

引用格式: 张航, 常宏, 戎晓庆, 等. 2026. 渭河盆地湖相—风成序列石英表面微形态特征及意义[J/OL]. 沉积学报. DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.024
Zhang Hang, Chang Hong, Rong Xiaoqing, et al. 2026. Surface Microstructures of Quartz Grains in the Lacustrine and Aeolian Sequences from the Weihe Basin and Its Implication for Sedimentary Environments[J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica. DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.024.
DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.024 CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2026.024

渭河盆地湖相—风成序列石英表面微形态特征及意义

张航^{1,2}, 常宏¹, 戎晓庆^{1,2}, 龙宜澧^{1,2}, 张建广^{1,2}, 刘博³, 刘星星¹, 孙有斌¹

1. 中国科学院地球环境研究所黄土科学全国重点实验室, 西安 710061

2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

3. 西安地球环境创新研究院, 西安 710061

摘要 【目的】渭河盆地连续的湖相—风成沉积序列是研究东亚季风演化的良好材料, 但晚上新世以来盆地沉积记录显著变化的过程与机制仍不明确。【方法】对渭河盆地东部沉降中心获取的 1 386 m 连续沉积岩心 (WB1 孔), 开展不同沉积层位石英颗粒表面微形态特征的扫描电镜分析。【结果】(1) WB1 孔底部 (1 386~880 m) 游河组中石英颗粒表面普遍发育大量硅质沉淀, 反映盆地处于湖泊静水沉积环境; (2) 下部三门组 (880~380 m) 石英表面平行解理面显著增多, 指示盆地沉积水动力条件有所增强; (3) 上部秦川群 (380~60 m) 石英表面平行解理面发育并伴有中—大贝壳状断口等特征, 表明其经历了强水动力搬运过程, 为三角洲前缘亚相水下分流河道沉积; (4) 顶部 60 m 沉积的石英表面出现新月形撞击坑、碟形坑等特征, 表明该阶段转变为风成为主的沉积环境。【结论】WB1 孔沉积中石英颗粒表面的微形貌特征, 灵敏地记录了晚上新世以来渭河盆地沉积环境从浅湖—滨湖向三角洲体系逐步演化的完整过程, 并在中更新世晚期最终演变为以风成堆积为主的沉积环境。晚上新世以来, 渭河盆地经历了四个阶段的沉积环境演变过程, 这一过程受到东亚夏季风长期演化的重要影响。

关键词 渭河盆地; 湖相—风成沉积物; 石英颗粒; 表面微形貌; 沉积环境; 东亚季风

第一作者 张航, 男, 1989 年出生, 博士, 沉积学与古环境学, E-mail: zhanghang@ieecas.cn

中图分类号: P512.2 **文献标志码**: A **文章编号**: 1000-0550 (2026) 00-0000-00

0 引言

秦岭北侧的渭河盆地位于亚洲季风降水边缘区, 盆地内堆积了新生代以来巨厚的河湖相—风成沉积, 是研究东亚季风演化过程的理想区域 (鹿化煜等, 2018; An *et al.*, 2020)。前人针对盆地南缘的沉积序列开展了大量的古环境研究, 利用孢粉 (Zhao *et al.*, 2020)、黏土矿物 (Lyu *et al.*, 2021)、沉积物粒度 (Wang *et al.*, 2020) 等环境代用指标, 重建了区域长时间尺度古气候环境演化规律。然而, 盆地中心湖相—风成序列的沉积特征及成因, 尤其是晚上新世—更新世期间, 盆地由灰绿色典型湖相沉积向棕黄色河湖相沉积转变, 以及最终变为风成沉积的环境演变过程, 仍有待进一步研究 (Xiao *et al.*, 2021)。因此, 探明渭河盆地晚上新世以来沉积环境特征变化, 可为东亚古季风演化历史等提供有力证据。

收稿日期: 2026-01-04; 收修改稿日期: 2026-05-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42494910); 国家深地科技重大专项 (2024ZD1001003); 国际大陆科学钻探计划 (ICDP-2022/02 (#2088))

石英是具有较高硬度、较强抗机械破碎和抗化学风化的稳定矿物。在搬运沉积过程中,不同的动力过程导致颗粒表面形成特殊的微形貌结构,记录了沉积过程中搬运介质、搬运方式以及沉积环境等差异。利用扫描电镜统计分析石英颗粒表面微形貌特征,可提供识别沉积物的物质来源、搬运机制以及沉积环境等关键信息(Mahaney *et al.*, 2001; Vos *et al.*, 2014)。石英表面形态特征广泛应用于沉积环境研究,前人已研究积累了大量不同沉积环境下石英颗粒的典型形态特征(谢又予, 1984; 陈丽华等, 1986)。特别是在风成与河湖相沉积序列中开展石英颗粒表面的微形貌研究,对沉积环境演化具有重要指示意义(李育等, 2013)。

本文基于从渭河盆地东部沉降中心固市凹陷获取的 1 386 m 连续沉积岩心(WB1 孔),选择不同沉积特征层位样品,开展了石英颗粒表面微结构特征扫描电镜对比分析,结合沉积构造、粒度分布特征以及矿物薄片鉴定结果,揭示渭河盆地晚上新世以来湖相沉积逐步转变为风成沉积的多阶段沉积环境演变过程,旨在为重建区域古环境演化提供了重要依据。

1 区域概况

渭河盆地南依秦岭造山带,北接鄂尔多斯地块,为新生代形成的构造断陷盆地(图 1)。渭河盆地的形成和演化与青藏高原隆升远程效应、秦岭造山带生长及鄂尔多斯块体变形密切相关。受青藏高原向东扩展影响,秦岭在新生代经历了多次构造隆升,伴随着鄂尔多斯地块逆时针旋转,造成了渭河盆地的拉伸与形成(An *et al.*, 2020)。晚中新世以来,青藏高原东北缘(Miao *et al.*, 2022)、北秦岭造山带(Wang *et al.*, 2022b)以及鄂尔多斯地块东缘(Chen *et al.*, 2021; Clinkscales *et al.*, 2021)均存在造山抬升,渭河盆地通过西侧一系列左行走滑断裂系统响应青藏高原向东扩展,在新生代发生持续伸展沉降(Li *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2021)。渭河盆地为一组 NEE 走向正断层与走滑断层围限的新月形伸展沉降区域,盆地南部边界受秦岭山前断裂和华山山前断裂控制,在伸展构造环境下盆地下降沉积伴随着北秦岭隆升剥蚀(Wang *et al.*, 2022b)。区域地球物理资料和钻孔数据表明,渭河盆地新生代沉积基本连续,固市和郿邑凹陷两个沉降中心的新生代沉积厚度超过 6 000 m(An *et al.*, 2020)。

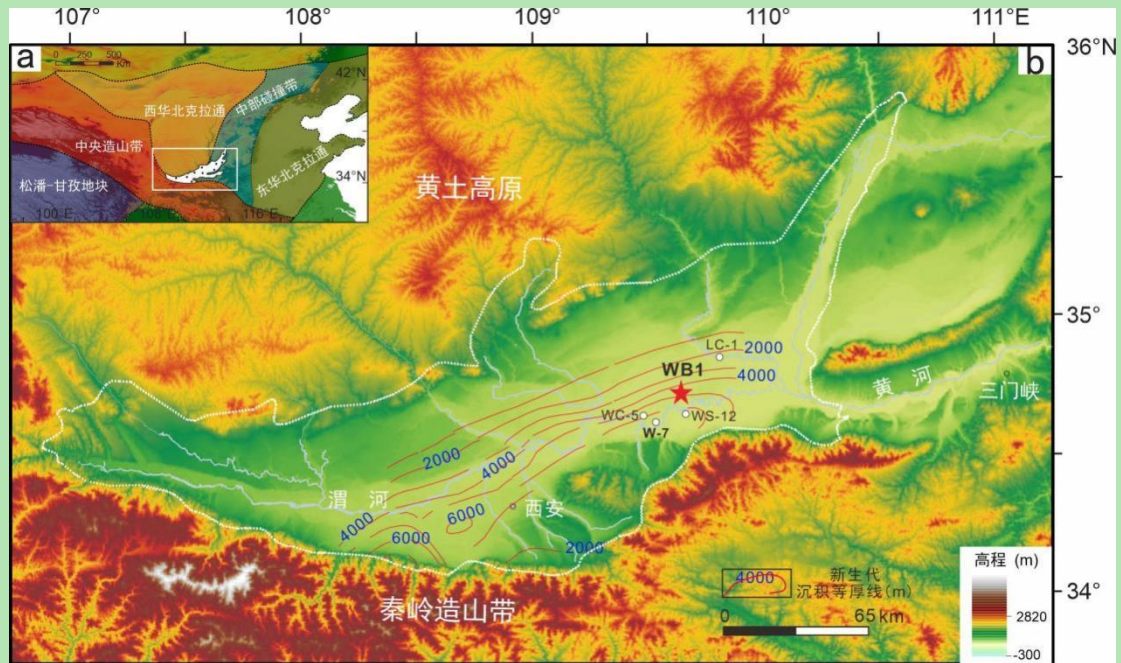


图1 渭河盆地及 WB1 孔位置 (据参考文献 An *et al.*, 2020, 修改)

(a) 渭河盆地大地构造背景图 (Zhao *et al.*, 2012); (b) 渭河盆地地形图

Fig.1 The Weihe Basin and the location of core WB1 (modified after An *et al.*, 2020)

(a) geotectonic setting map of Weihe basin (Zhao *et al.*, 2012); (b) topographic map of Weihe Basin

自中始新世~50 Ma 以来, 渭河盆地内堆积了古近纪、新近纪以及第四纪的巨厚碎屑沉积 (王建强等, 2015; 鹿化煜等, 2018), 记录了青藏高原隆升远程效应以及东亚季风演化过程 (鹿化煜等, 2018; An *et al.*, 2020)。其中, 作为我国北方陆相地层典型代表的上新世—更新世三门组沉积在盆地内广泛分布, 上新世地层以灰绿色泥质湖相沉积为主, 被称作“绿三门”; 更新统则为黄褐色粉砂—砂质沉积, 被称为“黄三门” (袁凤钊, 1986)。绿三门组中由于游河动物群化石的发现, 亦有学者将该地层定名为游河组 (薛祥煦, 1981)。本文采用“游河组”命名盆地内上新世典型的灰绿色细粒湖相沉积, 以区别于早更新世的三门组砂质沉积。三门组之上的河湖相沉积包含了中更新世以来黏土与砂砾石层混杂的泄湖组、乾县组及半坡组 (统称为秦川群) (李智超等, 2016) (图 2)。

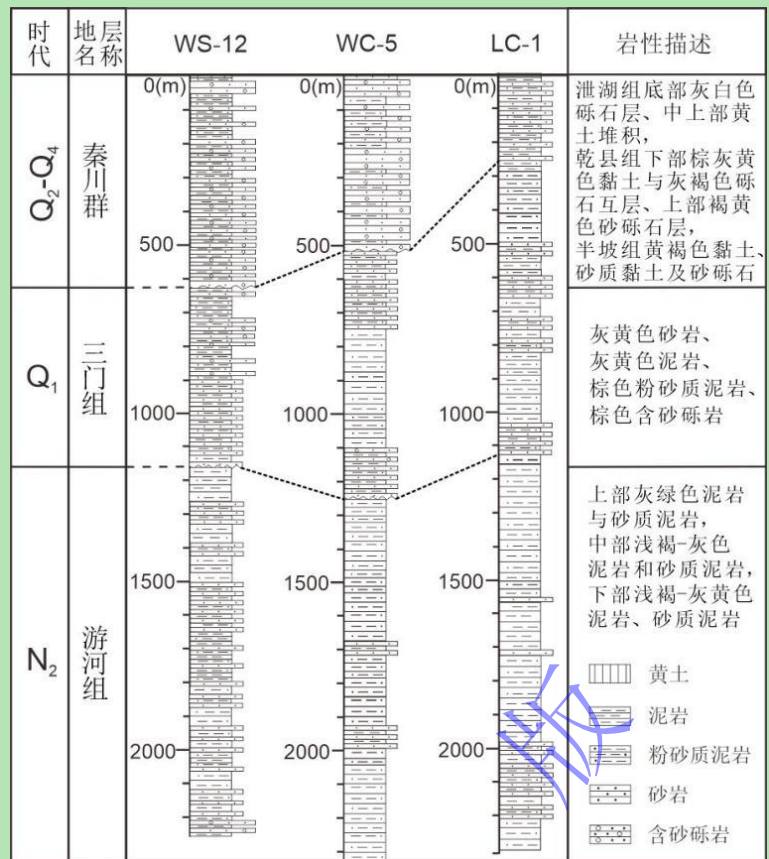


图2 渭河盆地上新世地层代表性岩心柱状对比

Fig.2 Pliocene stratigraphic correlations of representative boreholes in Weihe Basin

2 研究材料及实验方法

WB1 孔位于渭河盆地东部沉降中心的固市凹陷区域 (34°44' N, 109°39' E), 岩心总长度约 1 386 m, 取心率大于 95%。全孔岩性以粉砂质黏土—粉砂细组分沉积为主, 岩心上部 380 m 沉积中存在少量厚度超过 5 m 的砂层 (图 3)。岩心约 880 m 处作为 WB1 孔显著的灰绿色沉积与棕黄色沉积单元界线, 与渭河盆地中广泛观察到的灰绿色游河组向黄褐色三门组沉积过渡现象一致。根据古生物地层、古地磁以及光释光等年代学约束, 前人将渭河盆地游河组与三门组界线的年代限定在 2.8~2.6 Ma (袁凤钊, 1986; 葛同明等, 1991; 胡巍等, 1993; 王焯等, 2010)。

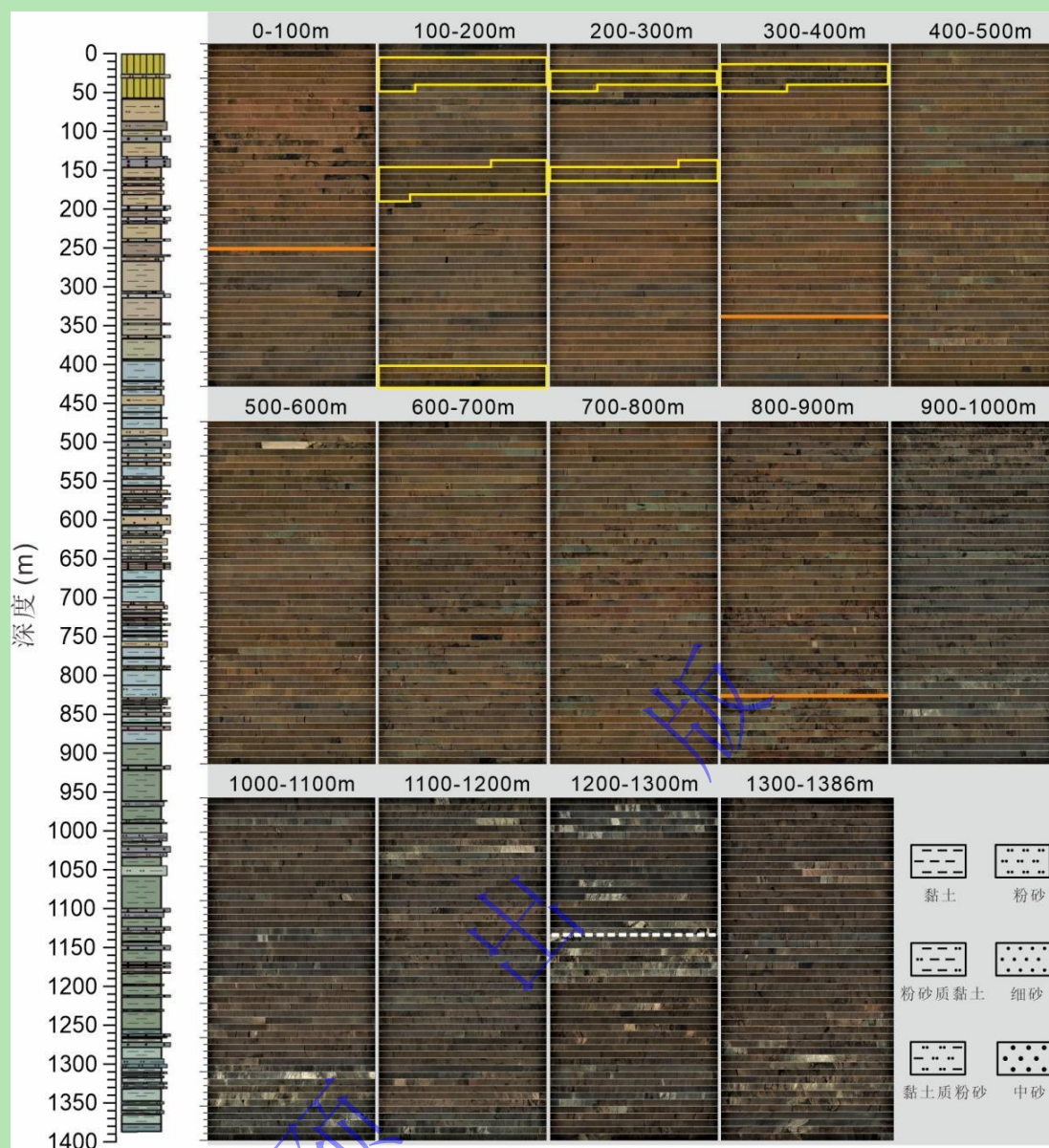


图3 WB1 孔岩性照片

黄线区域表示厚度大于 5 m 的砂层

Fig.3 Photography of lithological facies for the core WB1

Yellow lines show the intervals of sand layers with a thickness > 5 m

利用磁性地层建立的渭南阎村 W7 孔的年代框架作为 WB1 孔年代参照基准(葛同明等, 1991), 地层相关性分析表明 WB1 孔在~880 m 灰绿色与黄褐色沉积交界处的年代约为 2.6 Ma (图 4)。在 WB1 孔 880~380 m 棕黄色粉砂质为主的三门组沉积之上为夹多套厚砂层的秦川群沉积, 与盆地周缘剖面具砂砾石层变粗沉积特征一致, 指示盆地沉积环境发生了显著变化。WB1 孔中秦川群上部 60 m 黄褐色粉砂质沉积推测为受水动力改造的次生黄土。

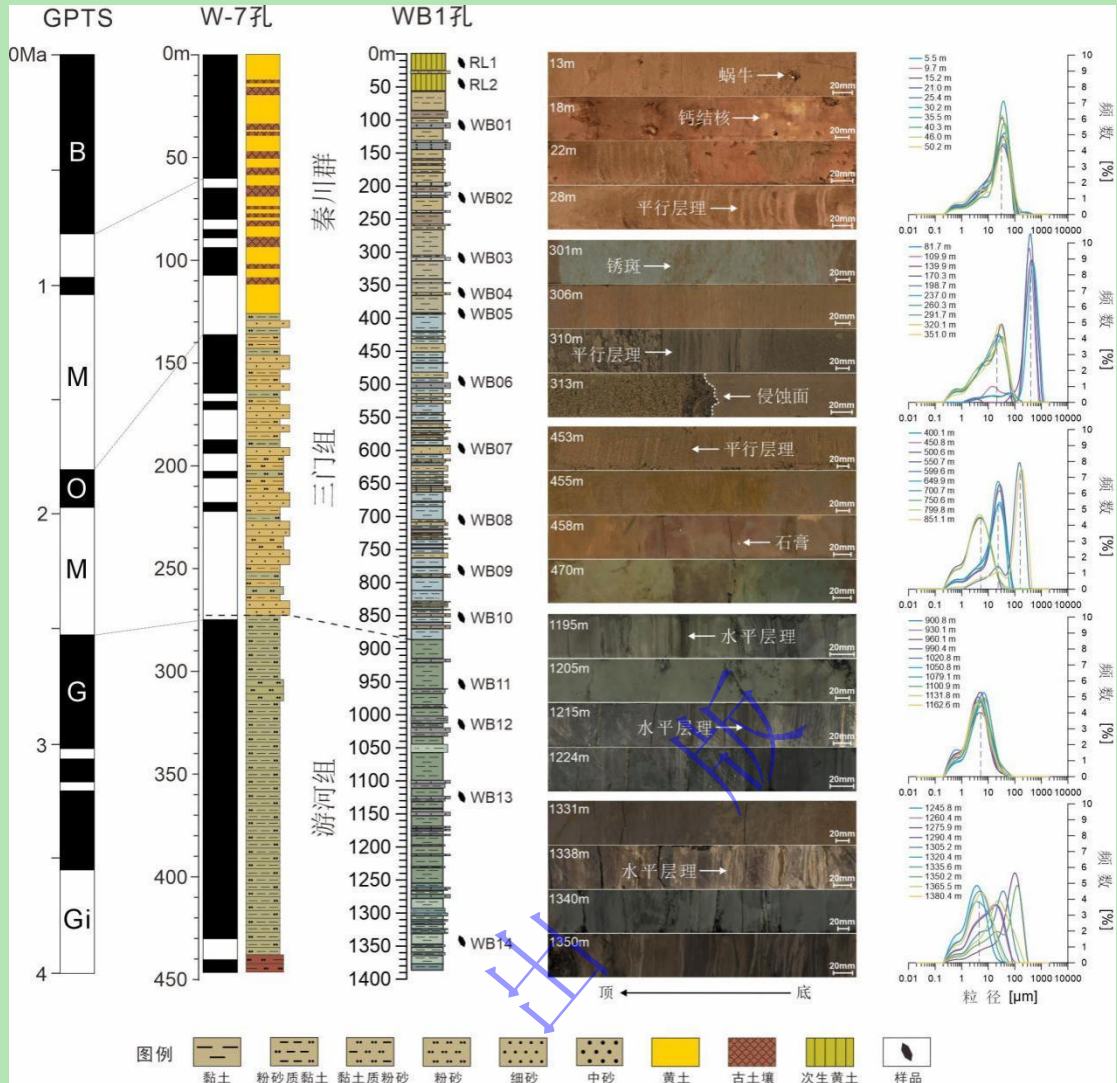


图4 WB1孔岩性地层、沉积相及粒度变化特征(W7孔年代框架据葛同明等, 1991)

B.布容正极性时; M.松山负极性时; O.奥尔都维正极性亚时; G.高斯正极性时; Gi.吉尔伯特负极性时

Fig.4 Lithostratigraphy, sedimentary facies and grain size variation of the core WB1 (The chronological framework of the core W7 is shown as a reference [Ge et al., 1991](#))

B. Brunhes; M. Matsuyam; O. Olduvai; G. Gauss; Gi. Gilbert

从WB1孔中的游河组、三门组、秦川群以及顶部次生黄土四个不同地层单元共采集16个样品(图4), 采用Vos *et al.* (2014)总结的石英颗粒表面微形貌特征对16个样品提取的石英进行24种表面微形貌结构观察(表2), 并采用出现频率统计分析方法予以统计。鉴于10~25粒样本量通常足以统计分析样品中存在的大部分特征变化(Vos *et al.*, 2014), 每个样品统计石英颗粒不少于20颗(表3)。研究表明, 500~125 μm 石英颗粒是各成因沉积物中最活跃组分, 其表面结构成因组合发育全面, 因而能完整记录相关成因信息(方小敏等, 1991)。因此, 本文所有样品均采自砂层与粗粉砂层, 用湿筛法对采集的样品依次过30目与120目试验筛, 在光学显微镜下随机选取石英颗粒后使用导电胶将其粘至载样台并进行喷镀金膜处理。石英颗粒表面的观察与统计通过中国科学院地球环境研究所 ZEISS

EVO-18 扫描电子显微镜完成。

表 2 本研究统计采用的石英颗粒表面微形貌特征

Table 2 The specific quartz-grain surface microstructures statistically analyzed in this study

成因类型	编号	名称	主要特征	环境解释
机械成因	Ao—Angular outline	棱角轮廓	石英颗粒呈现出显著的棱角结构，磨圆度差	常见于冰川作用，河流搬运可见
	So—Subangular outline	半棱角轮廓	石英颗粒呈近似磨圆状，存在少量棱角结构，磨圆程度中等	河流搬运、湖泊岸堤、湖泊环境、风成搬运
	Ro—Rounded outline	圆形轮廓	石英颗粒整体呈现出较为显著的圆形结构，表明其磨圆度较好	风成搬运、湖泊岸堤
	Scf—Small conchoidal fractures	小贝壳断口	多条弧状平行解理纹呈圆盘状或扇形，形似贝壳的同心条纹，长度小于 10 μm	河流搬运、湖泊岸堤、冰川作用
	Mcf—Medium conchoidal fractures	中贝壳断口	多条弧状平行解理纹呈圆盘状或扇形，形似贝壳的同心条纹，长度~10~100 μm	常见于冰川作用，河流搬运与湖泊岸堤可见
	Lcf—Large conchoidal fractures	大贝壳断口	多条弧状平行解理纹呈圆盘状或扇形，形似贝壳的同心条纹，长度大于 100 μm	常见于冰川作用，偶见于河流搬运
	As—Arcuate steps	弓形阶梯	呈弓形阶梯状，深度较大，约 5 μm	常见于冰川作用，风成搬运、河流搬运、湖泊岸堤可见
	Ss—Straight steps	直形阶梯	呈近似直形阶梯状，深度较大，约 5 μm	常见于冰川作用，河流搬运、湖泊岸堤可见
	Fcs—Flat cleavage surfaces	平行解理面	机械碰撞形成平行的解理表面，150 μm 以下石英常见，部分解理面呈磨蚀光滑	河流搬运、湖泊岸堤、冰川作用
	Vpc—V-shaped percussion cracks	“V”形撞击坑	水下环境机械碰撞产生形似“V”状痕迹，长~5 μm，指示高能水下环境	河流搬运、湖泊岸堤、湖泊环境
	Up—Upturned plates	翻板	上翻的解理薄片，长度约 0.5~10 μm	风成搬运
	Cp—Crescentic percussion marks	新月形撞击坑	形似新月形，长度约 1~30 μm	风成搬运
化学成因	Be—Bulbous edges	球根状边缘	近似球形或椭球形，通常与平滑面或磨光面同时出现	风成搬运
	Dd—Dish shaped depressions	碟形坑	由石英颗粒表面撞击磨圆后形成的形似碟子凹坑	风成搬运
	Spi—Solution pits	溶蚀坑	石英颗粒表面化学溶蚀产生的凹陷，常呈圆一次圆形，长~10 μm	常见于湖泊环境、风成搬运可见
	Sc—Solution crevasses	溶蚀裂缝	由化学溶蚀产生，其深度<10 μm	常见于湖泊环境、风成搬运可见
	Sg—Silica globules	二氧化硅小球	石英颗粒表面似小球形硅质沉淀，呈圆一次圆状，长~0.05~0.25 μm	湖泊环境、风成搬运
	Sf—Silica flowers	二氧化硅花	形似花状的六边形硅质沉淀，长~1~20 μm，二氧化硅小球进一步生长产物	湖泊环境、风成搬运
机械+化学成因	Spe—Silica pellicle	二氧化硅薄膜	石英颗粒表面薄膜状硅质沉淀，长~2~10 μm，硅小球、硅花进一步生长产物	湖泊环境、风成搬运
	Co—Crystalline overgrowths	晶体生长	半自形至自形硅质沉积形成	风成搬运、成岩作用
	Lr—Low relief	低浮雕	表明石英颗粒表面的平面起伏程度较小	常见于风成搬运，河流搬运可见
	Mr—Medium relief	中浮雕	表明石英颗粒表面的平面起伏程度中等	河流搬运、湖泊岸堤、湖泊环境
	Hr—High relief	高浮雕	表明石英颗粒表面平面起伏显著，高度大于 2 μm	常见于冰川作用，河流搬运可见
	Ap—Adhering particles	黏附颗粒	附着于石英颗粒表面的微小颗粒	冰川作用、成岩作用、风成搬运

注：据李育等，2013；Vos *et al.*，2014。

表 3 WB1 孔石英颗粒表面微形貌特征频率统计

Table 3 Statistical grain frequency for specific quartz-grain surface microstructures from core WB1

特征频率/%	次生黄土沉积物		三角洲前缘沉积物				滨湖沉积物						浅湖沉积物			
	WB RL1	WB RL2	WB 01	WB 02	WB 03	WB 04	WB 05	WB 06	WB 07	WB 08	WB 09	WB 10	WB 11	WB 12	WB 13	WB 14
	21 颗	20 颗	30 颗	46 颗	34 颗	35 颗	25 颗	40 颗	24 颗	27 颗	20 颗	25 颗	24 颗	27 颗	22 颗	20 颗
棱角轮廓 (Ao)	9.5	20.0	80.0	87.0	94.1	85.7	28.0	45.0	33.3	44.4	40.0	40.0	20.8	18.5	36.4	20.0
半棱角轮廓 (So)	81.0	80.0	20.0	13.0	5.9	14.3	72.0	55.0	66.7	55.6	60.0	60.0	79.2	77.8	63.6	80.0
圆形轮廓 (Ro)	9.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.7	0.0	0.0
小贝壳断口 (Scf)	0.0	0.0	3.3	2.2	0.0	2.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.7	0.0	0.0

中贝壳断口 (Mcf)	0.0	15.0	13.3	8.7	5.9	5.7	8.0	0.0	0.0	3.7	5.0	8.0	4.2	7.4	0.0	5.0
大贝壳断口 (Lcf)	0.0	0.0	13.3	13.0	8.8	8.6	4.0	7.5	12.5	7.4	0.0	12.0	0.0	0.0	9.1	5.0
弓形阶梯 (As)	9.5	5.0	6.7	6.5	8.8	8.6	16.0	7.5	20.8	14.8	5.0	20.0	16.7	7.4	9.1	5.0
直形阶梯 (Ss)	4.8	5.0	3.3	4.3	11.8	5.7	0.0	10.0	4.2	3.7	5.0	0.0	0.0	0.0	9.1	0.0
平行解理面 (Fcs)	19.0	10.0	73.3	78.3	76.5	82.9	40.0	40.0	41.7	51.9	50.0	40.0	29.2	25.9	18.2	20.0
V 型撞击坑 (Vpc)	0.0	0.0	10.0	10.9	11.8	11.4	12.0	7.5	12.5	11.1	10.0	16.0	16.7	11.1	27.3	10.0
翻板 (Up)	95.2	75.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
新月形撞击坑 (Cp)	23.8	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
球根状边缘 (Be)	14.3	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
碟形坑 (Dd)	9.5	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
溶蚀坑 (Spi)	14.3	40.0	10.0	2.2	2.9	5.7	8.0	7.5	12.5	7.4	10.0	16.0	4.2	14.8	9.1	0.0
溶蚀裂缝 (Se)	0.0	5.0	3.3	0.0	0.0	5.7	4.0	0.0	4.2	0.0	0.0	4.0	0.0	3.7	4.5	0.0
二氧化硅小球 (Sg)	9.5	0.0	10.0	4.3	2.9	0.0	32.0	20.0	12.5	7.4	20.0	32.0	58.3	85.2	77.3	45.0
二氧化硅花 (Sf)	0.0	0.0	10.0	4.3	2.9	5.7	8.0	15.0	8.3	7.4	15.0	24.0	41.7	74.1	45.5	30.0
二氧化硅薄膜 (Spe)	14.3	5.0	10.0	8.7	8.8	11.4	48.0	32.5	29.2	29.6	35.0	56.0	70.8	92.6	95.5	85.0
晶体生长 (Co)	23.8	25.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
低浮雕 (Lr)	33.3	15.0	3.3	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	11.1	0.0	10.0
中浮雕 (Mr)	52.4	50.0	73.3	82.6	82.4	80.0	60.0	75.0	75.0	70.4	70.0	72.0	83.3	77.8	81.8	75.0
高浮雕 (Hr)	14.3	35.0	23.3	17.4	17.6	20.0	40.0	20.0	20.8	29.6	30.0	28.0	16.7	11.1	18.2	15.0
黏附颗粒 (Ap)	14.3	10.0	10.0	13.0	11.8	5.7	4.0	10.0	4.2	0.0	10.0	4.0	4.2	0.0	4.5	10.0

3 结果

3.1 WB1 孔沉积特征

根据沉积岩性、沉积构造以及粒度分布等特征将 WB1 孔划分为四个基本沉积单元 (图 4)。(1) 1 386~880 m 分为两个次级单元: ①1 386~1 240 m 灰绿色黏土—粉砂质黏土与深棕色黏土质粉砂—粉砂交替, 见水平层理发育; 粒度分布显示主要由粉砂 (模态值 5~50 μm) 以及少量细砂 (模态值 ~110 μm) 组成。②1 240~880 m 以具水平层理的钢灰色和灰绿色黏土—粉砂质黏土为主; 粒度分布十分相似, 以分选很好的细组分沉积为主 (模态值 3~8 μm)。

(2) 880~380 m: 以具锈斑的棕黄色粉砂质黏土—黏土质粉砂为主, 交替少量灰绿色黏土—粉砂质黏土, 夹具平行层理的中—厚层细砂; 粒度分布宽泛, 粗组分到细组分模态值分别为 ~110 μm 、~30 μm 及 ~5 μm , 显示复杂的水动力环境。(3) 380~60 m: 以具块状层理的棕黄色粉砂质黏土—黏土质粉砂为主, 夹多套具平行层理、厚度大于 5 m 的中砂层, 砂层底部常见侵蚀—充填构造; 粒度分布主要由粗组分 (模态值 ~400 μm) 和细组分 (模态值 11~13 μm) 组成。(4) 60~0 m: 整体为黄褐色粉砂, 夹薄层棕红色黏土层及细砂层, 常见次生碳酸盐结核及少量陆生蜗牛壳体碎片; 主要以模态值 30~40 μm 分选好的粉砂为主。

3.2 游河组石英颗粒表面特征 (1 386~880 m)

如图 5 所示, WB1 孔游河组以灰绿色泥质沉积为主, 石英表面以显著的半棱角轮廓 (So)、

中浮雕（Mr）为主要特征，颗粒表面低洼处各类硅质沉淀如二氧化硅薄膜（Spe）、二氧化硅小球（Sg）、二氧化硅花（Sf）普遍分布（分布频率普遍大于 40%），尤以二氧化硅薄膜（Spe）特别发育（分布频率大于 70%）（图 5c, d），此外可见少量的平行解理面（Fcs）、V 型撞击坑（Vpc）、弓形阶梯（As）等水下环境标志特征发育（分布频率小于 30%）。大量的硅质沉淀指示水动力相对较弱的搬运特征，上述微表面特征组合反映了水下相对低能的静水沉积环境。

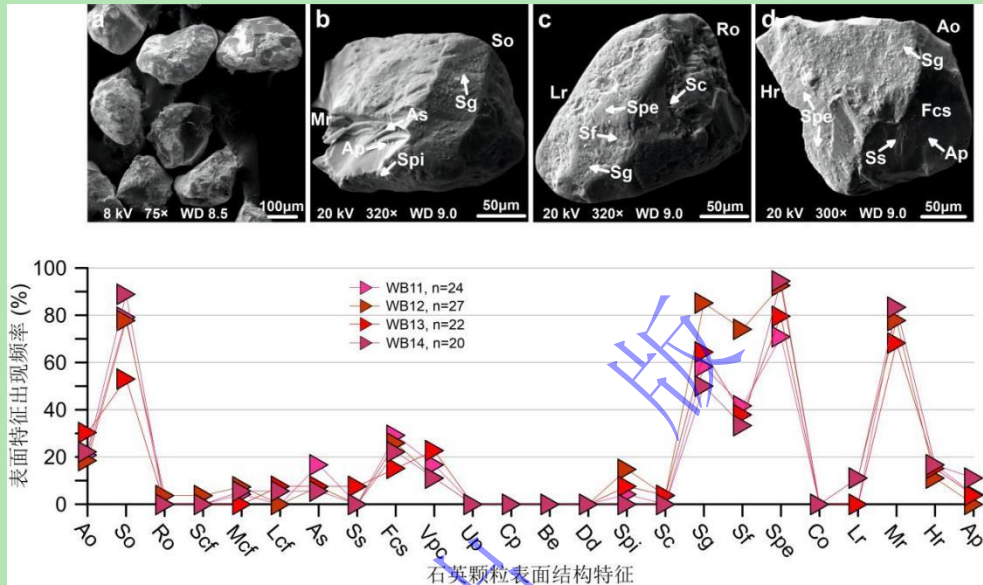


图 5 WB1 孔游河组石英颗粒微结构特征与表面特征频率统计

(a) 游河组石英样品；(b) 弓形阶梯（As）与溶蚀坑（Spi）；(c) 二氧化硅花（Sf）与溶蚀裂缝（Sc）；(d) 二氧化硅薄膜（Spe）与平行解理面（Fcs）

Fig.5 Surface microstructures for quartz grains and frequency of typical microstructures from Youhe Formation, core WB1

3.3 三门组石英颗粒表面特征（880~380 m）

三门组以棕黄色粉砂质沉积为主，石英颗粒外形以半棱角轮廓（So）—棱角轮廓（Ao）、中浮雕（Mr）—高浮雕（Hr）为主要特征（图 6），颗粒表面二氧化硅薄膜（Spe）和二氧化硅小球（Sg）等特征仍有发育。相比游河组石英颗粒，硅质沉淀显著减少（分布频率小于 40%），平行解理面（Fcs）显著增多（分布频率大于 40%）（图 6c, d），V 型撞击坑（Vpc）、弓形（As）—一直形阶梯（Ss）以及少量大贝壳状断口（Lcf）等水下环境标志特征发育。这些微表面特征组合反映了 WB1 孔三门组沉积相比游河组水动力有所增强。

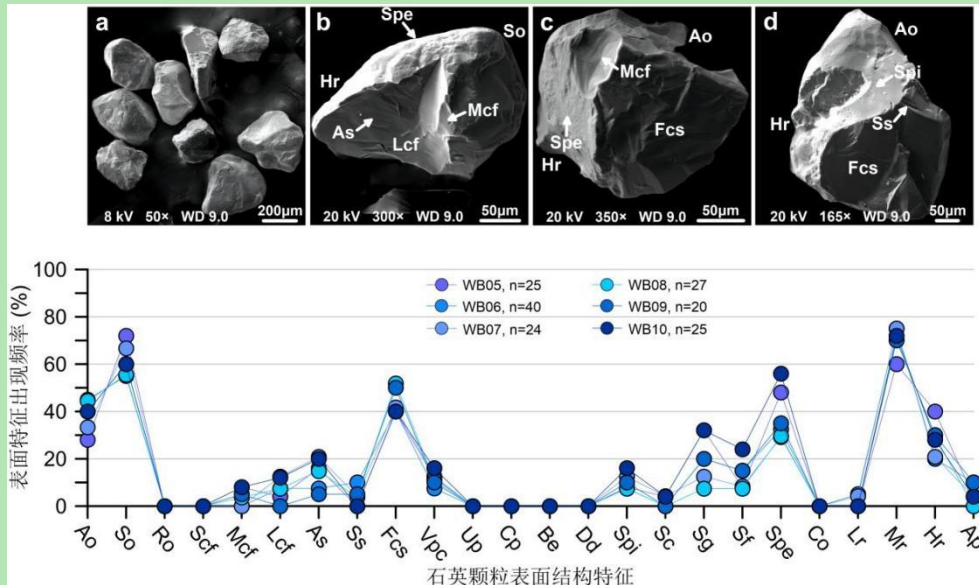


图6 WB1孔三门组石英颗粒微结构特征与表面特征频率统计

(a) 三门组石英样品; (b) 大贝壳状断口 (Lcf) 与弓形阶梯 (As); (c) 中贝壳断口 (Mcf) 与二氧化硅薄膜 (Spe); (d) 直形阶梯 (Ss) 与平行解理面 (Fcs)

Fig.6 Surface microstructures for quartz grains and frequency of typical microstructures from Sanmen Formation, core WB1

3.4 秦川群石英颗粒表面特征 (380~60 m)

WB1 孔秦川群具有多套显著厚层中砂层, 石英颗粒外形以棱角轮廓 (Ao)、中浮雕 (Mr) 一高浮雕 (Hr) 特征为主, 表面新鲜的平行解理面 (Fcs) 特别发育 (分布频率大于 70%) (图 7b, d), 还可见弓形阶梯 (As)、V 型撞击坑 (Vpc)、中 (Mcf) 一大贝壳状断口 (Lcf) 等 (图 7d), 这些微表面特征组合反映秦川群砂层经历了非常强的水动力条件搬运过程, 为高能水动力环境的沉积产物 (缪昕, 1981; 谢又予, 1984; 陈丽华等, 1986)。

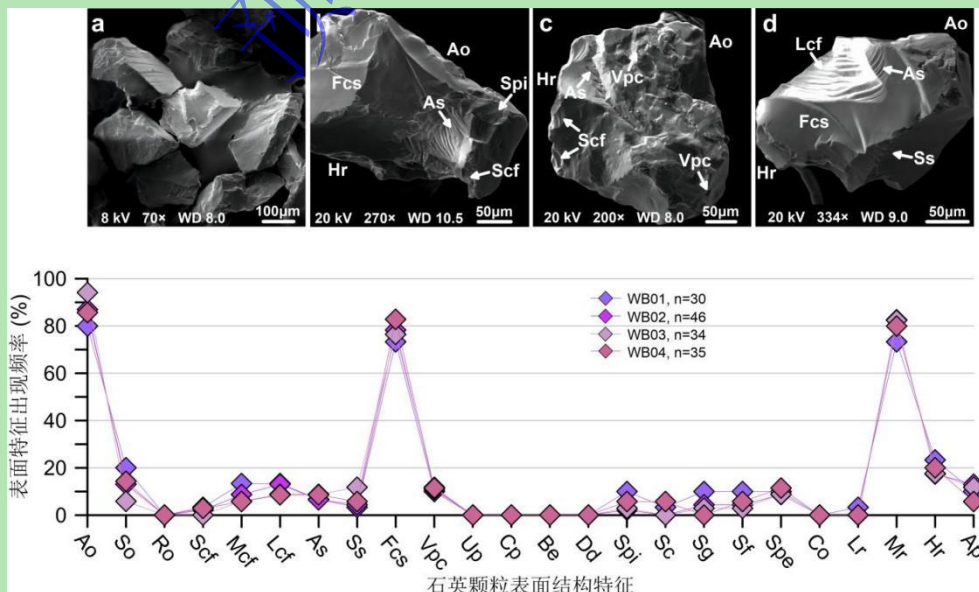


图7 WB1孔秦川群石英颗粒微结构特征与表面特征频率统计

(a) 秦川群石英样品；(b) 小贝壳断口 (Scf) 与弓形阶梯 (As)；(c) V 型撞击坑 (Vpc) 与小贝壳断口 (Scf)；(d) 平行解理面 (Fcs) 与大贝壳状断口 (Lcf)

Fig.7 Surface microstructures for quartz grains and frequency of typical microstructures from Qinchuan Group, core WB1

3.5 风成石英颗粒表面特征 (60~0 m)

来自 WB1 孔上部 60 m 的两个样品 (WBRL1, WBRL2)，石英颗粒外形以半棱角轮廓 (So)、低浮雕 (Lr)—中浮雕 (Mr) 为特征，翻板 (Up) 特别发育 (分布频率大于 75%) (图 8b~d)，可见新月形撞击坑 (Cp)、碟形坑 (Dd)、球根状边缘 (Be) 等风成环境下的典型特征结构 (谢又予, 1984; 陈丽华等, 1986; Mahaney *et al.*, 2004) (图 8b, d)。晶体生长 (Co)、黏附颗粒 (Ap) 特征亦有发育。这些微表面特征组合显示了显著的风成环境搬运特征，少量弓形 (As) 一直形阶梯 (Ss)、平行解理面 (Fcs) 的发育，指示其形成经历了较弱的水动力改造，推测为盆地周缘风成堆积后期水动力搬运至湖盆的次生黄土沉积。

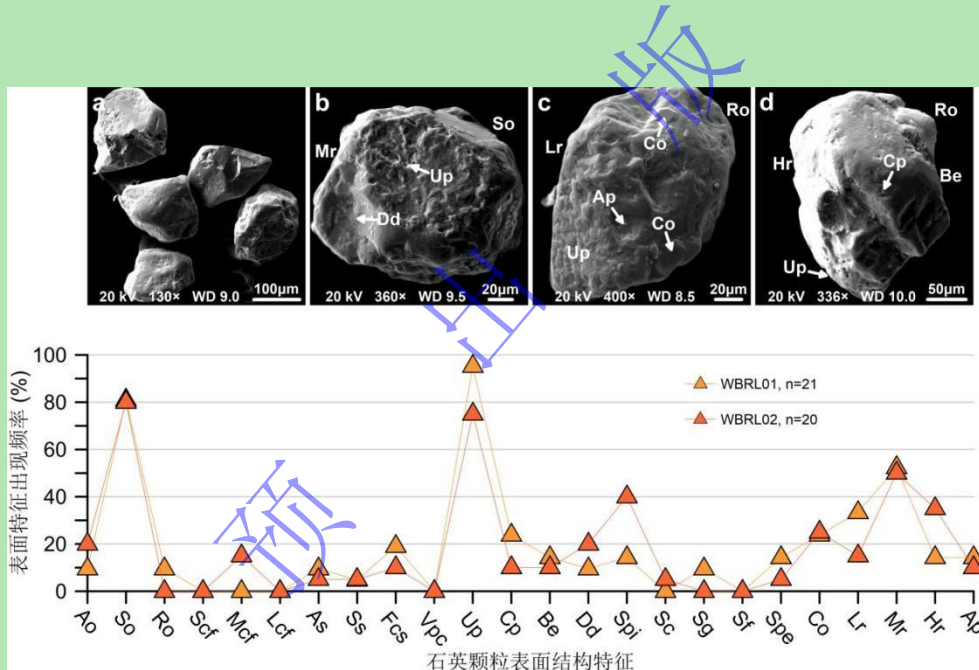


图 8 WB1 孔次生黄土石英颗粒微结构特征与表面特征频率统计

(a) 次生黄土石英样品；(b) 翻板 (Up) 与碟形坑 (Dd)；(c) 晶体生长 (Co) 与黏附颗粒 (Ap)；(d) 新月形撞击坑 (Cp) 与球根状边缘 (Be)

Fig.8 Surface microstructures for quartz grains and frequency of typical microstructures from reworked loess of core WB1

3.6 水下沉积的矿物组合特征

对 WB1 孔岩心水下沉积部分游河组、三门组以及秦川群代表性样品的薄片显微照片观察与统计显示 (图 9)，游河组与三门组沉积岩屑的含量较低，具有相对较高的矿物成熟度；相较之下秦川群沉积的矿物成熟度明显降低，含较多岩屑碎片，尤以火成岩岩屑组分占优。游河—三门组与秦川群沉积的矿物组合特征差异可能主要受沉积过程影响，反映了水动力环

境的显著变化。

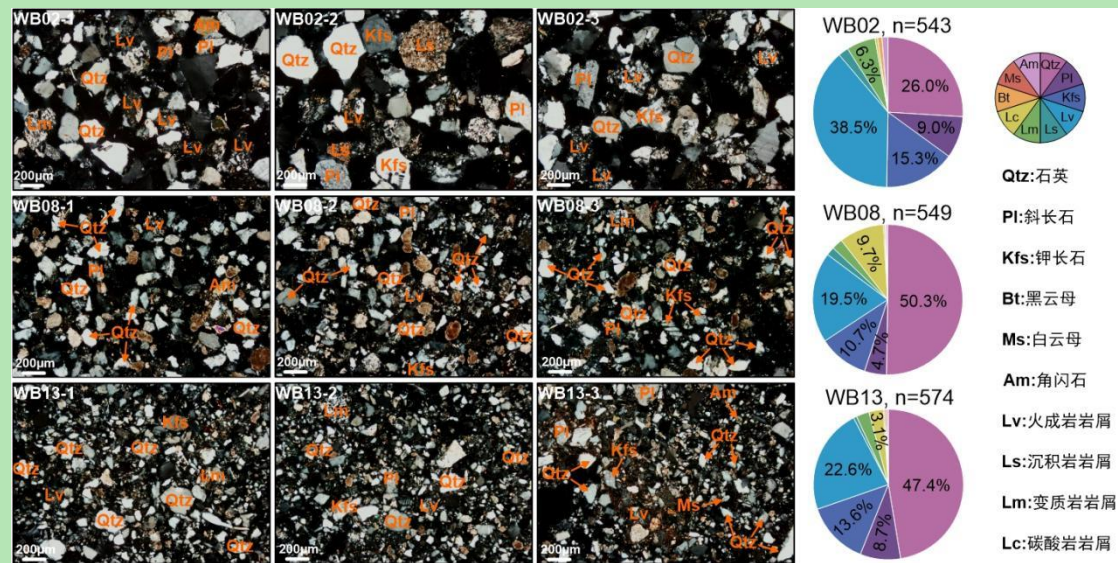


图9 WB1 孔不同沉积层位代表样品显微照片(左)及矿物成分统计图(右)

WB02 为秦川群代表性样品; WB08 为三门组代表性样品; WB13 为游河组代表性样品

Fig.9 Micrographs of the representative samples (left) and percentage diagrams of major minerals (right) from different sedimentary intervals, core WB1

4 讨论

4.1 石英颗粒表面特征揭示的盆地沉积环境变化

WB1 孔不同沉积层位样品中石英表面微结构特征存在显著差异, 表明渭河盆地沉积环境经历了浅湖到风成环境的多阶段演化过程。在上新世, WB1 孔游河组沉积中石英颗粒表面典型特征为较好的颗粒磨圆与丰富的硅质沉淀现象, 多以二氧化硅薄膜沉淀在颗粒表面低洼处, 硅化物沉淀结构的形成通常与稳定的水动力条件及高盐的沉积环境有关(李育等, 2013)。弓形阶梯与平行解理面等分布频率低且规模较小也指示了其表面经受的流水冲击较弱(图 5b, d)。

WB1 孔游河组灰绿色—棕褐色的泥质—粉砂质细组分沉积、普遍发育的水平层理以及分选良好的粒度分布(图 4), 与渭河盆地其他剖面 and 钻孔的沉积地层特征一致, 揭示了上新世盆地低能的浅湖沉积环境(Xiao *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2022a)。前人在上新世—早更新世盆地地层中发现了非海洋有孔虫动物群及咸水介形虫化石(汪品先等, 1982; 袁凤钿, 1986; 王焯等, 2010), 结合对盆地游河组和三门组盐度的定量估算(刘护军等, 2006), 推测渭河盆地曾为低盐度—半咸水内陆湖泊环境。因此, WB1 孔游河组石英表面形成的化学结构特征与当时相对高盐的沉积环境相符。

相较上新世游河组湖相沉积, WB1 孔早更新世三门组的石英表面典型特征为平行解理

面显著增多的同时硅质沉淀明显减少，弓形一直形阶梯、大贝壳状断口更加常见（表 3），表明三门组沉积水动力条件较上新世时期浅湖亚相有所增强。基于对 WB1 孔三门组沉积特征观察，如大量锈斑与石膏沉淀以及多峰的粒度分布特征，表明该套沉积形成于低能悬浮状态并伴随一定的水动力强度波动（图 4），形成于蒸发作用显著、氧化—还原条件不稳定的滨湖亚相沉积环境。此外，邻近的三门峡盆地 SMX19 孔和运城盆地 YC20 孔的易溶盐含量及古盐度定量分析结果显示，盆地早更新世仍为咸水—微咸水湖沉积（Wang *et al.*, 2022a; 丁璇, 2024），说明石英颗粒表面的化学沉淀受水动力条件变化影响显著。

WB1 孔秦川群的石英颗粒表面以发育丰富的新鲜平行解理面为主要特征（图 7），弓形阶梯、中—大贝壳状断口常见，表明其石英颗粒表面经受了强水动力搬运影响。这些石英表面典型结构特征指示了与游河组及三门组相对静水低能的湖泊环境截然不同的水动力条件。WB1 孔秦川群不同层位样品的粒度分布差异巨大，包含了中砂层（模态值 $\sim 400\ \mu\text{m}$ ）和细粉砂（模态值 $11\sim 13\ \mu\text{m}$ ）的分值，表现为细组分粉砂质沉积中发育多套突变的厚中砂层。砂层中常见代表强水动力环境的平行层理，砂层底部与粉砂质黏土突变接触、常见冲刷面及泥砾，具有由底至顶从砂质向粉砂质渐变过渡的正韵律沉积等特征（图 4）。粗组分中砂层与细组分粉砂质沉积互层，表明其可能形成于具迁移河道的动态沉积环境。由于缺失暴露标志（如残存根通道、洞穴及 Fe-Mn 胶膜等），因此，推断 WB1 孔秦川群应属于三角洲前缘亚相沉积环境，其中粗组分为水下分流河道沉积。

此外，样品矿物薄片鉴定结果显示（图 9），游河组和三门组的沉积物成熟度相对较高，石英含量高而岩屑含量较少，与滨浅湖亚相沉积环境特征相符：受湖泊水动力波动的影响，沉积物经历反复的机械破碎和化学分解作用，再由湖浪进行分选。秦川群沉积物成熟度显著降低、含有大量岩屑碎片，具有强侵蚀作用和输沙能力的径流搬运特征，将粗粒沉积物输送到湖泊中。值得注意的是，秦川群的火成岩岩屑含量显著增加，可能揭示了来自秦岭造山带火成岩区物源贡献的增多，特别是北秦岭西部存在大量的早古生代岩体。

来自 WB1 孔上部 60 m 的石英颗粒外形以显著的翻板发育为主要特征，亦可见明显的新月形撞击坑、碟形坑、球根状边缘等风成搬运特征，弓形一直形阶梯以及平行解理面的出现指示其受到了一定程度的水动力改造。这些微表面特征组合与沉积特征一致，WB1 孔上部 60 m 以黄褐色模态值 $30\sim 40\ \mu\text{m}$ 的粉砂为主，粒度分布曲线形态与典型黄土特征相似（图 4）；夹少量指示氧化环境的棕红色黏土层，及薄层具平行层理的粗粉砂与细砂互层，显示受水动力改造影响。但是，普遍的钙结核及陆生蜗牛壳体碎片，表明该阶段整体脱离了水下沉积环境，为受水动力改造的次生黄土沉积。

4.2 渭河盆地沉积环境演变机制

渭河盆地经历了从晚上新世典型的湖相沉积,到更新世古湖泊逐渐变浅并最终消亡的演化过程,沉积环境的演变趋势可能与晚新生代全球气候持续变冷驱动的季风降水减少有关。伴随~2.73 Ma 以来北半球冰量不断增长,全球气候转型进入寒冷干旱、气候波动的更新世(Haug *et al.*, 1999; Lisiecki and Raymo, 2005)。东亚地区的古气候替代指标,如东亚夏季风有效降水变率(SMI)和代表 C₄ 植被占比的土壤碳酸盐碳同位素($\delta^{13}\text{C}$),均表明东亚夏季风在~2.9 Ma 至 2.7 Ma 到达峰值,随后进入更新世大幅震荡且总体减弱的下降趋势(An *et al.*, 2005; Sun *et al.*, 2010),与区域孢粉记录(Wu *et al.*, 2007)共同揭示了更新世以来东亚夏季风降水减弱的趋势。

晚上新世以来渭河盆地沉积环境演变具有明显的阶段性特征,与 WB1 孔游河组—三门组的石英表面特征反映的水动力条件变化结果一致。渭河盆地大量剖面与钻孔沉积记录揭示,盆地在上新世/更新世之交发生了大范围的沉积相变,灰绿色泥质—粉砂质为主的游河组沉积转变为黄褐色砂层与浅棕色—灰绿色泥质交替的三门组沉积,指示古湖泊经历了大范围的湖平面下降。对比邻近三门峡盆地的地层特征及物源变化证据表明,古湖泊可能在~2.8 Ma 至 2.6 Ma 因区域构造活动,导致了由渭河盆地向三门峡盆地的泄水事件,造成上述沉积相的显著变化(Liu *et al.*, 2019; 刘瑾等, 2020)。

根据渭河盆地的武家堡(孙建中等, 1988; 王婷等, 2023)、宋家北沟(岳乐平, 1996; Liu *et al.*, 2019)及石家湾(Han *et al.*, 1997)等剖面以及渭南阎村 W7 孔(葛同明等, 1991)对三门组沉积上界的限定,在早—中更新世渭河盆地周缘的水下沉积环境逐渐结束转变为风成黄土—古土壤序列沉积,同时期 WB1 孔石英表面特征记录了上新世以来最强水动力环境,均说明此时盆地的湖泊沉积环境范围发生了急剧的收缩。

5 结论

(1) 上新世游河组浅湖亚相静水环境沉积的石英颗粒表面以半棱角状轮廓、中等浮雕为主,具有平行解理面、V 型撞击坑、弓形阶梯等水下环境标志的微形貌特征,低洼处沉淀大量二氧化硅薄膜;早更新世滨湖亚相的三门组石英颗粒以半棱角轮廓—棱角轮廓、中—高浮雕为主,样品硅质沉淀显著减少,平行解理面增多指示更强的水动力环境。

(2) 盆地沉积环境显著变化发生在三角洲前缘亚相的秦川群,其石英表面呈棱角轮廓、中—高浮雕,具大量新鲜平行解理面及中—大贝壳状断口等微形貌特征,显示与径流强水动力搬运有关;WB1 孔顶部 60 m 沉积石英颗粒具新月形撞击坑、碟形坑、球根状边缘等典型

风成特征，标志着渭河盆地湖泊沉积环境的结束。

(3) 渭河盆地晚上新世以来沉积环境经历了浅湖—滨湖—三角洲—风成的阶段性演变，与东亚夏季风的减弱趋势密切相关。

致谢 感谢审稿专家对文章提出的宝贵意见与建议。

参考文献 (References)

- 陈丽华, 缪昕, 于众. 1986. 扫描电镜在地质上的应用[M]. 北京: 科学出版社, 21-44. [Chen Lihua, Miao Xin, Yu Zhong. 1986. The applications of scanning electron microscope in geology[M]. Beijing: Science Press, 21-44.]
- 丁璇. 2024. 运城盐湖形成演化的易溶盐记录[D]. 兰州: 兰州大学. [Ding Xuan. 2024. Records of soluble salts in the formation and evolution of Yuncheng salt lake[D]. Lanzhou: Lanzhou University.]
- 方小敏, 史正涛, 沈明智. 1991. 试从兰州地区黄土石英砂表面特征探讨黄土物质来源、成因及环境变迁[M]//中国第四纪冰川与环境研究中心, 中国第四纪研究委员会. 中国西部第四纪冰川与环境. 北京: 科学出版社: 138-148. [Fang Xiaomin, Shi Zhengtao, Shen Mingzhi. 1991. Exploring the source, genesis and environmental changes of loess from the surface characteristics of loess quartz sand in Lanzhou area[M]//China Quaternary Glacier and Environment Research Center, China Quaternary Research Committee. Quaternary glaciers and environment in western China. Beijing: Science Press: 138-148.]
- 葛同明, 樊利民, 徐行, 等. 1991. 渭南阎村 W7 孔岩心样品的古地磁学研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 11(4): 59-71. [Ge Tongming, Fan Limin, Xu Xing, et al. 1991. Magnetostratigraphic study for borehole W7 from Yancun, Weinan[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 11(4): 59-71.]
- 胡巍, 岳乐平, 田新红. 1993. 渭南沈河宋家北沟剖面磁性地层学研究[J]. 陕西地质, (2): 26-32. [Hu Wei, Yue Leping, Tian Xinhong. 1993. On the magnetostratigraphy of the Songjia—Beigou section, Youhe, Weinan[J]. Geology of Shaanxi, (2): 26-32.]
- 李育, 周雪花, 李卓仑, 等. 2013. 基于扫描电镜分析的猪野泽全新世砂层成因探讨[J]. 沉积学报, 31(1): 149-156. [Li Yu, Zhou Xuehua, Li Zhuolun, et al. 2013. Formation of Holocene sand layers by SEM analyses in the Zhuye lake sediments[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 31(1): 149-156.]
- 李智超, 李文厚, 李永项, 等. 2016. 陕西渭河地区新生代地层及沉积环境演化[J]. 地层学杂志, 40(2): 168-178. [Li Zhichao, Li Wenhao, Li Yongxiang, et al. 2016. Cenozoic stratigraphy and paleoenvironments in the Weihe area, Shaanxi province[J]. Journal of Stratigraphy, 40(2): 168-178.]
- 刘护军, 薛祥煦, 李永项. 2006. 渭河盆地渭南段古三门湖的盐度估算[J]. 西北大学学报(自然科学版), 36(1): 112-114. [Liu Hujun, Xue Xiangxu, Li Yongxiang. 2006. Calculation on the paleosalinity of the ancient Sanmen Lake in the Weinan area of Weihe River Basin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 36(1): 112-114.]
- 刘瑾, 陈兴强, 王平, 等. 2020. 渭河—三门峡盆地三门组沉积充填特征、物源区及其构造意义[J]. 地球科学, 45(7): 2673-2683. [Liu Jin, Chen Xingqiang, Wang Ping, et al. 2020. Sedimentary characteristics, provenance and tectonic significance of the Sanmen Formation in Weihe-Sanmenxia Basin[J]. Earth Science, 45(7): 2673-2683.]
- 鹿化煜, 张瀚之, 王逸超, 等. 2018. 渭河盆地新生代沉积序列与亚洲季风气候起源演化[J]. 第四纪研究, 38(5): 1057-1067. [Lu Huayu, Zhang Hanzhi, Wang Yichao, et al. 2018. Cenozoic depositional sequence in the Weihe Basin (central China): A long-term record of Asian monsoon precipitation from the greenhouse to icehouse Earth[J]. Quaternary Sciences, 38(5): 1057-1067.]
- 缪昕. 1981. 石英颗粒表面“V”形撞击坑与化学溶蚀坑的鉴别[J]. 地质科学, (3): 291-293. [Miao Xin. 1981. The recognition of “V”-shaped impact pit and chemical etching on the quartz-grain surface[J]. Scientia Geologica Sinica, (3): 291-293.]
- 孙建中, 赵景波, 魏明建, 等. 1988. 武家堡剖面古地磁新资料[J]. 水文地质工程地质, (5): 44-48, 36. [Sun Jianzhong, Zhao Jingbo, Wei Mingjian, et al. 1988. New paleomagnetic data from the Wujiabu section[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, (5): 44-48, 36.]
- 汪品先, 王乃文, 鲍金松. 1982. 汾渭盆地新生代有孔虫的发现及其意义[J]. 地质论评, 28(2): 93-100. [Wang Pinxian, Wang Naiwen, Bao Jinsong. 1982. Discovery of the Cenozoic foraminifera in the Fen-Wei Basin and its significance[J]. Geological Review,

- 28(2): 93-100.]
- 王焯, 王平, 王曦. 2010. 陕西渭南宋家北沟新近纪/第四纪三门组介形类化石研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 25(1): 35-40, 44. [Wang Zhuo, Wang Ping, Wang Xi. 2010. Study on the Neogene: Quaternary ostracoda fossils of Sanmen Formation in Songjiabeigou, Weinan, Shaanxi[J]. Journal of Xi'an Shiyu University (Natural Science Edition), 25(1): 35-40, 44.]
- 王建强, 刘池洋, 高飞, 等. 2015. 陕西渭河盆地前新生界地质特征及其油气意义[J]. 地质通报, 34(10): 1981-1991. [Wang Jianqiang, Liu Chiyang, Gao Fei, et al. 2015. Pre-Cenozoic geological characteristics and oil-gas significance in Weihe Basin, Shaanxi province[J]. Geological Bulletin of China, 34(10): 1981-1991.]
- 王婷, 张航, 孙有斌. 2023. 渭河盆地南缘早更新世风成相和湖相沉积环境演化[J]. 地质科技通报, 42(6): 95-105. [Wang Ting, Zhang Hang, Sun Youbin. 2023. Sedimentary evolution revealed by aeolian and lacustrine depositions in the southern margin of the Weihe Basin during the Early Pleistocene[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 42(6): 95-105.]
- 谢又予. 1984. 中国石英砂表面结构特征图谱[M]. 北京: 海洋出版社: 4-10. [Xie Youyu. 1984. Atlas of quartz sand surface textural features of China micrographs[M]. Beijing: Ocean Press: 4-10.]
- 薛祥煦. 1981. 陕西渭南一早更新世哺乳动物群及其层位[J]. 古脊椎动物学报, 19(1): 35-44. [Xue Xiangxu. 1981. An Early Pleistocene mammalian fauna and its stratigraphy of the River You, Weinan, Shensi[J]. Vertebrata Palasiatica, 19(1): 35-44.]
- 袁凤钿. 1986. 三门峡地区三门系介形类化石的发现及其意义[J]. 微体古生物学报, 3(2): 161-166, 231. [Yuan Fengtian. 1986. Discovery of ostracods from the San men series and its significance[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 3(2): 161-166, 231.]
- 岳乐平. 1996. 黄土高原黄土、红色粘土与古湖盆沉积物关系[J]. 沉积学报, 14(4): 148-153. [Yue Leping. 1996. Depositional Relation between the loess, red clay and Sedimentation of the Lakebasin in the Loess Plateau[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 14(4): 148-153.]
- An Z S, Huang Y S, Liu W G, et al. 2005. Multiple expansions of C₄ plant biomass in East Asia since 7 Ma coupled with strengthened monsoon circulation[J]. Geology, 33(9): 705-708.
- An Z S, Zhang P Z, Vogel H, et al. 2020. Scientific drilling workshop on the Weihe Basin Drilling Project (WBDP): Cenozoic tectonic-monsoon interactions[J]. Scientific Drilling, 28: 63-73.
- Chen X Q, Dong S W, Shi W, et al. 2021. Magnetostratigraphic ages of the Cenozoic Weihe and Shanxi Grabens in North China and their tectonic implications[J]. Tectonophysics, 813: 228914.
- Clinkscales C, Kapp P, Thomson S, et al. 2021. Regional exhumation and tectonic history of the Shanxi rift and Taihangshan, North China[J]. Tectonics, 40(3): e2020TC006416.
- Han J, Fyfe W S, Longstaffe F J, et al. 1997. Pliocene-Pleistocene climatic change recorded in fluvio-lacustrine sediments in central China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 135(1/2/3/4): 27-39.
- Haug G H, Sigman D M, Tiedemann R, et al. 1999. Onset of permanent stratification in the subarctic Pacific Ocean[J]. Nature, 401(6755): 779-782.
- Li X N, Zhang P Z, Zheng W J, et al. 2018. Kinematics of Late Quaternary slip along the Qishan-Mazhao fault: Implications for tectonic deformation on the southwestern ordos, China[J]. Tectonics, 37(9): 2983-3000.
- Lisiecki L E, Raymo M E. 2005. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records[J]. Paleoclimatology and Paleoclimatology, 20(1): PA1003.
- Liu J, Chen X Q, Shi W, et al. 2019. Tectonically controlled evolution of the Yellow River drainage system in the Weihe region, North China: Constraints from sedimentation, mineralogy and geochemistry[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 179: 350-364.
- Lyu H, Lu H Y, Wang Y C, et al. 2021. East Asian paleoclimate change in the Weihe Basin (central China) since the Middle Eocene revealed by clay mineral analysis[J]. Science China Earth Sciences, 64(8): 1285-1304.
- Mahaney W C, Dirsowsky R W, Milner M W, et al. 2004. Quartz microtextures and microstructures owing to deformation of glaciolacustrine sediments in the northern Venezuelan Andes[J]. Journal of Quaternary Science, 19(1): 23-33.
- Mahaney W C, Stewart A, Kalm V. 2001. Quantification of SEM microtextures useful in sedimentary environmental discrimination[J]. Boreas, 30(2): 165-171.
- Miao Y F, Fang X M, Sun J M, et al. 2022. A new biologic paleoaltimetry indicating Late Miocene rapid uplift of northern Tibet

- Plateau[J]. Science, 378(6624): 1074-1079.
- Sun Y B, An Z S, Clemens S C, et al. 2010. Seven million years of wind and precipitation variability on the Chinese Loess Plateau[J]. Earth and Planetary Science Letters, 297(3/4): 525-535.
- Vos K, Vandenberghe N, Elsen J. 2014. Surface textural analysis of quartz grains by scanning electron microscopy (SEM): From sample preparation to environmental interpretation[J]. Earth-Science Reviews, 128: 93-104.
- Wang X, Hu G, Saito Y, et al. 2022a. Did the modern Yellow River form at the mid-Pleistocene transition?[J]. Science Bulletin, 67(15): 1603-1610.
- Wang Y C, Lu H Y, Wang K X, et al. 2020. Combined high- and low-latitude forcing of East Asian monsoon precipitation variability in the Pliocene warm period[J]. Science Advances, 6(46): eabc2414.
- Wang Y Z, Li C P, Hao Y Q, et al. 2022b. Multi-stage growth in the north margin of the Qinling orogen, central China, revealed by both low-temperature thermochronology and river profile inversion[J]. Tectonics, 41(4): e2021TC007029.
- Wu F L, Fang X M, Ma Y Z, et al. 2007. Plio–Quaternary stepwise drying of Asia: Evidence from a 3-Ma pollen record from the Chinese Loess Plateau[J]. Earth and Planetary Science Letters, 257(1/2): 160-169.
- Xiao G Q, Pan Q, Zhao Q Y, et al. 2021. Early Pleistocene integration of the Yellow River II: Evidence from the plio-Pleistocene sedimentary record of the Fenwei Basin[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 577: 110550.
- Zhao G C, Cawood P A, Li S Z, et al. 2012. Amalgamation of the North China Craton: Key issues and discussion[J]. Precambrian Research, 222-223: 55-76.
- Zhao L, Lu H Y, Wang H L, et al. 2020. Vegetation dynamics in response to evolution of the Asian Monsoon in a warm world: Pollen evidence from the Weihe Basin, central China[J]. Global and Planetary Change, 193: 103269.

Surface Microstructures of Quartz Grains in the Lacustrine and Aeolian Sequences from the Weihe Basin and Its Implication for Sedimentary Environments

ZHANG Hang^{1,2}, CHANG Hong¹, RONG XiaoQing^{1,2}, LONG YiLi^{1,2}, ZHANG JianGuang^{1,2}, LIU Bo³, LIU XingXing¹, SUN YouBin¹

1. State Key Laboratory of Loess Science, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China

2. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Xi'an Institute for Innovative Earth Environment Research, Xi'an 710061, China

Abstract: [Objective] The continuous lacustrine and aeolian sedimentary sequence in the Weihe Basin provides an excellent archive for investigating the evolution of the East Asian monsoon. However, the processes and mechanisms underlying significant changes in sedimentary records since the late Pliocene remain unclear. [Methods] Based on Scanning electron microscope (SEM) analysis of quartz grain surface microstructures from different sedimentary intervals within a 1,386 m long continuous sediment core (WB1) retrieved from the eastern depocenter of the Weihe Basin, our results indicate that the basin has undergone four-phased evolution of the sedimentary environment since the late Pliocene. [Results] (1) At the bottom of core WB1 (1 386-880 m), the surfaces of quartz grains within the Youhe Formation are characterized by abundant siliceous precipitation, indicating a lacustrine sedimentary environment during the Pliocene. (2) In the lower Sanmen Formation (880-380

m), there is a significant increase in the Flat cleavage surfaces, reflecting enhanced hydrodynamic conditions in the basin during the Early Pleistocene. (3) Within the upper Qinchuan Group (380-60 m), quartz grains display particularly well-developed Flat cleavage surfaces along with medium- to large- conchoidal fractures, which indicate deposition under strong hydrodynamic transport conditions and are characteristic of a subaqueous distributary channel within the delta front subfacies. (4) The uppermost 60 meters of sediment contain quartz grains with surface features such as Crescentic percussion marks and dish-shaped depressions-distinctive structures of aeolian environments, indicating a transition to an aeolian-dominated sedimentary environment. **[Conclusions]** The surface microstructures of quartz grains in core WB1 sensitively record the evolution of the basin's sedimentary environment since the Late Pliocene, transitioning from a shallow lake to a lakeshore and subsequently the deltaic setting, ultimately the aeolian sedimentary environment dominated in the late Middle Pleistocene. The four-stage variations in the sedimentary environment of the Weihe Basin were primarily driven by the long-term evolution of the East Asian summer monsoon.

Key words: Weihe Basin, lacustrine and aeolian sediments, quartz grains, surface microstructures, sedimentary environment, East Asian monsoon

