

吕梁—陕北地区马家沟组中 小层序特征及其成因

高永丰 魏瑞华

(河北地质学院, 石家庄 050031)

提 要 吕梁—陕北地区马家沟组碳酸盐岩-蒸发岩向上变浅层序由一系列小层序垂向叠置而成。本文主要通过小层序特征及其分布规律的研究,认为小层序是由叠加在三级海平面变化旋回上的频繁小级别海平面升降旋回形成的,这种小级别海平面旋回与地球轨道旋回引起的米兰科维奇旋回有关。

关键词 小层序 海平面变化旋回 碳酸盐岩 马家沟组

第一作者简介 高永丰 男 39岁 讲师 石油地质学与沉积学

80年代至今,层序地层学和海平面变化分析所取得的新进展已成为沉积学领域最引人注目的热点。这一领域的新发展使沉积学家们认识到地质时期海平面变化和与地球轨道变化有关的气候旋回对沉积作用有着深刻的影响,并有可能从沉积剖面中识别。华北地台奥陶系马家沟组碳酸盐岩具有明显的旋回性和事件特征,对它的研究有助于认识频繁的海平面变化对台地碳酸盐沉积体系演化的影响和指导能源矿产的找寻。

在研究区内,中奥陶碳酸盐岩由怀远运动形成的区域性平行不整合面与下奥陶统亮甲山组为界,与上覆石炭系中统呈假整合接触。马家沟组可分为6个岩性段,其中1、2、3段称为下马家沟组,4、5段为上马家沟组,马6段相当于华北的峰峰组。由于后期剥蚀作用,马6段在离石、中阳剖面仅存20余米,而在柳林和西部井区上马家沟组马5段直接与石炭系中统呈假整合接触。上、下马家沟组分别是二个完整的碳酸盐岩-蒸发岩层序,其露头剖面可与西部井区剖面对比(图1)。

本文旨在说明上、下马家沟组旋回层序中小层序的类型、特征及分布规律,探讨小层序的成因。层序界面的确认和对比将允许建立等时面格架,以解释沉积环境和古地理演化。

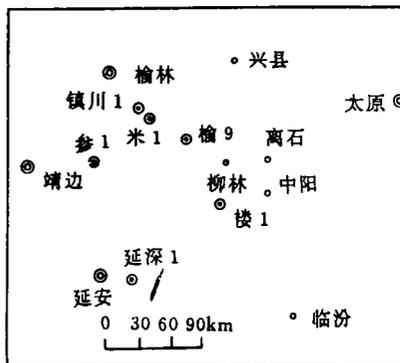


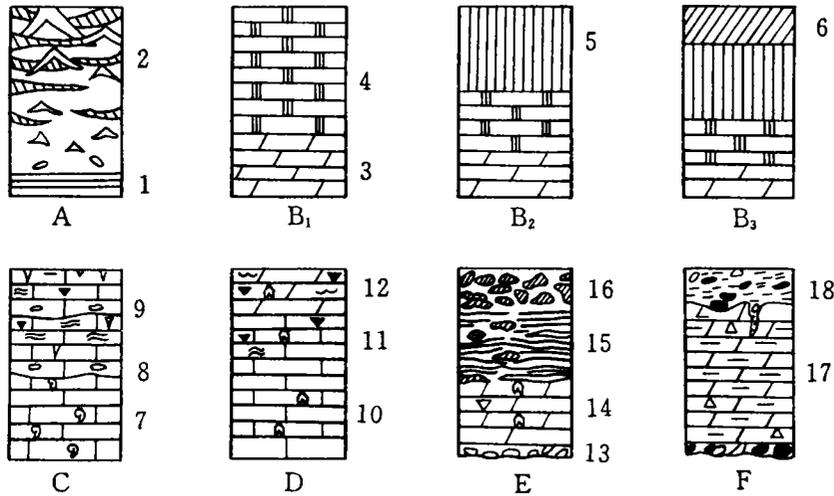
图1 研究剖面位置图

● 钻井 ○ 露头剖面

Fig. 1 Location map of the studied section

1 小层序的类型

本文所指的小层序是地层中见到的成因上相关的岩相整合序列,这一序列是由小旋回过程形成的。小层序的厚度变化于数十厘米至五米之间,都具有清楚的界面,底界面为突然加深相变面,很少或没有海进沉积记录。大多数小层序表现出向上变浅特征。根据小层序的岩相组合特征,研究区内马家沟组中能够识别出 6 类小层序,它们占了全部可辨认小层序的 90%以上(图 2)。



1. 富有机质纹层状厚层泥晶灰岩 2. 生物扰动灰岩 3. 厚层块状泥晶白云岩 4. 块状硬石膏岩 5. 岩盐 6. 肉红色含钾岩盐 7. 厚层含化石泥晶灰岩 8. 颗粒灰岩薄层 9. 藻纹层泥晶灰岩 10. 含板状石膏假晶纹层状泥晶灰岩 11. 含板状石膏假晶纹层状泥晶灰岩 12. 薄层泥晶白云岩 13. 底砾岩薄层 14. 浅灰色泥晶白云岩、粘土含量高,具石膏假晶和铸模 15. 藻纹层泥晶白云岩,具肠状,瘤状硬石膏,局部为同生角砾岩 16. 鸡笼铁丝状硬石膏岩 17. 纹层状泥屑白云岩 18. 泥岩,黑色泥砾和泥晶白云岩砾常见

图 2 研究剖面中小层序的垂向相序

Fig. 2 Vertical successions of the facies in the small-scale sequences within the studied section

A 型小层序: A 小层序岩相特征是质纯的厚生物泥晶灰岩相,是开阔海较深潮下环境形成的。在小层序垂向上,生物化石数量、种类和生物扰动程度发生明显变化。层序的底部为水平纹层状泥晶灰岩,色暗,富有机质和出现莓状黄铁矿和稀疏的较完整的底栖生物化石。向上底栖和内生物化石种类和数量逐渐增多,生物扰动程度也明显增强。小层序的下部只稀疏地分布着个体小形态单调的生物潜穴,而上部潜穴个体和数量增大,形态多样,这些潜穴和层面生物迹相互交织成网状。生物潜穴内普遍发生白云岩化,形成了典型的云斑灰岩。因此,小层序在垂向上表现出白云岩化向上增强的趋势。

B 型小层序: 主要岩相是泥晶白云岩、硬石膏岩、岩盐和黑色泥岩。泥晶白云岩呈厚层块状构造,色暗,富有机质,粘土含量少,缺乏颗粒和浅水成因构造和具泥晶灰岩交代残余。硬石膏岩以块状、纹层状和条带状产出,多呈浅灰色粉晶至细晶结构。条带状硬石膏夹于泥晶

白云岩和岩盐中,其边缘凹凸不平。纹层状硬石膏则主要分布于泥晶白云岩中,纹层是由硬石膏和白云岩在纵向上含量变化显示出来,纹层在侧向上延伸范围大。岩盐以黑色胶粒状、黑色晶粒状、白色晶粒状和肉红色晶粒状不同形式出现。化学分析表明,黑色胶粒状和黑色晶粒状岩盐是硬石膏含量较高所致,而肉红色岩盐是KCl含量较高的结果^[1]。黑色泥岩有机质含量高,发育完好的立方体黄铁矿。有些泥岩还有很强的沥青味和H₂S味。黑色泥岩常以厚几厘米至几十厘米的夹层分布于块状硬石膏岩或岩盐中。

根据小层序中岩相类型的发育完全程度,可以分为三个亚类。质纯的厚层泥晶白云岩总是出现在小层序的底部,向上白云岩中出现了条带状和层纹状硬石膏,硬石膏在白云岩中所占的比例不断增高,渐演化为块状硬石膏(B₁小层序)。B₂小层序是在B₁小层序的基础上发育了黑色胶粒状、黑色晶粒状和白色晶粒状岩盐,表明了由石膏沉积渐转变为纯石盐沉积。B₃小层序以其顶部为肉红色晶粒状含钾岩盐为特征。以上小层序的共同特征是层序内部表现出岩相渐变,其顶界面具蒸发岩溶解面。

B小层序:序中泥晶白云岩呈厚层状,富含有机质,缺乏浅水沉积构造;硬石膏岩呈块状、条带状和层纹状,没有发现瘤状、鸡笼铁丝网状硬石膏;黑色泥岩富有机质、黄铁矿和具沥青味和H₂S味。这些都是深水沉积的直接证据。因此,B小层序是形成于较深泻湖环境。小层序中岩相的垂向分布表明,在小层序的形成过程中,随蒸发作用的进行,环境水体的盐度不断增高。小层序顶部的蒸发岩类型指示了小层序沉积晚阶段水体的相对盐度,B₁、B₂和B₃分别对应低、中、高盐度类型。

C小层序:小层序下部为块状生物泥晶灰岩,呈深灰色,底栖化石类型多。层序的上部为纹层状泥晶灰岩,纹层呈微波状,单个纹层可在数米内连续。纹层状泥晶灰岩具鸟眼、垂直潜穴、生物迹和实体化石碎片,在其顶部垂直潜穴尤为发育。与下部的块状泥晶灰岩相比,纹层泥晶灰岩的颜色明显的变浅,至层序的顶部呈现淡褐氧化色,顶面具泥裂。小层序内常分布侧向分布局限的颗粒岩层,颗粒岩之下为冲刷面。以上特征表明,小层序形成于由浅潮下向潮间带沉积环境演化过程,颗粒岩是潮汐水道环境的产物。

D小层序:底部为富有机质的黑色泥晶灰岩,生物化石单调稀少,可见板状石膏假晶和黄铁矿。中部纹层状泥晶灰岩中板状石膏假晶有时可局部富集显示层理构造。层序的上部藻纹层泥晶白云岩呈灰白色、薄层状,具泥屑、石英粉砂和板状石膏假晶。鸟眼和泥裂在顶部发育,鸟眼主要由粉末状石膏充填。在层序的顶部白云岩化最强,但局部白云岩化可穿切至厚层泥晶灰岩,泥晶白云岩与纹层状泥晶灰岩的界限常切割层面。这一层序反映了微咸化水潮下向潮间环境演化的过程。与C小层序的不同之处在于D小层序的沉积环境水体的盐度有所增高,允许少量板状石膏沉淀和在潮间-潮上带早白云岩化发生。

E小层序:小层序显示出萨布哈旋回沉积特征。在冲刷面之上分布砾石层,砾石成分与下伏岩性相同。小层序的下部是浅灰色泥晶白云岩,具泥晶和泥质条带、藻团块、波状叠层构造、石膏假晶、铸模和鸟眼构造。中部藻纹层泥晶白云岩含较多粘土和石英粉砂,夹肠状和瘤状石膏,干化裂隙和帐蓬构造发育。白云岩常被切割成多边形角砾,角砾间被细碎屑和石膏充填胶结形成同生角砾岩。层序的顶部为鸡笼铁丝状硬石膏岩。这是一个从潮间带下部向潮上萨布哈演化过程中形成的垂向层序。

在东部露头区,E小层序常形成膏溶垮塌角砾岩。不同大小的角砾混杂堆积,角砾发育大量的蜂窝状溶孔溶洞,角砾岩呈疏松或半胶结状,填隙物为细碎屑和亮晶方解石胶结物,

亮晶方解石胶结物可绕角砾形成皮壳,使岩石呈疮塔状。

F 小层序:小层序底部常为冲刷面,冲刷面上分布白云岩砾石和黑色砾石。下部为纹层状泥屑白云岩,暗色纹层由泥晶白云岩细碎屑和粘土、石英粉砂构成,亮纹层主要是微亮晶白云石。纹层呈现出连续光滑或微波状,局部可出现卷曲层理。干裂和帐篷构造常将泥屑白云岩角砾化形成角砾层。在白云岩的顶部发育网状裂隙、管状孔洞和环颗粒裂隙,这些裂隙和孔洞被粉砂级碎屑、粘土和亮晶胶结物充填,有时可显示底构造。小层序的顶部为泥岩,具黑色泥砾和白云岩砾。以上特征表明,在小层序的形成过程中,由于海平面降低引起了潜水面降低,暴露、渗透成岩作用和成壤作用发生。

2 小层序的分布

以上描述的 6 类小层序概括了研究区马家沟期存在的各种沉积环境随时间的演化。这些小层序在研究区马家沟组地层柱中普遍存在。小层序具明显的相突变界面,侧向上连续,可以在相距几十公里的剖面间对比。详细的研究表明,数个(一般 4~6 个)小层序构成了中型层序。这些中型层序都具有易于识别的界面,在垂向上表现出明显的向上变浅趋势。柳林、中阳剖面的中型层序可以与相距数百公里之外的临汾剖面对比。一系列不同类型的小层序垂向叠置分别构成了上、下马家沟组碳酸盐岩-蒸发岩大层序。大层序的下部为开阔海较深潮下相,其顶界面则以潮上萨布哈相、暴露相为特征,表现出向上变浅趋势。通过大层序垂向上小层序类型分布的研究,大层序向上变浅趋势显示出明显的阶梯式特征,而小层序的垂向叠置在研究区东、西部表现出明显的差异。图 3 示意了研究区东、西部上马家沟组大层序中小层序类型的垂向演化趋势。在整个研究区,上马家沟组层序的底部都由 A 小层序构成,大层序都结束于 E、F 小层序。而在大层序的中部,研究区的东、西部则分别为 C+D 和 B 小层序类型。这种小层序垂向演化差异反映了东、西部在上马家沟期沉积环境和古地理演化的区别。

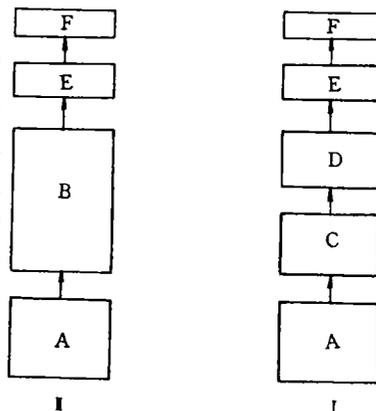


图 3 研究区上马家沟组碳酸盐岩-蒸发岩层序中小层序类型的分布
I:东部露头区 II:西部钻井区
Fig. 3 Vertical distribution of the types of small-scale sequences in Upper-Majiagou Formation carbonate-evaporite sequences. I: Eastern crop area, II: Western drilled area.

3 小层序的成因

碳酸盐沉积环境水体的物理化学条件和深度控制着有机和无机碳酸盐的形成。沉积环境水体的深度和能量直接或间接地决定了沉积物的堆积。而沉积环境水深的变化取决于盆地下沉速率、全球海平面变化和沉积物堆积速率。马家沟组普遍存在的以上描述的各类小层序都具有明确的加深相突变面,指示了沉积环境的不连续,这种界面独立于相变,能够在侧向上长距离追索和剖面间对比,这表示了是由影响整个盆地的水体突然加深事件形成的。这种水体突然加深事件被认为是盆地范围内快速海平面上升形成的^[3]。小层序内部在垂向上表现出连续相变,反映了沉积环境水体深度和物理化学条件的连续变化。大多数小层序表现

出向上变浅趋势,表明了小层序是在沉积物的堆积速率超过了下沉速率与海平面变化速率之和的相对稳定时期形成的^[4]。

马家沟组小层序在地层垂向上叠置构成了中型层序和大层序。这些大层序表现出阶梯式的向上变浅趋势和突变加深沉积界面,这意味着在层序的形成过程中,在较高级别的海进-海退背景下叠加了一系列频繁小级别海平面变化。频繁小级别海平面变化使沉积水体的深度和物理化学条件反复变化形成了小层序垂向叠置。由于频繁小级别海平面变化速率明显地大于较高级别海平面变化速率,频繁小级别海平面变化可以形成具明显边界的小层序^[8]。由于频繁小级别海平面变化是叠加在高级别的海进海退过程中,在大层序垂向上小层序的类型分布表现出系统的变异。

当长期海平面旋回的上升阶段或高水位期,在较深水沉积环境,频繁小级别海平面变化的幅度不足以达到出现明显相变的水深度临界值,形成的沉积相保持在较深潮下相。但地层记录中能够反映出小级别海平面变化过程中水体的物理化学条件和陆源输入量的变化。研究区内广布着 A 小层序意味着大层序沉积初期整个研究区处于统一的高海平面体系。A 小层序在垂向上表现出生物化石种类与数量和生物扰动程度逐渐增大的趋势,而这种趋势在边界处突然终止。小层序底界之上形成了化石类型单调稀少、缺乏生物扰动的富有机质纹层状泥晶灰岩。这种边界两侧的突变表示了适于底栖和内生生物发育和活动的的环境发生了明显的不连续,沉积环境底水的氧化还原条件、透光性、有机质供给和盐度都影响着底栖和内生生物的发育和活动^[6],造成沉积环境中以上诸因素的变化可能与相对海平面迅速上升导致的水体突然加深和上升海平面可以使得高盐度海水回流到邻近盆地有关。继快速海侵事件之后的缓慢海平面下降时期,适于底栖和内生生物发育和活动的底水环境逐渐建立,形成了小层序内化石种类、数量、生物扰动程度和变异度在垂向上逐渐增大的趋势。因此,在地层层序中记录下了生物和生物活动对海侵-海退旋回的响应。

西部井区分布的 B 型小层序中的岩相特征表明,它们是在较深泻湖环境形成的。小层序垂向岩相序列表明在小层序形成过程中,随蒸发作用进行,海水的盐度不断增大。小层序底部的块状泥晶白云岩与下伏小层序的蒸发岩呈突变接触和蒸发岩普遍具溶解面。这反映了在泻湖蒸发过程中,卤水的淡化是普遍存在的,而淡化是旋回性的。因此,这种淡化可能是间歇性正常海水补给而引起的。间歇性正常海水补给是由盆地范围内周期性海平面迅速上升造成的。

当高级别海平面下降速率等于或大于盆地下沉速率时,在浅水潮缘环境,频繁小级别海平面升降可以使相对海平面达到临界水深,因而相变出现。小层序中可以由浅潮下、潮间或潮上相垂向叠置(C,D,E 小层序)。如果小级别海平面变化过程中环境的初始水深不大或沉积物堆积速率接近于海平面上升的最大速率,可以发生暴露、渗透成岩作用和侵蚀作用(F 小层序)。

从小层序的分布可以看出,它们不但受高级别海进-海退旋回阶段的控制,而且与古地理、古环境有密切的关系。在东部露头区,大层序垂向上小层序类型的变化显示出沉积环境是由较深开阔海潮下向浅潮下、潮间环境演化,最终以潮上萨布哈或局部陆上暴露环境结束高级别海进-海退旋回。而在西部井区,大层序中部则以深泻湖形成的白云岩-蒸发岩小层序垂向叠置为特征,这与东部区表现出明显的古地理差异。张吉森等(1991)^[1]研究发现,上马家沟组巨厚岩盐是在区域蒸发背景下受局部隆起和拗陷控制的,岩盐的展布呈近于南北向。

因此,在我们的研究区东、西部之间可能存在一相对隆起区。在海平面快速上升时期,正常海水可以越过这一相对隆起区对泻湖提供补给。随间歇性海平面上升的反复发生,凹陷区白云岩-蒸发岩小层序垂向叠置,凹陷不断被充填,深泻湖不断变浅。当巨厚的蒸发岩沉积结束时,该区和其它地区一样变成了广阔的陆表海潮坪沉积,形成了萨布哈层序。因此,间歇性海平面升降反复出现可以大大地改变古地理景观。

马家沟组大层序的底界为海泛面,顶界面以潮上萨布哈、陆上暴露和侵蚀面为特征,整个层序在垂向上表现出典型的台地碳酸盐沉积体系的向上变浅沉积序列,它们在整个盆地内可以对比。这些特征表明,大层序在时限上相当于三级海平面升降旋回,其时间间隔1~5Ma^[9,10]。越来越多的证据表明三级海平面旋回上叠加的频繁小级别海平面变化旋回在许多地质时代普遍存在,尤其是在潮缘-泻湖碳酸盐岩层序中很好地记录了这种频繁小级别海平面旋回变化^[7]。许多作者已经证明潮缘-泻湖碳酸盐岩小级别层序与米兰科维奇(Milankovitch)旋回有关^[7]。在低纬度地区,米兰科维奇倾斜旋回的记录常缺失^[2]。10万年周期的偏心率旋回层序和2.1万年周期的日差旋回层序在许多地层剖面中得到了最好的发育^[8]。Pisias和Imbrie(1986)^[5]证明了10万年周期的偏心率旋回在控制更新世气候过程中起了重要的作用。考虑到华北地台在奥陶纪属低纬度地区、马家沟组大层序的时限(三级旋回为1~5Ma)和小层序的匹配数目(上马家沟组大层序中共53个小层序),小层序的时限最可能为10万年周期的偏心率旋回或2.1万年周期的日差旋回。但是,要建立小层序时限与米兰科维奇旋回类型之间精确的关系,需要更精确的古生物和地层同位素年代资料。

收稿日期:1994年11月1日

参 考 文 献

- [1] 张吉森等,1991,鄂尔多斯东部地区岩盐的发现、成因及其意义,沉积学报,9(2):34~43.
- [2] Anderson, R. Y., 1984, Orbital forcing of evaporite Sedimentation, NATO ASI Ser C, 126, 147~162.
- [3] Goodwin, P. W. and Anderson, E. J., 1985, Punctuated aggradational cycles: a general hypothesis of episodic stratigraphic accumulation. *J. Geol.*, (93):51~533.
- [4] Kendall, CGStC, Schlager, W., 1981, Carbonates and relative changes in sea level, *Mar. Geol.*, (44):181~212.
- [5] Pisias, N. G., Imbrie J., 1986, Orbital geometry, CO₂, and pleistocene climate. *Oceanus*, (29):43~49.
- [6] Savrd, C. E., Bottjer, D. J., 1987, The eraerombiczone, a new oxygendeficient marine biofacies. *Nature*, (327):54~56.
- [7] Strasser, A., 1988, Shallowing-upward sequences in Purkeckian Carbonates (lower most Cretaceous, Swiss and French Jura Mountains). *Sedimentology*, (35):369~383.
- [8] Strasser, A., 1991, Lagoonal-peritidal sequences in carbonate environments: autocyclic and allocyclic processes, In: P. G. Einsele *et al.*, *Cycles and Events in Stratigraphy*, Springer-Verlag, 709~721.
- [9] Van Wagoner *et al.*, 1988, An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions, In: *Sea-level changes An Integrated Approach*, SEPM, Special publication, 42, 39~45.
- [10] Van Wagoner *et al.*, 1987, Seismic Stratigraphy interpretation Using Sequence Stratigraphy, A. A. P. G., *Stud. Geol.*, 27, 11~14.

The Characteristics and Origin of Small-scale Sequences in Majiagou Formation (Middle Ordovician) in the Luliang-Northern Shaanxi Area

Gao Yongfeng and Wei Ruihua

(Hebei College of Geology, Shijiazhuang 050031)

Abstract

Shallowing-upward sequences in the Majiagou carbonates in the Luiliang-Northern Shaanxi area consist of a great number of small-scale sequences. The small-scale sequences (1.2~5 m in thickness) are the fundamental units of the Majiagou sedimentary deposit. The small-scale sequences have obvious boundaries of abrupt change to deeper facies, and are of internally regressive deposits, containing little or no transgressive deposits. The small-scale sequences are vertically stacked and laterally extensive asymmetry cycles for tens of kilometers (independent of lateral facies). These sequences appear to occur in the depositional facies of most environments.

Six types of small-scale sequences can be recognized, i. e., A; trace-fossil cycles in deeper open sea subtidal facies; B; dilution cycles of hypersaline brine in deeper lagoon facies; C; intertidal to supratidal overprinting of shallow subtidal facies; D; intertidal to supratidal overprinting of shallow brackish subtidal facies, often associated with early dolomitization; E; Sabkha sequences; F; terrestrial overprinting of intertidal facies. The characteristics and distribution of small-scale sequences were formed during high-frequency but low-amplitude sea level variations superimposed on the third order transgressive-regressive cycles. The types of the small-scale sequences depend on the position of high-frequency sea level variations within the third order cycles and the palaeotopography of sedimentary environments. During the high sea level of long-term cycles periodically changed the physical-chemical conditions of water body in deeper open sea subtidal facies. Thus small-scale sequences recorded the benthic and infauna response to transgressive-regressive cycles. In shallow peritidal environments during the longer-term sea level fall, high-frequency sea level variations made the relative sea level reach the critical water depth. Consequently, C, D, E, F small-scale sequences were formed. In local depressions, the high-frequency sea level rise provided the punctuated supplement of sea water for the evaporation and caused the dilution cycles of hypersaline brine which formed B small-scale sequences. High-frequency small-scale sea level variations seem to be related to Milankovitch climatic cycles caused by the Earth's orbital cycles. Identification and correlation of sequence boundaries make it possible to set up a framework of isochronous surfaces, and thus to interpret in detail the palaeographic, sedimentological evolution of the Majiagou carbonate environments and to predict the distribution of oil-gas reservoirs in the sedimentary basin.