

上扬子地区寒武纪岩相古地理:对中国小陆块 海相盆地演化特点及其控藏效应的启示

陈安清¹, 侯明才¹, 林良彪¹, 邢凤存¹, 徐胜林¹, 钟怡江¹,

杨 帅¹, 熊 晨³, 张奎华², 文 龙², 陈洪德¹

(1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059; 2. 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院, 四川 成都 610041; 3. 四川省地震局, 四川 成都 610041)

摘要:岩相古地理重建对认识盆地的沉积环境演化、沉积建造时空分布和油气勘探具有重要意义。为揭示上扬子地区寒武纪古地理背景这一先决条件对新发现的安岳巨型气田的控制作用及其对碳酸盐岩油气勘探的启示,本文综合油气勘探的地震、钻井资料及盆地周缘的露头剖面地质调查成果,重建了寒武纪两个构造层序的岩相古地理,分析了寒武系生储盖组合发育的特征。结果表明:早寒武世早期,伸展背景形成了破碎型克拉通盆地,近南北向的深水槽切割了上扬子克拉通,充填了丰富的富有机质沉积物,成为深层巨型生烃灶;早寒武世晚期—晚寒武世,上扬子板块转变为准稳定的构造背景,盆地性质转换为陆表海型克拉通坳陷盆地,沉积建造以发育潮坪楔及伴生的膏盐为特征,陆表海潮汐作用和古隆起控制了储层宏观分布;构造活跃期的裂陷沉积之上叠加以准稳定期的克拉通内坳陷沉积,形成了类似裂陷盆地的由裂谷层序和后裂谷层序组成的剖面形态像牛头的牛头型沉积建造结构;与大板块若即若离的亲缘过程中,构造活跃期和构造准稳定期交替叠合的盆地古地理特点是我国前晚三叠世小陆块离散演化阶段的一大特色,在沉积建造上形成良好的生—储—盖空间配置,是克拉通油气勘探的两大重要领域。

关键词:古地理重建;碳酸盐岩;深层油气;寒武纪;上扬子板块

中图分类号:P531

文献标识码:A

引言

华南大陆的古地理再造是当前的研究热点。越来越多的证据表明扬子与华夏地块在新元古代中期已经拼合形成统一古陆^[1-2],并且可能存在一个更大范围的大南方板块^[3]。该统一的古陆在Rodinia超大陆裂解过程中,以陆内造山作用和陆内裂谷作用为特色,形成的典型构造包括加里东期的江南-雪峰陆内造山带和江绍—萍乡—钦防一线的南华陆内裂谷构造^[1]。虽然对这一备受关注的科学问题有了较统一的认识,但对于华南板内的构造古地理细节仍然知之甚少。上扬子地区的四川

盆地是我国重要的油气能源基地。最近,其深层碳酸盐岩油气勘探和页岩气勘探再次成为世界焦点。最为引人注目的是基于地震和钻井资料揭示了“绵阳—长宁”深水富有机质沉积区,推动了四川盆地深层震旦—寒武系的古老碳酸盐岩巨型气田(安岳气田)的发现,也引起了众多对板内隐伏构造的争论^[4-7]。争论焦点主要集中在“绵阳—长宁”深水槽的构造属性及其对油气的控制作用上。其构造模式有拉张槽^[4]、坳拉槽^[5]、裂谷^[6]和拉张侵蚀槽^[7]等多种不同的观点。通过总结分析已有的资料及当前争论的焦点,本文试图重新建立上扬子寒武纪的古地理模型,讨论其对油气勘探的启示。

收稿日期:2020-04-20; 改回日期:2020-05-13

作者简介:陈安清(1981—),男,教授,沉积学与石油地质学。E-mail:chenanqing2012@cdut.edu.cn

通讯作者:侯明才(1968—)男,教授,沉积学与石油地质学。E-mail:houlmc@cdut.edu.cn

资助项目:国家科技重大专项(2017ZX05008005)、国家自然科学基金面上项目(41872109)、中国石油科技重大专项“深层油气储集层形成机理与分布规律”(2018A-0103)。

1 地质背景

四川盆地位于上扬子板块,是中国南方最大的陆上叠合盆地。上扬子地区的沉积盖层纵向演化经历了台地(海相)、盆地(陆相)和褶皱隆升改造三大阶段。震旦系是盆地第一个沉积盖层,上震旦统(陡山沱组和灯影组)广泛超覆在不同时代的老地

层之上。晚震旦世一早寒武世表现为伸展运动,灯影组发育白云岩为主,下寒武统则以深水黑色泥岩发育为主。中、上寒武统一志留系主要为台地阶段,中、上寒武统主要为白云岩沉积,奥陶系为灰岩发育,志留系发育碎屑岩。志留纪末期受隆升剥蚀的影响,大面积地层被剥蚀。寒武纪,上扬子作为中国大南方陆块的一部分位于原特提斯大洋之中^[8]。

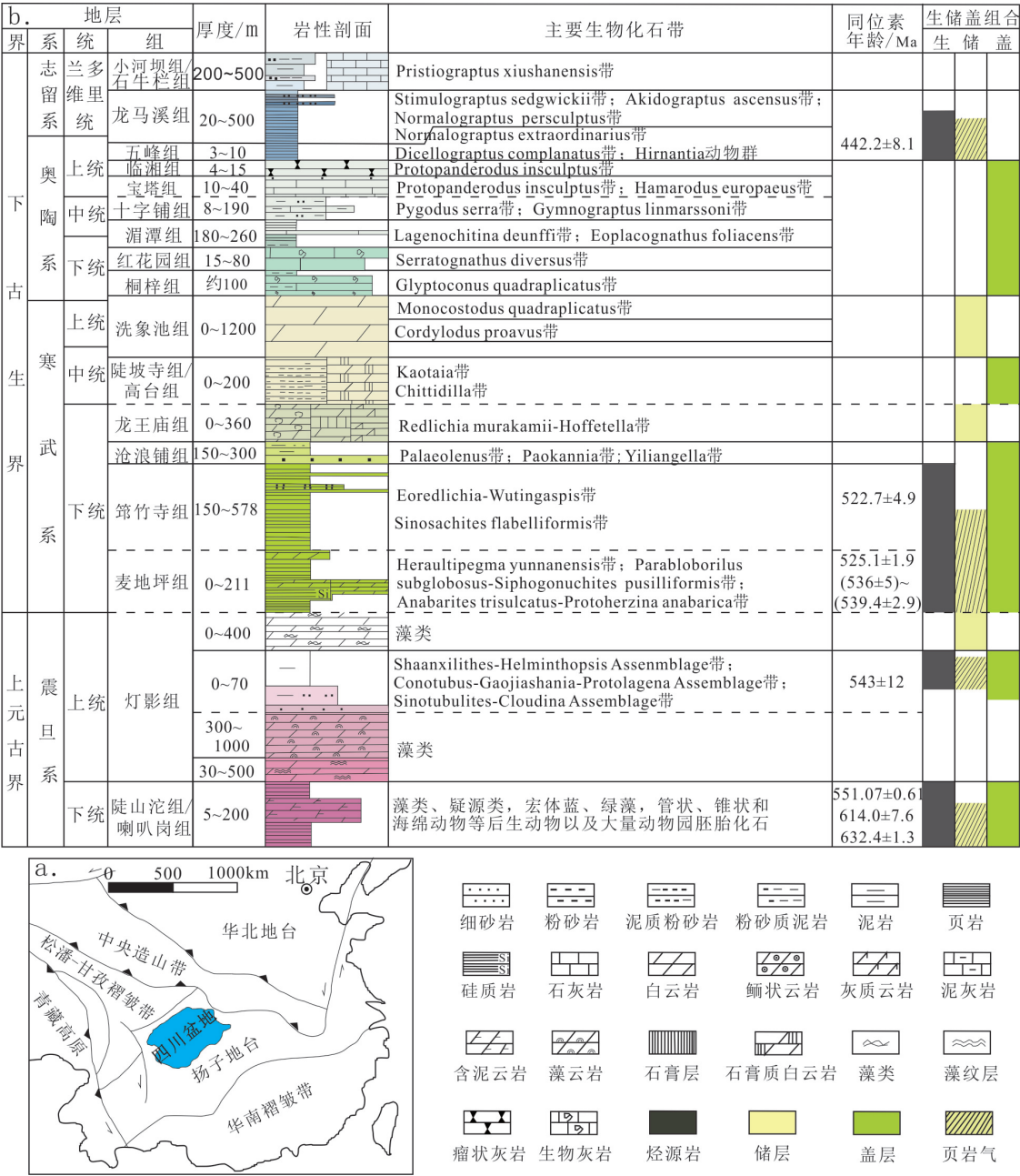


图1 四川盆地位置及震旦系一下古生界含油气系统综合柱状图(据参考文献^[10])

Fig.1 The location of Sichuan Basin and the composite columnar section of the Sinian-Lower Paleozoic oil-bearing systems (Zou et al. , 2014)

沉积-构造演化上,早寒武世的上扬子地区基本延续了原特提斯洋的伸展裂解背景,程度上明显减弱。克拉通内和边缘由于伸展作用形成了周缘裂谷系和克拉通内裂陷区。在深水裂陷区沉积了黑色页岩,浅水地台区主要为台地相的碳酸盐岩。中一晚寒武世,深水区被充填补齐,水体变浅,主要以潮坪相和局限台地相的白云岩为主,台内浅水坳陷发育巨厚的膏岩沉积^[9]。

勘探表明,上扬子地区下组合地层中发育多套含气系统^[10]。以灯影组和龙王庙组为主要勘探目标的油气系统的烃源岩主要为麦地坪组和筇竹寺组黑色岩系^[11-12],陡山沱组泥岩及灯影组泥岩亦可能提供少量气源,储层主要为龙王庙组白云岩,灯影组也是其储层之一,盖层包括上覆的膏盐岩、泥页岩和致密碳酸盐岩,它们共同构成了该油气系统的生-储-盖组合(图1)。成藏分析表明在成都—南充—重庆—内江—宜宾—乐山—雅安一带勘探潜力最大。其中遂宁—泸州等川中地区是最为重要的成藏区带,带内发育有四川盆地最早发现的碳酸盐岩气藏——威远震旦系气藏。最近发现的安岳气田表明,该油气系统的资源潜力比以普光气田为代表的上组合油气系统更大。

2 寒武纪岩相古地理特征

上世纪90年代以来,随着地质资料的积累,上扬子地区寒武纪的岩相古地理重建模型被不断地更新^[9,13]。本文基于2012~2015年间由成都理工大学承担的地质调查子项目《四川盆地及周缘碳酸盐岩油气地质调查及战略选区(带)评价》的成果资料,在此前岩相古地理重建的基础上,综合近年来新获取的钻井和地震资料及详实露头剖面,开展了上扬子寒武系的层序地层对比和沉积相分析,进而修编了上扬子地区寒武纪两个构造层序的海侵体系域和高位体系域的岩相古地理图。

新的岩相古地理图件显示,随着全球海平面上升,早寒武世海水侵没了整个上扬子地区,总体上呈现为西高东低的特点。西部为古陆分布区,分布有康滇古陆和泸定古陆等,东部则主要过渡为滨浅海相、台地、陆棚相沉积。早寒武世早期的海侵体系域,上扬子板块内发育了一个近南北向的台内深水区,该深水区规模大,具有中间窄、向南北两侧变宽变深的形态特征,该时期的上升洋流和富营养生物链为生烃物质的聚集奠定了基础(图2)。早寒武

世晚期的高位体系域,上扬子板块构造从活化态再次向准稳定态转变,成为一具有盐洼的克拉通坳陷盆地,并在末期地壳有抬升,使川中、黔北地区部分的麦地坪组遭受不同程度的剥蚀(图3)。中一晚寒武世构造层序古地理重建显示,加里东运动造成上一期碳酸盐台地如灯影组顶部一样亦遭受剥蚀。毛庄期的海侵作用形成新的碳酸盐台地(图4)。而后,徐庄—凤山期的高位体系域,碳酸盐台地进一步发展,除了台内浅滩发育外,已有连续或断续分布台地边缘礁滩相带发育(图5)。值得注意的是,该构造层序沉积充填期,川中隆起、黔中隆起和川北隆起等已有雏形,相带的展布由受深水槽的控制转变为了受古隆起制约。

相关的区域构造研究表明,在晋宁运动形成统一的华南板块与全球 Rodinia 大陆裂解的背景下,上扬子地区在基底之上的碎屑岩垫底沉积后,逐渐向稳定的陆表海台地型碳酸盐沉积环境转变,形成了灯影期富藻陆表海台地。由于受原特提斯洋伸展构造应力场的影响,上扬子克拉通基底构造被一定程度地再次活化,发生裂陷作用而形成切割克拉通的“绵阳-长宁”深水槽及板块周缘的相关裂谷^[14],塑造了该时期极为重要的古地理宏观格局和独特的相带时空配置。岩相古地理重建揭示的这一新的沉积-构造格局,打破了此前长期以来的关于上扬子为统一的陆表海碳酸盐台地的认识。这一特殊的沉积-构造格局是四川盆地寒武系古老油气系统形成的先决条件。它是如何控制成藏组合的至今仍悬而未决。

3 讨论

3.1 小板块古地理演化特点

众所周知,中国现今所在的东亚大陆是由众多小型或微型陆块和造山带组合而成的复合大陆^[15]。其中我国的华北陆块和西伯利亚陆块,以及非洲部分古老陆块,同属于哥伦比亚大陆的 Nena 大陆块体群的一部分,与波罗的海古陆连接在一起^[16-17],于18~16亿年的大规模裂解事件后开始形成中元古代以碳酸盐岩为主的克拉通盆地。塔里木和四川陆块则属于在格林威尔运动(相当于华南的四堡运动)中形成的 Rodinia 大陆的一部分,然后在晋宁(塔里木)运动中分裂而形成^[18]。而 Pangea 大陆形成时,我国的塔里木、扬子、中朝等陆块并未卷入其中,仅分散的位于它的东部的古特提斯洋中,而当 Pangea 大陆从中生代开始裂解,并有一大批以裂谷

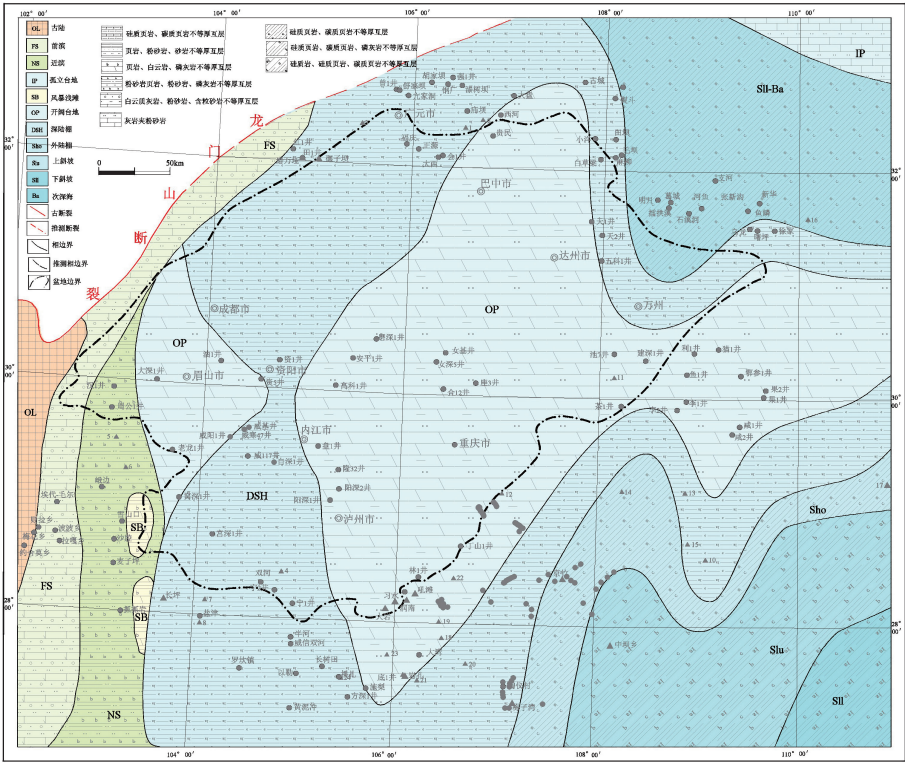


图2 上扬子地区早寒武世构造层序海侵体系域岩相古地理图

Fig.2 Paleogeographic scheme of the transgressive systems tract of Early Cambrian tectonic sequence, Upper Yangtze

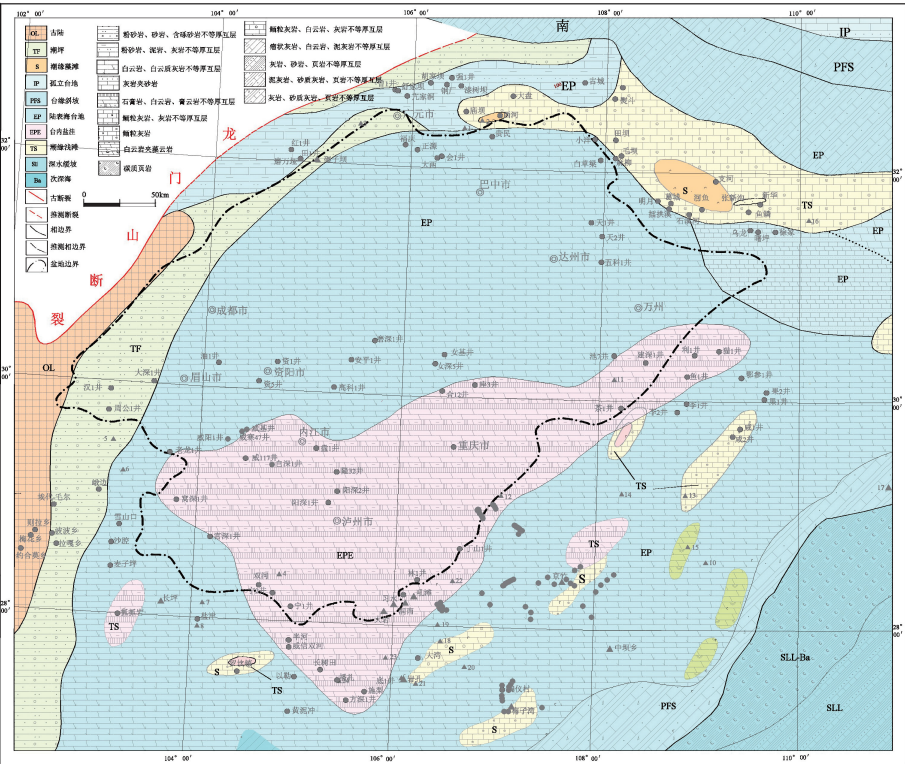


图3 上扬子地区早寒武世构造层序高位体系域岩相古地理图

Fig.3 Paleogeographic scheme of the high systems tract of Early Cambrian tectonic sequence, Upper Yangtze

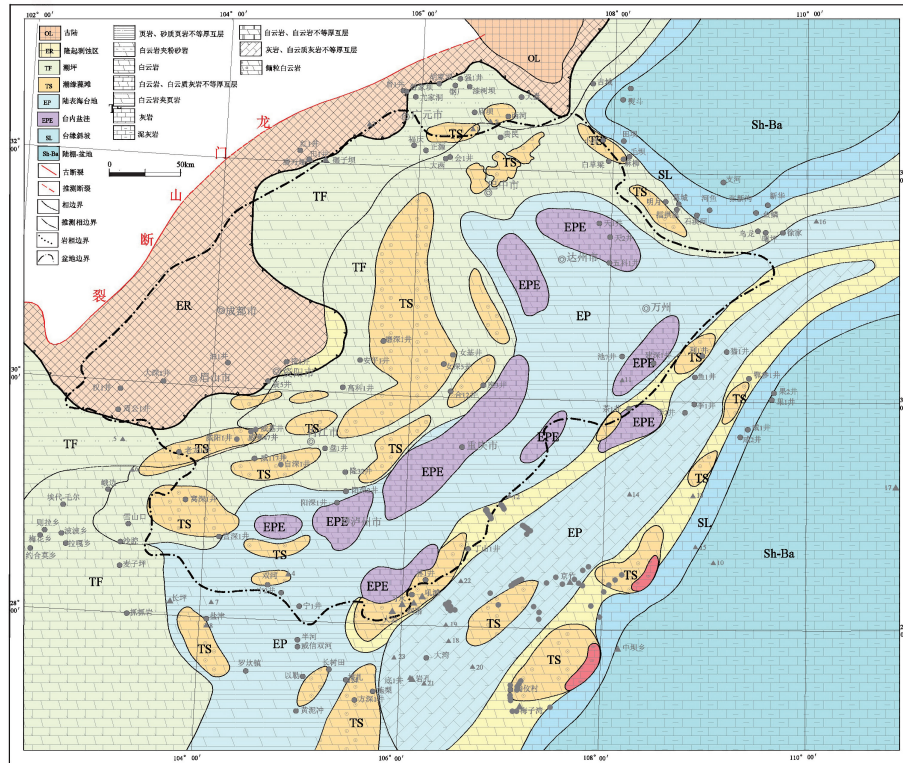


图4 上扬子地区中-晚寒武世构造层序海侵体系域岩相古地理图

Fig. 4 Paleogeographic scheme of the transgressive systems tract of Middle-Later Cambrian tectonic sequence, Upper Yangtze

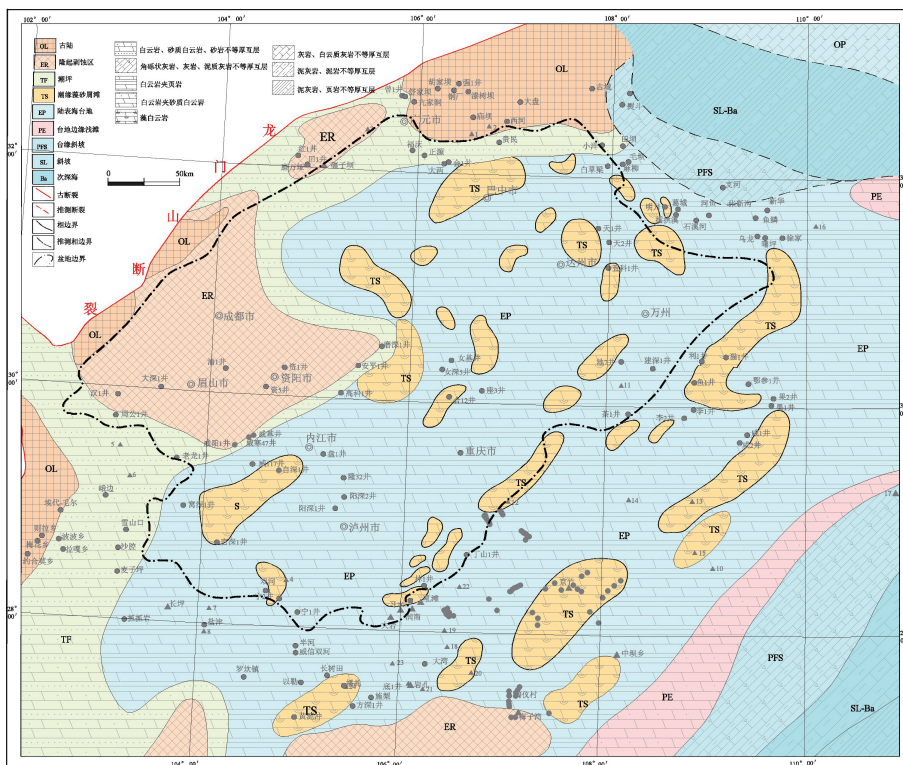


图5 上扬子地区中-晚寒武世构造层序高位体系域岩相古地理图

Fig. 5 Paleogeographic scheme of the high systems tract of Middle-Later Cambrian tectonic sequence, Upper Yangtze

为基底的中新生代盆地在全球各地出现时,我国的三大陆块已拼合在一起,成为统一稳定的中华陆块,再也没有强烈的伸展作用发生和大面积的海侵。因此,在我国陆上除西藏外只存在哥伦比亚大陆和 Rodinia 大陆裂解后形成的海相叠合盆地,没有 Pangea 大陆裂解后中生代以来形成的新的海相叠合盆地,而是进入了新的陆相盆地阶段^[19-20]。可见,中国的板块构造活动轮廓,大体上可以中三叠世末为界,区分为早期的以中朝、塔里木和扬子陆块为基础的分散的小型陆块漂移阶段和后期聚合在一起的以整个中国板块为主体的板内活动阶段。

中国深层海相碳酸盐岩主要发育于晚三叠世之前塔里木(塔里木陆块)、鄂尔多斯(中朝陆块的西部)和四川盆地(上扬子陆块),面积分别为 $65 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $30 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。相比北美、西伯利亚等大型克拉通,这些陆块上发育的盆地少得多。晚三叠世之前的分散小型陆块漂移阶段,中朝、塔里木和扬子等小型或微型陆块位于茫茫的古海洋中,这是中国古老海相地层形成的特殊的大地构造背景。对于这一构造背景的一个非常重要的研究议题就是它们在演化过程中与大型克拉通的亲缘性。我们通过扬子和华夏板块结合带附近采集的寒武系砂岩的锆石 U-Pb 年代学的物源示踪对比分析显示,早古生代华南陆块为一统一整体,与东冈瓦纳大陆具有亲缘性(图 6),其亲缘性也体现在两者具有能够类比的沉积建造上。

小陆块在与亲缘大板块的若即若离的演化过程中,其沉积盆地更容易受到构造事件影响。因此,造成不同性质的盆地多旋回叠合。在构造相对活跃期,它们的基底和周缘都伴有不同程度的裂谷作用,形成与裂谷相关的破克拉通盆地。由于如今裂谷隐伏的深度大、后期构造对裂谷层序的强烈改造作用及受地震资料品质和钻井少等的限制,这些深埋裂谷很难被发现。这也是盆地古地理重建的难点。随着区域构造背景认识的深入和勘探资料的积累,早寒武世早期的“绵阳-长宁”深水槽已被证实是切割上扬子克拉通的一个重要构造单元。目前对该古构造单元的性质争议较大。有人称之为裂陷槽(Taphogenic trough/Aulacogen)^[5],有人认为是内克拉通裂谷(Intracratonic rift)^[6],亦有人提出是拉张槽(Intracratonic sag)^[4]。根据 Allen 的盆地分类,这三种不同的构造模式都属于伸展构造背景,只是对它们的成因机制和伸展程度的认识有所

不同。本文的岩相古地理重建也揭示出该深水陆棚的存在,即此前认为的上扬子寒武纪早期统一的克拉通陆表海盆地应修正为被绵阳—长宁深水盆地所切割的破碎型克拉通盆地。在构造准稳定期,这些小陆块上往往发育克拉通陆表海盆地。本文的岩相古地理重建揭示出早寒武世中晚期—晚寒武世上扬子就是叠加在早期破碎型克拉通盆地之上的陆表海克拉通盆地。前人关于该时期龙王庙组主力储层的沉积环境同样存在不同认识。有人建立了裂陷槽控制的碳酸盐缓坡双颗粒滩模式来预测储层的分布^[21],但是依据这一模式重建的北东—南西向控滩槽的走向与早寒武世早期的裂陷槽近于垂直,这与实际的构造模型不大协调。也有人认为颗粒滩受早寒武世早期拉张槽的控制^[22],但实际上颗粒滩的分布是满盆补丁状散布的,并不是沿该槽的边缘分布。亦有人提出浅滩化的陆表海碳酸盐台地的模式^[23],这一模式的浅滩与岩相宏观分布格局是相符的,但颗粒滩的发育程度似乎被夸大了。钻井岩心储层样品的镜下鉴定显示,碳酸盐颗粒的发育是有限的,有利储层是颗粒白云岩/晶粒白云岩/微生物白云岩的组合物。组合物形成于潮汐作用主控的间歇性高能环境,与持续波浪作用形成的高能滩体是不同的。值得注意的是,这些碳酸盐颗粒沉积物对该类储层组合物预测具有重要的指示作用。

3.2 内克拉通油气勘探启示

上扬子寒武纪早期“绵阳-长宁”深水槽的发现,揭示出该时期具有形成良好生—储—盖组合的相应沉积演化序列。裂陷期形成麦地坪组和筇竹寺组烃源岩,裂谷夭折后的内克拉通拗陷期发育陆表海环境下的龙王庙组储层及相应的盖层。这种裂陷作用往往在叠合盆地的不同期次都有发育,或在克拉通边缘,或在克拉通内部,形成“板内裂陷”或“板缘裂陷”。裂陷沉积之上叠加以稳定的克拉通拗陷沉积,形成类“裂陷层序”和“后裂陷层序”组成的截面形态呈“牛头型”的沉积建造结构。裂陷现象一般都发生在各期次盆地形成的早期,隐伏于深部地层中,发育规模不大,经历了长期的构造改造。由于深埋区的地震资料品质差,地震地质解译难,不易被识别。从沉积建造的组合特征来看,非稳定构造期的“裂陷层序”往往为深水富有机质沉积,是良好的生烃灶,其周缘则发育陆棚镶边台地成因的台缘礁滩储层;上覆准稳定构造期的“拗陷层

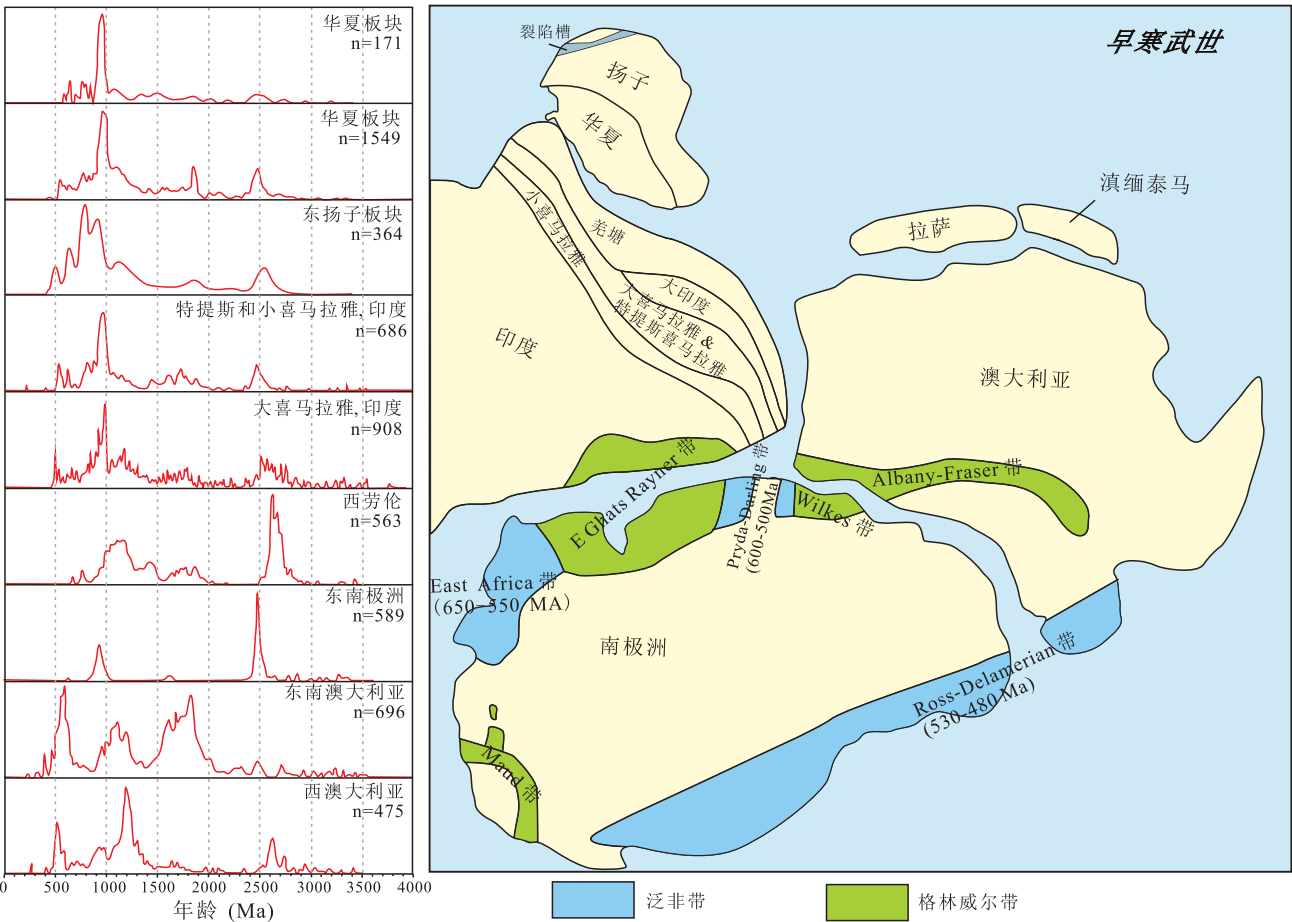


图6 早古生代华南板块与东冈瓦纳大陆的亲缘性(A. 华南板块钻石 U-Pb 年龄谱及其与冈瓦纳板块的对比,B. 早古生代华南板块的位置及东刚瓦纳大陆重建^[21])

Fig. 6 Affinity between the South China block and East Condwanaland (A. Comparisons of age spectra of South China Block with those of the potential neighboring blocks in Gondwana, B. Reconstruction of East Gondwana showing hypothetical paleo-position of the South China Block during the early Paleozoic^[21])

序”为浅水陆表海沉积,形成大面积分布的台内白云岩储层。中国的小板块在超大陆旋回演化过程中,其构造-沉积响应非常敏感,导致这种发育于小型克拉通之上的盆地呈现准稳定与非稳定态的

交替发育,特别是在海相碳酸盐岩盆地演化阶段,对应发育两种不同性质的碳酸盐台地,从而造就了不同的勘探目标(图7)。

上扬子克拉通内安岳特大型气田的发现就与该

克拉通构造状态	盆地性质	构造-沉积分异	台地类型	潜在勘探目标
非稳定期	内克拉通裂陷	深水裂陷-浅水地台	陆棚镶边台地 (威尔逊模式)	环深水裂陷台缘礁滩体
准稳定期	内克拉通拗陷	浅水台坳-台内低隆	陆表海台地 (欧文和塔克模式)	环隆起浅水台内白云岩

图7 内克拉通盆地准稳定与非稳定构造期的碳酸盐岩勘探目标

Fig. 7 The exploration targets of carbonate rocks in stable and unstable tectonic periods of the intracratonic basin

类建造结构有关。受下伏裂隙的控制,下寒武统筇竹寺组的黑色泥页岩发育区呈近南北向带状展布,形成了上扬子巨型生烃灶,与上覆龙王庙组陆表海颗粒滩形成有利成藏组合。这一成藏组合与普光气田既有相似之处,亦有不同点。相似的是它们的生烃灶发育于切割克拉通的裂隙深水区,不同的是普光气田的储层主要为同裂隙期周缘的台地边缘礁滩相,而安岳气田的龙王庙组储层则与上覆坳陷期陆表海白云岩席有关。当前,在高石梯-磨溪构造共发现磨溪、龙女寺、高石6井区3个富气区块,地质储量超过 $6000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其中,磨溪区块龙王庙组探明含气面积 779.86 km^2 ,探明地质储量 $4403.83 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[5]。四川盆地深层龙王庙组碳酸盐岩的勘探发现,昭示着其他克拉通盆地发育的与隐伏裂谷相关的深层碳酸盐岩亦可能成为大型油气富集带。前文已述,关于安岳大气田成因的争论焦点主要集中在“绵阳-长宁”深水槽的构造属性及其对油气的控制作用。而实际上,该深水槽的控制作用主要体现在生烃灶的形成及其后期的油气运移,而龙王庙组储层的发育分布受其后坳陷期的浅水陆表海环境的制约。

川东北普光气田发现后,在我国海相油气勘探中掀起了台地边缘礁滩相勘探的热潮。经典的镶边台地模式对于该类型的碳酸盐岩油气预测发挥着重要的作用。我们知道,镶边台地背景下的有利储层分布主要受高能波浪作用带的控制。在我国复杂的小板块多旋回构造演化背景下,克拉通盆地周缘的台地礁滩相带往往被周缘围限的造山带破坏得面目全非,只有那些围绕伸入克拉通内部的裂谷周缘的台缘礁滩相带能较好地保存下来。因此,该类型的油气勘探目标往往发育在构造相对活跃期的克拉通内,如普光气田。除波浪作用外,潮汐作用是海洋表层水体普遍存在的另一种重要的地质营力。地质历史中,海相克拉通也有准稳定的间隙期,浅水陆表海碳酸盐台地是这一时期的典型沉积环境,台地潮坪和盐湖广泛发育^[24-25]。由于陆表海台地形成的碳酸盐岩储层往往时代老、埋藏深、隐蔽性强,油气勘探难度大,长期被勘探家们忽视。2010年以来,对于陆表海白云岩发育分布规律的认识,促使碳酸盐岩勘探拓展至了克拉通内幕白云岩新领域^[26]。虽然陆表海台地沉积模式很早就被拉波特和塔克等所提出,但在油气勘探中对其的重视程度远不如威尔逊建立的镶边碳酸盐台地。除本

文所研究的寒武系后裂隙期长期发育浅水陆表海台地外,鄂尔多斯盆地早古生代也长期发育陆表海环境。研究表明受气候、风向、海流变化的影响,陆表海环境的浅海潮缘相带在每个海平面升降旋回中具有不断向克拉通内坳陷增生的特征,从而形成广泛分布的向上变浅的潮缘层序。龙王庙组和鄂尔多斯盆地马家沟组一样,也是典型的进积潮坪楔模式,潮坪的进积作用主要表现为向内克拉通坳陷区连续性退超,膏盐发育区则是当时的克拉通内坳陷区。进积楔垂向序列下部主要是潮坪沉积,其上为纹层状的潮间到潮上的沉积物,以发育席状潮缘滩为特征。在当时稳定的水文条件下,潮坪进积楔稳定分布于整个台地,每次海平面的迅速上升不但导致前一个旋回的进积作用的停止,还将叠加新一期的潮坪进积楔,这种进积楔模式能够很好地解释龙王庙组的储层展布规律^[27]。当然,并不是所有陆表海盆地都是大型的单隆单坳,如四川盆地三叠系嘉陵江组和雷口坡组、二叠系栖霞组、震旦系灯影组等沉积期的陆表海盆地就呈现出多隆多坳的格局,其沉积充填模式称之为潮坪岛拼嵌模式^[26]。实质上,它和进积潮坪楔模式没有本质上的差别。由于陆表海的地貌低幅起伏较小,水体较浅,海平面的升降变化往往会引起更大距离的相带迁移与相带转换。它所形成的有利白云岩储层呈席状展布。由于陆表海潮坪席建造岩相较为均一,同时形态结构简单,它所带来的油气勘探难度比镶边台地中的礁滩“移动靶”更大。因此,认识陆表海潮汐作用及与之相关的蒸发岩成因是该类储层预测的关键。从四川盆地安岳巨型气田的发现来看,该领域的深层碳酸盐岩的勘探潜力是能够与台缘礁滩领域媲美的,未来有望发现更多的油气资源。

4 结论

(1)综合油气勘探的地震和钻井资料及盆地周缘的露头剖面地质调查成果,分别重建了四川盆地寒武纪两个构造层序的海侵体系域和高位体系域的岩相古地理,揭示了早寒武世早期深水沉积区的分布及此后的陆表海沉积环境特征。

(2)分析了我国前晚三叠世小陆块离散阶段具有构造活跃期和构造准稳定期交替叠合的古地理特点。构造活跃期为伸展背景的破碎型克拉通盆地,构造准稳定期为陆表海型克拉通坳陷盆地。构造活跃期的裂隙沉积之上叠加以准稳定期的克拉

通内坳陷沉积,形成了类似裂谷盆地的由裂谷层序和后裂谷层序组成的剖面形态像牛头的牛头型沉积建造结构。

(3)上扬子地区寒武纪的古地理沉积背景是深层巨型气田形成的先决条件。早寒武世早期,近南北向的深水槽切割了上扬子克拉通,沉积了巨厚的富有机质沉积物,成为深层巨型生烃灶。早寒武世晚期—晚寒武世,沉积环境转变为统一的陆表海台地,沉积建造由潮坪席及伴生的膏盐层为特征,广泛的潮汐作用和古隆起控制了储层的宏观分布。

参考文献:

- [1] 张国伟, 郭安林, 王岳军, 等. 中国华南大陆构造与问题[J]. 中国科学:地球科学, 2013, 43(10): 1553–1582.
- [2] 舒良树. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 2012, 31(7), 1035–1053.
- [3] 郭润华, 李三忠, 索艳慧, 等. 华北地块楔入大华南地块和印支期弯山构造[J]. 地学前缘, 2017, 24(4), 171–184.
- [4] 刘树根, 孙玮, 罗志立, 等. 兴凯地裂运动与四川盆地地下组合油气勘探[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2013, 40(5), 511–520.
- [5] Du JH, Zou C, Xu CC, et al. Theoretical and technical innovations in strategic discovery of a giant gas field in cambrian longwangmiao formation of central sichuan paleo-uplift, sichuan basin [J]. Petroleum Exploration & Development, 2014, 41(3): 294–305.
- [6] Wei G, Yang W, Du JH, et al. Tectonic features of Gaoshiti-Moxi paleo-uplift and its controls on the formation of a giant gas field, Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration & Development, 2015, 42(3): 283–292.
- [7] Li ZQ., Liu J, Li Y, et al. Formation and evolution of Weiyuan-Anyue tensional corrosion trough in Sinian system, Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration & Development, 2015, 42(1): 29–36.
- [8] Li SZ, Zhao SJ, Liu X, et al. Closure of the Proto-Tethys Ocean and Early Paleozoic amalgamation of microcontinental blocks in East Asia [J]. Earth Science Review, 2018, 186, 37–75.
- [9] 陈洪德, 郭彤楼. 中上扬子叠合盆地沉积充填过程与物质分布规律[M]. 北京: 科学出版社. 2012.
- [10] 邹才能, 杜金虎, 徐春春, 等. 四川盆地震旦系—寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3), 278–293.
- [11] Shi CH, Cao J, Tan XC, et al. Discovery of oil bitumen co-existing with solid bitumen in the Lower Cambrian Longwangmiao giant gas reservoir, Sichuan Basin, southwestern China: Implications for hydrocarbon accumulation process [J]. Organic Geochemistry, 2017, 108: 61–81.
- [12] Shi CH, Cao J, Tan XC, et al. Hydrocarbon generation capability of Sinian-Lower Cambrian shale, mudstone and carbonate rocks in the Sichuan Basin, southwestern China: Implications for contributions to the giant Sinian Dengying natural gas accumulation [J]. AAPG Bulletin, 2018, 102(5): 817–853.
- [13] 刘宝珺. 中国南方岩相古地理图集[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [14] 侯明才, 邢凤存, 徐胜林, 等. 上扬子 E-C 转换期古地理格局及其地球动力学机制探讨[J]. 沉积学报, 2017, 35(5): 902–917.
- [15] 任纪舜, 牛宝贵, 刘志刚. 软碰撞、叠覆造山和多旋回缝合作用[J]. 地学前缘, 1999, 6(3): 85–93.
- [16] Rogers J J W, Santosh M. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic Supercontinent [J]. Gondwana Research, 2002, 5(1): 5–22.
- [17] 陆松年, 杨春亮, 李怀坤, 等. 华北古大陆与哥伦比亚超大陆[J]. 地学前缘, 2002, 9(9): 225–233.
- [18] Li Z. X., Bogdanova, S. V., Collins, A. S., et al. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis [J]. Precambrian Research, 2008, 179–210.
- [19] 万天丰, 朱鸿. 古生代与三叠纪中国各陆块在全球古大陆再造中的位置与运动学特征. 现代地质, 2007, 21(1): 1–13.
- [20] 许效松, 刘宝珺, 牟传龙, 等. 中国中西部海相盆地分析与油气资源[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
- [21] Chen A. Q., Hou M. C., Xiong C. et al. The Crucial Role of Tectono-sedimentary Records of China in Understanding Paleogeographic Evolution [J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(S3): 5–7.
- [22] 刘树根, 宋金民, 赵异华, 等. 四川盆地龙王庙组优质储层形成与分布的主控因素[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2014, 41(6): 657–670.
- [23] 马腾, 谭秀成, 李凌, 等. 四川盆地早寒武世龙王庙期沉积特征与古地理[J]. 沉积学报, 2016, 34(1), 33–48.
- [24] 陈安清, 王立成, 姬广建, 等. 川东北早-中三叠世聚盐环境及海水浓缩成钾模式[J]. 岩石学报, 2015, 31(9): 2757–2769.
- [25] 陈安清, 杨帅, 陈洪德, 等. 陆表海台地沉积充填模式及内克拉通碳酸盐岩勘探新启示[J]. 岩石学报, 2017, 33(4): 1243–1256.
- [26] 陈安清, 侯明才, 陈洪德, 等. 中国海相碳酸盐岩勘探领域拓展历程及沉积学的基本驱动作用[J]. 沉积学报, 2017, 35(5): 1054–1062.
- [27] Chen, A. Q., Xu, S. L., Yang, S., et al. Ordovician deep dolomite reservoirs in the intracratonic Ordos Basin, China: Depositional model and Diagenetic evolution. Energy Exploration & Exploitation, 2018, 36(4): 850–871.

Cambrian lithofacies paleogeographic characteristics of the Upper Yangtze Block: implications for the marine basin evolution and hydrocarbon accumulation of small-scale tectonic blocks in China

Chen Anqing¹, Hou Mingcai¹, Lin Liangbiao¹, Xin Fengcun¹, Xu Shenglin¹, Zhong Yijiang¹, Yang Shuai¹, Xiong Chen³, Zhang Xihua², Wen Long², Chen Hongde¹

(1. *State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China*; 2. *Research Institute of Exploration and Development, Petrochina Southwest Oil & Gas field Company, Chengdu 610041, Sichuan, China*; 3. *Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 610041, Sichuan, China*)

Abstract: The reconstruction of litho-paleogeography plays an important role in understanding the evolution of sedimentary environment, spatial distribution of sedimentary formations and hydrocarbon exploration of basins. In order to reveal the Cambrian paleogeographic setting which is the controlling precondition of the newly discovered Anyue giant gas field in the Upper Yangtze Block and its significances to potential carbonate oil and gas exploration, based on the seismic and borehole-logging data and the geological survey of outcrop section surrounding the Sichuan Basin, the lithofacies and paleogeography of the two Cambrian tectonic sequences were reconstructed, and the characteristics of Cambrian source-reservoir-seal assemblage were analyzed. The results showed that, in the earlier Early Cambrian, the tectonic extensional background induced a broken craton basin which had a deep trough cutting the Upper Yangtze Block with north-south direction. The infill of organic-rich sediments in the trough became the kitchen of deep giant hydrocarbon layers. From the later Early Cambrian to the late Cambrian, the upper Yangtze plate shifted to a relatively stable tectonic setting, and the basins on the Upper Yangtze Block were unified and formed a craton depression basin. The sedimentary formation was characterized by the development of the epeiric tidal wedge and associated salt. The tidal energy in the epeiric sea constrained the macroscopic distribution of the reservoirs. The deposits filling in tectonic active stages were superimposed by infill of the relatively stable intracraton depressions, forming a sequence combination similar to the rift basin which is composed of rift and post-rift sequences. The transection-profile of this type of sequence combination is like a cartoon of the ox-head. The paleogeographic characteristics of the basin, which experienced tectonic active interval and tectonic stability interval alternately, was a major feature of Chinese small-scale blocks linked to their affinity with the big-scale plates and drifting discretely in paleo-oceans in the pre-Late Triassic period. This special was favor for forming potential source-reservoir-seal assemblages in the sedimentary formation which can develop giant hydrocarbon reservoir in intracratonic basins.

Key words: Paleogeographic reconstruction; Carbonate; Deep nature gas; Cambrian; Upper Yangtze Block