引用格式：陈科，卢妍欣，王昱荦，等，2026. 中扬子地区震旦纪—早寒武世鄂西海槽演化特征及其天然气地质意义[J]. 地质力学学报，32（2）：452−468. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025048

Citation: CHEN K，LU Y X，WANG Y L，et al.，2026. The evolution of the Sinian–Early Cambrian E’xi Trough in the Central Yangtze region and its geological significance for natural gas[J]. Journal of Geomechanics，32（2）：452−468. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025048

中扬子地区震旦纪—早寒武世鄂西海槽演化特征及其天然气地质意义

陈　科[1,2]，卢妍欣[1,2]，王昱荦[1,2]，李　飞[1,2]

CHEN Ke[1,2]，LU Yanxin[1,2]，WANG Yuluo[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*

The evolution of the Sinian–Early Cambrian E’xi Trough in the Central Yangtze region and its geological significance for natural gas

Abstract: ［**Objective**］From the Neoproterozoic Sinian to the Early Cambrian periods, extensive basins in South China accumulated substantial volumes of organic-rich shale and carbonate rocks, providing high-quality source rocks and reservoirs. These basins constitute key targets for petroleum exploration. The Central Yangtze Region hosts the Sinian–Early Cambrian E’Xi trough, whose formation and evolutionary processes require further investigation. ［**Methods**］Comprehensive analyses integrating drilling data, outcrop sections, and seismic profiles reveal the evolution history of this north-south-trending trough. ［**Results**］Research indicates four distinct developmental stages: (1) During the deposition of the Nantuo Formation, an initial subsidence center emerged in western Hubei with limited tillite thickness; (2) The Doushantuo Formation developed in a half-graben basin system, coinciding with the post-Snowball Earth warming and humidification, which fostered syn-depositional faulting along the eastern trough margin; (3) The deposition of the Dengying Formation was characterized by carbonate platform with the establishment of a "two-platform, one-basin" architecture across the Central–Upper Yangtze region and the development of a complete graben basin in western Hubei; (4) The Niutitang Formation, dominated by clastic sediments, exhibits thickness complementarity with the underlying Dengying dolomites, marking trough filling and termination. ［**Conclusions**］Members II and IV of Doushantuo Formation, together with Member II of the Niutitang Formation, host organic-rich shales, which constitute the primary targets for shale gas exploration. Conventional hydrocarbon systems display a "sandwich-style" accumulation model comprising Doushantuo source rocks, Dengying reservoirs, and Niutitang seal/source couples. Multiphase tectonic activities have disrupted some oil and gas closed systems, while excessive burial depths locally induced overmatured organic matter. Therefore, the key to shale gas exploration is identifying tectonically stable areas with moderate maturity levels, while the strategic focus for conventional natural gas exploration is prioritizing regions characterized by effective hydrocarbon accumulation and favorable preservation conditions.

Keywords: E’xi trough; Sinian–Early Cambrian; basin evolution; shale gas; natural gas exploration

---

基金项目：国家自然科学基金项目（U2344213）

This research was 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：卢妍欣(1999—)，女，硕士，助理工程师，主要从事油气地质调查。Email：1929893625@qq.com

收稿日期：2025−04−27；**修回日期**：2025−10−30；**录用日期**：2025−11−24；**网络出版日期**：2026−03−30；**责任编辑**：范二平

Received：2025−04−27；Revised：2025−10−30；Accepted：2025−11−24；Available Online：2026−03−30；Handling Editor：FAN Erping

摘　要：新元古代震旦纪—早寒武世华南断陷盆地沉积了大量富有机质页岩和碳酸盐岩，优质烃源岩与储层发育，是油气勘探的重点领域。中扬子地区震旦纪—早寒武世发育鄂西海槽，但其形成与演化过程尚需进一步研究。基于钻井、野外露头和地震剖面等资料的综合分析，文章揭示出南北向鄂西海槽的形成与演化历史。研究结果表明，鄂西海槽经历了4个不同的阶段：南沱组沉积时期，鄂西地区初步形成沉降中心，但冰碛岩沉积厚度较小；陡山沱组沉积时期，雪球地球结束，气候转为温暖湿润，在鄂西海槽东侧形成了具有同沉积断裂的半地堑盆地；灯影组沉积时期，中—上扬子地区整体上形成2个台地和1个盆地的台-盆结构，鄂西地区发育完整的地堑盆地，呈现出碳酸盐岩台地的特征；牛蹄塘组沉积末期，鄂西海槽填充并消亡。其中陡山沱组二段和四段、牛蹄塘组二段发育富有机质页岩，是页岩气勘探的主要层系。同时鄂西海槽自下而上发育陡山沱组烃源岩、灯影组储层、牛蹄塘组烃源岩和盖层，具有“三明治”式的常规油气成藏模式。但多期次的构造活动导致部分油气封闭系统遭到破坏；此外，局部地区烃源岩埋藏深度大，致使有机质成熟度偏高。因此，寻找构造稳定区和成熟度适中地区是鄂西海槽页岩气勘探的关键，而优选有效成藏条件和良好保存地区则是常规天然气勘探的重点方向。

关键词：鄂西海槽；震旦纪—早寒武世；盆地演化；页岩气；天然气勘探

中图分类号：P618.13　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006-6616(2026)02-0452-17

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025048

0　引言

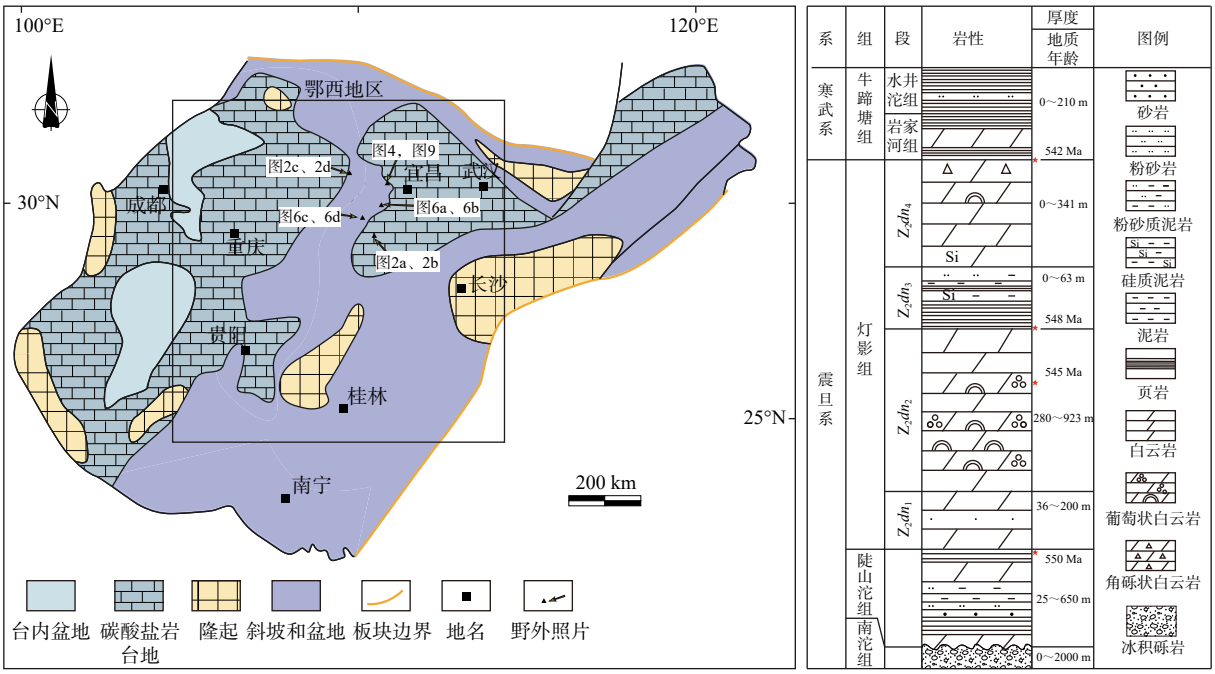
新元古代罗迪尼亚超大陆裂解(约660～530 Ma)，扬子板块在离散作用下形成了多个裂陷槽。位于上扬子地区的裂陷槽被称为德阳-安岳海槽，位于中扬子地区的裂陷槽被称为鄂西海槽。勘探发现海槽中聚集了丰富的天然气资源(陈科等，2024；王剑等，2024)。近年来，随着页岩气调查工作的深入，鄂西地区相继在震旦系陡山沱组和寒武系牛蹄塘组等多套层系中获得页岩气工业气流(陈科等，2020)，实现了古老层系复杂构造区页岩气调查的重大突破。鄂西地区富有机质页岩的分布主要受控于震旦纪—寒武纪发育的鄂西海槽(陈科等，2024，2025)。目前对于该海槽的形成机制仍存在着拉张槽(赵文智等，2017，丁一等，2025)和侵蚀槽(李忠权等，2015)等不同认识。此外，鄂西海槽的形成时间仍不清楚；而关于该海槽演化的结束时间也存在早寒武世和中寒武世的不同观点(段金宝等，2019；李文正等，2020)。因此，鄂西海槽的演化历史还有待进一步研究。

中扬子地区作为中国南方海相油气勘探的重要战略区域，历来是地质学家和油气勘探学家研究的焦点。近期页岩气勘探进展揭示出中扬子鄂西海槽地区具有巨大的天然气勘探潜力(陈科等，2020，2024)，同时也显示出该地区震旦纪—寒武纪沉积环境与大地构造背景等一系列需要深入研究的科学问题。基于以往勘探过程中获取的钻井与地球物理数据，文章通过进一步分析鄂西地区震旦系—下寒武统的沉积特征，明确了其沉积环境与分布范围，刻画了鄂西海槽的形成演化历史，并讨论了其在油气地质调查与大地构造研究中的地质意义。

1　地质背景

震旦纪—早寒武世鄂西海槽在构造上属于中扬子地块，其基底为中太古代—古元古代微型陆核，中—新元古代经过了多期褶皱、变质和岩浆活动。震旦纪(埃迪卡拉纪 Ca. 635～539 Ma)是罗迪尼亚超大陆裂解和冈瓦纳超大陆开始形成的过渡时期(王剑等，2024)。在早期阶段(Ca. 630 Ma)，由扬子地块和华夏地块拼合形成的华南板块离开超大陆，在其被动大陆边缘沉积了浅水碳酸盐岩台地、斜坡和深水环境的地层(Wang et al.，2023；王红岩等，2025；图 1a)。早寒武世牛蹄塘组沉积时期，随着海平面不断上升以及海侵作用，华南地区普遍发育陆棚相碎屑岩沉积。

中扬子地区震旦系由陡山沱组与灯影组2套地层组成(郭露等，2024；图 1b)。其下伏的南沱组冰碛岩形成于中—低纬度，这与世界上其他地区同时期冰碛岩的古地磁研究结果一致(Merdith et al.，2021)。祁柯宁等(2024)曾报道了南沱组上段紫红色粉—细砂岩顶部最年轻碎屑锆石年龄为 636 Ma，该年龄与其他地区如纳米比亚新元古代 Ghaub 冰碛



a—扬子地区震旦纪—早寒武世沉积古地理图；b—鄂西地区震旦系—下寒武统综合地层特征

图 1 扬子地区震旦纪—早寒武世沉积古地理特征和鄂西地区地层综合特征（据王剑等，2024；丁一等，2025 修改；地质年龄来源于 Condon et al.，2005；Chen et al.，2015）

Fig. 1 Sinian–Early Cambrian paleogeographic map and comprehensive log in the Yangtze region (modified after Wang et al., 2024; Ding et al., 2025; geological ages from Condon et al., 2005; Chen et al., 2015)

(a) Sinian–Early Cambrian paleogeographic map in the Yangtze region; (b) Comprehensive log of the Sinian–Lower Cambrian in western Hubei

岩 635±1.2 Ma 的年龄吻合（周传明等，2021），代表了南沱组冰碛岩顶界的沉积年龄。其上覆灯影组所含火山灰夹层的地质年龄为 551±0.7～542±0.1 Ma（Condon et al., 2005; Chen et al., 2015）。陡山沱组从下到上可分为 4 段，陡一段和陡三段为碳酸盐岩沉积；而陡二段和陡四段为碎屑岩沉积，在鄂西地区主要为富有机质页岩。灯影组主要为碳酸盐岩和台地边缘相沉积，也可分为 4 段（罗胜元等，2024），分别为：灯一段（蛤蟆井段）灰白色厚层状藻纹层白云岩、叠层石白云岩等；灯二段（石板滩段）条带状白云岩角砾岩；灯三段（白马沱段）厚层状细晶白云岩—块状藻迹粉晶白云岩—颗粒白云岩；灯四段（天柱山段）中—厚层状灰色微晶白云岩和纹层状白云岩（图 1b）。上覆牛蹄塘组主要为黑色含灰质页岩、含炭质页岩以及灰岩。该地层分为 3 段，底部牛一段（早期被称为岩家河组）为深灰色中—薄层状泥质条带灰岩；牛二段为富有机质页岩；牛三段为薄—中层灰岩。

中扬子地区震旦纪—寒武纪地层发育齐全，但不同地层分区命名不同。为便于研究，在已有研究基础上，文章将震旦系自下而上依次称为陡山沱组和灯影组，寒武系底部称为牛蹄塘组，该地层由早期命名的岩家河组和水井沱组所组成（图 1）。

2 沉积特征

2.1 地层分布特征

2.1.1 南沱组

南沱组以灰绿色冰碛岩为标志，与下伏莲沱组呈角度不整合接触。南沱组主要发育 5 种岩相，分别代表了不同的冰川沉积环境：块状杂砾岩（近缘冰海重力流相或冰下底碛冰碛岩相）、砾岩（近缘冰海重力流相）、含砾石砂岩（远缘冰筏相）、粉砂岩和黑色页岩（正常开阔海相）。从杂砾岩到粉砂岩或黑色页岩的地层序列被解释为一个完整的冰进—冰消序列（胡军等，2021；胡军，2021）。

湖北宜昌峡东地区南沱组冰碛岩的成分复杂，其砾石成分主要是花岗岩、片岩、片麻岩、砂岩、碳酸盐岩以及燧石等。南沱组冰碛岩中的细小碎屑（杂基）成分也比较复杂，大体上与砾石组分类似。

砾石表面常具擦痕、刻痕和撞痕等，是在冰川运动过程中由不同大小的砾石、砾石与基岩之间相互摩擦、刻划和冲撞造成的。擦痕一般表现为细而浅的沟纹，长度介于 1 cm 到数 10 cm，有的成组出现（图 2）。



a—湘西北三叉乡冰碛岩；b—湘西北三叉乡含砾砂岩；c—鄂西神农架地区砾石擦痕；d—鄂西神农架地区碳酸盐岩砾石擦痕

图 2　南沱组野外露头特征（据胡军等，2021；胡军，2021 修改；具体位置见图 1）

Fig. 2　Outcrop characteristics of the Nantuo Formation (modified after Hu et al., 2021; Hu, 2021; locations are shown in Figure 1)

(a) Glacial deposits in Sanchaxiang, northwest Hunan; (b) Conglomeratic sandstone in Sanchaxiang, northwest Hunan; (c) Striations on conglomerates in the Shennongjia area; (d) Striations on carbonate clasts in the Shennongjia area

南沱组冰碛岩是扬子地区新元古代分布最广的冰期沉积物，除四川盆地中部和北部局部地区（如四川南江洋坝剖面）之外，几乎在整个扬子地区都有分布（图 3）。在湖北宜昌峡东地区，南沱组厚度约为 60 m；在宜昌樟村坪，南沱组厚度仅约为 7 m，岩性以灰绿、紫红色块状杂砾岩为主。南沱组沉积分布特征表明，在南沱组冰期时，中—上扬子地区从西北往东南方向依次为冰盖剥蚀区、大陆冰川沉积区和冰海沉积区。

南沱组冰碛岩与上覆震旦系陡山沱组呈不整合接触，南沱组顶部一般为杂砾岩或含砾泥岩，上覆地层为陡山沱组底部的“盖帽白云岩”。

2.1.2　陡山沱组

南沱组沉积之后，扬子地区发生了大规模海侵，大量富营养物质被上升洋流从深海携带至大陆边缘—斜坡地带，有利于浮游生物的繁殖，使得陡山沱组沉积时期刺疑源类生物的分异度达到新元古代的最高水平（Ouyang et al., 2021）。早期生命的爆发使生产力水平大幅提升，为区内富有机质页岩的形成提供了物质基础。

陡山沱组位于灯影组之下，并与下伏南沱组冰碛岩呈不整合接触，为一套海相碎屑岩夹碳酸盐岩组合。依据其岩性组合可划分为 4 段（图 4）：

（1）陡山沱组一段（陡一段，厚 3.28～16.70 m）

下部为灰白色、浅灰色中—厚层灰质白云岩，含砾灰质白云岩，发育气孔构造；中部为灰色、浅灰色中—薄层含泥晶灰质白云岩，发育水平纹层；上部主要为浅灰—灰白色中层状白云岩，夹 2～4 cm 厚燧石条带或透镜体。与下伏南沱组呈角度不整合接触。

（2）陡山沱组二段（陡二段，厚 100.57～235.40 m）

主要为黑色炭质页岩与灰色中层含炭白云岩不等厚互层，富含燧石结核。与下伏陡一段整合接触。底部为灰绿色泥岩与中—薄层泥晶白云岩不等厚互层，并向上过渡为黑色炭质页岩；中部以灰色泥质白云岩为主夹黑色页岩，二者不等厚互层，鄂西地区白果坪剖面中白云岩发育滑塌构造（陈科等，2024）；上部以黑色页岩为主，夹中—厚层泥晶白云岩及灰黑色含砂屑鲕粒灰岩。

（3）陡山沱组三段（陡三段，厚 11.80～64.73 m）

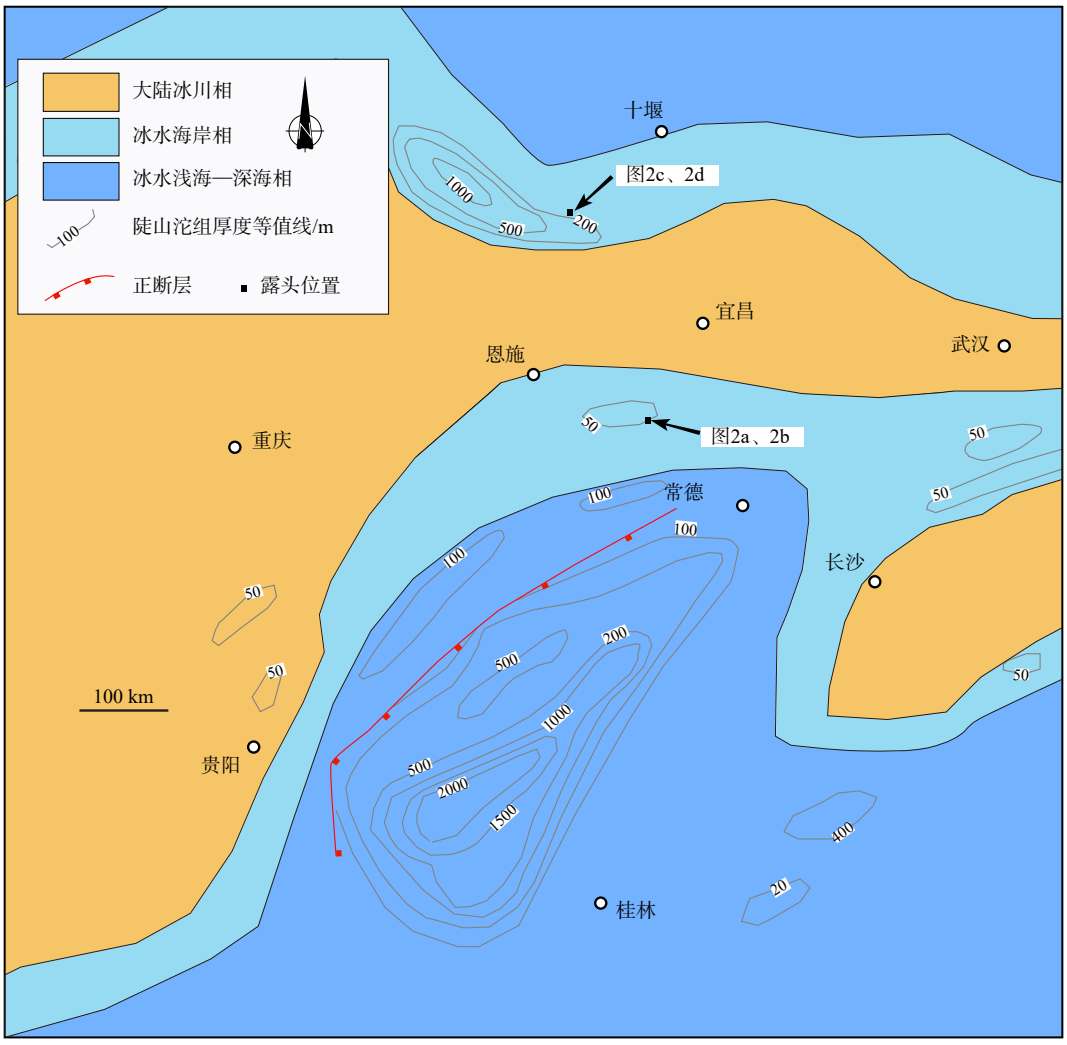


图 3 鄂西地区南沱组厚度等值线及沉积相特征（据王剑，2000修改）

Fig. 3 Isopach and sedimentary facies map of the Nantuo Formation in western Hubei (modified after Wang, 2000)

下部为藻丘发育的中—厚层状含砾微晶白云岩；中部为浅灰色中层夹燧石条带泥—粉晶白云岩；上部为灰色薄层泥晶灰岩夹泥岩；顶部由灰色薄—中层含白云质泥晶灰岩和白云质灰岩组成，向上灰岩单层变厚。

(4)陡山沱组四段(陡四段，厚1～26 m)

主要为黑色炭质页岩和硅质页岩，夹硅质岩、白云岩透镜体。黄陵背斜东北翼ZK506钻井揭示陡山沱组四段泥岩厚20 m(单长安等，2015)，但在黄陵背斜东南翼相变为灰黑色薄层含硅质泥晶白云岩。

陡山沱组暗色泥页岩在中扬子地区分布不均，不同地区厚度差距较大(图5)。其中，鄂西地区陡山沱组暗色泥岩发育最厚，一般为11～377 m。陡山沱组黑色富有机质页岩主要赋存于陡二段和陡四段，陡二段黑色页岩厚度约为105 m，陡四段黑色页岩厚度约为25 m。

2.1.3 灯影组

灯影组是一套整体以碳酸盐岩为主的地层，按岩性组合一般可划分为4段，鄂西三峡地区从下到上分别为蛤蟆井段、石板滩段、白马沱段和天柱山段。灯影组在大部分地区与下伏陡山沱组整合接触，沉积厚度为113～863 m。

(1)灯影组一段(灯一段)主要为灰白色厚层状藻纹层白云岩、叠层石白云岩、砾屑白云岩、微晶白云岩等，底部夹灰岩，发育大型交错层理，夹硅质条带和燧石结核，鹤峰白果坪剖面为台地浅滩鲕粒白云岩沉积(图6a)。

(2)灯影组二段(灯二段)在长阳—鹤峰白果坪地区主要为硅质泥晶灰岩与白云质泥岩互层，发育水平层理(图6b)，秭归九龙湾地区见水平层理和滑塌构造(图6c)，秭归头顶石剖面见丘状交错层理



a—陡二段黑色页岩；b—陡四段黑色页岩；c—陡三段浅灰色含泥质条带灰岩；d—陡三段中白云质泥岩中燧石结核

图 4　宜昌三斗坪地区陡山沱组沉积特征（具体位置见图 1）

Fig. 4　Sedimentary characteristics of the Doushantuo Formation in the Sandouping area, Yichang (Location is shown in Fig. 1)

(a) Black shale from the second member of the Doushantuo Formation; (b) Black shale from the fourth member of the Doushantuo Formation; (c) Light gray, argillaceous ribbon limestone from the third member of the Doushantuo Formation; (d) Chert nodules within dolomitic mudstones from the third member of the Doushantuo Formation

(图 6d)。

(3)灯影组三段(灯三段)在鹤峰白果坪主要为浅灰色中层硅质粉晶白云岩、泥晶白云岩夹长条状薄层硅质岩。

(4)灯影组四段(灯四段)在三峡地区以灰色中—薄层含硅质条带泥质细晶白云岩与下伏白马沱段厚层白云岩相区别。

灯影组整体厚度为 79.9～853.0 m(图 7, 图 8)，发育东西 2 个厚度高值区，且西部厚度整体大于东部，具有明显的台地和盆地沉积特征，台地区碳酸盐岩厚度大，盆地区碳酸盐岩厚度较小。中—上扬子地区具有两台夹一盆的特征，即西部上扬子台地、东部中扬子台地，中间为鄂西震旦纪—早寒武世断陷盆地(图 8)。

2.1.4　牛蹄塘组

根据鄂西地区沉积特征和岩性组合将牛蹄塘组从下到上分为牛一段、牛二段和牛三段，其中牛一段与岩家河组相对应，牛二段和牛三段与水井沱组的下段和上段相当。牛蹄塘组与下伏灯影组呈整合或平行不整合接触(湖北省地质局三峡地层研究组，1978)。

(1)牛蹄塘组一段(牛一段，相当于岩家河组，厚 0～80 m)

牛一段具有三分特征，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(图 9a)；上部为灰黑色薄层泥岩与中层泥—粉晶灰岩不等厚互层。

(2)牛蹄塘组二段和三段(牛二段和牛三段，相当于水井沱组，厚 5～286 m)

①牛二段(厚 3～86 m)下部为灰黑色薄层炭质页岩，夹“锅底”灰岩(图 9b)，见多层硅质岩，海绵骨针化石丰富，局部见软舌螺类化石富集层；上部为深灰—灰黑色薄层钙质页岩与中—厚层状灰岩互层(图 9c)，含丰富的海绵骨针、三叶虫等化石，在岩心中发育黄铁矿(图 9d)。牛二段与下伏岩家河组呈平行不整合接触。②牛蹄塘组三段(牛三段，厚

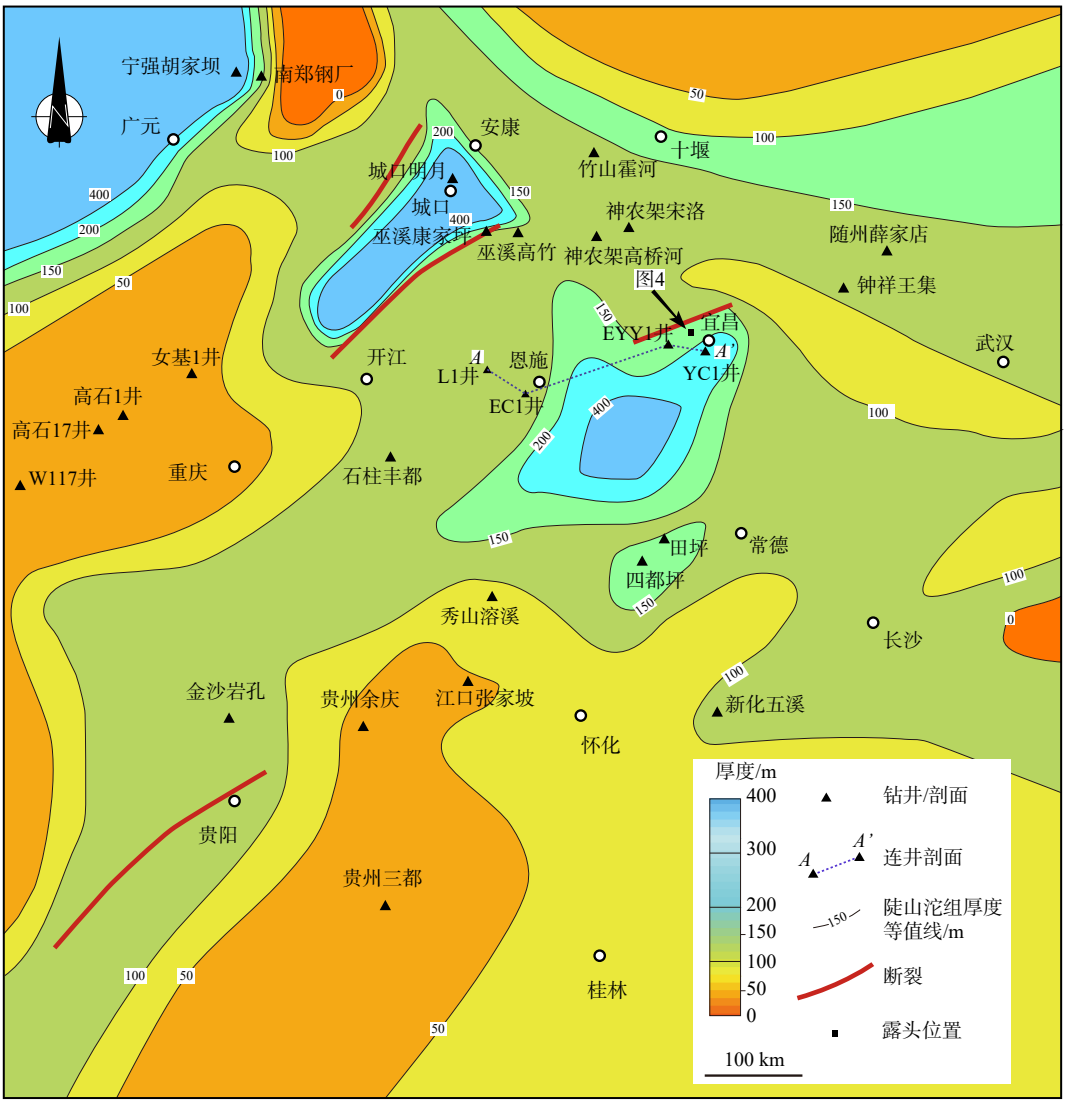


图 5 鄂西地区陡山沱组厚度等值线图（据陈科等，2024 修改）

Fig. 5 Isopach map of the Doushantuo Formation in western Hubei (modified after Chen et al., 2024)

0～200 m)岩性为深灰色薄—中层状灰岩夹薄层状泥灰岩、钙质页岩。页岩的比例向上越来越低，在露头上常呈陡坎地貌。

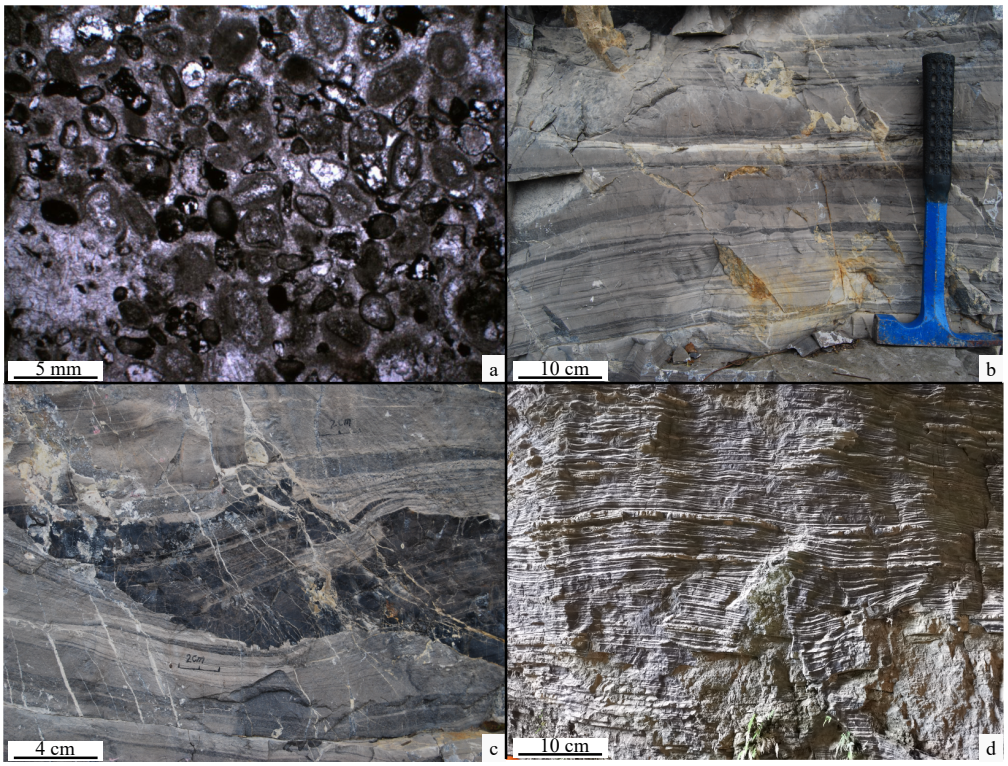
牛蹄塘组富有机质泥页岩在鄂西—渝东地区分布广泛，厚度一般介于 20～200 m(图 10)。中—上扬子地区牛蹄塘组在 2 个区域形成较薄的沉积层(厚度小于 50 m)，分别位于四川盆地东北部的广元—城口和鄂中地区的宜昌—武汉，这 2 个区域与早期灯影组沉积时期 2 个台地的位置大体相当，该位置水深较浅，可容空间较小，形成的牛蹄塘组碎屑岩地层较薄(图 8, 图 10)。

牛蹄塘组总体属于碎屑岩浅水陆棚—深水陆棚相沉积，沉积中心位于鄂西宜昌—恩施并向西南方向延伸，厚度最大可达 500 m，主要沉积深水陆棚相富有机质页岩(图 10)。

2.2 层序地层划分

鄂西地区震旦系—寒武系自下而上沉积南沱组、陡山沱组、灯影组和牛蹄塘组，主要岩性分别为冰碛岩、碎屑岩、碳酸盐岩和碎屑岩(图 11)。不同学者对该地区的层序地层划分存在较大差异，周雁等(2004)将陡山沱组和灯影组各划分出 4 个三级层序；王自强等(2001)通过层序地层学的研究提出了峡东地区震旦系等时层序地层格架，在陡山沱组划分 6 个三级层序，在灯影组划分出 7 个三级层序；王传尚等(2011)以田坪、大坪剖面为基础将湘西北斜坡相区的陡山沱组和灯影组分别划分出 4 个和 5 个三级层序。

目前对震旦系—寒武系的层序地层划分方案仍然较难统一。但油气勘探开发亟需区分海侵体系域形成的烃源岩和海退时期发育的碳酸盐岩储



a—鹤峰白果坪剖面台地边缘浅滩鲕粒；b—鹤峰白果坪剖面水平层理；c—秭归九龙湾水平层理和滑塌构造；d—秭归头顶石丘状交错层理

图 6　灯影组沉积特征（具体位置见图 1）

Fig. 6　Sedimentary characteristics of the Dengying Formation (Locations are shown in Fig. 1)

(a) Shoal ooids from the platform margin of the Baiguoping section, Hefeng; (b) Horizontal bedding in the Baiguoping section, Hefeng; (c) Horizontal bedding and slump structures in the Jiulongwan section, Zigui; (d) Hummocky cross-bedding in the Toudingshi section, Zigui

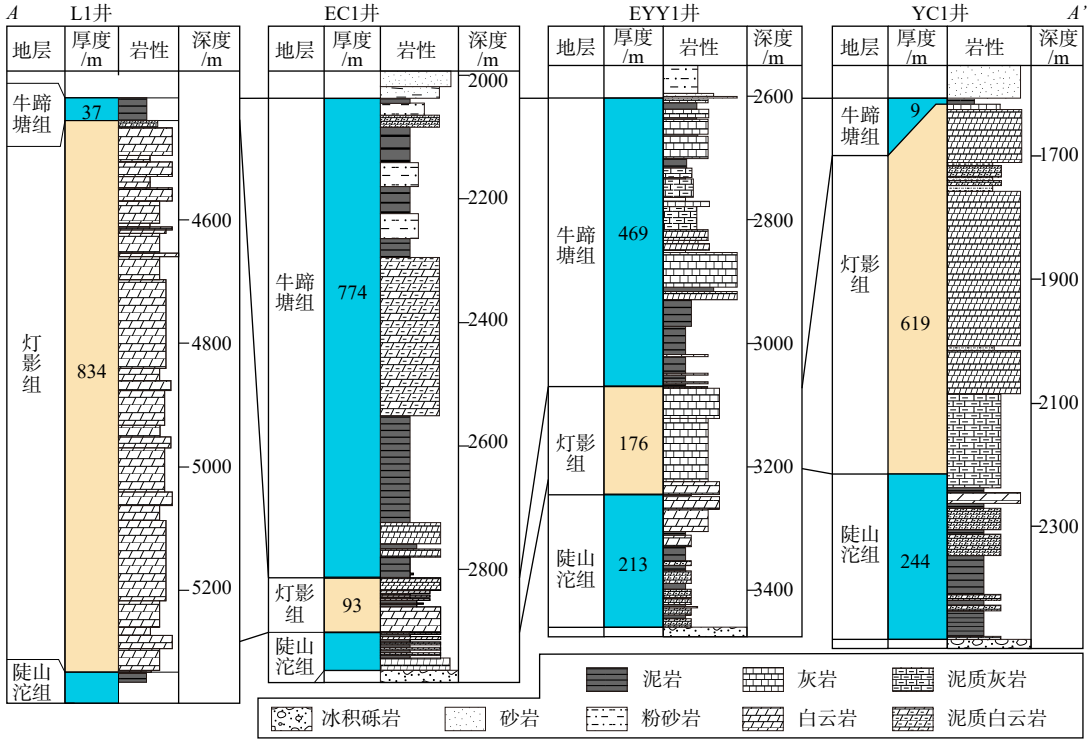


图 7　灯影组和牛蹄塘组连井剖面（剖面位置见图 5）

Fig. 7　Well profile of the Dengying and Niutitang Formations (Locations are shown in Fig. 5)

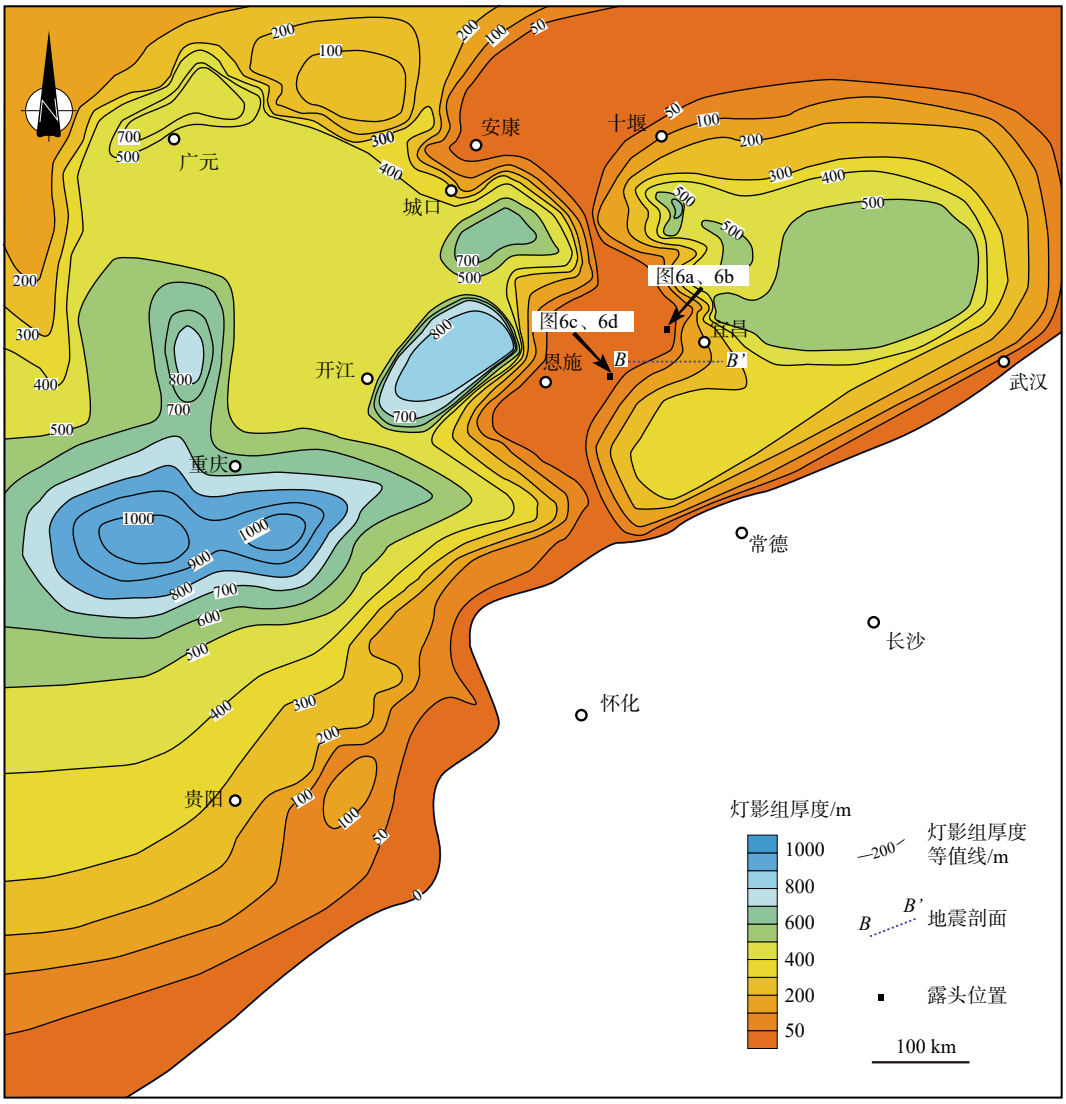


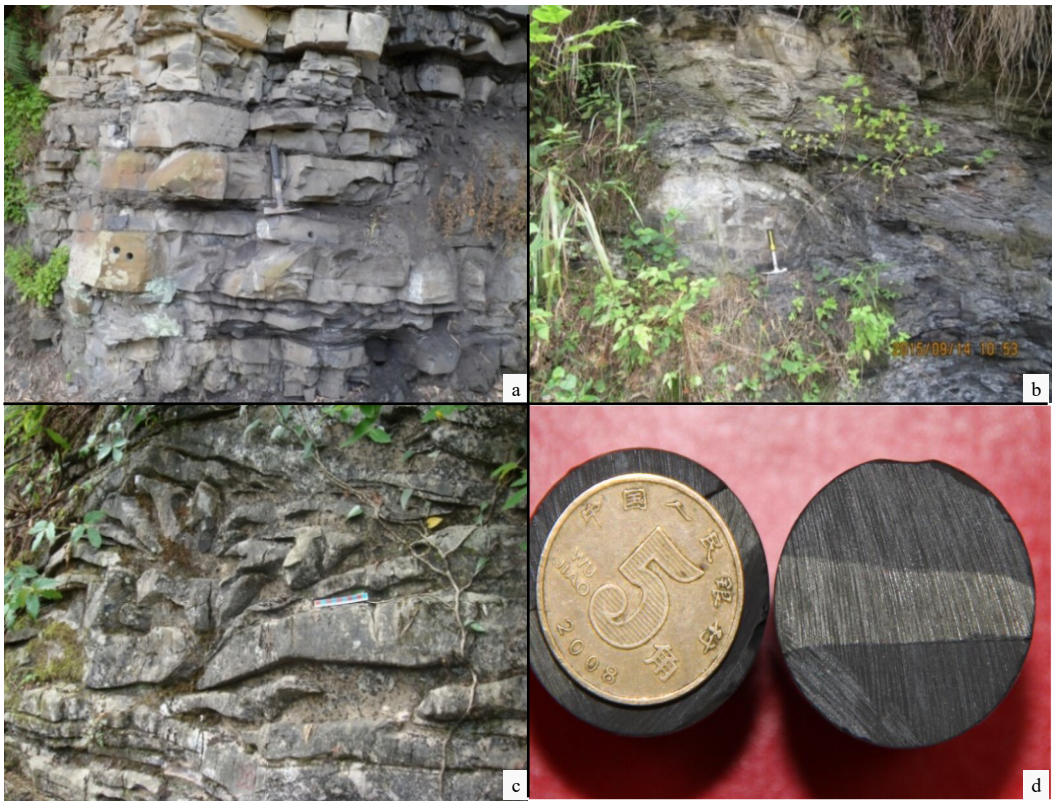
图 8 鄂西地区灯影组厚度等值线图（据汪泽成等，2014 修改）

Fig. 8 Isopach map of the Dengying Formation in western Hubei (modified after Wang et al., 2014)

层，因此按岩性可将震旦系—下寒武统陡山沱组、灯影组和牛蹄塘组划分为 5 个层序（图 12）：①陡一段盖帽白云岩和陡二段碎屑岩构成第 1 个层序，陡一段与下伏南沱组呈不整合接触；②陡三段碳酸盐岩和陡四段碎屑岩组成第 2 个层序；③灯一段蛤蟆井段和二段石板滩段共同组成一个层序，且在石板滩顶部可能存在暴露面；④灯三段白马沱段和四段天柱山段形成一个层序，在四段顶部存在暴露面，并且在局部地区缺失该段沉积；⑤牛蹄塘组可划分为一个层序，底部牛一段在宜昌秭归地区发育灰岩，划分为低位体系域较为合理；牛二段为富有机质页岩，可解释为海侵体系域；向上过渡为牛三段浅水碳酸盐岩沉积。牛蹄塘组之上的石牌组为一套浅水粗碎屑岩地层，说明已进入下一个层序沉积旋回。因此，整个震旦系—下寒武统油气成藏组合可划分为 5 个层序，通常在海侵体系域发育烃源岩，而在高位体系域一般发育优质储层。

2.3 地层厚度沉积规律

根据钻井、露头剖面等资料编制的不同地层单元厚度等值线图显示，不同时期沉积中心具有明显的变化（图 3，图 5，图 8，图 10）。鄂西宜昌地区采集的二维地震资料显示类似的沉积特征（图 13），下寒武统牛蹄塘组和灯影组在厚度上具有明显的“互补性”，灯影组厚度大则牛蹄塘组厚度小，反之也是如此（见图 13 中 EYY1 井和 YC1 井）。剖面西侧 EYY1 井灯影组厚度为 212 m，牛蹄塘组厚度为 265 m。YC1 井灯影组厚度为 619 m，牛蹄塘组厚度为 9 m。灯影组呈西薄东厚的特征，可能反映出台地沉积区



a—深灰色中层含炭粉晶灰岩夹黑色薄层含炭粉砂质泥岩；b—薄层含炭钙质泥岩夹灰岩透镜体；c—含炭钙质泥页岩夹灰岩透镜体；d—鄂阳页 1 井牛蹄塘组二段层状黄铁矿

图 9　牛蹄塘组沉积特征（具体位置见图 1）

Fig. 9　Sedimentary characteristics of the Niutitang Formation (Location is shown in Fig. 1)

(a) Dark gray medium-bedded micrite limestone interlayered with thin beds of carbon-bearing silty mudstone; (b) Thin-bedded calcareous mudstone intercalated with lenses of limestone; (c) Calcareous mud shale intercalated with lenses of limestone; (d) Layered pyrite from the second member of the Niutitang Formation in well EYY1

碳酸盐岩厚度大，而在斜坡和盆地区碳酸盐岩厚度小。牛蹄塘组呈西厚东薄的特征，反映了可容空间受控于碳酸盐岩台–盆结构，上覆的碎屑岩在低洼地区沉积厚度大，而早期的台地区水体较浅，可容空间较小，沉积厚度较小。构造上，地震剖面（*BB*’；图 13）西侧发育正断层，由于其未延伸至其上覆牛蹄塘组，表明该断层为形成于灯影组沉积时期的同沉积断裂，剖面东侧发育逆断层，仅造成上部牛蹄塘组地层厚度变化，据此判断，该断层是后期挤压形成的逆断层。

为构建鄂西海槽的沉积格局，根据绘制的横穿鄂西海槽的南沱组、陡山沱组、灯影组和牛蹄塘组地层厚度剖面（图 14）可知，整体上南沱组沉积厚度较薄，没有形成盆地的形态（图 14a）。陡山沱组沉积厚度在白果坪剖面（BGP）最大，可达 695 m；在海槽西侧 L2 井和 X2 井其厚度分别为 47 m和 59 m；东侧地区陡山沱组沉积厚度比较稳定，在杨家坪剖面（YJP）、鄂阳页 1 井（EYY1 井）和宜参 1 井（YC1）的沉积厚度分别为 232 m、213 m 和 244 m（图 14b），整体上具有半地堑的几何形态。如果将灯影组的底界面置于同一水平面，其厚度剖面呈现出明显的台–盆结构。其中西侧利 1 井（L1 井）灯影组的厚度为 893 m，是鄂西地区钻穿该地层厚度最大的钻井；东部宜参 1 井（YC1 井）钻遇灯影组厚度为 619 m；中部（M3 井）显示灯影组厚度为 223 m；由此呈现东西两侧为台地、中间为盆地的几何形态（图 14c）。牛蹄塘组在鄂西海槽的沉积特征表现为中间厚、东西两侧较薄。牛蹄塘组在鄂宜页 1 井（EYY1 井）的沉积厚度最大可达 468.5 m，在宜参 1 井（YC1 井）的沉积厚度仅为 9 m（图 14d）。基于地层特征及沉积厚度变化，鄂西海槽经历了 4 期不同的阶段：①南沱组沉积时期，断陷盆地形成较浅的凹槽，但其盆地形态不清晰；②陡山沱组沉积时期，断陷盆地已经形成，具有半地堑盆地的几何形态；③灯影组沉积时

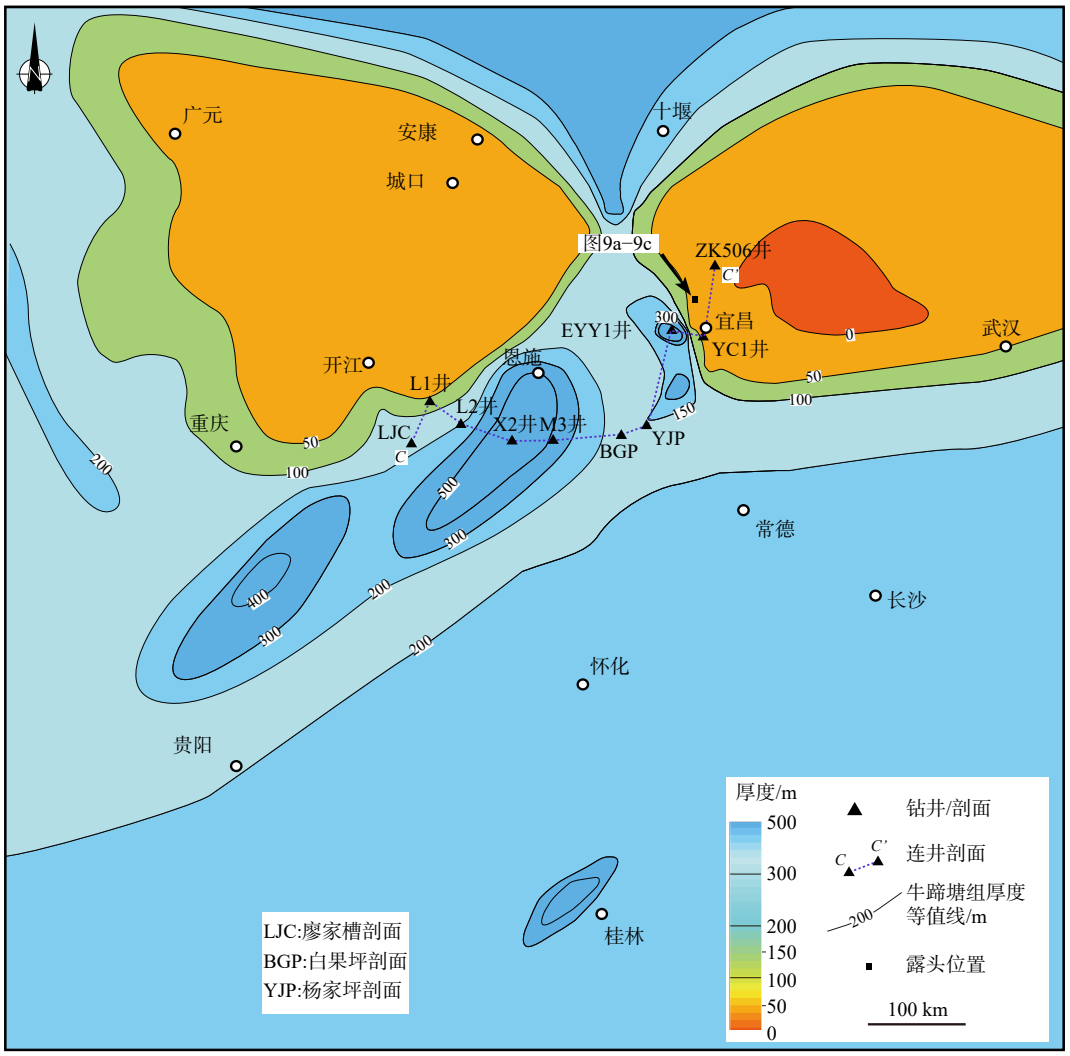


图 10 鄂西地区牛蹄塘组厚度等值线图（据陈科等，2025 修改）

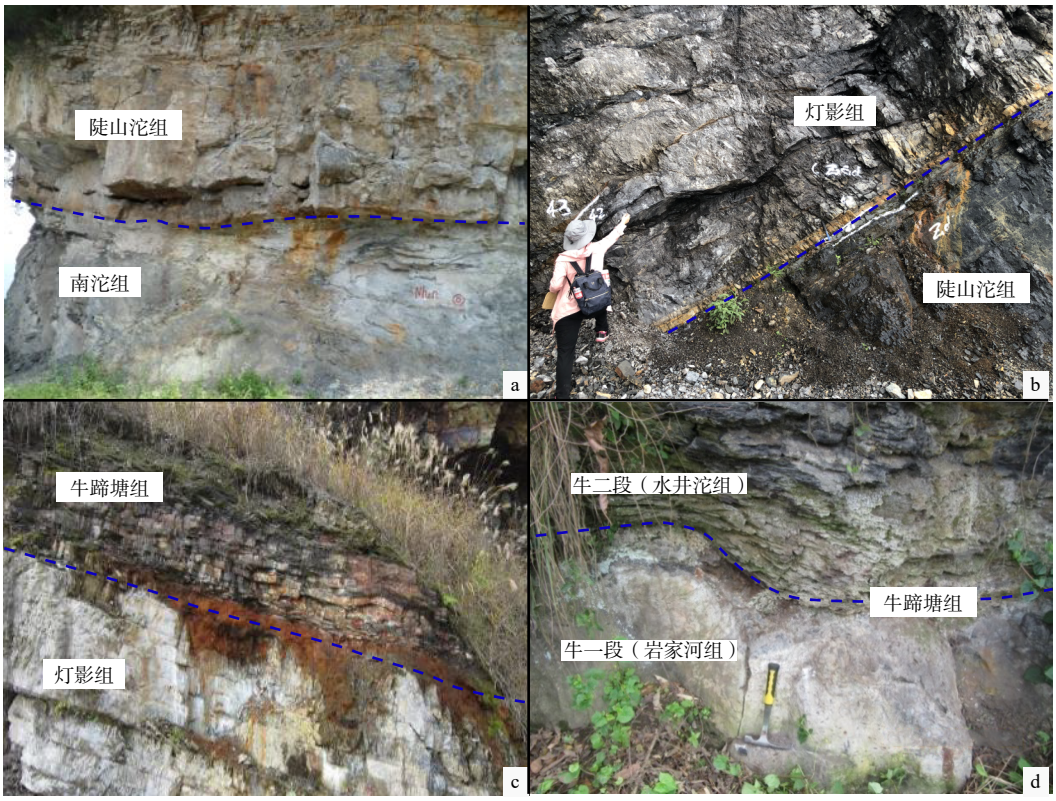
Fig. 10 Isopach map of the Niutitang Formation in western Hubei (modified after Chen et al., 2025)

期，该地区具有碳酸盐岩台地的特征，鄂西海槽处于东西 2 个台地所夹持的位置，形成盆地；④牛蹄塘组沉积时期，主要沉积碎屑岩，其厚度分布与灯影组呈镜像关系，受控于灯影组的古地理形态，盆地逐渐被充填，具有填平补齐的特征，鄂西海槽消亡而演化结束。

3 讨论

3.1 震旦纪—早寒武世鄂西海槽的形成与演化

华南地区从元古代到古生代经历了裂谷拉张、被动大陆边缘热沉降和闭合造山 3 个阶段。晋宁–四堡造山的聚合作用使得扬子地块成为罗迪尼亚超大陆的一部分，随着罗迪尼亚超大陆解体，扬子地块进入了新的构造沉积旋回。在华南地区，晋宁–四堡不整合面之上的“楔状地层”是造山作用后的新沉积，如湘北沧水铺组、湘西北石桥铺组、黔东南甲路组、桂北白竹组等，这些地层底部的火山岩年龄代表了大洋闭合造山运动之后新元古界开始接受沉积的最早时间，也是华南新元古代进入新的裂谷–造山循环的时间。锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年龄测定结果表明，华南新元古代广泛的裂谷作用始于 820 Ma 左右（王剑等，2024），而整个伸展构造持续到震旦纪—寒武纪，并导致晚震旦世中上扬子克拉通发生构造断陷。受同沉积断裂活动控制，四川盆地发育德阳–安岳台内断陷，中扬子发育鄂西台内断陷，整体上形成了灯影组沉积期“三台两凹”的构造–古地理格局（汪泽成等，2020）。震旦纪—早寒武世鄂西台内断陷盆地又称为鄂西海槽，海槽中心地区牛蹄塘组埋深可达约 6000 m。因此，鄂西海槽是一个被深埋的地质单元，其整体地质特征在



a—陡一段盖帽白云岩，与下伏南沱组呈不整合接触；b—灯影组与陡山沱组整合接触；c—灯影组与牛蹄塘组之间平行不整合接触；d—牛蹄塘组一段（岩家河组）与二段（水井沱组）界面

图 11　鄂西震旦系—下寒武统关键地层界面特征

Fig. 11　Photographs of key stratigraphic interfaces in the Sinian–Lower Cambrian in western Hubei

(a) Cap dolomite of the first member of the Doushantuo Formation, in conformable contact with the underlying Nantuo Formation; (b) The Dengying Formation is in conformable contact with the Doushantuo Formation; (c) The Dengying Formation has a parallel unconformity contact with the Niutitang formation; (d) The interface between the first member (Yanjiahe Formation) and the second member (Shuijingtuo Formation) of the Niutitang Formation

地表出露较少，主要通过钻井和物探资料识别。通过对上述 4 套地层的对比分析，明确了鄂西海槽分为以下 4 个演化阶段。

3.1.1　南沱组沉积时期

鄂西地区南沱组冰碛岩具有分选性和磨圆度较差的特点，砾石上发育有擦痕，指示了当时的冰川作用和雪球地球事件（胡军等，2021；胡军，2021）。根据南沱组沉积和分布特征（图 14a），中扬子地区此时为大陆冰川沉积，在鄂西海槽地区沉积厚度略大，表明南沱组沉积时期处于震旦纪—早寒武世鄂西海槽断陷发育之前，形成冰碛岩沉积的低洼处，但是并没有形成明显的盆地形态。

3.1.2　陡山沱组沉积时期

南沱组之后冰川融化而海平面上升，低洼地演变成海水相对较深的盆地，形成黑色页岩、薄层硅质岩；裂谷间的古地理地势较高地区，往往成为碳酸盐台地优先发育的地带，沉积了较厚的浅水碳酸盐岩。鄂西地区陡山沱组沉积分为 4 段，陡一段和陡三段发育碳酸盐岩台地或缓坡相沉积地层，陡二段和陡四段主要为滨岸—陆棚—深水海盆沉积（汪泽成等，2019；陈科等，2024）。穿过鄂西海槽的剖面显示，陡山沱组具有明显的半地堑断陷盆地特征，其东侧沉积地层厚度大，推测具有控盆断裂构造，表明鄂西海槽在此时已经形成（图 14b，图 15a）。

3.1.3　灯影组沉积时期

灯影组主要为碳酸盐岩地层，在鄂西地区发现了位于灯影组上部的同沉积正断层（图 13），在四川盆地的灯影组内部也存在大量同沉积正断层（汪泽成等，2020）。区域沉积厚度剖面表明在台地区域碳酸盐岩发育，水体深度较小，具备碳酸盐岩形成的有利条件。而在断陷盆地内部，水体深度较大，不利于碳酸盐岩发育，沉积厚度较薄，发育深水斜



ZSQ-1—震旦系第 1 个层序；ZSQ-2—震旦系第 2 个层序；ZSQ-3—震旦系第 3 个层序；ZSQ-4—震旦系第 4 个层序；CSQ-1—寒武系第 1 个层序；CSQ-2—寒武系第 2 个层序；TST—海侵体系域；HST—高位体系域

图 12 鄂西地区震旦系—下寒武统层序地层划分（据王剑，2000 修改）

Fig. 12 Sequence stratigraphy of the Sinian–Lower Cambrian in western Hubei (modified after Wang, 2000)

ZSQ-1—the 1st sequence of the Sinian System; ZSQ-2—the 2nd sequence of the Sinian System; ZSQ-3—the 3rd sequence of the Sinian System; ZSQ-4—the 4th sequence of the Sinian System; CSQ-1—the 1st sequence of the Cambrian System; CSQ-2—the 2nd sequence of the Cambrian System; TST—transgressive systems tract; HST—highstand systems tract

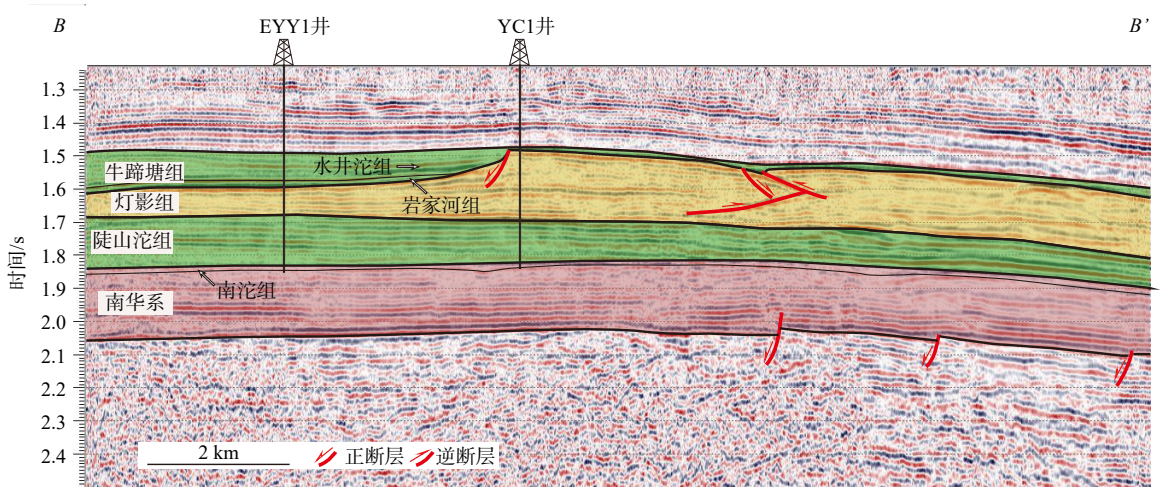
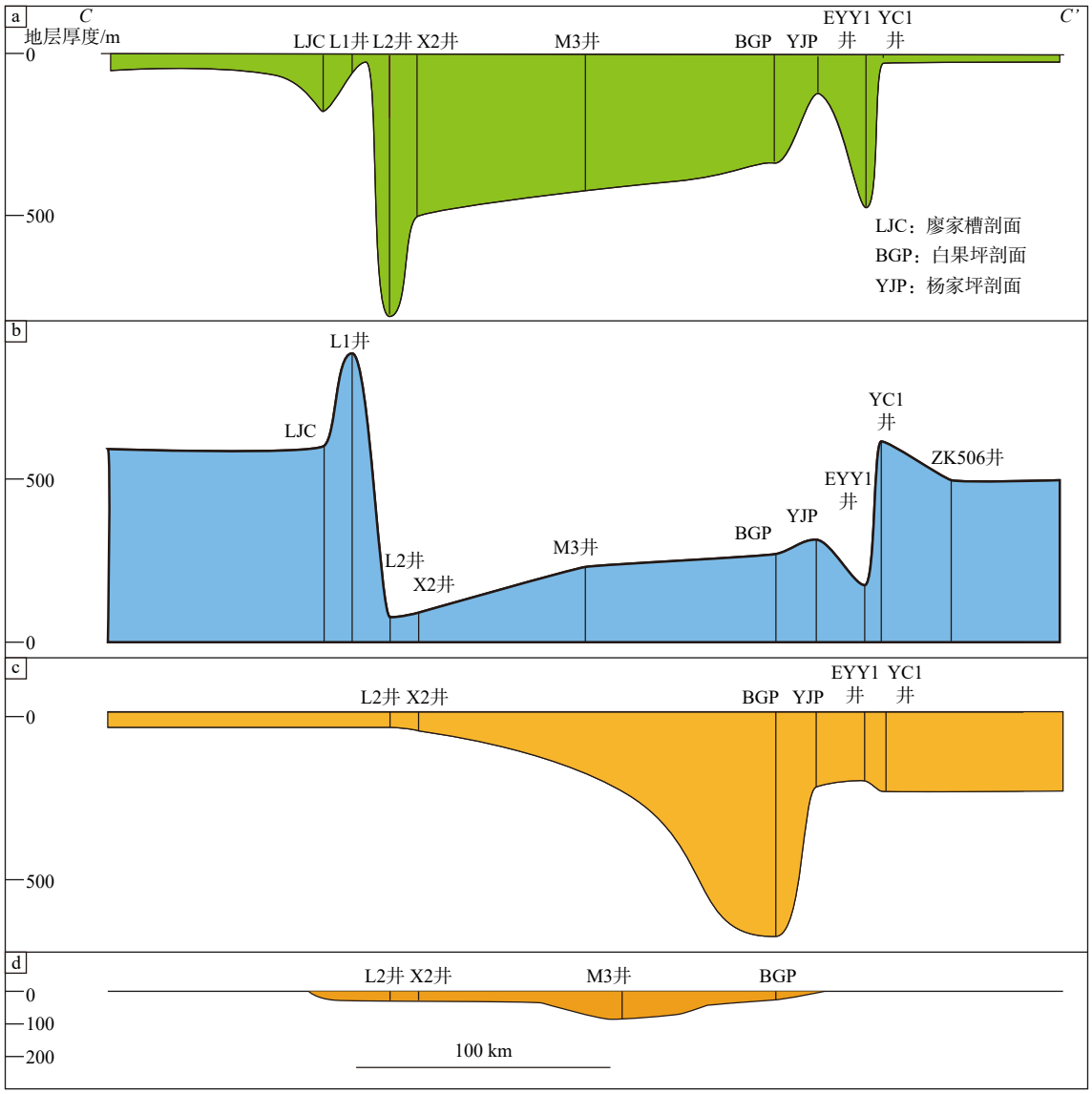


图 13 鄂西地区地震剖面特征（剖面位置见图 8）

Fig. 13 Seismic profile in western Hubei (Location is shown in Fig. 8)



a—牛蹄塘组沉积厚度剖面；b—灯影组沉积厚度剖面；c—陡山沱组沉积厚度剖面；d—南沱组沉积厚度剖面

图 14　横穿鄂西海槽地层厚度剖面示意图（剖面位置见图 10）

Fig. 14　Cross section of stratigraphic thickness across the E'xi trough (Location is shown in Fig. 10)

(a) Sedimentary thickness section of the Niutitang Formation; (b) Sedimentary thickness section of the Dengying Formation; (c) Sedimentary thickness section of the Doushantuo Formation; (d) Sedimentary thickness section of the Nantuo Formation

坡–盆地相角砾状灰岩和泥岩(杨瑞青等, 2019; 李文正等, 2020)。整体上该时期存在明显的台盆结构, 东部为中扬子台地, 西部为上扬子台地, 两者之间为震旦纪—早寒武世鄂西海槽, 内部可能发育孤立台地(图 15b)。

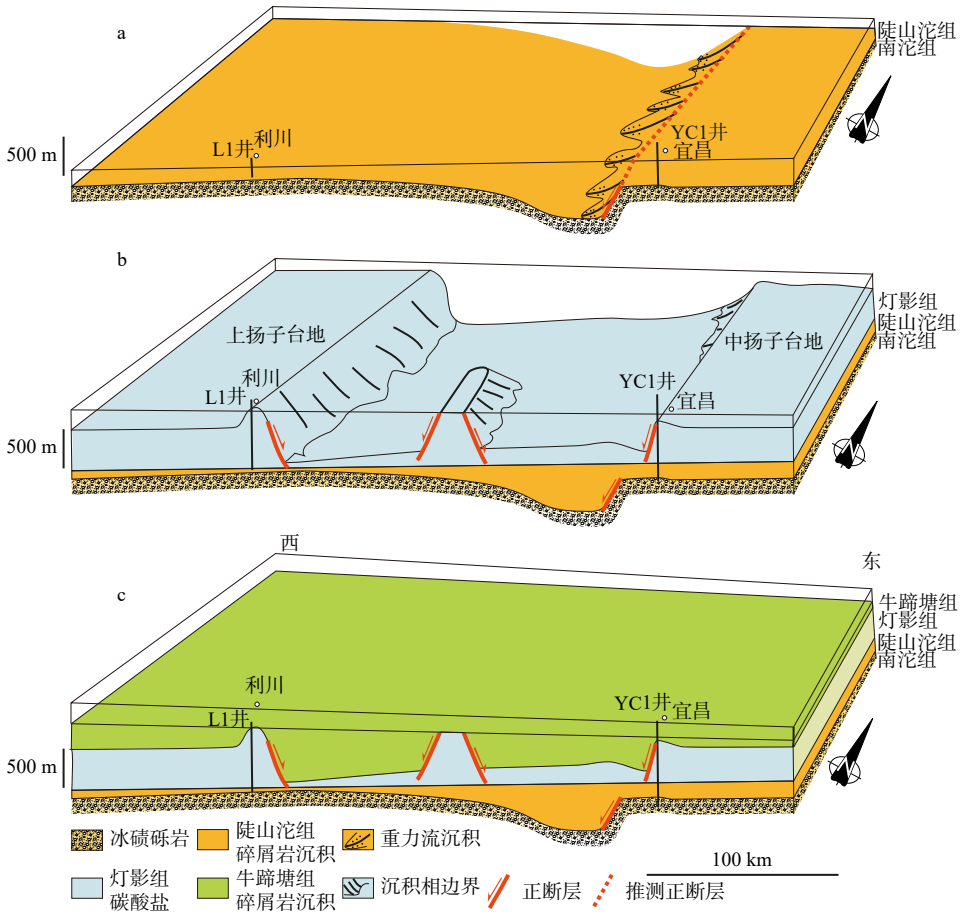
3.1.4　牛蹄塘组沉积时期

牛蹄塘组主要为碎屑岩沉积, 判断其沉积环境为滨岸相和陆棚相。鄂西海槽继承了灯影组的盆地结构, 牛蹄塘组在厚度上与灯影组呈现出此消彼长的特征(图 14), 这指示了牛蹄塘组具有填平补齐的沉积特征。其上的石牌组在断陷盆地地区显示为滨浅海沉积特征, 说明鄂西海槽被填平后变成浅水沉积。因此, 从牛蹄塘组空间展布上看, 灯影组沉积时期台盆结构控制了牛蹄塘组的可容空间和平面分布(图 15c)。

3.2　天然气勘探意义

3.2.1　页岩气勘查

鄂西海槽及周缘发育有 2 套富有机质页岩, 分别为下部的陡山沱组和上部的牛蹄塘组。该区页岩气地质条件较好, 黄陵隆起西南缘宜昌长阳地区



a—陡山沱组沉积模式图；b—灯影组沉积模式图；c—牛蹄塘组沉积模式图

图 15 鄂西海槽形成演化模式图

Fig. 15 Formation and evolution model of E'xi trough

(a) Sedimentary model of the Doushantuo Formation; (b) Sedimentary model of the Dengying Formation; (c) Sedimentary model of the Niutitang Formation

富有机质页岩厚度较大、成熟度适中，保存条件较好，在陡山沱组和牛蹄塘组已获得页岩气工业气突破(陈科等，2020)，证实了其勘探潜力。陡山沱组沉积中心位于鹤峰白果坪地区，此处富有机质页岩厚度最大，在评价其成熟度和保存条件后，建议进一步实施勘探(陈科等，2024，2025)。寒武系牛蹄塘组页岩发育 2 个沉积中心，文章认为优选有机质成熟度适中和保存条件良好的地区进行勘探，有望扩大下寒武统页岩气勘探范围。

3.2.2 常规天然气

在常规天然气勘探领域，陡山沱组—灯影组—牛蹄塘组构成常规天然气的成藏组合。断陷盆地的演化控制了陡山沱组和牛蹄塘组 2 套烃源岩的形成，台地的形成控制了灯影组碳酸盐岩储层的分布。根据相带进行分类，该区域可分为 2 类生-储-盖组合：台缘带成藏组合和台内成藏组合。其主要特征为灯影组台缘带和丘滩体储集层与上、下 2 套烃源岩构成天然气成藏组合，具有“三明治”式成藏组合特征。

4 结论

(1)震旦纪—早寒武世鄂西断陷盆地主要经历了 4 个阶段：①南沱组冰碛岩沉积于低洼地带，盆地形态不明显；②陡山沱组沉积时期开始形成半地堑盆地；③灯影组沉积时期形成了具有台-盆结构的断陷盆地格局；④牛蹄塘组沉积时期填平补齐，鄂西海槽在其末期消亡。

(2)鄂西海槽是罗迪尼亚超大陆裂解过程中在华南形成的断陷盆地之一，反映了超大陆裂解过程中伸展作用在地表的地质响应。

（3）华南地区鄂西海槽发育古老的烃源岩和储层，烃源岩主要是震旦系陡二段、陡四段及下寒武统牛二段页岩，储集层为台缘和台内富孔隙白云岩，这些烃源岩和其间的储层形成“三明治”式常规天然气聚集模式。文章建议优选具有有利保存条件的地区开展勘查，有望在常规天然气和页岩气领域取得进一步突破。

作者贡献声明：陈科、卢妍欣负责论文构思、数据分析、研究方法和论文写作；陈科、卢妍欣参与数据分析和技术手段的实践应用和绘图；王昱荦、李飞参与数据分析、研究方法和修改。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author's Contributions: CHEN Ke and LU Yanxin conceived the study, performed data analysis, designed the research methodology, and drafted the manuscript; CHEN Ke and LU Yanxin participated in data analysis, practical application of technical approaches, and figure generation; WANG Yuluo and Li Fei were involved in data analysis, refinement of the research methodology, and manuscript revision. All authors have read and approved the submission and publication of the manuscript.

利益冲突声明：本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests: All authors declare no conflict of interests.

References

CHEN D Z, ZHOU X Q, FU Y, et al., 2015. New U–Pb zircon ages of the Ediacaran–Cambrian boundary strata in South China[J]. Terra Nova, 27(1): 62-68.

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 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. (in Chinese with English abstract)

CONDON D, ZHU M Y, BOWRING S, et al., 2005. U-Pb ages from the neoproterozoic Doushantuo Formation, China[J]. Science, 308(5718): 95-98.

DING Y, LIU S G, WEN L, et al., 2025. Strata missing of the Ediacaran upper Dengying Formation at the northeastern Mianyang-Changning intracratonic sag, and tectonic implications[J]. Acta Geologica Sinica, 99(2): 352-364. (in Chinese with English abstract)

DUAN J B, MEI Q H, LI B S, et al., 2019. Sinian-Early Cambrian tectonic-sedimentary evolution in Sichuan Basin[J]. Earth Science, 44(3): 738-755. (in Chinese with English abstract)

GUO L, ZHONG Y J, ZHANG S P, et al., 2024. Structural-sedimentary filling processes and resource implications of intracratonic rift: example from Middle-Upper Yangtze transition zone[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 42(6): 2119-2134. (in Chinese with English abstract)

HU J, 2021. Sedimentary characteristics, paleogeography and paleomarine environment of the Neoproterozoic Nantuo Formation in Shennongjia area (South China)[D]. Wuhan: China University of Geosciences. (in Chinese with English abstract)

HU J, SUN S Y, GU H D, et al., 2021. Subglacial sedimentary characteristics of the bottom of Nantuo Formation in three gorges area and its implications[J]. Earth Science, 46(7): 2515-2528. (in Chinese with English abstract)

LI W Z, ZHANG J Y, LI H H, et al., 2020. Distribution characteristics of intracratonic rift and its exploration significance in western Hubei and eastern Chongqing area[J]. Natural Gas Geoscience, 31(5): 675-685. (in Chinese with English abstract)

LI Z Q, LIU J, LI Y, et al., 2015. Formation and evolution of Weiyuan-Anyue extension-erosion groove in Sinian System, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 42(1): 26-33. (in Chinese with English abstract)

LUO S Y, MIAO F B, ZHANG B M, et al., 2024. Characteristics of deep marine carbonate reservoirs in platform margin of the Dengying Formation, Yichang area[J]. Geological Review, 70(S1): 293-296. (in Chinese with English abstract)

MERDITH A S, WILLIAMS S E, COLLINS A S et al., 2021. Extending full-plate tectonic models into deep time: linking the Neoproterozoic and the Phanerozoic[J]. Earth-Science Reviews, 214: 103477.

OUYANG Q, ZHOU C M, XIAO S H et al., 2021. Distribution of Ediacaran acanthomorphic acritarchs in the lower Doushantuo Formation of the Yangtze Gorges area, South China: evolutionary and stratigraphic implications[J]. Precambrian Research, 353: 106005.

QI K N, KUANG H W, LIU Y Q, et al., 2024. Sedimentary characteristics of the Cryogenian Nantuo Formation and stratigraphic attribution of red beds in central Yunnan, southwestern margin of Yangtze Craton[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 26(6): 1305-1324. (in Chinese with English abstract)

SHAN C A, ZHANG Y S, GUO J J, et al. , 2015, Geological characteristics and resource potential of the Upper Sinian Doushantuo Formation shale gas in the north of middle Yangtze region[J]. Geology in China, 42(6): 1944-1958. (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, BAI Y S, et al., 2011. The classification and correlation of Sinian sequence stratigraphy on the slope zone in northwestern Hunan Province[J]. Geological Bulletin of China, 30(10): 1538-1546. (in Chinese with English abstract)

WANG H Y, SHI Z S, ZHAO Q et al., 2025. Stratigraphic characteristics and

shale gas enrichment interval distribution of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation, Upper Yangtze region, China[J]. Coal Geology & Exploration, 53(03): 72-89. (in Chinese with English abstract)

WANG J, 2000. Neoproterozoic rifting history of South China: significance to Rodinia breakup[M]. Beijing: Geological Publishing House: 146. (in Chinese)

WANG J, CUI X Z, WANG W, et al., 2024. Evolution of the South China paleocontinent and related resource-environmental developments: from Columbia to Gondwana[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 42(6): 1849-1875. (in Chinese with English abstract)

WANG L J, LIN S F, XIAO W J, 2023. Yangtze and Cathaysia blocks of South China: their separate positions in Gondwana until early Paleozoic juxtaposition[J]. Geology, 51(8): 723-727.

WANG Z C, JIANG H, WANG T S, et al., 2014. Paleo-geomorphology formed during Tongwan tectonization in Sichuan Basin and its significance for hydrocarbon accumulation[J]. Petroleum Exploration and Development, 41(3): 305-312. (in Chinese with English abstract)

WANG Z C, LIU J J, JIANG H, et al., 2019. Lithofacies paleogeography and exploration significance of Sinian Doushantuo depositional stage in the middle-upper Yangtze region, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 46(1): 39-51. (in Chinese with English abstract)

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 Q, GAO L Z, YIN C Y, 2001. Ascertainment and stratigraphic division of the Sinian Stratotype section[J]. Geological Review, 47(5): 449-458. (in Chinese with English abstract)

YANG R Q, YANG F L, ZHOU X F, et al., 2019. Paleogeographic Evolution of the Dengying Formation in Hannan-Northeastern Sichuan Basin: Sedimentary evidence of the extensional tectonic setting for the northwest margin of the Yangtze Block in the Late Sinian[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 37(1): 189-199. (in Chinese with English abstract)

ZHAO W Z, WEI G Q, YANG W, et al., 2017. Discovery of Wanyuan-Dazhou intracratonic rift and its exploration significance in the Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 44(5): 659-669. (in Chinese with English abstract)

ZHOU C M, OUYANG Q, WANG W, et al., 2021. Lithostratigraphic subdivision and correlation of the Ediacaran in China[J]. Journal of Stratigraphy, 45(3): 211-222. (in Chinese with English abstract)

ZHOU Y, CHEN H D, WANG C S, et al., 2004. Study on sequence stratigraphy in Upper Sinian Series in mid-Yangtze area[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 31(1): 53-58. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

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.

丁一，刘树根，文龙，等，2025. 绵阳—长宁拉张槽东北缘埃迪卡拉系灯影组上部地层缺失及构造意义[J]. 地质学报，99(2)：352-364.

单长安，张廷山，郭军杰，等，2015. 中扬子北部上震旦统陡山沱组地质特征及页岩气资源潜力分析[J]. 中国地质，42(6)：1944-1958.

段金宝，梅庆华，李毕松，等，2019. 四川盆地震旦纪-早寒武世构造-沉积演化过程[J]. 地球科学，44(3)：738-755.

郭露，钟怡江，张述鹏，等，2024. 克拉通内裂陷构造—沉积充填过程及其资源效应：以中上扬子过渡带震旦系为例[J]. 沉积学报，42(6)：2119-2134.

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.

胡军，2021. 华南神农架地区新元古代南沱组沉积古地理和古海洋环境研究[D]. 武汉：中国地质大学.

胡军，孙思远，谷昊东，等，2021. 峡东南华系南沱组底部冰川底碛沉积特征及其意义[J]. 地球科学，46(7)：2515-2528.

李文正，张建勇，李浩涵，等，2020. 鄂西—渝东地区克拉通内裂陷分布特征及油气勘探意义[J]. 天然气地球科学，31(5)：675-685.

李忠权，刘记，李应，等，2015. 四川盆地震旦系—威远—安岳拉张侵蚀槽特征及形成演化[J]. 石油勘探与开发，42(1)：26-33.

罗胜元，苗凤彬，张保民，等，2024. 宜昌地区灯影组深层丘滩相碳酸盐岩储层特征[J]. 地质论评，70(S1)：293-296.

祁柯宁，旷红伟，柳永清，等，2024. 扬子西南缘滇中成冰系南沱组沉积特征及其上红层归属讨论[J]. 古地理学报，26(6)：1305-1324.

王传尚，李旭兵，白云山，等，2011. 湘西北地区震旦系斜坡相区层序地层划分与对比[J]. 地质通报，30(10)：1538-1546.

王红岩，施振生，赵群，等，2025. 上扬子地区下寒武统筇竹寺组地层特征及页岩气富集段分布[J]. 煤田地质与勘探，53(03)：72-89.

王剑，2000. 华南新元古代裂谷盆地演化：兼论与 Rodinia 解体的关系[M]. 北京：地质出版社：146.

王剑，崔晓庄，王伟，等，2024. 华南古大陆演化及其资源环境效应：从哥伦比亚到冈瓦纳[J]. 沉积学报，42(6)：1849-1875.

汪泽成，姜华，王铜山，等，2014. 四川盆地桐湾期古地貌特征及成藏意义[J]. 石油勘探与开发，41(3)：305-312.

汪泽成，刘静江，姜华，等，2019. 中—上扬子地区震旦纪陡山沱组沉积期岩相古地理及勘探意义[J]. 石油勘探与开发，46(1)：39-51.

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.

王自强，高林志，尹崇玉，2001. 峡东地区震旦系层型剖面的界定与层序划分[J]. 地质论评，47(5)：449-458.

杨瑞青，杨风丽，周晓峰，等，2019. 汉南—川东北灯影组古地理演化：晚震旦世扬子西北缘拉张背景的沉积学证据[J]. 沉积学报，2019，37(1)：189-199.

赵文智，魏国齐，杨威，等，2017. 四川盆地万源—达州克拉通内裂陷的发现及勘探意义[J]. 石油勘探与开发，44(5)：659-669.

周传明，欧阳晴，王伟，等，2021. 中国埃迪卡拉纪岩石地层划分和对比[J]. 地层学杂志，45(3)：211-222.

周雁，陈洪德，王成善，等，2004. 中扬子区上震旦统层序地层研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版)，31(1)：53-58.