

中条山陶家窑剖面长城系混合沉积特征与发育模式*

陈 亮¹ 任军峰² 李 涵² 潘 星² 季汉成^{3,4} 陈发清^{3,4}

1 中国石油大学(北京)理学院, 北京 102249

2 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西西安 710018

3 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

4 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249

摘 要 山西永济中条山地区长城系沉积了一套以碎屑岩为主的海相地层, 是鄂尔多斯地区最早的沉积地层, 完整记录了长城纪的裂陷活动。自下而上发育了白草坪组、北大尖组、崔庄组和洛峪口组。其中, 白草坪组与北大尖组被认为以石英砂岩为主, 崔庄组为页岩, 洛峪口组为白云岩。本次研究在中条山陶家窑剖面中发现大量混合沉积, 类型多样, 在以往关于鄂尔多斯地区长城系的研究中鲜有报道, 对于混合沉积成因与沉积模式缺乏系统认识。通过宏观的野外沉积物结构和沉积构造分析, 结合微观的室内显微镜观察, 以明确中条山地区长城系混合沉积特征与类型, 进而揭示混合沉积的成因与模式。研究表明, 白草坪组为具有块状构造的相混合沉积; 北大尖组发育原地混合、相混合与间断混合沉积, 呈中一薄层夹于发育交错层理的石英砂岩中; 崔庄组发育少量相混合沉积; 洛峪口组主要发育母源混合沉积。混合沉积的过程受裂谷作用控制: 早期受裂谷活动影响, 为陡坡地貌, 缺少原地混合条件, 以相混合为主; 北大尖组沉积时期, 裂谷作用减弱, 形成缓坡地貌, 发育了相混合、原地混合以及间断混合。洛峪口组沉积时期, 裂陷作用结束, 海平面大幅下降, 早期沉积的碳酸盐岩出露被剥蚀, 以内碎屑的形式搬运至盆地内部与石英共同沉积形成母源混合。整体上, 混合沉积均出现在各组顶部的海平面开始加速上升时期, 因此海平面上升在一定程度上是决定混合沉积的基础条件。

关键词 混合沉积 混积类型 沉积模式 长城系 中条山 山西省

第一作者简介 陈亮, 男, 1987 年生, 副教授, 主要从事沉积学研究。E-mail: georabbit1987@hotmail.com。

中图分类号: P588.2 **文献标志码:** A

Characteristics and development patterns of mixed sedimentation of the Changchengian in Taojiayao outcrop of Zhongtiao Mountains

CHEN Liang¹ REN Junfeng² LI Han² PAN Xing² JI Hancheng^{3,4} CHEN Faqing^{3,4}

1 College of Science, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

2 Exploration and Development Research Institute, Changqing Oilfield Branch, PetroChina, Xi'an 710018, China

3 College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

4 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

* 中国石油大学(北京) 自然科学基金(编号: 2462023BJR011)、中石油科技创新基金(编号: 2021D002-0102)和中国石油长庆油田分公司科研项目(编号: 2023DJ0104, 2023YQX10105)联合资助。[Co-funded by Science Foundation of China University of Petroleum, Beijing (No. 2462023BJR011), CNPC Innovation Fund (No. 2021D002-0102), Research Project of PetroChina Changqing Oilfield Company (Nos. 2023DJ0104, 2023YQX10105)]

收稿日期: 2024-07-01 改回日期: 2024-08-26

Abstract A set of marine strata dominated by clastic rocks was deposited during the Changchengian period in the Zhongtiao Mountain region of Yongji, Shanxi. These strata are the earliest sedimentary strata in the Ordos region, recording a complete history of the rifting activities during the Changchengian period. The strata contain four lithostratigraphic units including, from bottom to top, the Baicaoping, Beidajian, Cuizhuang, and Luoyukou Formations. Among them, the Baicaoping and Beidajian Formations are dominated by quartzose sandstones, the Cuizhuang Formation by shale, and the Luoyukou Formation by dolomite. In this study, various mixed sedimentary deposits were discovered in the Taojiayao section of the Zhongtiao Mountains. This study combines field sedimentary structures with microscopic observations to clarify the characteristics and types of mixed sedimentary deposits and further reveals their origins and patterns. The result shows that the Baicaoping Formation is a mixed-facies deposit with massive structures; the Beidajian Formation contains in-place mixing, phase mixing, and intermittent mixing deposits, presented as medium-to-thin layers interspersed in cross-bedded quartzose sandstone; the Cuizhuang Formation develops a small amount of mixed-facies deposition; the Luoyukou Formation mainly contains source-mixed deposits. The mixed sedimentary processes were controlled by rifting: in the early stage with intense rifting, the steep slope landform was dominated by mixed facies; during the Beidajian period with weakened rifting, a gentle slope formed, leading to the development of mixed-facies, and in-place and intermittent mixing deposits; during the Luoyukou depositional period when rifting ended and sea-level dropped significantly, the carbonate rocks deposited earlier were exposed and eroded, and transported into the basin interior as internal debris forming source-mixed deposits. Overall, mixed deposits appeared at the top of each formation during the period when the sea-level began to accelerate, suggesting that sea-level rise was a fundamental condition for determining mixed deposition to a certain extent.

Key words mixed sedimentation, types of mixed sedimentary deposits, patterns of mixed sedimentary deposits, Changchengian, Zhongtiao Mountain, Shanxi Province

About the first author CHEN Liang, born in 1987, is an associate professor. He is mainly engaged in sedimentology research. E-mail: georabbit1987@hotmail.com.

在研究现代浅海陆架沉积体系时，“混合沉积物 (Mixed sediments)”的概念被首次提出 (Mount, 1984)，国内学者杨朝青和沙庆安 (1990) 首次提出了“混积岩”的概念。研究早期对“混积岩”的定义局限于岩石组分的混合，即硅质盆外碎屑与盆地碳酸盐岩沉积的混合，强调不同组分在时间和空间上的一致性 (Mount, 1984)。随着理论的发展，“混积岩”概念逐渐涵盖了混积层系，使得混合沉积的定义在时—空尺度上都得到了极大拓展：混合沉积可以是垂向上碎屑岩沉积与碳酸盐沉积的交互，大到地层级别，小到纹层级别 (杨朝青和沙庆安, 1990)。

混合沉积的机理被分为了间断混合沉积、相混合沉积、原地混合沉积与母源混合沉积 4 类 (Mount, 1984)。间断混合沉积是指由突发事件，如风暴、泥石流等，将不同类型的沉积物搬运到同

一个环境，进而使盆外碎屑物质与盆内碳酸盐颗粒发生混合，形成混合沉积物 (McNeill *et al.*, 2011; 丁一等, 2013; 陈世悦等, 2017); 相混合从 Walther 相序定律的角度出发，认为相带间并不是截然分开的，而是存在过渡带，在过渡带内会发生沉积物的混合 (Longhitano *et al.*, 2014; 叶茂松, 2020)，其混合沉积类型可以是混积层系，亦可为组分混合；原地混合是指堆积在基底之上的钙质生物残骸与陆源输入的碎屑物质发生混合，这种混合多形成以生物碎屑为主的混积岩 (Dorsey and Kidwell, 1999; Chiarella *et al.*, 2016; 徐伟等, 2019)；母源混合是指盆外物源区发育已经成岩的碳酸盐岩地层与碎屑岩地层，通过风化剥蚀、径流搬运，在盆地内发生混合，进而形成混积岩 (André *et al.*, 2003)。

华北克拉通中元古界长城系中发育不同类型

的混积沉积。北京西郊南口虎峪一带，长城系大洪峪组发育一套砂岩与叠层石互层的混积层系（梅冥相等，2007）；神农架林区的神农剖面顶部，中元古界中发育广泛的相混合沉积（王昌勇等，2022）。而鄂尔多斯盆地中元古界长城系鲜有关于混合沉积的研究报道。以往研究认为山西永济中条山剖面是一套石英砂岩—页岩—白云岩的沉积（山西省地质调查院，2019；潘星，2021）。本次研究中，在永济陶家窑剖面中发现大量混合沉积，在各组内均有发育。分析混合沉积的成因类型，总结混合沉积模式，对认识鄂尔多斯长城系岩相古地理条件有重要意义，同时也可作为研究鄂尔多斯地区长城系裂陷槽演化过程的参考依据。

1 区域地质概况

中条山位于山西省南部，横跨临汾、运城、晋城三市，处于太行山和华山之间，其山体呈东北—西南走向，全长约 160 km，宽度在 10 ~ 15 km 之间（图 1）。构造上，中条山也被称为中条背斜，有着复杂的岩性组成，包括太古界片麻岩、元古界石英岩、白云岩以及火山岩系。陶家窑剖面位于中条山南段，出露了中上元古界与寒武系。陶家窑剖面长城系自下而上发育白草坪组、北大尖组、崔庄组和洛峪口组（图 2）。在长城纪早期，大陆裂解，火山岩沉积物发育，熊耳裂谷盆地初步形成；随后，随着地壳的进一步裂解，发生小规模海侵，局部沉积了滨海相碎屑岩，同时济源、伊川等地为河流—冲积扇沉积环境，沉积的小沟背组—云梦山组代表了大陆裂谷的沉积（吕奇奇等，2020；庞岚尹等，2021）。长城纪晚期，裂解作用持续进行，地壳沉降，海侵范围扩大，熊耳裂陷槽海水普遍受到限制，在该时期沉积了白草坪组、北大尖组、崔庄组和洛峪口组。白草坪组以红色泥岩、粉砂岩页岩为主，夹少量石英砂岩、石英岩状薄层砂岩，发育交错层理与泥砾构造，反映了潮间—潮上带砂泥坪的沉积环境（张严等，2018；胡漾等，2024）。北大尖组是以白色石英岩状砂岩为主的沉积组合，其中部夹紫红色、灰黑色页岩、砂质页岩，上部夹砂质白云岩、白云岩，北大尖组沉积体系受物源和相对海平面变化控制，沉积环境为碎屑岩潮坪（张严等，2018）。崔庄组以灰绿色、

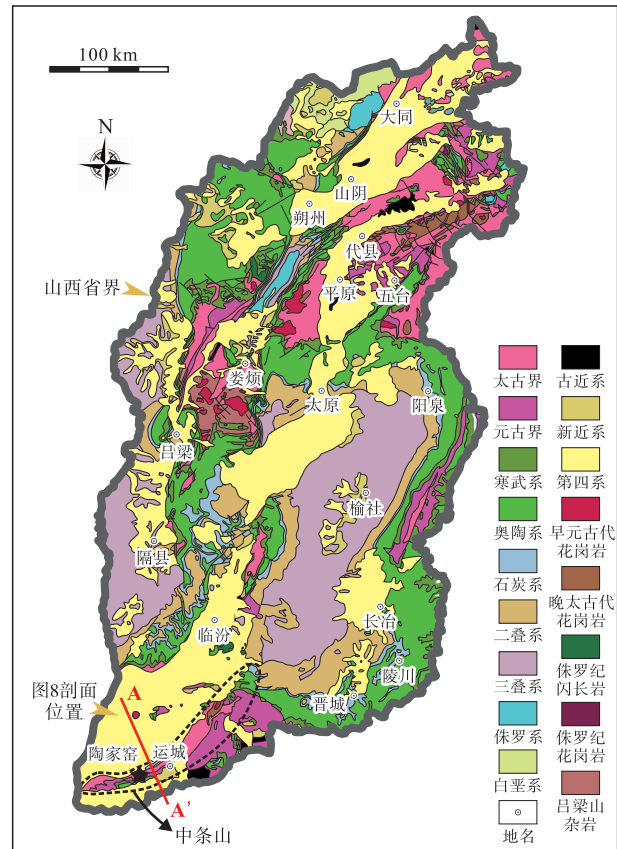


图 1 山西省地质图（山西省地质调查院，2019）和中条山陶家窑剖面位置

Fig. 1 Geological map of Shanxi Province (after Shanxi Geological Survey Institute, 2019), location of the Taojiayao outcrop, Zhongtiao Mountains

黑色页岩、砂质页岩为主的沉积组合，其底部夹灰白色厚层石英岩状砂岩。洛峪口组是由红色白云岩、含叠层石红色白云岩组成的沉积组合。随着海侵范围逐渐扩大，裂谷盆地开始接受巨厚的滨—浅海相沉积，洛峪口组的沉积环境转变为滨—浅海相，标志着被动大陆边缘的形成（吕奇奇等，2020；庞岚尹等，2021）。

长城系在不同地区地层划分与命名存在一定差异。在山西省区域内太行山南段长城系地层包括赵家庄组、常州沟组和申岭沟组，出露良好，地层连续。赵家庄组页岩可与熊耳裂谷白草坪组对比，推测两者均为 1790 Ma 之后的沉积产物，不早于 1764 Ma（赵太平等，2015；王青春等，2017；胡漾等，2024），太行山南段常州沟组可以与渑池—确山地区汝阳群的北大尖组进行对比（王玺童等，2021）。中元古代地层砂岩层面上多种沉积构造

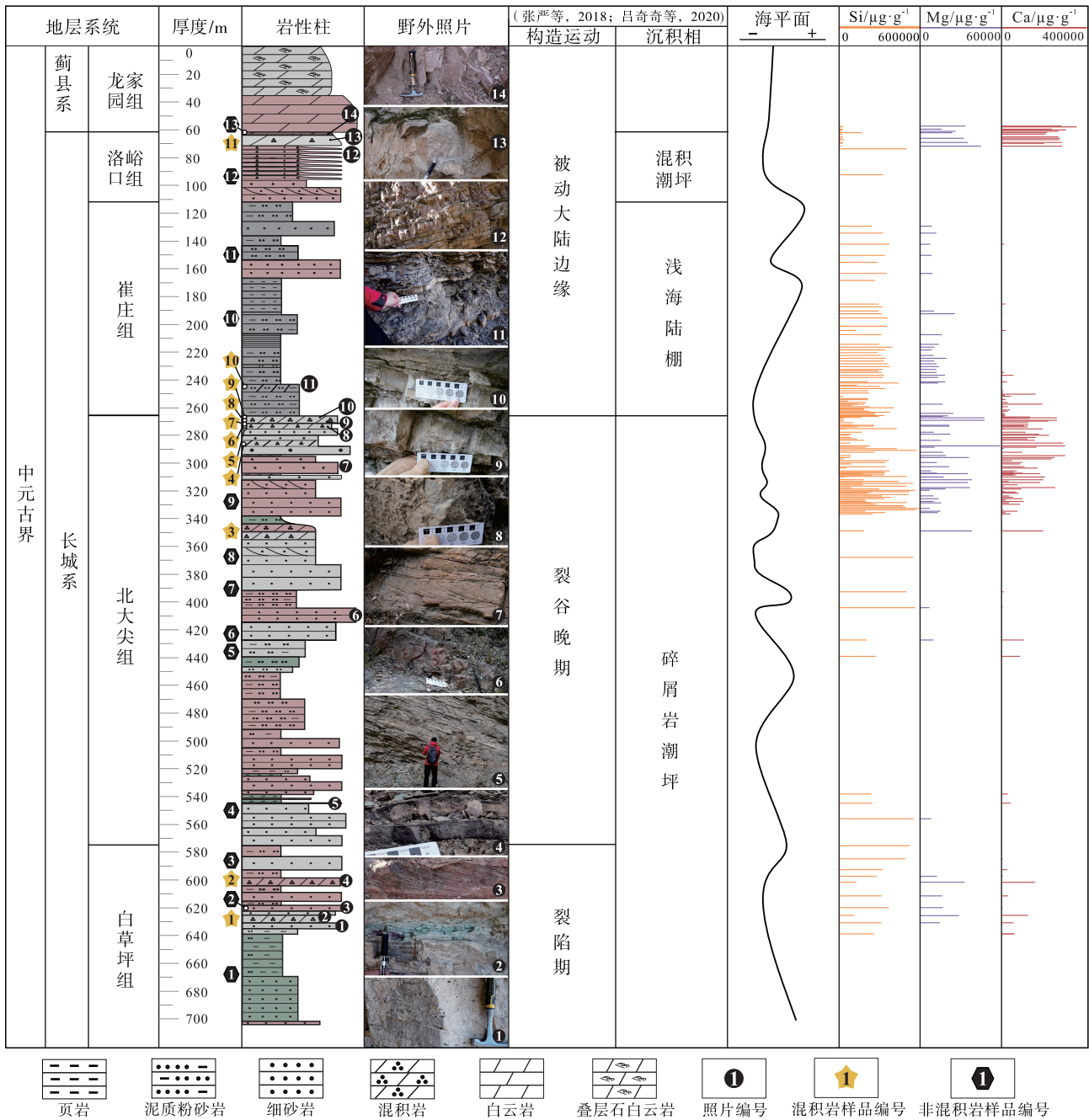


图 2 中条山地区陶家窑剖面长城系综合柱状图

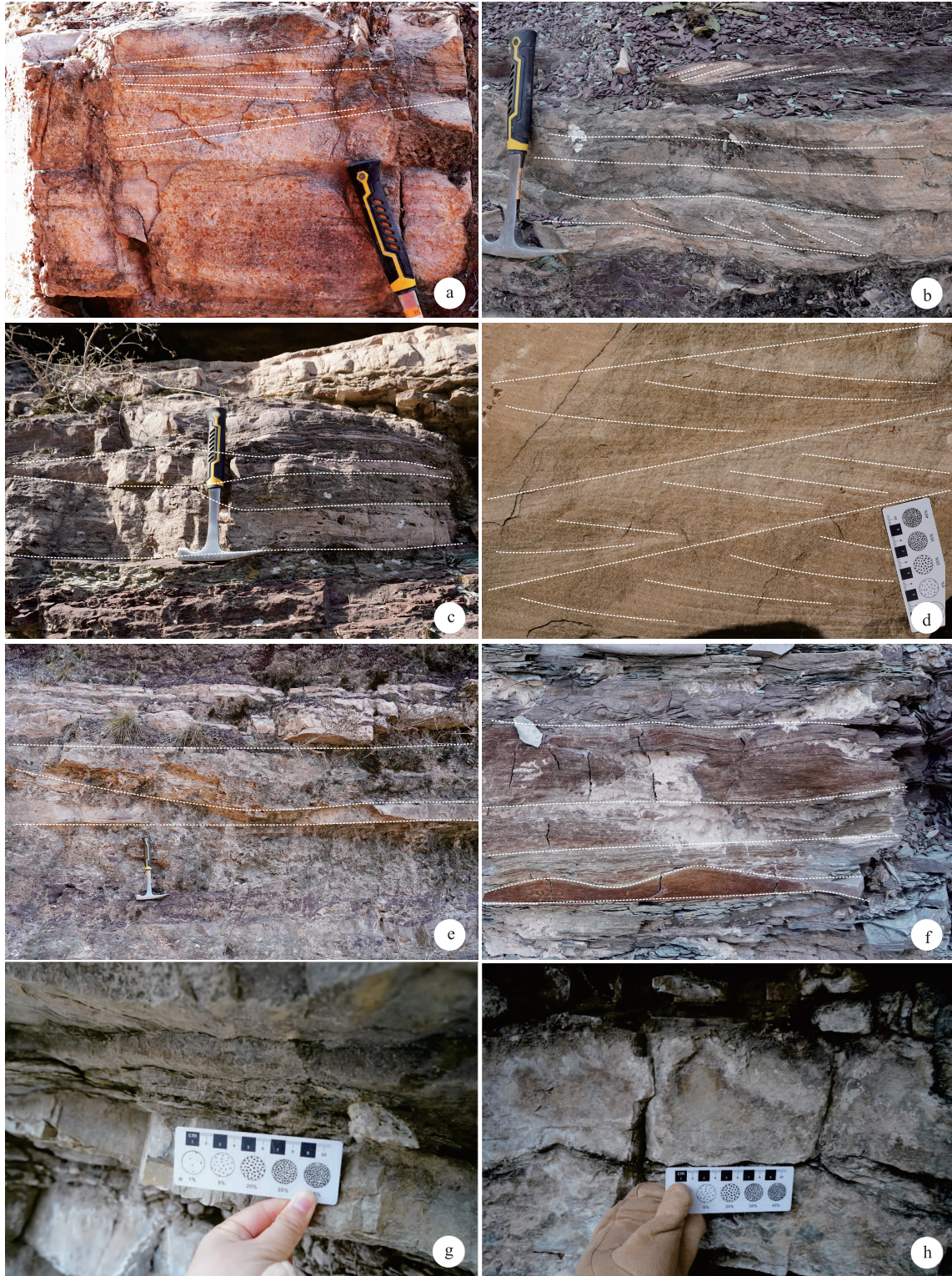
Fig. 2 Comprehensive stratigraphic column of the Changchengian at Taojiayao outcrop, Zhongtiao Mountains

(含痕迹化石) 的相似性可为华北地区地层、环境对比及沉积盆地构造演化研究提供重要的材料(郑元等, 2009)。

2 混合沉积特征与分类

1) 白草坪组下部为灰色灰绿色石英砂岩沉积, 上部为紫红色石英砂岩(图 2, 照片编号 1

-3)。在整套地层中夹紫红色泥岩与混合沉积岩。砂岩沉积中发育大量板状交错层理(图 2, 照片编号 3; 图 3-d), 可见不同方向纹层组连续出现的薄层板状交错层理(图 3-b), 代表多向水流的存在, 为潮汐水道沉积特征; 此外, 还观察到规模不同的下切水道(图 3-c, 3-e), 整体上为潮间带沉积特征。镜下微观特征显示, 白草坪组石英砂岩的分选中等, 磨圆中等, 以中一细砂岩为主(图 4-a,



a—北大尖组，冲洗交错层理；b—白草坪组，板状交错层理，纹层方向不同；c—白草坪组，中部下切界面，上部波状交错层理；d—白草坪组，板状交错层理；e—白草坪组，下切水道；f—洛峪口组，下部对称波痕，上部波状交错层理；g—北大尖组，块状构造；h—北大尖组，块状构造

图 3 中条山地区陶家窑剖面长城系沉积构造

Fig. 3 Sedimentary structure photographs of the Changchengian at Taojiayao outcrop, Zhongtiao Mountains

4-b, 4-c)。

根据组分含量 10%、25% 与 50% 为界限, 可将混积岩划分为陆源碎屑岩、碳酸盐岩、火山碎屑岩、正混积岩四大类 (Mount, 1984)。通过手持元素测试仪, 在野外考察过程中对部分岩石元素成分进行了测试, 依据 Si、Ca 与 Mg 元素的含量情况 (图 2), 确定了混积岩的发育位置, 结合镜下观察分析了混积岩的类型。

白草坪组混积岩主要为组分混合型混积岩, 为石英颗粒与白云石的混合, 石英颗粒分选中一差 (图 5-a, 5-b)。细粒与粉粒级别石英砂多与泥晶—粉晶白云石混合, 石英颗粒多为不接触, 石英颗粒含量低 (图 5-a); 中粒与细粒级别的石英颗粒多与亮晶白云石混合, 石英颗粒多为点接触且石英碎屑含量高 (图 5-b), 反映了不同水动力条件下的混合沉积。沉积构造上, 混积岩多为中—薄层的块状沉积构造。

2) 北大尖组为灰色石英砂岩与紫红色石英砂岩互层 (图 2, 照片编号 5-10), 与白草坪组类似, 板状交错层理与平行层理发育 (图 2, 照片编号 7; 图 3-d), 为河道或潮汐水道沉积。除河道沉积的沉积构造外, 北大尖组发育冲洗交错层理 (图 3-a), 指示了滨岸沉积环境。中部发育紫红色页岩沉积, 解释为潮间带—潮下带沉积。微观特征显示, 北大尖组的石英颗粒分选与磨圆较白草坪组更好, 磨圆为中—好 (图 4-d 至 4-j)。

北大尖组混合沉积亦为组分混合型混积岩, 根据微观特征又可以分为 3 类。第 1 类与白草坪组类似, 为石英颗粒与白云石的混合, 石英颗粒分选较差 (图 5-c, 5-l)。第 2 类是分选较差的粉砂级到中砂级石英颗粒与泥晶白云岩岩屑混合, 以及第 1 类混积岩岩屑混合, 磨圆中等, 其次是与鲕粒混合 (图 5-d 至 5-j)。第 3 类为少量细粒石英颗粒与鲕粒的混合沉积, 石英颗粒以碎屑颗粒或鲕粒核心的形式出现 (图 5-k), 沉积构造上亦为中—薄层的块状沉积构造 (图 2, 照片编号 10; 图 3-g, 3-h), 指示了鲕粒滩的沉积环境。

3) 崔庄组为一套紫红色—灰绿色—黑色页岩互层沉积, 夹粉砂岩薄层 (图 4-k, 4-l, 4-m), 水平层理发育 (图 2, 照片编号 11), 为浅海陆棚—半深海沉积。可见少量组分混合型混积岩, 为粉粒石英与泥晶、亮晶白云石的混合, 是潮间带沉积

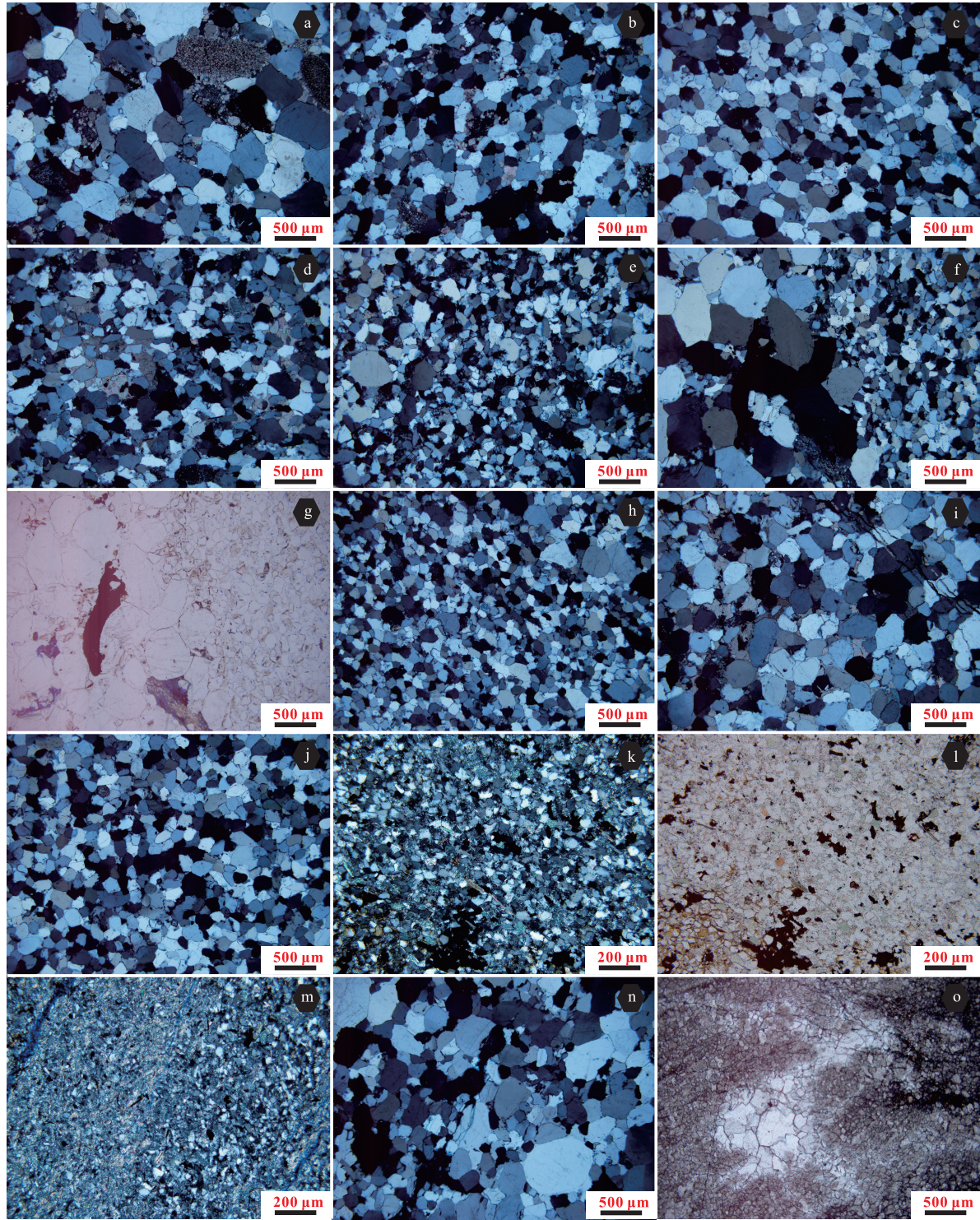
产物 (图 5-m)。

4) 洛峪口组下部为紫红色石英砂岩沉积, 上部为白云岩沉积 (图 2, 照片编号 12-14)。石英砂岩的粒径集中在细砂至中砂级, 分选磨圆好 (图 4-n), 沉积构造多为中—薄层块状沉积构造, 见浪成波痕与波状交错层理 (图 3-f), 上部白云岩多为粉晶—亮晶白云岩, 见羽状交错层理, 整体为碳酸盐岩潮坪沉积环境。洛峪口组中的混积岩也表现为组分混合, 混合程度相对较低, 为中粒石英砂岩、混积岩岩屑以及碳酸盐岩岩屑混合, 混积岩岩屑与石英颗粒分选磨圆好, 鲕粒以岩屑形式出现, 粒径与石英颗粒相似 (图 5-n, 5-o), 代表了长距离搬运的特征。

3 混合沉积成因分析与沉积模式

根据 Mount (1984) 的混合沉积机理分类, 存在 4 类混合沉积过程, 包括原地混合、相混合、间断性混合与母源混合。原地混合是指陆源碎屑和碳酸盐组分在空间和时间上同时存在的混积岩, 这一类混合沉积过程会形成组分混合类型的混积岩。相混合是指在碎屑岩和碳酸盐岩为主导的沉积环境边界之间的混合沉积现象, 例如, 碳酸盐浅滩复合体的翼部与碎屑潟湖之间的相混合, 砂质潮坪与潮下带碳酸盐岩沉积的混合。相混合过程主要形成纹层状混积岩或混积层系, 也可以形成组分混合沉积 (Chiarella *et al.*, 2012, 2017)。间断混合指的是碳酸盐与硅质碎屑岩之间孤立存在, 这种混合沉积作用通常为事件沉积, 如风暴、地震或海啸等事件, 这些事件将沉积物从一个环境搬运到另一个环境中, 造成碳酸盐与硅质碎屑岩的混合。间断混合过程可以形成纹层状混积岩或组分混合型混积岩 (Halfar *et al.*, 2004; Chiarella *et al.*, 2017)。母源混合是指物源区母岩为碳酸盐岩, 经历风化破碎后搬运至盆地与碎屑颗粒混合, 形成组分混合型混积岩 (Chiarella *et al.*, 2017)。

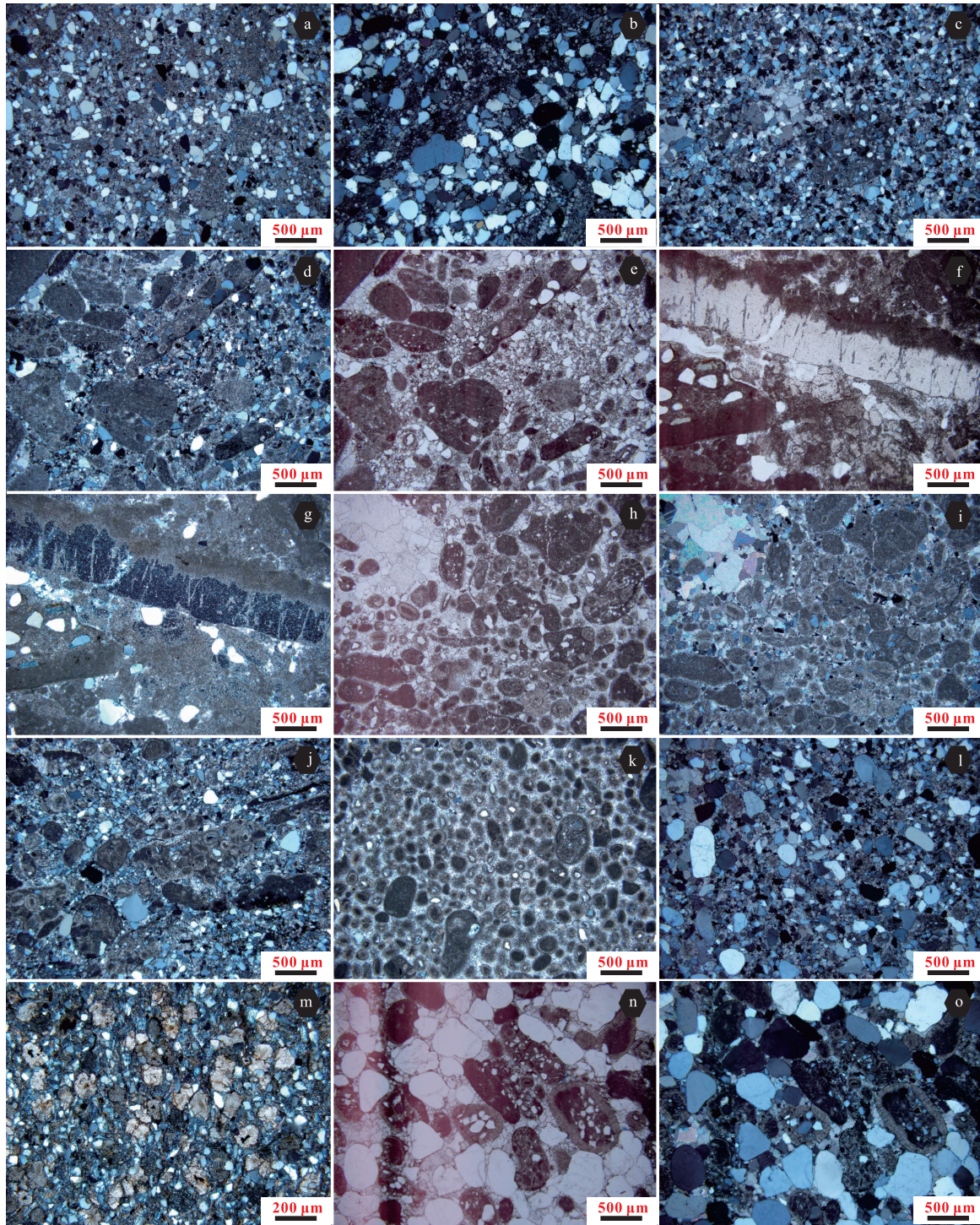
白草坪组沉积时期是熊耳裂陷活动的延续, 沉降中心靠近断层一侧 (图 6-a)。混积岩主要为组分混合型混积岩, 为石英颗粒与泥—粉晶白云石的混合, 根据混合沉积过程与混积岩特征的对应关系, 可以判断白草坪组混合沉积可能为相混合或原地混合 (Chiarella *et al.*, 2017)。此外, 白草坪组混积岩中碎屑含量高则粒度粗 (图 5-a), 碎屑含



a—白草坪组，中粒石英砂岩，正交光；b—白草坪组，细粒石英砂岩，正交光；c—白草坪组，细粒石英砂岩，正交光；d—北大尖组，细粒石英砂岩，正交光；e—北大尖组，细粒石英砂岩，正交光；f—北大尖组，中粒石英砂岩（左）与细粒石英砂岩（右），正交光；g—北大尖组，中粒石英砂岩（左）与细粒石英砂岩（右），单偏光；h—北大尖组，细粒石英砂岩，正交光；i—北大尖组，中粒石英砂岩，正交光；j—北大尖组，细粒石英砂岩，正交光；k—崔庄组，粉砂岩，正交光；l—崔庄组，粉砂岩，单偏光；m—崔庄组，粉砂岩，正交光；n—洛峪口组，中粒石英砂岩，正交光；o—洛峪口组，细晶白云岩，单偏光

图 4 中条山地区陶家窑剖面长城系非混积岩镜下特征

Fig. 4 Micro-photographs of clastic and carbonate rocks of the Changchengian of Taojiayao outcrop, Zhongtiao Mountains



a—白草坪组，细粒石英颗粒与泥晶云岩混合，正交光；b—白草坪组，细粒石英颗粒与泥晶云石混合，正交光；c—北大尖组，粉粒石英颗粒与泥晶云石混合，正交光；d—北大尖组，细粒石英颗粒、白云岩岩屑与亮晶白云石混合，正交光；e—北大尖组，细粒石英颗粒、白云岩岩屑与亮晶白云石混合，单偏光；f—北大尖组，细粒石英颗粒、白云岩岩屑与泥晶白云石混合，单偏光；g—北大尖组，细粒石英颗粒、白云岩岩屑与泥晶白云石混合，正交光；h—北大尖组，细粒石英颗粒、白云岩岩屑与亮晶白云石混合，单偏光；i—北大尖组，细粒石英颗粒、白云岩岩屑与亮晶白云石混合，正交光；j—北大尖组，细粒石英颗粒、白云岩岩屑与泥晶白云石混合，正交光；k—北大尖组，泥晶鲕粒与石英颗粒混合，正交光；l—北大尖组，不等粒石英与亮晶白云石混合，正交光；m—崔庄组，粉粒石英砂颗粒与亮晶方解石混合，正交光；n—洛峪口组，中粒石英颗粒与混积岩岩屑混合，单偏光；o—洛峪口组，中粒石英颗粒与混积岩岩屑混合，正交光

图 5 中条山地区陶家窑剖面长城系混积岩镜下特征

Fig. 5 Micro-photographs of mixed deposited rocks of the Changchengian of Taojiayao outcrop, Zhongtiao Mountains

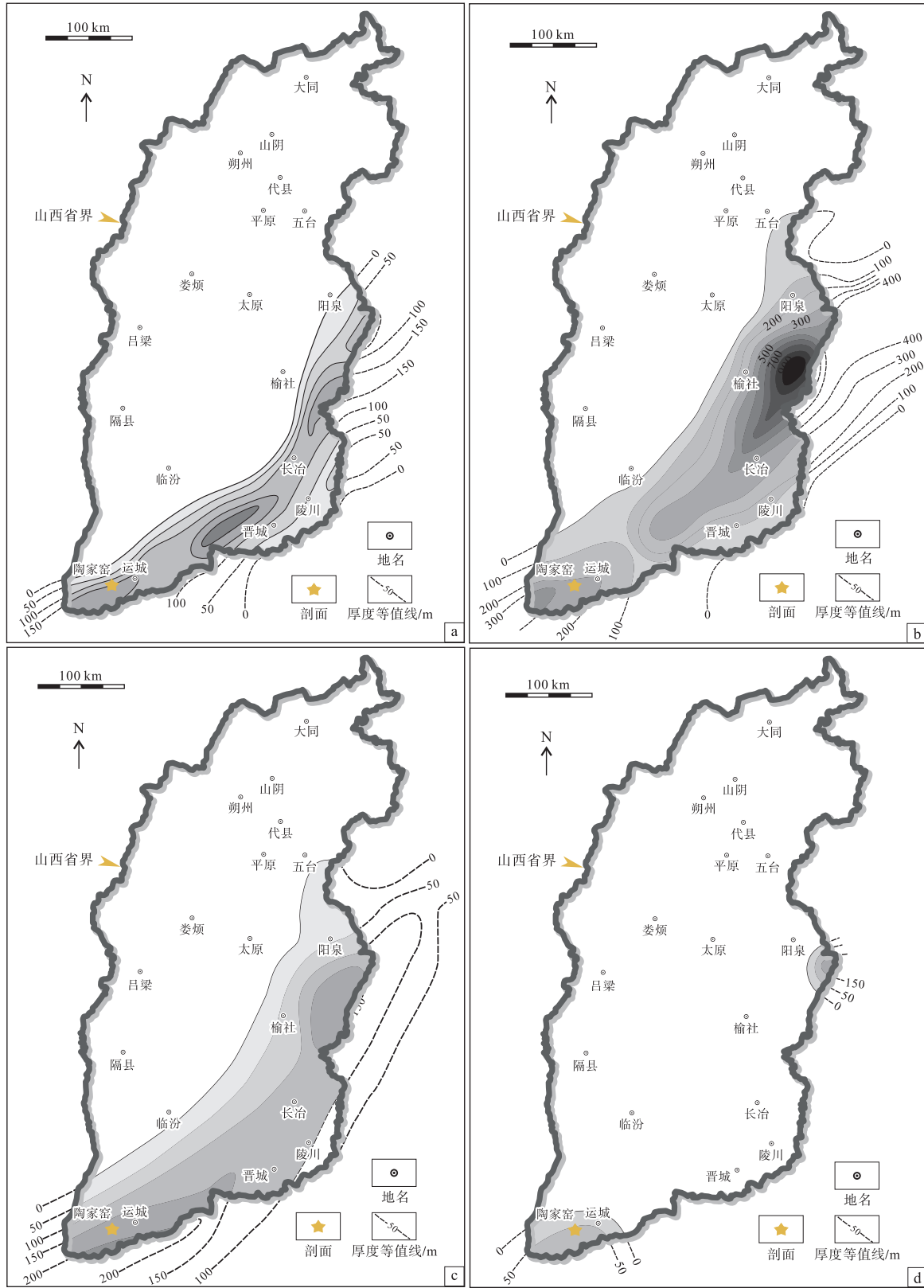


图 6 山西省长城系地层厚度图 (据山西省地质调查院, 2019)

Fig. 6 Thickness isogram maps of the Changchengian in Shanxi Province (after Shanxi Geological Survey Institute, 2019)

量低则粒度细(图 5-b), 表明较粗石英颗粒的沉积更靠近陆源碎屑沉积环境; 而细粒石英颗粒的沉积远离陆源碎屑供给, 泥—粉晶白云石更加发育, 沉积构造上为水平层理发育的泥—粉砂岩, 对应陆源碎屑供给不足的中—低能潮坪环境。因此, 认为白草坪组混积岩更倾向于相混合, 由于三角洲提供的陆源碎屑供给不足或海平面变化, 从而出现相混合过程(图 7-a)。

北大尖组是长城系范围最广、厚度最大的地层, 是裂谷活动晚期, 沉降中心明显向东南迁移(图 6-b), 陆源碎屑供给强, 其混合沉积类型最

为丰富, 但整体上颗粒较粗, 反映了高能沉积环境。北大尖组第 1 类混合沉积与白草坪组类似(图 5-1), 应属于相混合沉积。第 2 类混积岩是岩屑与石英颗粒的混合, 其中岩屑类型复杂, 大量观测到的为泥晶云岩、组分混合型混积岩、鲕粒。其分选差, 但大量岩屑磨圆较好, 具有“竹叶状”特征(图 5-d 至 5-j)。因此, 第 2 类混积岩成因为间断混合, 是风暴等事件沉积所导致。第 3 类混积岩较为特殊, 是石英颗粒与鲕粒的组分混合型混积岩, 并且部分鲕粒的核心为石英颗粒, 并且石英颗粒较细, 主要为粉砂级别, 与鲕粒粒径差异较大

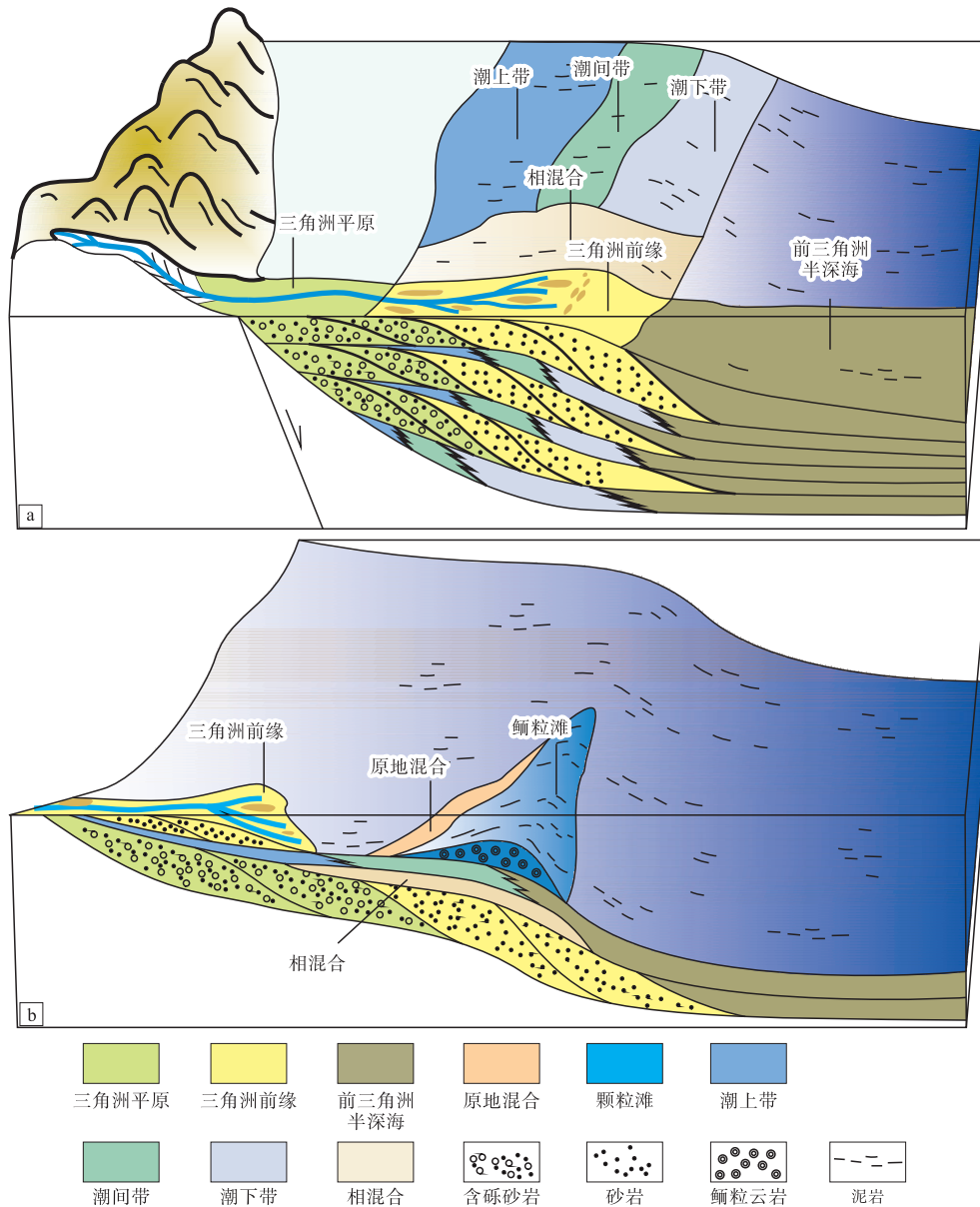


图 7 中条山地区长城系混积岩沉积模式

Fig. 7 Depositional models of mixed sedimentation in the Changchengian, Zhongtiao Mountains

(图 4-k)。粉—细粒级别的石英颗粒表明陆源碎屑搬运时的水动力弱；而鲕粒的形成，尤其是以石英颗粒为核心的鲕粒，呈中—波层状沉积(图 3-g, 3-h)，指示混积岩的形成应处于高能颗粒滩的沉积环境。本研究认为，粉砂级别的石英颗粒来源于碎屑颗粒沉积环境的末端，受潮汐作用搬运至碳酸盐岩颗粒滩的沉积地区，在波浪的作用下形成了以鲕粒发育为特征的混积岩。因此，该类混合沉积应为原地混合(图 7-b)。

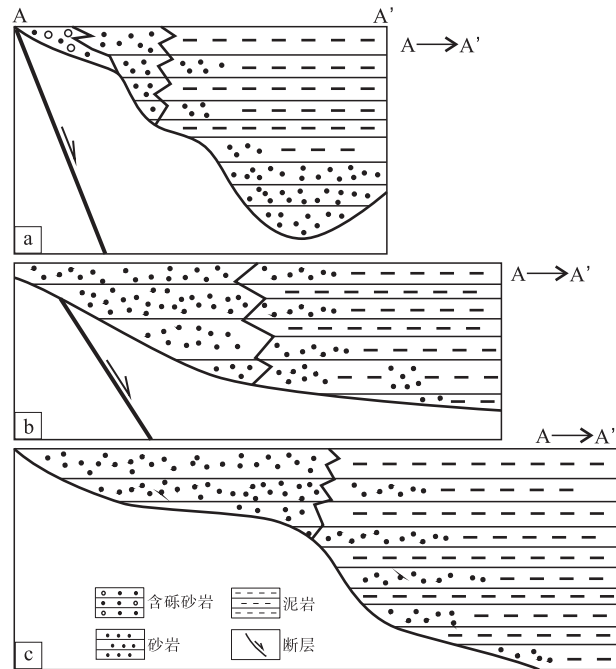
崔庄组是鄂尔多斯地区长城系中一套标志性页岩沉积，沉积范围广，但厚度较北大尖组小(图 6-c)，陆源碎屑供给减弱，其中的混合沉积类型与白草坪组类似，是相混合沉积的产物。

洛峪口组沉积时期，其混积岩类型亦为组分混合型混积岩，但主要特征为粒径基本一致的碳酸盐岩岩屑与石英颗粒的混合，颗粒分选磨圆好，岩屑类型主要为泥晶白云岩与混积岩。洛峪口组是长城系沉积范围大范围减小的时期，下伏地层在东北部大面积出露(图 6-d)，仅在运城一带存在沉积作用，早期沉积的混积岩与泥晶云岩被剥蚀，以母源碎屑的形式与石英碎屑混合。因此，该时期混合沉积为母源混合。向上裂谷作用停止，陆源碎屑供给停止，沉积了洛峪口组顶部的白云岩与蓟县系白云岩。

4 混合沉积控制因素分析

相混合过程主要由于碎屑沉积环境与碳酸盐岩沉积环境的变迁所造成，可以是垂向上的交替，也可以是横向上迁移，最终导致在 2 种沉积环境逐渐过渡时发生相混合沉积。然而，对于大部分情况，2 种沉积环境的交替是截然发生的，仅有少量情况会发生渐变。尽管如此，对于研究区这一类裂谷作用控制的海相沉积环境而言，由于陆源碎屑沉积物供给量受到裂谷作用影响而周期性变化，沉积环境的交替是广泛存在的。也正因如此，在整个陶家窑剖面长城系中，相混合过程普遍存在。而对于白草坪组，裂谷作用强，为陡坡地貌(图 8-a)，向盆地方向水深变化快，脱离陆源碎屑供给影响范围后，水深过大，不利于碳酸盐沉积，难以形成原地混合，多发育相混合沉积(图 7-a)。

在海相沉积环境，即便存在陆源碎屑供给，



a—白草坪组剖面；b—北大尖组剖面；c—崔庄组演化剖面。

剖面位置见图 1

图 8 山西省长城纪裂谷演化剖面(据山西省地质调查院, 2019)

Fig. 8 Profiles of the Changchengian rift evolution in Shanxi Province (after Shanxi Geological Survey Institute, 2019)

也会存在一定量的碳酸盐矿物沉积，这些碳酸盐沉积物主要是一些原地死亡的钙质生物，这些产物与陆源碎屑混合，会发生原地混合沉积。研究区出现的原地混合以北大尖组碳酸盐岩鲕粒与石英粉粒的混合为特征。北大尖组沉积时期，进入裂谷晚期，在陶家窑剖面处已经由陡坡带转换为缓坡带(图 8-b)，为颗粒滩的沉积提供了地貌条件。与此同时，宽缓的滨岸地貌也增加了陆源供给与颗粒滩之间的距离，是陆源碎屑供给对鲕粒沉积的影响减弱(图 7-b)。因此，研究区原地混合的发生，主要由于裂谷作用活动减弱所导致的地貌变化所引起。

母源混合在洛峪口组的出现，是由于长城系沉积晚期，裂谷活动停止，被动大陆边缘形成，沉积范围向西南方向萎缩，北东地区的沉积地层出露被剥蚀后，碳酸盐岩以内碎屑(岩屑)的形式与石英颗粒混合而发生母源混合。其中碳酸盐岩碎屑以泥晶云岩、混积岩为主，也表明碳酸盐岩与混积岩的沉积在研究区以北是广泛存在的。

除去与构造活动相关的地貌因素外，陶家窑剖面中，混积岩基本出现在每个组的顶部，基本对应

于海平面最低点，随后海平面加速上升(图 2)，这表明海平面的强烈变化是导致相混合与原地混合的可能因素之一。

5 结论

鄂尔多斯盆地中条山地区是鄂尔多斯盆地东南缘长城系典型露头区，本次研究在中条山陶家窑剖面中发现了大量混积岩，在中条山长城系各组内都有发育。通过镜下观察与沉积构造分析，混积类型包含了原地混合、相混合、间断混合与母源混合，涵盖了主要的 4 类混积过程，但在不同构造演化时期，混积过程存在明显差异。

在裂谷活动期(白草坪组沉积时期)，由于地貌坡度陡，水深变化快，向盆地方向，脱离碎屑岩沉积影响区域后水深过大，不利于形成碎屑沉积与碳酸盐沉积同时存在的环境，该时期发育相混合沉积；随着裂谷活动减弱，在北大尖组沉积时期地貌特征变为缓坡，缓坡地貌为碎屑沉积与碳酸盐沉积提供了条件，使得该时期不但发育有相混合，也发育原地混合；崔庄组沉积时期，是主要的海泛期，陆源碎屑供给少，发育少量相混合沉积；至洛峪口组沉积时期，裂谷作用停止，研究区东北部出露，早期沉积的碳酸盐与混积岩被剥蚀以岩屑搬运至沉积区，形成了母源混合沉积。另外，大量的混合沉积都发育在各组的顶部，属于海平面相对最低点，向上海平面快速上升，表明层序顶部海平面由低位向高位转变时期有利于混积岩的发育。

参考文献 (References)

- 陈世悦,张顺,刘惠民,鄢继华. 2017. 湖相深水细粒物质的混合沉积作用探讨. 古地理学报,19(2): 271-284. [Chen S Y,Zhang S, Liu H M,Yan J H. 2017. Discussion on mixing of fine-grained sediments in lacustrine deep water. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition),19(2): 271-284]
- 丁一,李智武,冯逢,翟中华,孙玮,汤聪,张葳,张长俊,刘树根. 2013. 川中龙岗地区下侏罗统自流井组大安寨段湖相混合沉积及其致密油勘探意义. 地质论评,59(2): 389-400. [Ding Y,Li Z W, Feng F,Zhai Z H,Sun W,Tang C,Zhang W,Zhang C J,Liu S G. 2013. Mixing of lacustrine siliciclastic-carbonate sediments and its significance for tight oil exploration in the Da'anzhai Member,Ziliujing Formation, Lower Jurassic, in Longgang Area, central Sichuan Basin. Geological Review,59(2): 389-400]
- 胡漾,祝禧艳,张瑞英,赵太平,张成立. 2024. 山西黎城地区长城系

沉积时代及源区分析: 碎屑锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素证据. 岩石学报,40(1): 295-312. [Hu Y,Zhu X Y,Zhang R Y, Zhao T P,Zhang C L. 2024. Depositional age and source analysis of the Changcheng System in the Licheng area, Shanxi Province: evidence from U-Pb geochronology and Lu-Hf isotope of detrital zircons. Acta Petrologica Sinica,40(1): 295-312]

吕奇奇,罗顺社,官玉龙,汪泽成,王铜山,张严. 2020. 华北克拉通南缘中-新元古界沉积充填特征及演化. 沉积学报,38(6): 1123-1139. [Lü Q Q,Luo S S,Guan Y L,Wang Z C,Wang T S,Zhang Y. 2020. Filling sedimentary characteristics and evolution of Meso-Neoproterozoic strata in the southern margin of the North China Craton. Acta Sedimentologica Sinica,38(6): 1123-1139]

梅冥相,刘智荣,孟庆芬,高金汉. 2007. 南口虎峪中元古界大红峪组混积岩系的层序地层划分: 海侵砂岩中的微生物席碎片简介. 地质科技情报,26(1): 33-40. [Mei M X,Liu Z R,Meng Q F, Gao J H. 2007. Sequence-stratigraphic divisions of the mixed rock system for Mesoproterozoic Dahongyu Formation at Huyu section of Nankou Town in Beijing: brief introduction on microbial-mat chips in transgressive sandstones. Geological Science and Technology Information,26(1): 33-40]

潘星. 2021. 鄂尔多斯盆地南缘中-新元古代成源环境与有机质富集机制. 西北大学博士学位论文. [Pan X. 2021. Sedimentary environments and mechanism of organic matter enrichment of the Meso-Neoproterozoic Era in the southern margin of Ordos Basin. Doctoral dissertation of Northwest University]

庞岚尹,祝禧艳,胡国辉,仇一凡,苏文博,王世炎,赵太平. 2021. 华北克拉通南缘中-新元古代年代地层格架和沉积演化过程研究的新进展. 地层学杂志,45(2): 180-195. [Pang L Y,Zhu X Y, Hu G H,Qiu Y F,Su W B,Wang S Y,Zhao T P. 2021. Advances in the study of Meso-Neoproterozoic stratigraphic chronology and sedimentary evolution in the southern margin of the North China Craton. Journal of Stratigraphy,45(2): 180-195]

山西省地质调查院. 2019. 中国区域地质志·山西志. 山西省地质调查院. [Institute of Shanxi Geological Survey. 2019. Regional Geology of China. Annals of Shanxi. Institute of Shanxi Geological Survey]

王昌勇,刘帅,李胡蝶,常玖,许兴斌,范亚楠,旷红伟. 2022. 神农架地区中元古界混合沉积特征及其发育模式: 以神农顶乱石沟组-台子组剖面为例. 沉积学报,40(6): 1649-1659. [Wang C Y,Liu S,Li H D,Chang J,Xu X F,Fan Y N,Kuang H W. 2022. Characteristics and development model of Mesoproterozoic mixed deposits in Shennongjia Area: an example from Shennongding section of Luanshigou Formation-Taizi Formation. Acta Sedimentologica Sinica,40(6): 1649-1659]

王青春,贺萍,杜江民,刘荣访,李伟. 2017. 太行山中南段长城系赵家庄组沉积特征. 西南石油大学学报: 自然科学版,39(4): 47-56. [Wang Q C,He P,Du J M,Liu R F,Li W. 2017. Depositional characteristics of the Zhaojiazhuang Formation, Changcheng Sys-

- tem, in the Middle Southern Areas of the Taihang Mountains. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 39(4): 47–56]
- 王玺童, 王怀厂, 官玉龙, 刘文香, 罗顺社, 吕奇奇, 张严. 2021. 山西黎城中元古界长城系常州沟组岩石学特征和沉积环境. *海相油气地质*, 26(1): 71–80. [Wang X T, Wang H C, Guan Y L, Liu W X, Luo S S, Lü Q Q, Zhang Y. 2021. Petrological characteristics and sedimentary environment of Changzhougou Formation of the Mesoproterozoic Changcheng System in Licheng, Shanxi. *Marine Origin Petroleum Geology*, 26(1): 71–80]
- 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 of terrigenous clastics and carbonate. *Acta Sedimentologica Sinica*, 8(2): 59–66]
- 叶茂松. 2020. 环渤中坳陷古近系沙河街组一二段混积岩特征及优质储层形成机理. 中国地质大学(武汉)博士学位论文. [Ye M S. 2020. Characteristics of siliciclastic-carbonate sediments and forming mechanism of high-quality reservoirs in the Member 1~2 of the Shahejie Formation, circum-Bozhong Depression, Bohai Bay Basin. Doctoral dissertation of China University of Geosciences (Wuhan)]
- 张严, 罗顺社, 吕奇奇, 王铜山, 詹贵斌. 2018. 华北克拉通南缘中条山地区汝阳群沉积特征与层序地层分析. *东北石油大学学报*, 42(6): 22–31. [Zhang Y, Luo S S, Lü Q Q, Wang T S, Zhan G B. 2018. Sedimentary characteristics and sequence stratigraphic of Ruyang Group in Zhongtiaoshan area in south margin of North China Craton. *Journal of Northeast Petroleum University*, 42(6): 22–31]
- 赵太平, 邓小芹, 胡国辉, 周艳艳, 彭澎, 翟明国. 2015. 华北克拉通古/中元古代界线和相关地质问题讨论. *岩石学报*, 31(6): 1495–1508. [Zhao T P, Deng X Q, Hu G H, Zhou Y Y, Peng P, Zhai M G. 2015. Paleoproterozoic-Mesoproterozoic boundary of the North China Craton and the related geological issues: a review. *Acta Petrologica Sinica*, 31(6): 1495–1508]
- 郑元, 吕洪波, 章雨旭, 王敏, 孙闯. 2009. 山西黎城中元古代砂岩层面多种痕迹特征及成因初析. *地质论评*, 55(1): 1–9. [Zheng Y, Lü H B, Zhang Y X, Wang M, Sun C. 2009. Miscellaneous traces on the bedding planes of Mesoproterozoic sandstones in Licheng, Shanxi: characteristics and origin analysis. *Geological Review*, 55(1): 1–9]
- André J P, Biagi R, Moguedet G, Buffard R, Clément G, Redois F, Baloge P A. 2003. Mixed siliciclastic-cool-water carbonate deposits over a tide-dominated epeiric platform: the faluns of L'anjou Formation (Miocene, w. France). *Annales De Paléontologie*, 89(3): 113–123.
- Chiarella D, Longhitano S G, Sabato L, Tropeano M. 2012. Sedimentology and hydrodynamics of mixed (siliciclastic-bioclastic) shallow-marine deposits of Acerenza (Pliocene, southern Apennines, Italy). *Italian Journal of Geosciences*, 131(1): 136–151.
- Chiarella D, Longhitano S G, Tropeano M. 2017. Types of mixing and heterogeneities in siliciclastic-carbonate sediments. *Marine and Petroleum Geology*, 88: 617–627.
- Chiarella D, Moretti M, Longhitano S G, Muto F. 2016. Deformed cross-stratified deposits in the early Pleistocene tidally-dominated catanzaro strait-fill succession, Calabrian arc (southern Italy): triggering mechanisms and environmental significance. *Sedimentary Geology*, 344: 277–289.
- Dorsey R J, Kidwell S M. 1999. Mixed carbonate-siliciclastic sedimentation on a tectonically active margin: example from the Pliocene of Baja California sur, Mexico. *Geology*, 27(10): 935–938.
- Halfar J, Lucio G, Mutti M, José E V, Borges J M. 2004. Nutrient and temperature controls on modern carbonate production: an example from the gulf of California, Mexico. *Geology*, 32(3): 213–216.
- Longhitano S G, Chiarella D, Muto F. 2014. Three-dimensional to two-dimensional cross-strata transition in the lower Pleistocene Catanzaro tidal strait transgressive succession (southern Italy). *Sedimentology*, 61(7): 2136–2171.
- Meneill D F, Klaus J S, Budd A F, Lutz B P, Ishman S E. 2011. Late Neogene chronology and sequence stratigraphy of mixed carbonate-siliciclastic deposits of the Cibao Basin, Dominican Republic. *Geological Society of America Bulletin*, 124(1–2): 35–58.
- Mount J F. 1984. Mixing of siliciclastic and carbonate sediments in shallow shelf environments. *Geology*, 12(7): 432–435.

(责任编辑 郑秀娟; 英文审校 陈吉涛)