'an. Genesis and metallogenic model of the Chejiang copper deposit, Hunan province[J]. Mineral Deposits, 1997, 16(3): 244-253.]
- [55] 龙国中, 王积廉. 衡阳盆地盐类矿床地质特征与矿床成因[J]. 湖南地质, 1994, 13(1): 22-24. [Long Guozhong, Wang Jilian. Geologic properties and origin of salt deposits in Hengyang Basin[J]. Hunan Geology, 1994, 13(1): 22-24.]
- [56] 邓湘伟, 戴雪灵, 黄满湘. 柏坊铜矿成矿规律及成矿模式探讨[J]. 华南地质与矿产, 2008(4): 22-25. [Deng Xiangwei, Dai Xueling, Huang Manxiang. Analysis on metallogenic regularity and ore-forming pattern of Bofang copper mineral deposit [J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2008(4): 22-25.]
- [57] 杨吉根. 中国东南地区中生代岩盐矿床的沉积成盐特征[J]. 盐湖研究, 1993, 1(4): 1-8. [Yang Jigen. Sedimentary and salt forming characteristics of Meso-Cenozoic halite deposits in Southeast China [J]. Journal of Salt Lake Research, 1993, 1(4): 1-8.]
- [58] 杨尖絮. 滇西兰坪-思茅盆地成钾地质条件及成矿模式分析[D]. 南京: 南京大学, 2013. [Yang Jianxu. The geological settings of potash-forming and depositional model of Lanping-Simao Basin, western Yunnan province [D]. Nanjing: Nanjing University, 2013.]
- [59] 刘成林, 宣之强, 曹养同, 等. 探索中国陆块找钾: 中国东特提斯域成钾作用及模式[J]. 化工矿产地质, 2015, 37(4): 193-197. [Liu Chenglin, Xuan Zhiqiang, Cao Yangtong, et al. Research on potash exploration at China land mass: potash alteration and pattern of eastern Tethys ocean, China [J]. Geology of Chemical Minerals, 2015, 37(4): 193-197.]
- [60] 李永寿, 马海州, 苗卫良, 等. 兰坪—思茅盆地勐野井组钾盐矿床成矿构造背景[J]. 盐湖研究, 2016, 24(3): 17-23, 29. [Li Yongshou, Ma Haizhou, Miao Weiliang, et al. Ore-forming tectonic setting of the Mengyejing Formation potash deposits in Lanping-Simao Basin [J]. Journal of Salt Lake Research, 2016, 24(3): 17-23, 29.]
- [61] 苗忠英, 张震, 郑绵平, 等. 东特提斯构造演化与兰坪—思茅盆地蒸发岩的形成[J]. 地球学报, 2017, 38(6): 883-896. [Miao Zhongying, Zhang Zhen, Zheng Mianping, et al. Tectonic evolution of eastern tethys and formation of evaporite in Lanping-Simao Basin, Southwest China [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2017, 38(6): 883-896.]
- [62] 许欢, 柳永清, 旷红伟, 等. 华北晚侏罗世—早白垩世风成砂沉积及其古地理和古生态学意义[J]. 古地理学报, 2013, 15(1): 11-30. [Xu Huan, Liu Yongqing, Kuang Hongwei, et al. Sedimentology, palaeogeography and palaeoecology of the Late Jurassic-Early Cretaceous eolian sands in North China [J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(1): 11-30.]
- [63] 童潜明, 胡能勇, 肖欣. 湖南白垩系丹霞地貌地层的生命记录及意义[J]. 国土资源导刊, 2008, 5(5): 26-28. [Tong Qianming, Hu Nengyong, Xiao Xin. Life records and significance of Cretaceous Danxia landform in Hunan [J]. Land & Resources Herald, 2008, 5(5): 26-28.]
- [64] 黄乐清, 唐鹰, 童潜明, 等. 株洲天元白垩纪含化石层地质记录及恐龙死亡、埋藏过程初探[J]. 中国地质, 2018, 45(5): 1023-1038. [Huang Leqing, Tang Ying, Tong Qianming, et al. Geological records of fossils layer and death process and taphonomy of dinosaurs in Cretaceous in Tianyuan, Zhuzhou [J]. Geology in China, 2018, 45(5): 1023-1038.]
- [65] 李志文, 李保生, 孙丽, 等. 全新世中国东部亚热带地区气候变迁的古生物学证据[J]. 热带地理, 2015, 35(2): 179-185. [Li Zhiwen, Li Baosheng, Sun Li, et al. Paleontological evidence of the changes of the north boundary of Southern Mid-Subtropical Zone in eastern China during Holocene [J]. Tropical Geography, 2015, 35(2): 179-185.]

The Discovery of Cretaceous Eolian Deposits at the Eastern Margin of the Hengyang Basin, Hunan, and Its Paleoenvironmental Significance

HUANG LeQing¹, HUANG JianZhong², LUO Lai¹, WANG XianHui¹, LIU YaoRong¹, LIANG EnYun¹, MA HuiYing¹

1. Hunan Institute of Geology Survey, Changsha 410116, China

2. Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Hunan Province, Changsha 410011, China

Abstract: This is the first report of Upper Cretaceous eolian deposits in the Honghuatao Formation at the eastern margin of the Hengyang Basin in central southern Hunan, providing a new understanding of the paleogeographic environment of this area in the Upper Cretaceous. The Honghuatao Formation comprises a set of medium to fine-grained magenta feldspar quartz sandstone and lithic quartz sandstone. Large plates, wedge-shaped staggered bedding, bi-directional staggered bedding, parallel bedding and ventifacts are common, all indicating an eolian desert environment. Optical microscope examination shows that suspended components such as mud and mica are absent, and dish-shaped pits, crescent-shaped craters, and upturned (flat) jointed particles are visible under the electron microscope. Comprehensive analysis confirmed that the sandstone is an eolian deposit, which has important paleoenvironmental significance. The discovery indicates that the climate was dry and hot; desertification and saline lakes were obvious, and food shortage might have led to the migration of dinosaurs in the Hengyang Basin. The dip characteristics of the foreset laminae of sand dunes has enabled the characteristics of surface wind belts in Hunan province to be restored, which provides a new basis for supporting the connection between the Hengyang Basin and its surrounding red basins. The discovery provides valuable material for the study of eolian deposition in Hunan province.

Key words: eolian deposit; paleoclimate; Cretaceous; Honghuatao Formation; Hengyang Basin