引用格式：陈科，王昱荦，卢妍欣，等，2025. 鄂西海槽下寒武统水井沱组沉积特征及其油气地质意义[J]. 地质力学学报，31（4）：604−616. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025036

Citation: CHEN K，WANG Y L，LU Y X，et al.，2025. Sedimentary characteristics of the Lower Cambrian Shuijingtuo Formation in the E’Xi trough and its petroleum geological significance[J]. Journal of Geomechanics，31（4）：604−616. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025036

鄂西海槽下寒武统水井沱组沉积特征及其油气地质意义

陈　科[1,2]，王昱荦[1,2]，卢妍欣[1,2]，李　飞[1,2]

CHEN Ke[1,2]，WANG Yuluo[1,2]，LU Yanxin[1,2]，LI Fei[1,2]

1. 中国地质调查局油气资源调查中心，北京 100083；
2. 多资源协同陆相页岩油绿色开采全国重点实验室，北京 100083

1. *Oil and Gas Resources Survey Center of the China Geological Survey*, *Beijing* 100083, *China*;
2. *State Key Laboratory of Continental Shale Oil*, *Beijing* 100083, *China*

Sedimentary characteristics of the Lower Cambrian Shuijingtuo Formation in the E’Xi trough and its petroleum geological significance

Abstract: ［**Objective**］The organic-rich shales of the Lower Cambrian in South China are characterized by significant thickness and high thermal maturity. Recent explorations have yielded industrial gas flows from the Lower Cambrian shales in the Middle Yangtze region. To further investigate the shale gas resource potential of the Lower Cambrian in South China, this study focuses on the Lower Cambrian Shuijingtuo Formation in the Middle Yangtze region.［**Methods**］Through an integrated analysis of outcrop observations and drilling data, we analyzed its sedimentary characteristics and processes. A third-order stratigraphic sequence framework for the Lower Cambrian shale was established, and a sedimentary model of the Early Cambrian E’Xi Trough in the Middle Yangtze region was constructed, clarifying exploration targets.［**Results**］The Lower Cambrian Shuijingtuo Formation in the Middle Yangtze region primarily consists of shallow-water and deep-water shelf facies, with shallow carbonate deposits at both the bottom and top. The Lower Cambrian organic-rich shales can be divided into five third-order sequences, which are correlatable with those in the Upper Yangtze region. The Shuijingtuo Formation formed during the filling stage of the E’xi Trough, primarily consisting of argillaceous clastic sedimentary rocks.［**Conclusion**］Organic-rich shales are distributed in deep-water facies, with two identified subsags within the E’xi Trough (the Enshi and Yichang–Changyang depressions) serving as key exploration targets. The Lower Cambrian Shuijingtuo Formation, together with the underlying Sinian Dengying and Doushantuo Formations, forms a "sandwich-like" conventional hydrocarbon assemblage, which is a priority area for future conventional oil and gas exploration in Western Hubei.

Keywords: E’Xi trough; lower Cambrian; Shuijingtuo Formation; sedimentary characteristics; sequence stratigraphy

摘　要：中国南方下寒武统富有机质页岩具有整体厚度大、热演化程度高的特点，近期的页岩气勘探已经在中扬子地区获得下寒武统页岩气工业气流。为了进一步调查中国南方下寒武统页岩气资源潜力，以中扬子地区下寒武统水井沱组为重点，结合地表露头观察和钻井资料，研究分析了其沉积特征和沉积过程，划分了下寒武统页岩三级地层层序格架，构建了中扬子地区鄂西海槽早寒武世的沉积模式，并指明了中扬子地区下寒武统页岩气勘探方向。研究表明：中扬子地区下寒武统水井沱组主要发育浅水陆棚相和深水陆棚相沉积，其底部和顶部发育浅水碳酸盐岩沉积；下寒武统富有机质页岩可划分为5个三级层

基金项目：国家自然科学基金项目（U2344213）

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U2344213).

第一作者：陈科（1982—），男，博士，正高级工程师，主要从事油气地质调查。Email：39024332@qq.com

通信作者：王昱荦(1997—)，男，硕士，助理工程师，主要从事油气地质调查。Email：1197434674@qq.com

收稿日期：2025−04−03；**修回日期：**2025−07−15；**录用日期：**2025−07−20；**网络出版日期：**2025−07−29；**责任编辑：**王婧

序，并可与上扬子地区进行对比；水井沱组发育于震旦纪—早寒武世鄂西海槽的充填阶段，主要为泥质碎屑岩沉积。富有机质页岩分布于深水相区，在鄂西海槽识别出恩施、宜昌长阳2个次级凹陷，是页岩气勘探的重点地区；下寒武统水井沱组与下伏震旦系灯影组和陡山沱组形成“三明治”式常规油气组合，是下一步鄂西常规油气勘查的重点领域。

关键词：鄂西海槽；下寒武统；水井沱组；沉积特征；层序地层学

中图分类号：P618.13　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1006-6616(2025)04-0604-13

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025036

0　引言

下寒武统富有机质页岩是华南地区页岩气勘探开发的重点层系之一，其岩石序列变化丰富，页岩层系具有分布面积广、厚度大、连续分布和有机碳含量高的特点。早期的页岩气勘查中，已在川南（何骁等，2022; Zou et al., 2024）、鄂西（陈科等，2020）、黔南（门玉澎等，2020）、黔北（付勇等，2021）和陕南（韩伟等，2024）等地区探获工业气流，近年来又在四川盆地获得了高产工业气流（郭彤楼，2025）。然而，由于中扬子地块鄂西地区构造条件复杂，其勘探程度仍然较低。此外，早寒武世也是地球环境转变和生物大爆发的关键时期，地球从寒冷的地球转变为高生产率、温暖的地球（Li et al., 2023; Deng et al., 2025）。鄂西地区记录了完整的震旦系—下寒武统，富有机质页岩主要受控于震旦系—寒武纪鄂西海槽的演化（陈科等，2020; 翟刚毅等，2020），页岩的分布特征和主控因素仍不清楚，需进一步深入研究。层序地层学是研究地层较好的手段，主要通过露头或岩心观察、建立岩性剖面结合年代学资料、古生物资料识别层序界面并划分层序，既有文献对于下寒武统地层已有一定程度的研究，但主要基于露头观察（梅冥相，2006a; 王传尚等，2012）。随着近年来钻井工作的开展，鄂西地区的新资料为研究下寒武统页岩沉积环境提供了条件。为查明鄂西地区油气分布，文章综合露头剖面、钻井和物探等资料，研究了中扬子地区下寒武统沉积特征和主控因素，并分析了其沉积历史和模式，为下一步页岩气和常规油气的勘探奠定了基础。

1　地质背景

鄂西地区大地构造位置处于中扬子地块，地理范围覆盖鄂西宜昌—恩施及周边区域，在晚震旦世—早寒武世为低洼地，现有研究中称其为鄂西海槽（夏文杰等，1994; 谷昊东等，2021; 陈科等，2024; 图1）。早震旦世陡山沱组沉积时期，扬子地区发育裂陷盆地；灯影组沉积时期具有碳酸盐岩台盆结构；而至早寒武世，该区出现盆地填平补齐的特征（陈科等，2024）。早寒武世，扬子板块主体上由几个古陆、小面积的碳酸盐台地和碎屑岩陆棚构成，到早寒武世晚期（龙王庙期），扬子板块已基本上变成了浅水碳酸盐岩台地（冯增昭等，2001）。震旦纪与寒武纪之交的快速海侵所形成的台地淹没事件，形成了厚度数百米的海侵沉积岩系，数次明显的快速海侵事件造成了下寒武统特殊的层序组构样式（冯增昭等，2001; 梅冥相等，2006a）。中扬子地块宜昌秭归地区下寒武统水井沱组具有明显的三段式沉积特征：底部以灰岩为主，中部发育富有机质页岩，顶部以灰岩为主，三者之间的过渡阶段则以灰岩和碎屑岩交互为特征。因此，该时期可能存在频繁的海进-海退过程，地球化学指标证实气候的变化也颇为频繁（陈旭等，1997; 张国涛等，2022）。

鄂西峡东地区水井沱组主要为一套富有机质页岩（湖北省地质局三峡地层研究组，1978; 汪啸风等，1987），与贵州牛蹄塘页岩大体相当，牛蹄塘组创名地点在贵州省遵义县牛蹄塘村，水井沱组命名来自于湖北宜昌水井沱村。水井沱组最早由张文堂（1957）创立，是从原石牌页岩下部划分出来的一个岩石地层单位，当时包括底部黑色页岩夹薄层灰岩、中部黄绿色砂质页岩、顶部薄层砂岩及铁质鲕粒石灰岩。目前较公认的水井沱组底界以浅灰色厚层泥粉晶白云岩结束、灰黑色炭质泥岩出现为标志，在宜昌秭归地区与下伏岩家河组或天柱山段呈整合接触；顶界以深灰色中层状泥晶灰岩结束、灰绿色薄中层状粉砂岩出现为标志（湖北省地质局三峡地层研究组，1978; 汪啸风等，1987; 表1）。因此，为了便于细化研究，仍然以水井沱组和岩家河组命名中扬子地区下寒武统富有机质页岩。该页岩沉

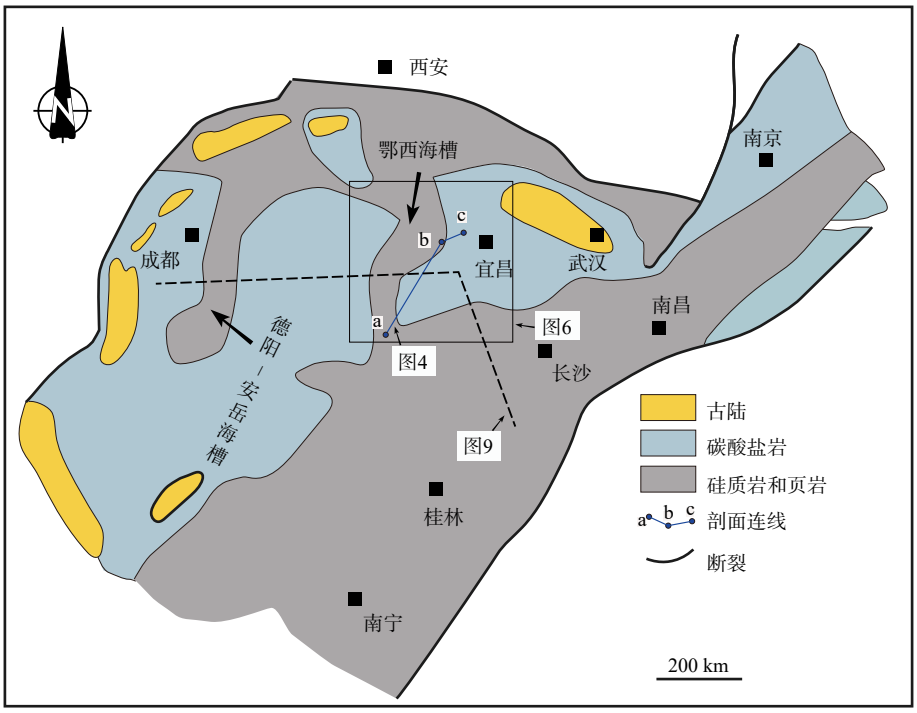


图 1 扬子地区早寒武世古地理图（据 Wang et al.，2012；刘忠宝等，2018；赵建华等，2019 修改）

Fig. 1 Paleogeographic map of the Yangtze region during the Early Cambrian(modified after Wang et al., 2012; Liu et al., 2018; Zhao et al., 2019)

积厚度大，但是其勘探和认识程度较低。为了推进中扬子地区下寒武统页岩气勘探开发，选取中扬子地区鄂西海槽地区水井沱组近期钻井和露头剖面（Wang, 2004; 图 1）进行沉积特征和层序地层研究，分析其沉积相平面展布、空间分布及沉积模式，并讨论其页岩气和常规油气勘探方向。

表 1 中上扬子地区下寒武统地层对比表

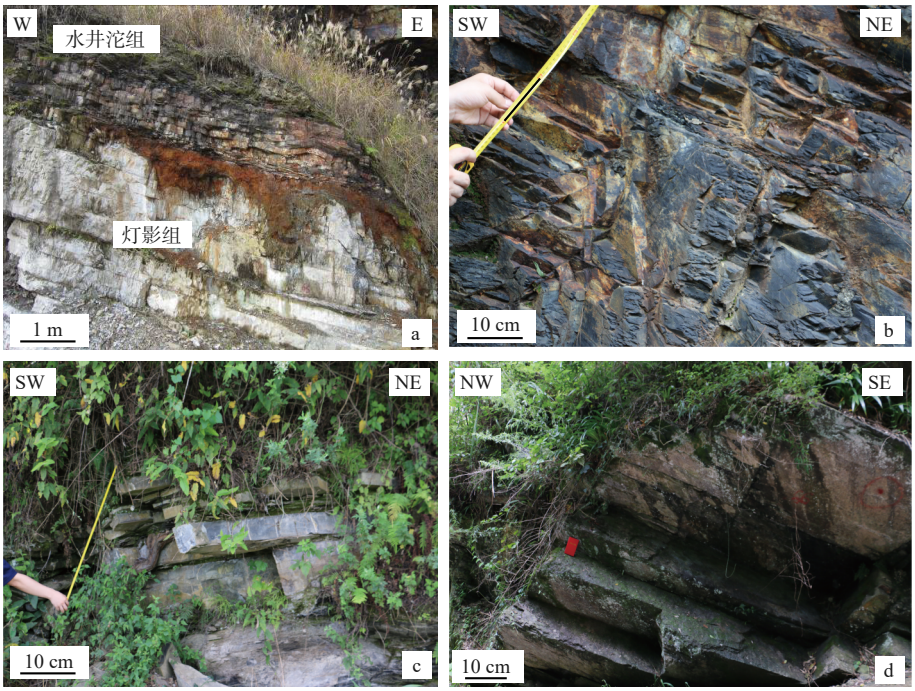
Table 1 Stratigraphic correlation of the Lower Cambrian in the Middle–Upper Yangtze region

系	四川盆地		黔北		中扬子	
寒武系	沧浪铺组		沧浪铺组		石牌组	
	筇竹寺组	上段	牛蹄塘组	三段	水井沱组	上段
		下段		二段		下段
	麦地坪组			一段	岩家河组/天柱山段	
震旦系	灯影组		灯影组		灯影组	

2 水井沱组沉积特征

2.1 岩相特征

鄂西下寒武统富有机质页岩可按照沉积特征自下而上划分为 3 个岩性段：岩家河组、水井沱组下段和水井沱组上段。通过区域地层对比表明（表 1），岩家河组与黔北地区牛蹄塘组一段相当、水井沱组下段和上段分别与黔北地区牛蹄塘组二段和三段相当（表 1）。在接触关系方面，水井沱组和岩家河组与下伏灯影组在不同地区呈整合或平行不整合接触，如鹤峰走马镇白果坪地区接触关系为平行不整合（图 2a）。各岩性段具有明显的沉积学特征：岩家河组下部为灰色中层含泥质白云岩夹浅灰—灰绿色薄层泥岩，中部为黑色薄层硅质岩夹硅质泥岩，上部为灰黑色薄层夹中层泥—粉晶灰岩，与深灰色中层页岩不等厚互层；水井沱组下部为灰黑色薄层炭质页岩或泥岩（图 2b），夹多层“锅底”灰岩，局部见较多薄层硅质岩，上部为深灰—灰黑色薄层钙质页岩与中—厚层状灰岩互层；水井沱组上部岩



a—宜昌鹤峰水井沱组与灯影组间平行不整合；b—宜昌滚石坳剖面水井沱组富有机质泥岩；c—宜昌滚石坳剖面水井沱组上部中—厚层灰岩夹薄层泥页岩；d—宜昌秭归泗溪剖面石牌组厚层灰黄色泥岩夹粉砂岩

图 2　典型野外剖面露头岩石特征

Fig. 2　Rock characteristics of typical outcrop sections

(a) Disconformity between the Shuijingtuo Formation and the Dengying Formation at the Hefeng section in Yichang; (b) Organic-rich mudstone of the Shuijingtuo Formation at the Gunshi'ao section in Yichang; (c) Upper part of the Shuijingtuo Formation at the Gunshi'ao section in Yichang, characterized by medium-to-thick-bedded limestone interbedded with thin layers of mudstone and shale; (d) Thick-bedded grayish–yellow mudstone intercalated with siltstone of the Shipai Formation at the Sixi section in Zigui, Yichang

性为深灰色薄—中层状灰岩夹薄层状泥灰岩、钙质页岩(图 2c)。上覆石牌组为厚层灰黄色泥岩夹粉砂岩(图 2d)。

为了避免命名的混淆，并区分不同沉积过程，仍然采用岩家河组(对应牛蹄塘组一段)和水井沱组(对应牛蹄塘组二段和三段)的命名方案(表 1)。基于以上分析，主要研究并讨论岩家河组和水井沱组页岩以及下伏灯影组白云岩和上覆石牌组粉砂质页岩的沉积特征和演化过程。

根据目前钻井和剖面的岩石学特征，鄂西海槽水井沱组可以划分为 8 种岩相，主要归纳为 5 种沉积相(图 3)：①盆地相(B1)；②深水陆棚相(Sh1、Sh2)；③浅水陆棚相(Sh3、Sh4)；④开阔台地相(Op1、Op2)；⑤局限台地相(L1)。B1 为硅质页岩盆地相，主要由硅质岩或硅质泥岩组成；Sh1 为黑色页岩深水陆棚相，主要由黑色富有机质页岩组成；Sh2 为页岩夹灰岩混积陆棚相，主要由页岩组成，夹薄层的灰岩，该岩相主体上属于深水陆棚相；Sh3 为粉砂岩浅水陆棚相，主要由粉砂岩组成；Sh4 为钙质粉砂岩浅水陆棚相，主要由钙质粉砂岩组成；Op1 为灰岩开阔台地相，主要由中—厚层的灰岩组成；Op2 为灰岩夹页岩混积陆棚相，主要由灰岩夹薄层的页岩组成，该岩相主体上属于开阔台地相；L1 为泥质白云岩局限台地相，主要为泥质白云岩。

2.2　层序界面和地层划分

层序地层学是沉积学研究的重要方法，识别出的层序是一套相对完整、成因上有联系、以不整合和可以与之对比的整合面为界的地层单元。而层序划分的关键是层序界面的识别，可用于确定层序的界面包括层序的底界面、初始海泛面和最大海泛面，其中最为重要的是层序底界面的识别(马永生等，2009)。下寒武统页岩的层序地层划分较为困难，一般将其划分为二级层序(梅冥相等，2006b；庞维华等，2011)。随着区域地质调查对比研究的深入，将下寒武统岩家河组和水井沱组划分为 5 个三级层序较为合理，地层在不同地区表现为不同特

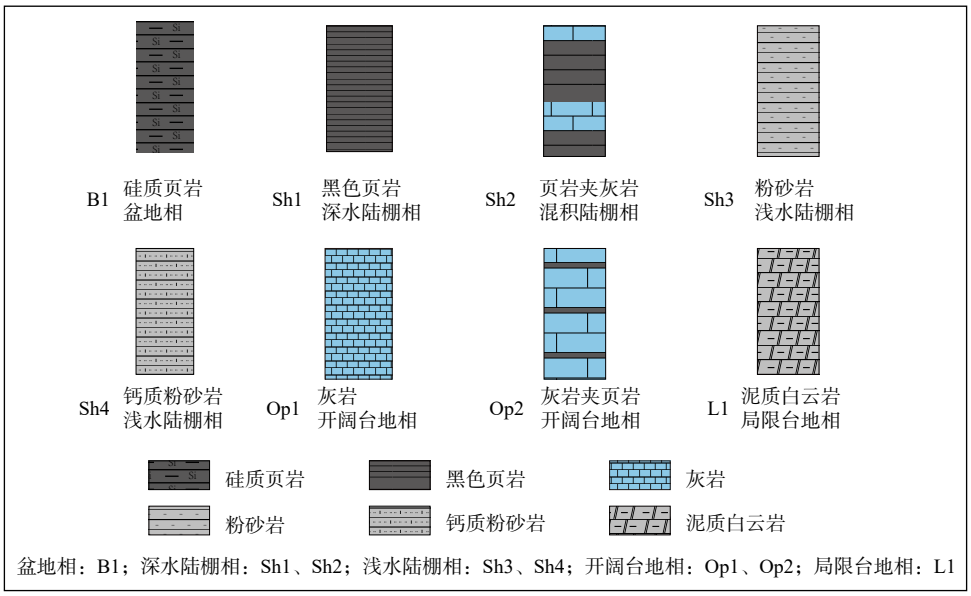


图 3 鄂西海槽水井沱组典型沉积岩相

Fig. 3 Typical sedimentary facies of the Shuijingtuo Formation in the E'Xi Trough

征，由浅到深依次为潮坪、台地、盆地区，代表性的剖面分别有宜昌莲沱天柱山、宜昌三斗坪岩家河和沅陵龙潭坪（图 4；王传尚等，2012）。

（1）层序 1（CamSq1）：该层序在盆地相区沅陵龙潭坪剖面沉积硅质岩，而在其他地区沉积缺失，形成沉积间断面。

（2）层序 2（CamSq2）：该层序在沅陵龙潭坪剖面位置转变为斜坡相，其海侵体系域（TST）由黑色薄层状硅质岩与极薄层状硅质岩、含炭质硅质岩组成的多个韵律叠置构成，高位体系域（HST）由中层状硅质岩组成；而浅海陆棚相区的岩家河剖面沉积岩家河组下段灰黑色硅质岩夹黑色页岩构成海侵体系域，并与下伏灯影组白云岩假整合接触，局部可见侵蚀面，其高位体系域由灰白色中—厚层白云岩夹黑色薄层硅质岩组成，含小壳化石组合。

（3）层序 3（CamSq3）：该层序在潮坪相、浅海陆棚相中为侵蚀不整合面，而在斜坡相及盆地相中，该层序底面为整合沉积接触。在潮坪相区，该层序即为天柱山段的沉积，其海侵体系域为下部的夹燧石透镜体中层状白云岩与泥质白云岩互层向上变为灰黑色硅质白云岩，解释为潮下低能带的沉积；高位体系域由夹燧石条带的厚层状泥晶白云岩组成，发育波状层理，显示水体能量较高、深度较浅的潮坪相沉积，顶部的富含小壳化石的粒屑砂屑白云岩解释为潮下带高能滩相沉积。在浅海陆棚相区，此三级层序对应岩家河组上部的沉积，其海侵体系域（TST）和凝缩层沉积为黑色硅质岩、黑色炭质灰岩夹黑色炭质页岩，其底界与三级层序 CamSq2 顶部的含小壳化石的硅磷质碎屑白云质灰岩整合接触。高位体系域为该组上部的黑色炭质灰岩与黑色钙质炭质页岩互层，顶部为含小壳化石的硅磷质碎屑灰岩，为一套加积沉积序列，顶部表现为进积型。在斜坡相区的沅陵龙潭坪剖面，该层序表现为一套弱退积沉积序列，由薄层硅质岩夹炭质页岩组成，自下而上硅质岩单层厚度逐渐减小。换言之，该层序在斜坡相及盆地相中，高位体系域发育不明显或不发育，仅表现为一套海侵沉积序列。

（4）层序 4（CamSq4）：该层序的底界为 II 型层序界面，黑色炭质页岩超覆在不同层位的地层之上，在台地相区湖北宜昌莲沱剖面，水井沱组不整合在天柱山段之上，在长阳王子石假整合在岩家河组之上，在斜坡相区及盆地相区的湖南张家界田坪、永顺王村、湖南安化大福坪、贵州丹寨等地，与灯影组顶部的硅质岩、留茶坡组或老堡组硅质岩接触。

（5）层序 5（CamSq5）：该层序与下伏三级层序为连续沉积，底界面为一个 II 型层序界面，但其陆架边缘体系域（SMST）仅在川黔湘交境地区发育较好，称变马冲组（徐世球等，1997），区域上该组的岩性与其命名剖面丹寨南皋变马冲剖面有所差异，后者为一套黑色含炭质钙质泥岩夹泥质粉砂岩、石英粉砂岩等。

鄂西地区水井沱组上覆石牌组地层，其下部为

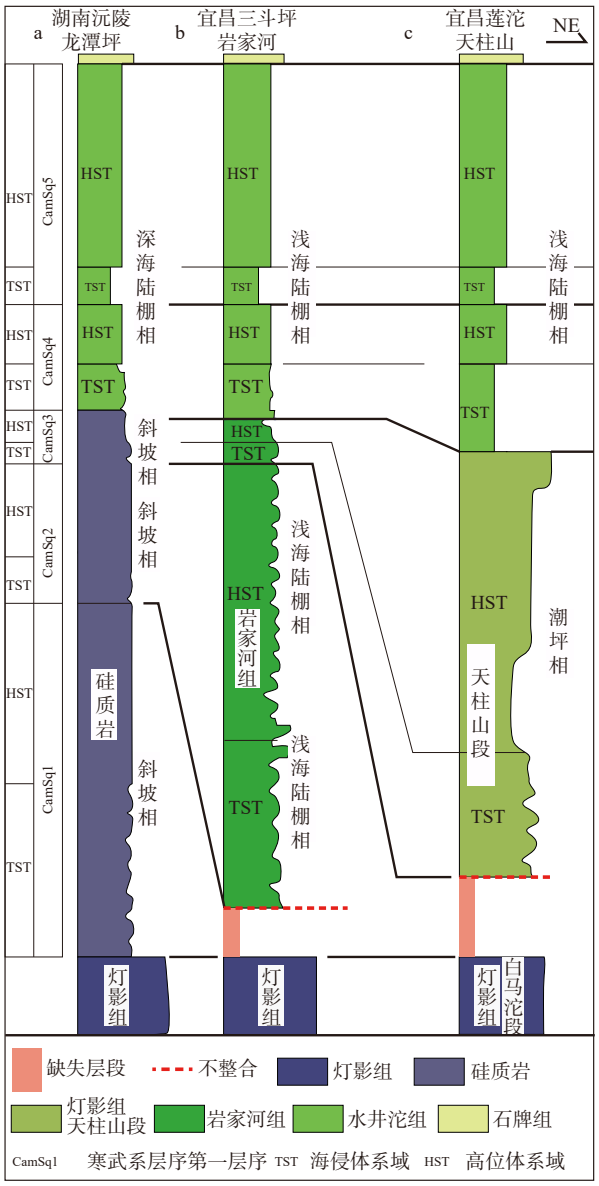


图 4　中扬子地区下寒武统层序地层划分柱状图（剖面位置见图 1；据王传尚等，2012 修改）

Fig. 4　Sequence stratigraphic column of the Lower Cambrian in the Middle Yangtze Region (The location is shown in Fig.1; modified after Wang et al., 2012)

黄绿色泥岩、粉砂质泥岩夹薄层钙质粉砂岩和薄层灰岩，富含三叶虫化石，为海侵体系域沉积；中部为石英粗粉砂岩，向上变为钙质细砂岩、紫红色含铁鲕粒灰岩，为一套向上变粗的进积型沉积序列。

2.3　钻井特征

EYY1 井是为了探索中扬子地区震旦纪和寒武纪页岩气并取得突破的页岩气勘探井（陈科等，2020），位于宜昌三斗坪剖面以西。该井揭示，水井沱组和岩家河组主体上具有深水陆棚相特征，主要沉积富有机质页岩，与灯影组整合接触并连续沉积。根据岩性组合特征，钻井的富有机质页岩可以大致划分为 3 段，从下到上分别为岩家河组、水井沱组下段和上段（陈孝红等，2018；高键等，2021），对应第 1 到第 5 个三级层序（图 5）：岩家河组（3061～3069 m）地层属于深水陆棚相类型，主要发育含炭质灰岩与极薄层含炭质泥岩；水井沱组下段（2852～3061 m）主要发育灰色钙质粉砂岩和钙质泥岩，夹碳酸盐岩；水井沱组上段（2601～2852 m）属于开阔台地沉积相类型，发育灰色中层状泥晶灰岩（图 5；何庆等，2021；刘俞佐等，2022）。水井沱组上段的灰岩含量从下到上逐渐增加，可能反映了频繁气候变化而引起的海进–海退循环（张国涛等，2022）。参考露头剖面层序地层划分和伽马测井曲线可以划分为 5 个三级层序：层序 1（CamSq1）的底界面为灯影组碳酸盐岩向页岩转换的岩性–岩相转换面，其主要为黑色页岩夹灰岩，为深水陆棚相沉积；层序

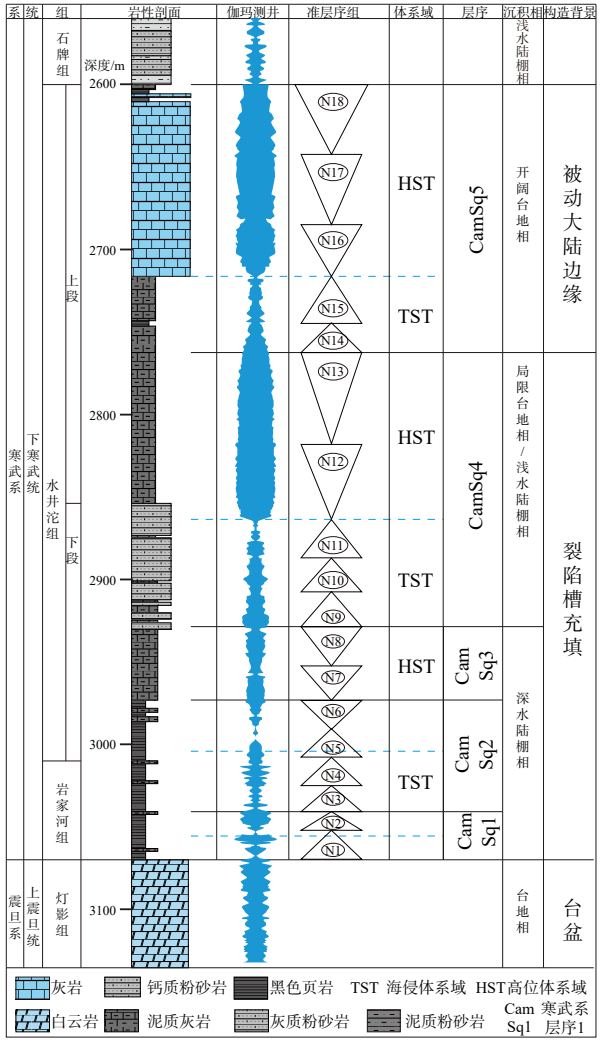


图 5　EYY1 井综合柱状图

Fig. 5　Comprehensive histogram of Well EYY1

1—层序3均发育深水陆棚相沉积，主要为页岩夹泥质灰岩，判断为裂陷槽充填的初期；其上层序4(CamSq1)粒度变粗，沉积钙质粉砂岩和泥质灰岩，沉积环境推测为碳酸盐岩台地和浅水陆棚相的组合；最上部的层序5(CamSq5)为泥质灰岩和中—厚层灰岩组成，判断为开阔台地相沉积，具有被动大陆边缘的特征(图5)。

2.4 平面分布特征

中扬子地区水井沱组在鄂西海槽及邻区变化较大，海槽两侧水深较浅、沉积厚度较小。目前钻井显示，东侧ZK9003井沉积厚度最薄，仅为6 m，此处大部分地区不超过50 m；西侧钻井资料较少，L1井显示沉积厚度较薄，为44 m(图6)。

海槽内部，水井沱组和岩家河组富有机质页岩的厚度明显变大，总厚度约为100～200 m。通过钻井发现，台地内部存在2个沉积凹陷。东侧凹陷为宜昌地区，经多期勘探开发证实，其最厚处为EYY1井，厚度达521 m；周边钻井显示，该凹陷的厚度普遍为200～300 m。西侧凹陷位于恩施附近，勘探显示X2井洼陷处厚度最大达826.5 m，可能是沉积的中心部位。相比之下，凹陷外部的钻井显示其厚度小于500 m。

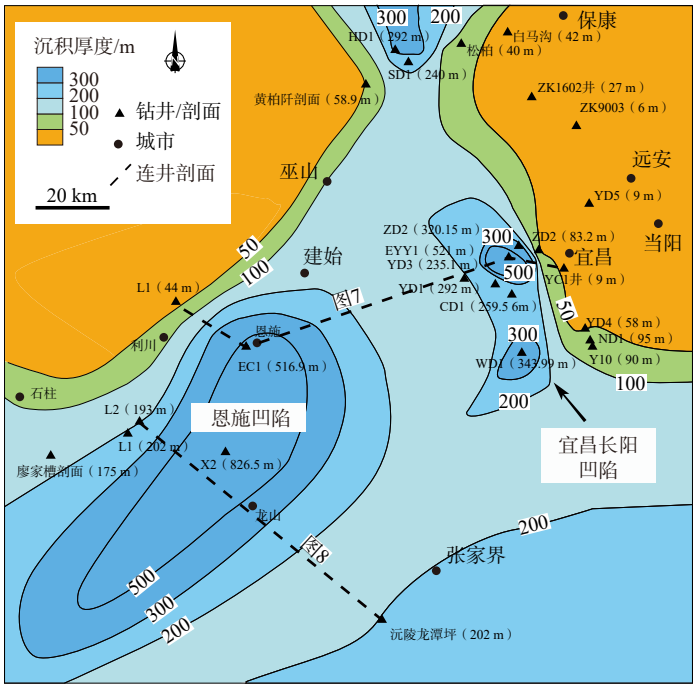


图6 鄂西海槽地区水井沱组和岩家河组沉积厚度等值线图

Fig. 6 Isopach map of the Shuijingtuo and Yanjiahe Formations in the E'Xi Trough area

综上所述，鄂西地区在平面上具有明显的海槽特征，北侧较窄，在神农架地区发育有深水陆棚相沉积，南部宽度较大，与半深海—深海盆地相相连。

2.5 地层对比

2.5.1 东西向剖面

从地层厚度分布特征来看，鄂西海槽水井沱组呈现明显的中间厚两边薄的空间分异格局，这一形态特征指示该组沉积期存在碎屑充填补偿的沉积过程。岩性特征表明：位于海槽东、西两翼的YC1井和L1井均以浅水陆棚相粉砂质泥岩为主；位于海槽内部的EYY1井则表现为下细上粗的沉积序列，底部为深水陆棚相炭质页岩，向上逐渐过渡为含多层灰岩夹层的泥质沉积，顶部发育中—厚层灰岩；YC1井下部可见富有机质页岩，向上渐变为泥质灰岩，厚度非常薄，指示该区沉积为海槽边缘的台地区(图7)。

沉积相特征显示了鄂西海槽两翼沉积浅水陆棚相粉砂质泥岩沉积，海槽中心则呈现以深水陆棚相为主的阶段性演化特征。水井沱组沉积早期，EYY1井和EC1井均处于深水陆棚相环境；中期EYY1井沉积环境发生改变，先后发育浅水陆棚相和开阔台地相碳酸盐岩沉积；而EC1井在沉积晚期出现炭质灰岩，表现出较浅水沉积环境。该套地层三维空间展布特征与沉积相组合规律，记录了早古生代鄂西

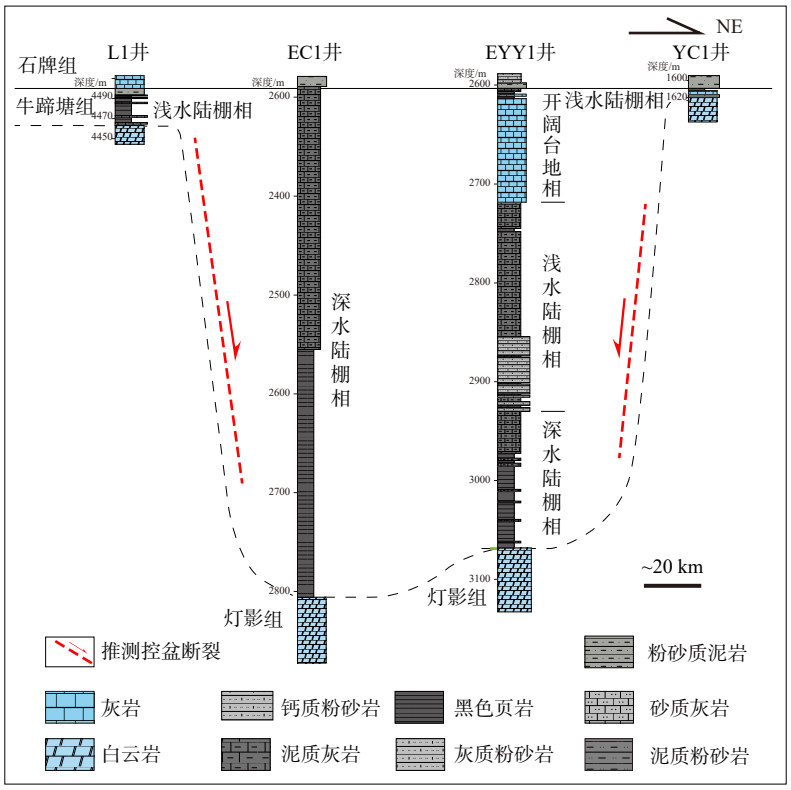


图 7　中扬子地区下寒武统近东—西方向连井剖面（剖面位置见图 6）

Fig. 7　E–W trending well-tie cross-section of the Lower Cambrian in the Middle Yangtze region (The location is shown in Fig.6.)

海槽古地理格局，其几何形态与结构特征直观反映了海槽基底形态对沉积环境分化的控制作用。

2.5.2　北西—南东向剖面

从北西—南东方向看，水井沱组的厚度分布特征显示了在鄂西恩施地区呈现出显著的凹陷（图 6）。在凹陷中心部位，厚度达到最大值，其中 X2 井的水井沱组厚度为 826.5 m；而向东部和西部两侧，厚度则逐渐减小；西侧 L2 井的水井沱组厚度为 320 m，东侧沅陵龙潭坪剖面的水井沱组厚度为 200 m（图 8）。

在岩性特征方面，L2 井底部发育有约 10～20 m 厚的硅质岩，向上过渡为黑色富有机质页岩，其上部则为泥质灰岩；X2 井底部同样发育有较厚的硅质岩，硅质岩之上为约 600 m 厚的炭质页岩，再往上上覆石牌组为灰岩沉积。此外，X2 井底部还发育有粉砂岩质泥岩，下部存在厚层的硅质岩，上部则发育富有机质页岩并夹杂少量粉砂质泥岩，其上覆石牌组为灰岩和粉砂质页岩沉积。东南侧沅陵龙潭坪剖面下寒武统发育的牛蹄塘组与鄂西地区水井沱组相当，厚度约为 200 m，下伏灯影组为硅质岩沉积，此处牛蹄塘组主要发育富有机质页岩，其上覆杷榔组为泥质白云岩，与鄂西地区的石牌组地层相当。

在沉积相方面，X2 井位于沉积中心，位于陆棚环境中形成的凹陷内，主要发育深水相硅质沉积和富有机质页岩，凹陷东西两侧为深水陆棚相页岩沉积。而东侧的沅陵龙潭坪剖面牛蹄塘组为沉积深水盆地相页岩，且连续沉积于灯影组硅质岩之上（图 8）。

3　中上扬子地区下寒武统富有机质页岩对比

3.1　典型剖面

中扬子地区鄂西海槽及其周缘的水井沱组可与上扬子地区德阳–安岳海槽筇竹寺组进行对比（刘忠宝等，2017）。根据古沉积环境分析，当时的沉积环境可以划分为碎屑岩和碳酸盐岩两大沉积体系和多种沉积相：碎屑岩沉积相由浅到深依次发育滨岸相、陆棚相、斜坡相和盆地相；碳酸盐岩沉积相包括缓坡相、开阔台地相和局限台地相。

滨岸相代表性剖面为四川南部凉红剖面的筇竹寺组，其沉积特征为灰色中—细粒石英砂岩，发育板状及槽状交错层理、浪成波痕、生物扰动构造等，具有近滨砂坝的微相特征。

陆棚相可进一步划分为深水陆棚相和浅水陆

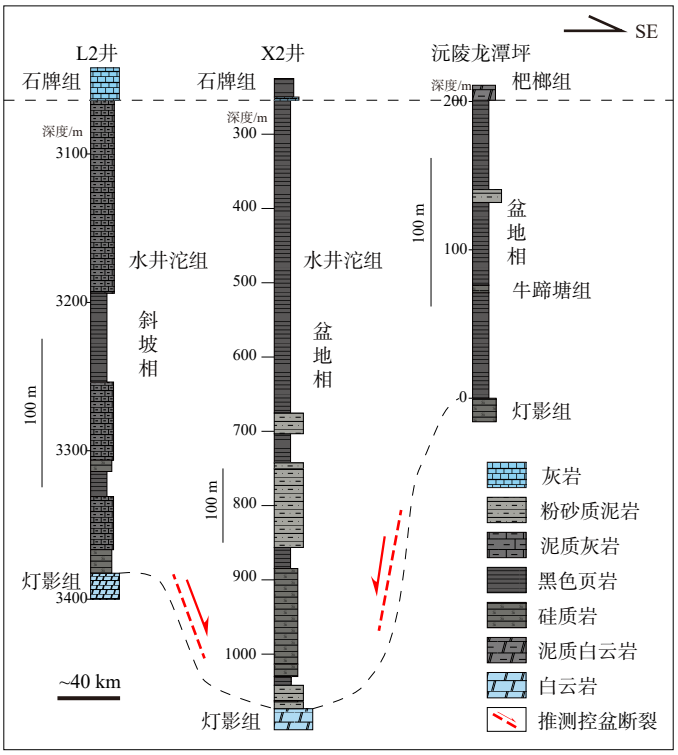


图 8 中扬子地区下寒武统近北西—南东方向连井剖面（剖面位置见图 6）

Fig. 8 NW–SE trending well-tie cross-section of the Lower Cambrian in the Middle Yangtze region (The location is shown in Fig.6.)

棚相：浅水陆棚相主要由灰色黏土质页岩、含灰泥岩、粉砂质页岩、含碳页岩组成，沉积构造上具有波状层理、小型交错层理、砂泥互层及碎屑岩–碳酸盐岩混积，绿藻、蓝细菌发育，局部发育少量黄铁矿，代表性剖面包括川南 JY1 井筇竹寺组、重庆彭水 CS1 井石牌组；深水陆棚相发育黑色—黑灰色炭质页岩、含磷泥岩、含粉砂质页岩及钙质纹层页岩，局部可见纹层及水平层理，代表性剖面有磨溪–高石梯 GS17 井筇竹寺组、贵州永和剖面牛蹄塘组、鄂西恩施 EY1 井水井沱组及黔西岩孔剖面牛蹄塘组。

斜坡相可细分为陡斜坡相和缓斜坡相，主要由硅质页岩和炭质页岩组成，黄铁矿高度富集，滑塌构造发育，代表性剖面见于湘西吉首龙鼻嘴牛蹄塘组下部。

盆地相以黑色—灰黑色硅质岩、硅质页岩、硅炭质页岩为主，地层厚度减薄，砂质及碳酸盐岩含量极少、硅质含量高，代表性剖面位于鄂西 X2 井水井沱组下部。

缓坡相具有潮坪亚相和浅水缓坡亚相特征：潮坪亚相以含磷粉—细晶云岩和含磷泥晶灰岩为主，典型沉积构造上为波状层理，磷质小壳化石丰富，代表性剖面见于川南范店、抓抓岩麦地坪组和重庆石柱剖面水井沱组；浅水缓坡亚相（开阔台地相）岩性组合为灰色—深灰色泥质灰岩和钙质泥岩，沉积构造以厚层状、团块状为主，泥质灰岩–钙质泥岩–泥岩互层，典型剖面见于鄂西 L2 井水井沱（图 3）。

局限台地相由富含球粒的碳酸盐泥组成，岩性主要为泥质碳酸盐岩，鄂西 EYY1 井为该相带典型代表，且向东侧水体变浅至鄂中古陆（图 4，图 6，图 7）。

3.2 沉积相模式

鄂西海槽地区水井沱组和岩家河组下伏地层主要为灯影组碳酸盐岩，受中上扬子地块边缘多个古陆及滨岸相沉积的影响，水井沱组与下伏地层的接触关系具有 2 种沉积模式：一是台地或古陆区的平行不整合接触，碳酸盐岩遭到剥蚀；二是深水区的整合接触，出现在湘西、江西地区的深水斜坡相–盆地相区，在鄂西海槽和德阳–安岳海槽内部的深水区同样表现为连续沉积。

鄂西地区下寒武统（水井沱组和岩家河组）富有机质页岩沉积可分为 5 个三级层序（CamSq1—CamSq5），与上扬子德阳–安岳海槽具有良好可对比性（刘忠宝等，2018）。层序 1（CamSq1），主要分布于下伏灯影组大陆斜坡相和深海盆地相区，例如湘西和江西地区沉积硅质岩，在鄂西海槽和德阳–安岳海槽的低洼部位有沉积记录，而在灯影组白云岩台

地区存在明显的缺失；层序 2(CamSq2)，主要发育在盆地内部和鄂西海槽岩家河组的下部，盆地核心部位为硅质岩−页岩沉积，而其他高部位区域沉积浅水陆棚相粉砂质页岩夹灰岩；层序 3(CamSq3)，在海槽内部有硅质岩沉积，而在台地部位为岩家河组上段和天柱山段白云岩沉积；层序 4(CamSq4)，主要为海侵深水陆棚相沉积，全区广泛发育富有机质页岩，形成富有机质页岩地层；层序 5(CamSq5)，该时期相对海平面变浅，原来深水陆棚相沉积转变为碳酸盐岩和浅水陆棚相沉积(图 9)。

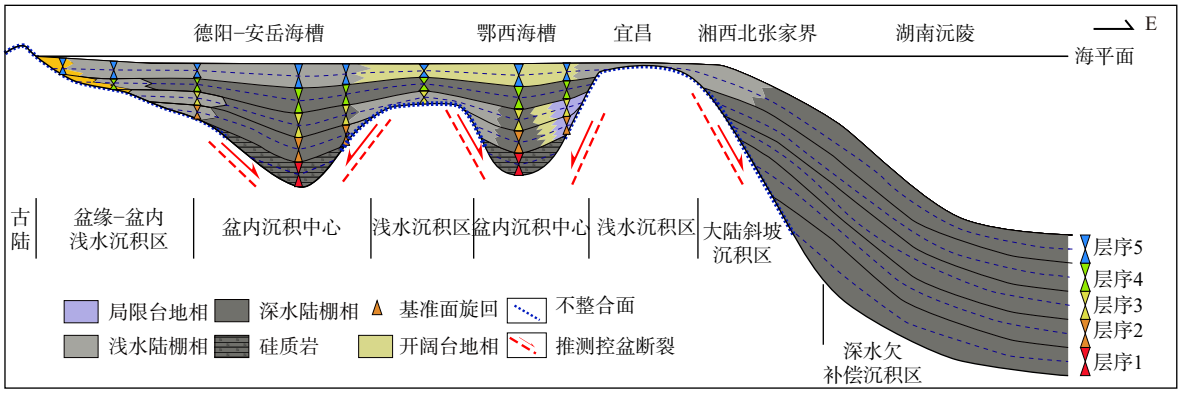


图 9　中上扬子地区下寒武统富有机质页岩沉积模式图（上扬子地区数据据刘忠宝等，2018 修改）

Fig. 9　Depositional model of Lower Cambrian organic-rich shales in the Middle–Upper Yangtze region (The data for the Upper Yangtze region are modified from Liu et al., 2018)

4　讨论

4.1　水井沱组沉积过程

震旦纪—寒武纪鄂西海槽主要形成于陡山沱组沉积时期(陈科等，2024)，而震旦纪灯影组沉积时期中扬子地区为台盆结构，其上覆的水井沱组沉积具有填平补齐的特征，形成碎屑岩沉积并充填。鄂西地区水井沱组下伏灯影组台地范围较大，沉积厚层的碳酸盐岩，而在鄂西海槽、德阳−安岳海槽沉积中心和湖南沅陵等地区为深水硅质岩沉积。灯影组顶面在台地区存在暴露侵蚀的特征，因此宜昌地区上覆水井沱组以平行不整合覆盖在灯影组碳酸盐岩之上，而在鄂西海槽和德阳−安岳海槽内部，以及深水陆棚相和斜坡盆地相区，水井沱组和与其年代相当的牛蹄塘组整合覆盖在灯影组(湘西−黔东为留茶坡组)之上。

震旦纪—寒武纪中扬子地区自西北向东南水深逐渐增加，按照层序地层学原理结合区域地质调查资料，可以将下寒武统富有机质页岩划分为 5 个三级层序(CamSq1—CamSq5)，底界面为震旦纪和寒武纪界面，地质年龄为 539 Ma，水井沱组和石牌组的界面约为 517 Ma(陈孝红等，2018)。因此，下寒武统水井沱组的地质时间约为 22 Ma，每一个三级层序的平均时间为 4.4 Ma，符合层序地层学对三级层序的定义。CamSq1—CamSq3 时期，整体表现为一个持续的海进层序，在中上扬子地区该层序可能缺失，沉积仅存在于低洼地区，宜昌莲沱镇以东为天柱山段，而以西为岩家河组，再往东呈现水井沱组减薄或者缺失的趋势，指示了鄂中古陆的存在；CamSq4 时期，水井沱组深水沉积淹没了整个中上扬子地区，形成了厚层的富有机质页岩；CamSq5 时期，相对海平面下降，宜昌地区形成灰岩，在上覆石牌组过渡为浅水陆棚相的粉砂岩。至此，鄂西海槽由灯影组时期的台盆结构转化为浅水陆棚相沉积。中扬子水井沱组富有机质页岩记录了寒武纪生命大爆发的重大地质事件，雪球事件后氧气含量提升与深水缺氧环境的结合是生物爆发并保存有机质的关键，古气候由寒冷向温暖转变，促进了生物生产力提升(汪啸风和姚华舟，2019；潘晓强等，2023；汪宗欣等，2023)。

4.2　油气地质意义

中扬子地区下寒武统水井沱组主要由黑色页岩组成，总有机碳含量(TOC)大于 2.0%，镜质体成熟度(R_o)约 3%，为页岩气勘探的主要层位(陈科等，2020)，富有机质页岩主要分布于深水陆棚相区。鄂西地区下寒武统页岩具有三段式沉积特征：底部第一段(岩家河组，潮坪相区称为天柱山段)含有小壳化石，富有机质页岩仅在深水区分布；中部第二

段(水井沱组下部)伴随大规模海进事件,中上扬子地区大部分被淹没,富有机质页岩分布广泛、厚度大;上部第三段(水井沱上部)表现为海退沉积序列,在鄂西宜昌地区发育粉砂质页岩夹灰岩,在顶部转变为纯灰岩。因此,目前鄂西水井沱组页岩气勘探主要集中在第一段和第二段(即 CamSq1—CamSq4),鄂西海槽相对水深地区是页岩气勘查的主要地区。

下寒武统富有机质页岩记录了早寒武世扬子板块内部板内裂陷的充填过程,在裂陷盆地中形成了深水陆棚相的富有机质页岩,因此鄂西海槽和上扬子地区的德阳−安岳海槽是页岩气和烃源岩发育的重点地区,目前资源评价显示,鄂西地区页岩气地质资源量超过 10 万亿立方米(包书景等, 2025)。

水井沱组也是常规天然气“下组合”中最重要的烃源岩。震旦系—寒武系常规天然气是中国南方重要的油气成藏组合,如四川盆地新元古界灯影组藻丘滩白云岩,受沉积相和成岩作用双重影响(汪泽成等, 2020),特别是两期桐湾运动导致的风化剥蚀暴露及淡水淋滤作用,形成有效储集层,孔隙度一般为 4%～6%,储集层累计厚度可达 60～130 m。目前在四川盆地获得了安岳气田灯影组常规油气重大突破。中扬子地区从下到上发育陡山沱组烃源岩、灯影组常规油气储层及牛蹄塘组烃源岩和盖层,形成“三明治”式常规油气成藏模式,然而该组合在中扬子地区保存条件较差,还需要进一步勘查,优选保存条件,在复向斜中优选构造高点(“凹中隆”),有望获得该新领域的突破。

5 结论

(1)中扬子地区下寒武统水井沱组和岩家河组可划分为 5 种沉积相组合,主要发育浅水陆棚相和深水陆棚沉积相。该区在海槽中心主要沉积深水相富有机质页岩,而向盆地两侧水体变浅为浅水陆棚相或台地相。通过调查研究识别出鄂西恩施和宜昌长阳 2 个次级凹陷,沉积了厚层(大于 500 m)的富有机质页岩。

(2)层序地层学研究表明,可将鄂西海槽下寒武统富有机质页岩划分为 5 个三级层序,底界面为震旦系和寒武系界面,地质年龄为 539 Ma,水井沱组和石牌组的界面约为 517 Ma,下寒武统水井沱组的地质年龄约为 22 Ma,每一个三级层序的平均时间为 4.4 Ma。

(3)水井沱组沉积位于鄂西震旦纪—寒武纪裂陷槽的填平补齐阶段,富有机质页岩分布于深水陆棚相区,页岩气勘探集中在相对深水相区,鄂西恩施和宜昌长阳 2 个次级凹陷是页岩气勘探的重点地区;常规油气勘探中鄂西下寒武统富有机质页岩主要为灯影组常规油气储层提供烃源岩,良好的保存条件是天然气成藏的关键。

References

BAO S J, GE M N, ZHAO P R, et al., 2025. Status-quo, potential, and recommendations on shale gas exploration and exploitation in China[J]. Oil & Gas Geology, 46(2): 348-364. (in Chinese with English abstract)

CHEN K, ZHAI G Y, BAO S J, et al., 2020. Tectonic evolution of the Huangling uplift and its control effect on shale gas preservation in South China[J]. Geology in China, 47(1): 161-172. (in Chinese with English abstract)

CHEN K, LU Y X, LI F, et al., 2024. Sedimentary characteristics of Doushantuo Formation in middle-upper Yangtze Region and its significance for oil and gas geology[J]. Geological Survey of China, 11(5): 92-103. (in Chinese with English abstract)

CHEN X, BU K, RUAN Y P, et al., 1997. Correlation between geologically marked climatic changes and extinctions[J]. Earth Science Frontiers, 4(3-4): 123-128. (in Chinese with English abstract)

CHEN X H, WEI K, ZHANG B M, et al., 2018. Main geological factors controlling shale gas reservoir in the Cambrian Shuijingtuo Formation in Yichang of Hubei Province as well as its and enrichment patterns[J]. Geology in China, 45(2): 207-226. (in Chinese with English abstract)

DENG L, YAN Q R, YANG J, et al., 2025. Environmental drivers of biotic turnover: insight from tectono-sedimentary environment transition during the terminal Ediacaran to Early Cambrian[J]. Precambrian Research, 417: 107666.

FENG Z Z, PENG Y M, JIN Z K, et al., 2001. Lithofacies palaeogeography of the Cambrian in South China[J]. Journal of Palaeogeography, 3(1): 1-14. (in Chinese with English abstract)

FU Y, ZHOU W X, WANG H J, et al., 2021. The relationship between environment and geochemical characteristics of black rock series of Lower Cambrian in northern Guizhou[J]. Acta Geologica Sinica, 95(2): 536-548. (in Chinese with English abstract)

GAO J, LI Y Q, HE S, et al., 2021. Exploration discovery of shale gas and its indicative significance to mineralization of MVT lead-zinc deposit in Yichang area, West Hubei[J]. Earth Science, 46(6): 2230-2245. (in Chinese with English abstract)

GU H D, HU J, AN Z H, et al., 2021. Sedimentary characteristics of Doushantuo Formation in Shennongjia area: implications for "West Hubei Trough"[J]. Earth Science, 46(8): 2958-2972. (in Chinese with English abstract)

GUO T L, DENG H C, ZHAO S, et al., 2025. Formation mechanisms and exploration breakthroughs of new type of shale gas in Cambrian Qiong-

zhusi Formation, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 52(1): 57-69. (in Chinese with English abstract)

HAN W, JIANG X C, WANG J Q, et al., 2024. Tectonic evolution and geological conditions for the formation of Cambrian shale gas in Hanzhong area[J]. Acta Geologica Sinica, 98(6): 1829-1839. (in Chinese with English abstract)

HE Q, GAO J, DONG T, et al., 2021. Elemental geochemistry and paleo-environmental conditions of the Lower Cambrian Niutitang shale in western Hubei Province[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 39(3): 686-703. (in Chinese with English abstract)

HE X, CHEN G S, WU J F, et al., 2022. Deep shale gas exploration and development in the southern Sichuan Basin: new progress and challenges[J]. Natural Gas Industry, 42(8): 24-34. (in Chinese with English abstract)

LI L Y, TOPPER T P, BETTS M J, et al., 2023. Calcitic shells in the aragonite sea of the earliest Cambrian[J]. Geology, 51(1): 8-12.

LIU Y Z, ZHAI G Y, XU X F, et al., 2022. Logging Identification of high quality shale of Niutitang Formation and Doushantuo Formation in western Hubei[J]. Earth Science, 47(5): 1791-1804. (in Chinese with English abstract)

LIU Z B, GAO B, ZHANG Y Y, et al., 2017. Types and distribution of the shale sedimentary facies of the Lower Cambrian in Upper Yangtze area, South China[J]. Petroleum Exploration and Development, 44(1): 21-31. (in Chinese with English abstract)

LIU Z B, DU W, GAO B, et al., 2018. Sedimentary model and distribution of organic-rich shale in the sequence stratigraphic framework: a case study of Lower Cambrian in Upper Yangtze Region[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 48(1): 1-14. (in Chinese with English abstract)

MA Y S, CHEN H D, WANG G L, et al. , 2009. Sequence stratigraphy and paleogeography in Southern China[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)

MEI M X, ZHANG C, ZHANG H, et al., 2006a. Sequence-Stratigraphic frameworks and their forming backgrounds of paleogeography for the Lower Cambrian of the Upper-Yangtze Region[J]. Geoscience, 20(2): 195-208. (in Chinese with English abstract)

MEI M X, ZHANG H, MENG X Q, et al., 2006b. Sequence stratigraphic division and framework of the Lower Cambrian in the Upper Yangtze Region[J]. Geology in China, 33(6): 1292-1304. (in Chinese with English abstract)

MEN Y P, YAN J F, QI M H, et al., 2020. Effects of bottom and top layers of Niutitang Formation on preservation of shale gas in southern Guizhou[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 40(1): 53-59. (in Chinese with English abstract)

PAN X Q, HUA H, DAI Q K, et al., 2023. Fossil assemblages and their stratigraphic distribution in the Shuijingtuo Formation (Cambrian Series 2, Stage 3) in Yichang area, Hubei Province, China[J]. Earth Science Frontiers, 30(3): 28-43. (in Chinese with English abstract)

PANG W H, DING X Z, GAO L Z, et al., 2011. Characteristics of Sequence Stratigraphy and Plaeoenvironmental Evolution of Lower Cambrian strata in Hunan Province[J]. Geology in China, 38(3): 560-576. (in Chinese with English abstract)

The Three Gorges Stratigraphic Research Group of Hubei Provincial Bureau of Geology, 1978. Paleontology of Sinian to Permian strata in the eastern Xiadong Region[M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)

WANG C S, LI X B, LI Z H, et al., 2012. Cambrian sequence-stratigraphy in the middle and Upper Yangtze platform[J]. Journal of Stratigraphy, 36(4): 773-783. (in Chinese with English abstract)

WANG J G, CHEN D Z, WANG D, et al., 2012. Petrology and geochemistry of chert on the marginal zone of Yangtze platform, western Hunan, South China, during the Ediacaran-Cambrian transition[J]. Sedimentology, 59(3): 809-829.

WANG X F, YAO H Z, 2019. Yangtze Basin, China: a unique fossil-lagerstatten for the Cambrian explosion and diverse radiation evolution in the world[J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 53(6): 821-833. (in Chinese with English abstract)

WANG X L, 2004. Criteria for defining and recognizing the various orders of sequences in outcrop sequence stratigraphy[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 47(7): 618-629.

WANG X F, NI S Z, ZENG Q L, et al. , 1987. Biostratigraphy of the Yangtze Gorges Area (2) Early Paleozoic Stratigraphy[M]. Beijing: Geological Publishing House: 43-142. (in Chinese)

WANG Z C, JIANG H, CHEN Z Y, et al., 2020. Tectonic Paleogeography of Late Sinian and its significances for petroleum exploration in the middle-upper Yangtze Region, South China[J]. Petroleum Exploration and Development, 47(5): 884-897. (in Chinese with English abstract)

WANG Z X, ZENG X W, MIAO F B, et al., 2023. Geochemical characteristics of elements and their geological significance in the boundary between Yanjiahe Formation and Shuijingtuo Formation of the Early Cambrian in Yichang area[J]. South China Geology, 39(2): 320-332. (in Chinese with English abstract)

XIA W J, DU S G, XU X H, et al. , 1994. Sinian lithofacies paleogeography and mineralization in South China[M]. Beijing: Geological Publishing House: 50-61. (in Chinese)

XU S Q, YANG J L, LI F Q, et al., 1997. Sedimentary sequence and paleoenvironments of " Bianmachong Formation" in Early Cambrian in the boundary area of Sichuan, Guizhou and Hunan[J]. Earth Science——Journal of China University of Geosciences, 22(5): 520-525. (in Chinese with English abstract)

ZHAI G Y, WANG Y F, LIU G H, et al., 2020. Accumulation model of the Sinian-Cambrian shale gas in western Hubei Province, China[J]. Journal of Geomechanics, 26(5): 696-713. (in Chinese with English abstract)

ZHANG G T, CHEN X H, WANG B Z, et al., 2022. Geochemical characteristics of black rock series in the transition zone between Sinian and Cambrian systems in the Xuefengshan area: implications for their provenances, paleoclimate and tectonic setting[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 41(2): 414-428. (in Chinese with English abstract)

ZHANG W T, LI J J, QIAN Y Y, et al., 1957. Cambrian and Ordovician Strata in Eastern Yangtze Gorge, Hubei[J]. Science Bulletin, (5): 145-146. (in Chinese)

ZHAO J H, JIN Z J, LIN C S, et al., 2019. Sedimentary environment of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation shale in the Upper Yangtze Region[J]. Oil & Gas Geology, 40(4): 701-715. (in Chinese with English

abstract)

ZOU C N, ZHAO Z F, PAN S Q, et al., 2024. Unveiling the oldest industrial shale gas reservoir: insights for the enrichment pattern and exploration direction of Lower Cambrian shale gas in the Sichuan Basin[J]. Engineering, 42: 278-294.

附中文参考文献

包书景, 葛明娜, 赵培荣, 等, 2025. 中国页岩气勘探开发现状、潜力与发展建议[J]. 石油与天然气地质, 46(2): 348-364.

陈科, 翟刚毅, 包书景, 等, 2020. 华南黄陵隆起构造演化及其对页岩气保存的控制作用[J]. 中国地质, 47(1): 161-172.

陈科, 卢妍欣, 李飞, 等, 2024. 中上扬子地区陡山沱组沉积特征及其油气地质意义[J]. 中国地质调查, 11(5): 92-103.

陈孝红, 危凯, 张保民, 等, 2018. 湖北宜昌寒武系水井沱组页岩气藏主控地质因素和富集模式[J]. 中国地质, 45(2): 207-226.

陈旭, 布科, 阮亦萍, 等, 1997. 显生宙全球气候变化与生物绝灭事件的联系[J]. 地学前缘, 4(3-4): 123-128.

冯增昭, 彭勇民, 金振奎, 等, 2001. 中国南方寒武纪岩相古地理[J]. 古地理学报, 3(1): 1-14.

付勇, 周文喜, 王华建, 等, 2021. 黔北下寒武统黑色岩系的沉积环境与地球化学响应[J]. 地质学报, 95(2): 536-548.

高键, 李英强, 何生, 等, 2021. 鄂西宜昌地区页岩气勘探发现对MVT铅锌矿成矿的指示意义[J]. 地球科学, 46(6): 2230-2245.

谷昊东, 胡军, 安志辉, 等, 2021. 神农架陡山沱组沉积特征及其对“鄂西海槽”的启示[J]. 地球科学, 46(8): 2958-2972.

郭彤楼, 邓虎成, 赵爽, 等, 2025. 四川盆地寒武系筇竹寺组新类型页岩气形成机理与勘探突破[J]. 石油勘探与开发, 52(1): 57-69.

韩伟, 蒋兴超, 王建强, 等, 2024. 汉中地区构造演化及寒武系页岩气形成地质条件研究[J]. 地质学报, 98(6): 1829-1839.

何庆, 高键, 董田, 等, 2021. 鄂西地区下寒武统牛蹄塘组页岩元素地球化学特征及沉积古环境恢复[J]. 沉积学报, 39(3): 686-703.

何骁, 陈更生, 吴建发, 等, 2022. 四川盆地南部地区深层页岩气勘探开发新进展与挑战[J]. 天然气工业, 42(8): 24-34.

湖北省地质局三峡地层研究组, 1978. 峡东地区震旦纪至二迭纪地层古生物[M]. 北京: 地质出版社.

刘俞佐, 翟刚毅, 徐笑丰, 等, 2022. 鄂西地区牛蹄塘组和陡山沱组优质页岩测井识别[J]. 地球科学, 47(5): 1791-1804.

刘忠宝, 高波, 张钰莹, 等, 2017. 上扬子地区下寒武统页岩沉积相类型及分布特征[J]. 石油勘探与开发, 44(1): 21-31.

刘忠宝, 杜伟, 高波, 等, 2018. 层序格架中富有机质页岩发育模式及差异分布: 以上扬子下寒武统为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 48(1): 1-14.

马永生, 陈洪德, 王国力, 等, 2009. 中国南方层序地层与古地理[M]. 北京: 科学出版社.

梅冥相, 张丛, 张海, 等, 2006a. 上扬子区下寒武统的层序地层格架及其形成的古地理背景[J]. 现代地质, 20(2): 195-208.

梅冥相, 张海, 孟晓庆, 等, 2006b. 上扬子区下寒武统的层序地层划分和层序地层格架的建立[J]. 中国地质, 33(6): 1292-1304.

门玉澎, 闫剑飞, 戚明辉, 等, 2020. 黔南地区下寒武统牛蹄塘组页岩气顶底板特征研究[J]. 沉积与特提斯地质, 40(1): 53-59.

潘晓强, 华洪, 代乔坤, 等, 2023. 宜昌地区寒武系水井沱组(第二统第三阶)生物组合面貌及其地层分布[J]. 地学前缘, 30(3): 28-43.

庞维华, 丁孝忠, 高林志, 等, 2011. 湖南下寒武统层序地层特征与古环境演化变迁[J]. 中国地质, 38(3): 560-576.

王传尚, 李旭兵, 李志宏, 等, 2012. 中上扬子区寒武纪层序地层划分与对比[J]. 地层学杂志, 36(4): 773-783.

汪啸风, 倪世钊, 曾庆銮, 等, 1987. 长江三峡地区生物地层学(二)早古生代分册[M]. 北京: 地质出版社: 43-142.

汪啸风, 姚华舟, 2019. 中国扬子海盆: 世界上罕见寒武纪生命大爆发和辐射进化的化石库[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 53(6): 821-833.

汪泽成, 姜华, 陈志勇, 等, 2020. 中上扬子地区晚震旦世构造古地理及油气地质意义[J]. 石油勘探与开发, 47(5): 884-897.

汪宗欣, 曾雄伟, 苗凤彬, 等, 2023. 湖北宜昌早寒武世岩家河组-水井沱组界线元素地球化学特征及其地质意义[J]. 华南地质, 39(2): 320-332.

夏文杰, 杜森官, 徐新煌, 等, 1994. 中国南方震旦纪岩相古地理与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社: 50-61.

徐世球, 杨家驎, 李富强, 等, 1997. 川黔湘交境早寒武世“变马冲组”沉积层序与古环境[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 22(5): 520-525.

翟刚毅, 王玉芳, 刘国恒, 等, 2020. 鄂西地区震旦系—寒武系页岩气成藏模式[J]. 地质力学学报, 26(5): 696-713.

张国涛, 陈孝红, 王保忠, 等, 2022. 雪峰山地区震旦系-寒武系之交黑色岩系地球化学特征: 物源、气候与构造背景[J]. 矿物岩石地球化学通报, 41(2): 414-428.

张文堂, 李积金, 钱义元, 等, 1957. 湖北峡东寒武纪及奥陶纪地层[J]. 科学通报, (5): 145-146.

赵建华, 金之钧, 林畅松, 等, 2019. 上扬子地区下寒武统筇竹寺组页岩沉积环境[J]. 石油与天然气地质, 40(4): 701-715.