第 28 卷　第 1 期
2026 年　2 月

古　地　理　学　报
JOURNAL OF PALAEOGEOGRAPHY（Chinese Edition）

Vol. 28　No. 1
Feb.　2026

文章编号：1671-1505(2026)01-0189-22　　**DOI**:10.7605/gdlxb.2025.093

鄂尔多斯盆地太原组陆表海多尺度混合沉积特征及沉积模式*

周　越[1,2]　冯强汉[3]　许淑梅[1,2,4]　王　涛[3]　侯云东[3]　雷　迅[3]　周　迅[3]
邓路佳[3]　张宝珠[1,2]　郭芮洁[1,2]　舒鹏程[1,2]　王曼茜[1,2]　刘政东[1,2]

1 中国海洋大学海洋地球科学学院，山东青岛 266100
2 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室，山东青岛 266100
3 中国石油长庆油田分公司，陕西西安 710021
4 海洋高等研究院/深海圈层与地球系统前沿中心，山东青岛 266100

摘　要　鄂尔多斯盆地二叠系太原组为陆表海背景下的含煤层海陆交互相混合沉积体系。当前对太原组混合沉积体系认识的不统一，对其混合特征及主控因素的不明确，限制了对致密石灰岩与致密砂岩等优质储集层的勘探与评价。基于对盆地东部太原组岩心、镜下薄片及野外剖面的系统观察，结合测井、录井等数据，深入分析了太原组旋回性、岩相及岩性特征；通过对多尺度混合沉积特征与样式的系统分析，厘清了其主控因素及主要形成过程，构建了混合沉积模式。研究区太原组为 1 个相对完整的三级旋回，可细分为 5 个四级旋回，经历了较完整的海侵—海退过程。四级旋回表现为海侵—高位体系域二元结构。海侵体系域以碳酸盐岩台地沉积为主，局部发育三角洲及障壁沙坝砂体；高位体系域则以潮坪及潟湖沉积为主。太原组发育 3 个尺度的混合沉积：旋回性混合为宏观尺度，主要受高频海平面变化及波动幅度控制，反映时间周期性变化对混合叠置样式的影响；同期异地相混合为中等尺度，受陆源碎屑供应、碳酸盐产率及沉积地貌等因素控制，反映空间环境差异对内外源沉积物分配的制约；组分混合为微观尺度，主要反映陆源碎屑供给、沉积水动力及物化条件对内外源沉积物组分分布的调控。太原组混合沉积具有多尺度发育、多因素协同作用、沉积环境动态演化的显著特征。

关键词　混合沉积　混合沉积模式　地层旋回性　陆表海　太原组　鄂尔多斯盆地

第一作者简介　周越，女，2000 年生，硕士研究生，主要从事沉积地质学的研究。E-mail：mialboxzoye@163.com。

通讯作者简介　许淑梅，女，1970 年生，教授，主要从事沉积学及盆地分析的教学和研究。E-mail：xsm@ouc.edu.cn。

中图分类号：P512.2　　**文献标志码**：A

Multiscale mixed sedimentary characteristics and depositional model in the Taiyuan Formation of epicontinental sea setting, Ordos Basin

ZHOU Yue[1,2]　FENG Qianghan[3]　XU Shumei[1,2,4]　WANG Tao[3]　HOU Yundong[3]　LEI Xun[3]　ZHOU Xun[3]
DENG Lujia[3]　ZHANG Baozhu[1,2]　GUO Ruijie[1,2]　SHU Pengcheng[1,2]　WANG Manxi[1,2]　LIU Zhengdong[1,2]

1 *College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Shandong Qingdao* 266100, *China*

* 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司科研技术攻关项目（编号：CQYT-CQTRQPI-2023-JS-2045）。[Financially supported by Research and Technology Key Project of the Changqing Oilfield Branch, China Petroleum & Natural Gas Corporation(No. CQYT-CQTRQPI-2023-JS-2045)]

收稿日期：2025-02-22　　改回日期：2025-06-20

2 *Key Laboratory of Seafloor Science and Detection Technology*, *Ministry of Education*, *Ocean University of China*, *Shandong Qingdao* 266100, *China*
3 *Changqing Oilfield Branch*, *China Petroleum Corporation* (*CNPC*), *Xi'an* 710021, *China*
4 *Institute for Advanced Ocean Studies/ Center for Deep Ocean Circulation and Earth System Frontiers*, *Shandong Qingdao* 266100, *China*

Abstract The Taiyuan Formation of Ordos Basin is a mixed depositional system of coal-bearing paralic facies developed under an epicontinental sea setting. Current inconsistencies in the understanding of its mixed depositional system, as well as unclear mixed characteristics and controlling factors, have constrained the exploration and evaluation of high-quality reservoirs such as tight limestones and tight sandstones. Based on systematic observations of cores, thin sections, and outcrops of the Taiyuan Formation in the eastern basin, combined with well logging and mud logging data, this study conducted an in-depth analysis of the cyclicity, lithofacies, and lithological characteristics of the Taiyuan Formation. Through a systematic examination of multiscale mixed depositional features and patterns, the main controlling factors and formation processes were clarified, and a mixed depositional model was established. The Taiyuan Formation in the study area constitutes a relatively complete third-order sequence, which can be subdivided into five fourth-order sequences, recording a relatively full transgressive-regressive cycle. The fourth-order sequences exhibit a binary structure of transgressive and highstand systems tracts. The transgressive systems tract is dominated by carbonate platform deposits, with local development of deltaic and barrier sandbar sand bodies, while the highstand systems tract is primarily composed of tidal flat and lagoon deposits. The Taiyuan Formation exhibits mixed deposition at three scales: Cyclic mixing at the macro-scale, primarily controlled by high-frequency sea-level fluctuations and their amplitudes, reflects the influence of temporal periodic changes on mixed stacking patterns; Contemporaneous heterotopic facies mixing at the meso-scale, governed by terrigenous clastic supply, carbonate productivity, and depositional topography, highlights the constraints of spatial environmental variations on the distribution of endogenic and exogenic sediments; and Component mixing at the micro-scale, mainly regulated by terrigenous clastic input, hydrodynamic conditions, and physicochemical factors, reflects the control on the distribution of mixed sedimentary components. The mixed deposition in the Taiyuan Formation is characterized by multiscale development, multi-factor synergy, and dynamic evolution of depositional environments.

Key words mixed sedimentation, mixed sedimentary model, stratigraphic cyclicity, epicontinental sea, Taiyuan Formation, Ordos Basin

About the first author ZHOU Yue, born in 2000, is a master degree candidate. She is mainly engaged in sedimentary geology research. E-mail: mialboxzoye@163.com.

About the corresponding author XU Shumei, born in 1970, is a professor. She is mainly engaged in the teaching and research of sedimentology and basin analysis. E-mail: xsm@ouc.edu.cn.

混合沉积是指陆源碎屑与碳酸盐（包括内源颗粒）沉积的混合，是陆源与内源沉积互为消长过程中的产物（张锦泉和叶红专，1989；江茂生和沙庆安，1995；沙庆安，2001）。Mount（1984）在总结了浅海陆架沉积体系的沉积特征后，首次提出了“混合沉积物”的概念，采用砂（陆源碎屑）、内源颗粒、灰泥和黏土四端元对混合沉积物进行分类，并将其划分为间断混合、相缘混合、原地混合和母源混合 4 种成因类型。杨朝青和沙庆安（1990）在对云南曲靖中泥盆统曲靖组海湾沉积的研究中提出了“混积岩”的概念，认为碳酸盐岩组分大于25%、陆源碎屑组分大于 10%的岩石可

称为混积岩。沙庆安（2001）及郭福生（2004）分析了浅海陆架、滨岸浅滩环境的研究实例，将混合沉积分为狭义和广义 2 类。狭义的混合沉积为混积岩，广义上的混合沉积为在垂向和侧向交替沉积所形成的混积层系（江茂生和沙庆安，1995；Chiarella *et al.*，2017）。董桂玉等（2007）在上述前人研究的基础上，提出了陆源碎屑与碳酸盐两端元混积岩分类方案。混积层系类型则可根据组分特征分为以陆源碎屑为主和以碳酸盐为主 2 类；根据混合沉积发育与演化特征，可划分为渐变式、突变式和复合式 3 类。混积层系的混合尺度和规模也有显著差别。杜学斌等（2020）在研究东营凹陷湖相细粒沉积过程中，基于天文旋回理论提出了四到七级层序内的多尺度的混积纹层，这对陆表海多尺度混合沉积特征研究具有重要借鉴作用。

目前，关于陆表海环境下混合沉积的研究主要集中于混积特征、混积相分析、主控因素及其与地层旋回耦合关系的探讨。陆表海沉积体系中，混合沉积主要在混积潮坪、潟湖、障壁岛及碳酸盐岩台地等沉积相发育（董桂玉等，2009；常嘉等，2021；曹岩刚等，2024；文祖超等，2024）。混合沉积的特征及混积样式受海平面升降、构造运动、气候条件、物源供应及水动力条件等多种因素的协同作用（张金亮和司学强，2007；董桂玉等，2009；赵灿等，2013；Schwarz *et al.*，2018；徐伟等，2019）。其多发育在旋回界面或体系域转化带附近，发育的强度及时间分布受相对海平面变化型式、古地貌、碳酸盐产率及陆源供给速率等多因素共同影响（李祥辉和曾允孚，1999；李祥辉，2008；郑荣才等，2010；刘桂珍等，2021）。在陆源供应充足时，碎屑滨岸一般发育灰质砂岩、灰质泥岩等混积岩，并常与薄层石灰岩互层构成以陆源碎屑主导的混积层系；而陆源碎屑供应不足时，在碳酸盐岩台地沉积区，灰质泥岩与泥质灰岩等混积岩常与厚层石灰岩构成以碳酸盐岩为主导的混积层系（孙娇鹏等，2014；曾楷等，2020；王红岩等，2023）。

鄂尔多斯盆地太原组为 1 套陆表海背景下含煤层海陆交互相混合沉积体系（郭书元等，2009）。受频繁的海平面波动、温暖湿润的气候条件以及相对稳定的沉积环境影响，太原组煤层广泛发育，并与碳酸盐岩、陆源碎屑岩交替叠置沉积，形成多期次的旋回性混合建造（王德发等，1986；李增学等，2002；高青松，2018）。太原组呈现“北砂南灰”的沉积分布特征，沉积相带呈纵向分异（郭艳琴等，2019；黄有根等，2024）。北部发育连续性较好的三角洲及连片分布的孤立状砂体（董国栋等，2023）。三角洲为浅水或潮汐三角洲，以三角洲前缘水下分流河道最为发育（席胜利等，2009）；对于孤立状砂体，其成因尚存在分歧，目前仍存在障壁岛、河口坝和远沙坝等多种成因解释（王付斌等，2007；兰朝利等，2011；郭军等，2012；郭艳琴等，2021）。南部以碳酸盐沉积为主，其沉积环境与成因亦存在碳酸盐岩潮坪、碳酸盐岩台地及浅海陆棚等多种观点（郭艳琴等，2019；崔宏俊等，2023；高星等，2023；杨晓利等，2025）。同时，太原组横纵向演化迅速及非均质性强等沉积特征，增加了其相带识别及成因分析的复杂性，混合沉积体系的精细研究仍面临较大挑战。

随着对天然气成藏条件的深入认识，太原组致密石灰岩和致密砂岩显示出良好的含气性，成为致密气、煤成气等重要的勘探领域。然而当前对太原组混合沉积体系认识的不统一，对混合沉积的混合样式、规模及级次缺乏系统分析，对导致多尺度混合沉积的主导性因素不明确，严重制约了对致密石灰岩和致密砂岩等优质储集层成因的深入认识。基于对鄂尔多斯盆地东部太原组岩心观察、薄片鉴定及测井资料的分析，结合野外剖面地质调查，通过对地层旋回、岩相及岩性多规模混合沉积的深入研究，系统的阐述了太原组多尺度混合沉积特征及主要形成过程，探讨了其主控因素，构建了太原组混合沉积模式。该研究对深入认识混合沉积成因、预测有利储集层发育区及指导油气勘探开发具有重要意义。

1　区域地质背景

鄂尔多斯盆地位于华北板块西部，是 1 个稳定沉降、扭动明显的多旋回叠合盆地。其演化经历了中晚元古代拗拉谷、早古生代浅海台地、晚古生代近海平原、中生代内陆湖盆和新生代周边断陷 5 个沉积阶段（何自新等，2003；付金华等，2021）。盆地晚古生代构造演化和华北地台相一致，与兴蒙海槽和秦祁海槽的构造活动密切相关。晚石炭世末，华北板块南北两侧的相向俯冲导致了板块内部的翘板式运动，鄂尔多斯盆地的古构造格局由

“南隆北倾”转化为“北隆南倾”(陈世悦，1998)。下二叠统太原组沉积期，鄂尔多斯盆地进入稳定沉降阶段，海水自东南方向侵入，越过中央古隆起与西部海域汇合，形成统一的陆表海（郭英海等，1998；李文厚等，2021)。该时期盆地位于北半球赤道附近，处于晚古生代冰期—间冰期的气候转变期。气候温暖潮湿，沉积环境呈现由氧化—还原到还原的过渡特征(赵剑，2021；Peng *et al.*, 2023)，地形平缓，水体浅且风暴作用频繁（胡斌等，2014；宋慧波等，2024)。受大陆冰川作用影响，盆地石炭纪—二叠纪期间既存在多次大幅的海平面下降，也发育高频低幅的海平面变化，形成了广泛分布的旋回性沉积（严雅娟等，2015；武思琴等，2016；杨江海等，2017)。太原组旋回呈现显著的韵律性与结构相似性，其纵向演化迅速，石灰岩常直接覆于煤层之上，呈突变特征。陆源碎屑主要来自于北部阴山地区，其汇聚于盆地东南部相对凹陷区，形成以内源为主、陆源为辅的海陆交互相混合沉积体系（郭英海等，1998；黄有根等，2024)。

研究区位于鄂尔多斯盆地东部区域中心地带，地处伊陕斜坡构造单元(图 1-a)，东缘与晋西挠褶带相接。研究目地层为上古生界下二叠统太原组(图 1-b)。太原组自下而上可分为庙沟段、毛儿沟段、斜道段及东大窑段，共发育 4 套石灰岩、3 套砂岩，整体代表了 1 个海进—海退过程。斜道段、毛儿沟段石灰岩厚度大、分布面积广，代表了海侵范围较大的高海平面时期。太原组顶界为山西组北岔沟砂岩底部的侵蚀面，东大窑段常遭受冲刷侵蚀，导致顶部泥岩层的缺失。底界为本溪组 8# 煤层顶部的构造体制转换面，为古构造格局变化及

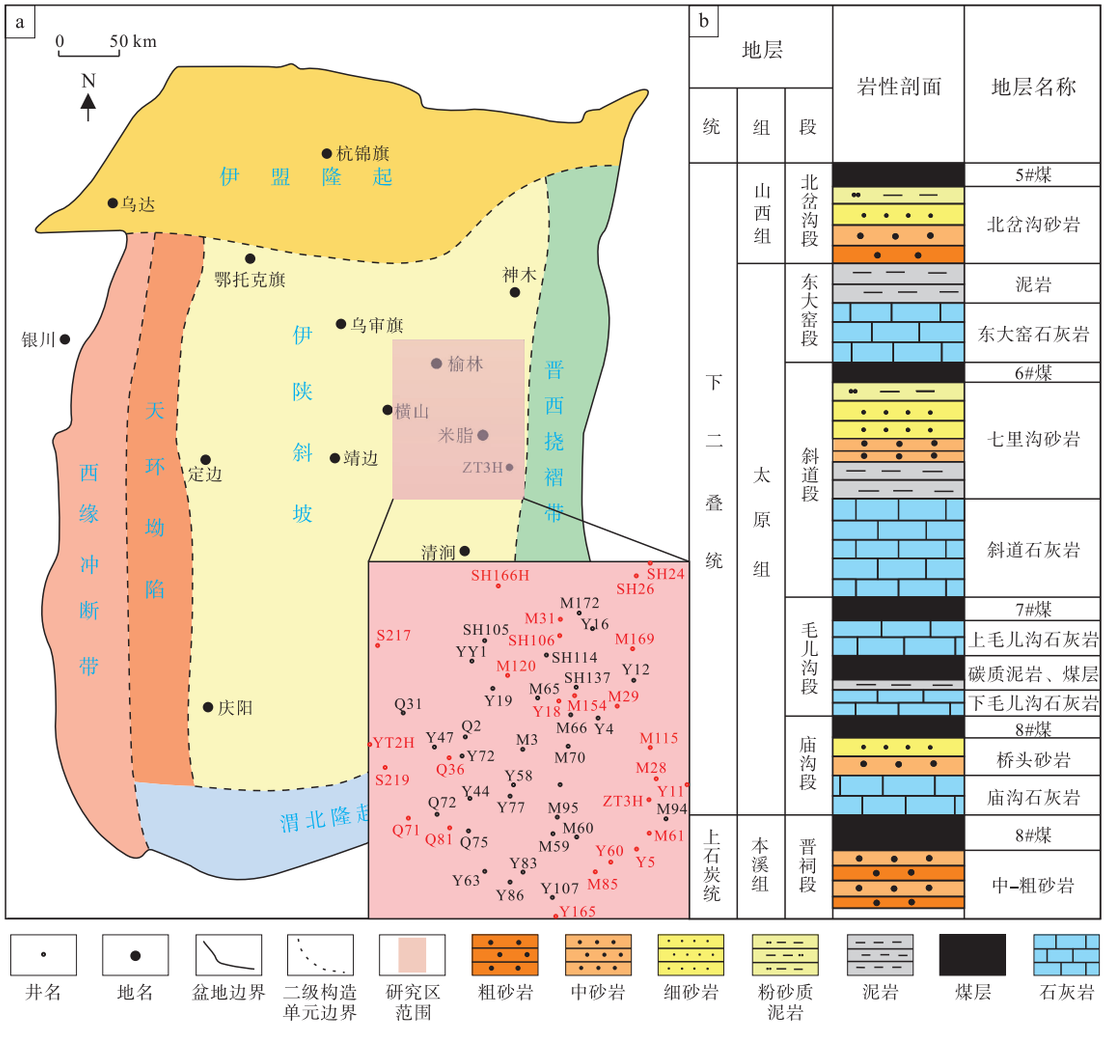


图 1 鄂尔多斯盆地东部地区构造位置（a）及地层综合柱状图（b）（据刘新社等，2023；有修改）

Fig. 1 Tectonic position (a) in eastern Ordos Basin and the stratigraphic composite column (b) (modified from Liu *et al.*, 2023)

大规模海退而形成的界面（沈玉林等，2009；郭艳琴等，2021；刘新社等，2023）。

2　混积相及旋回性分析

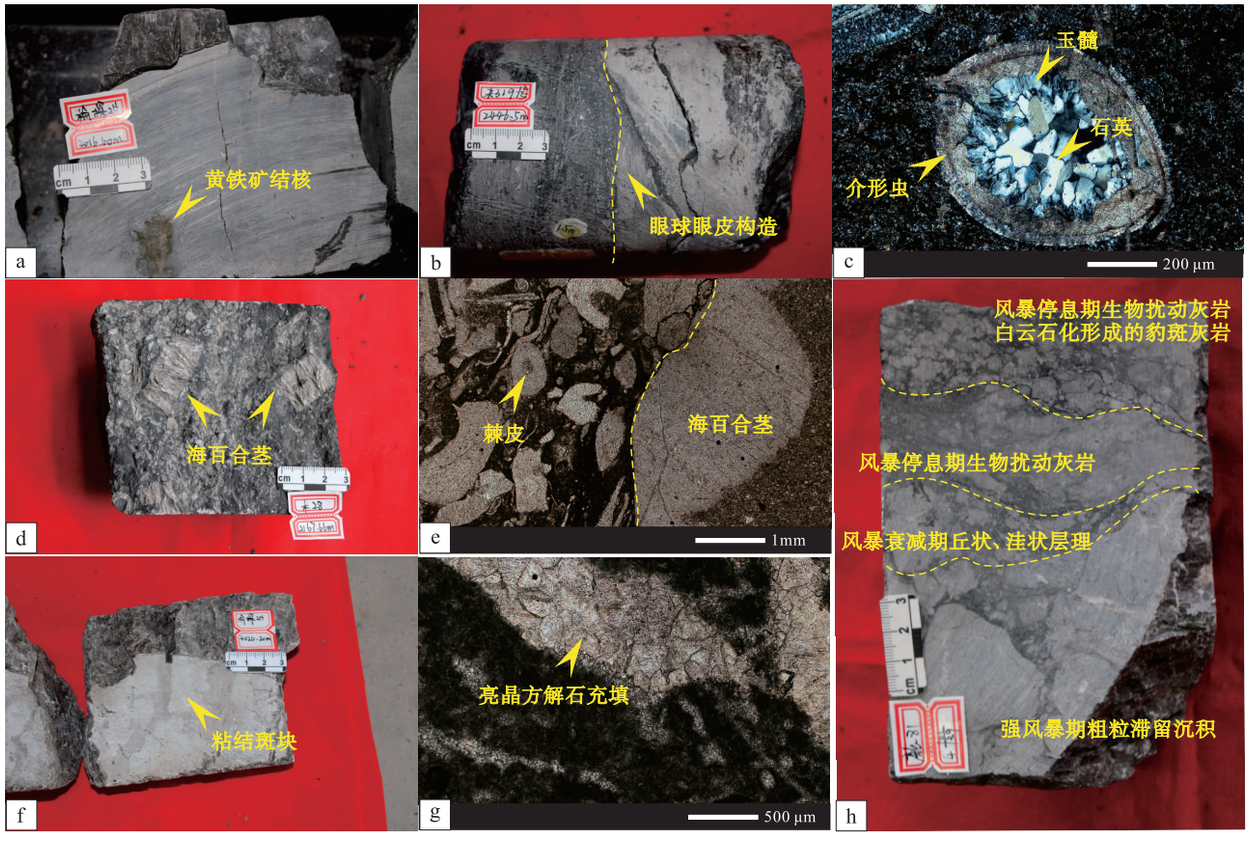
2.1　岩性特征

鄂尔多斯盆地下二叠统太原组发育典型的陆表海海陆交互相混合沉积体系（郭书元等，2009），其岩石类型多样、结构复杂，常见陆源碎屑与碳酸盐组分混合沉积而形成的混积岩。基于对研究区太原组岩心及镜下薄片的系统观察与分析，将其岩石划分为碳酸盐岩、碎屑岩和混积岩 3 大类，并进一步识别出 15 种岩石类型。

2.1.1　碳酸盐岩

鄂尔多斯盆地碳酸盐岩主要发育于碳酸盐岩台地沉积体系中的局限台地、开阔台地及局部潟湖的清水沉积区。主要识别出泥晶灰岩、（含）生屑泥晶灰岩、泥晶生屑灰岩、粘结岩和风暴角砾灰岩 5 种碳酸盐岩，不发育或极少发育亮晶灰岩。

泥晶灰岩呈灰至深灰色，块状构造，性脆，裂缝发育，偶见生物碎屑（<5%）（图 2-a）。（含）生屑泥晶灰岩生屑含量为 10%~50%，呈灰至深灰色，具有块状或眼球眼皮构造，常与泥质灰岩/灰质泥岩互层，局部发育泥质纹层，生屑在纹层处富集、定向排列（图 2-b），生屑多由亮晶方解石充填，部分为硅质或白云质充填，存在多世代胶结现象（图 2-c）。泥晶生屑灰岩主要成分为生物碎屑，呈灰至深灰色，块状构造，断面粗糙，逆粒序层理，颗粒支撑（图 2-d），富含生物碎屑，常见介形虫、海百合茎、棘皮类等，被亮晶方解石交代



a—YT2H 井，3016.60 m，泥晶灰岩，见直径 2 cm 的黄铁矿结核，富含有机质，开阔台地；b—M31 井，2446.50 m，生屑泥晶灰岩，眼球眼皮状构造，开阔台地；c—Q36 井，2790.89 m，生屑泥晶灰岩（+），介形虫中存在多世代交代，开阔台地；d—M28 井，2168.20 m，泥晶生屑灰岩，见直径 2 cm 的海百合茎，颗粒滩；e—M28 井，2168.00 m，泥晶生屑灰岩（-），见海百合茎、棘皮类等生物，颗粒滩；f—YT2H 井，3026.20 m，粘结岩，见粘结斑块，生物丘；g—YT2H 井，3026.20 m，粘结岩（-），亮晶方解石交代充填，生物丘；h—Q81 井，2754.75 m，风暴角砾灰岩，见明显的风暴作用序列，开阔台地

图 2　鄂尔多斯盆地东部太原组碳酸盐岩岩心及镜下特征

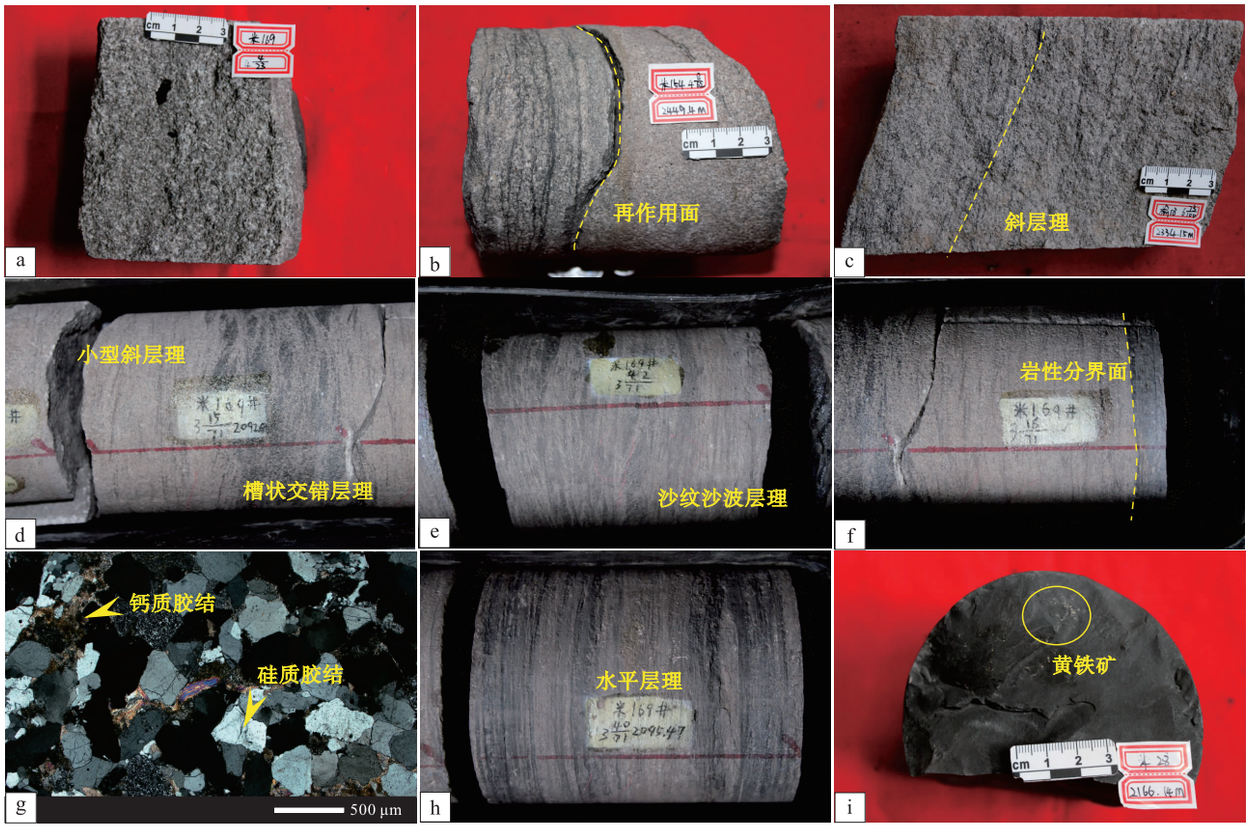
Fig. 2　Core and microscopic characteristics of carbonate rocks of the Taiyuan Formation in eastern Ordos Basin

(图 2-e)。粘结岩由多种藻类粘结形成，为原地生物灰岩，呈浅灰至灰棕色，块状构造，局部具有斑块状结构(图 2-f)，可见被大颗粒亮晶方解石交代(图 2-g)。风暴角砾灰岩受风暴作用影响而形成，呈浅灰至灰色，角砾状结构明显，局部可见压溶缝合线，岩心上常见明显的风暴沉积序列(图 2-h)。

2.1.2 碎屑岩

鄂尔多斯盆地碎屑岩主要分布于北部三角洲及滨岸沉积体系，在三角洲平原、三角洲前缘、潮坪、潟湖及障壁沙坝等沉积环境发育。研究区陆源碎屑岩整体粒度较细，仅在三角洲和障壁沙坝沉积区发育中—粗砂岩。碎屑岩亦夹杂灰质组分，局部泥岩可见石灰岩角砾，部分中、粗砂岩灰质以钙质胶结形式存在。研究区主要识别出含砾砂岩、砂岩、粉砂岩、泥岩等碎屑岩及煤层。

含砾砂岩主要为含砾粗砂岩，岩心上多呈灰色块状(图 3-a)，底部见冲刷构造，发育正粒序层理。砂岩可细分为粗砂岩、(泥质)中砂岩、(泥质)细砂岩等，局部再作用面发育(图 3-b)，可见典型的斜层理(图 3-c)、槽状交错层理(图 3-d)、沙纹沙波层理及岩性分界面等(图 3-e，3-f)，镜下可见钙质、硅质胶结(图 3-g)。粉砂岩通常为泥质粉砂岩，常具水平层理(图 3-h)，粉砂质与泥质互层明显。泥岩可细分为粉砂质泥岩和碳质泥岩，泥岩性脆，一般呈片理状，可见植物碎片，局部存在黄铁矿等次生矿物(图 3-i)；碳质泥岩质轻污手，是泥岩向煤层过渡的岩性。研究区



a—M169 井，2099.50 m，含砾粗砂岩，三角洲平原水上分流河道；b—M154 井，2449.40 m，中—粗砂岩，见再作用面，该界面上下层理角度发生明显变化，潮道；c—Y18 井，2334.15 m，中砂岩（岩心照片），斜层理，障壁沙坝；d—M169 井，2092.64 m，中细砂岩，见小型斜层理和槽状交错层理，三角洲前缘河口坝；e—M169 井，2095.70 m，泥质细砂岩（岩心照片），沙波沙纹层理发育，三角洲前缘河口坝；f—M169 井，2092.84 m，中细砂岩，小型沙纹沙波层理发育，见岩性分界面，三角洲前缘河口坝；g—M154 井，2451.00 m，中粗砂岩(+)，见钙质、硅质胶结，障壁沙坝；h—M169 井，2095.47 m，泥质粉砂岩，水平层理，三角洲前缘席状砂；i—M28 井，2166.14 m，泥岩，见黄铁矿，潟湖

图 3 鄂尔多斯盆地东部太原组碎屑岩岩心及镜下特征

Fig. 3 Core and microscopic characteristics of clastic rocks of the Taiyuan Formation in eastern Ordos Basin

泥炭沼泽聚集，煤层普遍发育，岩心上表现为黑色块状，密度小，轻易污手，局部可见植物化石碎片。

2.1.3　混积岩

鄂尔多斯盆地太原组受冰期—间冰期海平面频繁升降控制，广泛发育由陆源碎屑与碳酸盐混合沉积形成的混积岩，主要分布于潮坪、潟湖、碳酸盐岩台地等沉积相。研究区太原组发育 2 类典型的混积岩：一类以碳酸盐组分为主，表现为石英颗粒与泥质组分均匀分散于泥晶方解石基质中；另一类以陆源碎屑组分为主，主要表现为碎屑岩中夹杂灰质，或灰质以钙质胶结的形式赋存于砂体中。基于董桂玉等（2007）提出的陆源碎屑和碳酸盐两端元分类命名方案（表 1），在研究区共识别出（含泥）粉砂质灰岩、含泥/泥质灰岩、含泥/泥质生屑泥晶灰岩、灰质泥岩/含灰砾泥岩、灰质砂岩等 5 类混积岩。

（含泥）粉砂质灰岩主要由泥晶方解石组成，粉砂质小于 50%。在岩心上呈灰—深灰色，块状构造，自然断面粗糙，局部可见泥砾混杂，偶见生物碎屑（图 5-a）；镜下呈灰棕色，泥晶方解石中漂浮有石英或岩屑颗粒（图 5-b）。含泥/泥质灰岩主要成分为泥晶方解石，泥质含量小于 50%，在岩心上呈灰—深灰色，生物碎屑（<10%）常富集于泥质纹层附近（图 5-c）；部分岩心石灰岩角砾明显，角砾间泥质充填（图 5-d）；在镜下呈灰棕色，泥质含量较高，偶见生物碎屑，角砾边界明显，呈条带状，泥质充填（图 5-e）。含泥/泥质生屑泥晶灰岩主要由泥晶方解石组成，生物碎屑和泥质小于 50%；岩心呈深灰色，生物碎屑呈点状分布（图 5-f），大部分已被亮晶方解石充填；在镜下岩石呈灰棕—黑色，棘皮、三叶虫等生物碎屑漂浮于泥晶方解石中，泥质组分多（图 5-g）。灰质泥岩/含灰砾泥岩主要成分为泥质，灰质含量小于 50%；在岩心上呈深灰—黑色，颜色随泥质含量增加而变深。含灰砾泥岩指含石灰岩角砾的泥岩，在岩心上可见明显的石灰岩角砾漂浮于泥岩基质中，角砾边界明显。灰质砂岩主要组分为石英颗粒，灰质含量小于 50%，见部分岩屑。研究区常见灰质中、细砂岩，在岩心上呈浅灰—灰棕色，常见大型斜层理（图 4-i）、潮汐层理（图 5-h）、沙波沙纹层理等（图 4-e），部分岩心可见泥质条带或泥砾（图 5-h）。在镜下为颗粒支撑，泥晶方解石以钙质胶结物的形式存在，局部存在硅质胶结（图 5-i）。

2.2　混积相分析

鄂尔多斯盆地下二叠统太原组沉积体系具有明显的南北分异特征（郭艳琴等，2019；黄有根等，2024），北部主要发育三角洲沉积，南部主要为海相碳酸盐岩台地沉积，两者之间的过渡带发育障壁沙坝及受其围限影响形成的潟湖沉积，构成典型的局限陆表海海陆交互相混合沉积体系（表 2）。

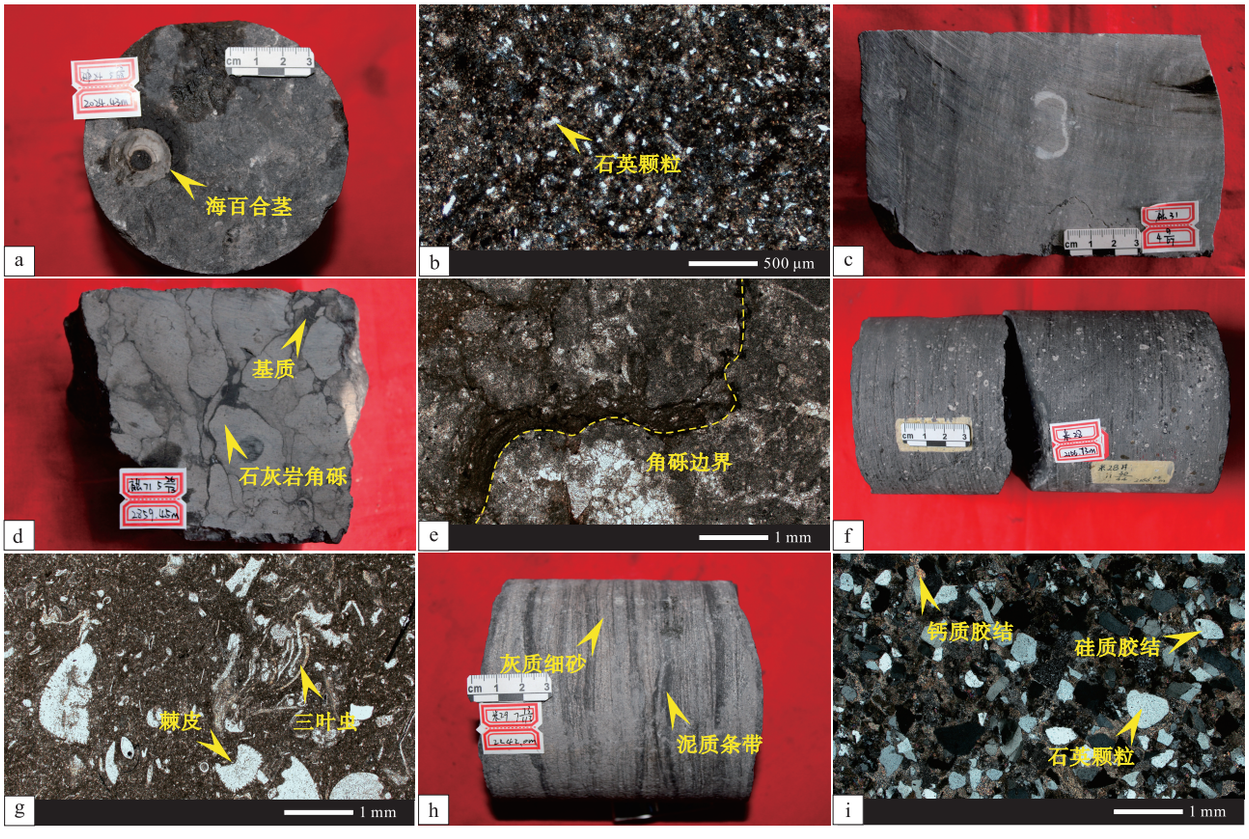
碳酸盐岩台地包括局限台地及开阔台地。局限台地海水循环受限，水动力较弱，岩性主要为泥质灰岩、含泥/泥质生屑泥晶灰岩等，通常呈块状，泥质组分较多，受陆源碎屑影响显著。开阔台地为水体循环良好的开阔水域，主要发育生物丘、颗粒滩、丘/滩间海等微相。生物丘为各种藻类及微生物原地粘结形成，岩性主要为粘结岩，通常呈块状，发育藻纹层结构及粘结斑块等（图 2-f）；颗粒滩形成于较强水动力环境，以异地搬运的生屑堆积为主，主要发育中—厚层块状生屑泥晶灰岩和泥晶生屑灰岩，生屑含量高（图 2-d）；丘/滩间海以大套泥晶灰岩为主，富含有机质，沉积厚度较大。研究区碳酸盐岩台地受风暴作用影响显著，常见风暴角砾灰岩，发育典型的风暴沉积序列（图 2-h）。厚层石灰岩中常见泥质灰岩/灰质泥岩夹层，生物碎屑在此处富集，定向排列，岩心上呈眼球眼皮状

表 1　组分混积岩分类命名方案（据董桂玉等，2007；有修改）

Table 1　Classification scheme of component-mixed rocks (modified from Dong *et al.*, 2007)

主要组分	碳酸盐/陆源碎屑含量/%	分类名称	举例
以碳酸盐为主	0<LS< 25	含陆源碎屑碳酸盐岩	含泥灰岩、含泥生屑泥晶灰岩
	25<LS< 50	陆源碎屑质碳酸盐岩	粉砂质灰岩、泥质灰岩
以陆源碎屑为主	0<TS< 25	含碳酸盐陆源碎屑岩	含灰泥岩、含灰砾泥岩
	25<TS< 50	碳酸盐质陆源碎屑岩	灰质砂岩、灰质泥岩

注：TS 代表碳酸盐，LS 代表陆源碎屑。



a—SH24 井，2024.43 m，粉砂质灰岩，见直径 2 cm 的海百合茎，潮间带混合坪；b—YT2H 井，3018.80 m，含泥粉砂质灰岩(+)，石英颗粒分布于泥晶方解石中，潮间带混合坪；c—Q31 井，2895.20 m，泥质灰岩，局限台地；d—Q71 井，2859.45 m，角砾状泥质灰岩，开阔台地；e—Q71 井，2850.10 m，角砾状泥质灰岩(-)，角砾边界明显，开阔台地；f—M28 井，2166.73 m，含泥生屑泥晶灰岩，生物碎屑点状分布，潟湖；g—M28 井，2166.73 m，含泥生屑泥晶灰岩(-)，见棘皮、三叶虫等生物，局限台地；h—M29 井，2242.00 m，泥质灰质粉细砂岩，潮汐韵律层理，可见双黏土层，见泥质条带，潮间带混合坪；i—SH26 井，2125.45 m，泥质灰质中砂岩 (+)，钙质胶结为主，局部存在硅质胶结，三角洲前缘河口坝

图 4 鄂尔多斯盆地东部太原组混积岩岩心及镜下特征

Fig. 4 Core and microscopic characteristics of mixed rocks of the Taiyuan Formation in eastern Ordos Basin

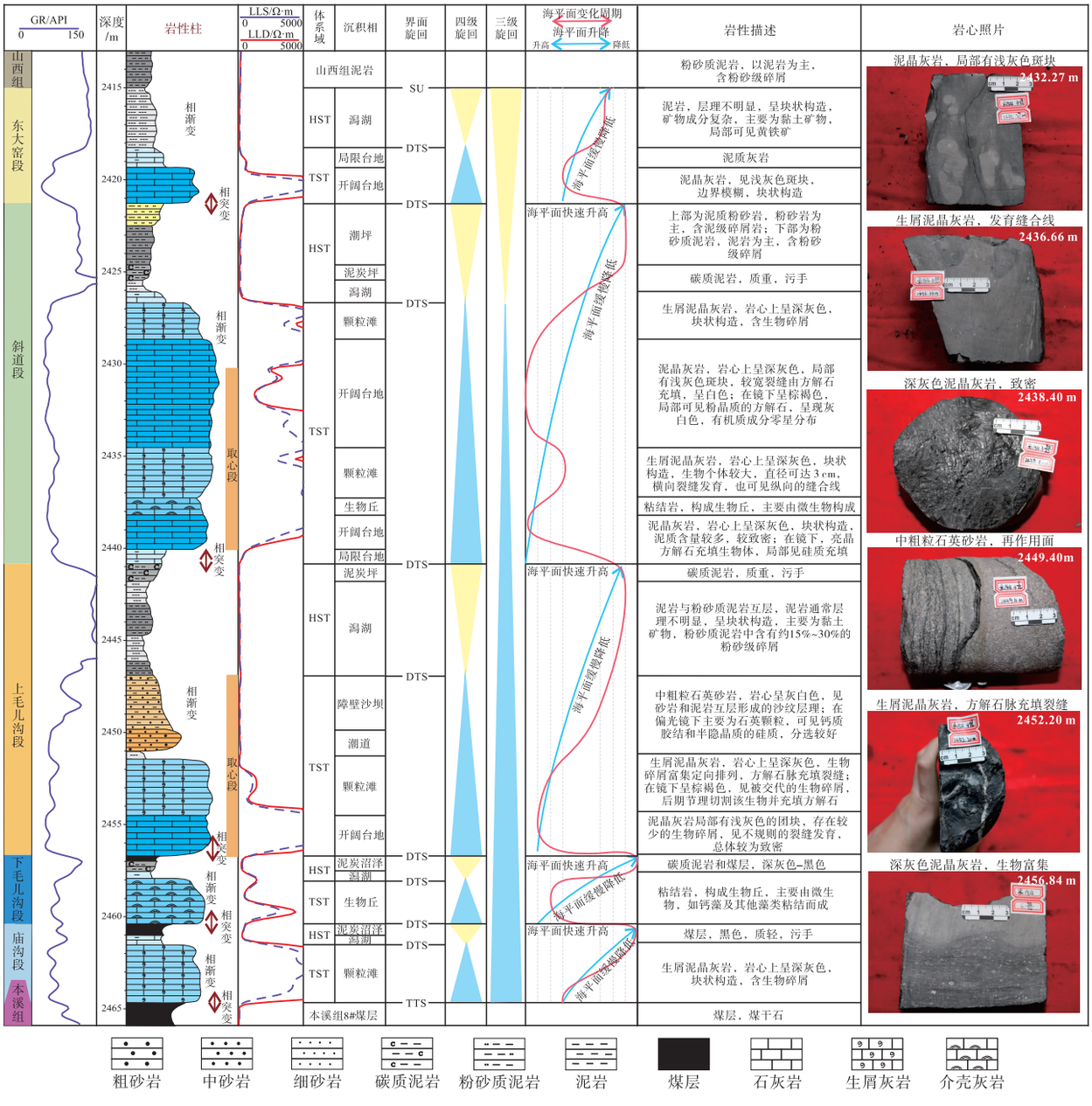
构造(图 2-b)。台地相石灰岩常与障壁砂体及潟湖相灰质泥岩、泥质灰岩伴生发育。

障壁沙坝发育于高能环境，其岩性以中、细砂岩为主，成分成熟度和结构成熟度都很高，分选好，灰质常以钙质胶结物的形式赋存于砂体中，常见楔形、板状层理及大型斜层理(图 3-c)。局部潮汐水道发育，岩性以中—粗砂岩为主，见底冲刷或再作用面(图 3-b)，正粒序，向上过渡为障壁沙坝沉积。障壁砂体常与潟湖相灰质泥岩、泥质灰岩及台地相厚层石灰岩伴生发育。

潟湖为低水动力沉积区，其岩性以厚层暗色泥岩和灰质泥岩为主，局部泥炭化可形成碳质泥岩甚至煤层。在弱陆源输入区可沉积薄层泥质灰岩，通常呈深灰色块状，泥质含量高，见少量生物碎屑，生物扰动构造发育。潟湖整体处于还原环境中，富含有机质，可见黄铁矿、菱铁矿等自生矿物(图 3-i)，灰泥混杂现象明显。潟湖相灰质泥岩、泥质灰岩常与障壁砂体、台地相厚层石灰岩伴生发育。

潮坪可分为潮上带及潮间带亚相。潮上带主要发育泥炭沼泽或泥炭坪沉积，岩性为煤层、泥岩、碳质泥岩等，局部可见炭屑、铁质结核及植物化石碎片。潮间带主要发育混合坪，岩性主要为泥岩、泥质粉砂岩等，以互层形式存在，潮汐韵律层理发育(图 4-h)。在弱陆源输入区可见粉砂质灰岩、灰质粉砂岩等混积岩沉积。潮坪相泥岩、泥质粉砂岩常与潟湖相灰质泥岩、泥质灰岩伴生发育。

三角洲可分为三角洲平原及三角洲前缘亚相。



注：SU 代表侵蚀面，TTS 代表构造体制转换面，DTS 代表沉积作用转换面

图 5　鄂尔多斯盆地 M154 井单井旋回划分及沉积相分析综合柱状图

Fig. 5　Comprehensive lithologic column of cyclostratigraphic division and depositional facies analysis for Well M154 in eastern Ordos Basin

三角洲平原主要包括泥炭沼泽及水上分流河道微相。泥炭沼泽主要发育碳质泥岩及煤层；水上分流河道主要发育含砾粗砂岩至细砂岩，砂体粒度粗，分选差，发育底冲刷构造，正粒序，见炭屑、铁质结核等。三角洲前缘主要发育水下分流河道、支流间湾及河口坝微相，岩性主要为细砂岩、粉砂岩，呈灰色中—厚层状，发育钙质、硅质胶结。水下分流河道微相发育波状层理以及底冲刷构造，支流间湾微相可见水平层理(图 3-h)、透镜状层理等。河口坝微相可见槽状交错层理及沙纹沙波层理(图 3-d，3-e) 等，局部岩性分界面明显(图 3-f)。三角洲前缘砂体常直接覆盖于潟湖相泥岩、泥质灰岩之上。

2.3　旋回性分析

下二叠统太原组沉积期，鄂尔多斯盆地处于陆

表 2 鄂尔多斯盆地东部太原组混积相单元划分

Table 2 Classification of mixed sedimentary facies units of the Taiyuan Formation in eastern Ordos Basin

沉积体系	相	亚相	微相	主要岩性	相标志	混合沉积特征
碳酸盐岩台地沉积体系	碳酸盐岩台地	局限台地、开阔台地	生物丘、颗粒滩、丘/滩间海	泥晶灰岩、生屑泥晶灰岩、泥晶生屑灰岩、粘结岩	藻纹层结构、粘结斑块、眼球眼皮状构造、水平层理、波状层理	发育含泥/泥质生屑泥晶灰岩、泥质灰岩、灰质泥岩等混积岩，泥质灰岩/灰质泥岩常以薄层形式夹于厚层石灰岩
碎屑滨岸沉积体系	障壁沙坝	/	/	(泥质)中砂岩、(泥质)细砂岩	大型斜层理、板状/楔状层理	发育灰质中、细砂等混积岩，灰质以钙质胶结的形式赋存于砂体中
	潟湖	/	/	泥岩、灰质泥岩、泥质灰岩	水平纹层、灰泥混杂、黄铁矿/菱铁矿等自生矿物	发育灰质泥岩、泥质灰岩等混积岩，泥质灰岩呈薄层产出
	潮坪	潮上带	泥炭沼泽、泥炭坪	煤层、碳质泥岩	炭屑、铁质结核、植物化石碎片	混合沉积现象不明显
		潮间带	混合坪	泥岩、泥质粉砂岩	潮汐韵律层理、平行层理、双黏土层	发育灰质粉砂岩、粉砂质灰岩等混积岩
三角洲沉积体系	三角洲	三角洲平原	水上分流河道、泥炭沼泽	含砾砂岩、砂岩、泥岩、碳质泥岩、煤层	底刷面、槽状交错层理、正粒序、炭屑、铁质结核	混合沉积现象不明显
		三角洲前缘	水下分流河道、支流间湾、河口坝	细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩	底冲刷、波状层理、水平层理、透镜状层理、沙波沙纹层理、槽状交错层理	发育灰质粉砂、细砂等混积岩

表海沉积环境，受冰期—间冰期海平面高频波动的控制，地层旋回性特征显著。太原组可识别出 1 个较完整的三级旋回，可进一步划分为 5 个四级旋回，自下而上分别对应庙沟段、下毛儿沟段、上毛儿沟段、斜道段及东大窑段(图 5)。

太原组旋回结构清晰，受高频低幅的海平面变化控制，整体表现为在快速海侵与缓慢海退的背景下形成的海侵体系域和高位体系域二元结构(图 5)。在快速、不连续的海侵过程中形成碳酸盐沉积，在缓慢海退过程中逐渐过渡成滨岸及三角洲陆源碎屑沉积，最终演替为潮坪或泥炭沼泽环境发生泥炭堆积。四级旋回的沉积厚度较小，一般在几米至 20 m 之间，反映了盆地基底沉降缓慢、可容空间有限的稳定沉积环境。四级旋回的结构特征基本一致，主要表现为石灰岩—碎屑岩—碳质泥岩/煤层。具体而言，下部海侵体系域主要由泥晶灰岩、生屑泥晶灰岩、粘结岩等碳酸盐岩组成，代表了由颗粒滩、生物丘、丘/滩间海等微相组成的局限台地和开阔台地沉积，局部区域还存在三角洲及障壁沙坝砂体；上部高位体系域主要由泥岩、泥质灰岩、碳质泥岩及煤层构成，代表了潮上带泥炭沼泽、泥炭坪和潮间带混合坪等微相组成的潮坪及潟湖沉积(图 5)。

太原组底界为本溪组 8#煤层顶部的构造体制转换面，顶界为山西组北岔沟砂岩底部的区域性侵蚀面。太原组可划分为 5 个四级旋回，其分界面表现为海侵、海退转换形成的沉积作用转换面。界面之下以陆源碎屑沉积为主，界面之上则迅速过渡为碳酸盐沉积，常见厚层海相石灰岩直接覆于煤层之上，体现了太原组海侵的突发性。在四级旋回内部，海侵及高位体系域的分界面为海侵向海退阶段转变的沉积作用转换面，通常对应于海平面达到峰值后开始下降的关键沉积时期。基于上述旋回界面特征及体系域划分方案，建立了鄂尔多斯盆地东部太原组旋回对比格架(图 6)。太原组海侵初期，庙沟段石灰岩首先沉积于地貌低位，沉积范围相对局限，沉积厚度薄。随着海侵规模的扩大，毛儿沟段的石灰岩沉积范围向西北方向扩大，旋回厚度逐渐增加。石灰岩沉积范围与厚度在斜道段达到最大，标志着该阶段达到最大海侵期。随后海平面开始下降，至东大窑段，沉积环境大规模由海相转为陆相，仅在局部低洼区域保留海相石灰岩沉积，厚度较薄。

除构建旋回格架外，对鄂尔多斯盆地太原组野外地质剖面的考察，也有助于深入理解太原组的旋回性及各旋回的沉积组成。位于鄂尔多斯盆地东南缘山西临县招贤镇的剖面自下而上发育了 5 个旋回(图 7)，每个旋回的下部主要由厚层泥晶灰岩、生

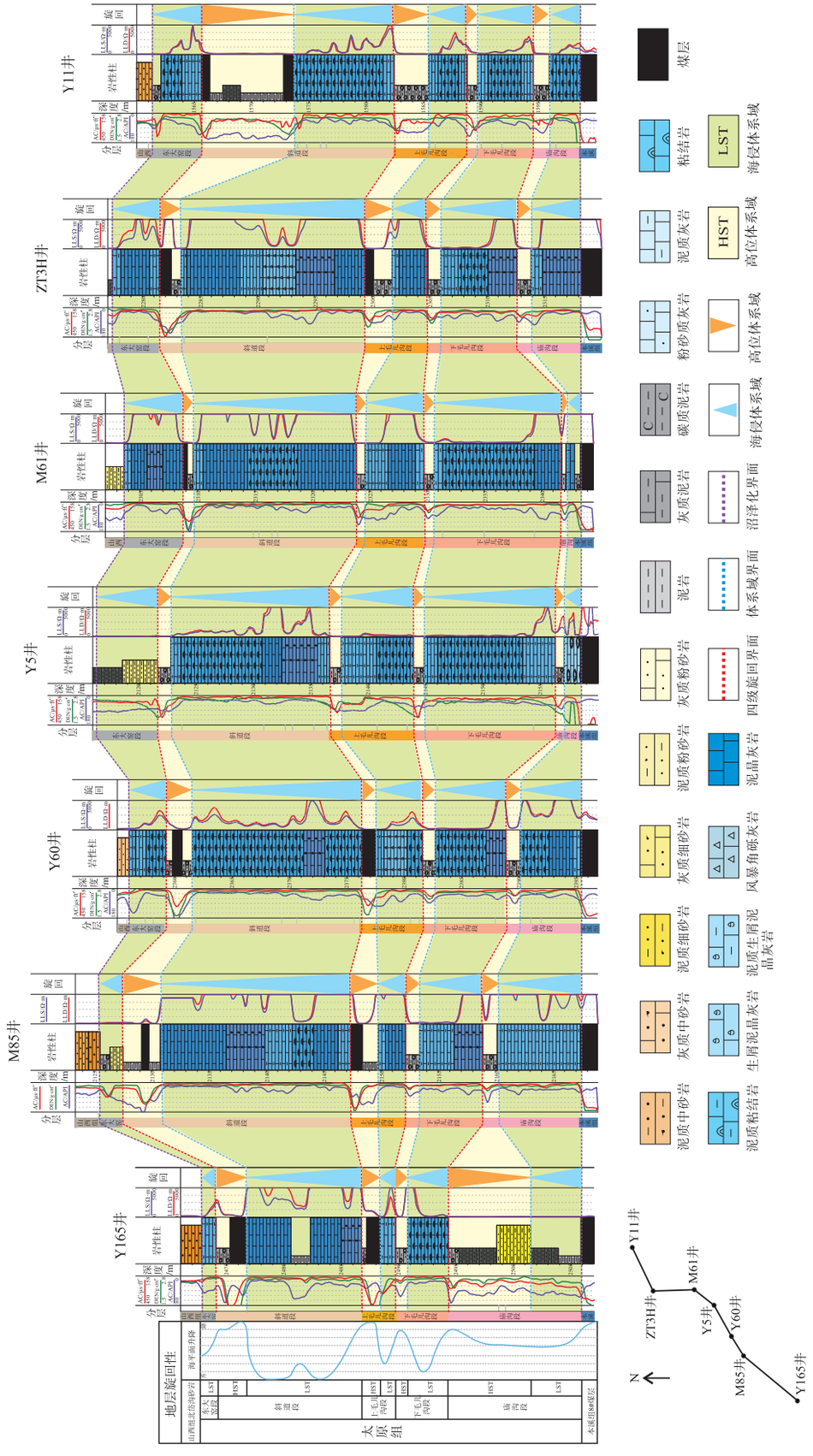


图 6　鄂尔多斯盆地东部太原组旋回对比格架

Fig. 6　Cyclostratigraphic correlation framework of the Taiyuan Formation in eastern Ordos Basin

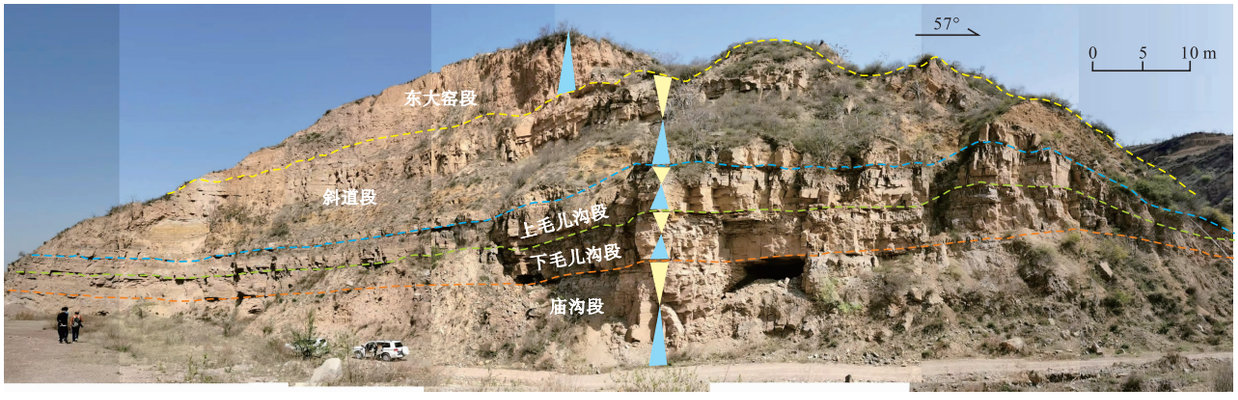


图 7 山西临县招贤镇太原组野外剖面及地层旋回划分

Fig. 7 Field outcrop and stratigraphic cyclicity division of the Taiyuan Formation of Zhaoxian Town, Linxian County, Shanxi Province

屑泥晶灰岩、粘结岩等台地相碳酸盐沉积组成，上部则以粉砂岩、泥岩、碳质泥岩及煤层等滨岸碎屑沉积为主。该野外剖面的地层旋回结构稳定，四级层序界面特征相似，其旋回特征与连井地层旋回对比格架高度吻合(图 6)，进一步验证了旋回划分和对比的可靠性，为区域地层的旋回性研究提供了有力的野外证据。

3 多尺度混合沉积特征及主控因素

鄂尔多斯盆地东部太原组混合沉积有在时间上受高频海侵—海退周期波动形成的由碳酸盐岩台地到碎屑滨岸至泥炭沼泽演化的旋回性混合；有在空间上受沉积相分布制约的碎屑岩与碳酸盐岩同期沉积形成的同期异地相混合；还有内源和陆源沉积物在沉积期受水动力作用形成的碳酸盐与陆源碎屑组分混合，即混积岩。

3.1 旋回性混合

旋回性混合指在地层旋回尺度上，沉积体系由内源碳酸盐沉积逐渐向陆源碎屑沉积转变，最终演化为浅水潮坪或泥炭沼泽的混合沉积。这是局限陆表海盆地受高频海平面波动影响下的典型混合样式。基于对岩心及测井录井资料的综合分析，结合岩相及地层旋回性研究，在研究区共识别出受相对海平面波动幅度、海侵范围和速度等制约的 4 类不同的旋回性混合样式(图 8)：

1) 碳酸盐岩台地—潟湖—泥炭沼泽混合(图 8-a)。该混积样式的底部边界为局限台地泥质灰岩，顶部边界为泥炭沼泽发育的薄煤层。下部海侵体系域主要由局限/开阔台地泥晶灰岩构成，局部厚层石灰岩可能存在泥岩夹层。受风暴作用影响，风暴角砾灰岩常见，有时可见明显的风暴序列；上部高位体系域主要由潟湖及泥炭沼泽构成，岩性以泥质灰岩、灰质泥岩及煤层为主。该混积样式主要分布于庙沟及东大窑段的低海平面沉积期，海平面上升幅度小，海侵范围局限，盆地可容空间有限，内源碳酸盐产率低，陆源碎屑供应不足，缺乏碎屑滨岸沉积，沉积速率较慢，地层较薄。台地相碳酸盐岩到潟湖相泥岩及薄煤层的叠置沉积反映了低海平面、低可容空间和低沉积物供应条件下，基准面下降过程中以内源碳酸盐沉积为主的混合叠置样式。

2) 碳酸盐岩台地—潟湖—三角洲混合(图 8-b)。该混积样式的底部边界为开阔台地发育的泥晶灰岩，顶部边界为三角洲平原发育的碳质泥岩或煤层。下部海侵体系域主要由碳酸盐台地相内源泥晶灰岩、风暴角砾灰岩，以及潟湖相泥质粉砂岩和三角洲前缘亚相中细砂岩组成；上部高位体系域主要由三角洲平原亚相的碳质泥岩及煤层构成。该混积样式发育于毛儿沟段，该旋回海平面相较庙沟段上升，海侵范围扩大，盆地可容空间增加，陆源碎屑沉积物供应增多，盆地由庙沟期的欠补偿状态转变为过补偿状态，沉积厚度大幅增加。台地相碳酸盐岩、潟湖相泥岩及三角洲沉积体系的叠置沉积反映了在较高海平面、高可容空间、近陆源区碎屑供应充足条件下，基准面下降形成的陆源碎屑占优势的混合叠置样式。

3) 碳酸盐岩台地—潮道—障壁沙坝—潮坪混

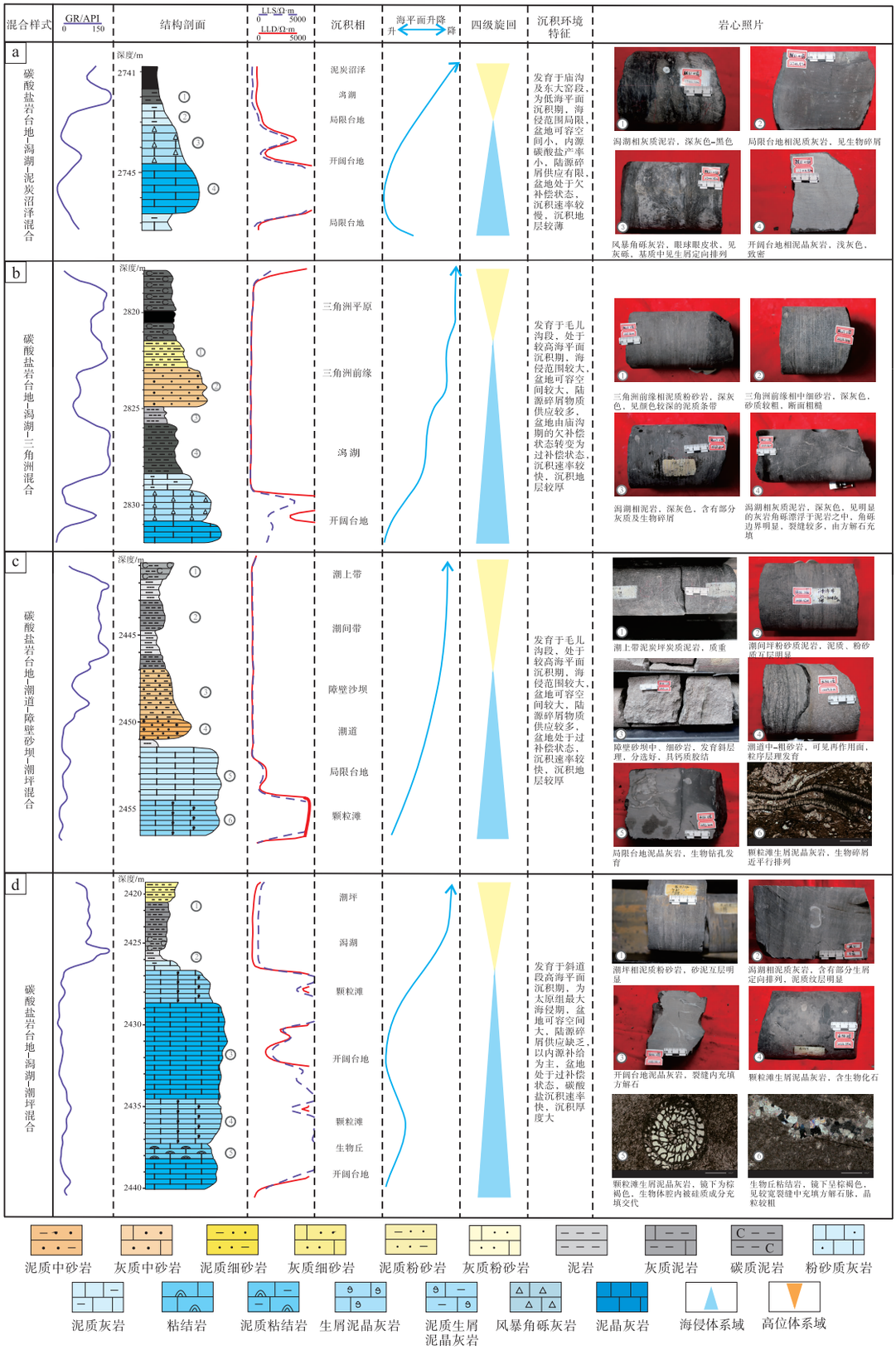


图 8　鄂尔多斯盆地东部太原组旋回性混合样式

Fig. 8　Cyclicity-controlled mixing patterns of the Taiyuan Formation in eastern Ordos Basin

合(图 8-c)。该混积样式的底部边界为颗粒滩微相生屑泥晶灰岩，顶部边界为潮上带泥炭坪碳质泥岩。下部海侵体系域主要由碳酸盐岩台地相泥晶灰岩、生屑泥晶灰岩，碎屑滨岸相的潮道、障壁沙坝砂岩等组成；上部高位体系域由潮坪亚相构成，岩性以泥岩、灰质泥岩和碳质泥岩为主。该混积样式发育于毛儿沟段，该段海平面相较庙沟段上升，海侵范围扩大，盆地可容空间增加，陆源碎屑沉积物供应增多，碎屑滨岸沉积发育，沉积厚度增大。其中潮道、障壁沙坝相砂岩和潮坪相粉砂质泥岩等多来源于同期未固结三角洲沉积物和沿岸物质的侵蚀再搬运。碳酸盐岩台地沉积体系与潮道—障壁沙坝—潮坪相砂、泥岩体系的垂向叠置，反映了靠近三角洲前缘或近岸剥蚀区、水动力较弱的再沉积区，在较高海平面和较大可容空间条件下形成的陆源碎屑与内源碳酸盐岩相对均衡的混合叠置样式。

4）碳酸盐岩台地—潟湖—潮坪混合(图 8-d)。该混积样式的底部边界为开阔台地相较深水泥晶灰岩，顶部边界为潮间带泥质粉砂岩。下部海侵体系域主要由碳酸盐岩台地相泥晶灰岩、风暴角砾岩，生物丘粘结岩及颗粒滩生屑泥晶灰岩组成，为研究区最厚的碳酸盐层连续发育层段；上部高位体系域为潮坪沉积，岩性主要为泥岩、泥质灰岩和泥质粉砂岩等，厚度较薄。该混积样式发育于斜道段高海平面时期，盆地可容空间大，陆源碎屑供应缺乏，以内源补给为主，碳酸盐沉积速率快，沉积厚度大。台地相厚层碳酸盐岩与潮坪相薄层碎屑岩的叠置沉积反映了在高海平面、陆源碎屑供应匮乏、盆地可容空间大、碳酸盐产能高等条件下形成的以内源碳酸盐沉积为主的混合叠置样式。

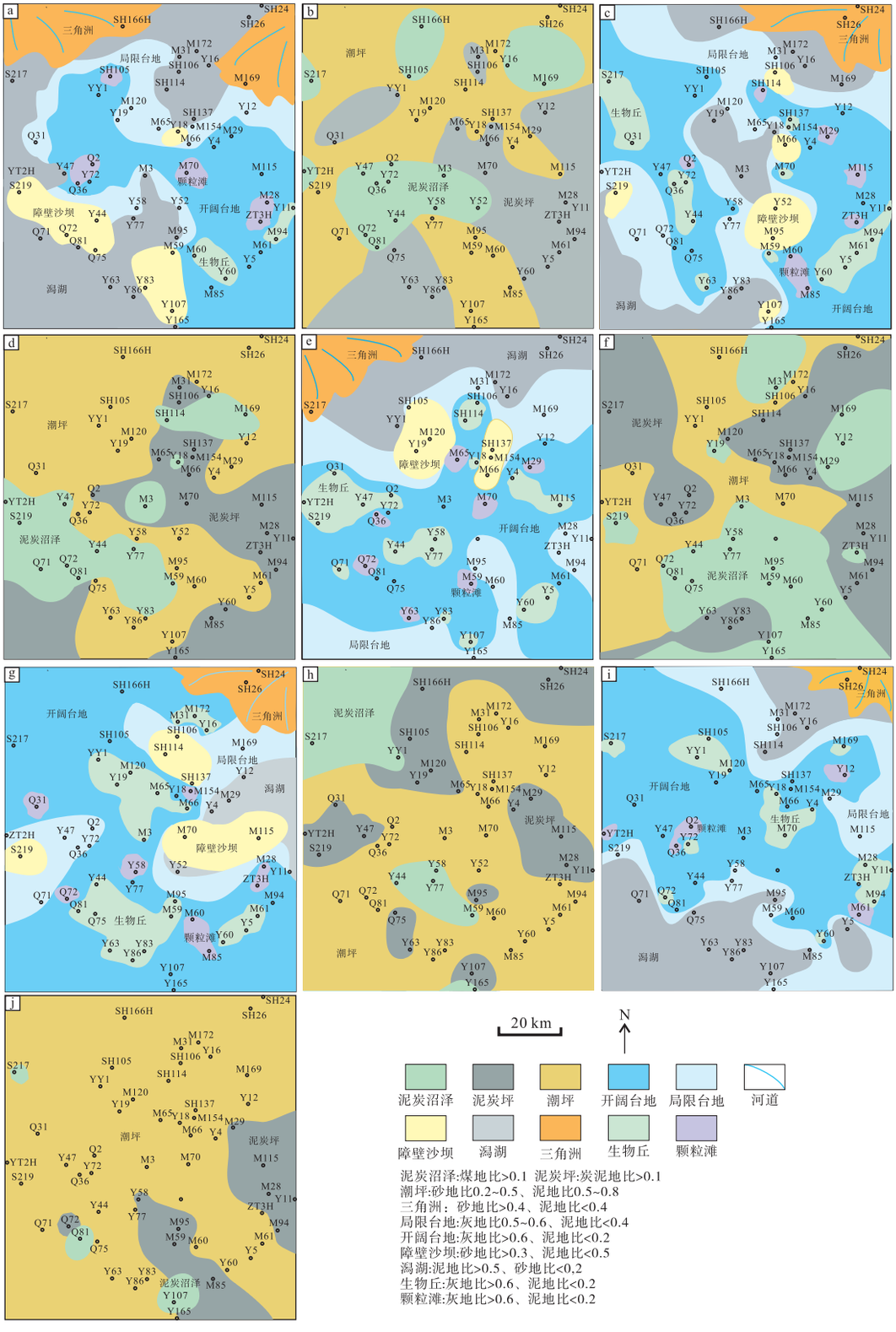
太原组旋回性混合沉积样式结构组成相似，演化模式稳定，主要表现为海平面下降过程中，碳酸盐岩台地沉积逐步向碎屑滨岸沉积过渡，最终以煤层或碳质泥岩为顶界，构成 1 个完整的四级旋回。旋回性混合主要受海平面升降及其波动幅度的控制，海平面变化通过调节陆源碎屑供给、碳酸盐产率以及盆地可容空间等因素，影响碳酸盐岩与碎屑岩的交替与混合沉积，进而控制混合样式。当海平面上升时，陆源碎屑供给减少，碳酸盐产率升高，盆地可容空间扩大；当海平面下降时，陆源碎屑供给增多，碳酸盐生产受到抑制而产率降低，盆地可容空间减小。同时，由于研究区处于陆表海沉积环境，海平面的快速上升不会使碳酸盐产率显著降低，但海平面的下降则会导致碳酸盐产率的显著下降。

庙沟段与东大窑段对应于相对低海平面时期，盆地可容空间有限，陆源碎屑供给不足，碳酸盐沉积受限，沉积地层较薄。上、下毛儿沟段对应于较高海平面时期，其陆源碎屑供应增多，碳酸盐产率相对庙沟段增大，陆源与内源沉积作用相对均衡，碳酸盐岩与碎屑岩沉积厚度相当。斜道段代表最高海平面沉积期，碳酸盐产率显著升高，陆源碎屑供应缺乏，以沉积厚层碳酸盐岩为主，碎屑岩厚度较小。总之，旋回性混合主要受高频海平面变化及其波动幅度控制，属于宏观大尺度混合沉积类型，反映时间上海平面周期性升降变化对混合沉积垂向叠置样式的影响。研究区快速海侵、缓慢海退的四级海平面变化特点决定了四级旋回的垂向叠置样式和混合沉积特征。

3.2 同期异地相混合

同期异地相混合是指同期沉积的、相邻的不同沉积相或岩相之间的混合，即同时沉积的陆源碎屑岩与内源碳酸盐岩的混合。在横向上，三角洲及碎屑滨岸沉积区常形成以陆源碎屑为主导的混合沉积，而在碳酸盐岩台地沉积区常形成以内源碳酸盐为主导的混合沉积(图 9)。二者之间漫长的相变线附近则形成碎屑岩与碳酸盐岩的“突变式”或“渐变式”混合。在物源供给充沛、沉积环境变化显著的区域一般形成不同岩相、沉积相间岩性呈显著变化的“突变式”混合；在物源供给稳定、沉积环境相对稳定的区域一般形成不同岩相、沉积相间岩性呈渐变过渡的“渐变式”混合。垂向上，同期异地相混合则表现为碎屑岩与碳酸盐岩的叠置，也形成相应的的“突变式”或“渐变式”沉积相组合。在鄂尔多斯盆地太原组共识别出 5 类同期异地相混合样式(图 10)：

1）三角洲前缘与潟湖混合(图 10-a)。三角洲前缘主要由中细砂岩、粉砂岩构成，砂体呈平行层理或沙纹沙波层理。三角洲前缘河口坝中可见槽状交错层理、沙纹沙波层理等，含有少量泥砾或灰岩岩屑。潟湖岩性以泥岩、泥质灰岩为主，泥岩通常呈深灰色至黑色，表现为中—厚层块状，富含有机质及生物碎屑，生物扰动构造发育，部分泥岩经泥炭化可形成碳质泥岩。在垂向上，岩性通常由潟



a—庙沟段海侵体系域；b—庙沟段高位体系域；c—下毛儿沟段海侵体系域；d—下毛儿沟段高位体系域；e—上毛儿沟段海侵体系域；f—下毛儿沟段高位体系域；g—斜道段海侵体系域；h—斜道段高位体系域；i—东大窑段海侵体系域；j—东大窑段高位体系域

图 9　鄂尔多斯盆地东部太原组各旋回沉积相平面分布

Fig. 9　Lithofacies palaeogeographic maps of each cyclothem of the Taiyuan Formation in eastern Ordos Basin

湖相泥岩、泥质灰岩突变为三角洲前缘中细砂岩、粉砂岩，反映了三角洲前缘与潟湖之间的同期邻近沉积相之间岩性有显著差异的“突变式”混合沉积特征。

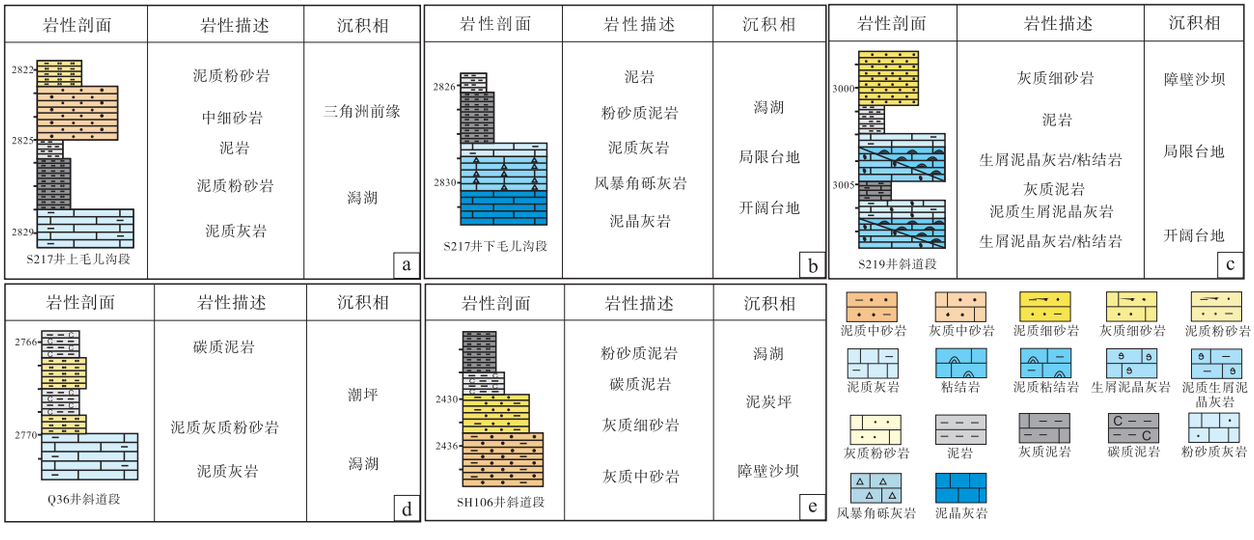
2）潟湖与碳酸盐岩台地混合(图 10-b)。潟湖岩性以泥岩、粉砂质泥岩及泥质灰岩为主。泥岩、粉砂质泥岩呈中—厚层块状，富含有机质，局部泥炭化可形成碳质泥岩。泥质灰岩多为深灰色，泥质含量高，呈薄层状产出，生物碎屑较多，生物扰动构造发育。碳酸盐岩台地岩性主要为泥晶灰岩、风暴角砾灰岩和泥质灰岩等，通常呈厚层块状。垂向上岩性由泥晶灰岩、风暴角砾灰岩渐变为泥质灰岩并进一步向粉砂质泥岩和泥岩演化，反映了潟湖与受风暴影响的碳酸盐岩台地之间同期邻近沉积相间岩性呈渐变过渡的“渐变式”混合沉积特征。

3）障壁沙坝与碳酸盐岩台地混合(图 10-c)。障壁沙坝岩性以灰质中砂岩、细砂岩为主，呈中—厚层状，具钙质胶结，常发育大型斜层理，可见少量泥砾混入。碳酸盐岩台地岩性主要为泥晶灰岩、生屑泥晶灰岩、粘结岩等，通常为厚层块状，常见由风暴作用形成的灰质泥岩夹层，在岩心上呈眼球眼皮状。在垂向上，岩性由台地相泥晶灰岩、风暴角砾灰岩突变为障壁沙坝相中细砂岩，反映了障壁沙坝与受风暴影响的碳酸盐岩台地之间同期邻近沉积相间岩性呈突变关系的“突变式”混合沉积特征。

4）潮坪与潟湖混合(图 10-d)。研究区潮坪相岩性以粉砂岩、泥岩为主，陆源碎屑供应不足时可在潮间坪沉积粉砂质灰岩，潮上坪的局部泥炭化可形成碳质泥岩。粉砂质灰岩呈浅灰色，薄层块状，可见潮汐韵律层理，岩心中粉砂质与石灰质的小尺度混积层系明显。潟湖相岩性以泥质灰岩、泥岩为主。泥质灰岩通常呈薄层产出，灰—深灰色块状，生物碎屑较多，生物扰动构造发育。在垂向上，岩性由潟湖相泥质灰岩渐变为潮坪相粉砂岩及碳质泥岩，反映了潮坪与潟湖之间邻近沉积相之间呈渐变过渡的“渐变式”混合沉积特征。

5）障壁沙坝与潟湖混合(图 10-e)。障壁沙坝主要由石灰质中、细砂岩组成，常为中—厚层，石灰质以钙质胶结的形式存在，混有泥砾，大型斜层理是其发育的典型特征。潟湖岩性以泥岩、灰质泥岩为主。泥岩呈中—厚层块状，局部泥炭化可形成碳质泥岩，灰泥混杂可形成灰质泥岩。障壁沙坝与潟湖之间的过渡区常形成由碳质泥岩组成的泥炭坪沉积。在垂向上，岩性由泥质中砂岩逐渐向碳质泥岩、粉砂质泥岩等沉积过渡，反映了障壁沙坝与潟湖之间同期邻近沉积相间岩性呈渐变过渡的“渐变式”混合沉积特征。

同期异地相混合为中等尺度混合，主要受海平面变化、陆源碎屑源供应、内源碳酸盐产率、沉积地貌及水动力条件等因素控制，反映空间环境差异对外源和内源混合沉积物分配的影响。受上述因素



a—三角洲前缘与潟湖混合；b—潟湖与碳酸盐岩台地混合；c—障壁沙坝与碳酸盐岩台地混合；d—潮坪与潟湖混合；e—障壁沙坝与潟湖混合

图 10 鄂尔多斯盆地东部太原组同期异地相混合样式

Fig. 10 Contemporaneous allopatric mixing patterns of the Taiyuan Formation in eastern Ordos Basin

的综合作用，陆源碎屑和内源碳酸盐在合适的可容空间进行分配并沉积，形成太原组特有的同期异地相混合沉积。三角洲、碎屑滨岸及碳酸盐岩台地之间漫长曲折的相变线附近是同期异地相混合的主要发育区。其中三角洲前缘与潟湖之间、障壁沙坝与碳酸盐岩台地之间因物源、沉积环境和水深及可容空间的较大差异，形成“突变式”同期异地相混合；潮坪与潟湖、潟湖与碳酸盐岩台地、障壁沙坝与潟湖之间因物源、沉积环境和水深及可容空间的渐变过渡特征，形成“渐变式”同期异地相混合。同时，由于陆表海地形平缓、水体浅，小幅度海平面波动即可引发沉积相的大范围迁移，更有利于同期异地相混合沉积的发育。

3.3　组分混合

组分混合是指陆源碎屑与碳酸盐组分以不同比例混合形成混积岩的过程。在鄂尔多斯盆地共识别出（含泥）粉砂质灰岩、含泥/泥质灰岩、含泥/泥质生屑泥晶灰岩、灰质泥岩/含灰砾泥岩、灰质砂岩 5 类混积岩，在潮坪、潟湖、碳酸盐岩台地等沉积相较为发育(表 3)。

在潮坪沉积中,陆源输入量是控制混积岩形成的重要因素，受海平面升降及气候等因素控制。在陆源碎屑输入不足时，潮坪以碳酸盐沉积为主，潮汐作用或离岸流搬运而来的粉砂质可与灰泥混合形成粉砂质灰岩，属于相缘混合沉积；在陆源碎屑供应充足时，潮坪以陆源碎屑沉积为主，灰质以胶结物形式产出形成灰质粉砂岩，有时亦可见灰质粉砂岩及粉砂质泥岩的毫米级混积层系，均属于原地及相缘混合沉积。三角洲前缘沉积与潮坪类似，灰质以钙质胶结形式存在，形成灰质中、细砂岩等。

潟湖沉积中，海平面波动及陆源碎屑输入变化造成碳酸盐与泥质的交替沉积，灰质和泥质呈现不等量的混杂，形成泥质灰岩、灰质泥岩等，属于相缘混合沉积。障壁沙坝沉积中，灰质中、细砂岩是常见的混积岩。海平面的升降波动造成砂体间断性被海水淹没，从而在原地接受台地相泥晶方解石沉积，最终形成具钙质胶结的障壁砂体，属于原地混合沉积。在潮道沉积中，除了类似于障壁沙坝的原地混合沉积之外，海水的冲刷和簸选使附近台地相灰岩破碎后混入潮道砂沉积，形成含灰质岩屑灰质中、粗砂岩，属于母源混合沉积。

鄂尔多斯盆地太原组伴随着多期次风暴沉积作用。当间断性风暴来临时，风暴浪的强水动力可使先前沉积的台地相石灰岩破碎，并将灰泥、灰岩岩屑、生屑等碳酸盐组分搅动和搬运到滨岸沉积体系，最远可波及到风暴高潮线处，形成灰质泥岩、含灰砾泥岩等，属于间断混合及母缘混合沉积。随后，风暴离岸洪流可将岸上的陆源碎屑物质搬运到潟湖以及碳酸盐岩台地沉积区，属于间断混合沉积。在潟湖中可形成细砂、粉砂岩夹层，而在局限/开阔台地中可见灰质泥岩夹层。灰质泥岩中生物碎屑定向排列成层状，这种沉积特征归因于风暴搬运的陆源碎屑为台地相提供了丰富的营养物质，促进了生物的局部富集与沉积。此外，台地相的生物丘可以粘结捕获部分的泥质或有机质，发育含泥粘结岩，属于原地混合沉积。

组分混合为微观尺度的混合沉积，其形成受高频海平面升降控制，同时受到陆源碎屑供给、水动力条件及物化条件等多因素的协同影响，主要反映沉积水动力及物化环境对陆源与内源沉积物组分分布的调控作用。研究区混积岩的成因类型以相缘混合和间断混合为主，原地混合和母源混合次之。混积岩广泛发育，成因类型多样，体现了沉积环境的高度动态演化特征。

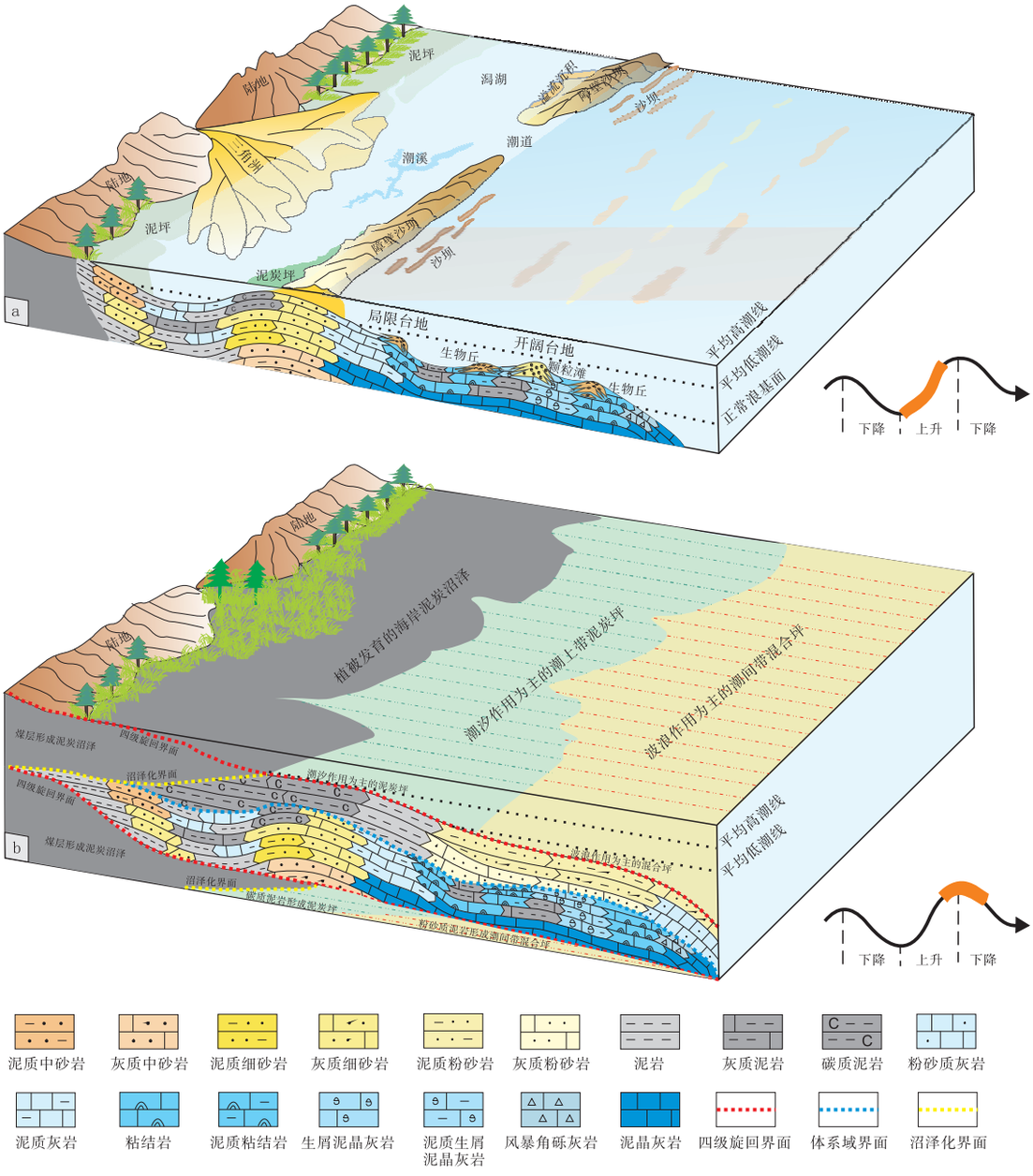
4　混合沉积模式

根据混积岩及混积样式特征及主要控制因素分

表 3　鄂尔多斯盆地东部太原组混积岩及其成因类型

Table 3　Mixed rocks and their genetic types of the Taiyuan Formation in eastern Ordos Basin

沉积相	沉积亚相	混积岩类型	成因类型
三角洲	三角洲前缘	灰质中、细砂岩	相缘混合(主)原地混合
潮坪	潮间带	灰质粉砂岩、粉砂质灰岩	相缘混合(主)原地混合
潟湖	/	(含泥)泥质灰岩、灰质泥岩	相缘混合(主)间断混合
障壁沙坝	/	灰质中、细砂岩	原地混合(主)母源混合
碳酸盐岩台地	局限台地、开阔台地	灰质泥岩、泥质灰岩、含泥/泥质生物碎屑灰岩、含泥/泥质粘结岩	间断混合(主)原地混合



a—海侵体系域混合沉积模式；b—高位体系域混合沉积模式

图 11 鄂尔多斯盆地东部太原组陆表海混合沉积模式

Fig. 11 Schematic model of mixed sedimentation in the epicontinental sea of Taiyuan Formation in eastern Ordos Basin

析，结合沉积相及地层旋回性研究，总结出鄂尔多斯盆地东部太原组陆表海混合沉积模式(图 11)。研究区受冰期—间冰期多次大幅及高频低幅的海平面变化控制，属于陆源与内源沉积互为消长并富含煤层的三角洲—碎屑滨岸—碳酸盐岩台地海陆交互相混合沉积体系，高频的海侵海退形成了广泛分布的旋回性沉积。太原组沉积期盆地处于温暖湿润的气候环境，受西北部隆升和海西运动的影响，北侧造山带成为主要物源区，为东南部凹陷提供了大量陆源碎屑，自北向南受陆源影响逐渐减弱，混合沉积逐渐由陆源碎屑主导向碳酸盐主导过渡。

鄂尔多斯盆地东部太原组发育多尺度的混合沉积，主要包括旋回性混合、同期异地相混合和组分混合。旋回性混合主要发生在宏观尺度，主要受海平面升降及其波动幅度控制，表现为在快速海侵、缓慢海退的背景下，碳酸盐沉积向陆源碎屑沉积的

逐步过渡。旋回初期，海平面快速上升，此时主要沉积碳酸盐，石灰岩常直接覆盖于煤层或碳质泥岩之上，沉积相突变特征明显；随后海平面下降，沉积体系逐渐由海相过渡到陆相，并以煤层或碳质泥岩为顶界，开始新的旋回。

同期异地相混合为中等尺度混合，主要受海平面升降、陆源碎屑供应、内源碳酸盐产率、沉积地貌等多因素的协同作用。受障壁沙坝围限影响，太原组沉积体系呈现明显的空间分异。沙坝内侧陆源物质供应充足，水体循环受限，水动力条件较弱，常形成以陆源碎屑为主导的混合样式；沙坝外侧由于砂体对陆源物质具有一定的阻隔作用，陆源供应匮乏，水体循环良好，风暴扰动频繁，碳酸盐产率高，常形成以内源碳酸盐为主导的混合样式。同时，太原组横向相变显著，沉积相的空间分异及不同沉积相的过渡演化可在垂向及平面上形成不同的混合样式。

组分混合是微观尺度的混合，其形成受陆源碎屑供给、沉积水动力和物化条件的共同影响。不同沉积相发育的混积岩类型具有明显差异(表 3)。在障壁沙坝内侧陆源碎屑供给充足的区域，常形成以陆源碎屑为主导的组分混积岩；而在沙坝外侧陆源供应不足的沉积区，则多形成以内源碳酸盐为主的混积岩。沉积水动力有助于沉积物的搬运，在促进混合沉积过程中起到关键作用。例如，风暴流携带泥质组分进入碳酸盐沉积区可形成泥质灰岩或灰质泥岩等混积岩；泥晶方解石等碳酸盐组分也可被搬运至陆源碎屑沉积区，形成灰质砂岩、灰质泥岩等。陆源碎屑供给及物化条件也可通过影响碳酸盐产率，进一步影响混积岩的组分变化。总之，研究区太原组混合沉积具有多尺度发育、多因素协同作用、沉积环境动态演化的显著特征。

5　结论

1）鄂尔多斯盆地东部太原组发育 1 个相对完整的三级旋回，自下向上可划分为庙沟段、下毛儿沟段、上毛儿沟段、斜道段及东大窑段 5 个四级旋回。四级旋回结构稳定，主要由海侵及高位体系域二元结构组成。海侵体系域主要为颗粒滩、生物丘、丘/滩间海等微相组成的局限、开阔台地沉积，局部区域发育三角洲及障壁沙坝砂体；高位体系域则以潮坪及潟湖沉积为主。鄂尔多斯盆地东部太原组经历了较完整的海侵—海退过程。庙沟段为低海平面期，石灰岩沉积于地貌低位；上、下毛儿沟段海侵范围扩大；斜道段为最大海侵期，沉积区域性厚层石灰岩；东大窑段海相大范围转为陆相，仅局部洼地保留石灰岩沉积。

2）鄂尔多斯盆地东部太原组发育 3 个尺度的混合沉积。宏观尺度为旋回性混合，包括碳酸盐岩台地—潟湖—泥炭沼泽、碳酸盐岩台地—潟湖—三角洲、碳酸盐岩台地—潮道—障壁沙坝—潮坪、碳酸盐岩台地—潟湖—潮坪 4 类混合样式；中等尺度为同期异地相混合，发育三角洲前缘与潟湖、障壁沙坝与碳酸盐岩台地 2 类“突变式”及潟湖与碳酸盐岩台地、潮坪与潟湖、障壁沙坝与潟湖 3 类“渐变式”混合样式；微观尺度为组分混合，识别出（含泥）粉砂质灰岩、含泥/泥质灰岩、含泥/泥质生屑泥晶灰岩、灰质泥岩/含灰砾泥岩、灰质砂岩 5 类混积岩。

3）旋回性混合主要受高频海平面变化及波动幅度控制，反映时间的周期性变化对垂向混合样式的影响；同期异地相混合主要受海平面升降、陆源碎屑供给、内源碳酸盐产率、沉积地貌等因素控制，反映空间环境差异对内外源混合沉积物分配的影响；组分混积主要受陆源碎屑供给、水动力及物化条件等因素影响，反映多因素对陆源与内源沉积物组分分布的协同调控。

参考文献(References)

曹岩刚,苏成,王庆,彭叙凯,高冬,聂万才,周怀来,李悟,付斯一,冯荣昌. 2024. 鄂尔多斯盆地清涧—宜川地区上石炭统本溪组混积特征及沉积演化. 大庆石油地质与开发,43(6): 29-38.[Cao Y G,Su C,Wang Q,Peng X K,Gao D,Nie W C,Zhou H L,Li W,Fu S Y,Feng R C. 2024. Hybrid sediments characteristics and sedimentary evolution of Upper Carboniferous Benxi Formation in Qingjian-Yichuan area of Ordos Basin. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing,43(6): 29-38]

常嘉,陈世悦,王琼,蒲秀刚,杨怀宇. 2021. 陆表海背景下障壁海岸体系沉积层序及聚煤模式：以渤海湾地区晚古生代太原组为例. 煤田地质与勘探,49(4): 123-133.[Chang J,Chen S Y,Wang Q,Pu X G,Yang H Y. 2021. Sequence stratigraphy and coal accumulation of barrier coastal system under epicontinental-sea environment: a case study of the Late Paleozoic Taiyuan Formation in Bohai Bay Area. Coal Geology & Exploration,49(4): 123-133]

陈世悦. 1998. 论秦岭碰撞造山作用对华北石炭二叠纪海侵过程的控制. 岩相古地理,18(2): 48-54.[Chen S Y. 1998. The controls of the collisional orogenesis in the Qinling Mountains on the Carbon-

iferous-Permian transgressional processes in North China. Sedimentary Facies and Palaeogeography,18(2): 48-54]

崔宏俊,雷燕云,曹雄伟,魏灿灿,李鹏程,付金伟,胡震,王博涵. 2023. 鄂尔多斯盆地延安地区本溪组—太原组地层及其沉积演化特征. 西安石油大学学报(自然科学版),38(3): 19-26.[Cui H J,Lei Y Y,Cao X W,Wei C C,Li P C,Fu J W,Hu X,Wang B H. 2023. High resolution sequence stratigraphy andsedimentary evolution characteristics of Benxi Formation-Taiyuan Formation in Yan'an Area,Ordos Basin. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition),38(3): 19-26]

董桂玉,陈洪德,何幼斌,秦志勇,罗进雄,辛长静. 2007. 陆源碎屑与碳酸盐混合沉积研究中的几点思考. 地球科学进展,22(9): 931-939.[Dong G Y,Chen H D,He Y B,Qin Z Y,Luo J X,Xin C J. 2007. Some problems on the study of the mixed siliciclastic carbonate sediments. Advances in Earth Science,22(9): 931-939]

董桂玉,陈洪德,李君文,林良彪,钟怡江,罗进雄,王峰,陈安清,李洁. 2009. 环渤海湾盆地寒武系混合沉积研究. 地质学报,83(6): 800-811. [Dong G Y,Chen H D,Li J W,Lin L B,Zhong Y J,Luo J X,Wang F,Chen A Q,Li J. 2009. The study on Cambrian mixed sedimentation around Bohai Sea Bay Basin. Acta Geologica Sinica,83(6): 800-811]

董国栋,赵伟波,张紫阳,卢子兴,付勋勋,裴文超,高星. 2023. 鄂尔多斯盆地榆林—清涧地区太原组砂岩成因与分布. 东华理工大学学报(自然科学版),46(4): 368-375.[Dong G D,Zhao W B,Zhang Z Y,Lu Z X,Fu X X,Pei W C,Gao X. 2023. Origin and distribution of sandstone in the Taiyuan Formation in Yulin-Qingjian area of Ordos basin. Journal of East China University of Technology(Natural Science),46(4): 368-375]

杜学斌,刘晓峰,陆永潮,刘惠民,张守鹏,马义权,赵珂,魏巍. 2020. 陆相细粒混合沉积分类、特征及发育模式: 以东营凹陷为例. 石油学报,41(11): 1324-1333. [Du X B,Liu X F,Lu Y C,Liu H M,Zhang S P,Ma Y Q,Zhao K,Wei W. 2020. Classification,characteristics and development models of continental fine-grained mixed sedimentation: a case study of Dongying sag. Acta Petrolei Sinica,41(11): 1324-1333]

付金华,董国栋,周新平,惠潇,淡卫东,范立勇,王永刚,张海涛,古永红,周国晓. 2021. 鄂尔多斯盆地油气地质研究进展与勘探技术. 中国石油勘探,26(3): 19-40.[Fu J H,Dong G D,Zhou X P,Hui X,Dan W D,Fan L Y,Wang Y G,Zhang H T,Gu Y H,Zhou G X. 2021. Research progress of petroleum geology and exploration technology in Ordos Basin. China Petroleum Exploration,26(3): 19-40]

高青松. 2018. 大牛地气田石炭系太原组沉积相类型再分析. 石油地质与工程,32(6): 1-5, 11, 116.[Gao Q S. 2018. Reanalysis of sedimentary facies types of Carboniferous Taiyuan formation in Daniudi gas field. Petroleum Geology and Engineering,32(6): 1-5, 11, 116]

高星,傅于恒,赵伟波,殷杰,陈娟萍,代榕. 2023. 鄂尔多斯盆地中东部太原组灰岩沉积相分析. 能源与环保,45(6): 127-134, 141. [Gao X,Fu Y H,Zhao W B,Yin J,Chen J P,Dai R. 2023. Sedimentary facies analysis of Taiyuan Formation limestone in central and eastern Ordos Basin. China Energy and Environmental Protection,45(6): 127-134, 141]

郭福生. 2004. 浙江江山藕塘底组陆源碎屑与碳酸盐混合沉积特征及其构造意义. 沉积学报,22(1): 136-141.[Guo F S. 2004. Characteristics and tectonic significance of mixing sediments of siliciclastics and Carbonate of Outangdi Formation in Jiangshan,Zhejiang Province. Acta Sedimentologica Sinica,22(1): 136-141]

郭军,陈洪德,王峰,赵俊兴,苏中堂,王磊. 2012. 鄂尔多斯盆地太原组砂体展布主控因素. 断块油气田,19(5): 568-571.[Guo J,Chen H D,Wang F,Zhao J X,Su Z T,Wang L. 2012. Main controlling factors of Taiyuan Formation sand body distribution in Ordos Basin. Fault-Block Oil & Gas Field,19(5): 568-571]

郭书元,张广权,陈舒薇. 2009. 陆表海碎屑岩—碳酸盐岩混积层系沉积相研究: 以鄂尔多斯东北部大牛地气田为例. 古地理学报,11(6): 611-627.[Guo S Y,Zhang G Q,Chen S W. 2009. Study on sedimentary facies of mixed clastic-carbonate sediments strata system in epicontinental sea: a case of Daniudi Gasfield in northeastern Ordos. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition),11(6): 611-627]

郭英海,刘焕杰,权彪,汪泽成,钱凯. 1998. 鄂尔多斯地区晚古生代沉积体系及古地理演化. 沉积学报,16(3): 44-51.[Guo Y H,Liu H J,Quan B,Wang Z C,Qian K. 1998. Late Paleozoic sedimentary system and paleogeographic evolution of Ordos Area. Acta Sedimentologica Sinica,16(3): 44-51]

郭艳琴,李文厚,郭彬程,张倩,陈强,王若谷,刘溪,马瑶,李智超,张梦婷,李百强. 2019. 鄂尔多斯盆地沉积体系与古地理演化. 古地理学报,21(2): 293-320.[Guo Y Q,Li W H,Guo B C,Zhang Q,Chen Q,Wang R G,Liu X,Ma Y,Li Z C,Zhang M T,Li B Q. 2019. Sedimentary systems and palaeogeography evolution of Ordos Basin. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition),21(2): 293-320]

郭艳琴,赵灵生,郭彬程,费世祥,李文厚,张倩,袁珍,马瑶,何子琼,李百强. 2021. 鄂尔多斯盆地及周缘地区下二叠统沉积特征. 古地理学报,23(1): 65-80.[Guo Y Q,Zhao L S,Guo B C,Fei S X,Li W H,Zhang Q,Yuan Z,Ma Y,He Z Q,Li B Q. 2021. Sedimentary characteristics of the lower Permian in Ordos Basin and its adjacent areas. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition),23(1): 65-80]

何自新,付金华,席胜利,付锁堂,包洪平. 2003. 苏里格大气田成藏地质特征. 石油学报,24(2): 6-12.[He Z X,Fu J H,Xi S L,Fu S T,Bao H P. 2003. Geological features of reservoir formation of Sulige gas field. Acta Petrolei Sinica,24(2): 6-12]

胡斌,王瑜,宋慧波,王芳. 2014. 豫西北及晋东南地区下二叠统太原组风暴沉积及伴生遗迹化石特征. 中国煤炭地质,26(1): 1-9. [Hu B,Wang Y,Song H B,Wang F. 2014. Lower Permian Taiyuan Formation storm deposit and associated ichnofossils characteristics in Northwestern Henan and Southeastern Shanxi Area. Coal Geology of China,26(1): 1-9]

黄有根,许杰,郑小鹏,刘燕,钟寿康,李琳,张道锋,谭秀成. 2024. 鄂

尔多斯盆地中东部下二叠统太原组灰岩沉积特征与沉积模式. 古地理学报,26(4)：911-925.[Huang Y G,Xu J,Zheng X P,Liu Y,Zhong S K,Li L,Zhang D F,Tan X C. 2024. Sedimentary characteristics and sedimentary models of the Lower Permian Taiyuan Formation limestone in mid-eastern Ordos Basin. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition),26(4)：911-925]

江茂生,沙庆安. 1995. 碳酸盐与陆源碎屑混合沉积体系研究进展. 地球科学进展,10(6)：551-554.[Jiang M S,Sha Q A. 1995. Research advance in the mixed siliciclastic-carbonate sedimentary systems. Advances in Earth Science,10(6)：551-554]

兰朝利,张君峰,陶维祥,张永忠,杨明慧,王金秀. 2011. 鄂尔多斯盆地神木气田太原组沉积特征与演化. 地质学报,85(4)：533-542.[Lan C L,Zhang J F,Tao W X,Zhang Y Z,Yang M H,Wang J X. 2011. Sedimentary characteristics and evolution of the Upper Carboniferous Taiyuan Formation Shenmu Gasfield Northeastern Ordos Basin. Acta Geologica Sinica,85(4)：533-542]

李文厚,张倩,李克永,陈强,郭艳琴,马瑶,冯娟萍,张道锋. 2021. 鄂尔多斯盆地及周缘地区晚古生代沉积演化. 古地理学报,23(1)：39-52.[Li W X,Zhang Q,Li K Y,Chen Q,Guo Y Q,Ma Y,Feng J P,Zhang D,F. 2021. Sedimentary evolution of the late Paleozoic in Ordos Basin and its adjacent areas. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition),23(1)：39-52]

李祥辉,曾允孚. 1999. 扬子西缘泥盆纪碳酸盐与陆源碎屑的混积层序和层序混积模式. 沉积学报,17(3)：339-344.[Li X H,Zeng Y F. 1999. Sequence stratigraphy of mixed Carbonate and siliciclastic sediments in devonian along the Western Margin of Yangtze Plate. Acta Sedimentologica Sinica,17(3)：339-344]

李祥辉. 2008. 层序地层中的混合沉积作用及其控制因素. 高校地质学报,14(3)：395-404.[Li X H. 2008. Mixing of siliciclastic-carbonate sediments within systems tracts of depositional sequences and its controlling factors. Geological Journal of China Universities,14(3)：395-404]

李增学,余继峰,郭建斌. 2002. 华北陆表海盆地海侵事件聚煤作用研究. 煤田地质与勘探,30(5)：1-5.[Li Z X,Yu J F,Guo J B. 2002. Study on coal accumulation under marine transgression events in the epicontinental basin of North China. Coal Geology & Exploration,30(5)：1-5]

刘桂珍,高伟,尉加盛,唐文. 2021. 混积层系沉积、层序特征：以鄂尔多斯盆地高桥地区本溪组为例. 天然气地球科学,32(3)：382-392.[Liu G Z,Gao W,Wei J S,Tang W. 2021. Sedimentary characteristics and sequence stratigraphy in a mixed silicilastic-carbonate depositional system：case study of Benxi Formation in Gaoqiao area,Ordos Basin. Natural Gas Geoscience,32(3)：382-392]

刘新社,张涛,黄道军,董国栋,王康乐,付勋勋,赵小会,卢子兴,于洲,荆雪媛,张君莹. 2023. 鄂尔多斯盆地中东部太原组石灰岩天然气勘探新突破及勘探方向. 天然气工业,43(5)：1-11.[Liu X D,Zhang T,Huang D J,Dong G D,Wang K L,Fu X X,Zhao X H,Lu Z X,Yu Z,Jing X Y,Zhang J Y. 2023. New breakthrough in and direction of natural gas exploration in Taiyuan Formation limestone in the central and eastern Ordos Basin. Natural Gas Industry,43(5)：1-11]

沙庆安. 2001. 混合沉积和混积岩的讨论. 古地理学报,3(3)：63-66.[Sha Q A. 2001. Discussion on mixing deposit and hunji rock. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition),3(3)：63-66]

沈玉林,郭英海,李壮福,魏新善,贾志刚. 2009. 鄂尔多斯盆地东缘本溪组—太原组层序地层特征. 地球学报,30(2)：187-193.[Shen Y L,Guo Y H,Li Z F,Wei X S,Jia Z G. 2009. Sequence stratigraphy of Benxi-Taiyuan Formation in eastern Ordos Basin. Acta Geoscientica Sinica,30(2)：187-193]

宋慧波,张彬,于振锋,金毅,胡斌,牛永斌,张立军. 2024. 鄂尔多斯盆地东缘太原组风暴沉积特征及环境模式. 沉积学报,42(4)：1370-1383.[Song H B,Zhang B,Yu Z F,Jin Y,Hu B,Niu Y B,Zhang L J. 2024. Storm deposit characteristics and their environmental model in the Taiyuan Formation on the eastern margin of the Ordos Basin. Acta Sedimentologica Sinica,42(4)：1370-1383]

孙娇鹏,陈世悦,胡忠亚,刘文,郭晨,马帅. 2014. 柴东北缘古生代碎屑岩—碳酸盐岩混积相发育特征及组合模式研究. 天然气地球科学,25(10)：1586-1593.[Sun J P,Chen S Y,Hu Z Y,Liu W P,Guo C,Ma S. 2014. Research on the mixed model and developmental characteristic of the clastic-carbonate diamictite facies in the Northern Qaidam. Natural Gas Geoscience,25(10)：1586-1593]

王德发,郑浚茂,邓宏文. 1986. 华北石炭—二叠系古地理沉积环境的初步分析. 地球科学,11(3)：267-272.[Wang D F,Zheng J M,Deng H W. 1986. A preliminary analysis of paleogeographic environments in carboniferous-permian system in northern China. Earth Science,11(3)：267-272]

王付斌,李良,陈亚平. 2007. 大牛地气田太原组沉积模式. 天然气工业,(12)：49-51, 163.[Wang F B,Li L,Chen Y P. 2007. Depositional models of Taiyuan Formation in Daniudi gas field,Ordos Basin. Natural Gas Industry,(12)：49-51, 163]

王红岩,施振生,孙莎莎,赵群,周天琪,程峰,拜文华. 2023. 陆表海页岩沉积微相类型及微相分布模式：以川南地区五峰组—龙马溪组为例. 石油勘探与开发,50(1)：51-64.[Wang H Y,Shi Z S,Sun S S,Zhao Q,Zhou T Q,Cheng F,Bai W H. 2023. Microfacies types and distribution of epicontinental shale：a case study of the Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin,China. Petroleum Exploration and Development,50(1)：51-64]

文祖超,沈玉林,李壮福,敬宇鸿,党志英,祝玉琳,孟艳,李林超. 2024. 混合沉积特征精细刻画：以江苏徐州寒武系馒头组为例. 古地理学报,26(4)：846-862.[Wen Z C,Shen Y L,Li Z F,Jing Y H,Dang Z Y,Zhu Y L,Meng Y,LI L C. 2024. Datailed characterization of mixed sedimentation：a case study of the Cambrian Mantou Formation in Xuzhou,Jiangsu Province. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition),26(4)：846-862]

武思琴,颜佳新,刘柯,严雅娟. 2016. 黔西南二叠纪早期陆源碎屑沉积体系对冈瓦纳冰川发育的响应. 地学前缘,23(6)：299-311.[Wu S Q,Yan J X,Liu K,Yan Y J. 2016. Response of early Permian silisiclastic depositional system to the advance of Gondwana glaciation in Southwestern Guizhou. Earth Science Frontiers,23(6)：299-311]

席胜利,李文厚,刘新社,郭英海. 2009. 鄂尔多斯盆地神木地区下二叠统太原组浅水三角洲沉积特征. 古地理学报,11(2):187-194.[Xi S L, Li W H, Liu X D, Guo Y H. 2009. Sedimentary characteristics of shallow water delta of the Lower Pemian Taiyuan Formation in Shenmu area, Ordos Basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 11(2): 187-194]

徐伟,杜晓峰,黄晓波,宋章强,李正宇. 2019. 混合沉积研究进展与关键问题. 沉积学报,37(2):225-238.[Xu W, Du X F, Huang X B, Song Z Q, Li Z Y. 2019. Research advances and critical issues of "mixed siliciclastic and carbonate sediments". Acta Sedimentologica Sinica, 37(2): 225-238]

杨朝青,沙庆安. 1990. 云南曲靖中泥盆统曲靖组的沉积环境:一种陆源碎屑与海相碳酸盐的混合沉积. 沉积学报,8(2):59-66.[Yang C Q, Sha Q A. 1990. Sedimentary environment of the Middle Devonian Qujing Formation, Qujing, Yunnan Province: a kind of mixing sedimentation ofterrigenous clastics and carbonate. Acta Sedimentologica Sinica, 8(2): 59-66]

杨江海,颜佳新,黄燕. 2017. 从晚古生代冰室到早中生代温室的气候转变:兼论东特提斯低纬区的沉积记录与响应. 沉积学报,35(5):981-993.[Yang J H, Yan J X, Huang Y. 2017. The Earth's penultimate icehouse-to-greenhouse climate transition and related sedimentary records in low-latitude regions of eastern Tethys. Acta Sedimentologica Sinica, 35(5): 981-993]

杨晓利,高娟,何福文,李金付,张明,张林科,徐文会. 2025. 鄂尔多斯盆地东缘佳县地区太原组沉积演化及成藏条件. 天然气地球科学,36(1):86-96.[Yang X L, Gao J, He F W, Li J F, Zhang M, Zhang L K, Xu W H. 2025. Sedimentary evolution and reservoir-forming conditions of Taiyuan Formation in Jiaxian area, eastern margin of Ordos Basin. Natural Gas Geoscience, 36(1): 86-96]

严雅娟,颜佳新,武思琴. 2015. 黔南地区早二叠世大幅度冰川性海平面下降的沉积学新证据. 地球科学,40(2):372-380.[Yan Y J, Yan J X, Wu S Q, 2015. Sedimentary records of Early Permian major glacial sea-level falls in southern Guizhou Province, China. Earth Science, 40(2): 372-380]

曾楷,李飞,龚峤林,唐浩,苏成鹏,车正强,邓嘉婷,胡广,李凌,曾伟,谭秀成. 2020. 寒武系第二统仙女洞组混合沉积特征及古环境意义:以川北旺苍唐家河剖面为例. 沉积学报,38(1):166-181.[Zeng K, Li F, Gong Q L, Tang H, Su C P, Che Z Q, Deng J T, Hu G, Li L, Zeng W, Tan X C. 2020. Characteristics and paleoenvironmental significance of mixed siliciclastic-carbonate sedimentation in the Xiannüdong Formation, Cambrian (Series 2): a case study from the Tangjiahe Section, Wangcang, northern Sichuan. Acta Sedimentologica Sinica, 38(1): 166-181]

赵灿,李旭兵,郇金来,于玉帅. 2013. 碳酸盐与硅质碎屑的混合沉积机理和控制因素探讨. 地质论评,59(4):615-626.[Zhao C, Li X B, Xun J L, Yu Y S. 2013. Mechanism of mixied siliciclastic-carbonate sediments and its controlling factors. Geological Review, 59(4): 615-626]

张金亮,司学强. 2007. 断陷湖盆碳酸盐与陆源碎屑混合沉积:以东营凹陷金家地区古近系沙河街组第四段上亚段为例. 地质论评,53(4):448-453, 577. [Zhang J L, Si X Q. 2007. Mixed siliciclastic-carbonate sediment in rift lacustrine basin: a case on the upper part of the Fourth Member of the Eogene Shahejie Formationin Jinjia Area, Dongying Depression. Geological Review, 53(4): 448-453, 577]

张锦泉,叶红专. 1989. 论碳酸盐与陆源碎屑的混合沉积. 成都地质学院学报,16(2):87-92.[Zhang J Q, Ye H Z. 1989. A study on carbonate and siliciclastic mixed sediments. Journal of Chengdu College of Geology, 16(2): 87-92]

赵剑. 2021. 鄂尔多斯盆地西缘太原组沉积特征. 石化技术,28(10):138-139.[Zhao J. 2021. Sedimentary characteristics of Taiyuan Formation in the western margin of Ordos Basin. Petrochemical Industry Technology, 28(10): 138-139]

郑荣才,周刚,董霞,胡忠贵. 2010. 龙门山甘溪组谢家湾段混积相和混积层序地层学特征. 沉积学报,28(1):33-41.[Zheng R C, Zhou G, Dong X, Hu Z G. 2010. The characteristics of hybrid facies and hybrid sequence of Xiejiawan Member of Ganxi Formation in the Longmenshan Area. Acta Sedimentologica Sinica, 28(1): 33-41]

Chiarella D, Longhitano S G, Tropeano M. 2017. Types of mixing and heterogeneities in siliciclastic-carbonate sediments. Marine and Petroleum Geology, 88: 617-627.

Mount J F. 1984. Mixing of siliciclastic and carbonate sediments in shallow shelf environments. Geology, 12(7): 432-435.

Schwarz E, Veiga G D, Álvarez Trentini G, Isla M, Spalletti L. 2018. Expanding the spectrum of shallow-marine, mixed carbonate-siliciclastic systems: processes, facies distribution and depositional controls of a siliciclastic-dominated example. Sedimentology, 65: 1558-1589.

Peng Y X, Guo S B. 2023. Lithofacies analysis and paleosedimentary evolution of Taiyuan Formation in Southern North China Basin. Journal of Petroleum Science and Engineering, 220: 111-127.

(责任编辑 王绍华)