

文章编号: 1671-1505(2024)06-1372-24 DOI: 10.7605/gdxb.2024.06.081

华南腹地茶永盆地白垩系 古沙漠床沙构型定量重建与启示*

黄乐清^{1,2,3} 胡能勇⁴ 文春华¹ 孟繁星⁵ 陈旭¹
向轲¹ 曾广乾¹ 焦鹏¹ 王灵珏¹

1 湖南省地质调查所, 湖南长沙 410116

2 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 湖北武汉 430074

3 古生物与地质环境演化湖北省重点实验室, 湖北武汉 430205

4 湖南省自然资源事务中心, 湖南长沙 410004

5 湖南省核地质调查所, 湖南长沙 410007

摘要 华南腹地茶永盆地白垩系发育古沙漠沉积, 其沙丘构型特征多样, 是构造活动、地下水文条件和古气候演变等多因素的综合结果, 然而目前在该方面的研究却近乎空白, 制约了对华南腹地古沙漠环境演变规律的认识。本研究将粒度端元分析(EMMA)新方法和沙丘构型分析传统方法相结合, 开展古沙漠形态学研究及床沙构型定量重建工作。结果表明, 华南腹地茶永盆地白垩系沙漠沙丘规模较大, 各项沙丘形态参数均远超全球典型断陷盆地的古沙丘均值, 可以类比鄂尔多斯盆地白垩系古沙丘或塔克拉玛干沙漠的现代沙丘, 指示茶永盆地的初始状态可能为一个大型干旱或沙漠盆地; 通过粒度端元四组分识别出风成沙丘、沙席和潮湿丘间(泥滩)等沉积环境类型。基于沙丘构型重建, 恢复古风向为 N-NE 向, 受北半球西风带控制, 且该沉积构型记录了复合新月形沙丘、复杂(爬升)横向沙丘等多种形态类型。茶永盆地南部风成序列为干燥—潮湿型丘间风成体系, 表现为内部干旱—潮湿丘间沉积与小—中型新月形沙丘的叠置; 盆地北部风成序列发育干燥型丘间风成体系, 发育巨型(爬升)叠加复合沙丘。茶永盆地周缘地区的构造隆升与水系发育, 为盆地带来大量沉积物源, 并在风力作用下发生二次侵蚀、迁移和堆积; 断—拗陷盆地基底下沉、潜水面的升降, 为风成沉积物的累积和保存创造了可容纳空间。该研究从风成沉积地质记录分析出发, 提出了茶永盆地白垩系沙漠沙丘规模可能较大的新见解, 加深了对华南腹地风成/水成沉积—盆地构造—古气候等多要素耦合过程的理解。

关键词 沙漠 床沙构型 白垩系 茶永盆地 华南**第一作者简介** 黄乐清, 男, 1985 年生, 高级工程师, 主要从事区域地质矿产与白垩系风成沉积研究。E-mail: 289773254@qq.com。**通讯作者简介** 文春华, 男, 1982 年生, 教授级高级工程师, 主要从事区域地质及矿产研究。E-mail: herowch2004@163.com。中图分类号: P512.2⁺1 文献标志码: A

Quantitative reconstruction and implications of the Cretaceous aeolian

* 湖南省自然科学基金项目(编号: 2021JJ30388)、中国地质调查局古生物与地质环境演化湖北省重点实验室开放基金(编号: PEL-202203)、湖南省地质院科研项目(编号: HNGSTP202322)和湖南省创新型省份科普专题(编号: 2022ZK4207)共同资助。[Co-funded by the Natural Science Foundation of Hunan Province of China (No. 2021JJ30388), and Open Foundation of Hubei Key Laboratory of Paleontology and Geological Environment Evolution (No. PEL-202203), and scientific research program of Geological Bureau of Hunan Province (No. HNGSTP202322), and Hunan Province Innovative Province Science Popularization Special Topic (No. 2022ZK4207)]

收稿日期: 2024-04-12 改回日期: 2024-05-20

bedform architecture in Chayong Basin, the hinterland of South China

HUANG Leqing^{1,2,3} HU Nengyong⁴ WEN Chunhua¹ MENG Fanxing⁵ CHEN Xu¹
XIANG Ke¹ ZENG Guangqian¹ JIAO Peng¹ WANG Lingjue¹

1 Geological Survey Institute of Hunan Province, Changsha 410116, China

2 Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3 Hubei Key Laboratory of Paleontology and Geological Environment Evolution, Wuhan 430205, China

4 Hunan Center of Natural Resources Affairs, Changsha 410004, China

5 Nuclear Geological Survey Institute of Hunan Province, Changsha 410007, China

Abstract The Cretaceous strata in the Chayong Basin, located in the hinterland of South China, are characterized by ancient desert sediments with diverse dune morphology. These features reflect a complex interplay of tectonic activity, hydrological conditions, and palaeoclimatic changes. Despite their significance, research on this topic remains limited, hindering our understanding of the evolution of the paleodesert environment. This study employs the innovative End-Member Modeling by Grain Size Analysis (EMMA) with traditional dune morphology analysis to investigate paleoaeolian morphologies and quantitatively reconstruct bedform configurations. The results indicate that the Cretaceous dunes in the Chayong Basin are exceptionally large, with morphological parameters surpassing global averages for typical fault basins. This suggests an initial arid or desert basin state comparable to the Cretaceous dunes of the Ordos Basin's or the modern dunes of the Taklamagan Desert. EMMA identified four end-members that are indicative of aeolian dunes, sand sheets, and moist interdune areas. The reconstructed paleowind direction was predominantly north-northeast, influenced by the westerlies of the Northern Hemisphere. The sedimentary configurations exhibit a variety of forms, including compound crescentic and complex transverse dunes. The southern part of the basin is characterized by a dry-moist interdune system, presenting internal arid-moist interdunes and small-medium crescentic dunes. In contrast, the northern part develops a dry interdune aeolian system dominated by giant compound dunes. Tectonic uplift and fluvial development surrounding the basin have provided abundant sediment sources, resulting in secondary erosion, migration, and deposition driven by wind action. The subsidence of the fault-basin basement and fluctuations in the groundwater table, has created accommodation space for the accumulation and preservation of aeolian sediments. This study, based on aeolian sedimentary geological records, offers a new perspective on the large-scale dynamics of the Chayong Basin during the Cretaceous period, enhancing our comprehension of the coupled processes of aeolian/fluvial sedimentation, basin tectonics, and paleoclimatic evolution in the hinterland of South China.

Key words desert, bedform architecture, Cretaceous, Chayong Basin, South China

About the first author HUANG Leqing, born in 1985, senior engineer, is mainly engaged in researches on regional geology, mineral resources, and Cretaceous aeolian sedimentary geology. E-mail: 289773254@qq.com.

About the corresponding author WEN Chunhua, professor-level senior engineer, is mainly engaged in regional geological and mineral research. E-mail: herowch2004@163.com.

白垩纪是地史时期温室气候的重要时期, 了解该时期全球气候状态及演变过程, 能够为认识当下

“温室效应”的长远影响和结果提供地质理论依据。自晚白垩世以来, 华南板块边缘沿岸山脉已经

形成, 叠加北半球副热带高压带的影响, 华南地区白垩纪广泛发育风成沙漠沉积体系, 且沙丘类型丰富, 成为地史上规模最大的沙漠之一 (Zhang *et al.*, 2016, 2021; Wu and Rodríguez-López, 2021; Chen *et al.*, 2022; Wu *et al.*, 2022, 2023)。如华南陆块东部句容盆地赤山组 (Cao *et al.*, 2023a)、信江盆地塘边组 (Wu *et al.*, 2018, 2023; Jiao *et al.*, 2020; Cao *et al.*, 2020, 2023b; Rodríguez-López and Wu, 2020)、华南中部江汉盆地红花套组 (Yu *et al.*, 2020, 2021a)、衡阳盆地东缘红花套组 (黄乐清等, 2019; Yu *et al.*, 2021b)、建始盆地正阳组 (Yu *et al.*, 2020), 华南陆块西部楚雄盆地江底河组和赵家店组 (汤海磊等, 2022), 华南陆块南部丹霞盆地丹霞组 (陈留勤等, 2019) 等, 风成沉积特征显著, 以风成砂为主要沉积物类型, 垂向上发育风成沙丘、丘间、古土壤、干盐湖、旱谷和沙席等沙漠沉积 (石宇翔等, 2023)。以往华南风成砂的研究主要集中在沉积特征 (粒度、表面结构、沉积构造)、时空分布、古风带和大气环流格局等方面, 对风成系统床沙构型研究较少。近年来, 国内学者逐步开展了风成地层 (风成沙波层、颗粒流层、粒落层、黏附层等) 及风成界面 (沙丘间界面、叠加界面和再作用面)、古沙漠不同位置的沉积构型 (沙漠中心、沙漠边缘、水成楔入改造)、风成沉积的形成和保存及其与构造和气候的耦合关系等方面的研究, 涌现出一大批成果 (Wu *et al.*, 2018, 2022; Xu *et al.*, 2019; Cao *et al.*, 2020, 2023a; Jiao *et al.*, 2020; Rodríguez-López and Wu, 2020; Yu *et al.*, 2021b; 许欢等, 2023), 揭示出中国白垩纪盆山型风成沉积的特点与科学内涵, 为研究典型温室期环境提供了重要信息。

风成沉积建造、累积和保存过程与气候环境、盆地可容空间变化紧密关联。风成沉积记录不仅能够反映干—湿气候旋回、地下水位升降, 而且古沙丘作为唯一一种具有方向矢量标志、能够直接恢复古风向的地质体, 在追踪副热带高压带及其漂移、恢复大气环流样式方面, 具有不可或缺的重要作用 (Kocurek and Nielson 1986; Mountney *et al.*, 1999; Howell and Mountney, 2001; Hasegawa *et al.*, 2010; Hay, 2011; Mountney, 2012; Rodríguez-López *et al.*, 2014; Bállico *et al.*, 2017a; Xu *et al.*, 2019;

Wu and Rodríguez-López, 2021; Yu *et al.*, 2021a, 2021b; Wu *et al.*, 2022; Cao *et al.*, 2023a, 2023c)。值得注意的是, 通过测量交错层理倾向获取可靠的古风向数据, 进而恢复白垩纪大气环流样式, 前提条件是沙丘床沙类型的准确恢复。不同类型的交错层理构成复杂的交错层理类型, 产生不同的风成层理组合样式, 代表了不同的古风场特征。例如, 简单横向沙丘中颗粒流层组成的前积纹层倾向代表的是主风向, 而多级叠加面 (子沙丘迁移方向) 则反映的是受地形及其他气流影响的次级风向。此外, 当子沙丘脊线与母沙丘脊线交角超过 15° 时, 沙丘间界面之上的母沙丘沉积和叠加界面之上的子沙丘沉积反映的风向特征也存在着较大区别 (许欢等, 2023)。因此, 风成层理、风成界面的识别和沙丘的重建对于恢复沙丘内部构造特征及准确获取交错层理前积纹层所反映的真实古风向至关重要, 故有必要针对茶永盆地多个露头的风成沙丘展开沉积特征及床沙构型方面的系统研究。然而, 在诸多公开报道的有关风成沉积文献中, 鲜有对茶永盆地的报道, 尚无床沙构型的重建研究, 其原因可能是长期将该盆地内的白垩系定义为河流相—冲积扇相沉积, 但笔者调查发现, 盆地内神皇山组砂岩具有风成沙丘的典型特征。湘南茶永盆地风成沙漠规模宏大、现象丰富, 是评估温室气体背景下地球表层系统沙漠化过程的理想场所。同时, 详细的路线地质调查表明, 茶永盆地风成体系以干燥—潮湿型风成体系为主, 潜水面升降对丘间环境影响明显, 裂隙盆地背景及水文地质条件促进了相对可容空间的增加, 利于原始沙丘内部结构的保存, 这为系统恢复华南腹地沙丘形态及真实古风向提供了契机。本次研究以华南腹地茶永盆地白垩系神皇山组风成沉积体系为研究对象, 通过对风成沉积构型的精细解析, 综合粒度端元分析等方法, 恢复了沙丘类型及古风向, 深化了对白垩纪中期华南腹地沙漠群的科学认识。

1 地质背景

白垩纪, 华南内陆发生了大规模的断陷沉降、拉伸和岩浆活动, 沿华夏地块与扬子地块之间的江山—绍兴缝合带, 形成了一系列大致平行于古太平洋板块俯冲带的 NE-NNE 向断陷盆地 (Li *et al.*, 2014)。茶陵—永兴盆地 (茶永盆地) 位于江山—

绍兴缝合带东南部，是华南一系列断拗型盆地的代表之一。该盆地北起茶陵高陇，南止于郴州市苏仙区飞天山镇，全长大于 150 km，大致呈南北两端宽、中间窄，平均宽约 20 km，面积约 3000 km² (图 1)。盆地内构造简单，总体为 1 个宽缓复式向斜，向斜西段受 NE-NNE 向的茶陵—郴州断裂带限定，南东边界多角度不整合于晚古生代地层之上。白垩纪以来，茶永盆地的纬度位置基本保持不变，无明显横向运动，仅顺时针旋转约 15° (Sun *et al.*, 2006)。古地理方面，盆地在晚白垩世经历拗陷和构造运动，沉积中心从南向西迁移；古新世开始盆地东部和北部大面积抬升，西南部下降，导致盆地地层西厚东薄，成为不对称的箕状断陷盆地 (曹硕, 2020)。同时，部分学者认为，受古太平洋板块俯冲带作用，白垩纪东亚大陆边缘形成的巨大海岸山脉对华南地区的气候产生了重要影响，导致华南地区普遍干旱化 (陈丕基, 1997; Zhang *et al.*, 2021)。在白垩纪典型的温室气候条件和古构造活动的共同作用下，华南地区形成了晚白垩世副热带高压—季风系统—地下水位—造山运动相互耦合的风成古沙漠沉积体系 (Wu *et al.*, 2022; 朱筱敏等, 2023)。

区域地质资料表明，茶永盆地白垩系自下而上依次为栏垅组 (K₁l)、神皇山组 (K₁sh)、罗镜滩组 (K₂l)、红花套组 (K₂h)、戴家坪组 (K₂d)、枣市组 (KEz)，构成以河道底砾岩、风成砂岩、冲积扇砾岩、砂岩、泥岩为主的充填序列，累积厚度达数千米以上 (Tang *et al.*, 2014)。其中，神皇山组是文中的主要研究层位，主体由紫红色块状砂岩组成，普遍见巨型交错层理，下部夹多层透镜状河流相砾岩，是风成沉积体系发育的主要层位。1:20 万郴县幅区域地质调查 (包括茶永盆地南部地区) 中，在郴县大面洲—陈家冲一线的栏垅组—罗镜滩组红层剖面中采得介形虫化石 (*Lycpteroocypris* sp., *Cypridea* sp.) 及孢粉化石，依据部分孢粉 (如 *Schizaea* sp., *Anemia* sp., *Pagiophyllum* sp., *Podozamites* sp., *Brochyphyllum* sp., *Cupessacese* sp., *Ginkgo* sp., *Sphagnum*, *Qsmunda* sp. 等) 的组合特征和含量，神皇组沉积时代应属白垩纪中期 (湖南省地质调查院, 2017)。

2 研究方法 with 实验步骤

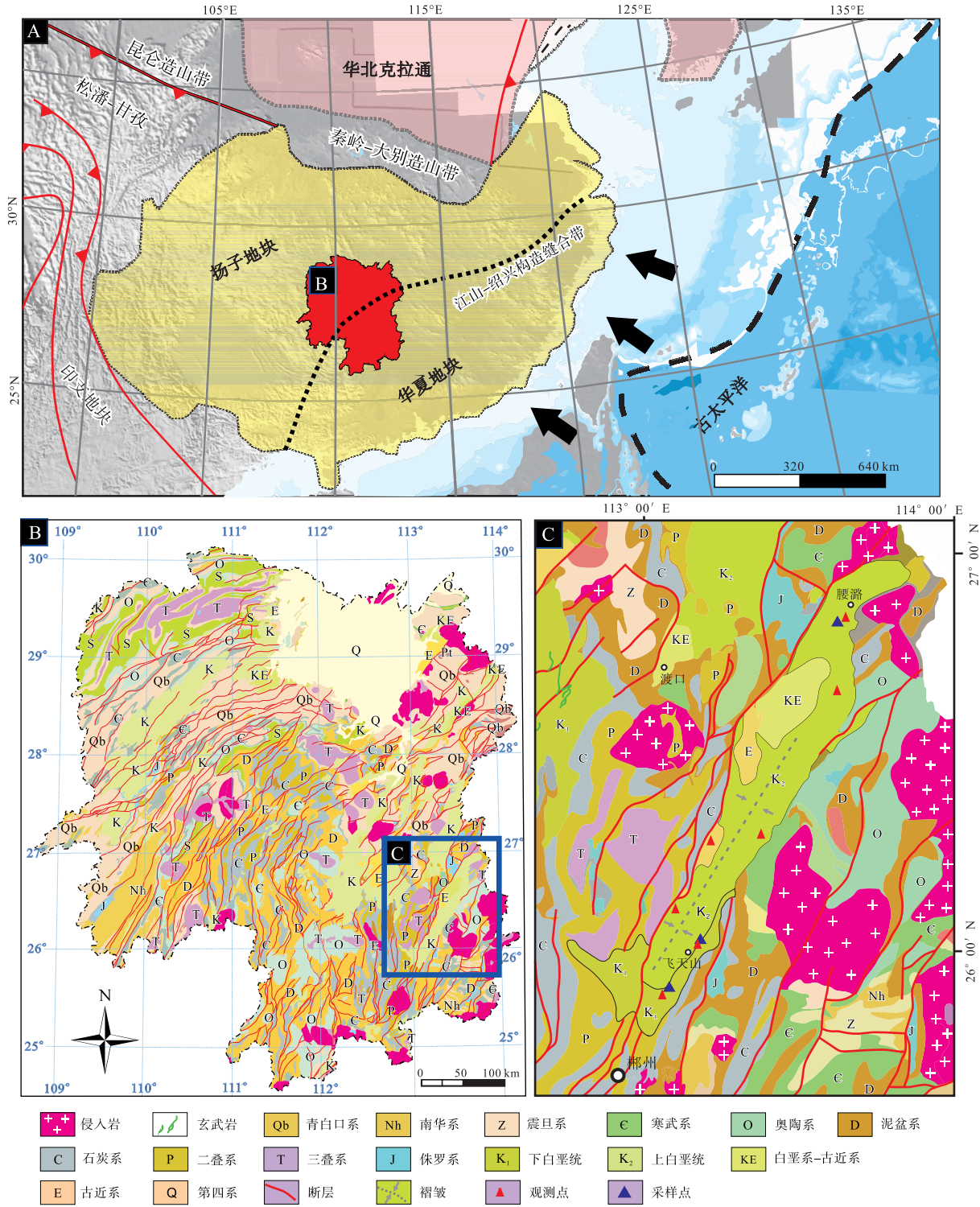
2.1 粒度分析

共采集 14 份砂岩样品进行粒度分析，结果见

表 1 和表 2。粒度分析在古生物与地质环境演化湖北省重点实验室完成。粒度测试前，首先使用 10% 的双氧水和 10% 的稀盐酸溶液进行预处理，以除去碳酸盐、铁的氧化物和有机质，静置 12 h 后，将上层清液取出，并在下层沉积物中加入 0.05 mol/L 的六偏磷酸钠作为分散剂，样品处理步骤参照前人的方法 (Zhou *et al.*, 2021)。粒度分析采用 Mastersizer 3000 型激光衍射粒度仪 (英国 Malvern 公司)，测量范围 0.02~2000 μm。每个样品重复测量 2 次，相对误差小于 2%。把实际测到的粒径范围 (0.2~12 φ) 按照 0.25 φ 的间隔分为 45 个粒级，构成粒度成分矩阵。使用 Folk 和 Ward (1957) 的研究方法来计算粒径的 5 个参数：平均粒径大小 (*Mz*)、标准差 (*σ*)、分选系数、偏度 (*Sk*) 和峰度 (*Kg*)，并引进了参数化端元分析方法 (Paterson and Heslop, 2015)，在 Matlab 平台使用威布尔函数进行拟合，获取样品的端元占比、线性相关系数 (*R*²) 以及角度偏差 (Angular Deviation) (Zhang *et al.*, 2020)。根据样本相关性曲线的拐点和端元稳定性最终确定端元数。

2.2 沙丘的形态参数

沙丘形态参数包括高度 (*H*)、间距 (*SP*)、波长 (*DW*)、波宽 (*WA*)、颗粒流层平均厚度 (*t*)、保留厚度 (*λ*)、爬坡角 (*φ*)、滑面水平长度 (*L*) 和休止角 (*α*) (Mountney and Howell, 2000; Romain and Mountney, 2014)。在这些参数中，*DW*、*WA* 和 *H* (类似于长度、宽度和高度) 可以直接反映沙丘的大小，并可在不同沙丘类型之间作量化对比 (图 2)。局部露头出露不佳，不能直接获取 *SP*、*DW* 等参数，主要根据 *t*、*WA* 等参数间接计算得出。前人对全球典型现代沙漠的统计表明，不同时期沙丘的高度、宽度与长度之间均存在着较好的正相关关系，如通过对 Entrada 砂岩和 Cedar Mesa 砂岩的分析，得到 *t* 与 *H* 之间的关系式： $H = 988.78t^{1.4796}$ 或 $H = 1532.7t^{1.6006}$ ；沙漠中心的沙丘高度 (*H*) 与沙丘间距 (*SP*) 之间存在 $H = 0.12 \times SP$ ；沙丘宽度 (*WA*) 与沙丘高度 (*H*) 之间存在 $WA = 11.29 \times H$ ；并通过休止角 (*α*) 模型建立沙丘迁移距离与累积厚度之间的关系 (Pulvertaft 1985) (图 2-D)。具体统计方法参见相关研究成果 (Mountney and Howell, 2000; Howell and Mountney, 2001; Cao *et al.*, 2023b)。



A—华南构造格架；B—湖南省区域地质简图及茶永盆地位置；C—茶永盆地地质简图

图1 茶永盆地位置及地质简图

Fig. 1 Location and simplified geological map of Chayong Basin

茶永盆地白垩纪风成沉积与鄂尔多斯古沙漠的沉积背景相似，同受北半球西风带控制，笔者拟采

用上述分析方法。本次研究在茶永盆地古沙漠的10个沙丘露头上共测量了77个数据点，汇编数据

表 1 茶永盆地神皇山组样品各端元组分的占比及粒度参数表
Table 1 Proportion of each end-member component and particle size parameter of sandstone sample of the Shenhuangshan Formation in Chayong Basin

端元	含量/%			平均粒径 / μm	标准偏差 (σ)	偏度 (Sk)	峰度 (Kg)
	最小值	最大值	平均值				
EM1	7.37	41.47	23.55	9.35	3.20	0.30	2.76
EM2	0	55.99	11.80	83.17	1.58	0	3.00
EM3	0	69.64	37.83	160.21	1.55	0	3.00
EM4	0	71.01	26.82	315.02	1.70	-0.01	2.98

可见附表 1。沙丘可分为多种类型，例如新月形、横向、线性和星形 (Mountney, 2006)，其中横向沙丘结构相对简单，且在迁移过程中受风向控制明显 (Jiao *et al.*, 2020; Cao *et al.*, 2023b)。因此，本研究主要通过对脊线较平直的横向沙丘分析来恢复古风向。

2.3 风成砂床沙型体重建

通过一系列平行或垂直沙丘运移方向的二维沉积构型分析，重建沙丘床沙形态(图 2)。研究区发育一系列良好的天然露头，完美地揭示了风成体系的内部构型特征，能满足研究需要。每个结构剖面详细记录了不同等级的沙丘界面类型、沙丘叠置界面的空间排列、沉积构造、岩相的横向和垂向分布范围以及各级边界面的倾角和方位角数据。由于各

级层系界面之间的角度关系往往较小，在测量时，优先选择沙丘顶部及沙丘坡面上交错层理的水平走向，以此来获取精确的层系框架。二维建筑面板上的所有测量数据在横向和纵向上都精确到米级，从数据中计算出的角度精确到 0.5°以内。

文中采用 Rubin 和 Hunter (1983) 的立体图—球面投影图法进行建模。在投影图中 (见后文详细描述)，蓝色的阴影面表示前积层产状的投影，而红色的阴影面表示“S”叠加面的产状投影，两面之交线为子沙丘的排列方向 (Rubin and Hunter, 1983)。具体过程为：首先初步判断露头床沙类型 (二维床沙或者三维床沙)，获取风成界面产状，再将“S”面与前积层产状进行投影，求出子沙丘的迁移方向；然后根据子沙丘与母沙丘之间的方位差与叠置关系，区分三维床沙类型：横向沙丘 (0°~15°)、斜向沙丘 (15°~75°)、纵向沙丘 (75°~90°) (Rubin and Carter, 1987)；最后，在子沙丘与母沙丘沙丘类型及关系判断基础上，进一步区分复合沙丘与复杂沙丘 (Bristow *et al.*, 1999; Mountney, 2006; Cao *et al.*, 2020; Jiao *et al.*, 2020)。

3 结果

3.1 岩石粒度特征

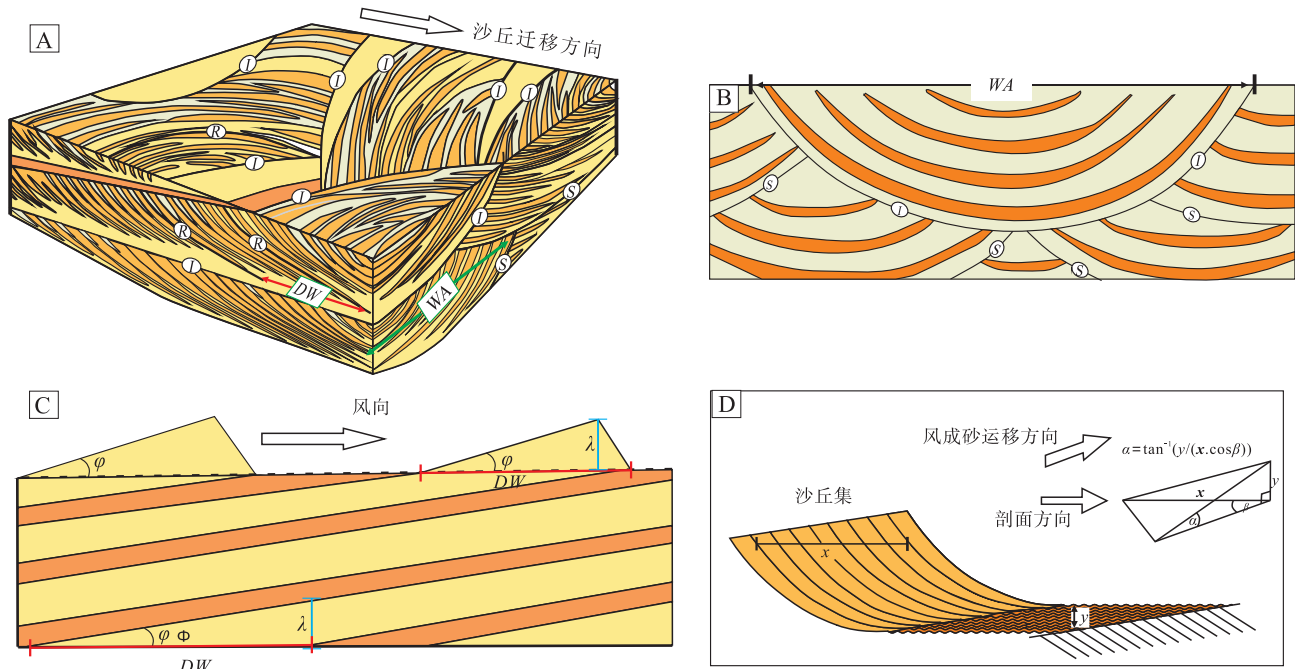
笔者通过粒度端元分解技术来精准识别茶永盆

表 2 茶永盆地神皇山组样品中的粒度端元组分占比

Table 2 Proportion of grain size end-member components of samples from the Shenhuangshan Formation in Chayong Basin

沉积物	样品编号	R^2	EM1/%	EM2/%	EM3/%	EM4/%
沙丘沉积物	DK-04	0.9905	13.79	8.65	43.18	34.38
	DK-05	0.9779	21.69	2.69	42.72	32.91
	GYL1-2	0.9826	26.65	6.97	66.38	0
	GYL-06	0.9929	14.74	7.33	69.64	8.29
	GYL-07	0.9795	28.09	14.14	57.77	0
	DK-11	0.9483	7.37	0	53.93	38.71
	平均值	0.9790	18.72	6.63	55.60	19.04
潮湿丘间	GYL3-2	0.9170	40.43	55.99	0	3.58
沙席沉积物	YX1-2	0.9144	26.20	23.80	28.04	21.96
	DK-01	0.9892	17.49	8.01	34.06	40.44
	DK2-3	0.9726	27.15	0.31	36.92	35.63
	GYL-08	0.8102	30.09	17.57	5.35	46.99
	GYL-09	0.9940	10.97	7.98	10.04	71.01
	GYL-12	0.9377	41.47	0	43.77	14.76
	平均值	0.9364	25.56	9.61	26.36	38.47

注：EM1 平均粒径为 9.35 μm ，EM2 平均粒径为 83.17 μm ，EM3 平均粒径为 160.21 μm ，EM4 平均粒径为 315.02 μm 。



A—风成沙丘和沙丘间沉积的沉积模式（修改自 Hême de Lacotte and Mountney, 2022），显示出平行、垂直于沙丘迁移方向的 2 个横截面；B—垂直于主要运输方向的横截面；C—风成累积演化的简化模型（修改自 Mountney and Russell, 2009；Cao *et al.*, 2023b）；D—沙丘爬升角计算模型（修改自 Pulvertaft, 1985）。I—沙丘间界面；S—叠加面；R—再活化面；DW—沙丘波长；WA—沙丘波长；λ—保留沙丘集厚度；φ—沙丘爬升角

图 2 古沙丘风成构型几何模型

Fig. 2 Geometric models of aeolian architecture of ancient dunes

地的沉积物类型。参数化端元分解结果显示：线性相关性 (R^2) 以及角度偏差在端元数量为 4 时出现拐点 (图 3)，此时所有粒度数据的线性相关性 R^2 为 0.96，角度偏差为 8.4° ，端元间相关性 R^2 为 0.1，端元之间的低相似性表明端元已经基本分离，且端元数量为 4 时的端元分布基本保持稳定。因此，“拐点”标准和端元稳定性均显示合理的端元数量为 4，表示为 EM1-EM4 (表 1)。

茶永盆地沉积物的粒度端元频率拟合分析 (图 3-B) 表明：EM1 呈现相对较低的峰值，具有最宽的粒度分布范围和最差的分选，平均粒径是 $9.35 \mu\text{m}$ ，含量为 7.37%~41.47%，平均含量为 23.55%，属于极细粉砂—黏土级；EM2 呈尖锐的单峰形态，分选较好，平均粒径是 $83.17 \mu\text{m}$ ，含量为 0~55.99%，平均含量为 11.8%，属于粗粉砂岩；EM3 分选最好，峰值较 EM2 略高，平均粒径是 $160.21 \mu\text{m}$ ，含量为 0~69.64%，平均含量为 37.83%，为细砂岩；EM4 粒度最粗，平均粒径是 $315.02 \mu\text{m}$ ，峰值较 EM2、EM3 略低，粒度分布范围宽，分选中等，含量为 0~71.01%，平均含量为

26.82%，为中粒砂岩。

由于沉积物搬运过程中地质营力状态的差异，导致不同环境成因的沉积物粒度曲线存在差异，主要表现在主峰粒径和曲线形态 2 个方面。在沙漠环境中，沙丘的粒度曲线常主峰突出，端元曲线最为典型，与其他风成沉积物容易相区分 (图 4；表 2)。在茶永盆地的沉积物粒度端元分析中，发现了疑似潮湿丘间的粒度组分，其粒度曲线呈双峰式，与内盖夫沙漠晚更新世的沙漠黄土 (Crouvi *et al.*, 2008) 具有较高的相似性，粒度组成显示主要由黏土组分 (EM1) 和粉砂组分 (EM2) 组成 (图 4-B)，占沉积物总组分的 96% 以上，野外与沙席、沙丘环境伴生，属于风力作用下悬浮/跃移搬运的组分，在时空上与其他风成环境产物具有一致性，也指示其风成成因。粒度端元中，EM3 具有高比例的细砂组分，分选最好，可标定为沙丘沉积物类型 (图 4；表 1)，这也是组成现代沙丘的典型粒度组分 (Zhou *et al.*, 2021)。如样品 GYL1-2，主要为细砂组分 (EM3, 66.38%)，含少量粉砂组分 (EM2, 6.96%)，细粒端带有长尾构造，不含

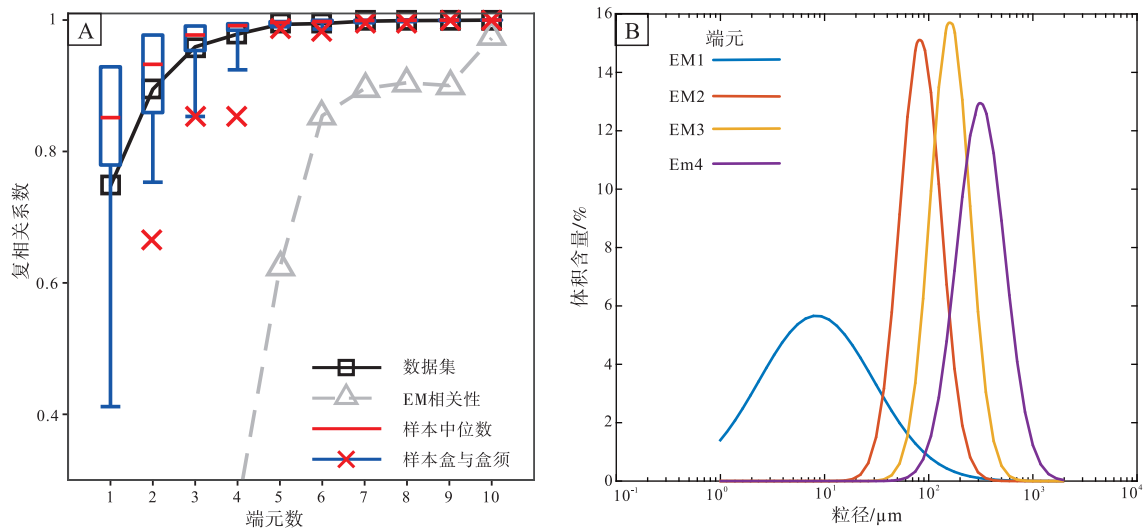


图 3 茶永盆地神皇山组岩石样品粒度参数化端元分解判别 (A) 和参数化端元分布 (B)

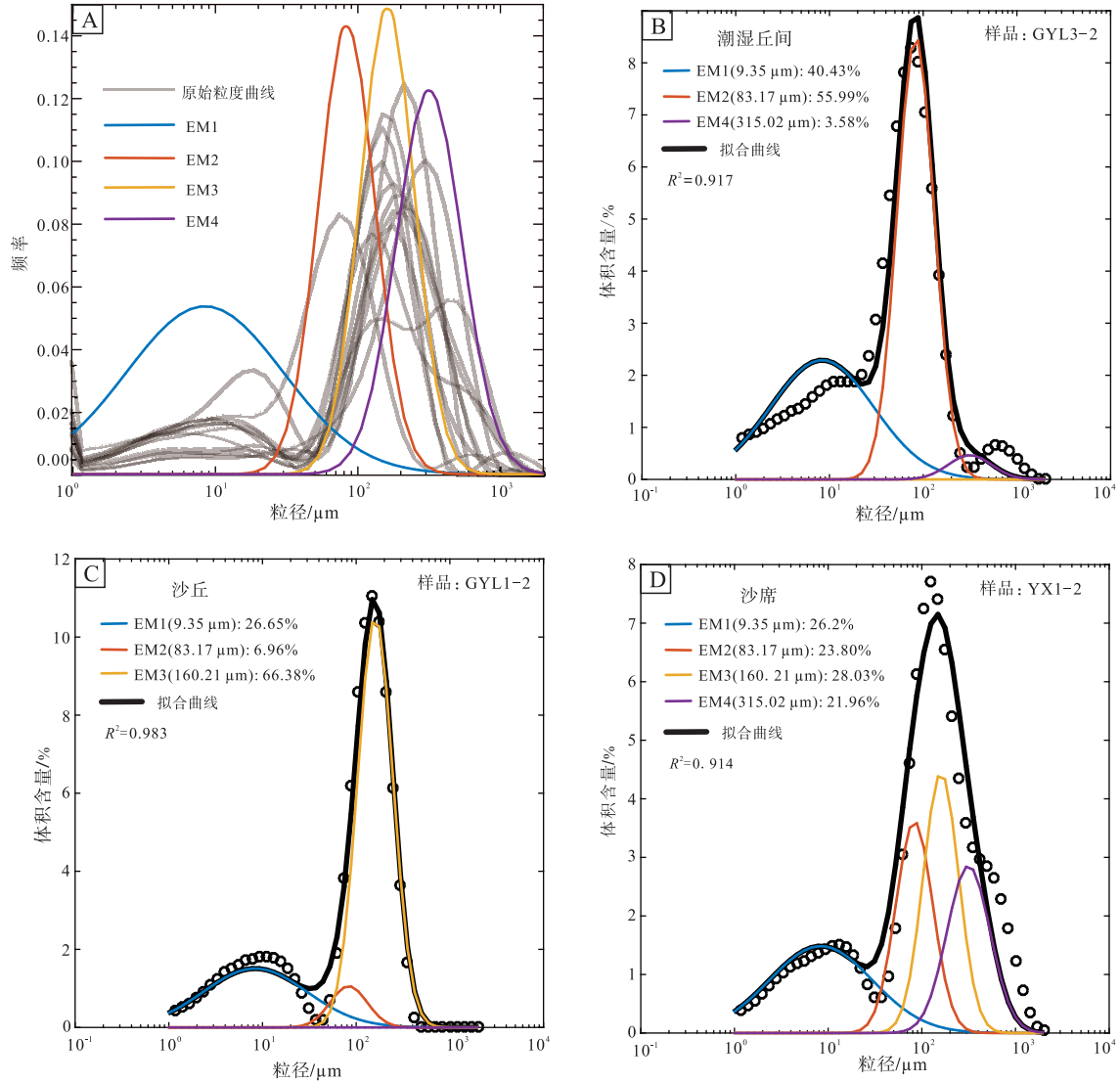
Fig. 3 Parameterized endpoint decomposition discrimination (A) and parameterized endpoint distribution map (B) of sandstone sample of the Shenhuangshan Formation in Chayong Basin

中砂组分 (EM4), 粒度分选性好, 端元组分突出, 为典型的沙丘砂岩 (图 4-C)。沙席环境沉积物以中粒、细粒级为主, 由分选中等的砂岩组成, 出现了四端元组分, 粒度曲线具有双峰特征, 野外常表现出近水平 (interzibar) 和低角度的纹层 (zibar), interzibar 和 zibar 常成对出现在沙席环境中, 以粗颗粒 (粒径分布在 0.1~1.0 mm 之间) 的风成波纹和不具前积层的滑脱面为特征。如样品 YX1-2, 4 种端元组分均存在, 含量相近, 符合前人研究的沙席环境的粒度特征 (Kocurek and Nielson, 1986); 主要组分由风积细砂粒级 (EM3) 和黏土粒级 (EM1) 构成, 次要组分由风积中砂粒级 (EM4) 以及粉砂粒级 (EM2) 组成 (图 4-D), 双峰模式明显。综上所述, 粒度端元分析结果精确表征了不同类型沉积物的动力学背景, 单峰模式表明沉积动力学相对稳定, 双峰模式可能反映了多动力搬运机制及区域气候环境的变化 (Vandenbergh *et al.*, 2018)。样品 DK-04、DK-05、GYL1-2、GYL-06、GYL-07、DK-11 粒度主峰明显狭窄, 主要受地表附近强风控制, 与中国北方典型的现代沙丘曲线相似 (Liang and Yang, 2023); 而样品 YX1-2、DK-01、DK2-3、GYL-08、GYL-09、GYL-12 具有次峰或多峰, 可能反映了多种地质营力的作用, 并为沉积物类型及环境的判别提供了更精确的依据。

3.2 沙丘形态特征

从茶永盆地东南缘的飞天山—高椅岭地区, 往西至永兴县城, 往北至茶陵县腰潞镇双车村, 均有大型古沙丘沉积出露, 路线地质调查表明白垩纪整个盆地已沙漠化。由于盆地内地层的褶皱效应, 向斜核部被更新的地层覆盖, 古沙漠主要沿盆地 NNE 向复式向斜两翼产出, 出露面积约为 700 km², 约占盆地面积的 1/3 (图 1-C)。盆地内古沙丘主要呈现沙漠中心古地理特征, 沙丘规模较大, 沙漠化程度较高, 在风成沙丘体系中的局部层位出现了数十个沙丘连续叠置的序列, 构成规模巨大的复合沙丘 (图 5)。沙漠边缘环境相对不太发育, 仅在北西方向有水—风交互作用沉积频率增高表现。茶永盆地古沙丘的 DW 、 WA 和 H 的统计分析结果见表 2。

茶永盆地内古沙丘波长 DW 范围为 85.2~1062.0 m, 平均 355.1 m; 波宽 WA 范围为 108.2~492.9 m, 平均 298.4 m; 沙丘高度 H 的范围从 9.6~127.4 m, 平均 34.4 m (表 3)。在茶永盆地中部永兴县龙形市乡至南部郴州飞天山—高椅岭一带, DW 、 WA 和 H 略有增大, 并向北、北北西方向至古沙漠边缘 (风—水交互作用区域) 有逐渐减小的趋势。值得注意的是, 在沿郴永大道飞天山—高椅岭—大王寨—坪石村地区, 观测到一系列长达 821 m、宽达 483.8 m、高达 98.5 m 的巨型沙



A—样品粒度累计曲线总体分布及 4 种粒度端元特征；B—潮湿丘间粒度端元特征，以 GYL3-2 为例；C—沙丘沉积物粒度端元特征，以 GYL1-2 为例；D—沙席沉积物粒度端元特征，以 YX1-2 为例

图 4 茶永盆地神皇山组样品粒度端元特征

Fig. 4 Particle end-member characteristics of samples from the Shenhuangshan Formation in Chayong Basin

丘。而在盆地北侧，风成系统中出现了水成的交互作用，对于露头规模有限的地方，通过 t 值换算补充了相关数据，其中： DW 范围为 89.4~360.9 m，平均 209.2 m； WA 范围大致为 109.1~386.4 m，平均 249.4 m； H 的范围为 9.7~43.3 m，平均 23.9 m（表 3）。数据统计表明，与鄂尔多斯盆地古沙漠相比，湖南茶永盆地古沙丘 DW 、 WA 、 H 等值略小，但平均值接近，可能与茶永盆地现今残留沙丘主要形成于沙漠中心环境有关。前人对库布齐沙漠和塔克拉玛干沙漠的研究结果（杨军怀，2019；Cao *et al.*, 2023b）表明，库布齐沙漠 DW 范围为 27~

262 m，平均 90 m， WA 范围为 38~315 m，平均 119 m， H 范围为 1~23 m，平均 9 m；而塔克拉玛干沙漠 DW 范围为 32~106 m，平均 69 m， WA 范围为 49~121 m，平均 85 m， H 范围为 3~11 m，平均 7 m。茶永盆地古沙漠的最大 DW 和 H 值是库布齐沙漠和塔克拉玛干沙漠的 5~10 倍以上，而平均 DW 值和 H 值也大约是库布齐沙漠和塔克拉玛干沙漠的 4 倍以上（表 3），充分显示出白垩纪华南腹地的古沙漠规模及辽阔程度可与北方现代沙漠相媲美。然而，古沙漠的 WA 最大值和 WA 平均值分别不超过库布齐沙漠的 2 倍，不超过塔克拉玛干沙

表 3 白垩系古沙丘与现代沙丘波长 (*DW*)、波宽 (*WA*) 和波高 (*H*) 统计结果

Table 3 Results of statistical analysis of wavelength (*DW*), wave width (*WA*) and height (*H*) of paleodunes in the Cretaceous and modern times

位置	时代	沙丘形态参数	沙丘数量 / 个	最大值	最小值	平均值	备注	
茶永盆地古沙漠主体	白垩纪	<i>DW</i> /m	21	1062	85.2	473.2	本文研究	
		<i>WA</i> /m	27	492.9	108.2	320.1		
		<i>H</i> /m	48	127.4	9.6	40.8		
茶永盆地西北缘局部	白垩纪	<i>DW</i> /m	17	360.9	89.4	209.2		
		<i>WA</i> /m	12	386.4	109.1	249.4		
		<i>H</i> /m	29	43.3	9.7	23.9		
鄂尔多斯盆地古沙漠(中心)	白垩纪	<i>DW</i> /m	83	2252	105	562		Cao et al., 2023b
		<i>WA</i> /m	25	523	135	308		
		<i>H</i> /m	108	270	12	58		
库布齐沙漠	现代	<i>DW</i> /m	215	262	27	90		
		<i>WA</i> /m	206	315	38	119		
		<i>H</i> /m	215	23	1	9		
塔克拉玛干沙漠(中部)	现代	<i>DW</i> /m	1550	106	32	69	杨军怀, 2019	
		<i>WA</i> /m	1550	121	49	85		
		<i>H</i> /m	1550	11	3	7		

漠的 3 倍，这一特征和部分学者对鄂尔多斯盆地古沙漠形态参数的研究结果相似，并且认为造成 *DW* 值与 *WA* 值不协调的原因主要是受到保存条件的限制，古沙漠的平均面积可能被低估了 (Cao et al., 2023b)。

3.3 风成丘间与砂席特征

茶永盆内风成丘间以干旱型丘间沉积为主，不同位置略有差异，局部见潮湿型风成丘间沉积和覆水型丘间沉积。干旱型丘间沉积由红色、分选中等的细砂岩组成，层厚 0.5~2 m，侧向延伸超 30 m，I 界面以上地层常可见大型高角度板状交错层理 (图 5-C)。潮湿型风成丘间沉积的层内层理不发育，整体主要呈黏结状纹层，向上过渡为低角度平行层理，局部因潜水面的上升，致使沙丘颗粒流层底部产生软沉积变形构造 (图 5-D)。覆水型丘间沉积中可见一些不同尺寸的、近水平分布的片状泥砾及呈洪积相产出的泥质粉砂岩层 (图 5-E)。

砂席亚相显示毫米—厘米级的平行或低角度层理，由红色、分选良好、次圆状到圆状的细—中砂岩组成，横向连续性超过数百米。有时与多个泥岩

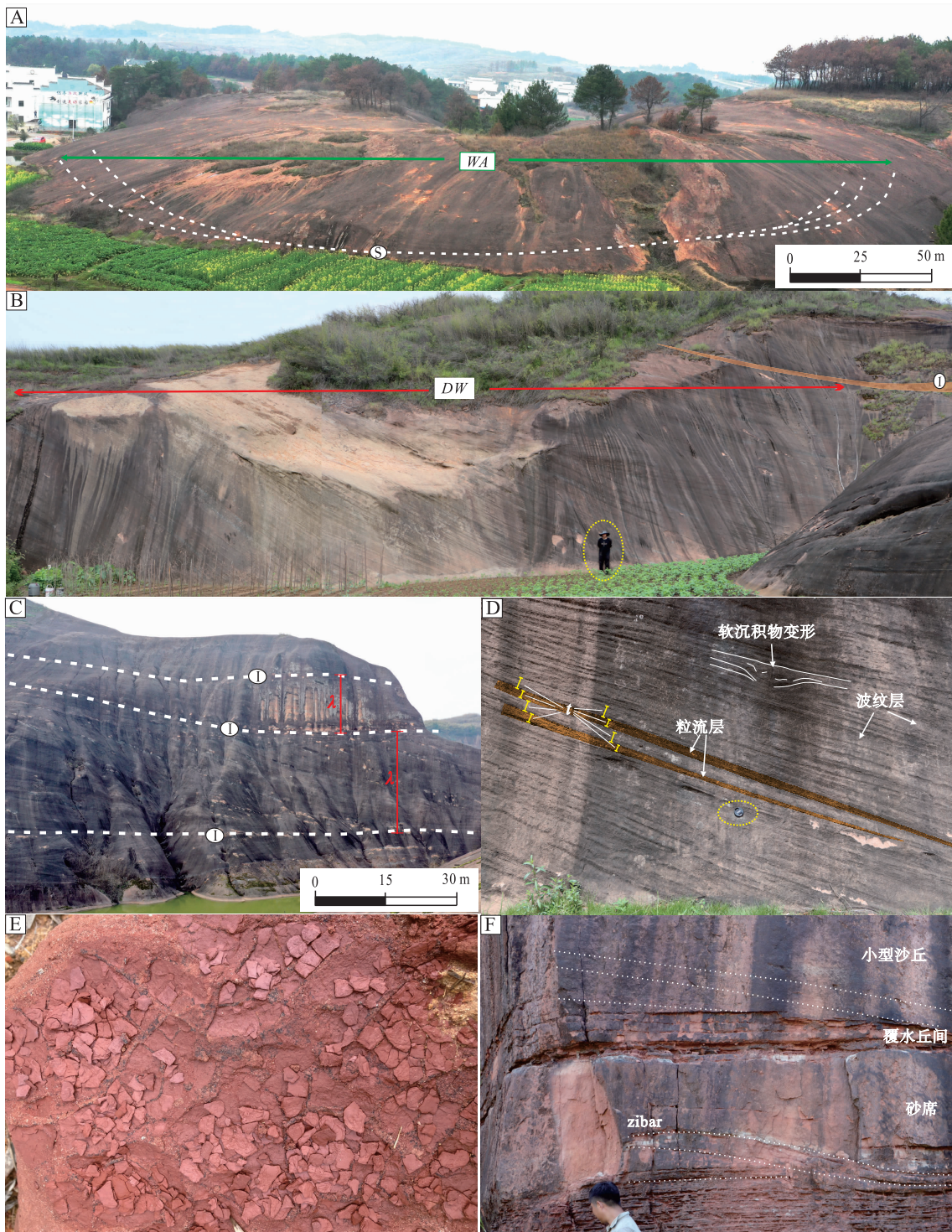
薄层呈互层状产出，基底是平坦的板状层，常见低角度 zibar 与 interzibar 等纹层构造 (图 5-F)；有时上覆在河流沉积物之上，基底呈现轻微波状起伏。

3.4 风成沙丘亚相结构

根据野外的实地调查，茶永盆地白垩系沙漠主要发育在神皇山组。该风成序列自下而上由下部的沙席亚相、小型简单沙丘亚相及覆水丘间亚相和中部的大型复合沙丘亚相、上部的风成与水层交互沉积组成，构成了一个理想的向上盆地沙漠化启动、发展到高潮、最后消亡的完整演化过程 (沉积演化过程拟另文发表)。本次研究分别选取茶永盆地南部和北部平行和垂直于古沙丘迁移方向的 4 个露头 (古沙丘结构剖面 A 和古沙丘结构剖面 B) 描述和解释茶永盆地神皇山组的风成沙丘构型特征。

3.4.1 结构剖面 A

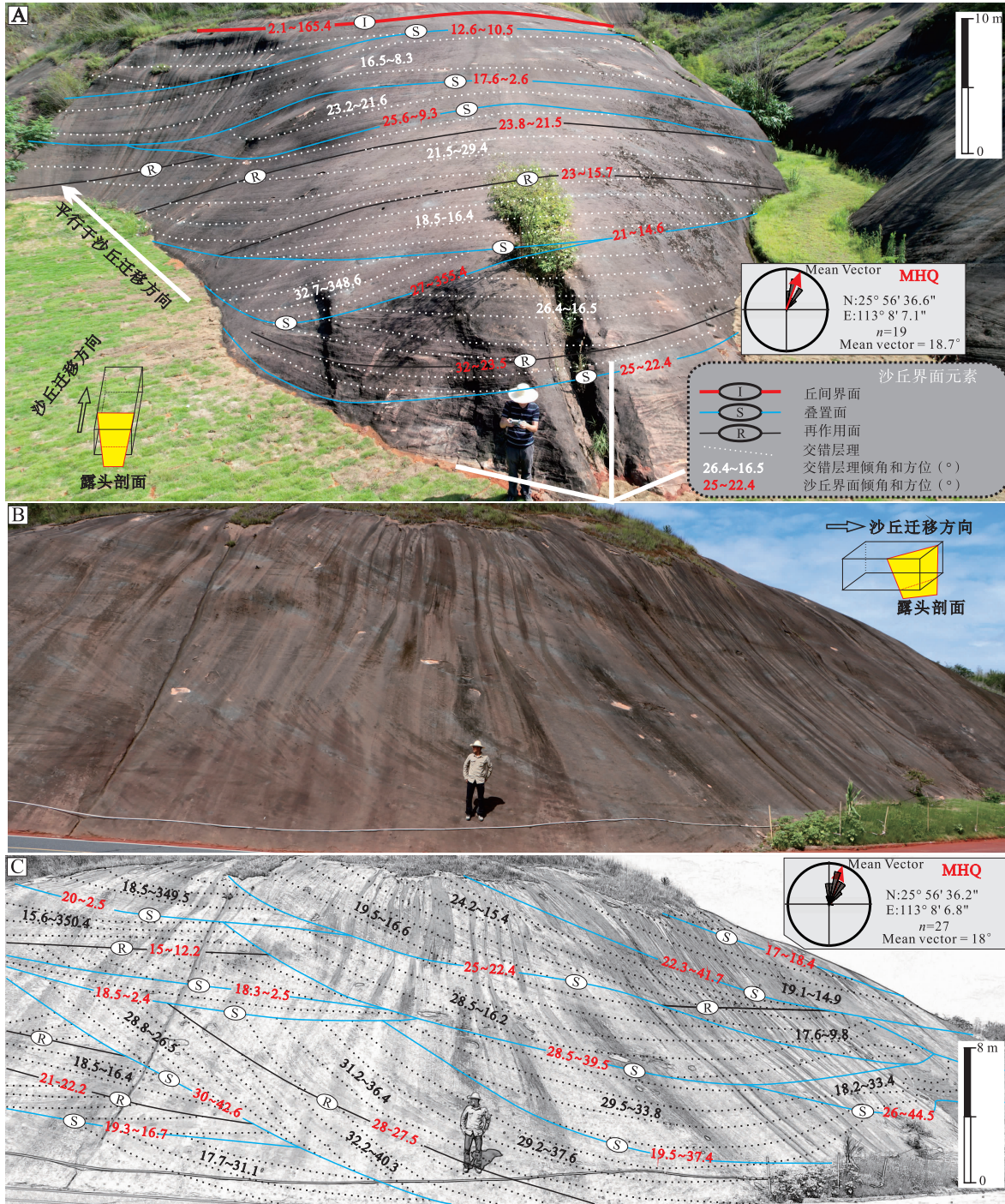
结构剖面 A 由茶永盆地南部飞天山地区道路两侧的 2 个连续露头构成 (坐标: 25°56'36.6"N、13°8'7.1"E)，2 个露头剖面与沙丘运移方向分别垂直和斜交 (图 6)。在垂直沙丘运移方向的露头剖面中 (图 6-A)，可见沙丘单元的 3 个连续侧向截面将沙丘构型完整的展示出来，一系列沙丘叠置面 (S) 近于平行分布，其方位角与交错前积层相近，前积层发散角度小，平均倾向为 N18.7°。在斜交沙丘运移方向的露头剖面中 (图 6-B)，可见不对称充填的槽状交错层系，层理充填于不同级序的风成界面之上，自下而上形成一系列大小不一的槽，依序交叉叠置，整体上中部形成的槽较大，交错层理充填于一级界面或者二级界面内部。该剖面处采集 GYL1-2、GYL-06、GYL-07、GYL-08、GYL-09、GYL-12 共 6 个样品，岩性为紫红色中—细粒长石砂岩、长石石英砂岩，碎屑颗粒以次圆状为主，粒度分析显示分选良好，主峰突出，以发育 EM3、EM4 粒度端元为主。砂岩呈宽缓的槽状交错层理叠置，单个槽厚度约为 4.5~13 m，槽宽 40~100 m (图 6-B、6-C)，最大可达 500 m，巨大的母沙丘之上发育小型子沙丘，槽底可见对下伏沙丘明显的侵蚀界面，从槽中心轴往两侧 (两翼)，前积层倾角由低角度变化到侧翼的中等角度，变化幅度 4°~16°。前积交错层主要由颗粒流层和风波纹层组成，约占沙丘整体 90% 以上，颗粒流层通过下倾面到达风波纹层，两者呈规则、平滑的指状交



A—大规模的风成槽状交错层理（近垂直于古风向剖面）；B—一侧以沙丘沉积为界的沙丘沉积（近平行于古风向的剖面）；C—古沙漠中心大型复合风成沙丘，以干旱型丘间为界；D—风成交错层理，显示颗粒流入和颗粒分层；E—覆水丘间的干裂与泥砾；F—层状砂席、zibar及小型沙丘沉积序列。I—沙丘间界面；S—叠加面；DW—沙丘波长；WA—沙丘波长； t —颗粒流厚度； λ —沙丘集厚度（残留）

图 5 茶永盆地获取古沙丘形态参数的部分露头及丘间、沙席特征

Fig. 5 Characteristics of some ancient dunes acquired morphological parameters, interdune areas and sand sheets



A, B—茶永盆地南端马皇丘野外露头照片, A 图剖面垂直于古风向, B 图剖面与古风向斜交; A 图显示含有多个近于平行的叠加面, 叠加面与前积层倾向和方位角趋同。C—B 图的露头素描图, 叠加面呈宽缓槽状交错叠置, 与前积层倾向相反; 经磁差校正古风向分别为向北方向 18.7° 和向北方向 18° (C 图数据更离散)

图 6 茶永盆地南部飞天山地区白垩系风成沙丘沉积构型分析

Fig. 6 Architecture analysis of the Cretaceous aeolian dune in Feitianshan region, southern Chayong Basin

又关系(图 6-B)。波纹层具有毫米级间距和逆粒序特征, 其倾角在 6°~24°之间, 平均值为 18°。颗粒流层厚度 1.5~9 cm, 倾角介于 18°~34°之间,

可接近休止角。颗粒飘落层在该剖面少见, 仅以薄层或小型透镜体的形式夹在颗粒流层底部。交错前积层倾斜方向具有朝北倾的优势方向, 在垂直古风

向剖面中分散性很小(图 6-A), 而斜交剖面分散性相对较大, 经磁偏角校正, 主要位于 $N350^{\circ} \sim NE36^{\circ}$ 之间(图 6-C)。该剖面显示沙丘叠置面(S) 和上覆水平沉积形成宽缓的槽状透镜体, 水平沉积从中心极大值向外侧减薄至零, S 界面向外侧终止。R 界面总体以相对低角度收敛于 S 界面。

由上述风成沙丘的沉积特征可以看出, 砂岩结构成熟度高, 交错层理前积层由波纹层和薄层的颗粒流层组合而成, 具有典型的风成沙丘沉积的特点(Mountney and Thompson, 2002; Mountney, 2004; Kocurek and Day, 2018)。交错层理的倾向指示风成沙丘主要向北迁移(图 6-A, 6-C)。前积层中颗粒流层组成比例及相对迁移方向上的稳定分布, 表明整个沙丘的生长已经超过了休止角(Postma, 1990), 沙丘滑动面发育良好。粒度端元分析显示, 沙丘沉积物以 EM3 为主, 沙丘下部的砂席环境粒度较粗, 以 EM4 为主。尽管颗粒流层在与波纹层在前积层底部有少量交错, 但很少出现波纹层占主体, 且多个叠加面近于平行, 叠加面与前积层倾向和方位角趋同, 表明古风向整体较稳定, 沙丘脊线走向与古风向总体正相交。再作用面(R) 的形成和对称性变化, 可能是风向和/或风速局部波动的结果(Mountney, 2006; Rodríguez-López *et al.*, 2012; Jones *et al.*, 2021)。R 面相对于交错层理前积层倾角更低, 表明沙丘背风面受到了风力的侵蚀和平滑作用, 结合颗粒飘落物特征, 可能与突发式沙尘暴的活动有关(Mesquita *et al.*, 2021)。同时, R 面相对于交错层倾斜方向的夹角较小, 指示不同方向风(逆风或斜风) 的作用较小, 在背风面的侵蚀和平滑过程中, 沙丘脊线的弯曲度改变较小, 整体形成横流沙丘(Kifumbi *et al.*, 2023)。横向结构剖面中槽状的几何形状(宽达 500 m) 和丘间界面方位角上的整体趋同, 是沙丘迁移过程中, 由于新月形沙丘两翼的脊线弯曲在先前沉积的沙丘之上产生冲刷槽, 而后两翼率先切入冲刷槽的结果(Kocurek, 1981; Mountney and Russell, 2009)。具体脊线的走向或各级界面指示的子沙丘与母沙丘的叠置关系, 见后文中基于 Robin 沙丘 3D 模型的沙丘构型重建。

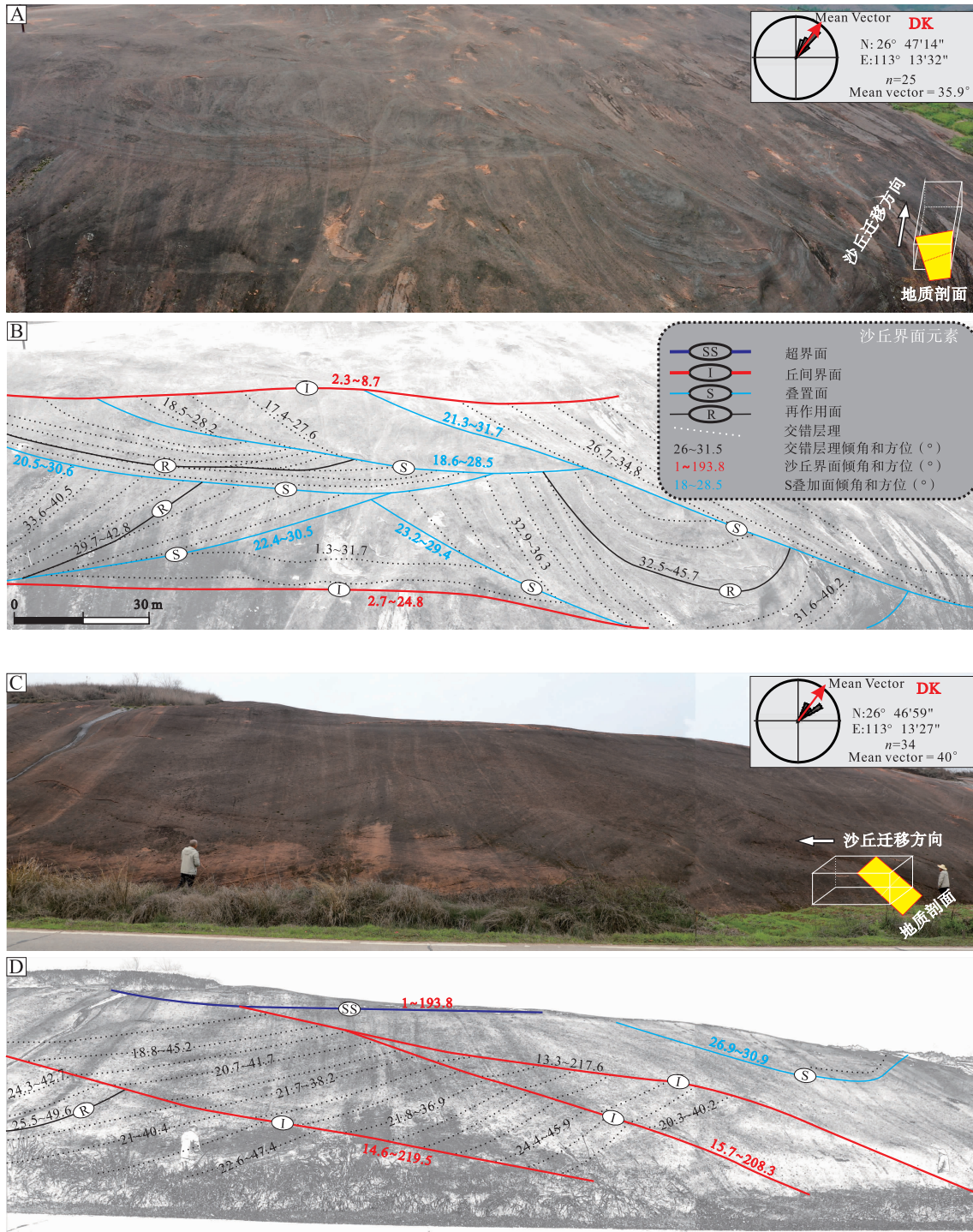
3.4.2 结构剖面 B

结构剖面 B 位于茶永盆地北部渡口地区, 选取 2 个分别近垂直、平行于沙丘运移方向的露头剖

面(坐标分别为: $26^{\circ}47'14''N$ 、 $113^{\circ}13'32''E$ 和 $26^{\circ}46'59''N$; $113^{\circ}13'27''E$)。剖面以丘间界面(I) 为界, 面板范围内均可见 2 个及以上简单的风成沉积单元。在盆地北部采集 DK-01、DK-04、DK-05、DK2-3、DK-11 等 5 个样品, 岩性主体为分选良好的紫红色细—中粒长石岩屑砂岩、长石石英砂岩, 颗粒具有较好的磨圆度, 交错层理规模巨大, 单个层系厚度为 5~20 m, 大者可达 50 m, 沿沙丘迁移方向稳定广泛分布。

近垂直于沙丘运移方向的露头剖面中(图 7-A, 7-B), 红色砂岩被分隔成 2 个交错层理的层系组, 以近水平($\sim 3^{\circ}$) 的 I 界面为界, 单个层系组的厚度大于 15 m (下部未出露)。层系组内被多组中等角度($15^{\circ} \sim 26^{\circ}$) 的顺古风向边界(S 面) 分割成多个层系, 这些“S” 边界相互呈槽状叠置, 构成“众” 字形态, 槽状层系总体随地层产状向右侧(南东方向) 倾伏, 使槽体同步倾斜; 槽状层系内由高角度的颗粒流层组成, 单个纹层厚度为 2~5 cm, 局部可达 8 cm, 纹层倾角在 $17^{\circ} \sim 27^{\circ}$ 范围内变化; R 界面偶尔会截断层系内的交错纹层。

平行于沙丘运移方向的露头剖面中(图 7-C, 7-D), 单个层系组厚度大于 15 m, 自下而上被 3 组低角度($1^{\circ} \sim 16^{\circ}$) 的逆古风向边界(I 面) 分割成多个层系, I 界面倾角逐渐变缓, 构成典型攀爬型沙丘的特点。底部第 1 个层系单元交错前积层以高角度颗粒流层和少量低角度风成沙波层为标志, 倾角变化范围小, 为 $1^{\circ} \sim 5^{\circ}$; 前积层以颗粒流层为主(占 90% 以上), 其次为风成沙波层(不足 10%)。颗粒流层厚度为 2~9 cm, 局部可见 5~8 cm 的颗粒流“厚层”, 内部呈块状或者反粒序的薄层结构; 沙丘粒度端元显示以 EM3、EM4 为主, 粒度较剖面 A 中的沙丘沉积稍粗、颗粒流层更厚; 颗粒流层前积倾向平均 40° , 倾角较大, 为 $29^{\circ} \sim 34^{\circ}$, 往上颗粒流层倾角有变缓的趋势。风成沙波层以毫米—厘米级间距、反粒序为特征, 总体位于前积层趾部, 横向上可延伸 2 m 以上。该沙丘单元中再作用面(R) 较少发育, 依据沙丘内部单元的前积层倾向及厚度均较为稳定、受叠置面(S) 截切、限定等特点, 可将其与叠置面(S) 区分开来。在迁移方向上, 风波纹层基底与陡峭的向下延伸的颗粒流地层相切, 仅局部有指状交叉共存。上部第 2 个沙丘单元前积层倾向与下伏沙丘一致, 倾



A, C—茶永盆地北部渡口乡的野外露头照片, A 图为含有多个叠加面的复合型沙丘, 叠加面与前积层倾向和方位角趋同, C 图显示爬升沙丘特点, 叠加面与前积层倾向相反; 经磁差校正古风向分别为向北方向 12.9° 和北东方向 41.6°。B, D—A 和 C 的露头素描图, A 和 C 剖面分别近垂直、平行于古风向

图 7 茶永盆地北部渡口地区风成沙丘构型分析

Fig. 7 Architecture analysis of the Cretaceous aeolian dune in Dukou region, northern Chayong Basin

角有所减缓; 单元厚度略有减薄、层内偶见 R 界面对前积层的截切。最上部 I 界面产状明显减缓, 至

近于水平, 略向逆风方向倾斜 1°~3°, 具有爬升沙丘的特点。总体上, 该剖面中交错层系组较为简

单,以 I、S、R 界面为界,细分成不同层次的古沙丘单元。其中,S 面平均倾向 35.2° ,表明次级新月形沙丘与母沙丘的巨型横向沙丘迁移方向相近。面板中 R 界面与沙丘滑面方向呈微小角度变化,变化范围在 $2^\circ\sim 6^\circ$ 之间。

通过上述分析,认为茶永盆地北部分隔沙丘沉积的水平侵蚀丘间界面是由于沙丘和丘间区域的横向迁移和纵向攀升所致。该沙丘间界面上主要以中—低爬升角度或水平的波纹层集合体为特点,低缓角度界面延伸可达数千米,界面之上未见丘间沉积而仅见丘间界面,表明研究区以干旱型爬升沙丘的叠置类型为主;自下而上的沙丘间(I)界面倾角逐渐变缓至近水平,其内部限定多期叠加面(S),表明多期沙丘叠置在母沙丘之上、沙丘间逐渐填平补齐的过程。沙丘间和上覆沙丘沉积单元之间呈渐变接触,以风成沙波层的倾角逐渐增大为标志,这种接触标志着沙丘与沙丘间的同步迁移(Kocurek, 1981)。丘间界面平均倾向为 210° ,前积层平均倾向 40° ,表明向北方向持续爬升、迁移。底部第 1 单元沙丘交错层前积层倾向稳定,前积层中多见颗粒流粗粒砂岩形成的条带层,缺失颗粒飘落层,滑动面发育,暗示了大型沙丘上部背风坡垮塌、滑动过程的发育及其对颗粒飘落层的破坏(Kocurek and Day, 2018)。古风向矢量数据的低离散性表明研究区受单向风主导,指示了低砂脊弯曲度的巨型横向沙丘,且这一沙丘随着时间的推移,背风坡不断累积,倾角变缓,沙丘规模越来越大(Mountney, 2006; Romain and Mountney, 2014; Bállico *et al.*, 2017b)。沙丘单元内再作用面不太发育,暗示沙丘迁移过程中受到了强烈的副热带高压作用下的古风场的控制,次级风在沙丘背风面局部侵蚀作用较小,可能与巨大的沙丘规模对来风的阻挡有关(Kifumbi *et al.*, 2023; 罗霖炎等, 2023)。随着沙丘不断建设和规模的增大,滑动面倾角有减小的趋势。上部沙丘单元规模相对较小,出现颗粒流层和风波纹层的不规则性交替及 R 界面对前积层的截切,表明沙丘滑面上形成崩塌(颗粒流层)的同时,次级风对背风面产生侵蚀,既形成了 R 界面,并在背风面上沉积了风波纹层(Kocurek, 1981; Kocurek and Nielson, 1986; Mountney, 2006);由再作用面(R)分隔的颗粒流层可能与风向的季节变化有关(Rubin and Carter, 1987),但整

体上这种季节性的影响较弱,仅在巨型沙丘的局部出现。在次级风侵蚀之后,风场系统恢复正常条件,沙丘在盛行风的作用下再次开始迁移。

4 讨论

4.1 大型古沙漠的定量评价及启示

近年来,华南白垩系风成沉积多有报道,其时代多集中在晚白垩世,地域范围覆盖了华南多个陆相盆地,被认为是典型的荒漠环境(Wu *et al.*, 2018, 2023; 黄乐清等, 2019; 陈留勤等, 2019; Cao *et al.*, 2020, 2023c; Jiao *et al.*, 2020; Rodríguez-López and Wu, 2020; Yu *et al.*, 2021a)。然而,这些白垩纪陆相盆地中的风成系统,是盆山型小型沙漠或湖岸、河岸的风成沙丘(Zheng *et al.*, 2024),还是传统描述的大规模干旱型沙漠(Rodríguez-López and Wu, 2020; Wu *et al.*, 2022; Cao *et al.*, 2023a, 2023b),如中国西北广袤的沙漠,尚需要做出定量的评价。在对沙漠进行量化评估的所有要素中,沙漠面积和沙漠化程度是 2 个有效的指标(Bryant, 2010; Cao *et al.*, 2023b),其中沙漠面积一般通过直接测量盆地内古沙漠分布面积来获取,而荒漠化程度则与沙丘大小范围以及最大沙丘大小呈正相关关系,故可通过评估沙丘形态和沙丘大小来量化每个沙漠的荒漠化程度(Cosgrove *et al.*, 2021),且这一方法在评估鄂尔多斯古沙漠的荒漠化中有较好的运用(Cao *et al.*, 2023b)。因此,在本研究中,笔者根据 DW、WA 和 H 等参数,对茶永盆地古沙漠的荒漠化程度进行了定量评估。

通过将茶永盆地古沙漠的面积和沙漠化程度与鄂尔多斯盆地的古沙漠以及世界上其他典型的现代沙漠进行比较,发现茶永盆地面积约 3000 km^2 ,不及鄂尔多斯古沙漠的 $1/12$,区域上认为是属于太平洋俯冲背景下华南内陆裂陷形成的小型断陷盆地(Dong *et al.*, 2023),是华南一系列断—拗陷盆地的代表之一。通常来说,沙漠的沙丘大小反映荒漠化程度,具体受沙源供给速率、植被发育、潜水面升降等条件控制;沙漠边缘的沙丘较小,随着沙丘在主风向上的逐渐迁移、累积和爬升,沙漠中心的沙丘则较大,沙丘大小与沙漠面积呈一定的正相关(Rubin and Carter, 1987; Cao *et al.*, 2023b; Cos-

grove *et al.*, 2023a)。评估结果表明，茶永盆地的古沙丘规模较大，如盆地南侧郴永大道飞天山—高椅岭—大王寨地区，观测到一系列巨型复合沙丘(图 6；图 9)，而在盆地北侧渡口地区见大规模的爬升沙丘(图 7；图 9)，且先前的调查已知盆地宽缓向斜东西两翼均有沙丘发育(黄乐清等, 2023)，表明整个盆地在白垩纪中期已整体沙漠化。在有限的数据统计中，所测量的最大沙丘长约 360.9 m，宽约 380.8 m(部分 DW 等数据为换算所得)，这一数据略小于鄂尔多斯盆地古沙丘规模，但沙丘参数 DW 、 WA 平均值较为接近；然而，鄂尔多斯古沙漠的面积比茶永盆地的面积要大得多，故两者的沙丘规模不应在一个数量级。

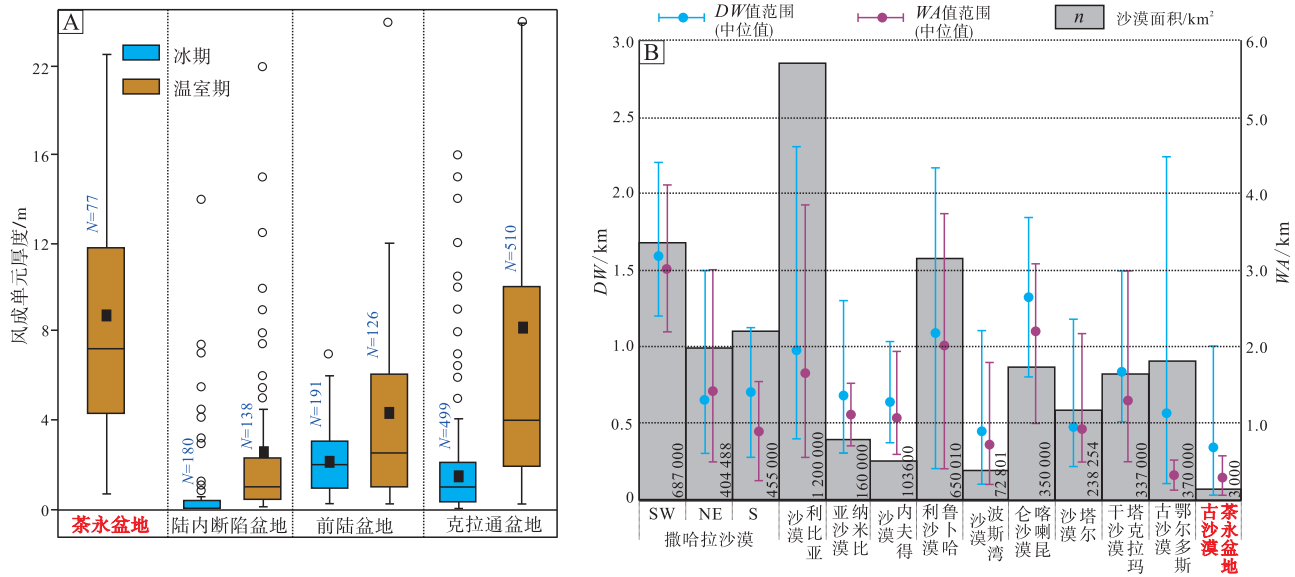
同时，Cosgrove 等(2023a)对全球分布的 56 个风成系统及其盆地性质进行了研究(未包含东亚大陆的风成沉积数据)，定量刻画了风成沉积结构的变化与其盆地背景之间的关系。在所统计的 18 个大陆裂陷(谷)盆地中，沙丘集单元(Dune-set Elements)平均厚度约 2 m，中位数为 1.3 m，沙席平均厚度约 1.3 m，中位数为 0.4 m，丘间平均厚度约 0.6 m，中位数为 0.3 m(Cosgrove *et al.*, 2023a)，表明裂陷盆地中的沙丘单元比其他类型盆地中的风成单元都要更薄。考虑到风成沙丘堆积的厚度是由攀升角度和原始沙丘大小之间的关系决定，Cosgrove 等(2023a)认为断—裂陷盆地的规模、沙丘的快速迁移、爬升角度低，限制了沙丘规模大小，形成较薄的沙丘集单元。然而，华南断陷盆地的风成沉积却不符合这一认识，其沙丘厚度及规模远大于全球大陆裂陷盆地内的风成沉积单元(图 8-A)。同时，茶永盆地是华南内陆的一个小型盆地，但在小型陆相盆地的盆缘高椅岭地区发育大规模的沙丘单元(图 8-B)，且大型沙丘遍布整个盆地，这与全球典型断陷盆地内仅发育小规模沙丘、盆缘发育砂席的特点完全不同。笔者通过对茶永盆地及其周缘的实地调查，初步推测现今的茶永盆地为残留盆地，其初始规模可能被远远低估了。首先，茶永盆地边缘巨型沙丘的存在，暗示所在区域可能不是原型盆地的边界；其次，茶永盆地周缘(西缘)与衡阳盆地之间仍分布有许多白垩系盆地的残体，单个残体面积不足 12 km^2 ，充填厚达千米的下白垩统栏陇组 and 神皇山组，孤零地分布在隆起区，故这些盆地可能是喜山期大型红层盆地被抬升

剥蚀的残留体，但不能排除这些残留体与茶永盆地相连接的可能。此外，茶永盆地白垩系底部多以一套河流相砾岩与前白垩系呈不整合接触，底砾岩层累积厚度仅 10~30 m，砾石磨圆度高，呈叠瓦状排列，与山前冲积扇相砾岩的混杂堆积完全不同，据经验公式 $D=81.5-12.7\ln T$ (T 为砾岩厚度)(刘林玉, 2003)，推断原始盆地边界距剖面点至少 40 km 以上，指示现今的“盆缘”区并非初始盆缘区。砾岩层之上普遍发育泥灰岩、泥晶灰岩及钙质结核(古土壤)夹层(湖南省地质调查院, 2017；吴学洪等, 2023)，进一步说明该时期湖平面相对开阔，受陆源注入影响小。部分学者通过磷灰石裂变径迹(AFT)数据和时间—温度模拟，提出了华南泛扬子白垩纪盆地的演化史(Tang *et al.*, 2014)。尽管后来有学者提出质疑(Chu *et al.*, 2020)，但白垩纪盆地的性质及其规模开始得到关注，且越来越多的沉积学证据表明，华南腹地白垩纪盆地的初始规模可能远超如今的残留盆地范围，茶永盆地及周缘的古沙漠是一个不可忽视的大沙漠，其沙漠化程度与鄂尔多斯古沙漠相当。从古沙漠视角出发，对华南白垩纪原型盆地规模的新认识，有助于对华南白垩纪古地理、盆山耦合过程及后期剥蚀程度等进行更深层次的思考。

4.2 沙丘构型定量重建及古风向恢复

沙丘内部发育三级界面，包括丘间界面(I)、叠加界面(S)及再作用界面(R)，这些风成界面为详细解释风成沙丘的发育、形状、类型、波长和爬坡角度以及整体沙海条件提供了关键信息(Kocurek and Day, 2018)。不同层级的界面，反映了风成沉积系统不同单元的成因类型和演化过程。通过对研究区出露良好的古沙丘 I、S、R 边界的表面几何形状以及它们所限定的交错层理方向的分析，重建了原始床沙的详细形态(Mountney and Howell, 2000)。

在茶永盆地东南缘飞天山—高椅岭地区，以发育大型沙丘为特征，其建设、累积与保存过程受盆地沉降、潜水面上下波动及风沙饱和度的联合控制，以干丘间沉积为主，局部发育潮湿型沙丘间沉积(Damp interdune)，子沙丘叠置在母沙丘之上形成巨型沙丘链(Draa)。平行于沙丘运移面的露头内部沉积构造简单，以大型板状交错层理为主，底部呈无收敛状，多以顺风方向高角度与“S”界面



A—箱须图显示陆内断陷盆地、前陆盆地和克拉通盆地的风成单元厚度，全球风成数据参考 Cosgrove 等 (2023a)；B—茶永盆地古沙漠与全球典型沙丘区面积、DW 值、WA 值对比图，全球风成数据参考 Cao 等 (2023b)

图 8 全球不同盆地的沙漠风成单元统计特征

Fig. 8 Statistical characteristics of aeolian elements in different basins around the world

相切。沙丘顶部颗粒流层走向延伸稳定，沙丘前积层倾角沿下风方向有变缓的趋势，沙丘顶部的局部偶尔出现向上风方向缓倾的层理，整体上类似于新墨西哥州白沙地横向沙丘的构造 (Bigarella, 1972)。从图 9-A、9-B 可以看出，上风向倾斜的极低角度 (近水平)“I”界面是区域上风成沙丘连续爬升而形成的沙丘间迁移面，该界面常在数千米范围内可追踪和对比 (Kocurek, 1981)。“S”界面呈下风向倾斜，是子沙丘在母沙丘之上的叠加迁移形成的分界面，往往代表一个规模较小、迁移速率较快的子沙丘叠置在规模较大、迁移速度较慢的母沙丘之上，或分布其两翼周缘。经古地磁旋转校正后，沙丘交错层理的平均倾向为 8°，“S”界面 (叠加面) 的平均倾向为 10.2°，前积层相对“S”界面有 4.2°的逆时针偏转。利用 Rubin 和 Hunter (1983) 的立体图—球面投影图法，由交错层理面和叠加面所绘制的两面交线得知子沙丘走向为 90.4°，子沙丘迁移方向为 0.4°，而母沙丘的迁移方向为 10.2°，说明子沙丘相对于母沙丘有 9.8°的倾斜，倾向北。此外，前积层倾向的发散角很小，平行于沙丘迁移方向的前积层厚度大，展布十分稳定，指示母沙丘演化到了成熟阶段；垂直于沙丘迁移的剖面上，沙丘前积层面和风成界面呈水平展

布，说明母沙丘脊线平直，为横向沙丘 (Rubin and Carter, 1987)。因此，飞天山—高椅岭地区神皇山组露头表现为横向沙丘攀爬在另一个更大的横向沙丘上，为一个复合床沙。前积层交错层理的平均倾向 8°，沙丘向北方向移动，表明研究区地表的盛行风是南风。

在茶永盆地北缘腰潞镇—渡口地区，沙丘露头上普遍发育槽状交错层理，以发育干旱型沙丘间 (Dry interdune) 沉积为主；同时，沙丘层之上河流、湖泊等水流对沙丘的改造，可能促成了该地区沙席的发育 (Cosgrove et al., 2023b)。沙丘间界面 (I) 与前积层倾向相反，并截切沙丘前积层和其他界面。沙丘内部发育多级风成界面，其中“S”界面是沙丘演替的结果，老沙丘形成沉积基底，新沙丘在迎风坡上迁移、攀爬，从而使得先沉积前积层被侵蚀切割。前积层倾角有一定发散，整体小于 36°；垂直于沙丘运移方向“S”界面为槽状，据风成界面和内部构造关系判断沙丘脊线弯曲，这些特征与巴西 Parnaíba 盆地的新月形沙丘内部构造较为相似 (Kifumbi et al., 2023)。沙丘交错层理的平均倾向为 40°，“S”界面 (叠加面) 的平均倾向为 35.2°，前积层相对“S”界面有 4.2°的逆时针偏转。叠加“I”界面平均倾向为 210°，为典型的

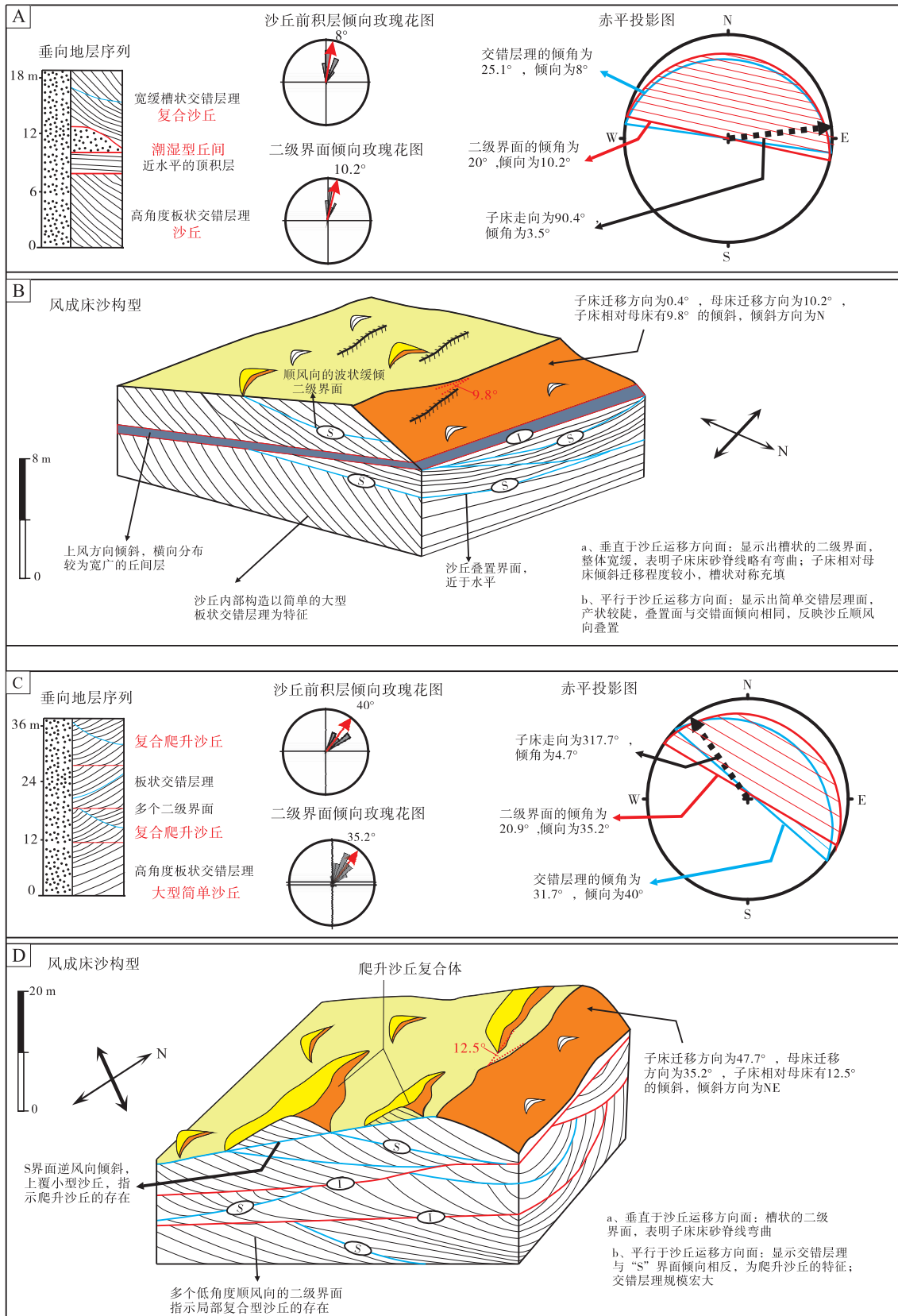


图 9 茶永盆地飞天山地区 (A-B) 和渡口地区 (C-D) 白垩系沙丘建模

Fig. 9 Morphometric reconstruction of the Cretaceous aeolian dunes in Feitianshan (A-B) and Dukou (C-D) regions, Chayong Basin

爬升沙丘类型。根据 Rubin 和 Hunter (1983) 的立体图投影可知, 由“S”界面和交错层理所绘制的两面交线, 得到子沙丘砂脊的走向为 317.7° , 倾向为 NE, 与母沙丘的迁移方向相差 12.5° 。此外, 前积层倾向的发散角小于 60° 以及垂直于沙丘运移面发育有良好的槽状交错层理, 其中层理与界面形态较为一致, 说明了母沙丘为曲脊横向沙丘, 而子沙丘为规模相对较小的新月形沙丘 (Rubin and Hunter, 1983; Rubin and Carter, 1987)。总之, 腰潞镇一渡口地区出露的露头代表了在一个较大的横向母沙丘上有多个新月形沙丘攀爬, 整体为一个复杂床沙。根据上述沙丘解析得知, 茶永盆地南缘主要发育以新月型、横向沙丘为主的复合型横流沙丘, 北缘发育巨型 (爬升) 叠加复合沙丘 (图 9), 且该类型的沙丘总体上脊线平直或微弯曲, 大部分露头顺风向积层倾向展开角小于 60° 。因此, 在床沙类型确定的前提下, 经过古风向校正, 显示晚白垩世早期茶永盆地的盛行风为南风, 向北有往东偏转的趋势, 呈北东风向 (图 9)。

华南地区白垩纪晚期的副热带高压带及其辐射轴的位置深刻影响着北半球大气环流样式及演变, 并决定中低纬度带沙漠干旱环境的时空分布, 故其南北向漂变规律是古气候研究的关键问题之一 (Hasegawa *et al.*, 2010, 2012; Wu *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2021a)。Hasegawa 等 (2010) 认为副热带高压总体上位于泰国 Khorat 盆地的北边, 但在沉积期间有南北向的漂变。结合华南四川盆地和思茅盆地风成沙漠的分布, 推测白垩纪中期 (Aptian-Turonian) 副热带高压带位于 16.3°N 至 29.6°N 之间 (Hasegawa *et al.*, 2012)。由此可见, 沙漠分布直接反映了副热带高压带的位置, 保存在沙漠沉积物中的地面盛行风揭示了其辐射轴的确切位置, 代表着 Hadley 环流的近地边缘带。部分学者通过对华南陆块多个晚白垩世陆相盆地中风成沙丘的古风向数据统计, 结合古纬度数据, 对副热带高压带的位置进行了优化调整, 推测其应位于江汉盆地、信江盆地和衡阳盆地所在的纬度区域 (Wu *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2021a)。依据沙丘构型重建及古风向结果, 茶永盆地的盛行风为正北向, 而往北盛行风有向东偏移的趋势, 主要为北东向 (黄乐清 *et al.*, 2019; Yu *et al.*, 2021b)。该风向在北半球主要出现在副热带高压带北缘的正下方, 说明白垩纪中期

副热带高压带的辐射轴至少在湖南郴州以南; Wu 等 (2017) 通过对思茅盆地 (白垩纪古纬度介于 $20.9^\circ\text{N} \sim 27.6^\circ\text{N}$) 的横向沙丘古风向统计, 指示该盆地平均古风向为西南风, 受东北信风的控制 (Wu *et al.*, 2017)。因此, 结合华南各陆相盆地的白垩纪中期古风向数据以及古地理分布特点, 笔者推测白垩纪中期, 副热带高压带介于茶永盆地和思茅盆地之间的古纬度区域。结合早白垩世和晚白垩世风成砂岩沉积分布于鄂尔多斯、塔里木盆地等中纬度地区 ($32.6^\circ\text{N} \sim 41.0^\circ\text{N}$ 或 $(36.8 \pm 4.2)^\circ\text{N}$), 笔者的研究结果支持副热带高压带随全球平均气温变化而发生漂移的认识, 认为在白垩纪中期的“超级温室”时期, 当大气二氧化碳水平和/或全球温度超过一定阈值时, 哈德利环流将急剧萎缩。

4.3 风成沉积堆积、保存控制因素

风成沉积地层结构样式一般受内部因素 (盆地性质) 和外部因素 (地貌和地理条件、潜在源区和沉积物特征、植被和气候条件) 的双重控制 (Cao *et al.*, 2023b)。风成沉积地层结构是床沙底形的大小 (顺风波长) 以及床沙迁移攀爬角度 (迁移率与堆积面上升率之比) 的时间函数, 顺风波长决定堆积物的总规模, 沙源供给和沉积可容空间的变化决定爬升角度, 任何一个变量随空间或时间的变化都将改变最终的堆积结构 (Cosgrove *et al.*, 2023a)。因此, 风成沉积地层结构是反演风成沉积建设、堆积与保存过程的可靠地质档案 (Bristow *et al.*, 1999)。

受不同古地理位置的地形、水文条件影响, 研究区不同区域分别发育干旱型风成体系或潮湿型风成体系。在统计的有限沙丘参数中, 沙丘残留厚度 (λ) 介于 $1.5 \sim 22.9\text{m}$ 之间, 爬坡角 (φ) 介于 $1.1^\circ \sim 2.5^\circ$ 之间, 波长 (DW) 介于 $85.2 \sim 1062.0\text{m}$ 之间。其中, 自下而上, 波长有增大的趋势, 而爬坡角有减小的趋势, 如风成序列底部的小型沙丘波长约为 125.2m , 计算的爬坡角为 2.2° , 而位于沙海中心的叠加沙丘测量波长最大值为 1062m , 计算的爬坡角仅为 1.2° 。与此同时, 风成序列底部砂席沉积中见大量的中砂组分 EM4 ($315.02\ \mu\text{m}$) 和细砂组分 EM3 ($160.21\ \mu\text{m}$), 其分布范围较大, 主要由河流向盆地内部输入改造、迁移形成。风成序列中部沙丘是构建在砂席基础之上的, 表现为爬坡角的减小、粒度组分以细砂

EM3 (160.21 μm) 和黏土 EM1 (9.35 μm) 为主 (图 4; 表 2), 另外见少量潮湿丘间沉积, 粒度组分以 EM1 (9.35 μm) 和 EM2 (83.17 μm) 为主, 这可能归因于沙丘沉积物中的细砂磨蚀与再释放, 并在沙丘迁移运动时被搬运至砂席沉积物与潮湿丘间中 (Lancaster and Mountney, 2021)。风成沉积堆积过程可能主要受潜水面的升降控制, 茶永盆地风成序列底部普遍发育潮湿型丘间粘结层, 沉积物之间出现一些水成环境的泥质粉砂岩层和泥砾 (图 3-E), 侧向延伸超过 20 m, 属于典型的覆水丘间型风积系统 (wet interdune)。这种环境下砂粒积聚速度受相对水位波动速度的控制, 堆积面的快速上升使其能够以相对较高的角度攀升, 并由于潜水面抬升至丘间之上, 对沙丘沉积物起到保存作用 (图 10-A)。潜水面对沙丘沉积的影响, 在研究区内也被沙丘前积层的液化变形以及丘间波纹层与上覆风成沙丘单元前积层趾部的过渡关系所证实 (图 3-D)。而在干燥的风成系统中, 即飞天山—高椅岭、渡口一带, 风成沙丘规模巨大, 波长可达 1062 m、宽达 418 m, 攀爬角度约 1.1°, 丘间以干燥型为主, 局部偶见潮湿丘间沉积 (Damp interdune)。当风的搬运累积作用占主导时, 沙丘逐渐生长, 直至整个沙床都被沙丘覆盖且丘间被充填, 此时爬升沙丘逐渐开始形成 (图 9-D)。在这种情况下, 堆积速度基本上受风积连续性原理的制约, 当沙粒完全饱和的气流减速时, 所携带的部分沙粒就会沉积下来 (Mountney and Howell, 2000)。因此, 在干燥的风成系统中, 气流速度影响爬升角的大小, 风速加大造成对沙丘迎风面形成强烈侵蚀并导致爬升角的减小, 产生多级风成界面, 这一现象在研究区沙丘构型解析中普遍可见 (图 7)。研究区相对更多的底层床面被截断, 这反映出风沙运移速率远超过了茶永盆地可容空间的形成速率 (图 10-B)。

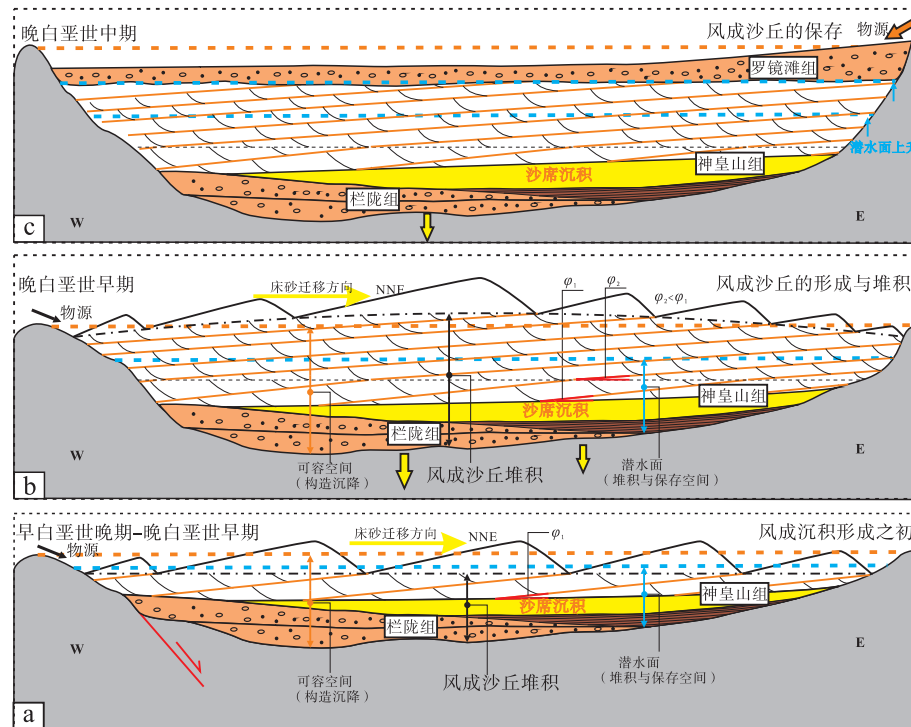
同时, 研究区内大规模的沙丘发育, 意味着大量砂源的可利用和相对可容空间增大到接近或超过堆积表面的水平。白垩纪亚洲中低纬度地区形成的近带状的浩瀚沙漠干旱地带, 与哈德莱环流的收缩和岩石圈构造驱动作用及地形效应有关, 指示了极端干旱气候背景下物源区有大量沙源可利用 (Hasegawa *et al.*, 2012; Wu *et al.*, 2022)。部分学者通过在东亚沿岸带山前断陷盆地中发现的晚白垩

世早期巨厚层磨拉石堆积, 首次提出东亚边缘存在南北向的沿海山脉 (陈丕基, 1997)。沿海山脉隆起, 在其西坡上沉积了大量厚层沉积物, 这种情况可能与当今北美西部的情况相似 (Suo *et al.*, 2019)。古高程模拟结果表明, 在晚白垩世早期, 沿海山脉古海拔可能超过 2 km, 随后 (85–66 Ma) 逐渐降低 (Zhang *et al.*, 2016)。盆地南缘沿岸山脉的隆起, 产生相对较高的剥蚀速率, 为山脉北缘陆相盆地建造大型沙丘提供了丰富的沉积物源。此外, 茶永盆地形成于古太平洋板块向西俯冲、华南内陆大规模的断陷沉降与拉伸的背景下, 断陷盆地将经历最高的可容空间生成速率。沈尚峰 (2008) 通过回剥分析方法计算和模拟了江陵凹陷自晚白垩世以来的盆地总沉降和构造沉降速率, 认为晚白垩世盆地构造沉降速率为 90 m/Ma, 高于全球裂陷盆地平均 61.9 m/Ma 的沉降速率 (Cosgrove *et al.*, 2023a)。湖南白垩纪盆地的地质背景、物质充填、古气候条件均与江汉盆地类似 (Dong *et al.*, 2023; 李建华等, 2024), 因此, 该结果可作为湖南断陷盆地发育的一个数据参考。进入晚白垩世中期, 盆地周缘发生强烈抬升和剥蚀, 盆内基底快速沉降伴随潜水面的升高, 大量粗碎屑强烈进积, 致使风成沉积大部分被粗碎屑沉积所覆盖, 砾岩层覆盖、潜水面上升及可容空间的增大, 促成了风成沙丘与丘间单元的堆积和保存 (图 10-C)。

5 结论

1) 基于茶永盆地白垩系风成沉积的粒度端元分析和沙丘构型定量重建, 揭示了茶永盆地的初始规模、沙丘形态及古风向特征。首次提出华南腹地的小型盆地内发育大型沙丘, 推测茶永原型盆地白垩纪沙漠可能为一个可类比鄂尔多斯古沙漠或塔克拉玛干沙漠的大型沙漠。基于沙丘构型重建, 研究区床沙类型主要为新月形复合沙丘和 (爬升) 横向沙丘等。恢复的古风向为 N-NE 向, 主要受北半球西风带控制, 并认为北半球副热带高压辐射轴位于茶永盆地和沿岸山脉之间的区域。

2) 茶永盆地不同尺度沙丘的形成主要受控于沙源供给速率、沉积可容空间的变化以及全球气候背景。盆地周缘的构造隆升和水系发育为盆内沙漠的形成提供了丰富的沉积物源, 而断陷盆地基底下沉和潜水面的升降则为风成沉积物的累积和保存创



a—茶永盆地发育早期，以伸展构造为主，发育一套粗碎屑辫状河道沉积（栏陇组），之上见湖泊沉积与沙席、沙丘沉积（神皇山组），断陷背景下的盆地沉积形成了未充填的可容纳空间，潜水面与可容空间均在沙丘堆积面之上，发育湿润型丘间沉积；爬升角度大，风成沙丘元素得到较好的保存。b—茶永盆地处于强烈拗陷阶段，该时期盆地内可容纳空间显著增加，周缘充分的沉积物供给以及有效的地形阻隔促进了风成砂的堆积；爬升角减小，而沙丘长度增大，沙丘集单元增厚，以干燥型沙丘间沉积为主，潜水面低于风成沉积面。c—茶永盆地周缘发生强烈抬升和剥蚀，伴随盆地内进一步拗陷，此时大量粗碎屑强烈进积，致使风成沉积大部分被粗碎屑沉积所覆盖，风成砂的保存与砾岩层覆盖及随后相对湿润的气候、潜水面上升有关

图 10 茶永盆地白垩系风成沉积形成—堆积—保存模式

Fig. 10 Model for construction, accumulation and preservation of the Cretaceous aeolian bedform in Chayong Basin

造了容纳空间。这些因素共同作用，为相对较高的爬升角度和相对较大沙丘的形成提供了必要的条件，促进了沙丘的建设和保存，形成了具有区域特色的风成沉积体系。

3) 本研究加深了对华南腹地白垩系沙丘形态特征及规模的认识，为评估原型盆地规模、盆山耦合过程及后期剥蚀程度提供了新的视角。

致谢 成都理工大学吴驰华研究员在野外风成沉积调查与研究过程中给予了诸多指导，野外工作得到了石宇翔、秦江颖、张小凤等同志的帮助，两位审稿专家对论文修改提出了宝贵建议，在此表示最诚挚的感谢！

附加材料 附表 1 由作者提供，数据真实性由作者负责。在线查看网址：<http://www.gdxb.cn/CN/10.7605/gdxb.2024.06.103>。

参考文献 (References)

- 曹硕. 2020. 中国东部晚白垩世风成沉积盆地型沙漠体系. 中国地质大学(北京)博士学位论文. [Cao S. 2020. Late Cretaceous aeolian deposits in Eastern China: the intermountain erg system. Doctoral dissertation of China University of Geosciences (Beijing)]
- 陈留勤, 李鹏程, 郭福生, 刘鑫, 李馨敏. 2019. 粤北丹霞盆地晚白垩世丹霞组沉积相及古气候意义. 沉积学报, 37(1): 17-29. [Chen L Q, Li P C, Guo F S, Liu X, Li X M. 2019. Facies analysis and paleoclimate implications of the Late Cretaceous Danxia Formation in the Danxia Basin, northern Guangdong Province, South China. Acta Sedimentologica Sinica, 37(1): 17-29]
- 陈丕基. 1997. 晚白垩世中国东南沿岸山系与中南地区的沙漠和盐湖化. 地层学杂志, 21(3): 203-213. [Chen P J. 1997. Coastal mountains of SE China, desertization and saliniferous lakes of central China during the Upper Cretaceous. Journal of Stratigraphy, 21(3): 203-213]
- 黄乐清, 黄建中, 罗来, 王先辉, 刘耀荣, 梁恩云, 马慧英. 2019. 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. 沉积学报, 37(4): 735-748. [Huang L Q, Huang J Z, Luo L, Wang X H, Liu Y R, Liang E Y, Ma H Y. 2019. The discovery of Cretaceous eo-

- lian deposits at the eastern margin of the Hengyang Basin, Hunan, and its paleoenvironmental significance. *Acta Sedimentologica Sinica*, 37(4): 735–748]
- 黄乐清, 吴驰华, 周丽芸, 金妮, 彭世良, 胡能勇, 杨长明, 陈杰. 2023. 湖南郴州丹霞地貌景观特征、成因及演化探讨. *现代地质*, 37(6): 1680–1694. [Huang L Q, Wu C H, Zhou L Y, Jin N, Peng S L, Hu N Y, Yang C M, Chen J. 2023. New perspectives of the features, formation, and evolution of the special Danxia landscape in Chenzhou, Hunan. *Geoscience*, 37(6): 1680–1694]
- 湖南省地质调查院. 2017. 中国区域地质志·湖南志. 北京: 地质出版社, 1–300. [Hunan Institute of Geological Survey. 2017. Regional Geology of China: Hunan Province. Beijing: Geological Publishing House, 1–300]
- 李建华, 董树文, 赵国春, 张岳桥, 辛宇佳, 王金铭, 卢运可. 2024. 华南晚中生代大陆变形、深部过程及动力学. *地质学报*, 98(3): 829–861. [Li J H, Dong S W, Zhao G C, Zhang Y Q, Xin Y J, Wang J M, Lu Y K. 2024. Late Mesozoic continental deformation, deep processes, and geodynamic evolution of South China. *Acta Geologica Sinica*, 98(3): 829–861]
- 刘林玉. 2003. 焉耆中生代原型盆地沉积特征与盆地边界的确定. 西北大学博士学位论文. [Liu L Y. 2003. Sedimentary characteristics of the Yanqi prototype basin in Mesozoic Era and the determination of the basin boundaries. Doctoral dissertation of Northwest University]
- 罗霖炎, 高鑫, 赵永成. 2023. 新月形沙丘表面流场特征. *中国沙漠*, 43(4): 41–54. [Luo L Y, Gao X, Zhao Y C. 2023. The surface flow pattern characteristics of barchan dunes. *Journal of Desert Research*, 43(4): 41–54]
- 沈高峰. 2008. 江汉盆地江陵凹陷的构造格架和演化. 中国地质大学(北京)硕士学位论文. [Sheng S F. 2008. Tectonic framework and evolution of Jiangling Depression in Jianghan Basin. Masteral dissertation of China University of Geosciences(Beijing)]
- 石宇翔, 吴驰华, 黄乐清, 伊海生, 李智武, 焦海菁, 杨嘉宝, 秦江颖, 张小凤, 周亚楠, Juan Pedro Rodriguez-López. 2023. 华南衡阳盆地上白垩统黄土类似物的初步研究. *地质学报*, 97(9): 3101–3115. [Shi Y X, Wu C H, Huang L Q, Yi H S, Li Z W, Jiao H J, Yang J B, Qin J Y, Zhang X F, Zhou Y N, Rodriguez-López J P. 2023. Preliminary study of Late Cretaceous loess-like sediments in the Hengyang Basin, South China. *Acta Geologica Sinica*, 97(9): 3101–3115]
- 汤海磊, 梁瑞, 伊海生, 李高杰. 2022. 楚雄盆地白垩纪晚期盐湖风成砂微观组构特征研究. *矿产综合利用*, 43(1): 57–70. [Tang H L, Liang R, Yi H S, Li G J. 2022. Study on the microstructure characteristics of Late Cretaceous aeolian sand in the playa from Chuxiong Basin. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 43(1): 57–70]
- 吴学洪, 徐亚东, 许笑玮, 张黎渊, 何妍. 2023. 湘东南茶永盆地白垩纪—古近纪沉积古地理演化. *华南地质*, 39(2): 214–234. [Wu X H, Xu Y D, Xu X W, Zhang L Y, He Y. 2023. Cretaceous–Paleogene paleogeographic evolution of the Chaling–Yongxing Basin in southeastern Hunan Province. *South China Geology*, 39(2): 214–234]
- 许欢, 柳永清, 旷红伟, 彭楠, 丁家翔, 杜研, 苑婷媛. 2023. 古风成沉积理论体系与研究进展. *沉积学报*, 41(6): 1681–1713. [Xu H, Liu Y Q, Kuang H W, Peng N, Ding J X, Du Y, Yuan T Y. 2023. Theoretical system and research progress of eolian deposits. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(6): 1681–1713]
- 杨军怀. 2019. 塔克拉玛干沙漠沙丘移动研究. 陕西师范大学硕士学位论文. [Yang J H. 2019. A study of dune movement in the Taklamakan Desert. Masteral dissertation of Shaanxi Normal University]
- 朱筱敏, 陈贺贺, 谈明轩, 李顺利, 秦祎, 杨棵. 2023. 从太平洋到喜马拉雅的沉积学新航程: 21届国际沉积学大会研究热点分析. *沉积学报*, 41(1): 126–149. [Zhu X M, Chen H H, Tan M X, Li S L, Qin Y, Yang K. 2023. A new journey in sedimentology from the Pacific to the Himalayas: analysis of research hotspots from the 21st International Sedimentological Congress. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(1): 126–149]
- Bálico M B, Scherer C M S, Mountney N P, Souza E G, Reis A D, Raja Gabaglia G P, Magalhães A J C. 2017a. Sedimentary cycles in a Mesoproterozoic aeolian erg-margin succession: Mangabeira Formation, Espinhaço Supergroup, Brazil. *Sedimentary Geology*, 349: 1–14.
- Bálico M B, Scherer C M S, Mountney N P, Souza E G, Chemale F, Pisarevsky S A, Reis A D. 2017b. Wind-pattern circulation as a palaeogeographic indicator: case study of the 1.5–1.6 Ga Mangabeira Formation, São Francisco Craton, Northeast Brazil. *Precambrian Research*, 298: 1–15.
- Bigarella J J. 1972. Eolian environments: their characteristics, recognition, and importance. In: Rigby J K, Hamblin W K (eds). *Recognition of Ancient Sedimentary Environments*. SEPM Society for Sedimentary Geology.
- Bristow C S, Skelly R L, Ethridge F G. 1999. Crevasse splays from the rapidly aggrading, sand-bed, braided Niobrara River, Nebraska: effect of base-level rise. *Sedimentology*, 46: 1029–1047.
- Bryant R. 2010. Deserts and desert environments. *The Geographical Journal*, 176(1): 119.
- Cao S, Zhang L M, Wang C S, Ma J, Tan J, Zhang Z H. 2020. Sedimentological characteristics and aeolian architecture of a plausible intermountain erg system in Southeast China during the Late Cretaceous. *GSA Bulletin*, 132: 2475–2488.
- Cao S, Ma J, Wang C. 2023a. The sedimentological characteristics of the intermontane desert system in the Jurong Basin, South China and its relationship with the Late Cretaceous hot climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 623: 111618.
- Cao S, Ma J, Zhang L M. 2023b. Quantitative reconstruction of Early Cretaceous dune morphology in the Ordos paleo-desert and its paleoclimatic implications. *Frontiers in Earth Science*, 11: 1142034.
- Cao S, Zhang L M, Mountney N P, Ma J, Hao M G, Wang C S. 2023c. Ultra-long-distance transport of aeolian sand: the provenance of an intermontane desert, south-east China. *Sedimentology*, 70(7): 2108–2126.
- Chen Y, Meng J, Liu H, Wang C S, Tang M, Liu T, Zhao Y N. 2022. Detrital zircons record the evolution of the Cathaysian Coastal Mountains along the South China margin. *Basin Research*, 34(2): 688–701.
- Chu Y, Lin W, Faure M, Allen M B, Feng Z T. 2020. Cretaceous exuma-

- tion of the Triassic intracontinental Xuefengshan Belt: delayed unroofing of an orogenic plateau across the South China Block? *Tectonophysics*, 793: 228592.
- Cosgrove G I E, Colomera L, Moutney N P. 2021. Quantitative analysis of the sedimentary architecture of eolian successions developed under icehouse and greenhouse climatic conditions. *GSA Bulletin*, 133: 2625–2644.
- Cosgrove G I E, Colomera L, Moutney N P. 2023a. Quantitative analysis of aeolian stratigraphic architectures preserved in different tectonic settings. *Earth-Science Reviews*, 237: 104293.
- Cosgrove G I E, Colomera L, Moutney N P, Basilici G, Mesquita Á F, Soares M V. 2023b. Precambrian aeolian systems: a unique record? *Precambrian Research*, 392: 107075.
- Crouvi O, Amit R, Enzel Y, Porat N, Sandler A. 2008. Sand dunes as a major proximal dust source for late Pleistocene loess in the Negev desert, Israel. *Quaternary Research*, 70: 275–282.
- Dong S W, Li J H, Gao R, Cawood P A, Thybo H, Johnston S T, Jiao L Q, Zhang Y Q, Wang J M. 2023. Intraplate lithospheric extension revealed by seismic reflection profiling of South China. *Earth and Planetary Science Letters*, 609: 118100.
- Folk R L, Ward W C. 1957. A study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27: 3–26.
- Hasegawa H, Imsamut S, Charusiri P, Tada R, Horiuchi Y, Hisada K I. 2010. ‘Thailand was a desert’ during the mid-Cretaceous: equatorward shift of the subtropical high-pressure belt indicated by eolian deposits (Phu Thok Formation) in the Khorat Basin, northeastern Thailand; Thailand was a desert in the mid-Cretaceous. *Island Arc*, 19: 605–621.
- Hasegawa H, Tada R, Jiang X, Sukanuma Y, Imsamut S, Charusiri P, Ichinnorov N, Khand Y. 2012. Drastic shrinking of the Hadley circulation during the mid-Cretaceous Supergreenhouse. *Climate of the Past*, 8: 1323–1337.
- Hay W W. 2011. Can humans force a return to a ‘Cretaceous’ climate? *Sedimentary Geology*, 235: 5–26.
- Hême de Lacotte V J P, Moutney N P. 2022. A classification scheme for sedimentary architectures arising from aeolian-fluvial system interactions: Permian examples from southeast Utah, USA. *Aeolian Research*, 58: 100815.
- Howell J, Moutney N. 2001. Aeolian grain flow architecture: hard data for reservoir models and implications for red bed sequence stratigraphy. *Petroleum Geoscience*, 7: 51–56.
- Jiao H J, Wu C H, Rodríguez-López J P, Sun X M, Yi H S. 2020. Late Cretaceous plateau deserts in the South China Block, and Quaternary analogues: sedimentology, dune reconstruction and wind-water interactions. *Marine and Petroleum Geology*, 120: 104504.
- Jones F H, dos Santos Scherer C M, Kifumbi C. 2021. Aeolian dunes morphodynamics and wind regime reconstruction in mid-latitudes of the Gondwana during Early Permian, Aracaré Formation, Sergipe – Alagoas Basin, Brazil. *Aeolian Research*, 50: 100672.
- Kifumbi C, dos Santos Scherer C M, Dalla Lana Michel R, dos Reis A D, Guadagnin F, de Souza E G, Ferronato J P F, Jones F H. 2023. Spatial and temporal variation in the evolution of ancient aeolian dune-field, the Pennsylvanian Piauí Formation (Parnaíba Basin), Brazil. *Sedimentary Geology*, 451: 106398.
- Kocurek G. 1981. Significance of interdune deposits and bounding surfaces in aeolian dune sands. *Sedimentology*, 28: 753–780.
- Kocurek G, Nielson J. 1986. Conditions favourable for the formation of warm-climate aeolian sand sheets. *Sedimentology*, 33: 795–816.
- Kocurek G, Day M. 2018. What is preserved in the aeolian rock record? a Jurassic Entrada sandstone case study at the Utah-Arizona border. *Sedimentology*, 65: 1301–1321.
- Lancaster N, Moutney N P. 2021. Eolian processes and sediments. In: *Encyclopedia of Geology*. Amsterdam: Elsevier, 809–829.
- Li J H, Zhang Y Q, Dong S W, Johnston S T. 2014. Cretaceous tectonic evolution of South China: a preliminary synthesis. *Earth-Science Reviews*, 134: 98–136.
- Liang P, Yang X P. 2023. Grain shape evolution of sand-sized sediments during transport from mountains to dune fields. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 128: e2022JF006930.
- Mesquita Á F, Basilici G, Soares M V T, Janočko J, Moutney N P, Colomera L, de Souza Filho C R. 2021. Hybrid dry-wet interdune deposition in Precambrian aeolian systems: Galho do Miguel Formation, SE Brazil. *Sedimentary Geology*, 425: 106007.
- Moutney N P. 2004. Feature: the sedimentary signature of deserts and their response to environmental change. *Geology Today*, 20: 101–106.
- Moutney N P. 2006. Periodic accumulation and destruction of aeolian erg sequences in the Permian Cedar Mesa Sandstone, White Canyon, southern Utah, USA. *Sedimentology*, 53: 789–823.
- Moutney N P. 2012. A stratigraphic model to account for complexity in aeolian dune and interdune successions: modelling aeolian dune-interdune architecture. *Sedimentology*, 59: 964–989.
- Moutney N, Howell J. 2000. Aeolian architecture, bedform climbing and preservation space in the Cretaceous Etjo Formation, NW Namibia. *Sedimentology*, 47: 825–849.
- Moutney N P, Thompson D B. 2002. Stratigraphic evolution and preservation of aeolian dune and damp/wet interdune strata: an example from the Triassic Helsby Sandstone Formation, Cheshire Basin, UK. *Sedimentology*, 49: 805–833.
- Moutney N P, Russell A J. 2009. Aeolian dune-field development in a water table-controlled system: Skeidarársandur, Southern Iceland. *Sedimentology*, 56: 2107–2131.
- Moutney N, Howell J, Flint S, Jerram D. 1999. Climate, sediment supply and tectonics as controls on the deposition and preservation of the aeolian-fluvial Etjo Sandstone Formation, Namibia. *Journal of the Geological Society*, 156: 771–777.
- Paterson G A, Heslop D. 2015. New methods for unmixing sediment grain size data. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16: 4494–4506.
- Postma G. 1990. Depositional architecture and facies of river and fan deltas: a synthesis. In: *Coarse-Grained Deltas (1st ed)*. Wiley: 13–27.
- Pulvertaft T C R. 1985. Aeolian dune and wet interdune sedimentation in the Middle Proterozoic Dala sandstone, Sweden. *Sedimentary Geology*, 44: 93–111.
- Rodríguez-López J P, Wu C H. 2020. Recurrent deformations of aeolian desert dunes in the Cretaceous of the South China Block: trigger

- mechanisms variability and implications for aeolian reservoirs. *Marine and Petroleum Geology*, 119: 104483.
- Rodríguez-López J P, Meléndez N, De Boer P L, Soria A R. 2012. Controls on marine-erg margin cycle variability: aeolian-marine interaction in the mid-Cretaceous Iberian Desert System, Spain: aeolian-marine interaction in the mid-Cretaceous Iberian Desert System, Spain. *Sedimentology*, 59: 466–501.
- Rodríguez-López J P, Clemmensen L B, Lancaster N, Mountney N P, Veiga G D. 2014. Archean to recent aeolian sand systems and their sedimentary record: current understanding and future prospects. *Sedimentology*, 61: 1487–1534.
- Romain H G, Mountney N P. 2014. Reconstruction of three-dimensional eolian dune architecture from one-dimensional core data through adoption of analog data from outcrop. *AAPG Bulletin*, 98(1): 1–22.
- Rubin M, Hunter R E. 1983. Reconstructing bedform assemblages from compound crossbedding. *Developments in Sedimentology*, 38: 407–427.
- Rubin D M, Carter C L. 1987. Cross-Bedding, Bedforms, and Paleocurrents. SEPM Society for Sedimentary Geology.
- Sun Z M, Yang Z Y, Yang T, Pei J L, Yu Q F. 2006. New Late Cretaceous and Paleogene paleomagnetic results from South China and their geodynamic implications. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 111(B3): B03101.
- Suo Y H, Li S Z, Jin C, Zhang Y, Zhou J, Li X Y, Wang P C, Liu Z, Wang X Y, Somerville I. 2019. Eastward tectonic migration and transition of the Jurassic-Cretaceous Andean-type continental margin along Southeast China. *Earth-Science Reviews*, 196: 102884.
- Tang S L, Yan D P, Qiu L, Gao J F, Wang C L. 2014. Partitioning of the Cretaceous Pan-Yangtze Basin in the central South China Block by exhumation of the Xuefeng Mountains during a transition from extensional to compressional tectonics? *Gondwana Research*, 25: 1644–1659.
- Vandenbergh J, Sun Y, Wang X, Abels H A, Liu X. 2018. Grain-size characterization of reworked fine-grained aeolian deposits. *Earth-Science Reviews*, 177: 43–52.
- Wu C H, Rodríguez-López J P. 2021. Cryospheric processes in Quaternary and Cretaceous hyper-arid plateau desert oases. *Sedimentology*, 68: 755–770.
- Wu C H, Liu C L, Yi H S, Xia G Q, Zhang H, Wang L C, Li G J, Wagreich M. 2017. Mid-Cretaceous desert system in the Simao Basin, southwestern China, and its implications for sea-level change during a greenhouse climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 468: 529–544.
- Wu C H, Rodríguez-López J P, Liu C L, Sun X M, Wang J Y, Xia G Q, Wagreich M. 2018. Late Cretaceous climbing erg systems in the western Xinjiang Basin: palaeoatmosphere dynamics and East Asia margin tectonic forcing on desert expansion and preservation. *Marine and Petroleum Geology*, 93: 539–552.
- Wu C H, Rodríguez-López J P, Santosh M. 2022. Plateau archives of lithosphere dynamics, cryosphere and paleoclimate: the formation of Cretaceous desert basins in east Asia. *Geoscience Frontiers*, 13: 101454.
- Wu C H, Sun X M, Li G W, Huang L Q, Jiao H J, Li Z W, Jian X, Mason C C, Rodríguez-López J P. 2023. Cretaceous mountain building processes triggered the aridification and drainage evolution in East Asia. *GSA Bulletin*, 136(5–6): 1863–1877.
- Xu H, Liu Y Q, Kuang H W, Peng N. 2019. Late Jurassic fluvial-eolian deposits from the Tianchihe Formation, Ningwu-Jingle Basin, Shanxi Province, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 174: 245–262.
- Yu X C, Liu C L, Wang C L, Li F, Wang J Y. 2020. Eolian deposits of the northern margin of the South China (Jiangnan Basin): reconstruction of the Late Cretaceous East Asian landscape in central China. *Marine and Petroleum Geology*, 117: 104390.
- Yu X C, Liu C L, Wang C L, Wang J Y. 2021a. Late Cretaceous aeolian desert system within the Mesozoic fold belt of South China: palaeoclimatic changes and tectonic forcing of East Asian erg development and preservation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 567: 110299.
- Yu X C, Wang C L, Bertolini G, Liu C L, Wang J Y. 2021b. Damp- to dry aeolian systems: sedimentology, climate forcing, and aeolian accumulation in the Late Cretaceous Liyou Basin, South China. *Sedimentary Geology*, 426: 106030.
- Zhang J, Liu Y G, Flögel S, Zhang T, Wang C S, Fang X M. 2021. Altitude of the East Asian coastal mountains and their influence on Asian climate during early Late Cretaceous. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 126: e2020JD034413.
- Zhang L M, Wang C S, Cao K, Wang Q, Tan J, Gao Y. 2016. High elevation of Jiaolai Basin during the Late Cretaceous: implication for the coastal mountains along the East Asian margin. *Earth and Planetary Science Letters*, 456: 112–123.
- Zhang X D, Wang H M, Xu S M, Yang Z S. 2020. A basic end-member model algorithm for grain-size data of marine sediments. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 236: 106656.
- Zheng C Y, Wang J Y, Li X H, Zhang C K. 2024. Intermontane erg environment and arid climate indicated from associated eolian and alluvial fan facies during the Late Cretaceous, South China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 264: 106044.
- Zhou N, Li Q, Zhang C L, Huang C H, Wu Y B, Zhu B Q, Cen S B, Huang X Q. 2021. Grain size characteristics of aeolian sands and their implications for the aeolian dynamics of dunefields within a river valley on the southern Tibet Plateau: a case study from the Yarlung Zangbo river valley. *Catena*, 196: 104794.

(责任编辑 张西娟; 英文审校 刘贺娟)