

doi: 10.12029/gc20210816001

陈孝红, 石万忠, 田巍, 何红生, 李海. 2025. 湘中坳陷石炭系天鹅坪组富有机质页岩的形成与页岩气富集机理[J]. 中国地质, 52(2): 665–679.

Chen Xiaohong, Shi Wanzhong, Tian Wei, He Hongsheng, Li Hai. 2025. Mechanism of organic-rich shale formation and shale gas enrichment in the Carboniferous Tian'eping Formation from the Xiangzhong Depression[J]. Geology in China, 52(2): 665–679(in Chinese with English abstract).

湘中坳陷石炭系天鹅坪组富有机质页岩的形成与页岩气富集机理

陈孝红¹, 石万忠², 田巍¹, 何红生³, 李海¹

(1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 443003; 2. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074; 3. 湖南省煤田地质勘探院, 湖南 长沙 410014)

摘要:【研究目的】本文旨在通过页岩成因和页岩气富集机理研究, 确定湘中坳陷下石炭统天鹅坪组页岩气形成富集主控因素和富集模式。【研究方法】以湘新地 4 井为重点, 通过下石炭统碳酸盐岩稳定碳、氧同位素、页岩全岩氧化物和微量元素含量测定, 分析页岩形成的古气候、古环境特点, 确定富有机质页岩的成因。在系统查明页岩岩石矿物学、有机地化和储存物性特征以及页岩气赋存方式和构造保存条件基础上, 结合中—低成熟页岩储存的热演化模拟结果, 确定页岩气富集机理。【研究结果】(1)下石炭统天鹅坪组富有机质页岩是全球早石炭世杜内期气候剧烈波动引起海水分层, 海底缺氧的沉积产物。(2)涟源地区中生代广泛而强烈的岩浆事件导致区域古地温梯度升高, 并引起天鹅坪组页岩发生二次生烃和储层物性的改善。天鹅坪组页岩气是印支期油气调整后, 页岩中原油裂解和有机质二次生烃的共同结果。(3)发育在下石炭统测水煤系中的滑脱构造部分封堵了下伏天鹅坪组页岩气的垂直逸散通道, 有利于页岩气的保存富集。【结论】湘中坳陷下石炭统天鹅坪组页岩气是有利相带控制总有机碳含量、岩浆热作用控制储层物性和滑脱构造控制保存的共同结果。

关键词: 页岩气; 富有机质页岩; 成因; 富集模式; 下石炭统; 油气勘查工程; 湘中

创新点: (1)气候重大转折期古大陆边缘凹陷盆地是页岩气勘探的有利相带; (2)岩浆热作用制约区域页岩有机质热演化程度和页岩气储存的品质; (3)滑脱构造下盘是页岩气勘探的最有利区域。

中图分类号: P618.13 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)02-0665-15

Mechanism of organic-rich shale formation and shale gas enrichment in the Carboniferous Tian'eping Formation from the Xiangzhong Depression

CHEN Xiaohong¹, SHI Wanzhong², TIAN Wei¹, HE Hongsheng³, LI Hai¹

(1. Wuhan Centre, China Geological Survey, Wuhan 443003, Hubei, China; 2. China University of Geoscience, Wuhan 430074, Hubei, China; 3. The Coal Geological Exploration Institute of Hunan, Changsha 410014, Hunan, China)

Abstract: This paper is the result of oil and gas exploration engineering.

[Objective] Through the study of shale formation and shale gas enrichment mechanism, the current study aims at finding out main factor controlling shale gas reservoir in the Carboniferous Tian'eping Formation in the Xiangzhong Depression as well as its

收稿日期: 2021-08-16; 改回日期: 2022-01-10

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20190558、DD20190559)资助。

作者简介: 陈孝红, 男, 1964 年生, 研究员, 主要从事地层古生物学研究和页岩气地质调查工作; E-mail: yccxiaohong@163.com。

enrichment patterns. **[Methods]** Carbonates carbon and oxygen isotopes as well as shale trace elements and major elements were analyzed at Well Xiangxindi 4 in order to recover paleo-environment and investigate the origin for the shale formation. Combined with the thermal evolution simulation of medium-low maturity shale gas reservoirs, the mechanism for shale gas enrichment is identified through petromineralogy, organic geochemistry, physical properties of shale gas reservoirs, existence forms of shale gas and tectonic preservation condition. **[Results]** (1) The organic-rich shale in Lower Carboniferous Tian'eping Formation were formed due to seawater stratification and seabed anoxia caused by the intensive climatic fluctuations in the Early Carboniferous. (2) The extensive and intense magmatic events in central Hunan led to the increase of locally paleogeothermal gradient and further caused secondary hydrocarbon generation in the Lower Carboniferous organic-rich shale. Shale gas in the Tian'eping Formation was formed owing to crude oil cracking and secondary hydrocarbon generation of organic matter. (3) Shale gas preservation was promoted due to decollement in the Ceshi Formation of the lower Carboniferous blocking the vertical escaping channel of the shale gas from the underlying Tian'eping Formation. **[Conclusions]** The shale gas of Lower Carboniferous Tian'eping Formation in Xiangzhong Depression is the common result of favorable facies zone controlling the total organic carbon content, magmatic thermogenesis controlling the reservoir physical properties and detachment structure controlling the preservation.

Key words: shale gas; organic-rich shale; genesis; enrichment pattern; Lower Carboniferous; oil and gas exploration engineering; Central Hunan Province

Highlights: (1) Paleo depression in the continental margin during the major climate transition period is benefit for shale gas exploration. (2) Organic matter thermal evolution in regional shale and shale gas preservation are limited by magmatism. (3) The decollement footwall is the most favorable area for shale gas exploration.

About the first author: CHEN Xiaohong, male, born in 1964, researcher, mainly engaged in research on stratigraphy and paleontology and shale gas geology; E-mail: yccxiaohong@163.com.

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey (No.DD20190558, No.DD20190559).

1 引言

湘中坳陷是中国南方上古生界海相油气勘探领域的重点地区之一。通过 1978—1985 年油气地质普查工作,湘中坳陷已取得了丰富的油气地质基础资料和岩相、构造、油气各方面的研究成果,并在涟源凹陷冷水江—杨家山、邵阳凹陷东部保和堂和零陵凹陷砂井地区获得了不同程度的油气发现。1995—2005 年针对涟源凹陷内勘探前景较好的冷水江—杨家山含气区块实施了湘冷 1 井、湘中 1 井和新 1 井钻探和含油气测试。上述工作虽未获得油气勘探的重大突破,但证实涟源凹陷上古生界地层中浅层天然气活跃,油气勘探前景良好。

2011 年中石化华东分公司在前期石油普查成果基础上,以二叠系大隆组、石炭系测水组为目的层,在湖南省涟源市桥头河镇部署实施了湘页 1 井,并针对 600~620 m 井段压裂测试获得日产 2409 m³ 的低产气流,证实该区大隆组页岩气具备一定的勘探潜力(汪凯明等, 2021)。2014 年以来中国地质调查局武汉地质调查中心先后以石炭系测

水组、泥盆系余田桥组为目的层共钻探调查井 8 口,参数井 2 口(图 1),系统查明了湘中坳陷石炭系测水组和泥盆系余田桥组页岩气储层的岩石矿物学、地球化学、物性和含气性特点(苗凤彬等, 2016; 田巍等, 2019a, b; 陈林等, 2021)。为进一步扩大湘中页岩气地质调查成果,2020 年选择涟源凹陷浅层天然气发育的杨家山地区,以逆冲断裂下盘石炭系天鹅坪组页岩为目的层部署实施湘新 4 井,在井深 1343.9~1367.5 m 和井深 1390.5~1416.8 m 天鹅坪组下部钻获高含气量页岩 2 层。其中 1343.9~1367.5 m 段钙质页岩厚 23.6 m,全烃值(TG)由 2.163% 增至 5.844%,甲烷值(C₁)由 1.693% 增至 5.322%;现场解吸总含气量 3.53~4.30 m³/t。1390~1417 m 段硅质页岩厚 26.3 m,全烃值(TG)由 2.47% 增至 11.205%,甲烷值(C₁)由 2.11% 增至 10%。现场解析总含气量 3.53~4.30 m³/t。这一发现不仅证实湘中坳陷石炭系天鹅坪组是南方页岩气勘探的新层系,而且发现燕山期逆冲断裂下伏低幅构造或印支期背斜有利于页岩气保存富集。因此,对湘中下石炭统天鹅坪组页岩成因和页岩气赋

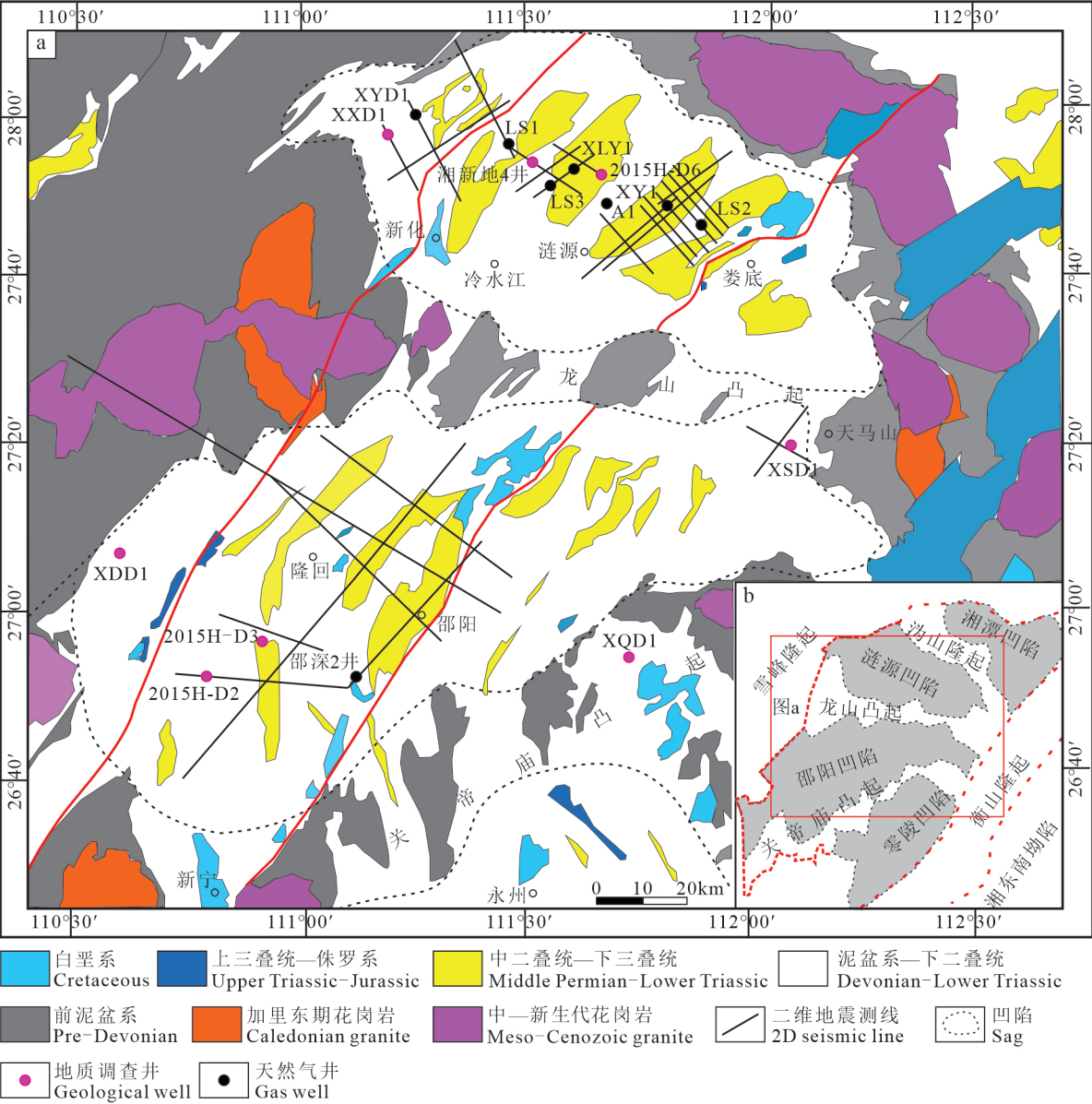


图 1 湘中坳陷地质简图(a)和页岩气勘探程度图(b)

Fig.1 Geological sketch (a) and shale gas exploration degree map (b) of the Xiangzhong Depression

存方式和富集机理的研究有利于确定天鹅坪组页岩气形成富集的主控因素,进一步提升对南方页岩气勘探潜力的认识,丰富和完善页岩气保存富集模式。

2 区域地理地质概况

湘中坳陷位于湖南省中南部,行政区划包括涟源、邵阳、衡阳大部分地区以及零陵和湘潭部分地区。在大地构造位置上属于华南后加里东地台赣湘桂坳陷区的一部分,由湘潭、涟源、邵阳和零陵

4 个凹陷以及浏山、龙山和关帝庙 3 个凸起共 7 个次级构造单元组成(图 1a),总面积 55600 km²。区内地层发育较完整,从元古界到第四系均有分布,其中凹陷内主要出露泥盆系—下三叠统海相碳酸盐岩、碎屑岩及少量海陆过渡相的含煤沉积,总厚度达 5000 m 以上。凹陷边缘见中泥盆统跳马涧组(D₂t)与凸起上广泛发育的下伏下寒武统—志留系黑色灰质板状页岩、千枚岩或元古界千枚岩、板岩、凝灰质砂岩呈角度不整合。此外,盆地内见零星分布的上三叠统—侏罗系不整合覆盖在上古生

界不同地层之上。区内岩浆活动强烈,凸起带内前泥盆系地层中见有加里东期、印支期和燕山期多次多阶段岩浆侵入活动形成的复式岩基(刘建清等, 2013; 杨俊等, 2015; 程顺波等, 2016; 苗凤彬等, 2024)(图 1b)。

3 鹅坪组页岩的分布与有机质富集模式

3.1 页岩的时空分布与形成的古地理背景

湘中涟源地区的下石炭统整合在上泥盆统孟公坳组砂泥质沉积之上,以碳酸盐岩夹泥岩为特点。按照岩石组合特点,自下而上划分为马栏边组、天鹅坪组、陡岭坳组和石磴子组(Hance et al., 1993; 谭正修等, 1994)。按照 1.5~2 m 间距对湘新

地 4 井下石炭统碳酸盐碳氧同位素以及黑色页岩相对发育的天鹅坪组和陡岭坳组页岩进行 TOC 以及常量、微量元素样品的系统采集和分析,结果发现在所测试的 113 个样品中,全部样品的 TOC 均大于 0.5%,最大达到 2.84%,平均为 1.05%。但 TOC 含量连续大于 1%,且地层厚度超过 10 m,的样品主要出现在天鹅坪组下部(A 层)、中部(B 层)以及陡岭坳组中部(C 层)和上部(D 层)(图 2)。其中 A 层对应井深 1402.4~1416.3 m, TOC 分布在 0.96%~1.25%,平均为 1.1%。B 层对应井深 1344.4~1363.6 m, TOC 分布在 1.04%~2.84%,平均为 1.46%。C 层对应井深 1122~1143 m, TOC 分布在 1.04%~2.66%,平均为 1.86%。D 层对应井深 1021~1036 m, TOC 分布在 1.13%~2.83%,平均为

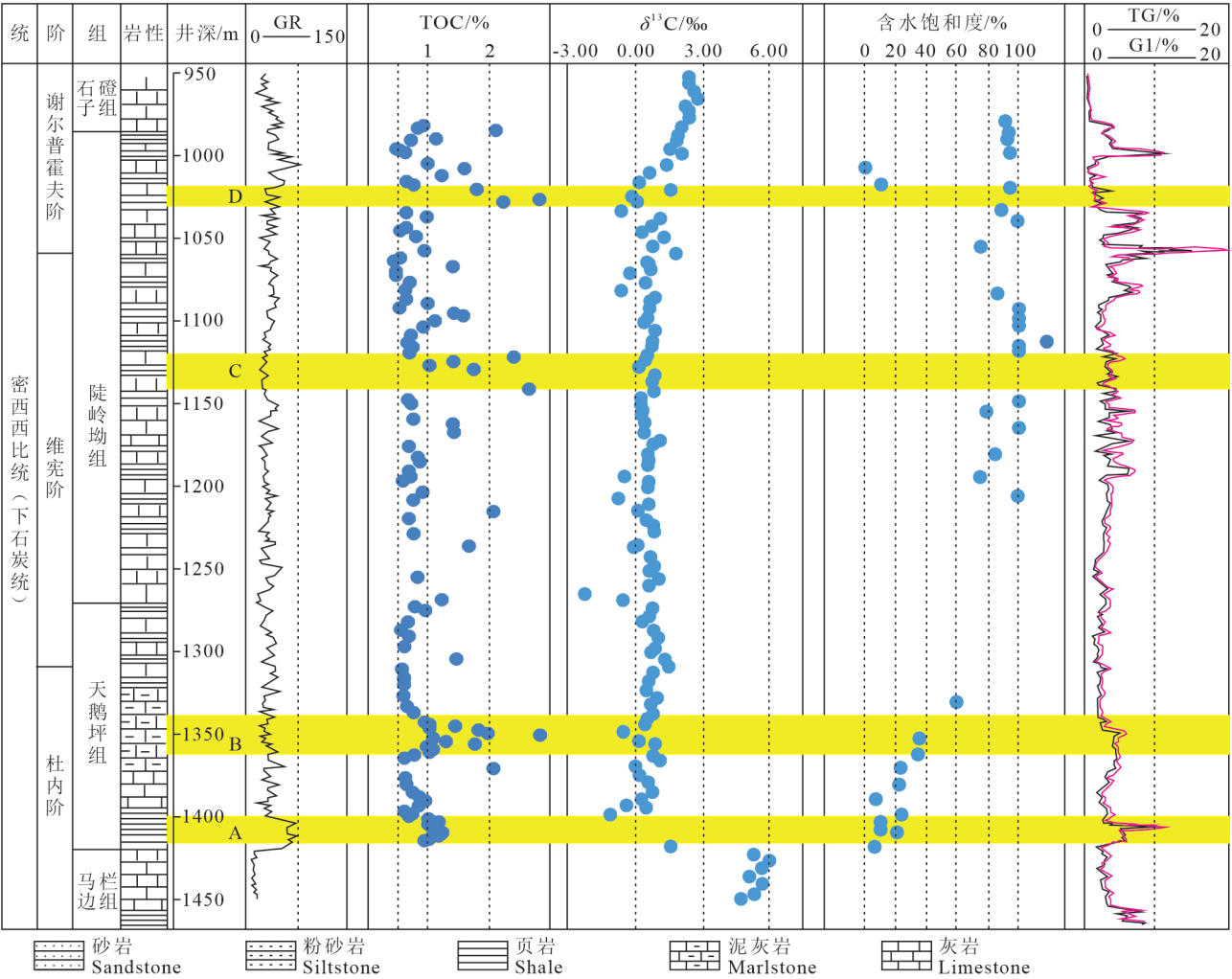


图 2 湘新地 4 井下石炭统岩性、伽马、总有机碳、 $\delta^{13}\text{C}$ 、含水饱和度与气测值
Fig.2 Lithology, gamma, TOC, $\delta^{13}\text{C}$, water saturation and gas content of the Lower Carboniferous in Well Xiangxindi 4

1.95%。测井和岩石 X 衍射分析显示 4 层高 TOC 地层的岩石矿物组成不同。A 层以泥岩、碳质页岩为主, 矿物组成上石英和黏土矿物占比超过 90%, 属于典型的富有机质页岩。B 层以钙质泥岩为主, 方解石含量接近或超过 50%, 属于高钙富有机质页岩。C 层和 D 层以泥质灰岩为主, 方解石含量普遍超过 50%。虽然上述四层富有机质页岩的岩石矿物组合不完全相同, 但它们所在层位在湘新地 4 井钻探过程中均见有一定的气测异常(图 2), 暗示湘新地 4 井下石炭统的含气性受地层 TOC 控制, 具有页岩气自生自储的特点。对比分析湘新地 4 井与国内外情况, 特别是湘中邵阳凹陷下石炭统稳定碳同位素组成变化特点和生物地层研究成果 (Hance et al., 1993; Brezinski et al., 2008; Yao et al., 2015; Qie et al., 2015), 上述 4 个富有机质页岩层段中, A 层和 B 层大致与杜内期晚期地层相当, C 层和 D 层分别与维宪期晚期和谢尔普霍夫期早期地层对比, 地层时代与北美著名的页岩气储层 Barnett 页岩接近 (Loucks and Ruppel, 2007; Abouelresh and Slatt, 2012), 是迄今中国页岩气勘探的新层系。

来自玻利维亚、秘鲁、巴西、南非、尼日利亚和阿巴拉契盆地泥盆纪最晚期 (Garzanti and Sciunnach, 1997; Brezinski et al., 2008; Isaacson et al., 2008) 和西藏早石炭世杜内期的冰川沉积记录 (Garzanti and Sciunnach, 1997; 李才等, 2008), 以及国内外同期地层稳定碳同位素组成变化特点 (Mii et al., 1999; Saltzman et al., 2000; Yao et al., 2015; Qie et al., 2015), 指示泥盆纪末期以及下石炭统杜内期中期和谢尔普霍夫期中晚期是地史时期北美中大陆和冈瓦纳大陆的重要冰期。与上述冰期的形成和消融所引起的海平面下降和上升相关, 在湘中坳陷早石炭世沉积形成了两套海进—海退沉积序列。根据湘新地 4 井岩心划分, 自下而上, 下部旋回由马栏边组下部台地相砂屑灰岩、泥质灰岩, 中部缓坡—盆地相黑色页岩夹(互)泥质灰岩、黑色页岩和上部台地相中厚层状泥晶灰岩组成; 上部旋回由天鹅坪组下部台盆相黑色页岩, 天鹅坪组底部和上部—陡岭坳组台坡相泥晶灰岩、黑色页岩和石磴子组台地相碳酸盐岩组成。从东西向横跨涟源凹陷的涟深 1 井 (LS1)—湘新地 4 井 (XXD4)—涟深 3 井 (LS3)—安 1 井 (A1)—涟深 2 井 (LS2) 剖面来

看(图 3, 图 4a), 涟源凹陷早石炭世沉积中心大致位于涟深 3 井至安 1 井一带, 上泥盆统上部孟公坳组台地相泥灰岩和泥—微晶云质灰岩较为发育。下石炭统厚度相对较大, 且以缓坡相的黑色页岩、泥质灰岩发育为特色(图 3, 图 4a)。由此往东、往西上泥盆统孟公坳组以滨岸砂泥质沉积为主, 早石炭世地层厚度逐步变小, 且以台地相灰岩(如涟深 1 井)或滨岸沙坝(如涟深 2 井)沉积为特色。据此, 并结合东南部界岭—香花井一带以潮下浅水环境沉积的泥微晶灰岩为主, 间夹泥页岩, 暗示涟源凹陷在早石炭世时期, 西部和东部靠近古陆, 南部为开阔台地, 构造古地理特点与现今构造特点较为相似, 为中部较低, 四周较高的凹陷盆地(图 4b)。

3.2 页岩形成的古气候古环境特点与成因

湘新地 4 井下石炭统杜内阶马栏边组和谢尔普霍夫阶石磴组强烈的同位素正偏离广泛见于北美、西欧同期碳酸盐地层中, 被认为是早石炭世二次气候变冷, 富 ^{12}C 的有机质被大量埋藏, 海水中 ^{13}C 升高的结果 (Mii et al., 1999; Saltzman et al., 2000; Cheng et al., 2020)。对比分析湘新地 4 井富有机质页岩的分布层位, A 层和 B 层富有机质页岩出现在杜内期 $\delta^{13}\text{C}$ 强烈正偏离之后, 与 $\delta^{13}\text{C}$ 下降紧密相关, 而 C 层和 D 层富有机质页岩则出现在谢尔普霍夫期 $\delta^{13}\text{C}$ 强烈正偏离之前, 与 $\delta^{13}\text{C}$ 振荡上升相对应, 显然, 湘新地 4 井下石炭统富有机质页岩的形成除了与气候变冷, 有机质被大量埋藏有关外, 还可能与气候变暖、冰川消融产生大量淡水注入海洋引起海水分层缺氧, 有利于有机质埋藏有关 (Armstrong et al., 2009)。

在以往的研究中, 岩石化学风化指数 (CIA) 以及微量元素 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 和 Rb/K 的比值被分别用作古气候以及古海洋环境氧化还原条件和海水盐度的替代指标 (Nesbitt and Young, 1982, 1989; Hatch and Leventhal, 1992; Scheffler et al., 2006; 陈孝红等, 2018a, b; 王宪峰等, 2020)。由于沉积物的地球化学成分在很大程度上取决于风化作用所产生源岩的地球化学成分, 而作为重矿物组分之一的锆在沉积物中的赋存状态主要受物源岩的地球化学控制, 因此, 当沉积物中锆含量变化与古气候、古环境替代指标存在良好协变关系时, 这些指标的变化结果指示的是物源变化, 而不是气候或环境变化结果。由

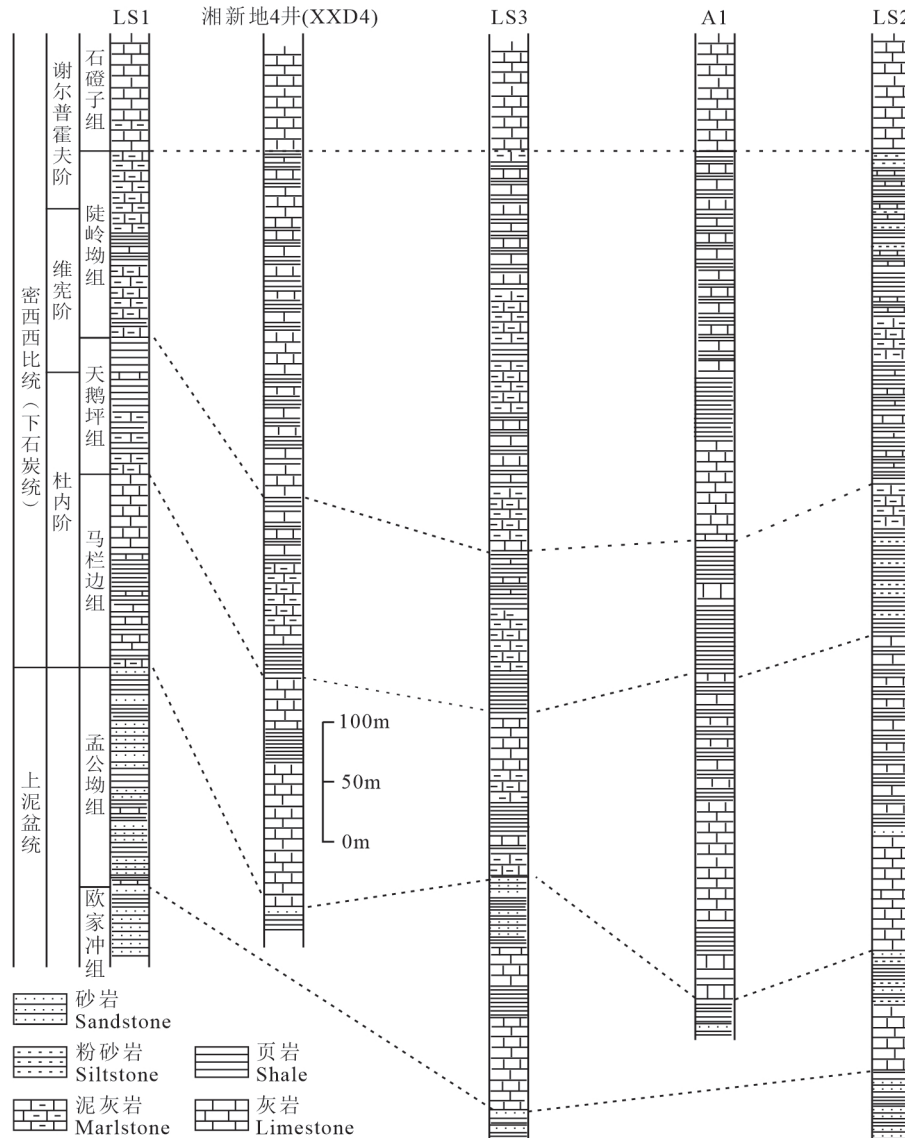


图3 湘中涟源凹陷上泥盆统一下石炭统划分对比图(钻井位置见图1)

Fig.3 Upper Devonian–Lower Carboniferous division and correlation in Lianyuan Sag, Central Hunan Province (the locations of the well are shown in Fig.1)

于湘新地4井下石炭统天鹅坪组—陡岭组泥页岩样品(碳酸钙含量小于10%)的Zr/Ti值与岩石化学风化指数(CIA)以及环境指标V/(V+Ni)的协变关系不强(图4c、d),因此,湘新地4井下石炭统泥页岩中CIA值和V/(V+Ni)值的变化趋势在一定程度上代表了当时古气候、古环境变化趋势(Scheffler et al., 2006)。总体上看,湘中地区下石炭统天鹅坪组—陡岭组的CIA值分布在70~80,属于温暖潮湿气候(Nesbitt and Young, 1982, 1989)(图4c, 图5)。进一步研究发现,在天鹅坪组—陡岭组下部出现CIA振荡升高,而在岭组上部发生CIA振

荡下降,陡岭组中部发生了气候的转折。湘新地4井下石炭统CIA与碳同位素组成变化趋势所指示的古气候变化特点一致,且与Zr/Ti值在陡岭组发生先降后升的剧烈变化相互印证,共同揭示湘中地区在早石炭世维宪中期前后发生了气候的重大转折,从维宪中期以前(天鹅坪组—陡岭组下部沉积时期)气候逐步变暖转化为气候逐步变冷。

与维宪期前后气候变暖或变冷,南冈瓦纳大陆或北美中大陆冰川的消融和形成,湘中地区同期海水的盐度和海洋氧化还原环境发生了同步变化。其中,盐度替代指标Rb/K值在湘新地4井天鹅坪

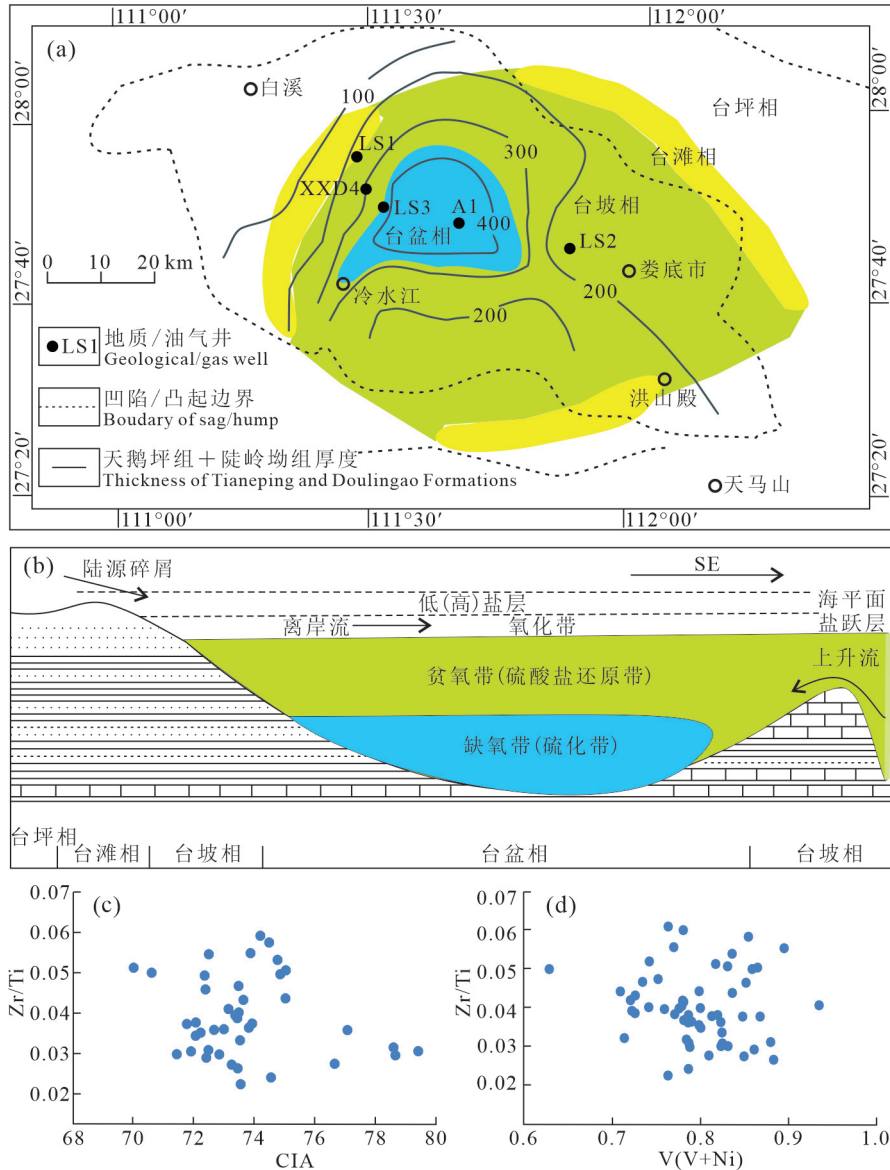


图 4 湘中下石炭统富有机质页岩形成的古地理、古环境与古气候指标

a—岩相古地理图; b—沉积相模式示意图; c—Zr/Ti—CIA 相关性图; d—Zr/Ti—V/(V+Ni) 相关性图

Fig.4 Palaeogeography, palaeoenvironment and palaeoclimate index of the formation of organic-rich shale in the Lower Carboniferous, Central Hunan Province

a—Lithofacies paleogeographic map; b—Schematic diagram of sedimentary facies model; c—Correlogram of Zr/Ti—CIA; d—Correlogram of Zr/Ti—V/(V+Ni)

组底部小于 6×10^{-3} , 具有非正常海相沉积的特点 (Scheffler et al., 2006; 王宪峰等, 2020)。其上天鹅坪组中上部—陡岭坳组下部的 Rb/K 值普遍大于 6×10^{-3} , 为正常海相沉积, 但有随 CIA 增大而减小, 海水淡化的特点, 以致陡岭坳组中部再次出现 Rb/K 值小于 6×10^{-3} 的非正常海相沉积 (Scheffler et al., 2006; 王宪峰等, 2020)。陡岭坳组上部页岩的 Rb/K 值明显高于 6×10^{-3} , 且有随 CIA 值变小而增

大, 海水咸化的趋势 (图 5)。在海水分层和海底氧化还原环境变化方面, 湘新地 4 井下石炭统天鹅坪组—陡岭坳组页岩中的 V/(V+Ni) 值分布在 0.64~0.94, 平均 0.76, 总体上沉积形成于分层不强的厌氧环境, 局部层段的 V/(V+Ni) 值大于 0.84, 具有硫化分层的古环境特点。具体到湘新地 4 井识别出的 4 层富有机质页岩上, 除了 A 层的 V/(V+Ni) 值分布在 0.84 附近, 最高达到 0.88, 局部具有硫化分层海

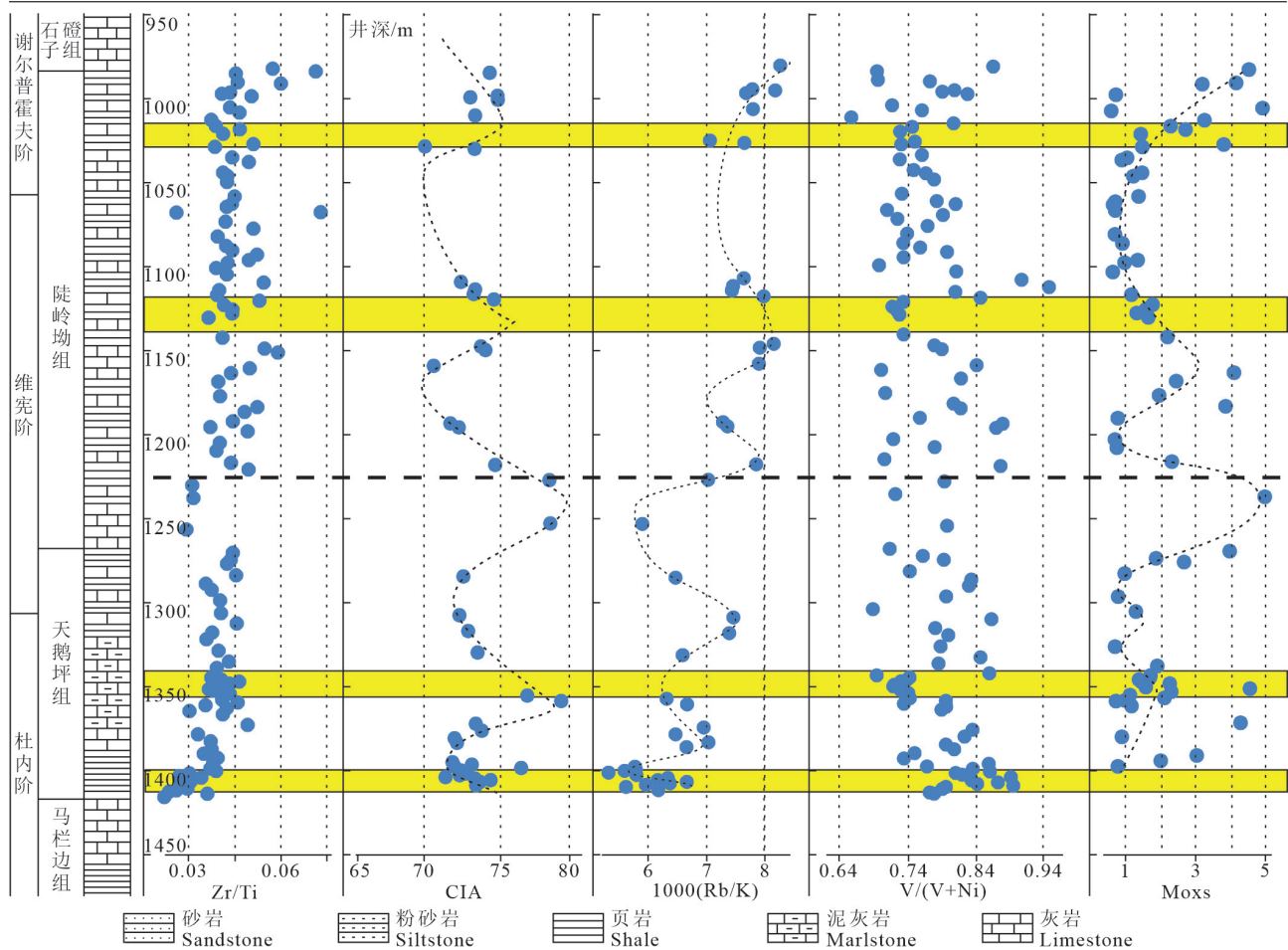


图5 湘中下石炭统物源、盐度、气候和生产率指标变化曲线

Fig.5 Provenance, salinity, climate and productivity index of the Lower Carboniferous, Central Hunan Province

洋环境特点之外,其余3层富有机质页岩的 $V/(V+Ni)$ 值均小于 0.82, 为分层不强的厌氧环境产物(图2,图4)。虽然目前尚未在华南地区发现杜内期或谢尔普霍夫期冰碛沉积的记录,但气候与盐度和海水分层的上述协同变化证明杜内期气候变暖,北美中大陆和冈瓦纳地区的冰川融化确实造成湘中地区海水淡化和分层,而谢尔普霍夫期气候变冷,北美中大陆和冈瓦纳地区的冰盖增生同样引起湘中地区海水盐度的上升和海水分层。也可能正是由于冰川融化产生的大量淡水进入海洋,在造成表层海水淡化,海水出现盐度分层的同时,淡水携带含大量富营养物质的陆源碎屑为海洋硫酸盐还原作用提供了大量硫酸盐,导致海洋硫酸盐还原作用加强而大量消耗氧气,造成海底贫氧(图4b)。同样也正是由于冰川形成吸收了海洋表层海水中的大量淡水,造成海洋表层海水咸化而出现海水分层,

引起海底缺氧,有利于有机质埋藏保存。但值得注意的是,在湘新地4井下石炭统测试的113件岩石样品中,代表海洋表层生物生产力水平的自生镍(Nixs,即利用澳大利亚太古代平均页岩中微量元素含量对样品微量元素含量进行Ti校正后得到的剩余值)仅见于极少数样品,而反映沉积时期海底有机碳通量的自生钼(Moxs)含量较高,且有随沉积时期古气候变暖而升高,气候变冷而降低的协同变化趋势(图5),暗示湘中涟源地区早石炭世时期海洋表层生物生产力较低,海底有机质大部分来源于气候变化所引起的洋流活动(图4b)。

4 页岩气赋存方式与富集机理

湘新地4井下石炭统测水组煤岩的镜质体反射率分布在1.95%~2.16%,平均2.01%。晚三叠世—白垩纪大规模岩浆活动产生的高热流值使涟

源凹陷测水组煤系的埋藏温度从 152℃ 上升到 250℃, 导致测水组煤镜质体最大反射率升高了 0.6% 以上(毕华等, 1996), 推测印支运动之前测水组的成熟度分布在 1.35%~1.56%。该反射率值与湘中地区测水组在正常古地温下最大埋深(约 4000 m)的镜质体反射率(1.3%~1.6%)相互印证, 证明在晚三叠世—白垩纪大规模的岩浆活动发生前, 湘新地 4 井天鹅坪组富有机质页岩中的有机质正处于生油高峰向生湿气转换阶段, 湘中地区印支期大规模岩浆活动导致该地区古地温梯度上升, 富有机质页岩受热发生二次生烃, 并最终进入生干气阶段。涟源凹陷下石炭统天鹅坪组页岩气不是简单的有机质深层热演化产物, 而是石炭纪—中三叠世深成热演化和印支期调整改造之后, 叠加晚三叠世—白垩纪区域岩浆热演化的结果。

4.1 热模拟实验获得的启示

为探索构造抬升改造之后, 页岩受热改造对页岩储层地化、物性和含气性特点的影响, 本文在武汉市新生纪科技有限公司成岩物理模拟系统上, 采用加热密闭罐中页岩的方法, 进行了不同温度条件下页岩储层地化、物性和含气性变化特点的模拟实验。模拟实验样品来自鄂尔多斯盆地镇泾地区延长组长 7 段, 直径为 130 mm, 长度为 220 mm 的 3 组(下称 C7-1、C7-2 和 C7-3 组)油页岩样品。其中 C7-1 组样品和 C7-3 组样品的 TOC 含量较高, C7-2 组相对较低。把这 3 组油页岩样品采用线切割的方式, 分割为 2.5 cm×2.5 cm 的柱样。将其中 1 份(C7-X-0)不进行加热, 作为原始对比样。另外 6 份(C7-X-1~6)置于密闭高压釜, 分别以 250℃、300℃、350℃、400℃、450℃、500℃ 为温度点, 恒温加热保持 72 小时, 以获得同一页岩储层在不同受热阶段黏土矿物、储层物性和甲烷吸附气含量的变化特征。通过模拟实验, 获得以下发现和启示:

(1) 加热 250℃ 时, 页岩相貌特征未有明显变化, 在 300~400℃ 时, 生成了石油, 页岩见明显的油侵现象。在 400~500℃ 时, 岩石上未见油侵显现, 但包裹其锡纸上见到石油碳化后的沥青, 表明石油开始裂解生气, 主要以生气为主。与生油、生气相伴, 实验样品的层理缝逐步明显, 并且随温度升高, 层理缝变宽(图 6a1~a3)。证明页岩层理缝是油气运移的通道和重要储存空间。在封闭条件下, 伴随

有机质受热裂解为油、气过程中, 地层压力逐步升高, 层理缝变宽。

(2) 在热模拟过程中, 随着温度的增加, 在生油和生气早期阶段(模拟样品加热至 300~450℃), 页岩中沥青随机反射率随温度升高而略有升高, 但整体变化不大。但到生气后期, 页岩中沥青的随机反射率从 0.62% 迅速升高至 2.25%(图 6c)。证明页岩中有机质受热发生二次生烃, 但页岩中的沥青反射率主要反映早期深成热演化阶段的有机质成熟度, 直到原油完全裂解后, 沥青反射率才迅速升高到与有机质生烃演化阶段相匹配的值。

(3) 在热模拟过程中, 随着温度的增加, 页岩的孔隙度和渗透率同步发生明显变化。其中加热到 300~400℃ 阶段时, 页岩的孔隙度和渗透率随温度的升高而降低。在 400~500℃ 阶段, 页岩的孔隙度和渗透率随温度的升高而升高(图 7e、f)。电镜扫描观察结果显示, 在低温生油阶段石油占据了页岩储层中几乎所有可到达孔隙, 包含黏土矿物粒间孔缝、晶间孔缝、页理缝等(图 6b1)。而在高温生气阶段, 粒间孔缝的有机质孔隙增多、增大, 但远离粒间孔缝的有机质孔隙不发育, 证明原生无机孔隙是油气的主要微观储集空间。在低温生油阶段, 石油占据了页岩储层中原生微观孔隙, 而高温生气阶段石油裂解气逸散后形成的孔洞成为天然气储存和运输的新通道(图 6b2、b3), 有益于页岩储层物性的改善。

(4) 在热模拟过程中, 随着模拟温度的增加, 页岩的孔体积与比表面积同步增加, 且比表面积增加更为显著。相比之下, 高 TOC 样品的总孔体积与比表面积较低 TOC 样品的高, 但后者具有较高的宏孔体积和比表面积。结合在生油阶段, 高 TOC 样品的微孔孔体积与比表面积随温度的升高而降低, 而在生气阶段则随着温度增加而增加(图 6g、h), 推测高有机碳页岩的孔隙主要由有机孔所贡献, 其中微孔是主要的孔隙类型。在低温生油阶段孔隙被沥青所占据, 而在高温生气阶段, 随着热模拟温度增加, 有机孔隙发生了由微孔向介孔和宏孔的逐步转变(图 6b3)。

(5) 采用静态吸附质量法对采用不同模拟温度加热后样品的甲烷吸附量进行了测定。结果表明高 TOC 样品(C7-3)页岩的吸附量远高于低 TOC 样

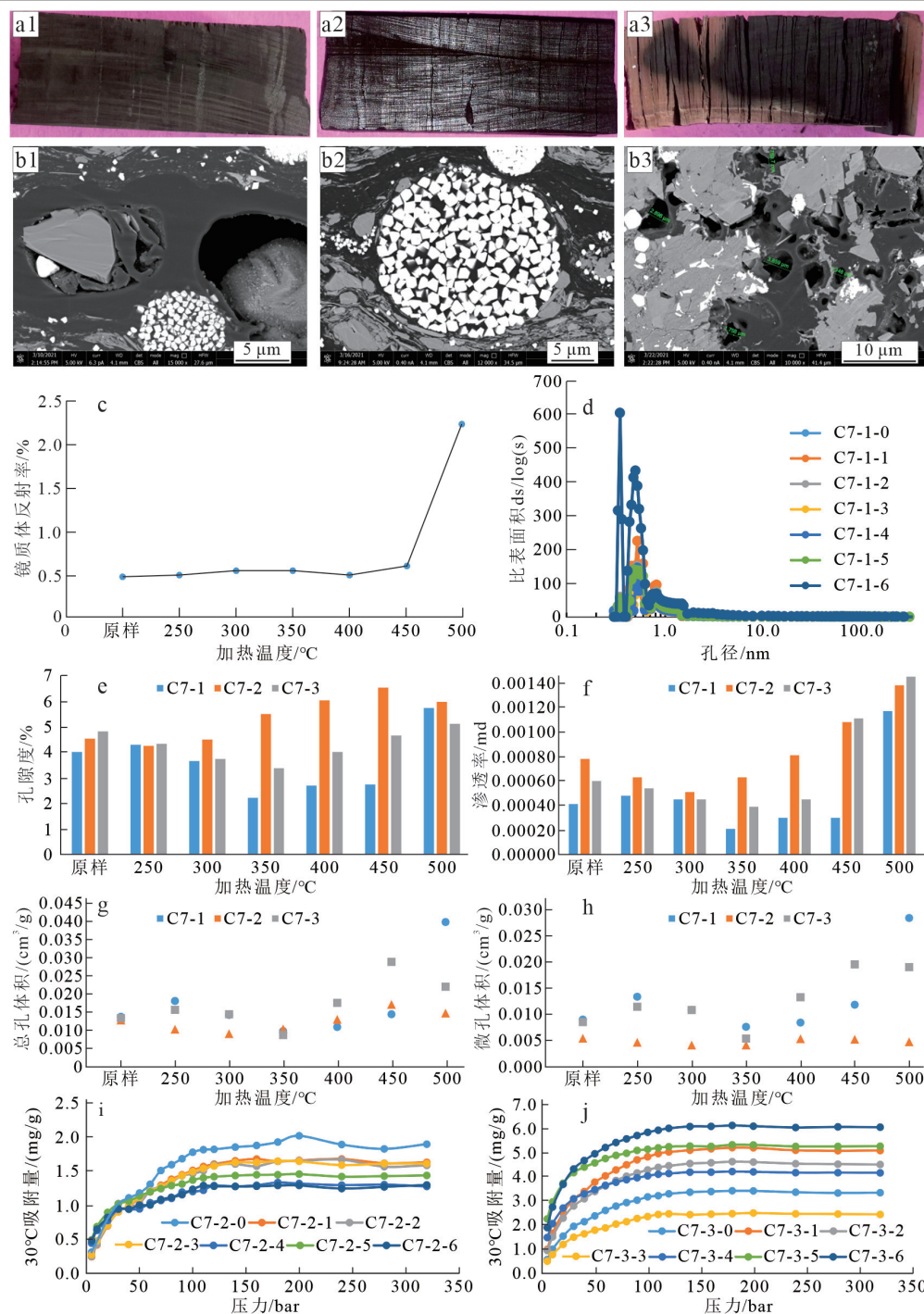


图6 不同模拟温度下页岩储层的物性和含气性特点

a—C7-1 的形貌变化: a1—原始样品, a2—300℃, a3—500℃; b—C7-1 有机质分布特点: b1—350℃ 有机质与矿物颗粒间孔, b2—400℃ 黄铁矿晶体间有机质, b3—450℃ 有机孔; c—C7-1 沥青反射率; d—C7-1 组孔体积分布图; e—孔隙度分布图; f—渗透率分布图; g—总孔体积对比图; h—微孔体积对比图; i—C7-2 组甲烷等温吸附曲线图; j—C7-3 组甲烷等温吸附曲线图

Fig.6 Physical and gas properties of shale reservoirs at different simulated temperatures

a—Morphologic change of sample C7-1: a1—Primitive sample, a2—300℃, a3—500℃; b—Distribution of the organic matter in sample C7-1: b1—The pore between the organic matter and mineral grain at 350℃, b2—The pyrite intergranular pores filled with organic matter at 400℃, b3—Organic pore at 450℃; c—Bitumen reflectance of sample C7-1; d—Pore volume of sample C7-1; e—Porosity distribution; f—Permeability distribution; g—The total pore volume comparison; h—Micropore volume comparison; i—Isothermal adsorption curve of methane of sample C7-2; j—Isothermal adsorption curve of methane of sample C7-3

品(C7-2)的吸附量(图 6i、j)。特别是当温度超过 350℃, 进入生气阶段之后, 高 TOC 样品(C7-3)的等温吸附量随着模拟温度增加而增加(图 6j)。但低 TOC 样品(C7-2)的吸附量有降低的趋势(图 6i、j)。结合不同 TOC 含量样品在不同模拟温度加热后有机质孔隙类型和比表面积特点, 证明有机质含量和页岩的比表面积共同决定页岩的吸附能力。

4.2 天鹅坪组页岩气赋存方式与富集机理

根据湘新地 4 井天鹅坪组页岩沥青的等效镜质体反射率为 1.25%~1.74%, 平均 1.44%, 参考模拟实验中沥青反射率不同受热阶段的变化特点, 推测湘新地 4 井下石炭统天鹅坪组富有机质页岩在晚三叠世—白垩纪大规模岩浆活动发生前处于生油高峰向生湿气转换的生烃演化阶段, 与模拟实验样品从 350℃ 加热至 450℃ 阶段大致相当。与模拟实验获得的该阶段孔隙结构类型、物性特征相互印证, 湘新地 4 井下石炭统天鹅坪组页岩中的无机孔隙被沥青充填, 有机质孔不发育, 页岩气的储集空间以层理缝、有机质与矿物间裂隙以及有机质微孔和溶蚀孔为主。页岩储层的物性较差, 页岩吸附能力一般。天鹅坪组底部 3 个页岩样品常规测试获得的渗透率值分布在 0.0172~0.159 mD, 孔隙度分布在 1.01%~1.50%, Langmuir 体积分布在 1.94~

2.69 cm³/g。

在湘新地 4 井钻探过程中, 陡岭坳组多次发生井涌现象。测井解释天鹅坪组底部页岩储层含水饱和度较低, 向上逐步升高, 至陡岭坳组钙质泥岩和碳酸盐岩储层的含水饱和度接近 100%(图 2)。反映到页岩气现场解析曲线上(图 7), 天鹅坪组底部富有机质页岩(图 7a), 主要有 a、b 两种瞬时产出速率随时间递减的产出方式, 应分别与页岩气中常见的游离气和吸附气产出曲线对比。但天鹅坪组下部和陡岭坳组高钙富有机质页岩的解析曲线除了 a、b 两种瞬时气体产出方式外, 在 a、b 之间则明显可以识别出第 c 种瞬时气体产出速率随时间递加的产出方式(图 7b~d)。结合富钙页岩 b 段瞬时产气量曲线在含水饱和度较低的天鹅坪组下部连续(图 7b), 而在储层含水饱和度较高的陡岭坳组(图 7c、d)不连续, 推测 c 段主要是微裂缝或宏孔中的水溶气, b 段为微孔中的水溶气和吸附气的混合气。解析过程中, 伴随解析(页岩储层受热)时间的延长, 气体克服溶液束缚能力升高, 致使 c 段瞬时产气量随时间增大。随着溶解气含量下降, 吸附气逐步被解吸出来, 当吸附气解吸出较大气泡时会阻碍微孔中水溶液的流动, 并造成气体扩散不连续, 致使 b 段或 b 段局部瞬时产气量曲线不连续

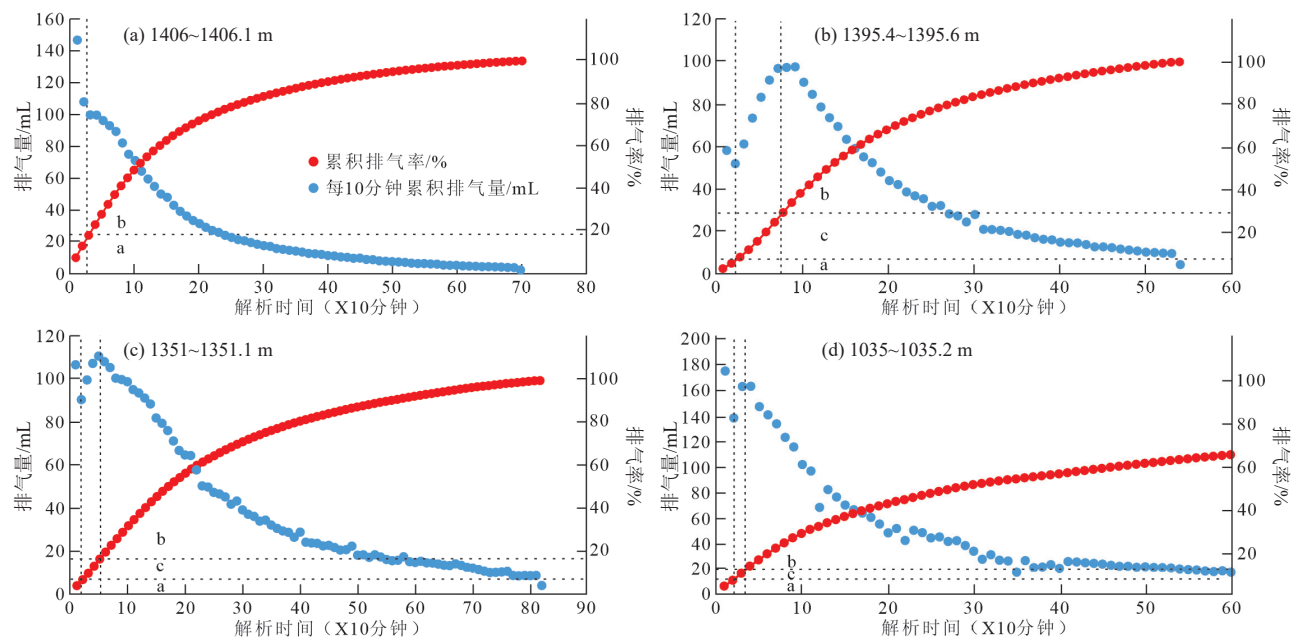


图 7 湘新地 4 井下石炭统页岩气产出曲线

Fig.7 Shale gas production curve of Lower Carboniferous in Well Xiangxindi 4

(图 7c、d)。湘新地 4 井下石炭统天鹅坪组和陡岭坳组内部天然气、水和压力的上述气水倒置,上部地层压力异常特征显然应该与上述地层中发育的富有机质页岩储层物性较差,页岩中有机质热解产生的天然气进入到页岩储层后难以排出,只有当页岩内有机质持续生烃,页岩储层内天然气量和能量不断积累到足够克服储层孔喉毛细管力及地层水静压力时就会发生向上运移,并大规模排驱孔隙水所致(金之钧等, 2003)。也正是湘新地 4 井下石炭统这一特定的页岩气赋存方式和富集机理,除了引起气水倒置和上部压力异常特点外,还造成高含气量页岩,或气测异常不是出现在富有机质页岩 TOC 最高层段,而是分布在富有机质页岩层段的顶部(图 2)。这实际上也是为什么湘新地 4 井下石炭统陡岭坳组中上部灰岩与页岩互层地层中频繁出现气测异常,且含气量最高或气测异常高值出现在陡岭坳组上部的原因(图 2, 图 7)。

综合分析天鹅坪组页岩成因、页岩气储层演化特点以及页岩气赋存方式和富集机理,可以发现涟源凹陷下石炭统天鹅坪组页岩气的形成富集主要受岩相、构造和岩浆活动的共同影响,是石炭纪沉积盆地有利相带控储,中—新生代构造和岩浆活动控藏的结果。

(1)有利相带控储:由于有机质含量直接关系到页岩的生烃能力和有机质孔的占比,因此,有利于

有机质埋藏保存和油气运移的有利沉积相带或岩相古地理部位对页岩气储层品质具有重要的控制作用。由于湘中下石炭统富有机质页岩的形成是古地理和古气候共同作用的结果,是早石炭世冰川形成和消融过程中,古大陆边缘海水出现盐度分层,引起海底缺氧的产物。加之涟源凹陷周边,特别是西部和北部地区紧靠陆地(图 1, 图 4),随河流进入盆地的陆源碎屑较为丰富,为盆地硫酸盐还原作用提供了必要的物质保障。因此涟源凹陷早石炭世时的海水硫酸盐还原带的深度可能不深(Armstrong et al., 2009),分层不强的贫氧环境从台盆相延伸到了台坪相内部,但硫化分层的缺氧环境仅出现台盆相内(图 2, 图 4),因此,石炭纪时期涟源凹陷边缘台坡相带(图 2b, c)和中部台盆相带(图 2a)都是页岩气勘探的有利相带。

(2)构造-岩浆控藏:湘中凹陷海西期构造稳定,下石炭统富有机质页岩在晚石炭世至中三叠世一直处于持续深埋和深成热演化过程。至中三叠世天鹅坪组页岩达到最大埋深时,页岩储层中的有机质正处于生油高峰向生湿气阶段转化时期。因此,中三叠世末伴随印支运动引起的区域褶皱抬升,储层中的油气将逐步向背斜核部运移聚集。晚三叠世—早侏罗世时期,伴随印支褶皱挤压后的松弛回弹,发生了区域性小规模拉张沉降,但沉积厚度不大,构造沉降产生的页岩深埋增温不足以促

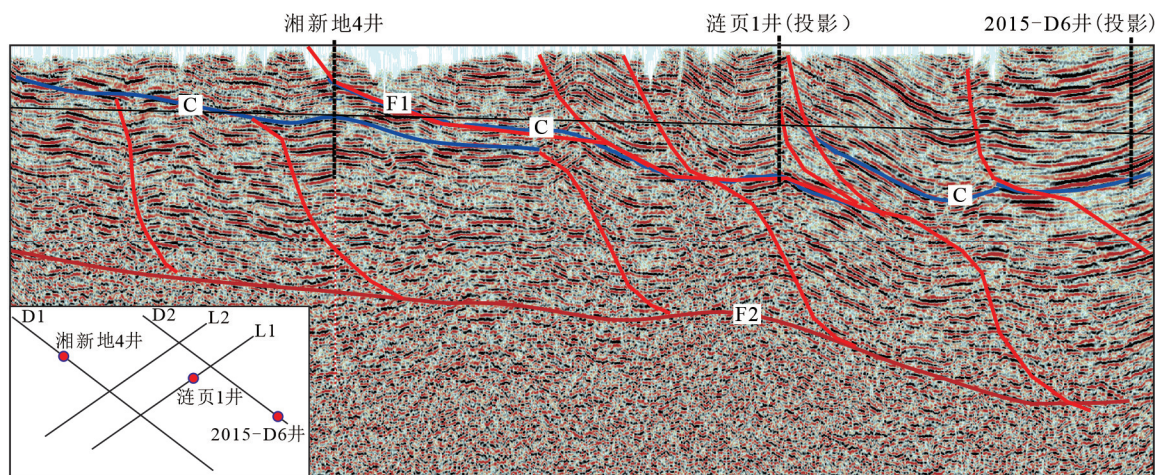


图 8 湖南涟源下石炭统页岩气双冲断裂夹块控藏模式图

F1—测水组内部顺层逆冲断裂; F2—泥盆系底部逆冲断裂带; C—测水组底界; D, L—二维地震测线

Fig.8 Controlling reservoir model of the Lower Carboniferous shale gas in Lianyuan, Hunan Province

F1—Bedding thrust fault within the Ceshui Formation; F2—Thrust fault at the base of the Devonian; C—The base of the Ceshui Formation; D, L—2D seismic line

使天鹅坪组页岩中的有机质发生二次生烃。然而同期大规模的岩浆入侵,使区域古地温梯度明显升高,页岩中的有机质和原油再次受热分解生成新的油、气。与之同时,强烈的燕山运动在造成印支期古背斜进一步遭受挤压形成高陡背斜并伴随断裂发育,引起油气大量散失的同时,强烈的水平挤压产生的逆冲推覆构造在局部推覆到印支期背斜之上,形成新的构造圈闭,或者在宽缓向斜翼部形成新的低幅隐伏构造,促进油气的重新富集成藏,成为页岩气的有利勘探目标。井震结合揭示湘新地 4 井分布在印支期背斜转折带,目的层系位于测水组滑脱断层(何红生, 2004)与泥盆系底界滑脱断层之间的夹块内,是双冲断层夹块控藏的新颖页岩气保存富集模式(图 8)。

5 结 论

(1)湘中坳陷下石炭统天鹅坪组富有机质页岩是全球早石炭世杜内期气候剧烈波动引起海水分层,海底缺氧的沉积产物,具有厚度大,分布广的特点。靠近加里东古陆边缘的凹陷盆地相是页岩气勘探的最有利相带。

(2)中—低成熟页岩储层的热模拟实验证实,半封闭条件下页岩的有机质成熟度主要受热演化阶段影响,呈阶梯式变化。在早期阶段,富有机质页岩受热二次生烃产生的原油充填于页岩储层的各种微观空隙中,页岩储层的物性随储层受热温度的升高而变差。但进入生气阶段之后,页岩的孔隙度和渗透率随储层受热温度的升高而升高,储层物性得到明显改善。

(3)涟源凹陷中部,发育在下石炭统测水煤系中的滑脱构造与发育在泥盆系底部的滑脱构造共同组成涟源凹陷中部典型的双冲断层。双冲断层夹块中发育的断裂有利于防止气体侧向运移,而双冲断层的顶板断层则封堵了断夹块内页岩气的垂直逸散通道。因此,双冲断层的夹块构造是复杂褶皱带最有利的页岩气控藏构造。

(4)涟源地区印支期广泛而强烈的岩浆事件导致中生代时期该区域古地温梯度升高,并引起天鹅坪组页岩发生二次生烃。天鹅坪组页岩气是印支期油气调整后,页岩中原油裂解和有机质二次生烃的共同结果。在天鹅坪组页岩二次生烃过程中,页岩

持续的生排烃和大规模排烃携水导致下石炭统天鹅坪组页岩储层内出现气、水倒置,上部压力异常的气藏特点。

References

- Abouelresh M O, Slatt R M. 2012. Lithofacies and sequence stratigraphy of the Barnett Shale in east-central Fort Worth Basin, Texas[J]. *AAPG Bulletin*, 96: 1–22.
- Armstrong H A, Abbott G D, Turner B R, Makhlof I M, Muhammad A B, Pedentchouk N, Peters H. 2009. Black shale deposition in an Upper Ordovician–Silurian permanently stratified, peri-glacial basin, southern Jordan[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 273: 368–377.
- Bi Hua, Peng Gelin, Yang Minghui. 1996. The thermal history and hydrocarbon-generating characteristics of Ceshui and Longtan coal series in Lianyuan, Hunan Province[J]. *Journal of East China Geological Institute*, 19(2): 157–161 (in Chinese with English abstract).
- Brezinski D K, Cecil B C, Skema V W, Stamm R. 2008. Late Devonian glacial deposits from the eastern United States signal an end of the mid-Paleozoic warm period[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 268: 143–151.
- Chen Lin, Zhang Baomin, Chen Xiaohong, Jiang Shu, Zhang Guotao, Li Hai, Chen Ping, Lin Weibing. 2021. Lithofacies and origin evolution of mudstone of Shetianqiao Formation in Shaoyang Sag of Xiangzhong Depression[J]. *Earth Science*, 46(4): 1282–1294 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xiaohong, Wei Kai, Zhang Baoming, Li Peijun, Li Hai, Liu An, Luo Shengyuan. 2018a. Main geological factors controlling shale gas reservoir in the Cambrian Shuijingtu Formation in Yichang of Hubei Province as well as its enrichment patterns[J]. *Geology in China*, 45(2): 207–226 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xiaohong, Zhang Baomin, Chen Lin, Zhang Guotao, Li Peijun, Zhang Miao. 2018b. Main geological controlling factors and enrichment pattern of shale gas reservoirs in the Late Ordovician–Early Silurian strata of Yichang, Western Hubei Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 39(3): 257–268 (in Chinese with English abstract).
- Cheng K Y, Elrick M, Romaniello S J. 2020. Early Mississippian Ocean anoxia triggered organic carbon burial and Late Paleozoic cooling: Evidence from uranium isotopes recorded in marine limestone[J]. *Geology*, 48(4): 363–367.
- Cheng Shunbo, Fu Jianming, Ma Liyan, Lu Youyue, Kou Xiaohu, Zhang Liguang and Huang Huilan. 2016. Origin of the Yuechengling Caledonian granitic batholith, Northeastern Guangxi: Constraint from zircon U–Pb geochronology, geochemistry and Nd–Hf isotopes[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 40(4): 853–872 (in Chinese with English abstract).
- Garzanti E, Sciunnach D. 1997. Early Carboniferous onset of

- Gondwanian glaciation and Neo-Tethyan rifting in South Tibet[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 148: 359–365.
- Hance L, Muchez P H, Coen M, Fang X S, Groessens E, Hou H, Poty E, Steemans P H, Streel M, Tan Z, Tournier F, Steenvinkel V M, Xu S C. 1993. Biostratigraphy and sequence stratigraphy at the Devonian–Carboniferous transition in southern China (Hunan Province); Comparison with southern Belgium[J]. *Annales de la Societe Geologique de Belgique*, 116: 359–378.
- Hatch J R, Leventhal J S. 1992. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark shale member of the Dennis limestone, Wabaunsee County, Kansas, U. S. A.[J]. *Chemical Geology*, 99: 65–82.
- He Hongsheng. 2004. On Ceishui Formation's bedding structure and decollement structure of Lianyuan Depression in Central Hunan Province[J]. *Journal of Xiangtan Normal University (Natural Science Edition)*, 26(2): 32–36 (in Chinese with English abstract).
- Isaacson P E, Díaz-Martínez E, Grader G W, Kalvoda J, Babek O, Devuyst F X. 2008. Late Devonian–earliest Mississippian glaciation in Gondwanaland and its biogeographic consequences[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 268: 126–142.
- Jin Zhijun, Zhang Jinchuan, Wang Zhixin. 2003. Some remarks on deep basin gas accumulation[J]. *Geological Review*, 49(4): 100–107 (in Chinese with English abstract).
- Li Cai, Xie Yaowu, Jiang Guangwu, Shi Jianrong, Wang Sunsheng. 2008. Glacial–marine diamictite of Gondwana facies in the Gyitangana, eastern Tibet, China, and its significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 27: 1654–1658.
- Liu Jianqing, Xie Yuan, Zhao Zhan, Lin Jiashan, Feng Weiming, Huang Xueping. 2013. The Geochronologic characteristics of Baimashan granite in western Hunan Province and its geotectonic significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 20(5): 25–35 (in Chinese with English abstract).
- Loucks R G, Ruppel S C. 2007. Mississippian Barnett shale: Lithofacies and depositional setting of a deep–water shale–gas succession in the Fort Worth Basin, Texas[J]. *AAPG Bulletin*, 91: 579–601.
- Miao Fengbin, Tan Hui, Wang Qiang, Bai Yunshan, Peng Zhongqin. 2016. Preservation conditions in shale gas of Carboniferous Ceshui Formation of Lianyuan Depression in the Middle of Hunan Province[J]. *Geological Science and Technology Information*, 25(6): 90–97 (in Chinese with English abstract).
- Miao Fengbin, Peng Zhongqin, Wang Zongxin, Zhang Baomin, Wang Chuanshang, Gong Lei. 2024. Brittleness characteristics and influencing factors of marine shale of Niutitang Formation in Xuefeng region: A case study of Well XZD–1[J]. *Geology in China*, 51(3): 743–761 (in Chinese with English abstract).
- Mii H S, Grossman E L, Yancey T E. 1999. Carboniferous isotope stratigraphies of North America: Implications for Carboniferous paleoceanography and Mississippian glaciation[J]. *GSA Bulletin*, 111(7): 960–973.
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 299: 715–717.
- Nesbitt H W, Young G M. 1989. Formation and diagenesis of weathering profiles[J]. *Journal of Geology*, 97: 129–147.
- Qie W K, Liu J S, Chen J T, Wang X D, Mii H S, Zhang X H, Huang X, Yao L, Algeo T J, Luo G M. 2015. Local overprints on the global carbonate $\delta^{13}\text{C}$ signal in Devonian–Carboniferous boundary successions of South China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 418: 290–303.
- Saltzman M R, González L A, Lohmann K C. 2000. Earliest Carboniferous cooling step triggered by the Antler orogeny[J]. *Geology*, 28: 347–350.
- Scheffler K, Buehmann D, Schwark L. 2006. Analysis of Late Palaeozoic glacial to postglacial sedimentary successions in South Africa by geochemical proxies: Response to climate evolution and sedimentary environment[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 240: 184–203.
- Tan Zhengxiu, Zhu Lunjie, Ren Xiaohua, Li Guobiao. 1994. On the Menggong'ao Formation[J]. *Regional Geology of China*, (2): 165–171 (in Chinese with English abstract).
- Tian Wei, Peng Zhongqin, Wang Baozhong, Wang Qiang, Miao Fengbin, Liu Feiyu. 2019. Reservoir characteristics and exploration potential of Lower Carboniferous shale gas in Lianyuan Sag, Central Hunan[J]. *Earth Science*, 44(3): 939–952 (in Chinese with English abstract).
- Tian Wei, Wang Chuanshang, Bai Yunshan, Li Peijun. 2019b. Shale geochemical characteristics and enrichment mechanism of organic matter of the Upper Devonian Shetianqiao Formation shale in Lianyuan Sag, Central Hunan[J]. *Earth Science*, 44(11): 3794–3811 (in Chinese with English abstract).
- Wang Kaiming, He Xipeng, Xu Yuping, Jin We. 2021. Geological characteristics of shale gas in Dalong Formation of Well Xiangye 1 in Lianyuan sag, Xiangzhong depression[J]. *China Petroleum Exploration*, 26(1): 86–98 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xianfeng, Peng Jun, Yu Ledan, Xu Tianyu. 2020. A review of the research methods of paleosalinity geochemistry in continental strata[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 40(2): 301–308.
- Yang Jun, Bai Daoyuan, Wang Xianhui, He Jiangnan. 2015. Zircon SHRIMP U–Pb dating and geochemistry of Caledonian Baimashan pluton and its tectonic significance[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 31(1): 48–56 (in Chinese with English abstract).
- Yao L, Qie W K, Luo G M, Liu J S, Algeo T J, Bai X, Yang B, Wang X D. 2015. The TICE event: Perturbation of carbon–nitrogen cycles during the mid–Tournaisian (Early Carboniferous) greenhouse–icehouse transition[J]. *Chemical Geology*, 401: 1–14.

附中文参考文献

- 毕华, 彭格林, 杨明慧. 1996. 涟源地区测水组、龙潭组煤热演化史及生烃特征[J]. 华东地质学院学报, 19(2): 157-161.
- 陈林, 张保民, 陈孝红, 蒋恕, 张国涛, 李海, 陈平, 林卫兵. 2021. 湘中坳陷邵阳凹陷余田桥组泥岩岩相及其成因演化[J]. 地球科学, 46(4): 1282-1294.
- 陈孝红, 危凯, 张保民, 李培军, 李海, 刘安, 罗胜元. 2018a. 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.
- 陈孝红, 张保民, 陈林, 张国涛, 李培军, 张森. 2018b. 鄂西宜昌地区晚奥陶世—早志留世页岩气藏的主控地质因素与富集模式[J]. 地球学报, 39(3): 257-268.
- 程顺波, 付建明, 马丽艳, 卢友月, 寇晓虎, 张利国, 黄惠兰. 2016. 桂东北越城岭岩体加里东期成岩作用: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素制约[J]. 大地构造与成矿学, 40(4): 853-872.
- 何红生. 2004. 湘中涟源凹陷测水煤系顺层构造与滑脱构造研究[J]. 湘潭师范学院学报(自然科学版), 26(2): 32-36.
- 金之钧, 张金川, 王志欣. 2003. 深盆气成藏关键地质问题[J]. 地质论评, 49(4): 100-107.
- 李才, 谢尧武, 蒋光武, 施建荣, 王生云. 2008. 藏东吉塘地区冈瓦纳相冰海杂砾岩的特征及其意义[J]. 地质通报, 27(10): 1654-1658.
- 刘建清, 谢渊, 赵瞻, 林家善, 冯伟明, 黄学平. 2013. 湖南雪峰山地区白马山花岗岩年代学特征及构造意义[J]. 地学前缘, 20(5): 25-35.
- 苗凤彬, 谭慧, 王强, 白云山, 彭中勤. 2016. 湘中涟源凹陷石炭系测水组页岩气保存条件[J]. 地质科技情报, 35(6): 90-97.
- 苗凤彬, 彭中勤, 汪宗欣, 张保民, 王传尚, 巩磊. 2024. 雪峰地区牛蹄塘组海相页岩脆性特征及影响因素——以湘张地 1 井为例[J]. 中国地质, 51(3): 743-761.
- 谭正修, 朱伦杰, 任晓华, 李国彪. 1994. 论孟公坳组[J]. 中国区域地质, (2): 165-171.
- 田巍, 彭中勤, 白云山, 王保忠, 王强, 苗凤彬, 刘飞宇. 2019a. 湘中涟源凹陷石炭系测水组页岩气成藏特征及勘探潜力[J]. 地球科学, 44(3): 939-952.
- 田巍, 王传尚, 白云山, 李培军. 2019b. 湘中涟源凹陷上泥盆统余田桥组页岩地球化学特征及有机质富集机理[J]. 地球科学, 44(11): 3794-3811.
- 汪凯明, 何希鹏, 许玉萍, 金伟. 2021. 湘中坳陷涟源凹陷湘页 1 井大隆组页岩气地质特征[J]. 中国石油勘探, 26(1): 86-98.
- 王宪峰, 彭军, 于乐丹, 许天宇. 2020. 陆相地层古盐度地球化学研究方法综述[J]. 四川地质学报, 40(2): 301-308.
- 杨俊, 柏道远, 王先辉, 何江南. 2015. 加里东期白马山岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、地球化学特征及形成构造背景[J]. 华南地质与矿产, 31(1): 48-56.