

楚雄盆地白垩纪晚期盐湖风成砂微观组构特征研究

汤海磊¹, 梁瑞², 伊海生^{1,3}, 李高杰¹

(1. 成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都 610059; 2. 四川省地质矿产勘查开发局成都综合岩矿测试中心, 四川 成都 610081; 3. 油气藏地质及开发工程重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 白垩纪是地球历史上一个持续时间较长的典型温室气候期, 受区域古地形叠加影响, 在东亚地区促成了广泛的干旱气候带, 并伴有大面积出露的古沙漠和蒸发岩沉积, 而楚雄盆地上白垩统江底河组即为该时期形成的一套干盐湖相红色碎屑岩夹膏盐沉积。通过光学显微镜和扫描电镜 (SEM) 及能谱 (EDS) 分析, 对江底河组砂岩石英颗粒结构形态及表面微形貌特征进行研究。结果显示, 楚雄盆地江底河组砂岩的石英颗粒具有高磨圆度和分选性、碟形撞击坑、“沙漠漆”以及强化学作用溶蚀孔 (洞) 群等现象, 展现出风成砂的典型特征。同时基于石英颗粒表面机械作用、化学 (溶蚀、沉淀) 作用及其组合特征, 系统总结了石英颗粒在不同沉积阶段和环境背景下, 其表面微形貌特征的演化规律。这项研究有助于对盐湖环境中风成砂的特征以及风成沉积和水成沉积相互作用机制的认识。

关键词: 石英颗粒; 表面特征; 扫描电镜 (SEM); 风成砂岩

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.01.007

中图分类号: TD989 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2022) 01-0048-12

前言

白垩纪是距今较近且持续时间最长的一个温室气候期^[1], 干旱、炎热基本笼罩整个特提斯域^[2-4]。尤其是内陆地区呈现广阔的沙漠气候环境, 以半球中低纬度大面积的白垩纪沙漠沉积最为典型^[5-10], 如信江盆地^[10-12]、苏北盆地^[13-14]、江汉盆地^[15]和四川盆地^[16-17]、兰坪-思茅盆地^[9,18-20]以及泰国呵叻盆地^[5]等地区。上述白垩纪沙漠群均以发育厚层状红色砂岩为特征, 而楚雄盆地作为东亚内陆盆地群之一, 白垩系广泛发育红色碎屑岩夹蒸发岩的组合, 但未有风成沉积的报道。目前而言, 前人研究多认为楚雄盆地白垩系归属于河流、滨湖相沉积^[21-22]; 针对江底河组, 前人仅提及及其出露的石膏层指示干盐湖相, 反映楚雄盆地在白垩纪晚期处于炎热干旱的古气候环境^[23-24]。同时, 楚雄盆地上白垩统在局部地区发育的大型交错层理、平行层理、同生泥砾等沉积构造, 特别是高成熟度砂

岩的岩石学特征并没有得到较好的描述和总结, 其沉积环境的解释仍显不足。石英颗粒作为一种最常见的造岩矿物, 由于较大的硬度和较高的化学稳定性等特点, 在搬运和沉积过程中, 保存有不同地质营力在石英颗粒表面形成的微形貌特征和组合^[25-27]。因此, 石英颗粒表面特征常作为识别不同沉积环境的一个重要技术手段。

江底河组发育高成熟度砂岩间夹蒸发岩薄层, 石英颗粒具有较为典型的风成作用特征, 是研究风成沉积 (风成砂) 和水成沉积 (盐湖) 相互作用的理想对象。基于上述科学问题和方法, 对楚雄盆地上白垩统江底河组红色厚层状碎屑岩的石英颗粒表面特征进行详细研究, 系统分析该套红层形成的古环境条件以及盐湖环境中风成砂的微观特征。同时, 探讨了古代风成石英颗粒和现代沙漠石英颗粒之间表面形态特征的差异, 建立了沉积环境演化与石英颗粒微形貌特征的模式。

收稿日期: 2020-07-02

基金项目: 国家自然科学基金 (41872099、41602127)

作者简介: 汤海磊 (1994-), 男, 硕士研究生, 研究方向为沉积学 (含古地理学) 专业。

通信作者: 梁瑞 (1985-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事岩石学环境地质学研究。

1 地质背景

楚雄盆地位于扬子地台西南边缘，是一个受到后期强烈改造的残留盆地。构造上，楚雄盆地位于扬子克拉通西缘古生代被动大陆边缘过渡壳基底之上，呈狭长状夹于哀牢山造山带和丽江台缘褶皱带之间^[28-30]，主体属康滇构造带，是特提斯构造域和滨太平洋构造域的结合部位。盆地北与攀西裂谷系相连，西为特提斯-青藏构造域的三江构造带，北西以红河-哀牢山断裂构造带为界，南与滇西兰坪-思茅盆地相隔^[28]（图 1A、1B）。中生代以来，在特提斯构造域和滨太平洋构造域多期联合和多次叠加过程中，楚雄盆地所属盆地边界及盆地内不同展布方向的先存基底断裂产生不同的运动特征，控制了其所属地层块分异的复杂

构造演化过程^[31-32]。

楚雄盆地广泛出露三叠系、侏罗系、白垩系地层，其中，白垩系地层最为发育，从底置顶依次为下白垩统高峰组、中白垩统普昌河组和马头山组以及上白垩统江底河组和赵家店组^[9,18,33-34]（图 1C）。其中，高峰寺组分布广泛，岩性主要为河流相灰色薄至中厚层状砂岩或粉砂岩，局部为灰色石英砂岩夹红色泥岩，与下伏上侏罗统妥甸组为假整合接触^[35]；普昌河组岩性主要为红色泥岩夹泥灰岩、薄层砂岩，局部可见薄层钙结壳沉积，为一套半干旱气候背景下的河-湖相沉积，与下伏高峰寺组整合接触；马头山组主要为一套红色石英砂岩夹砾岩及泥岩，砂岩可见大型板状交错层理，与下伏普昌河组为假整合接触；江底河组与下伏马头山组整合接触，岩性多为杂色泥

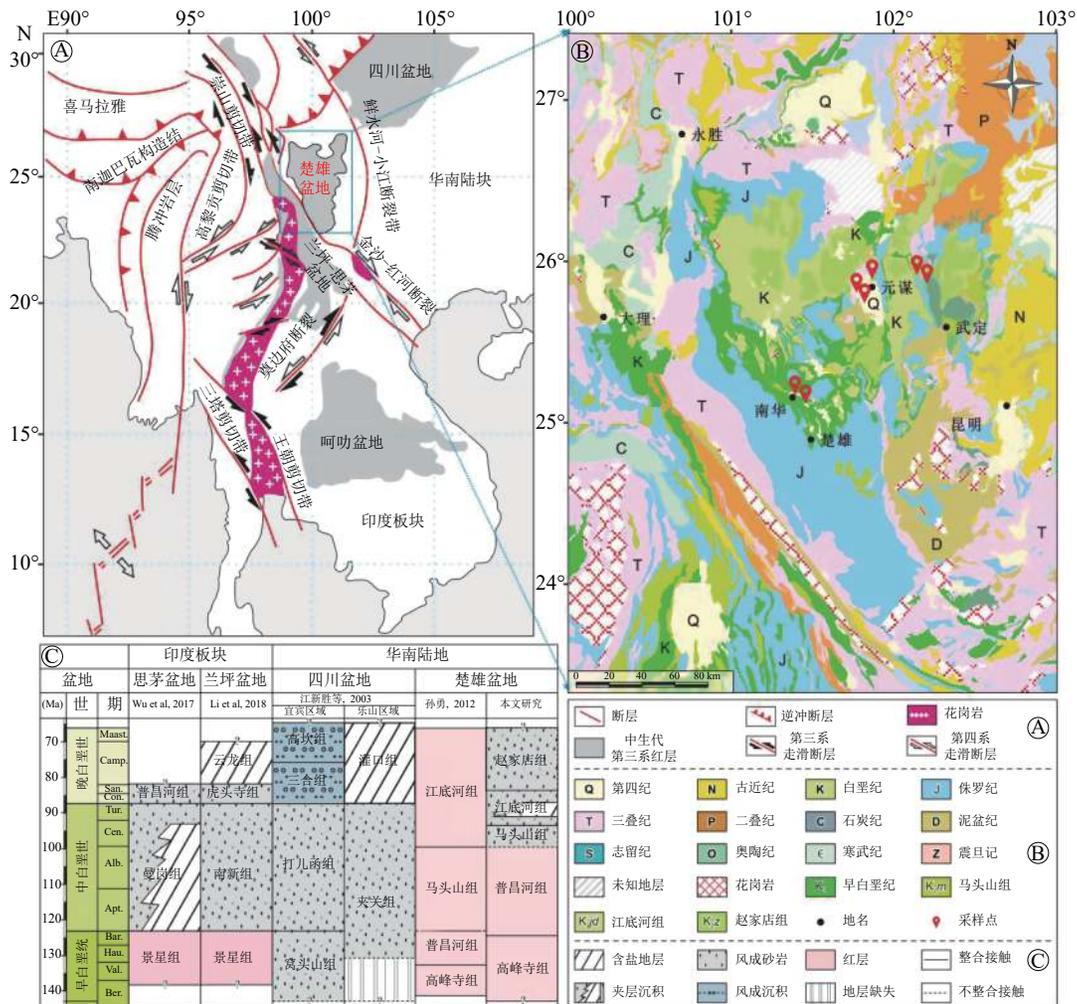


图 1 A) 东南亚构造简图 (据文献 [37] 修改) ; B) 楚雄盆地地质图 (据 20 张 1:20 万地质图清绘) C) 楚雄盆地及邻区白垩系地层与对比 (据文献 [9,18,33-34] 修改)

Fig.1 A) Structural outline of Southeast Asia(modified according to literature [37]); B) Geological map of ChuXiong Basin (according to 20 1:200,000 geological maps); C) Cretaceous strata and correlation in ChuXiong Basin and adjacent areas (modified according to literature [9,18,33-34])

岩、红色粉砂岩夹石膏，局部可见红色细砂岩，为气候炎热期湖水面积相对缩小背景下的干盐湖沉积。特征化石组有轮藻：*Charites sad-leri*(Unger) Horn et Rantzieu, *Obtusochara lanpingensis* Z. Wang et al.; 抱粉：*Schizaeosporites*; 叶肢介：*Barchygraptia* sp.。在 *Trigonioides*, *Plicatounio* 两属为主的淡水瓣鳃类动物群占优势外，其中 *Plicatounio* ex gr. *suzuki* 一种是仅见于晚白垩世的^[23,36]；赵家店组岩性为一套红色石英砂岩偶夹砾岩及泥岩，发育大型交错层理，层面具流水波痕，泥裂及虫迹，砂岩球形风化发育，仅在羊九河谷见爬行动物足迹，为干旱气候下的河流相沉积^[23]，与下伏江底河组整合接触。

2 样品采集及处理

本次研究集中于楚雄盆地江底河组砂岩层，采样位置主要位于元谋和南华地区，共采集砂岩样品 21 件，样品选择相对新鲜、受污染程度较弱的砂岩，分别通过偏光显微镜、扫描电镜 (SEM)、能谱测试 (EDS) 等手段，对碎屑颗粒结构形态、表面特征及成分等进行分析。首先通过轻击、敲打的方式将所选取的砂岩进行碎样，然后通过 0.1~0.14 mm 过滤筛筛选出已完全剥落的石英颗粒 20 g 左右，随后加入 30% 的双氧水中静置 24 h，在 60~70℃ 下加热 2 h，除去可溶有机质。然后除去酸液，用蒸馏水将残留物洗涤至中性，置于 5% 的盐酸溶液中，在 60~70℃ 下加热 1~2 h，并静置 48 h，使石英颗粒表面附着的碳酸盐充分分解。待反应完全停止后，除去酸液，用热蒸馏水洗涤至中性，最后烘干。随后使用双目镜对每件样品随机挑选 30~40 粒，同时观察石英颗粒表面特征，并进行拍照。然后，将选取的颗粒依次放在粘有导电胶的标准靶上，并进行 60 s 喷金工作，最后开展扫描电镜分析和能谱测试分析。

光学显微镜和扫描电镜测试分别在油气藏地质及开发工程国家重点实验室和重庆市地质遗迹保护与研究实验室完成。双目镜仪器型号：Nikon LV100POL，场发射环境扫描电子显微镜型号：Quanta250-FEG 和能谱仪型号：Oxford INCAx-max20。

3 石英颗粒表面特征

3.1 颗粒结构

江底河组砂岩以细砂岩为主，颗粒分选较好，磨圆度较高，为圆状-次棱角状（图 2A、2B、

2E）。按照陈丽华等^[38]提出的“目测五级估计法”，所选取的样品颗粒可达 III-IV 级，多呈圆状-浑圆状。与敦煌鸣沙山现代沙漠沉积物（图 2G）对比，其磨圆度比现代风成砂更高。碎屑颗粒主要由单晶石英颗粒组成（70%~90%），含有少量长石、重矿物、岩屑（约为 10%），多晶石英及波状消光非常少。碎屑颗粒之间以线接触和凹凸接触为主（图 2B、2E），钙质胶结。在石英颗粒表面，广泛发育一层褐红色薄膜（图 2B）。该层薄膜不均匀分布在颗粒表面，颗粒表面凹坑处分布较厚，但厚度通常小于 10 μm，颜色多为红褐色。

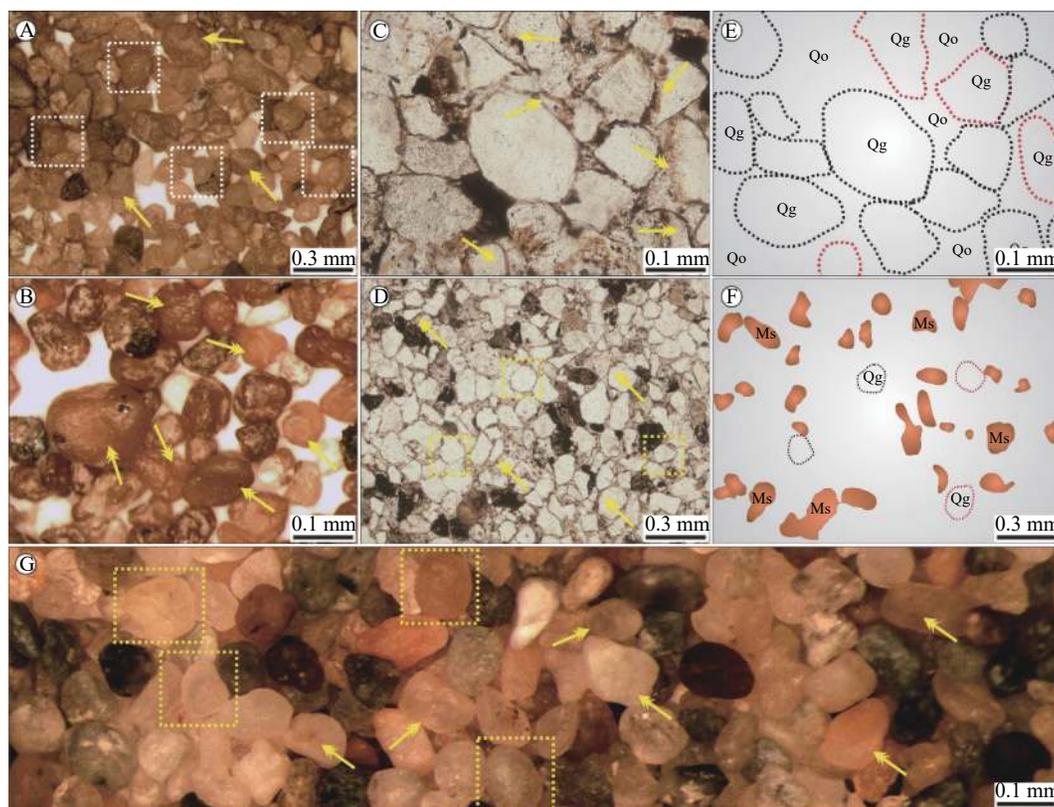
3.2 机械作用特征

江底河组砂岩发育丰富的机械撞击坑类型，如不规则撞击坑、星月型撞击坑、碟形坑等（图 2、3），其中，碟形撞击坑多发育于磨圆度较高的石英颗粒中（图 2D、3A、3D）。在高能量的机械碰撞下，高磨圆度颗粒之间的接触点应力被均匀分散^[18]，碰撞凹坑相对规则。同时，机械撞击坑的丰富度与磨圆度的高低也存在一定联系^[39]，在磨圆度较高的石英颗粒表面撞击痕迹多发育丰富，在磨圆度较差的颗粒上则相对减少，这不仅在江底河组砂岩中表现显著，在现代沙漠沉积物中亦得到了印证（图 3E、3F），与 Vos and Vandenberghe^[39]通过对 1300 个不同环境下石英颗粒微观结构的研究结果相吻合。

风成沉积石英颗粒另一特有的表面特征是新月形撞击坑（图 3C、3D），其成因与碟形坑相似。颗粒在以悬移或滚动推移负荷搬运搬运时，冲击能较小，从而形成新月形撞击坑^[40-41]。新月形撞击坑一般认为是碟形坑和 V 形坑之间的过渡类型^[33,38,42]。后者（V 形坑）主要出现在水成沉积环境中，偶见于低能风成环境。所观察到的新月形撞击坑类似弯曲的贝壳状裂缝（图 3C、3D）或“指甲印”，其长度约为 50 μm，由于缺乏冲击能而没有发展成完整的断裂面。在江底河组砂岩沉积物中，新月形撞击坑现象分布于约 5%~20% 的颗粒表面。

3.2.1 化学作用特征

除上述机械搬运撞击形成的表面形态外，在石英砂表面还有化学溶蚀作用形成的溶蚀坑、溶蚀缝等构造，颗粒溶蚀的同时还伴随一定程度的沉淀作用，形成硅质球、硅质鳞片等化学成因表面特征。



A-B) 双目镜下特征，白色虚线框指示高度圆度的石英颗粒，黄色箭头指示撞击坑；C-D) 具次生加大石英颗粒的单偏光镜下特征，黄色箭头指示“沙漠漆”；E-F) 为图 A-B 碎屑颗粒轮廓图，石英颗粒-Qg、石英过度生长-Qo；棕色-Ms 为泥套；G) 现代沙丘沉积（敦煌鸣沙山）石英颗粒双目镜下特征（特别注意的是，石英次生加大边包裹沙漠漆，再被后期泥套所包裹）

图2 楚雄盆地江底河组石英颗粒镜下显微照片
Fig.2 Photomicrographs of characteristic quartz grains

(1) 溶蚀作用

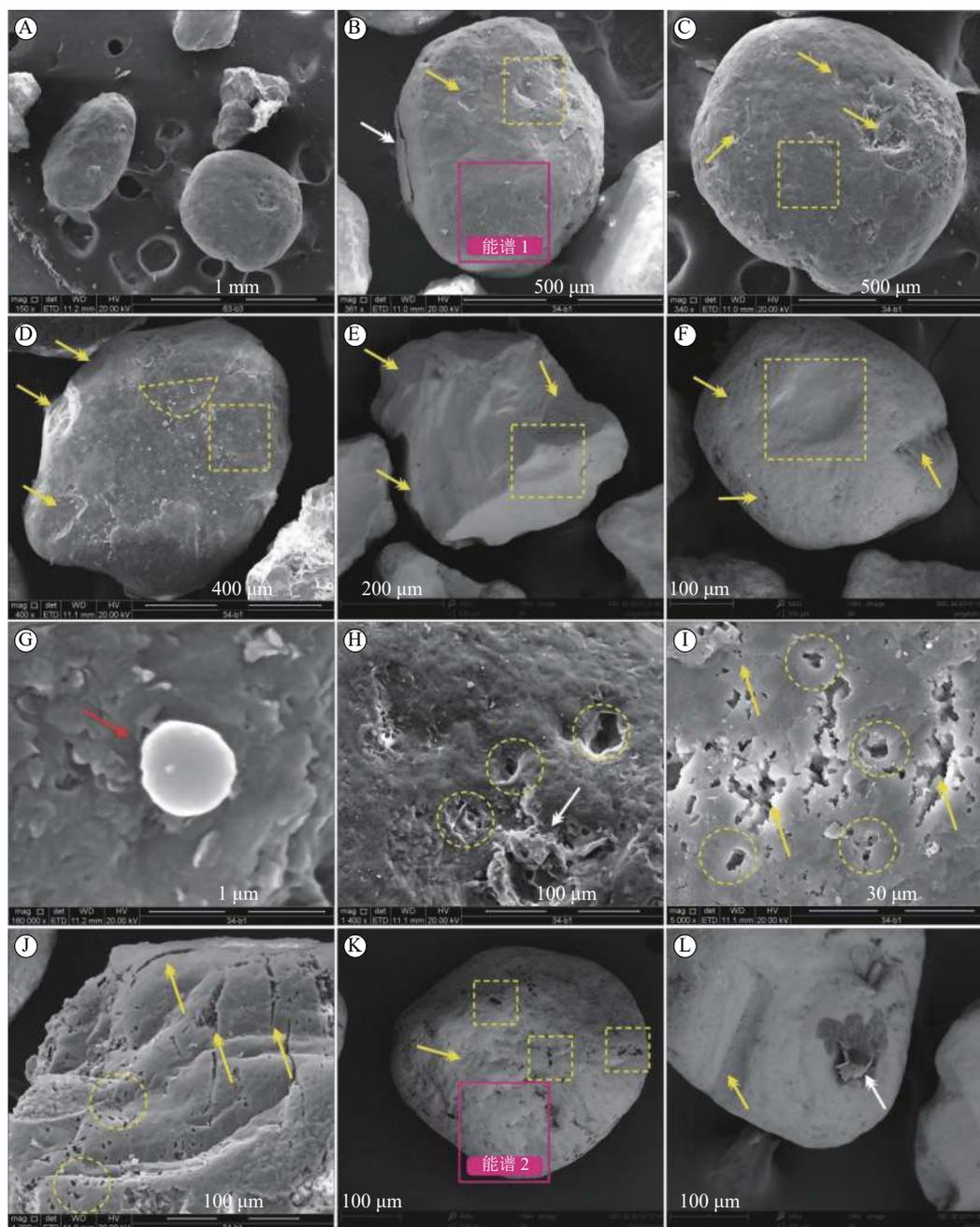
江底河组砂岩石英颗粒表面发育大量不规则的溶蚀孔和溶蚀洞等微构造（图 3H、图 I），溶蚀孔（洞）直径可达 10 μm ，呈蜂窝状，洞口边缘相对平滑、规则。在溶蚀孔、洞周围还伴生硅质解理薄片（图 3H），其形成与溶蚀孔、洞形成初期，部分硅质鳞片未剥落相关^[27]。溶蚀孔、洞也可被溶蚀所连接，形成深邃不规则但规模较大的溶蚀孔和溶蚀沟（图 3I）。溶蚀孔、洞的出现和不规则形状的产生，主要由石英颗粒在溶蚀作用过程中，溶蚀环境的化学活性和溶蚀时间差异引起^[43]。石英颗粒表面还发育少量溶蚀缝构造，其具有较好的定向性（图 3J）。在敦煌鸣沙山所采集的沙丘砂颗粒表面同样也发育有溶蚀作用（图 3K）。由于相对规则、定向的外观特征，蚀刻凹坑与机械制造的三角形 V 型冲击裂纹区容易区分。

(2) 沉淀作用

表面附着物：在江底河砂岩中所发育的泥套

（图 2E、2F），多以暗褐色出现，其粒径范围与石英颗粒较为一致。前文已经提及，风成砂岩颗粒表面的附生物质，大多是被“包裹”的复杂物质，而这些物质多以胶体溶液形式存在，在搬运过程中又可以粘附其他物质，以粉尘中的黏土为主，加之颗粒不断地滚动搬运，形成较为明显的泥套，均匀的分布在颗粒表面。在次生作用下，重结晶作用亦会形成晶形完好的黏土矿物（图 3D）。通过镜下观察，发现上述石英颗粒表面的附着物多为附着在被观察颗粒上的所有碎片或颗粒，因而导致颗粒的成分和粒径变化很大^[43]。然而，大多数情况下，纳米级附着物（覆盖了 10% 的颗粒表面）是风成环境的特征，因为磨损疲劳导致小颗粒附着在表面^[44]。在这种情况下，这些颗粒可能是由石英颗粒本身产生的，也可能是由石英颗粒碰撞到的任何其他颗粒产生的。

硅质球和硅质鳞片：在石英颗粒表面分布着相对光滑面，由于硅质的反复溶解夷平和沉淀填平作用以及碰撞磨损圆化， SiO_2 在颗粒表面形成



A-D) 江底河组石英颗粒扫描电镜镜下特征，黄色线框表示碟形坑，黄色箭头指示撞击坑，白色箭头指示凸起的硅质鳞片，图 B 紫色线框为能谱 1 分析区，图 D 表面亮色物质为黏附物；E-F) 敦煌鸣沙山现代沙丘石英颗粒 SEM 镜下特征，黄色线框内为碟形坑；G-J) 江底河组石英颗粒扫描电镜镜下特征，红色箭头指示硅质球，黄色线框表示不同类型溶蚀孔、洞，黄色箭头指示溶蚀缝，白色箭头指示凸起的硅质鳞片；K-J) 敦煌鸣沙山现代沙丘石英颗粒 SEM 镜下特征，黄色线框内指示溶蚀孔洞，黄色箭头指示撞击坑，白色箭头指示凸起的硅质鳞片，图 K 紫色线框为能谱 2 分析区。

图 3 楚雄盆地江底河组石英颗粒表面扫描电镜 (SEM)
Fig.3 Scanning electron microscope images of quartz grain surfaces

的硅质薄膜，造成风成环境中的石英颗粒高磨圆度和表面极其光滑现象（图 3B、3H）。在单个石英颗粒表面，硅质薄膜的厚度通常会有很大的变化，大约在 2~10 μm 之间^[43]。在风成沉积环境中，强烈的沉淀作用通常和溶蚀作用相伴生，在

干湿环境变化中更为明显。但由于孔隙水不饱和，不易搬运溶蚀而形成的 SiO₂ 沉淀物，一般在颗粒表面就近沉淀。SiO₂ 沉淀的初始作用期，易形成硅质球。在江底河组石英砂岩颗粒表面发现有硅质球（图 3G），圆球形，直径在 0.3~0.5 μm

左右。 SiO_2 再次进一步沉淀，则形成硅质鳞片。在江底河组砂岩石英颗粒表面，发育凸起的硅质鳞片（图3B、3H），形似鳞片状，长径在20~30 μm ，与敦煌鸣沙山所采集的沙丘砂颗粒表面发育凸起硅质鳞片较为相似（图3L）。

除上述溶蚀作用和沉淀作用以外，一些沉淀物和外来物质，在一定的条件下（温度、压力、孔隙水）可发生在石英颗粒表面，如成簇出现的黏土矿物，多形成于颗粒表面的凹陷处（图3L），上述特征可能反映了沉积期后次生风化作用。

4 讨论

（1）沙漠漆形成及保存机制

沙漠漆，即石英颗粒在风成环境中表面形成的红色-红褐色铁膜的包覆层，在风成砂中普遍发育，多为红色、褐红色^[45]，是颗粒机械搬运时反复溶解、氧化作用的产物，为干旱、炎热沙漠环境所特有的标志。铁锰质薄膜经常被后期增生石英所包裹，共同构成了风沙沉积的另一个重要特征^[10,18]。石英颗粒表面结构特征除了受搬运的动力条件影响外，还取决于当时的气候条件。“沙漠漆”作为风成砂岩中典型的表面附生物^[9,20]，几乎存在于所有环境中，包括南极洲在内^[46]，但最常见的是在干旱和半干旱气候环境，其成分主要为氧化铁和氧化锰，颜色多以暗红色和黑色为主。

楚雄盆地江底河组砂岩样品“沙漠漆”发育广泛，在石英颗粒周围普遍存在一层暗红色环边（图2B），部分“沙漠漆”被后期石英次生加大所包覆。同时，通过对楚雄盆地上白垩统江底河组（图4A，表1）与滇西云龙地区中白垩统南新组风成砂岩^[18]（图4B）和景谷地区下白垩统曼岗组风成砂岩^[20]（图4C）石英颗粒“沙漠漆”成分的对比，发现中生代风成沉积“沙漠漆”均存在Fe元素（图4）。在江底河组砂岩中，Fe元素最大质量百分比可达25.3%，最小值为0.5%，平均为7.7%，显著高于甘肃敦煌地区沙漠（图4D）、非洲东北部 Sinai 沙漠^[47]（图4E）和以色列南部 Negev 沙漠^[48]（图4F）沉积物Fe元素含量。而Mn元素仅在现代沙丘沉积物中存在（图4D），但质量百分比均不超过1%。

“沙漠漆”的形成是一个反复溶解、氧化的沉淀过程，涉及锰和铁元素一系列的溶解、扩散和沉淀作用。这些元素大多来源于石英颗粒自身溶

解部分中所含的一系列微量元素，而微量元素的移动可通过溶液传输或通过水分膜的离子扩散发生。搬运介质，如露水和雨水，在Mn、Fe元素搬运过程中一样重要。部分有机物，如细菌，也可能导致“沙漠漆”的沉积，但还没有得到证实^[49]。另一方面，在沙漠环境中，二氧化锰的蒸发和催化作用也能够促进铁锰质“沙漠漆”的形成^[50]。

（2）石英颗粒表面形态及古环境指示

石英颗粒形态和表面结构特征可以反映沉积物的搬运距离和搬运过程，以及搬运过程中的所经受的机械、化学作用，进而反映当时的沉积环境条件^[51-53]。不同环境下沉积的石英颗粒，颗粒表面上记载有不同的结构特征组合（表2）。在水成环境中，水介质具有一定的缓冲作用，机械动能相对较低。与此相反，风成环境中当空气作为运输介质时，对颗粒碰撞提供的保护非常小。正是由于风成介质的低缓冲作用、高速和高能量碰撞以及频繁的温度、湿度和pH值变化，形成了风成沉积高机械能和高化学能的沉积环境，以及独特的颗粒表面微形貌特征，对沉积环境解释具有重要意义^[54]。

基于石英颗粒表面的机械、化学，或两者的组合特征，可以利用上述三个特征的丰度、强度和空间排列建立划分不同沉积阶段和风化环境的模式图。在风成沉积作用初期，石英颗粒常以机械搬运作用占主，化学作用影响较小，颗粒形态多呈棱角状，磨圆较差（图5-①②）。随着搬运能量的增加，碰撞磨损圆化和硅质的反复溶解夷平作用，造就了风成环境中的石英颗粒高磨圆度和表面极其光滑现象（图5-⑩）。同时，撞击坑类型愈加丰富，最具代表性的为“碟形撞击坑”（图5-⑫）。随成岩作用持续发展，机械作用相对减弱，化学作用为主。石英颗粒表面结构特征除受机械动力条件影响外，温度和湿度条件的反复变化在石英颗粒表面也形成了特有沉积记录，造成一系列 SiO_2 溶蚀与沉淀的微形态，如溶蚀坑（图5-⑨）、溶蚀孔洞（图5-⑪）、溶蚀缝（图5-⑬）等溶蚀构造，以及硅质球（图5-⑬）、硅质鳞片（图5-⑨）等化学沉淀。

另一方面，二氧化硅的沉淀方式也取决于 SiO_2 的沉淀速度，在快速沉淀阶段，形成石英颗粒的夷平形态；中等沉淀速度情况下， SiO_2 以薄膜形式沉淀在上翻解理薄片之上，或在解理面

上产生一组新的翻翘薄片（图 3B、图 3H 和图 3L）；在沉淀速率较慢时，不仅会在颗粒棱角上产生沉淀，在空间足够的情况下，还会生成一端“根植”在石英颗粒表面的石英晶体（图 5-15），即石英次生加大。其一端固定在石英砂岩颗粒表面上，另一端则自由生长，石英颗粒表面晶体生长的大小、范围与沉积物的埋藏深度、在过饱和环境中的停留时间和可容纳空间息息相关^[56,57]。石

英颗粒上硅膜的形成是一个相对快速的事件，但晶体过度生长的形成则需要更多的时间^[43]。

溶蚀坑、溶蚀孔洞等溶蚀现象一般为干旱、炎热环境下，石英颗粒被高盐度碱性溶液部分溶解的结果^[18,20]。在水分条件比较有利时，即使气候比较寒冷，水的 pH 值也会因为溶解盐类而升高，进而造成石英颗粒表面部分 SiO₂ 被溶解；当温度升高时，蒸发作用导致含有 SiO₂ 的溶蚀液过饱

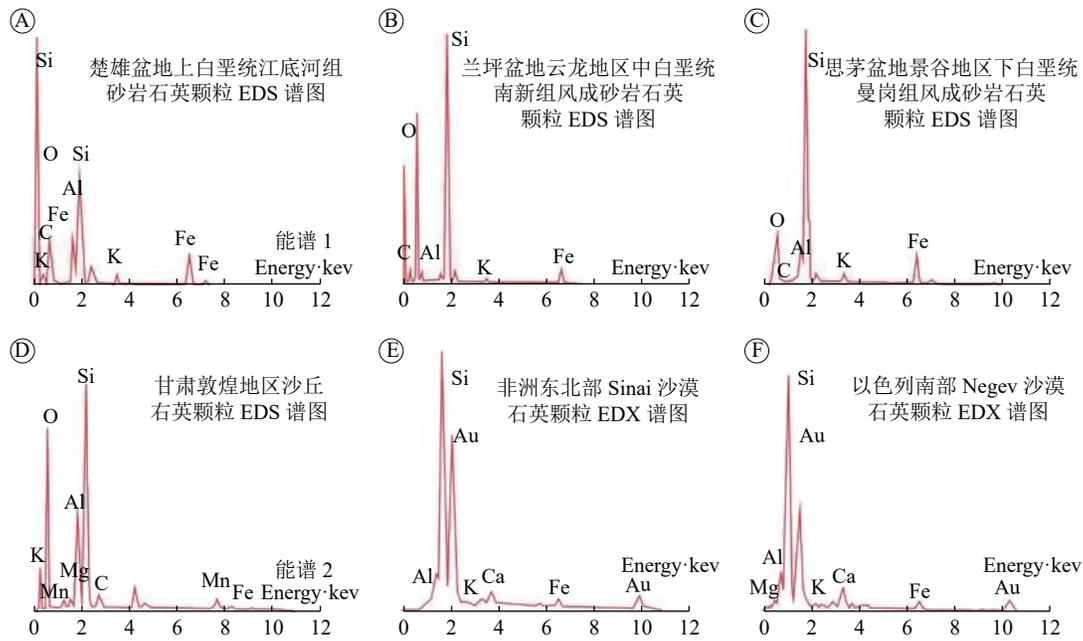


图 4 不同盆地风成砂岩石英颗粒表面能谱和 X 射线谱图特征

Fig.4 Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) of quartz grains in sandstone

表 1 楚雄盆地上白垩统江底河组砂岩石英颗粒能谱分析 (EDS) 元素统计
Table 1 Energy spectrum analysis of late Cretaceous Jiangdihe Formation in Chuxiong Basin, Yunnan and modern desert sediments (EDS)

样品编号	元素 (Wt%: 质量百分比; At%: 原子百分比)														地层	
	O		Si		Al		Fe		K		C		Mn			
	Wt%	At%	Wt%	At%	Wt%	At%	Wt%	At%	Wt%	At%	Wt%	At%	Wt%	At%		
DC-34b1-1	40.73	55.35	55.00	45.28	0.99	0.80	3.28	1.28								
DC-34b1-2	52.36	61.01	36.49	24.22	2.25	1.55					8.13	13.62				
DC-34b1-3	44.53	60.12	46.56	35.81	1.51	1.21	7.41	2.86								
DC-34b1-4	48.10	63.10	44.45	33.22	2.21	1.72	5.24	1.97								
DC-34b1-5	37.66	52.46	57.44	45.58			4.90	1.96								
DC-34b1-6	32.86	48.36	23.93	20.05	9.63	8.40	25.28	10.66	2.75	1.66	5.55	10.88				江底河组
DC-34b1-7	47.53	62.65	36.62	27.50	8.32	6.51	6.50	2.45	1.03	0.89						
DC-34b1-8	50.05	64.00	45.75	33.33	2.89	2.19	1.31	0.48								
DC-34b1-9	45.56	51.19	36.20	23.17							16.32	24.43				
DC-34b1-10	45.67	61.10	31.29	23.84	9.93	7.87			13.12	7.18						
DC-34b1-11	43.66	55.74	29.54	21.48	8.82	6.68			12.30	6.42	5.69	9.68				
平均值	44.43	57.73	40.30	30.32	5.17	4.10	7.70	3.09	7.30	4.04	8.92	14.65				

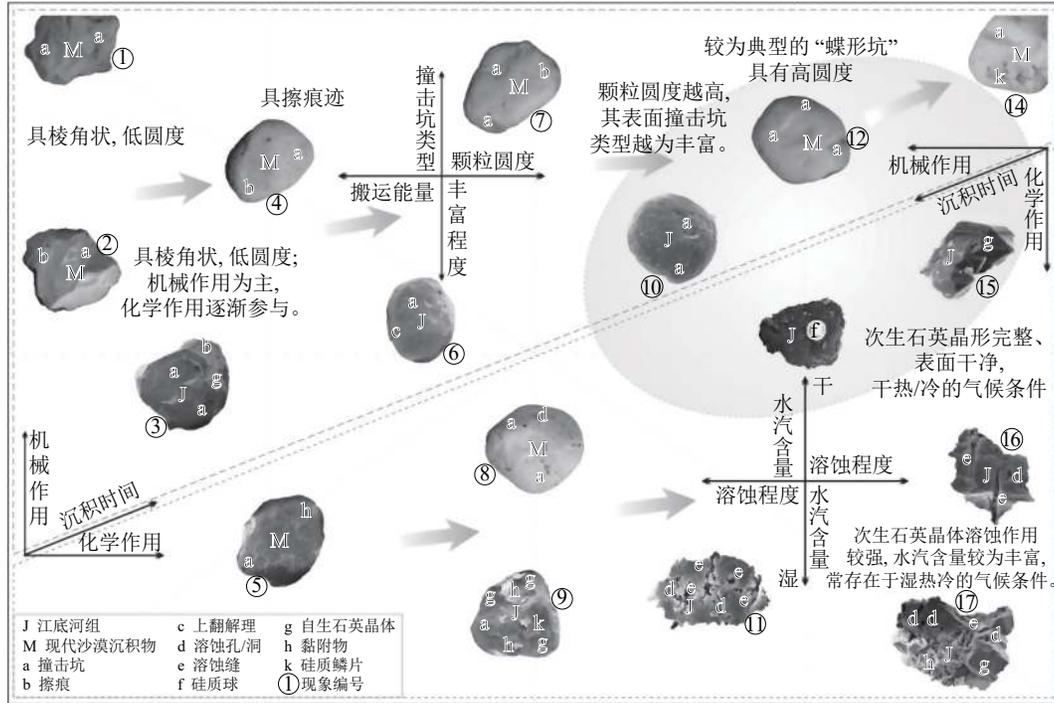


Fig.5 Surface characteristics evolution of quartz grains in aeolian sandstone and Pattern of sedimentary environment

表2 不同沉积环境下石英颗粒的表面特征（据文献^[38,55]修改）

Table 2 Surface characteristics of quartz particles in different sedimentary environments (Modified according to literature ^[38,55])

沉积环境		机械作用											化学作用					表面附着物		
		颗粒磨圆度			贝壳状断口	撞击沟	V型撞击坑	碟形撞击坑	新月形撞击坑	擦痕	平整解理面	上翻解理	鳞片状剥落	溶蚀沟	溶蚀孔	硅质球	凸起的硅质鳞片	晶体增长	陆相生物	海相生物
		棱角状	次棱角状	圆状																
表土风化和成岩作用			○	●							●	●	●	●	●	●	●			
沙漠环境			●	○	●	○	●	●			●	○	○	○	●	●	●	○		
冰川环境		●			●	●			●	●	●					●				
陆相水成环境	河床砂		●		●	●			●	●	●				●	●		●		
	河漫滩砂			●			●	○			●				●	●				
	冲积扇砂体			●			●	●			●				●	●				
	湖泊环境		●				●				●							●		
过度相	三角洲		●	○			●				●	●	●	●	●	●	●		●	
海相环境	潮坪		●	●	○	●	○	●				●	●	●	●	●			●	
	海滨沙丘			●			●	●			●				●	●			●	
	浅海大陆架	●	●										●	●					●	
	深海	●	●										●	●					●	

○ 很少出现 ● 时常存在 ● 始终存在

和,使 SiO_2 重新围绕石英颗粒沉淀,缓慢生长,这种过程在夏季沙漠边缘能够频繁进行^[38,42]。因此,这种围绕石英颗粒生长的石英晶体,可以指示冷暖交替的气候特征。楚雄盆地白垩纪晚期江底河组砂岩样品中 SiO_2 的溶蚀与再沉淀作用,反映出滇东北地区晚白垩世干旱-湿热的气候特征。

值得注意的是,在江底河组具典型风成作用特征(高磨圆度、碟形坑)的石英颗粒表面(图 5-⑩⑪),普遍发育有水成环境中强化学溶蚀作用形成的溶蚀孔、洞群^[18,20,43]。这种现象在现代沙漠湿丘间沉积物石英颗粒表面(图 5-⑧)同样发育,其形成可能归因于盐湖周缘的风成砂,经过季节性雨水及间歇性洪水搬运^[6,18],或强烈的风成吹蚀作用至盐湖(沙丘间低洼蓄水地带)中沉积^[6,18],使石英颗粒表面记录了风成沉积被水成沉积(盐湖)环境所改造所形成的“双相”现象,进而指示盐湖相与风成砂相互作用的沉积特征。然而,楚雄盆地上白垩统江底河组是否为沙漠尺度的盐湖环境^[57],还需要对风成沉积的分布范围进一步确定。目前,仍可将其视为沙地尺度的盐湖环境。

5 结 论

(1) 白垩纪时期,温暖、干旱的古气候环境,促成了滇东北楚雄盆地干盐湖沉积的形成。对楚雄盆地上白垩统江底河组红色砂岩的研究,显示盆地内局部发育风成沙地沉积,以高分选、高磨圆碎屑石英颗粒为典型特征,石英颗粒表面发育特有的碟形坑、溶蚀孔(洞)、硅质球和硅质鳞片等。

(2) 基于石英颗粒表面的机械作用、化学作用组合特征,建立了不同沉积阶段和环境演化对应不同微形貌特征的模式图。在风成沉积作用初期,以机械作用为主,碎屑颗粒具棱角、低圆度为特征;沉积中期,以发育表面化学溶蚀作用和沉淀作用为特征;晚期,颗粒具高圆度,具碟形坑为特征。而对于盐湖环境中的风成砂岩石英颗粒表面表现为强机械作用和强化学作用“双相”特征。

参考文献:

[1] Fluteau F, Ramstein G, Besse J, et al. Impacts of palaeogeography and sea level changes on Mid-Cretaceous climate[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*,

2007, 247(3-4):357-381.

[2] Chumakov N M, Zharkov M A, Herman A B, et al. Climate belts of the Mid cretaceous time [J]. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 1995, 3: 241-260.

[3] Bowman V C, Francis J E, Riding J B. Late Cretaceous winter sea ice in Antarctica? [J]. *Geology*, 2013, 41: 1227-1230.

[4] Wang L C, Liu C L, Fei M M, et al. First SHRIMP U-Pb zircon ages of the potash-bearing Mengyejing Formation, Simao Basin, southwestern Yunnan, China [J]. *Cretaceous Research*, 2015, 52: 238-250.

[5] Hasegawa H, Imsamut S, Charusiri P, et al. 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 [J]. *Island Arc*, 2010, 19: 605-621.

[6] Rodríguez-López J P, Meléndez N, De Boer P L, et al. Aeolian sand sea development along the mid-Cretaceous western Tethyan margin (Spain): erg sedimentology and palaeoclimate implications [J]. *Sedimentology*, 2008, 55: 1253-1292.

[7] Rodríguez-López J P, Meléndez N, De Boer P L, et al. The action of wind and water in a mid-Cretaceous subtropical erg-margin system close to the Variscan Iberian Massif, Spain [J]. *Sedimentology*, 2010, 57: 1315-1356.

[8] Rodríguez-López J P, Meléndez N, De Boer P L, et al. Controls on marine-erg margin cycle variability: Aeolian-marine interaction in the mid-Cretaceous Iberian Desert System, Spain [J]. *Sedimentology*, 2012, 59: 466-501.

[9] Wu C H, Liu C L, Yi H S, et al. Mid cretaceous desert system in the Simao Basin, southwestern China, and its implications for sea-level change during a greenhouse climate [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, 468: 529-544.

[10] Wu C H, Rodríguez-López J P, Liu C, et al. Late Cretaceous climbing erg systems in the western Xinjiang Basin: palaeoatmosphere dynamics and East Asia margin tectonic forcing on desert expansion and preservation [J]. *Mar. Petrol. Geol.*, 2018, 93: 539-552.

[11] Jiang X, Pan Z, Xu J, et al. Late Cretaceous aeolian dunes and reconstruction of palaeo-wind belts of the Xinjiang Basin, Jiangxi province, China. [J]*Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 2008, 257: 58-66.

[12] Jiao H, Wu C, Rodríguez-López J P, et al. Late Cretaceous plateau deserts in the South China Block, and Quaternary

- analogues; sedimentology, dune reconstruction and wind-water interactions [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 120. doi: 10.1016/j.marpetgeo.
- [13] 陈荣林. 江苏及邻区上白垩统赤山组中古沙漠沉积[J]. *江苏地质*, 1987(2):20-23.
- CHEN R L. Upper Cretaceous Chishan Formation Middle-Pale Desert Deposits in Jiangsu and its adjacent areas[J]. *Jiangsu Geology*, 1987(2):20-23.
- [14] 陈清华, 庞飞. 苏北盆地白垩纪沙漠石英颗粒表面特征及环境意义[J]. *特种油气藏*, 2008, 15(5):13-16.
- CHEN Q H, PANG F. Surface characteristics and environmental significance of quartz grains in the Cretaceous desert of the Subei Basin[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2008, 15(5):13-16.
- [15] 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*, 2011 (7): 34-37+5. HE Q C. Sedimentary characteristics of deserts—taking the Cretaceous Honghuatao Formation in Jiangling Sag as an example [J]. *Chinese Journal of Petroleum and Natural Gas*, 2011 (7): 34-37+5.
- [16] 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 X S, PAN Z X, FU Q P. Variation of wind direction in the Cretaceous desert in the Sichuan Basin and its significance[J]. *Lithofacies and Palaeogeography*, 1999, 19(1):1-11.
- [17] 刘立安, 姜在兴. 四川盆地古近纪沙漠沉积特征及古风向意义[J]. *地质科技情报*, 2011, 30(2):63-68.
- LIU L A, JIANG Z X. Sedimentary characteristics of Paleogene desert in Sichuan Basin and significance of paleowind direction[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2011, 30(2):63-68.
- [18] Li G, Wu C, Rodríguez-lópez J P, et al. Mid-Cretaceous aeolian desert systems in the Yunlong area of the Lanping Basin, China: implications for palaeoatmosphere dynamics and paleoclimatic change in East Asia [J]. *Sediment Geology*, 2018, 364: 121–140.
- [19] 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(11):2062-2074.
- YUAN T, WU C H, YI H S, et al. Sedimentary characteristics and paleoclimatic significance of aeolian sandstones of the Lower Cretaceous Mangang Formation in Jinggu area, Simao Basin, Yunnan Province[J]. *Acta Geology*, 2015(11):2062-2074.
- [20] 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(11):2053-2061.
- GONG Z, WU C H, YI H S, et al. Surface characteristics of quartz grains in the Mangang Formation in the Jinggu area of the Simao Basin in western Yunnan and their indicative significance[J]. *Acta Geology*, 2015(11):2053-2061.
- [21] 胡煜昭, 吴鹏, 闵朝龙, 等. 楚雄盆地六苴铜矿含矿岩系沉积环境及成矿时代分析[J]. *矿物学报*, 2009, 29(1):427-428.
- HU Y Z, WU P, MIN Z L, et al. Analysis of the sedimentary environment and mineralization age of the ore-bearing rock series of the Liuju copper deposit in the Chuxiong Basin[J]. *Acta Mineralogy Sinica*, 2009, 29(1):427-428.
- [22] 陈根文, 夏斌, 王国强, 等. 楚雄盆地砂岩铜矿床构造控矿分析[J]. *大地构造与成矿学*, 2002(2):167-171.
- CHEN G W, XIA B, WANG G Q, et al. Analysis of structural ore-controlling of sandstone copper deposits in Chuxiong Basin[J]. *Tectonics and Metallogeneses*, 2002(2):167-171.
- [23] 云南省地质矿产局. 云南省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1990.
- Yunnan Bureau of Geology and Mineral Resources. *Regional geology of Yunnan Province* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990.
- [24] 薛传东, 向坤, 胡廷银, 等. 楚雄盆地北部桂花铜矿区晚白垩世含矿岩系沉积环境[J]. *沉积学报*, 2019, 37(3):491-501.
- XUE C D, XIANG K, HU T Y, et al. Sedimentary environment of the Late Cretaceous ore-bearing rock series in the Guihua copper mining area in the northern Chuxiong Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(3):491-501.
- [25] Margolis S. V, Kennett J P. Cenozoic paleoglacial history of Antarctica recorded in Subantarctic deep-sea cores[J]. *American Journal of Science*, 1971, 271(1):1-36.
- [26] Krinsley, David H, Doornkamp. Atlas of quartz sand surface textures [M]. Cambridge University Press, 1973.
- [27] 蒲心纯, 尹福光, 朱同兴. 楚雄前陆盆地的充填层序与造山作用[J]. *岩相古地理*, 1996, 16(3):47-58.
- PU X C, YIN F G, ZHU T X. Filling sequence and orogen in the Chuxiong Foreland Basin[J]. *Lithofacies and Palaeogeography*, 1996, 16(3):47-58.
- [28] 刘和甫, 汪泽成, 熊保贤, 等. 中国中西部中、新生代前陆盆地与挤压造山带耦合分析[J]. *地学前缘*, 2000, 7(3):55-72.
- LIU H F, WANG Z C, XIONG B X, et al. Coupling analysis of Mesozoic and Cenozoic foreland basins and compressional

orogenic belts in central and western China[J]. *Geoscience Frontiers*, 2000, 7(3):55-72.

[29] 张志斌, 曹德斌. 滇中楚雄中生代盆地的形成、演化及其与哀牢山造山带的关系——以楚雄西舍路至禄丰碧城镇区域地质综合剖面为例 [J]. *地球学报*, 2002 (2): 129-134.

ZHANG Z B, CAO D B. The formation and evolution of the Chuxiong Mesozoic basin in central Yunnan and its relationship with the Ailao Mountain Orogenic Belt: taking the regional geological comprehensive section from Xishe Road to Lufeng Bicheng Town in Chuxiong as an example[J]. *Acta Geosciences*, 2002 (2): 129 -134.

[30] 李儒峰, 马永生, 汤良杰, 等. 云南楚雄盆地波动特征及构造沉积演化 [J]. *地球科学*, 2002, 29(2):129-134.

LI R F, MA Y S, TANG L J, et al. Formation and evolution of the Chuxiong Mesozoic basin in central Yunnan and its relationship with the Ailao Mountain Orogenic Belt: Taking the regional geological comprehensive section from Xishe Road to Lufeng Bicheng Town in Chuxiong as an example[J]. *Acta Geosciences*, 2002, 29(2):129-134.

[31] 朱同兴, 黄志英, 尹福光. 盆山转换与沉积地质记录——以楚雄前陆盆地分析为例 [J]. *岩相古地理*, 1999, 19(3):1-15.

ZHU T X, HUANG Z Y, YIN F G. Basin-Mountain transition and sedimentary geological record: taking Chuxiong Foreland Basin as an example[J]. *Lithofacies and Palaeogeography*, 1999, 19(3):1-15.

[32] 江新胜. 中国白垩纪沙漠及其古气候 [D]. 成都: 成都理工大学, 2003.

JIANG X S. Cretaceous desert in China and its paleoclimate [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2003.

[33] 孙勇. 云南西北早白垩世环境与气候分析 [D]. 成都: 成都理工大学, 2012.

SUN Y. Analysis of early Cretaceous environment and climate in Northwestern Yunnan [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.

[34] 陈根文, 夏斌, 吴延之, 等. 楚雄盆地砂岩铜矿成矿机理研究 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 2000, 30:169-176.

CHEN G W, XIA B, WU Y Z, et al. Research on metallogenic mechanism of sandstone copper deposit in Chuxiong Basin[J]. *Science in China (Series D)*, 2000, 30:169-176.

[35] 顾知微. 记滇中几个晚白垩世淡水瓣鳃类化石并略回顾云南陆相白垩系的研究 [J]. *古生物学报*, 1962 (3): 287-311.

GU Z W. A record of several Late Cretaceous freshwater palipes fossils in central Yunnan and a brief review of the research on the terrestrial Cretaceous in Yunnan[J]. *Acta Paleontology*, 1962 (3): 287-311.

[36] Gao L, Yang Z Y, Tong Y B, et al. New paleomagnetic studies of Cretaceous and Miocene rocks from Jinggu, western Yunnan, China: evidence for internal deformation of the Lanping-Simao Terrane. *Journal of Geodynamics*, 2015, 89: 39-59.

[37] 陈丽华, 缪昕, 魏宝和. 扫描电镜在石油地质上的应用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1986.

CHEN L H, MIAO X, WEI B H. Application of scanning electron microscope in petroleum geology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1986.

[38] 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.

[39] D. H Campbell. Percussion marks on quartz grains[J]. *Sediment. Petrol*, 1963, 33(4):855-859.

[40] Lancaster, Nicholas. The geomorphology of desert dunes [M]. Routledge; Macmillan Publishers NZ, Limited [Distributor], 1995.

[41] 谢又予. 中国石英砂表面结构特征图谱 [M]. 北京: 海洋出版社, 1984.

XIE Y Y. Characteristic map of the surface structure of quartz sand in China[M]. Beijing: Ocean Press, 1984.

[42] Higgs R. Quartz-grain surface features of mesozoic-cenozoic sands from the labrador and western greenland continental margins[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1979, 49(2):599-610.

[43] William Mahaney. Atlas of sand grain surface textures and applications [M]. USA, Oxford University Press, 2002.

[44] Reading, Harold G. Sedimentary environments and facies [M]. Cambridge University Press, 1978.

[45] Nagy B., Nagy L A, Rigali M J, et al. Rock varnish in the sonoran desert: microbiologically mediated accumulation of manganeseiferous sediments[J]. *Sedimentology*, 2010, 38(6):1153-1171.

[46] Pye Kenneth. Aeolian sand and sand dunes [M]. Springer, 2009.

[47] L E Frostick, I Reid. Desert sediments: ancient and modern [M]. Geological Society, 1987.

[48] Thiagarajan N., Lee C T A. Trace-element evidence for the origin of desert varnish by direct aqueous atmospheric deposition[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 224(1-2):131-141.

[49] Engel C. G, Sharp R P. Chemical data on desert varnish[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1958, 69(5):273-286.

[50] 陈涛. 末次冰消期以来柴达木盆地东部风成沉积记录的气候变化 [D]. 西安: 中国科学院研究生院 (地球环境研究所), 2015.

CHEN T. Climate change recorded by aeolian deposits in the eastern part of the Qaidam Basin since the last deglacial period [D]. Xi'an, : Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (Institute of Earth Environment), 2015.

[51] 范庆斌, 叶玮, 陈渠. 江西南昌横岗“砂山”石英颗粒表面形态特征 [J]. 干旱区地理, 2014(6):1170-1181.

FAN Q B, YE W, CHEN Q. Surface morphological characteristics of the “sand hills” quartz grains in Henggang, Nanchang, Jiangxi[J]. Arid Zone Geography, 2014(6):1170-1181.

[52] 张光威, 杨子赓. 南黄海第四纪时期古英砂表面结构特征及其环境意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1996(3):37-47.

ZHANG G W, YANG Z G. Surface structure characteristics and environmental significance of ancient British sands in the South Yellow Sea during the Quaternary Period[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1996(3):37-47.

[53] David H. , Krinsley Jack Donahue. Environmental

interpretation of sand grain surface textures by electron microscopy[J]. Geological Society of America Bulletin, 1968, 79(6):743-748.

[54] 任明达, 缪昕. 石英砂表面的微结构——一种沉积环境标志 [J]. 地质论评, 1984, 30(1):36-41.

REN M D, MIU X. Microstructure on the surface of quartz sand—a sign of sedimentary environment[J]. Geological Review, 1984, 30(1):36-41.

[55] Pittman E. Diagenesis of quartz in sandstones as revealed by scanning electron microscopy[J]. Journal of Sedimentary Research, 1972, 42(3):507-519.

[56] Marzolf, J. Sand-grain frosting and quartz overgrowth examined by scanning electron microscopy: The Navajo sandstone (Jurassic (?)), Utah[J]. Journal of Sedimentary Research, 1976, 46(4):906-912.

[57] Wu Chihua, Liu Chenglin, Shen Lijian, et al. A Cretaceous desert-playa sedimentary system controlled the potash formation in Simao Basin[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2017, 91(3):1143-1144.

Study on the microstructure characteristics of Late Cretaceous aeolian sand in the playa from Chuxiong Basin

Tang Hailei¹, Liang Rui², Yi Haisheng^{1,3}, Li Gaojie¹

(1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan, China; 2. Chengdu Analytical & testing Center, Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources, Chengdu, Sichuan, China; 3. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu, Sichuan, China)

Abstract: Cretaceous greenhouse, a long-lasting typical warming interval in the history of the earth, and the regional paleotopography effect triggered a wide spread arid-climate belt in East Asia accompanying with extensive paleo-desert outcrops and evaporite deposits. The Upper Cretaceous Jiangdihe Formation in the Chuxiong Basin is characterized by a set of red clastic rocks interbedded with gypsum, being atypical playa environment. Through multiple approaches including optical microscopy, Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Spectrum (EDS) analysis, the structural morphology and surface micro-morphology characteristics of quartz grains from the Jiangdihe Fm. sandstones from the Chuxiong basin have been studied. The results show that the quartz grains of the Jiangdihe Fm. sandstone has high roundness and well-sorted, dish-shaped impact scars, "desert varnish", and groups of intense chemical corrosion pores (caves), all of which show the typical characteristics of aeolian sand. In addition, the evolution rule of micro-morphology on the quartz grains under different sedimentary environment has been systematically summarized, based on physical interaction, chemical (dissolution, precipitation) interaction, and their combination characteristics of the quartz grains surface. This study will contribute to the further understanding for the characteristics of aeolian sand deposited in the playa environment and the mechanism of the interacting aeolian-aqueous deposition.

Keywords: Quartz grain; Surface characteristics; Scanning electron microscope (SEM); Eolian sandstone