https://doi.org/10.3799/dqkx.2023.216



川北-鄂西地区中二叠统层序岩相 古地理演化及页岩气勘探潜力

邱 振^{1,2},窦立荣^{1*},吴建发³,韦恒叶^{4*},刘 雯^{1,2},孔维亮^{1,2},张 琴^{1,2},蔡光银¹,

张 淦4,吴 伟3,李世臻5,曲天泉1,高万里1

1. 中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院,北京100083

2. 国家能源页岩气研发(实验)中心,北京100083

3. 中国石油西南油气田分公司页岩气研究院,四川成都 610051

4. 西南石油大学地球科学与技术学院,四川成都 610500

5. 中国地质调查局油气资源调查中心,北京100083

摘 要:近两年我国南方川北一鄂西地区上二叠统吴家坪组一大隆组取得了页岩气重大勘探突破,并在中二叠统孤峰组发现 了勘探新苗头,但其富有机质层段的分布规律及其页岩气资源潜力仍不清楚.通过对川北一鄂西地区中二叠统地层开展沉积 相识别与层序地层对比划分,分析不同层序的岩相古地理演化特征,进而探讨该区孤峰组富有机质层段的分布规律与页岩气 资源潜力.研究结果表明:川北一鄂西地区中二叠统可划分为3个三级层序SQ1、SQ2和SQ3,其中层序SQ3对应于孤峰组, 沉积于卡匹敦晚期;层序SQ3沉积时期,该区在碳酸盐岩台地(对应层序SQ1和SQ2)基础上发育了3个北西向展布的深水盆 地,即鄂西盆地、开江一梁平台盆(海槽)和广旺台盆(海槽);孤峰组硅质岩与硅质页岩层段的有机碳 TOC含量较高(平均 TOC含量为3%~10%),且展布相对连续稳定;峨眉山地幔柱事件驱动了该区中二叠世晚期深水斜坡一盆地环境的形成,从 而控制着孤峰组富有机质硅质岩与硅质页岩的大规模区域性沉积.基于上述分析,综合硅质岩及硅质页岩有效厚度、TOC含 量、构造保存条件等页岩气地质评价要素,在川东北至湘鄂西地区优选出5个有利区,面积约为1.2×10⁴km²,估算总资源量约 1.75×10¹²m³,展示了良好的页岩气勘探开发潜力.

关键词:页岩气;三级层序;沉积相;孤峰组;四川盆地;鄂西盆地;非常规油气沉积学;石油地质.
中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2024)02-712-37

收稿日期:2023-12-10

Lithofacies Palaeogeographic Evolution of the Middle Permian Sequence Stratigraphy and Its Implications for Shale Gas Exploration in the Northern Sichuan and Western Hubei Provinces

Qiu Zhen^{1,2}, Dou Lirong^{1*}, Wu Jianfa³, Wei Hengye^{4*}, Liu Wen^{1,2}, Kong Weiliang^{1,2}, Zhang Qin^{1,2}, Cai

基金项目:国家自然科学基金项目(Nos. 42222209,42272118,92255302和42102198);中国石油天然气集团公司项目(Nos. 2023ZZ0801, 2021yjcq02和2021DJ2001);四川省自然科学基金项目(No. 2023NSFSC0279)

作者简介:邱振(1984-),男,博士,高级工程师,从事非常规油气沉积学与勘探评价研究. E-mail:qiuzhen316@163.com

*通讯作者:窦立荣,E-mail:dlirong@petrochina.com.cn;韦恒叶,E-mail:hy.wei@swpu.edu.cn

引用格式:邱振,窦立荣,吴建发,韦恒叶,刘雯,孔维亮,张琴,蔡光银,张淦,吴伟,李世臻,曲天泉,高万里,2024.川北一鄂西地区中二叠统层 序岩相古地理演化及页岩气勘探潜力.地球科学,49(2):712-748.

Citation: Qiu Zhen, Dou Lirong, Wu Jianfa, Wei Hengye, Liu Wen, Kong Weiliang, Zhang Qin, Cai Guangyin, Zhang Gan, Wu Wei, Li Shizhen, Qu Tianquan, Gao Wanli, 2024. Lithofacies Palaeogeographic Evolution of the Middle Permian Sequence Stratigraphy and Its Implications for Shale Gas Exploration in the Northern Sichuan and Western Hubei Provinces. *Earth Science*, 49(2):712-748.

Guangyin¹, Zhang Gan⁴, Wu Wei³, Li Shizhen⁵, Qu Tianquan¹, Gao Wanli¹

1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 10083, China

3. Shale Gas Research Institute of PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu 610051, China

5. Oil and Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China

Abstract: In the last two years, significant breakthroughs have been achieved in the shale gas exploration within the Upper Permian Wuchiaping Formation to Talung Formation in the northern Sichuan and western Hubei provicnes, South China. Furthermore, a promising exploration perspective has also emerged in the Middle Permian Kuhfeng Formation. However, the distribution patterns of the organic-rich strata and the potential shale gas resources in these formations are not yet fully understood. By identifying sedimentary facies and correlating sequence stratigraphy in the Middle Permian of northern Sichuan and western Hubei area, the characteristics of lithofacies paleogeography in different sequences and their evolution were analyzed. Following this, it explores the distribution patterns of organic-rich layers and the shale gas resource potential in the Kuhfeng Formation. The research reveals that three third - order sequences, namely SQ1, SQ2, and SQ3, are identified from the Middle Permian formations in the northern Sichuan and western Hubei area. Specifically, sequence SQ3 corresponds to the Kuhfeng Formation and was deposited during the late Capitanian. During the deposition of sequence SQ3, three northwest-trending deep-water basins developed on a carbonate platform (corresponding to sequences SQ1 and SQ2). These basins are the western Hubei Basin, the Kaijiang-Liangping Platform Basin (trough), and the Guang-Wang Platform Basin (trough), respectively. The Kuhfeng Formation exhibits a relatively continuous and stable distribution of organic-rich layers, mainly including bedded chert and siliceous shale layers with high organic carbon content (average TOC content ranging from 3.0% to 10%). The Emeishan mantle plume contributed to the formation of the deep-water slope-basin environment during the late Middle Permian in this area, further controlling the large-scale regional deposition of organic-rich bedded cherts and siliceous shales within the Kuhfeng Formation. Based on these above results and further comprehensive analyses of geological evaluation factors of shale gas, such as the effective thickness of bedded chert and siliceous shale, TOC content, and tectonic preservation conditions, five favorable areas for shale gas reservoirs covering approximately 12,000 km² are identified in the northeastern Sichuan to the western Hunan-Hubei region. The estimated total shale gas resource is approximately 1.75 trillion cubic meters, demonstrating significant potential of shale gas exploration and development in the region.

Key words: shale gas; third-order sequence; facies; Kuhfeng Formation; Sichuan Basin; Western Hubei Basin; unconventional petroleum sedimentology; petroleum geology.

0 引言

新世纪以来,以美国为代表采用水平井及多段 压裂技术率先实现了页岩气商业化开采,2022年美 国页岩气年产量已超8000×10^sm³,约占其天然气 总产量的83%(EIA,2023).借鉴美国页岩气勘探 开发成功经验,经过十余年探索,我国逐步实现了 海相页岩气规模效益开发.截止2022年底已累计探 明地质储量约3×10¹²m³,年产量达240×10^sm³,约 占我国天然气总产量的约11%,已成为天然气增储 上产的重要领域.我国重点含油气盆地发育了多套 含气页岩层系,页岩气技术可采资源总量约21.8万 亿方,具有较大勘探开发潜力.然而,当前我国页岩 气主要产自四川盆地及其周缘奥陶系五峰组一志 留系龙马溪组黑色页岩层系(Qiu et al., 2021;邹才 能等,2022,2023;姜振学等,2023). 近些年来,随着 国家能源局组织各大石油公司制定"七年行动方 案",加大油气勘探开发力度保障国家能源安全,中 石油、中石化等持续加强了页岩气新区新领域勘探 力度,并在四川盆地及周缘寒武系筇竹寺组、二叠 系吴家坪组一大隆组以及鄂尔多斯盆地石炭系一 二叠系页岩层系中均获得了重要勘探突破(匡立春 等,2021;胡东风等,2023;杨雨等,2023). 特别是近 两年,在我国南方川北一鄂西地区上二叠统吴家坪 组一大隆组取得了页岩气重大勘探突破. 鄂西红星 地区 HY1井吴家坪组获测试日产量达8.9×10⁴m³, 累积产气已突破1×10⁸m³(胡德高等,2023);川东 北地区 DY1H 吴家坪组井页岩气测试日产量达 32.06×10⁴m³,单井累积产气突破2000×10⁴m³(杨 雨等,2023),LY1井大隆组测试日产量达42.66×

^{2.} National Energy Shale Gas R&D(Experiment)Center, Beijing 10083, China

^{4.} School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

10⁴ m³(胡东风等,2023);而川西北地区LB1井大隆 组直井压裂测试日产量达1448.9 m³(李飞等, 2023;王明筏等,2023).同时,在川北一鄂西地区中 二叠统茅口组茅一段泥灰岩与孤峰组(孤峰段)硅 质岩及硅质页岩中也均获得了工业气流,其中鄂西 红星地区孤峰组一口水平井测试日产页岩气达 6.45×10⁴ m³,展示了该区中二叠统页岩气良好的勘 探前景.

页岩气作为富有机质页岩层段中自生自储的 天然气,其形成与富集均受到页岩有机质富集程度 及其展布特征的控制,本质上来说,古地理格局所 控制的有利沉积环境是页岩气规模发育的基本前 提条件. 层序地层的形成过程受控于海平面变化、 区域构造活动以及沉积物的供应,同时它们也是富 有机质沉积以及沉积环境变化的重要影响因素,故 层序地层格架建立及层序内岩相古地理的恢复常 被用为查明富有机质页岩富集及分布规律的重要 研究手段之一(Slatt and Rodriguez, 2012; Crombez et al., 2017). 前人已对川北一鄂西地区中二叠统层 序地层及岩相古地理演化开展了大量研究工作(马 永生等,2023;彭金宁等,2023;石万忠等,2023),但 仍存在着一定的差异性,争议主要聚焦于中二叠世 晚期该区内深水斜坡-盆地分布范围.这一时期对 应于孤峰组富有机质硅质岩及硅质页岩沉积,也是 页岩气勘探的重要潜在层系之一.为了更好地精细 刻画川北一鄂西地区中二叠世晚期岩相古地理,本 文在前人研究的基础上,针对研究区内中二叠统茅 口组和孤峰组典型露头剖面和钻井资料,结合该时 期最新的地层学研究进展(Shen et al., 2020; 申博 恒等,2021),开展沉积相识别与三级层序地层对比 划分,以此在同一层序内通过沉积相对比恢复不同 层序的岩相古地理,明确研究区内孤峰组富有机质 层段的分布规律与页岩气资源潜力,以期为页岩气 有利区优选与勘探新突破提供重要理论基础与 支撑.

1 地质背景

研究区包括川西北、川东北以及湖北西部的鄂西地区,中二叠世时期总体上为浅水碳酸盐岩台地沉积,局部为相对深水的台间盆地,特别在中二叠世晚期,台间盆地范围进一步扩大,几乎占据了整个鄂西地区和部分川东北地区(马永生等,2023)(图1).

我国华南地区中二叠统地层包括茅口组、孤峰 组、武穴组和银屏组(图2),其中上扬子地区为茅口 组和孤峰组(沈树忠等,2019),中下扬子地区发育 孤峰组、武穴组和银屏组. 茅口组与栖霞组的地层 接触界面为中二叠统(瓜德鲁普统)与下二叠统(乌 拉尔统)的分界面(Shen et al., 2020). 完整的茅口 组(例如广西来宾地区)在地层年代上属于整个中 二叠世(瓜德鲁普世),包括罗德期、沃德期和卡匹 敦期,但是峨眉山地幔柱引发东吴运动所造成的早 期地壳抬升,使得华南地区茅口组上部地层普遍受 到抬升剥蚀而造成地层的缺失,古地理上浅水区沉 积的茅口组顶部往往发育不整合界面,其上覆盖风 化壳或王坡页岩.而同时期古地理上深水区则沉积 了一套黑色薄层的层状硅质岩和硅质页岩组合,为 孤峰组(或孤峰段). 孤峰组在上扬子地区属于卡匹 敦阶上部地层,即晚卡匹敦期(图2),而在中扬子地 区孤峰组可能属于卡匹敦早中期沉积,下扬子地区 孤峰组则属于罗德期至晚卡匹敦期(Shen et al., 2020). 从这一点来看,下扬子地区与中上扬子区的 孤峰组沉积时间明显不一致,即孤峰组是一个穿时 的岩石地层.由于在上扬子地区孤峰组与茅口组上 段石灰岩地层为同期异相关系,因而也被称为茅口 组的孤峰段.川北地区与鄂西地区的孤峰组均属于 卡匹敦阶地层,其沉积时间大致相同,鄂西地区的 孤峰组可能略早于川北地区.

前人对华南地区中二叠统茅口组和孤峰组层 序地层特征及划分已开展了大量研究工作,多数认 为中二叠统(茅口组和孤峰组)可以分为3个三级层 序(罗新民等,1997;梅仕龙等,1999;杜小弟等, 1999;李凤杰和陈荣林,2008;李乾等,2018;王俊涛 等,2022),也有学者划分为4个三级层序(张克信 等,2002).由于中二叠统地层层序的三分方案符合 瓜德鲁普世(中二叠世)三期海平面变化大旋回特 征(Ross and Ross, 1987),显然是更为合理.

2 沉积相特征

中二叠世时期,川北一鄂西地区总体上为一个 巨型的陆表海碳酸盐台地环境,周围被特提斯洋、 秦岭洋所包围,在四川盆地南部存在着康滇古陆. 通过开展茅口组和孤峰组各类岩石组合特征与沉 积相标志分析(图3~图7),共识别出5种典型沉积 亚相,即局限台地、开阔台地、台地边缘礁滩、台缘 斜坡和深水盆地.



图1 川北一鄂西地区中二叠世晚期岩相古地理图(据马永生等,2023修改)

Fig. 1 Studied outcrop sections, wells and Palaeogeographic map in the northern Sichuan and western Hubei area (modified from Ma *et al.*, 2023)

2.1 局限台地

局限台地是碳酸盐台地相的一种亚相类型,是 华南茅口组较为典型的沉积亚相.它在茅口组下段 地层中岩性为深灰色厚层瘤状或似瘤状灰岩(图 3a)、中至薄层眼球一眼皮状灰岩(图 3b)或者泥质 灰岩夹钙质页岩(图 3c). 前者含泥质较多,发育少 量的生物但生物多样性较为单调(图 31),常为局限 台地或半局限台地中台坪微相的典型沉积特征;后 两者一般发育水平纹层(图 3n)以及藻纹层(图 3o), 指示为相对静水的环境,且可见定向排列的生物碎 屑堆积在黑色泥质基质中,属于局限台地亚相中潟 湖微相的典型沉积特征.在茅口组下段,部分瘤状 灰岩还发育大量蓝绿藻的粘结结构(图 3d),将大型 的双壳以及灰泥基质粘结在一起.与其伴生的还有 大量的疑源类绿藻管壳石藻属(Tubiphytes)、大型 串管海绵(图 3g和 3f)、裸海松藻(或松藻)属(Codiaceae)以及大量的腹足(图 3i).这些大型的生物格 架与粘结藻类一起组成了格架一藻粘结礁,将局限 台地内部最常见的软体动物双壳和腹足障积在一 起,形成局限台地的点礁微相.茅口组下段的瘤状 灰岩中还发育厚壳腹足(图3i),菊花状天青石结核 (图 3k)以及成岩白云石化的灰泥基质(图 3m).由 于双壳是食悬浮物的软底内栖动物,该瘤状灰岩中 含有大量较完整双壳及绿藻和藻礁格架生物,表明 其沉积环境为局限台地(Flügel, 2004).菊花状天青 石的出现往往指示着富锶、富硫以及较高盐度、硫 酸盐还原菌活跃的环境(Hanor, 2004; Taberner *et al.*, 2002; Sanz-Montero *et al.*, 2009).尽管该解释 可能还存在着争议(颜佳新等,2001),但天青石结 核的出现至少说明该碳酸盐台地是一个海水物理 化学条件异常的环境,而这种环境常见于局限台 地.同样,灰泥基质普遍发生局部的白云石化,说明 成岩过程中周围流体镁的来源较为充足,这也从侧 面上反映其沉积时期镁的浓度较高,一般为盐度较 高的局限台地潟湖环境.

2.2 开阔台地

开阔台地作为碳酸盐台地相的一种亚相,在研究区内常以发育厚层、巨厚层甚至块状生屑灰岩为特征(图4a和4b),含丰富的生物化石碎片.它们岩性一般为泥粒灰岩或粒泥灰岩(图4c~4f),含陆源泥质组分较低,且生物多样性高,常见大型粗枝绿藻、棘皮类以及苔藓虫和单体珊瑚.这些岩性与生



Fig. 2 Middle Permian stratigraphy in South China

年代地层格架据沈树忠等(2019),其中上扬子广西来宾铁桥资料来自梅仕龙等(1999);川西北地区剖面修改自李乾等(2018)和王婧雅(2014);川东北宣汉渡口剖面综合自李凤杰和陈荣林(2008)和Shen et al. (2020);中扬子地区湖北大冶剖面修改自张克信等(2002)和曹长群等(2013);下扬子安徽宿松地区的孤峰组和武穴组资料分别来自王俊涛等(2022)和罗新民等(1997);巢湖平顶山资料修改自杜小弟等(1999)、Wei et al. (2019)、Zhang et al. (2020)和姚素平等(2022)

物化石组合特征一般指示着正常盐度的开阔海环境,沉积物颗粒常受动荡水体的冲洗和搬运.

2.3 台地边缘礁滩

台地边缘亚相为高能的沉积环境,常见生物礁 或生物滩,也即台缘礁或台缘滩.台缘礁滩环境在 研究区内以发育灰白色厚层或巨厚层灰岩为特征, 有时可见穹窿状或杂乱堆积的块状(图 5a 和 5b). 它 们富含串管海绵(图 5c 和 5d)、保存完美的四射珊瑚 (皱壁珊瑚) (图 5e~5f)、大型的苔藓虫格架(图 5g) 以及粘结蓝绿藻(图5h).这些粘结藻类以及刚性海 绵、苔藓虫格架能够将生物或非生物碎屑障积在周 围,形成大量的完整生物化石堆积,如大量的完整 腕足化石(苔藓虫周围化石,图5g)以及椭圆形的蜒 类有孔虫化石(图 5i). 此类由粘结藻类以及海绵和 苔藓虫藻礁格架形成的生物礁称为格架-粘结礁, 这也是茅口组晚期华南最为常见的一种生物礁类 型.此类礁体周期性露出海平面,常形成丰富的鸟 眼构造(图 5j). 茅口组格架-粘结礁在显微镜下则 表现为富含灰泥基质的泥粒灰岩特征(图5k~51), 且生物多样性高,含较多的生物碎片,部分颗粒被 蓝绿藻粘结形成藻团块(图51).由于周期性暴露,这 些藻团块局部出现白云石化特征(图5m).发育厚 层或巨厚层砂屑灰岩的台缘滩微相,野外一般常见 腕足生屑,含一定量的单体皱壁珊瑚以及苔藓虫, 指示其为正常盐度的高能环境.而在显微镜下,此 类砂屑灰岩为含灰泥颗粒灰岩、泥粒灰岩或者亮晶 生屑灰岩(图5n),常发生完全白云石化,形成细晶 白云石(图5o),但还能模糊辨认出原始的颗粒支撑 结构.

2.4 台缘斜坡

斜坡环境作为位于台地边缘晴天浪基面以下 的沉积环境,其水动力条件较弱.该亚相类型在研 究区内一般发育在孤峰组或者与孤峰组同期异相 的茅口组、武穴组之中.斜坡亚相在孤峰组中的岩 石特征为香肠状硅质岩或硅质页岩与灰色石灰岩 或泥质灰岩互层(图 6a),局部可见灰岩透镜体(图 6b,6d).部分灰岩透镜体表面能辨认出风暴丘状层 理的标志(图 6b,6c),但其镜下结构与正常薄层香



图 3 川北一鄂西地区茅口组局限台地相沉积特征

Fig. 3 Restricted carbonate platform characteristics in the Maokou Formation in northern Sichuan and western Hubei area a. 四川旺苍鹿渡坝剖面茅口组下段瘤状泥质灰岩; b. 湖南桑植二洞坪剖面茅口组下段小型瘤状灰岩和眼球状灰岩; c. 四川旺苍鹿渡坝剖面茅 口组钙质页岩与泥质灰岩互层; d. 四川广元西北乡剖面茅口组下段纹层状粘结蓝绿藻以及大型双壳碎片; e. 四川广元西北乡剖面茅口组下段 大型管壳石藻属 *Tubiphytes*; f, g. 四川广元西北乡剖面茅口组下段大型申管海绵; h. 四川广元西北乡剖面茅口组下段大型松藻属 *Codiaceae*; i. 四川广元西北乡剖面茅口组下段大量腹足; j. 四川旺苍鹿渡坝剖面茅口组似瘤状灰岩中大型腹足; k. 四川旺苍鹿渡坝剖面茅口组菊花状天青 石结核; l. 四川旺苍鹿渡坝剖面茅口组瘤状泥质灰岩显示富含介形虫的含黏土物质的泥晶灰岩; m. 四川旺苍鹿渡坝剖面茅口组瘤状泥质灰岩 中基质的白云石化; n. 四川旺苍鹿渡坝剖面茅口组眼球状灰岩和钙质页岩中发育水平层理的含生屑泥灰岩; o. 四川广元西北乡剖面茅口组下 段瘤状灰岩中含丰富的粘结藻纹层, 中部为一个大型双壳碎片.

肠状灰岩夹层一样均为微晶灰岩,且含较多的粉屑 碳酸盐颗粒(图 6k).这表明香肠状硅质岩中所夹的 香肠状或透镜状石灰岩很可能均为风暴成因,由风 暴将浅海区域的粉屑颗粒带到斜坡环境沉积而成. 此外,香肠状硅质岩在显微镜下未见放射虫或硅质 海绵骨针,见较多硅质基质以及碳酸盐非生物颗粒 (图 61),这说明该硅质岩的沉积不是由硅质生物直 接埋藏堆积而成,而可能是富硅的海水在早成岩作



图4 川北一鄂西地区茅口组开阔台地相沉积特征

Fig. 4 Open carbonate platform characteristics in the Maokou Formation in the northern Sichuan and western Hubei area a. 四川广元西北乡茅口组 SQ2 层序中灰白色厚层至块状生屑灰岩;b. 湖北恩施市郊茅口组上段灰色厚层状生屑灰岩;c. 四川旺苍鹿渡坝厚层 灰岩中含藻类和其他生屑;d. 四川广元西北乡茅口组厚层灰岩显示为绿藻一有孔虫生屑灰岩,单偏光;e. 四川旺苍鹿渡坝厚层灰岩显示为绿 藻生屑灰岩,单偏光;f. 湖北恩施田凤坪剖面茅口组厚层至巨厚层灰岩为棘皮生屑灰岩,单偏光.

用下交代方解石泥晶颗粒而成,进而显示出香肠状 或瘤状的硅质岩结构.值得注意的是,缺少硅质生 物也有可能是硅质生物如放射虫在死亡沉积过程 中被贫硅的海水溶解之故(邱振等,2011).此类香 肠状或波状硅质岩在局部地区,如广元地区西北 乡,含有较多的树枝状变口目苔藓虫(图 6e)以及小 型腕足等.大量树枝状苔藓虫指示硬地、低沉积速 率的环境,腕足也常附生于海洋硬地的陆棚或斜坡 环境(Flügel,2004),且二叠系小腕足也出现在下扬 子孤峰组深水硅质岩中.这些特征均表明,香肠状 硅质岩或波状硅质岩与前文所述的开阔和局限台 地环境不同,一般出现在沉积速率较低且海底硬化 的较深水环境之中.

研究区内的斜坡亚相也同样被记录在与孤峰 组同期异相的茅口组地层之中.孤峰组沉积时期, 鄂西盆地西南部以及重庆的东部地区沉积了一套 特殊的地层组合,其下部为厚度较薄的孤峰组,主 要为泥岩与硅质灰岩互层,而其上部则为大套的武 穴组灰岩,可见于桑植仁村坪(图 6g)、建始茅草街 (武穴组下部的页岩夹灰岩,图 6f)以及石柱冷水溪 剖面.此类岩石地层组合一般出现在斜坡或斜坡脚 的环境中.而另外一种岩石类型是茅口组上段的深 灰色中薄层局部夹厚层的泥晶灰岩(图 6h,6j),它们 发育风暴丘状层理(图 6h)以及水平层理(图 6j),指 示着受风暴浪影响的弱水动力条件,为晴天浪基面 以下、风暴浪基面以上的斜坡亚相特征.

2.5 盆地

盆地相以孤峰组黑色层状硅质岩层段为代表, 此类硅质岩一般为平直薄层状,夹黑色页岩或炭质 页岩(图7a~7c). 发育丰富的硅质海绵骨针和放射 虫(图 7d 和 7f),偶尔可见丰富的薄壳的双壳幼体 (图 7e). 丝状薄壳的双壳幼体经常被误认为是藻丝 体,实际上是幼年的双壳(Conti and Monari, 1992), 常常出现于斜坡、深水陆棚或盆地环境中(Flügel, 2004). 放射虫是单细胞浮游原生动物, 死亡之后从 海洋表层沉降至海底过程中大部分硅质骨骼被贫 硅的海水溶解,只有小部分能够被埋藏保存下来. 在孤峰组沉积时期,大量的放射虫堆积而形成硅质 岩,这表明该时期海洋表层发育大量的放射虫动 物.由于放射虫食用细菌或有机碎片,进一步说明 了该时期海洋表层存在大量的有机质,反映了异常 高的生物初级生产力条件,从而有利于异常高有机 质规模富集(邱振等,2021). 虽然放射虫也可以生 存在浅水潟湖环境(Racki and Cordey, 2000)或浅 水相灰岩(Blendinger, 1985),但放射虫硅质岩常被 认为是深水斜坡或盆地环境(Flügel, 2004).而且, 放射虫与硅质海绵骨针的组合,如恩施田凤坪的孤 峰组硅质岩(Wei et al., 2018),一般指示着斜坡至 盆地近端的环境(Flügel, 2004). 早期前人曾提出川 北南江和旺苍地区孤峰组硅质岩沉积于浅水潟湖 环境,水深仅数米,与开阔台地一致(邱威挺和古鸿 信,1991). 该观点的主要依据为:孤峰组黑色硅质



图 5 川北一鄂西地区茅口组台缘生物礁滩相特征

Fig. 5 Reef and shallow shoal characteristics at the edge of carbonate platform in the Maokou Formation in the northern Sichuan and western Hubei area

a.四川广元西北乡剖面茅口组顶部块状生物礁;b.四川旺苍燕儿洞茅口组顶部大型块状生物礁;c.四川广元西北乡剖面茅口组顶部生物礁灰 岩中含大量串管海绵以及粘结蓝绿藻,箭头所示;d.湖北建始茅草街茅口组顶部大型串管海绵;e.四川旺苍燕儿洞茅口组顶部礁灰岩中四射 珊瑚(皱壁珊瑚);f.四川旺苍燕儿洞茅口组顶部礁灰岩含大量皱壁珊瑚和串管海绵,箭头所示;g.四川旺苍燕儿洞茅口组顶部礁灰岩中富含 苔藓虫以及障积的生物颗粒;h.湖北建始茅草街茅口组顶部粘结蓝绿藻及其粘结的生物颗粒,箭头所示;i.湖北建始茅草街茅口组顶部大量 的蜒类化石被蓝绿藻粘结;j.四川广元西北乡剖面茅口组顶部块状生物礁的鸟眼构造;k.四川广元西北乡剖面茅口组顶部块状海绵粘结礁中 障积的泥粒灰岩;l.湖北建始茅草街茅口组顶部海绵粘结礁中障积的泥粒灰岩,位于中部的颗粒为藻粘结团块;m.湖北建始茅草街茅口组顶 部海绵粘结礁的局部白云石化;n.四川旺苍鹿渡坝茅口组顶部生物滩灰岩中亮晶生屑灰岩;o.四川旺苍鹿渡坝茅口组顶部生物滩砂屑灰岩的 完全白云石化

岩顶部与吴家坪组含煤层系的王坡页岩相邻,不可 能由深水相直接抬升突变为潟湖沼泽相.然而,孤 峰组与吴家坪组之间为沉积间断的不整合接触关 系,是由于东吴运动引发的地壳抬升所造成的,以



图 6 川北一鄂西地区孤峰组斜坡相特征

Fig. 6 Slope facies characterisitics in the Kuhfeng Formation in the northern Sichuan and western Hubei area a. 四川旺苍鹿渡坝剖面孤峰组下段瘤状硅质岩夹薄层硅质灰岩以及灰岩透镜体;b,c. 四川旺苍燕儿洞孤峰组下段瘤状硅质岩中含透镜状风 暴成因的丘状层理灰岩;d. 四川广元西北乡剖面孤峰组下段薄层钙质硅质岩中发育大型富含生屑的灰岩透镜体;e. 四川广元西北乡瘤状钙质 硅质岩中发育大型的变口目苔藓虫(Trepostomata);f. 湖北建始茅草街剖面孤峰组上段钙质页岩夹厚层瘤状白云岩;g. 湖南桑植仁村坪剖面 孤峰组黑色薄层硅质灰岩与泥岩互层,其上武穴组为SQ3的高位体系域沉积;h. 四川宣汉渡口梨坪村剖面茅口组上段灰色厚层灰岩中发育风 暴成因的丘状交错层理;i,j. 四川宣汉渡口梨坪村剖面茅口组上段 SQ2层序的深灰色薄至中层泥晶灰岩,发育水平层理(箭头所示);k. 四川旺 苍燕儿洞剖面孤峰组下段硅质岩所夹灰岩为微晶灰岩,正交偏光;l. 四川旺苍燕儿洞剖面孤峰组下段的薄层瘤状硅质岩中富含钙质,未见浮 游硅质化石,正交偏光

致孤峰组顶部地层暴露被剥蚀,因此它们之间存在 沉积相的跳相现象是正常的.而且在川东北和恩施 九个坡剖面,均可见到孤峰组黑色页岩或硅质岩因 抬升后所发育的古风化壳.

另外,孤峰组发育的浅水相生物一般出现在孤 峰组下段,如前文所述,是斜坡相的特征.而在孤峰 组上段黑色层状硅质岩中,指示深水的放射虫和硅 质海绵骨针化石大量发育,且未见或少见浅水生物 化石.尽管前人曾报道孤峰组下段的硅质岩与石灰 岩互层段中富含浅水生物和游泳类生物,并认为是 潮下低能环境不是盆地环境(柳祖汉,1986),实际 上它们为斜坡环境的可能性更高一些.综上所述, 研究区孤峰组自底向上的沉积环境表现为由斜坡 相向盆地相的转变.

3 层序地层特征

基于上述沉积相划分方案,结合典型露头剖面 层序地层学分析与重点井测井相层序地层分析,川 北一鄂西地区中二叠统(茅口组和孤峰组)自下而



图 7 川北一鄂西地区孤峰组盆地相沉积特征

Fig. 7 Basin facies characteristics in the Kuhfeng Formation in the northern Sichuan and western Hubei area a. 四川旺苍燕儿洞剖面孤峰组黑色薄层硅质岩夹页岩;b. 四川广元西北乡孤峰组黑色薄层硅质岩夹页岩;c. 湖北恩施新塘乡九个坡剖面黑色 薄层硅质岩;d. 四川旺苍燕儿洞孤峰组黑色薄层硅质岩中富含放射虫;e. 四川旺苍燕儿洞孤峰组硅质岩含丰富的翅蛤科双壳幼体;f. 湖北恩 施田凤坪剖面孤峰组薄层硅质岩含丰富的放射虫化石

上可划分为3个三级层序(SQ1、SQ2和SQ3),其中 孤峰组对应于层序SQ3.由于茅口组是海相碳酸盐 岩地层,孤峰组是海相硅质岩及硅质页岩地层,每 个层序仅识别出海侵体系域(TST)和高位体系域 (HST),层序界面为高位体系域向海侵体系域的过 渡界面.

3.1 层序界面的识别

层序界面的识别是层序划分的基础和关键.层 序界面的主要类型包括层序界面(SB)和最大海泛 面(MFS).层序界面也称为层序底界面,限定沉积 层序的边界,它包括暴露不整合面(SU)或古风化壳 及其对应的整合界面(CC).暴露不整合面是一个沉 积间断面,形成于陆地环境下的河流侵蚀、过路、成 土化或喀斯特化(Sloss *et al.*, 1949).该界面是一个 形成于被动海退阶段的沉积间断面,往往出现在高 位体系域的顶部.另外一种层序边界类型为不整合 面对应的整合界面,一般形成于较深水环境,是一 个明显的岩性转变界面.

川北-鄂西地区层序 SQ1底部为中二叠统茅 口组与下二叠统栖霞组的分界面,是灰白色亮晶砂 屑灰岩或凝块岩粘结礁灰岩与深灰色薄层瘤状灰 岩的过渡界面(图 8a).该界面是下部浅水碳酸盐岩 沉积向较深水沉积的过渡阶段,也是一个较为明显 的海泛面.在中上扬子地区,该界面一般为整合连 续沉积,而下扬子地区(如巢湖)常见风化壳暴露面 (Wei et al., 2019).这说明 SQ1底部界面是一个区 域性海平面相对下降,或者构造相对抬升的一个过 渡界面,也是一个区域性的三级层序界面.层序 SQ2底部的层序界面(SB)是一个岩性突变界面,从 灰色块状生屑泥晶灰岩突变为深灰色瘤状灰岩或 泥质灰岩(图8b),是一个较为明显的海泛界面.它 在地层上位于茅口组瘤状灰岩的上部,是中二叠世 海侵过程中的第一期(王立亭等,1994),也是最大 海侵期的结束界面.

层序 SQ3底部界面为茅口组与孤峰组的分界 面,自下而上表现为灰白色块状生屑灰岩、砂屑灰 岩或礁灰岩突变为黑色硅质岩(图 8c~8d). 该类型 的层序界面一般出现在四川盆地北部的广旺海槽 (台间盆地)、开江-梁平海槽(台间盆地)以及湖北 西部的鄂西海槽(台间盆地). 在这3个深水盆地区, 该界面一般为整合界面连续沉积或者过路沉积.而 在局部地区,如鄂西恩施东北部建始的茅草街剖 面、恩施的东北部田凤坪剖面(Wei et al., 2018),可 见到明显的暴露剥蚀界面或风化壳黏土,代表不整 合沉积间断界面.但在恩施的东部、南部和西南部 地区,该界面均未见沉积间断证据,很可能均为连 续整合沉积.这一界面为中二叠世卡匹敦期孤峰组 硅质岩初始的界面.在其他地方如贵州黔中凹陷相 同层位出现了热液硅质岩(陈文一等,2003;许涛 等,2020),而在广西来宾地区的卡匹敦中期茅口组 也出现了富含硅质岩段(韦雪梅等,2016),同样记 录了海底热液的过程(邱振和王清晨,2011;Qiu and Wang, 2011). 这些证据说明 SQ3底部界面硅质岩的开始沉积是一个区域性地质事件,可能与峨眉山 地幔柱活动有关(邱振和王清晨,2011),同时也是 一个区域性的层序界面.

层序SQ3顶部作为一个层序界面,是中二叠统 孤峰组(茅口组)与上二叠统吴家坪组(龙潭组)的 分界面(图 8e~8f).该界面由中二叠统孤峰组硅质 岩向上突变为上二叠统底部的黏土岩,或者武穴组 石灰岩突变为风化壳黏土岩,它是一个区域性不整 合界面,是由东吴运动造成的区域性地壳抬升所致.

钻井岩心剖面的中二叠统层序界面则是综合 利用测井曲线自然伽马(GR)和电阻率(RT)的响应 来识别(图9). 层序界面均对应这些测井曲线的突 变之处,具体来说,SQ1和SQ3底界面的自然伽马 曲线由平直的低值突变为高值,电阻率曲线则由平 直的高值突变为低值,它们分别代表着一次重要的 海泛面或沉积间断面.

3.2 典型剖面与重点井层序地层划分

3.2.1 四川旺苍鹿渡坝露头剖面层序地层划分 鹿渡坝剖面位于四川省北部旺苍县高阳镇通往双 汇镇的公路边,野外露头由于铺路石材的开采出露 了完整的栖霞组和茅口组以及孤峰组(图10a).其 中栖霞组顶部为灰白色的灰质白云岩,而茅口组分 两段,下段为深灰色瘤状灰岩,上段为灰白色生物 碎屑石灰岩、砂屑灰岩.栖霞组与茅口组的分界面 为灰色灰质白云岩和深灰色薄层瘤状灰岩(图 10a),作为层序SQ1的底部界面(SB),而孤峰组为 黑色硅质岩夹石灰岩,其底部硅质岩与其下部茅口 组灰白色亮晶生屑灰岩的分界面为一个岩性突变 界面,是一个整合的层序界面,并作为层序SQ3的 底部界面. 茅口组下段瘤状灰岩中部出现一个显著 的岩性突变界面,即为灰色块状似瘤状灰岩向上突 变为灰黑色小型瘤状灰岩(图10a),可作为中间层 序的界面,以此,该地区茅口组至孤峰组自下而上 可分为3个三级层序,即SQ1、SQ2和SQ3(图10a和 11). 在茅口组每个层序内部可识别出若干个米级 旋回组成的准层序,每个层序内部的下半部均由两 个至三个厚度较小(2~8m)的准层序组成退积型准 层序组叠置样式,构成海侵体系域(TST);而上半 部分则由三至四个厚度较大(3~20 m)的准层序组 成进积型准层序组叠置样式,构成高位体系域 (HST)(图10a). 在每个退积型准层序组向进积型 准层序组转变的层段岩性均为灰黑色小型瘤状灰 岩或钙质页岩,代表着最大海泛面或凝缩段的特征.

基于上述特征,该剖面茅口组可分为两个三级 层序SQ1和SQ2.下部的层序SQ1厚度约为60m, 依据广元地区茅口组牙形石生物地层划分(王婧 雅,2014),旺苍鹿渡坝剖面层序SQ1沉积时间应包 括了中二叠世早期的罗德期和沃德期,持续时间约 为9百万年(Ma).前人基于米兰科维奇旋回定年所



图 8 川北一鄂西地区中二叠统茅口组至孤峰组 SQ1至 SQ3 层序界面特征

Fig. 8 Sequence boundary of SQ1 to SQ3 in the middle Permian Maokou and the Kuhfeng formations in the northern Sichuan and western Hubei area

a.四川广元西北乡剖面茅口组 SQ1底部层序界面;b.四川旺苍鹿渡坝剖面茅口组 SQ2底部层序界面;c.四川广元西北乡剖面孤峰组 SQ3底 部层序界面;d.四川旺苍鹿渡坝剖面孤峰组底部层序界面;e.四川旺苍燕儿洞剖面孤峰组与吴家坪组分界面的层序边界;f.湖北建始茅草街 剖面孤峰组顶部层序界面特征.



Fig. 9 Well-logging response of sequence boundary in the Middle Permian in the northern Sichuan and western Hubei area

计算茅口组下段的沉积速率约为0.72 cm/ka(Fang et al., 2017),据此计算的鹿渡坝剖面SQ1沉积时长 约为8.3 Ma. 而层序SQ2应沉积于卡匹敦早中期, 其持续时间约为4 Ma. 层序SQ3(孤峰组)内最大海 泛面为一个黑色富碳的石煤层,海侵体系域为退积 型准层序组叠置样式,但高位体系域残存的厚度较 短(图11),这可能与孤峰组顶部被抬升剥蚀有关. 根据广元地区牙形石地层估算(王婧雅,2014),孤 峰组沉积时长约为2 Ma. 因此,尽管SQ1至SQ3沉 积持续时间存在较大差异(2~9 Ma),但它们均为 三级层序.它们之间的这些差异说明区域性海平面 变化除了受全球绝对海平面变化影响以外,还受到 区域性构造运动(东吴运动)有关.

3.2.2 四川广元西北乡露头剖面层序地层划分 西北乡剖面位于广元利州区前往西北乡的公路边, 从老至新完整地出露了栖霞组、茅口组、孤峰组和 吴家坪组.栖霞组上部为厚层、巨厚层至块状灰白 色亮晶生屑灰岩、凝块岩和泥粒灰岩.茅口组可分 为两段,下段为灰至深灰色瘤状、似瘤状灰岩、眼球 状灰岩,上段则为厚层、巨厚层至块状泥粒灰岩、亮 晶生屑灰岩、藻粘结礁灰岩.而孤峰组则由黑色层 状硅质岩、页岩、硅质灰岩和泥质灰岩组成.栖霞组 与茅口组的分界面是一个岩性突变界面(图10b), 从灰白色砂屑灰岩突变为深灰色瘤状灰岩,作为层 序 SQ1的层序界面(SB).茅口组顶部为灰白色海 绵-藻粘结礁灰岩,向上突变为孤峰组深灰色硅质 岩,以此岩性突变面作为层序 SQ3的层序界面 (SB).而茅口组下段发育灰色似瘤状灰岩,向上突 变为中层泥质灰岩夹钙质页岩,以此作为 SQ2的层 序界面.

该地区层序 SQ3 顶部为一个区域性不整合界 面(图 10c),界面之下为孤峰组黑色硅质岩,界面之 上为泥岩、黏土岩,并很快过渡为钙质页岩夹石灰 岩.该黏土岩或泥岩为典型的区域性风化壳沉积, 代表着沉积间断的层序界面.

根据茅口组和孤峰组内部的准层序以及准层 序组叠置样式,可识别出海侵体系域和高位体系域 (图12). 茅口组下段层序SQ1的海侵体系域由6个 准层序组成,为一个向上变薄的退积型准层序组叠 置样式.该体系域的岩性由底部的块状瘤状灰岩逐 724





渐过渡为小型瘤状灰岩和眼球状灰岩,代表着海平 面逐渐上升的过程,为海侵体系域的典型沉积特 征.在其之上则发育由4个准层序(厚2~6m)组成 的一个进积型叠置样式,表现为向上单个准层序逐 渐增厚.这一特征反映了其沉积水体逐渐变浅,海 平面逐渐下降的过程.总体上,层序SQ1的海侵体 系域相对高位体系域沉积更厚,持续时间更长.相 比较而言,层序SQ2海侵体系域厚度较小,由8个较 短的准层序组成,形成一个向上退积的叠置样式. 而层序SQ2高位体系域厚度很大,由11个准层序 (厚约3~14m)组成,形成一个向上进积的叠置样 式,反映海平面逐渐下降,沉积水体逐渐变浅的过 程. 层序 SQ2 厚度远比 SQ1长,可能与层序 SQ2的 较粗岩性特征及所代表的沉积速率较快有关. 层序 SQ3下部由孤峰组硅质岩和石灰岩呈不等厚互层 所组成7个准层序,向上形成退积型叠置样式,反映 了海侵体系域特征.层序SQ3上部为孤峰组硅质岩 夹页岩,发育3个准层序,每个准层序是指示向上变 浅的米级旋回,并由这3个准层序组成向上进积的 叠置样式,代表了高位体系域的特征.

3.2.3 重庆奉节LT1井层序地层划分 LT1井位 于重庆奉节县的西北部,栖霞组为生屑灰岩,茅口 组以石灰岩为主,而孤峰组则为薄层硅质岩与页 岩.准层序作为向上变浅的米级旋回,其测井曲线 自然伽马(GR)和电阻率(RT)均具有较为典型的特 征:GR曲线向上逐渐降低,而RT曲线则是向上逐 渐升高.据此,茅口组可初步划分出15个准层序,下 部准层序逐渐变薄并组成的退积型准层序组叠置 样式,代表着海侵体系域特征,而紧邻其之上的进 积型准层序组叠置样式代表着高位体系域特征(图 13a),并组成三级层序SQ1.层序SQ1是茅口组中 含泥较多的层段,其顶部为含生屑灰岩.层序SQ1





上二 次家伊祖 次会供現会会失石友治、庭郎为主黄色集工版 進用 海湾 海道 運動 第 3 3 1 <th>Litt.</th>	Litt.
	the second se
死 市 1 <th1< th=""> 1 1 1</th1<>	
	深
田 32 180 - 「	水陆
31 展展色電電楽器決構業員習、電腦為構成失容 次 次 成 30 170 通信石石灰岩 <td>果</td>	果
30 170 金融石石板岩 29 170 金融石石板岩 160 金融石石板岩 金融 160 金融石板岩 金融 160 金融石板 金融 160 金融石板 金融 160 金融 金融 160 金融 <td></td>	
29 160 生生物 生生生素 並生生素 第日色時秋格型一點活進失況、含智電運導、 生生素 生物 量 合理 160 生素 原目 原目 資源 160 生素 原目 原目 資源 160 生素 原目 原目 資源 160 生態3.0. 未自色块状形型 上部3.0. 未自色块状砂斯素泥、含丰富的 商 投源 28 160 上部3.0. 未自色块状砂斯素泥、含丰富的 商 技速	
29 160 25 26 2	
160 存起状砂菌灰岩 合規 160 上面13 m, 未白色块状砂菌灰岩, 含丰富的 直 28 北白 独北 和白色块状砂菌灰岩, 含丰富的	
100 上部13 m. 朱白色块状砂质灰岩, 含丰富的 和枝绿礁, 岩白色, 梨龙, 双先, 发育晶矾, 高 浅浅滑	
28 140 上部13 m, 朱白色块状砂斯灰岩, 含丰富的 高 浅沸	
28 140 1111111111111111111111111111111111	
120 BELLET THE SA DER S OF OUR SHOW OF OUR SHOW	
T T THE S IS O M OLD S LICENSER 9	
27 140	the state state state
ф	5.6
26	
	叠层石石灰岩
25 你们也可见你见你见你说你。他的发育。 27 词	1 4 4 4
	14 4 4 4
二 24 120 并且 <u>其他界层至块块生活夹出。金融石结核。</u> 于第1 m为界层状无法	1.07 0.44
	9 . 9
23 美色康求生前灰岩 78	生用一砂屑灰岩
22 家色热状生殖来方	
会 <u>****</u> 来色带层铁生解夹岩	生物礁灰岩
21 100- 秋色朱秋生游灰岩 分	
11 20 灰色块状生用灰岩 P3 通	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
19 90 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	合 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一
18 友色用品状を決定用実法 白坪	地
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	相状灰岩
16 80 秋田県の市住在安田県本部を加	Correction of the
14 <u>14</u> <u>14</u> <u>14</u> <u>14</u> <u>14</u> <u>14</u> <u>14</u> <u>1</u>	钙质页岩
13 灰色厚层生居灰岩 文 山	SCHOOL SC
12 70	
11 《四方加土的火石、无人如此止, 最低为90 cm用纸页岩	種類岩
10 水色巨厚层至狭状瘤状灰岩、底部为 00 m的黑色炎浴	
9	酷土岩
▲ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	
8 50	
7 灰色中至厚层瘤状灰岩 菜	
6 5 m あの定知的中華県営業は安安 2 m 2	
4 東色用現著中原状瘤状來出 数 海	
3 上部灰色巨厚层状瘤状灰岩、下部为中却 经	
30 SQ1	
大色目芽层型块状瘤状実況、富含大型地 単振線、大型な差和大型管差石製造 退期	
tubphytes	
20. 5	
英色厚层至块状瘤状束治:當含串音 海绵,大型腹足,大型原体描述,面	
是,那技得液	
一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一	碳酸盐碳
援 组 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	坡

图 12 四川广元西北乡剖面中二叠统层序地层与沉积相综合柱状图

Fig.12 Sequence subdivision and facies in the Middle Permian at Xibeixiang outcrop section, Guangyuan, Sichuan Province

第2期

的底部层序界面为下二叠统栖霞组与中二叠统茅 口组的接触界面,为生屑灰岩变为泥质灰岩的岩性 突变面,也是GR曲线突变升高、RT曲线突然下降 的界面. 茅口组其余部分层段由6个准层序组成,其 下部的3个准层组厚度较小,而上部的3个准层序 厚度较大,分别代表层系SQ2海侵体系域和高位体 系域的特征. 层序 SQ2 底部层序界面是准层序组叠 置样式由进积变为退积的转换界面,也是GR曲线 突然升高、RT曲线突然下降的拐点.该地区孤峰组 以硅质岩和硅质页岩为主,可分为6个准层序,其下 部5个准层序厚度较小,向上为退积型地层叠置样 式,指示着海侵体系域的特征,其顶部对应电阻率 RT曲线的最低点和GR曲线的最高点,为最大海泛 面的测井响应特征.在其之上仅保存一个准层序, 可能与该地区的抬升剥蚀有关(孤峰组顶部发育不 整合界面),反映了高位体系域的特征,

3.2.4 重庆梁平L8井层序地层划分 L8井位于重 庆梁平区的南部,在构造上位于开江一梁平海槽的 南翼.栖霞组为生屑灰岩,茅口组下段为泥质灰岩 夹生屑灰岩,上段为生屑灰岩,局部为粗粒生屑石 灰岩.孤峰组厚度较薄,仅为10m左右,主要由硅 质岩、页岩和泥质灰岩组成,在其之上沉积了一套 较厚的武穴组石灰岩.孤峰组和武穴组相当于其他 地区的茅口组上段地层,为同期异相地层单元.层 序SQ1的底部层序界面为栖霞组与茅口组的分界 面,是生屑灰岩向灰黑色一深灰色泥质灰岩的岩性 突变面,并对应着GR曲线突然升高、RT曲线突然 下降的拐点(图13b). 层序界面之上覆盖了一套厚 约100m的暗色泥质灰岩,依据GR和RT曲线的特 征可识别出12个准层序.下部6个准层序厚度较 薄,组成退积型地层叠置样式,指示着海侵体系域 特征;而上部则为6个较厚的准层序,向上组成进积 型地层叠置样式,指示着高位体系域的特征,与其 下方的海侵体系域组成层序SQ1. 茅口组其余地层 根据测井曲线识别出9个准层序.其下部的4个准 层序厚度较薄,岩性为泥质灰岩,向上组成退积型 地层叠置样式,反映海侵体系域的特征.而其上部5 个准层序厚度较厚,岩性为生屑灰岩,向上组成进 积型地层叠置样式,反映高位体系域的特征,与其 下方的海侵体系域组成层序 SQ2. 层序 SQ2底部的



图13 重庆奉节LT1井(a)和梁平L8井(b)茅口至孤峰组层序地层与沉积相综合柱状图

Fig. 13 Sequence subdivision and facies in the Maokou and the Kuhfeng formations in LT1 well (a) in Fengjie and L8 well (b) in Liangping, Chongqing

层序界面也是由进积型向退积型地层叠置样式的 转换界面来定义,同时也是生屑灰岩向泥质灰岩转 变、GR曲线最低点和RT曲线最高点的响应界面. 根据测井曲线在孤峰组与武穴组中可识别出7个准 层序,下部2个准层序厚度较薄,对应孤峰组的灰黑 色一深灰色硅质岩、泥岩和泥质灰岩,指示海侵体 系域的特征,而其之上的5个准层序厚度较大,向上 组成进积型地层叠置样式,对应于泥晶灰岩、生屑 和砂屑灰岩沉积,反映高位体系域的特征,与其下 方的海侵体系域组成层序 SQ3. 层序 SQ3底部的层 序界面为孤峰组暗色岩系与茅口组浅色石灰岩的 接触界面,是岩性突变面,也是GR曲线突然升高、 RT曲线突然下降的拐点. 层序 SQ3 这种岩性组合 在L8井最为典型,同时在其他地区如石柱冷水溪乃 至整个重庆东部、恩施州的西南部、南部和东南部 均有发育.

3.3 层序地层对比与地层格架

基于川北一鄂西地区典型露头剖面和重点井 中二叠统茅口组至孤峰组层序地层分析,它们的三 级层序时空分布具有较大差异性,如图14至17所 示.这4条层序地层横向对比大剖面均位于扬子台 地北部边缘,其中3条从浅海横切至广海海盆,指示 着顺物源方向沉积时期层序格架和台地结构特征, 1条是平行古海岸线,指示着垂直物源方向层序地 层格架特征.对比结果表明,川北一鄂西地区中二 叠统发育3个三级层序SQ1、SQ2和SQ3,并由4个 不整合或整合的层序界面所限定.在每个层序界面 之上均发育多个退积型准层序组地层叠置样式及 其之上的进积型准层序组叠置样式.每个准层序均 为向上变浅的米级旋回,代表一次海泛旋回过程, 其时限大约为400~770 ka(Fang et al., 2017). 茅口 组每个层序界面之下的进积型准层序组叠置样式 反映碳酸盐台地向海快速推进过程.顺物源方向的 层序地层厚度具有逐渐减薄特征(图14~16),这表 明碳酸盐台地从台地内部至边缘沉积物供给逐渐 减少,与碳酸盐工厂位于浅水陆棚密切相关.而垂 直物源方向层序地层厚度存在着较大差异(图17), 指示着研究区具有隆凹格局的特征,这也进一步说 明碳酸盐台地边缘存在较多的台内凹陷,可能与东 吴运动造成的地壳抬升和局部裂陷沉积有关.

具体来说,层序SQ1底部的层序界面(SB)在区 域上是栖霞组与茅口组的接触地层界面.川北一鄂 西地区在古地理上属于扬子台地北缘,是一个巨型 陆表海的台地边缘沉积环境.因此,该层序界面在 川北一鄂西地区为整合接触界面,但在川西南康滇 古陆周围(李明隆等,2022)以及下扬子巢湖地区 (耿梓傲和韦恒叶,2019),栖霞组顶部(SQ1底部) 存在着较为明显的区域不整合暴露特征,表明这是 一个区域性的相对海平面下降事件,可能与峨眉山 地幔柱早期隆升(He et al., 2006)以及古太平洋板 块向东俯冲(Zhang et al., 2022)引起的地壳抬升有 关.覆盖在该层序界面之上的深灰色瘤状灰岩或眼 (如旺苍鹿渡坝剖面,图10)富含磷质结核,代表着 一次快速海侵的开始. 层序 SQ1 海侵体系域厚约 20~50 m,均为退积型地层叠置样式,为一套富含有 机质的瘤状灰岩.而高位体系域则表现为从瘤状灰 岩过渡为似瘤状灰岩以及生屑灰岩.高位体系域顶 部均为灰色厚层至块状生屑灰岩,局部地区(如石 柱冷水溪)为台内点滩的砂屑灰岩,反映相对海平 面逐渐下降的过程.总体上层序 SQ1 以深灰色瘤状 灰岩、低电阻率、高伽马值为特征,顺物源方向从碳 酸盐陆棚内部至边缘地带,其厚度、岩性变化不大, 表现为巨型陆表海碳酸盐台地的沉积充填特征;而 垂直物源方向,层序SQ1厚度变化较小,没有表现 出明显的隆凹格局特征,这说明该时期为稳定的碳 酸盐台地发展阶段.

层序 SQ2底部的层序界面是一个整合接触的 岩性转换界面,在台地内部地势平坦的台坪区(如 广元西北乡剖面)以瘤状灰岩的结束为标志,而在 台地内部低洼区(如旺苍鹿渡坝剖面)则以海侵形 成的钙质页岩开始为标志,并在茅口组内部出现自 然伽马GR的最低值以及电阻率RT的最高值.本 次海平面下降形成的层序界面可能代表着中二叠 世最大海侵的结束事件.覆盖在该层序界面之上为 一次短期的海平面上升,沉积了含泥质的似瘤状灰 岩、泥质灰岩以及生屑灰岩层段.其地层叠置样式 为退积型,顶部一般为小型瘤状灰岩或钙质页岩, 指示着海侵体系域及最大海泛面特征. 层序 SQ2高 位体系域为一套厚层至块状生屑灰岩、砂屑灰岩以 及生物礁灰岩,由下至上组成进积型地层充填方 式,是川北一鄂西地区乃至整个华南地区茅口组碳 酸盐岩沉积的主体地层单元.在台地边缘(如西北 乡、鹿渡坝及二洞坪)常发育厚达50至70m的浅滩 相砂屑灰岩或藻粘结礁灰岩.从台地内部至台地边 缘,层序SQ2厚度变化不大,指示着碳酸盐台地形 态模式.但在该台地外部如宣汉渡口、桥亭等,其厚 度明显减少,岩性也由厚层至块状灰白色石灰岩转 变为深灰色中层状泥晶灰岩,表现为浅水台地之外 的较深水沉积充填特征.垂直物源方向的层序地层 对比表明,与层序 SQ1相比,层序 SQ2厚度差异性 有了较为明显的变化(图17),在浅滩相灰岩较为发 育的地带,层序 SQ2厚度较小,这可能与水下隆起 的浅水区因受到周期性海平面下降的影响而造成 可容空间不足有关.

层序 SQ3 底部的层序界面是孤峰组与茅口组 地层接触界面.在区域上是一个连续的整合接触界 面,但局部地区如建始茅草街、恩施田凤坪出现短 暂的暴露(Wei et al., 2018),是一个区域性海平面 下降事件.该界面之下发育浅水沉积,如叠层石(广 元西北乡)、粘结礁灰岩(茅草街)、浅滩相砂屑灰岩 等.海平面显著下降仅见于包括研究区在内的中上 扬子区,而在下扬子区并未发现,这说明该次海平 面下降可能与上扬子西南缘的峨眉山地幔柱隆升 所造成地壳抬升有关.层序SQ3底部的层序界面之 上为孤峰组的黑色一灰黑色硅质岩,因局部发育海 绵骨针和放射虫,一般被认为生物成因.但在湖北 恩施以及贵州遵义均发现了热液成因证据(Yao et al., 2002;许涛等,2020),笔者在宣汉渡口梨坪村剖 面也发现与贵州遵义特征相似的角砾状硅质岩,疑 似在研究区也存在热液活动事件.从顺物源大剖面 地层对比来看(图14~16),在川西北地区层序SQ3 厚度从台地内部向台地边缘以及较深水陆棚方向 逐渐变厚;而在川东北地区和鄂西地区层序SQ3厚 度在台地内部局部地区(例如YH3井、PG5井、石柱 冷水溪、恩施JD4井)较厚,显示出台内凹陷的沉积



Fig. 14 Sequence stratigraphic correlation from SQ1 to SQ3 among sections of ST1, LT1, Luduba, Yanerdong, Qiaoting, Nuoshuihe in northern Sichuan and western Hubei



 图15 川北一鄂西地区NC1井-GT1井-YH3井-WT1井-YA1井-PG5井-渡口梨坪村中二叠统三级层序SQ1至SQ3地层对比
 Fig. 15 Sequence stratigraphic correlation from SQ1 to SQ3 among sections of NC1, GT1, YH3, WT1, YA1, PG5, Lipingcun in the northern Sichuan and western Hubei area

特征.这些特征表明,相比层序 SQ2 时期的稳定台 地沉积格局,层序 SQ3 时期出现了显著的隆凹相间 的沉积模式.结合前述层序 SQ3 存在热液硅质岩的 证据,该时期隆凹格局的地层格架形成可能与峨眉 山地幔柱隆升所引发的构造裂陷有关(罗志立, 1989;卓皆文等,2009).

4 层序岩相古地理演化

4.1 沉积相对比

基于川北一鄂西地区中二叠统沉积相对比分 析结果,在川西北广元地区碳酸盐台地相呈现为沉 积厚度从浅海向广海深海方向逐渐变薄趋势(图 18),为巨型扬子陆表海台地边缘的典型充填特征. 层序 SQ1中局限台地亚相厚度也存在着类似变化 特征,但其潟湖微相在侧向上不连续,间隔着台内 浅滩相.这些特征说明在层序 SQ1沉积时期川西北

地区星点状分布着潟湖微相,局部潟湖之间被台内 浅滩相分割着,周围均为水体循环不畅的局限台坪 微相.至层序SQ2沉积时期,局限台地相演变为开 阔台地相,指示着相对海平面仍在持续上升阶段, 只不过相比层序SQ1时期其上升速率明显减缓.该 时期绝大部分地区为开阔台坪微相,并在台地内局 部发育孤立的台内滩微相,但规模较小,厚度一般 小于10m. 然而在台缘区,旺苍鹿渡坝和燕儿洞剖 面的台缘滩厚度可达35m,台缘礁厚达18m,连片 展布规模可达宽约40 km. 尽管在川西北地区南江 桥亭地区台缘礁滩临近广海,但野外并未见到大型 的交错层理,常见块状的格架一粘结礁和砂屑滩. 这说明该地区的台缘滩沉积于台缘礁之后,是一个 礁后保护的浅海环境.层序SQ3沉积时期,川西北 地区从ST1井至北东向的诺水河镇,层序厚度逐渐 增大,沉积相由开阔台地相逐渐过渡为斜坡相,并 变为盆地相.这一特征说明层序SQ3沉积时期川西



图 16 川北-鄂西地区 G1井-SX1井-冷水溪-JS1井-田凤坪-新塘九个坡-JD4井-大峡口中二叠统三级层序 SQ1至 SQ3 地层对比

Fig. 16 Sequence stratigraphic correlation from SQ1 to SQ3 among sections of G1, SX1, Lengshuixi, JS1, Tianfengping, Jiugepo, JD4 and Daxiakou in the northern Sichuan and western Hubei area

北地区总体上为边缘海类型的碳酸盐台地环境,并 在北东方向联通广袤的秦岭洋.

而在川东北地区,层序SQ1沉积时期局限台地 亚相广泛发育(图19),其规模至少从NC1井向北东 方向一直延伸至PG5井,宽约200km,且其厚度变 化较小,均为平坦的局限台坪沉积微相环境,仅在 近端南充地区发育孤立的潟湖及其周围台内浅滩 微相.这表明该时期四川盆地中北部乃至整个四川 盆地均为宽广的陆表海局限台地环境(马永生等, 2023),盆地中部地区可能发育较多的潟湖或台内 浅滩相.层序SQ2沉积时期,随着海平面进一步上 升,之前广袤的局限台地环境转变为开阔台地环 境,并在台地内局部地区,如NC1井至GT2井形成 了连片的台内滩,厚约40m且其规模宽约50km. 而在台地边缘则形成较厚的孤立台缘滩,其中PG5 井台缘滩厚达65m,且普遍发生白云石化.从PG5 井向广海方向则逐渐过渡为斜坡环境,沉积了一套 深灰色中薄层泥晶灰岩沉积(图19).层序SQ3沉积



图17 川北-鄂西地区西北乡-鹿渡坝-HB1井-WT1井-JS1井-田凤坪-深沟-仁村坪-二洞坪中三级层序SQ1至 SQ3地层对比

Fig. 17 Sequence stratigraphic correlation from SQ1 to SQ3 among sections of Xibeixiang, Luduba, HB1, WT1, JS1, Tianfengping, Shengou, Rencunping and Erdongping in the northern Sichuan and western Hubei area

时期,川东北地区出现两条北西向深水海槽沉积, 分别在WT1井和PG5井区附近,后者是广海盆地, 前者是台内凹陷,即开江一梁平海槽.而在YA1井 区附近则出现了孤立台地的沉积环境特征.

在鄂西地区,层序SQ1沉积时期总体上发育碳 酸盐局限台地亚相(图20),局部地区如宜昌大峡口 附近发育潟湖微相,石柱冷水溪地区则发育较薄 (厚约10m)的台内浅滩微相,其余地区则为台坪微 相.层序SQ2沉积时期,随着海平面的上升,原来局 限台地逐渐转变为开阔台地环境,局部地区如宜昌 大峡口、石柱冷水体形成大规模(厚50m,宽约20 km)的台缘浅滩沉积微相,而在G1井、九个坡、和 JD4井附近则发育星点状的小规模(厚约10m)台内 浅滩微相,其余地区均为台坪微相.然而在层序 SQ3沉积时期,鄂西地区由之前的开阔台地转变为 较深水斜坡和深水盆地沉积环境,盆地中心位于恩 施州东部,盆地规模可能超过200 km.在该盆地周 围,例如石柱冷水溪附近发育广阔的较深水斜坡环 境,沉积了孤峰组黑色硅质岩和武穴组石灰岩,而 在宜昌地区则仍然保持着开阔台地的环境特征.至 层序 SQ3 沉积末期,由于东吴运动引发的地壳抬 升,之前斜坡环境逐渐转变为台缘浅滩,而深水盆 地环境逐步转变为深水陆棚,并最终隆升成陆地.

上述基于顺物源方向的3条从浅海横切至广海海盆剖面的沉积相对比分析,川西北、川东北和鄂西地区不同层序(SQ1、SQ2和SQ3)之间沉积相时空分布特征存在着较大差异(图18~20).然而垂直物源方向贯穿研究区的大剖面沉积相对比分析结果表明,这些地区沉积相时空分布差异更为显著(图21).层序SQ1沉积时期,广元西北乡至鄂西盆地南缘桑植一带发育广阔的局限台地沉积环境,局部地区如西北乡和桑植二洞坪发育潟湖微相,其他地区均为台坪微相.层序SQ2沉积时期,随着海平面上升,局限台地演化为开阔台地,并呈现显著差异沉积微相特征:在川西北广元地区发育多个点状分布的台缘滩,而在桑植二洞坪和仁村坪地区形成规模较大(厚50m,宽30km)的台内滩,其他地区均为台坪环境.层序SQ3沉积时期,从川西北地区西



图 18 川北一鄂西地区 ST1-LT1-鹿渡坝-燕儿洞-桥亭-诺水河中二叠统连井相对比图



北乡沿向南东方向,经过鹿渡坝、HB1井、WT1井、 鄂西盆地的JS1井、恩施田凤坪、宣恩深沟到桑植仁 村坪,发育北西一南东方向的深水相斜坡至盆地沉 积,长达490 km.这些地区总体上呈现隆凹格局特 征,凹陷处为盆地环境,相对隆起处为较深水的斜 坡环境,而不是浅水台地环境(图 21).

4.2 单因素分析

基于上述中二叠统层序地层对比分析结果,分 别统计了川北一鄂西地区野外露头剖面和钻井剖 面的三个层序 SQ1、SQ2和 SQ3的厚度,绘制了研 究区内各层序的厚度分布图(图 22a~22c).结果表 明,层序 SQ1厚度变化较大(10~150 m),总体上为 东北薄、西南厚的分布特征(图 22a),主体厚度为 60~110 m.层序 SQ1在研究区存在4个厚度较大的 区域,分别为湖南石门磺厂、桑植二洞坪、宜昌大峡 口与剑阁猫儿塘地区.研究区内川西北广元西北 乡一南江桥亭至川东北宣汉一奉节一恩施建始一 带,以及桑植仁村坪一重庆石柱一云安一带,它们 沉积厚度相对偏薄.而在襄阳南漳常家洼一带厚度 也较薄,这是由于该地区碳酸盐岩颗粒较细,单层 厚度较薄所致.总体来说,在沉积厚度较厚的区域, 其岩性多为厚层或块状瘤状灰岩、似瘤状灰岩,而 在沉积厚度较薄的区域,除了南漳常家洼,其岩性 一般偏粗,颜色较浅.

川北一鄂西地区层序 SQ2 厚度分布与层序 SQ1的相似,变化较大(25~190 m)(图 22b),主体 厚度为50~150 m,在川北地区呈北西向,而在鄂西 地区呈东西向.研究区发育4个沉积厚度较大的地 区,自东至西分别为鄂西建始野三关(JD4井附近)、 重庆云阳云安镇一忠县石宝镇、重庆合川区太和镇



图 19 川北一鄂西地区 NC1-GT1-YH3-WT1-YA1-PG5-渡口梨坪村中二叠统连井相对比图 Fig. 19 Facies correlation among sections of NC1, GT1, YH3, WT1, YA1, PG5 and Lipingcun in the Middle Permian in the northern Sichuan and western Hubei area

以及剑阁北庙乡(ST1井).而在沿着南江桥亭 -MS1井-宣汉一奉节-建始以及宜昌一带沉积 厚度较薄,呈北西向展布.层序SQ2岩性均为灰色 或浅灰色碳酸盐岩,沉积较厚区域发育粗粒碳酸盐 岩(例如砂屑灰岩、泥粒灰岩),而在沉积厚度较薄 区域,如通江诺水河、宣汉渡口以及南漳常家洼等, 常发育岩性较细的泥晶灰岩或泥晶灰岩夹页岩 沉积.

川北-鄂西地区层序 SQ3 沉积厚度变化最为 显著(0~105 m)(图 22c),主体厚度为 5~50 m. 阆 中-南充一带以南地区以及宜昌大峡口地区层序 SQ3厚度为0值,它们很可能是地层剥蚀区.而重庆 云阳县云安镇一带的厚度很薄,是因为层序 SQ3实 际沉积厚度很薄,这可能是水下隆起区.层序 SQ3 实际沉积厚度很薄,这可能是水下隆起区.层序 SQ3 沉积时期,研究区发育 6个沉积厚度较厚的区域,自 西至东分别为巴中通江县沙溪镇(MS1井)、达州大 竹县(YH3井)、石柱冷水溪、重庆万州长滩镇(J1 井)、建始茅草街以及桑植陈家河镇(仁村坪)附近. 其中石柱冷水溪和桑植陈家河镇附近沉积厚度较 大的原因是发育了较厚的碳酸盐岩沉积.恩施屯堡 乡(田凤坪)周围被四个沉积相对较厚的中心所包 围,这是因为相对于鄂西其他地区,田凤坪孤峰组 层序SQ3缺少上部的页岩沉积,其页岩段可能是因 地层抬升后被剥蚀所致.

层序 SQ3 的硅质岩与硅质页岩是该层序内相 对细粒沉积岩,在川北一鄂西地区其厚度分布差异 性明显(图 22d). 层序 SQ3 沉积时期研究区发育 4 个细粒岩(硅质岩+硅质页岩)沉积中心,自西至东 分别为广元西北乡、达州大竹县、石柱冷水溪以及 湖北建始一鹤峰地区,总体展布方向为北西向.层 序SQ3中硅质岩+硅质页岩厚度与该层序地层总 厚度比值(F/S)大小可用于区分深水沉积、斜坡和 浅水沉积区(图23). 冯增昭等(1993)认为该比值大 于0.6一般属于深水沉积区,比值小于0.3一般属于 浅水区,比值处于两者之间一般属于斜坡区等过渡 区.川北一鄂西地区层序SQ3的F/S比值小于0.25 区域为L17井-YH3井-L8井-SB2井-SX1 井-桑植仁村坪一带以南地区,该区域可能是浅水 碳酸盐台地沉积;而F/S比值大于0.6区域为K3 井一旺苍燕儿洞一南江桥亭-TD32井-PG5井



图 20 川北一鄂西地区 G1-SX1-冷水溪-JS1-田凤坪-新塘九个坡-JD4-大峡口中二叠统连井相对比图 Fig. 20 Facies correlation among sections of G1, SX1, Lengshuixi, JS1, Tianfengping, Jiugepo, JD4 and Daxiakou in Middle Permian in the northern Sichuan and western Hubei area

-JS1 井-EWD2 井-带以外的地区,表示这些区域很可能为深水盆地沉积;F/S比值处于上述两者之间区域,多为广阔的过渡平缓地带,指示着这些区域可能是较深水的斜坡环境.

4.3 岩相古地理演化

基于上述川北一鄂西地区中二叠统各层序 (SQ1、SQ2和SQ3)地层厚度、层序SQ3细粒沉积 岩(硅质岩+硅质页岩)累计厚度以及其所占层序 地层总厚度比值(F/S)分布特征,并结合层序内沉 积相标志、横向沉积相展布特征,绘制了它们的岩 相古地理空间展布图,并明确了其演化特征(图 24a,22b,25),详述如下.

层序SQ1沉积时期属于茅口早期,也属于瓜德 鲁普世早期,川北一鄂西地区为广阔的局限台地环 境,在川西北一南江桥亭至湖北建始一带发育着北 西向的台地边缘,并在台地边缘外部发育与其平行 分布的斜坡至盆地环境(图 24a).总体上来说,该时 期研究区自南西向北东方向沉积水体逐渐加深,形 成了浅水碳酸盐岩局限台地一台地边缘至较深水 斜坡一深水盆地的古地理格局.

具体来说,层序SQ1沉积时期研究区局限台地 内部的浅滩呈星点状分布,局部发育较深水的潟湖 环境(图24a).潟湖微相主要分布在鄂西盆地北部 宜昌大峡口、东南部石门磺厂和西南部桑植二洞 坪,以及川西北的剑阁猫儿塘和旺苍鹿渡坝附近. 这些潟湖微相主要以深灰色中薄层瘤状灰岩、泥质 灰岩及钙质页岩沉积为主,局部可见菊花状天青石 结核,说明其海水化学性质较为异常,可能是一个 高矿化度、高盐度的环境(Taberner *et al.*, 2002;Hanor, 2004; Sanz-Montero *et al.*, 2009).旺苍鹿渡坝



图 21 川北一鄂西地区西北乡一鹿渡坝-HB1-WT1-JS1-田凤坪-深沟-仁村坪-二洞坪中二叠统连井相对比图 Fig. 21 Facies correlation among sections of Xibeixiang, Luduba, HB1, WT1, JS1, Tianfengping, Shengou, Rencunping and Erdongping in Middle Permian in the northern Sichuan and western Hubei area

和宜昌大峡口发育的小型潟湖出现在台地边缘浅 滩背后,缺乏典型的礁后潟湖粪球粒沉积,这说明 台缘浅滩的隔挡作用相对偏弱,与外海存在着一定 的水体交换.该时期台内浅滩主要分布在鄂西盆地 南部桑植红沙、石柱冷水溪、川北阆中等地.由于它 们规模较小,厚度较薄(10m左右),岩性以绿藻泥 粒灰岩为主,反映了水深小于10m的水下隆起沉积 环境特征.浅水台地边缘亚相呈带状分布于四川盆 地和鄂西盆地北部,主要为生屑泥粒灰岩沉积,局 部见暗色块状格架粘结礁.由于尚未发现大型的砂 屑滩,且总体上礁滩体不发育,推测以水下隆起为 主.由于受地层出露及钻井资料所限,该沉积相带 的具体展布特征还需要更多的证据来支持.此外, 需要指出的是,层序SQ1沉积时期研究区台地边缘 外部的斜坡和盆地相属于推测性质,仅在南漳常家 洼露头剖面上发现以中厚层泥晶灰岩为特征的斜 坡相.

层序SQ2沉积时期属于瓜德鲁普世中晚期(也 即茅口晚期),川北一鄂西地区为广阔的开阔台地 海,台地边缘亚相在研究区东部与东北部旺苍鹿渡 坝-PG5井-MC2井-建始茅草街-宜昌大峡口 一带呈带状分布(图 24b). 在台地边缘外海则分布 着与其平行的、相对平缓的较深水斜坡以及深水盆 地环境,从而使得研究区自西南向北东方向呈现开 阔台地一台地边缘一斜坡一深水盆地的古地理格 局.在开阔台地内部发育多个较大规模的台内浅 滩,主要分布在鄂西盆地的恩施新塘乡与湖南桑植 陈家河(二洞坪)、川东北云阳云安-忠县石宝镇以 及剑阁南部北庙乡(ST1井)一带.这些台内浅滩岩 性以亮晶生屑灰岩为主,富含蜓类、苔藓虫以及腕 足等生物,局部含晶洞或发生白云石化,反映水动 力强,且偶尔露出海平面之上的沉积环境.台地边 缘内的生物礁或生物浅滩微相呈星点状,主要分布 在旺苍燕儿洞和鹿渡坝、HB1井、PG5井、建始茅草 街、宜昌大峡口、宜都风鼓洞、以及湖南石门磺厂等 附近.台缘生物礁主要为灰白色块状生屑灰岩,富 含串管海绵、粘结蓝绿藻、苔藓虫、单体皱壁珊瑚, 以及其他非藻礁后生动物如腕足、双壳、蜒类与非 蜒类有孔虫、绿藻等.这些特征表明它属于格架-粘结生物礁类型,具有一定抗风浪能力,但总体以



图 22 川北一鄂西地区中二叠统层序 SQ1(a)、SQ2(b)和 SQ3(c)地层厚度及层序 SQ3中硅质岩+硅质页岩厚度(d)分布图 Fig. 22 Contour map of SQ1 (a), SQ2 (b), SQ3 (c) thickness in the Middle Permian strata and bedded chert and Siliceous shale thickness of SQ3 (d)in the northern Sichuan and western Hubei area

障积粘结作用为主.台缘浅滩岩性以亮晶生屑灰岩 和泥粒灰岩为主,含丰富的腕足、苔藓虫、皱壁珊 瑚、双壳、有孔虫、大型绿藻等生物,生物多样性高, 局部地区如PG5井的砂屑灰岩发生了白云石化(张 坤贞等,2019).这一特征表明台缘环境生物格架堆 积起到了一定的障壁作用,但未见连片的砂质障壁 岛特征,指示着该时期台地海与广海之间存在着一 定的水体连通交换.台地边缘外部的较深水斜坡环 境以发育中层状水平层理的泥晶灰岩沉积为特征, 局部地区如宣汉渡口则发育风暴丘状层理,这些特 征表明南江、通江以及宣汉北部应为广海较深水环 境,水动力条件可能介于晴天浪基面与风暴浪基面 之间.

层序 SQ3 沉积时期属于瓜德鲁普世晚期至末 期,川北一鄂西地区主要发育隆凹相间的较深水斜 坡至深水盆地环境(图 25).由多个较深水的斜坡或 陆棚环境将研究区分割为3个北西向展布的深水盆 地:鄂西盆地、开江一梁平台盆(海槽)以及广旺台 盆(海槽).每个台盆均是向北开口,而不是之前认 为的北西向连通在一起(马永生等,2006).开江一 梁平台盆(海槽)与鄂西盆地之间也不是前人认为 的以浅水台地分割(魏国齐等,2006;赵俊兴等, 2008),而是以较深水的斜坡或陆棚环境分割为东 西两侧的深水盆地.这3个深水盆地广泛沉积了一 套黑色硅质岩与硅质页岩,富含有机质,总有机碳 (TOC)含量一般 3%~10%,最高可达 31%(图 26). 由于该时期隆凹古地理格局可造成深水盆地 的水体循环受阻,同时其周围临近的古陆也能够输 入大量营养物质,从而使得这些深水盆地的水体极 度缺氧(Wei et al., 2016). 四川盆地内的斜坡环境 岩性以瘤状硅质岩与灰岩或泥质灰岩互层为主,而 鄂西盆地的斜坡环境则是以孤峰组硅质岩之上沉 积了武穴组石灰岩特征,指示为较深水的过渡环 境.总体上,研究区内斜坡环境较为宽缓,往深水盆 地可能存在着一定范围平坦的深水陆棚环境,而不 是前人认为的狭窄的斜坡相特征(魏国齐等,2006; 赵俊兴等,2008). 在川东北重庆云阳县分布着一个 浅水孤立台地,周围被深水盆地或斜坡所包围,总 体上呈北西向延伸.在研究区斜坡与盆地深水环境 的西南方向,分布着北西向呈带状分布的开阔台地 以及与之相邻的古陆(图25). 开阔台地的岩性主要 为泥粒灰岩,在台地与斜坡过渡地带的局部地区如 重庆石柱、忠县等地发育着台缘浅滩.



图 23 川北一鄂西地区中二叠统层序 SQ3 硅质岩+硅质页岩厚度与地层厚度比值(F/S)分布

Fig. 23 Contour map of fine-grained sedimentary rocks (Bedded chert and Siliceous shale)/SQ3 ratios in Middle Permian in the northern Sichuan and western Hubei area

5 峨眉山地幔柱与中二叠世晚期岩 相古地理演化

中二叠世晚期层序SQ3沉积时期,也即孤峰组 沉积期,受到峨眉山地幔柱所驱动的东吴运动影 响,研究区台缘地区先后遭受构造裂陷和构造抬升 作用(图 26).具体来说,峨眉山地幔柱初始隆起时 间限定为约262.5 Ma,主要基于贵州熊家场剖面牙 形石的生物地层学证据(Wignall et al., 2009)和茅 口组灰岩顶部黏土岩锆石年龄(262.5 Ma±2.3 Ma; Yan et al, 2020)的年代地层学证据. 而峨眉山大火 成岩省主体玄武岩的喷发时间为260.7~258.8 Ma (Zhu et al., 2021),其中火山活动最强烈的时间小 于1 Ma(260.1~259.5 Ma; Li et al., 2017; Yang et al., 2018). 根据经典地幔柱模型,大规模火山喷发 之前,高温地幔柱上涌产生的巨大浮力会导致地壳 表层发生千米级的规模隆升(Campbell and Griffiths, 1990; Richards et al., 1989; 何斌等, 2006),导致地层的差异剥蚀、不整合面和同时期沉 积一构造格局的改变等.虽然目前关于峨眉山地幔 柱导致的地壳隆升规模仍存在着一定的争议,但普 遍认为峨眉山玄武岩喷发导致了大规模的地壳隆 起,峨眉山大火成岩省的内带区域存在千米级的地 表隆升,外带逐渐降幅到 100~400 m (He et al.,

2003;何斌等,2006;何冰辉等,2016;李宏博和朱 江,2013;孙自明等,2023).此外,峨眉山地幔柱持 续上涌导致位于隆起带边缘的四川盆地中北部地 区处于伸展拉张的构造环境,形成了巨大的构造裂 陷,从而造成该区域中晚二叠世一系列拉张槽的出 现,如茅口组沉积晚期地壳隆起导致川北地区较为 明显的沉积一构造差异形成广元一旺苍海槽并出 现开江-梁平海槽的雏形(王兴志等,2021).总体 来说,峨眉山地幔柱事件是导致川北一鄂西地区中 二叠世晚期发育深水斜坡-盆地环境形成的驱动 因素,从而控制着孤峰组富有机质硅质岩及硅质页 岩的大规模沉积.

6 页岩气勘探潜力

由上所述,层序SQ3沉积时期,川北一鄂西地 区深水斜坡一盆地环境发育了孤峰组富有机质硅 质岩及硅质页岩(TOC含量一般3.0%~10%)(图 26),平均厚度可达10m以上,为典型的异常高有机 质规模沉积富集(邱振等,2021).不仅在研究区,甚 至整个上扬子地区中上二叠统(孤峰组一吴家坪 组/龙潭组一大隆组)均发育了异常高有机质规模 沉积,可作为开展非常规油气沉积学研究的一个重 要层系(邱振和邹才能,2020;Qiu and Zou, 2020). 第2期



图 24 川北一鄂西地区中二叠世早期 SQ1(a)和 SQ2(b) 层序岩相古地理图

Fig. 24 Palaeogeographic map during the SQ1 (a)and SQ2 (b) in Middle Permian in the northern Sichuan and western Hubei area



图 25 川北一鄂西地区中二叠世晚期 SQ3 层序岩相古地理图

Fig. 25 Palaeogeographic map during the SQ3 in Middle Permian in the northern Sichuan and western Hubei area





Fig. 26 Sea level changes and geological events during the Middle Permian and TOC content distribution of the Kuhfeng Formation in the northern Sichuan and western Hubei area

地质年代据国际年代地层表(2023版)及文献(Shen et al., 2020;申博恒等, 2021);孤峰组 TOC 数据部分来自文献(吴勘, 2013; Shi et al., 2016;周志等, 2018;李浩涵等, 2020;付小东等, 2021;苏健辉, 2021;王登等, 2021;刘昇等, 2023; Jiang et al., 2023);峨眉山地幔柱活动相关年龄详见文中

受古地理隆凹格局的影响,川北一鄂西地区孤 峰组富有机质沉积的规模在区域上存在着显著的 差异性(图 22d).此外,研究区主要发育北东向和北 西向断裂,其中川东北主要发育万源和城口断裂, 鄂西地区主要发育建始一恩施断裂以及雾渡河断 裂.而在鄂西地区的恩施一鹤峰台褶带发育一系列 北东向的向斜与背斜,向西则过渡为川东高陡褶皱 带.因此,在岩相古地理分析的基础上,以构造单元 及孤峰组顶界埋深为约束,综合硅质岩及硅质页岩 有效厚度、有机质丰度的平面分布特征等因素,在 四川盆地东北部至湘鄂西地区初步预测孤峰组页 岩气勘探有利区5个(图27;表1).

有利区 I 位于川东高陡断褶带,古地理上属于 斜坡至盆地环境,面积约为5 330 km²,硅质岩及硅 质页岩有效厚度分布在 14~20 m,平均 TOC 含量 可达 10%,估算资源量为7 600×10⁸ m³,但已有的失 利钻井表明复杂断褶带的勘探难度,需进一步开展 有利区富集条件的精细刻画,明确页岩气资源的分 布规律(表1).有利区 II 位于石柱复向斜,古地理上 属于深水斜坡环境,面积约为3 260 km²,黑色硅质



图 27 川北一鄂西地区中二叠统孤峰组页岩气有利区分布图 Fig. 27 Distribution of favorable shale gas areas in Middle Permian Kuhfeng formation in the northern Sichuan and western Hubei area

岩与硅质页岩有效厚度为10~20m,平均TOC含量 约为6.0%,估算页岩气资源量为3900×10°m3,红 页茅1HF井的高产工业气流已经证实了有利区的 资源潜力.有利区III位于花果坪复向斜,古地理上 属于深水盆地区,面积为1350km²,黑色硅质岩及 硅质页岩厚度为10~32 m,平均 TOC 含量可达 8.0%,估算资源量约为2400亿方,鄂恩页2井的现 场解析气含量超过5m³/t揭示了该有利区的良好勘 探潜力.有利区 IV 同样位于花果坪复向斜,有利区 面积较小,约为740 km²,有效厚度为16~30 m,估 算页岩气资源量约为1200×10°m³.有利区V位于 桑植一石门复向斜,古地理上属于平缓的较深水斜 坡环境,面积约为1520km²,黑色硅质岩与硅质页 岩有效厚度为16~22 m,平均 TOC 含量可达10%, 估算资源量约为2400亿方,属于尚未突破的勘探 有利区.

综上所述,川北一鄂西地区孤峰组硅质岩与硅 质页岩层段 TOC 含量较高,且厚度分布相对稳定, 估算的总资源量可达1.75×10¹² m³(表1),是该区页 岩气勘探的重要潜力层段.从地质条件分析,鄂西 地区的石门一桑植复向斜、花果坪复向斜及石柱复 向斜构造环境稳定、保存条件良好,建议优先部署 风险井,以期率先获得勘探突破.虽然川北的断褶 带受构造条件影响勘探成功率较低,但孤峰组有机 质富集条件优越、生烃潜力巨大,在补充精细地质 评价后仍有望获得勘探突破.

此外,层序SQ1沉积时期是区域性快速海侵时期(图26),在川北一鄂西地区局限台地中形成含泥

较多的瘤状灰岩.从更长周期的层序(如二级层序) 角度来看,层序SQ1对应于中二叠世最大规模的海 侵,形成了具有特色的瘤状灰岩以及菊花状天青石 结核的沉积特征,快速海侵形成的富有机质沉积也 是茅一段能够形成非常规天然气富集的重要前提.

7 结论

通过对川北一西地区中二叠统地层开展沉积 相识别与层序地层对比划分,探讨了不同层序岩相 古地理演化,明确了该区孤峰组富有机质层段的分 布规律与页岩气资源潜力.取得主要认识如下:

(1)川北一鄂西地区中二叠统可划分为3个三级层序SQ1、SQ2和SQ3.第一个层序SQ1属于茅口组下段地层,沉积于罗德期至沃德中晚期,该时期主要发育碳酸盐局限台地,内部零星分布台内浅滩和局限潟湖.层序SQ2属于茅口组上段地层,沉积于沃德晚期至卡匹敦早中期,该时期主要发育碳酸盐开阔台地,内部分布较为大型的台内浅滩,台地边缘形成多个台缘礁或浅滩.层序SQ3沉积时期,研究区在碳酸盐岩台地(对应层序SQ1和SQ2)基础上发育了3个北西向展布的深水盆地,即鄂西盆地、开江-梁平台盆(海槽)和广旺台盆(海槽).

(2)层序 SQ3属于孤峰组地层,沉积于卡匹敦 晚期,发育富有机质硅质岩与硅质页岩层段,平均 TOC含量为3%~10%,且厚度分布相对稳定.峨 眉山地幔柱事件是导致川北一鄂西地区中二叠世 晚期发育深水斜坡-盆地环境形成的驱动因素,从 表1 川北一鄂西地区中二叠统孤峰组页岩气有利区估算资源量

Table 1 Resource assessment for favorable shale gas areas of the Middle Permian Kuhfeng Formation in the northern Sichuan and western Hubei area

有利区	构造单元	埋深(m)	厚度(m)	面积(km ²)	估算资源量(×10 ⁸ m ³)
Ι	川东断褶带	>1 000	14~20	5 330	7 600
II	石柱复向斜	>1 000	10~20	3 260	3 900
III	花果坪复向斜	>1 000	10~32	1 350	2 400
IV	花果坪复向斜	>1 000	$16 \sim 30$	740	1 200
V	桑植一石门复向斜	>1 000	$16 \sim 22$	1 520	2 400
	合计			12 200	17 500

而控制着孤峰组富有机质硅质岩及硅质页岩的大 规模沉积.

(3)在层序岩相古地理分析基础上,综合孤峰 组富有机质硅质岩及硅质页岩有效厚度、TOC含 量、构造保存条件等页岩气地质评价要素,在川东 北至湘鄂西地区优选出5个有利区,面积约为1.2× 10⁴km²,估算总资源量约1.75×10¹²m³,展示了良好 勘探开发潜力.其中鄂西地区的石门一桑植复向 斜、花果坪复向斜及石柱复向斜构造环境稳定、保 存条件良好,建议优先部署风险井,以期率先获得 勘探突破.

References

- Blendinger, W., 1985. Radiolarian Limestones Interfingering with Loferites (Triassic, Dolomites, Italy). Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontolgie-Monatshefte, 4: 193-202. https://doi.org/10.1127/njgpm/1985/1985/193
- Campbell, I. H., Griffiths, R. W., 1990. Implications of Mantle Plume Structure for the Evolution of Flood Basalts. *Earth* and Planetary Science Letters, 99: 79-93. https://doi.org/ 10.1016/0012-821X(90)90072-6
- Cao, C. Q., Zhang, M. Y., Zheng, Q. F., et al., 2013. The Permian Capitanian Stratigraphy at The Rencunping Section, Sangzhi County of Hunan and Its Environmental Implications. *Journal of Stratigraphy*, 37(4): 485-498(in Chinese with English abstract).
- Chen, W. Y., Liu, J. R., Wang, Z. G, et al., 2003. Study on Lithofacies Palaeogeography during the Permian Emeishan Basalt Explosion in Guizhou Province. *Journal of Palaeogeography*, 5(1): 17-28(in Chinese with English abstract).
- Conti, M. A., Monari, S., 1992. Thin-Shelled bivalves from the Jurassic Rosso Ammonitico and Calcari a Posidonia Formations from the Umbrian-Marechean Apennine (Central Italy). *Palaeopelagos*, 2: 193-213.
- Crombez, V., Baudin, F., Rohais, S., et al., 2017. Basin Scale

Distribution of Organic Matter in Marine Fine-Grained Sedimentary Rocks: Insight from Sequence Stratigraphy and Multi-Proxies Analysis in the Montney and Doig Formations. *Marine and Petroleum Geology*, 83: 382– 401. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.10.013

- Du, X. D., Huang, Z. C., Chen, Z. N., et al., 1999. Division and Correlation of the Permian Sequencein Lower Yangtze Region. *Journal of Stratigraphy*, 23(2): 152-161(in Chinese with English abstract).
- EIA, 2023. Drilling Productivity Repot: For Key Tight Oil and Shale Gas Regions. EIA Independent Statistics & Analysis, Washington, U.S.A.
- Fang, Q., Wu, H. C., Hinnov, L. A., et al., 2017. Astronomical Cycles of Middle Permian Maokou Formation in South China and Their Implications for Sequence Stratigraphy and Paleoclimate. *Palaeogeography*, *Palaeoclimatology*, *Palaeoecolog*, 474: 130–139. https://doi.org/ 10.1016/j.palaeo.2016.07.037
- Feng, Z. Z., He, Y. B., Wu, S. H., 1993. Listhofacies Paleogeograpphy of Permian Middle and Lower Yangtze Region. Acta Sedimentological Sinica, 11(3): 13-24 (in Chinese with English abstract).
- Flügel, E., 2004. Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application (Second Edition). Springer Science & Business Media, 1–984.
- Fu, X. D., Chen, Y. N., Luo, B., et al., 2021. Characteristics and Petroleum Geological Significance of the High-Quality Source Rocks in the Gufeng Member of the Middle Permian Maokou Formation in the Northern Sichuan Basin. Acta Geological Sinica, 95(6): 1903–1920 (in Chinese with English abstract).
- Geng, Z. A., Wei, H. Y., 2019. Organic Geochemistry of Organic-Rich Cherts in the Middle Permian Gufeng Formation in Chaohu, Lower Yangtze Area. *Geological Journal of China Universities*, 25(6): 823-837(in Chinese with English abstract).

Hanor, J. S., 2004. A Model for the Origin of Large Carbonate

- and Evaporate-Hosted Celestine (Srso4) Deposits. Journal of Sedimentary Research, 74: 168-175. https://doi.org/ 10.1306/092203740168

- He, B. H., Liu, H., Li, L., 2016. The Emeishan Large Igneous Province and the Permian Extinction Event. Acta Geologica Sichuan, 36(4): 553-557(in Chinese with English abstract).
- He, B., Xu, Y. G., Chung, S. L., 2003. Sedimentary Evidence for a Rapid, Kilometer-Scale Crustal Doming Prior to the Eruption of the Emeishan Flood Basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 213(3-4): 391-405.https:// doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00323-6
- He, B., Xu, Y. G., Wang, Y. M., et al., 2006. Sedimentation and Lithofacies Paleogeography in Southwestern China Before and After the Emeishan Flood Volcanism: New Insights into Surface Response to Mantle Plume Activity. *Journal of Geology*, 114(1): 117-132. https://doi.org/ 10.1086/498103
- He, B., Xu, Y. G., Xiao, L., et al., 2006. Sedimentary Responses to Uplift of Emeishan Mantle Plume and Its Implications. *Geological Review*, 52(1): 30-37 (in Chinese with English abstract).
- Hu, D. F., Wei, Z. H., Wang, W., et al., 2023. Breakthrough of Shale Gas Exploration in Dalong Formation of Upper Permian by Well Leiye 1 in the Northeastern Sichuan Basin and Its Implications. *Natural Gas Industry*, 43(11): 28–39 (in Chinese with English abstract).
- Hu, D. G., Zhou, L., Bao, H. Y., et al., 2023. Breakthrough and Significance of Permian Shale Gas Exploration of Well HY1 in Hongxing Area, Eastern Sichuan Basin. Acta Petrolei Sinica, 44(2): 241-252 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, S. L, Zhou, Q. C., Li, Y. J., 2023. Fracability Evaluation of the Middle-Upper Permian Marine Shale Reservoir in Well HD1, Western Hubei Area. *Scientific Reports*, 13 (1): 14319. https://doi.org/10.1038/s41598-023-40735-z
- Jiang, T. X., Bian, X. B., Sun, C. X., et al, 2023. Key Technologies in Geology - Engineering ntegration Volumetric Fracturing for Deep Shale Gas Wells. *Earth Science*, 48(1): 1-13(in Chinese with English abstract).
- Jiang, Z.X., Liang, Z. K., Shen, Y. H., et al, 2023. Coupling Key Factors of Shale Gas Sweet Spot and Research Direction of Geology - EngineeringIntegration in Southern Sichuan. *Earth Science*, 48(1): 110-129 (in Chinese with English abstract).
- Kuang, L. C., Zhi, D. M., Wang, X. J., et al., 2021. Oil and Gas Accumulation Assemblages in Deep to Ultra-Deep Formations and Exploration Targets of Petroliferous Basins

in Xinjiang Region. *China Petroleum Exploration*, 26(04): 1-16 (in Chinese with English abstract).

- Li, F. J., Chen, R. L., 2008. Study on the Middle-Lower Permian Sequence Stratigraphy in Northeastern Area, the Sichuan Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 30(5): 472-477(in Chinese with English abstract).
- Li, F., Liu, Z. J., Chen, F. R., et al., 2023. Origin of Siliceous Mudstone in Permian Dalong Formation and Its Influence on Compressibility, Northeastern Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 34(2): 349-358 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. B., Zhu, J., 2013. Contact Between the Emeishan Basalt and Maokou Formation: Implication for the Geodynamic Model of the Emeishan Mantle Plume. *Geotectonica et Metallogenia*, 37(4): 571-579 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. H., Du, J., Chen, K., et al., 2006. Discovery of Permian Shale Gas in Wufeng Area, Hubei Province. *Geology in China*, 47(6): 1932-1933 (in Chinese).
- Li, M. L., Tan, X. C., Yang, Y., et al., 2022. Sequence-Lithofacies Paleogeographic Characteristics and Petroleum Geological Significance of Lower Permian Qixia Stage in Sichuan Basin and Its Adjacent Areas, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 49(6): 1119-1131(in Chinese with English abstract).
- Li, Q., Xu, S. L., Chen, H. D., et al., 2018. Geochemical Characteristics and Palaeo-Environmental Implication of middle Permian Maokou Formation in wangcang Region, Sichuan Basin, China. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 45(3): 268– 281(in Chinese with English abstract).
- Li, Y. J., He, H. Y., Ivanov, A. V., 2017. 40Ar/39Ar Age of the Onset of High-Ti Phase of the Emeishan Volcanism Strengthens the Link with the End-Guadalupian Mass Extinction. *International Geology Review*, 60: 1906– 1917. https://doi.org/10.1080/00206814.2017.1405748
- Liu, S., Fan, C. H., Zhang, B. J., et al., 2023. Distribution characteristics of Gufeng Member of the Middle Permian Maokou Formation, eastern Sichuan Basin and Its petrogeological significance. *Oil & Gas Geology*, 44 (4): 993– 1008 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. H., 1986. The Age, Stratigraphic Name and Sedimentary Environment of Cherts Covering Maokou Limestone in Shimen and Li County, Hunan Province. *Journal* of Xiangtan Mining Institute, 1: 19-22(in Chinese).
- Luo, X. M., Xu, G. R., Chen, L. Z., et al., 1997. Sedimentary Characteristics of the Wuxue Formation in the Susong-Fanchang Region, Anhui. *Sedimentary Facies and Pal*-

aeogeography, 17(4): 20-30(in Chinese with English abstract).

- Luo, Z. L., 1989. Determination and Significance of the Emei Taphrogenesis. *Acta Geologica Sichuan*, 9(1): 1-17(in Chinese).
- Ma, Y. S., Chen, H. D., 2023. Atlas of Marine Carbonate Oil and Gas Geology in Large Basin of Western China. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Ma, Y. S., Mou, C. L., Tan, Q. Y., et al., 2006. A Discussion on Kaijiang-Liangping Ocean Trough. Oil & Gas Geology, 27(3): 326-331(in Chinese with English abstract).
- Mei, S. L., Zhu, Z. L., Shi, X. Y., et al., 1999. Sequence Stratigraphy of Permian Lopingian Strata in Central Guangxi. *Geoscience*, 13(1): 11-18(in Chinese with English abstract).
- Peng, J. Y., Du, C. J., Li, L. L., et al., 2023. Lithofacies Palaeogeography of Middle Permian in the Sichuan Basin and its Petroleum Geological Significance. *Petroleum Geology & Experiment*, 45(01): 49-59 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, W. T., Gu, H. X., 1991. Sedimentary Environments of the Chert (Siliceous Rocks) from the Lower Permian Gufeng Formation in Northeastern Sichuan. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 6: 1-8(in Chinese with English abstract).
- Qiu, Z., Wang, Q. C., 2011. Geochemical Evidence for Submarine Hydrothermal Origin of The Middle-Upper Permian Chert in Laibin of Guangxi, China. Science China Earth Sciences, 54(7): 1011-1023. https://doi.org/10.1007/ s11430-011-4198-x
- Qiu, Z., Wang, Q. C., Yan, D. T., 2011. Geochemistry and Sedimentary Background of the Middle-Upper Permian Cherts in the Penglaitan Section, Laibin, Guangxi Province. Acta Petrologica Sinica, 27(10): 3141-3155 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, Z., Zou, C. 2020. Unconventional Petroleum Sedimentology: Connotation and Prospect. *Acta Sedimentologica Sinica*, 38(1): 1-29(in Chinese with English abstract).
- Qiu, Z., Zou, C. 2020. Controlling Factors on the Formation and Distribution of "Sweet-Spot Areas" of Marine Gas Shales in South China and a Preliminary Discussion on Unconventional Petroleum Sedimentology. *Journal of Asian Earth Sciences*, 194: 103989.
- Qiu, Z., Wei, H. Y., Liu, H. L., et al., 2021. Accumulation of Sediments with Extraordinary High Organic Matter Content: Insight Gained Through Geochemical Characterization of Indicative Elements. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(04): 931-948 (in Chinese with English abstract).

- Qiu Z., Tao H. F., Lu B., et al, 2021. Controlling Factors on Organic Matter Accumulation of Marine Gas Shale across the Ordovician-Silurian Transition in South China: Constraints from Trace-Element Geochemistry. *Journal of Earth Science*, 32(4): 887-900.
- Racki, G., Cordey, F., 2000. Radiolarian Palaeoecology and Radiolarites: Is the Present the Key to the Past? *Earth-Science Reviews*, 52(1-3): 83-120. https://doi.org/ 10.1016/s0012-8252(00)00024-6
- Richards, M. A., Duncan, R. A., Courtillot, V. E., 1989. Flood Basalts and Hot-Spot Tracks: Plume Heads and Tails. Science, 246(4926), 103-107.
- Ross, C. A., Ross, J. R. P., 1987. Late Paleozoic Sea Levels and Depositional Sequences. Cushman Foundation for Foraminiferal Research, Special Publication, 24: 137-149.
- Sanz-Montero., M. E., Rodríguez-Aranda, J. P., García del Cura, M. A., 2009. Bioinduced Precipitation of Barite and Celestite in Dolomite Microbialites: Examples from Miocene Lacustrine Sequences in the Madrid and Duero Basins, Spain. Sedimentary Geology, 222: 138-148. https: //doi.org/10.1016/j.sedgeo.2009.05.009
- Shen, B. H., Shen, S. Z., Hou, Z. S., et al., 2021. Lithostratigraphic Subdivision and Correlation of the Permian in China. *Journal of Stratigraphy*, 45(3): 319-339 (in Chinese with English abstract).
- Shen, S. Z., Wang, Y., Henderson, C. M., et al., 2007. Biostratigraphy and Lithofacies of the Permian System in the Laibin-Heshan Area of Guangxi, South China. *Pala-eoworld*, 16(1-3): 120-139. https://doi.org/10.1016/j. palwor.2007.05.005
- Shen, S. Z., Yuan, D. X., Henderson, C. M., et al., 2020. Progress, Problems and Prospects: An Overview of the Guadalupian Series of South China and North America. *Earth-Science Reviews*, 211: 103412. https://doi.org/ 10.1016/j.earscirev.2020.103412
- Shen, S. Z., Zhang, H., Zhang, Y. C., 2019. Permian Integrative Stratigraphy and Timescale of China. *Science China Earth Sciences*, 62: 154–188. https://doi.org/10.1007/ s11430-017-9228-4
- Shen, S. Z., Zhang, H., Zhang, Y. C., et al., 2019. Permian Integrative Stratigraphy and Timescale of China. Science China Earth Sciences, 62: 154–188. https://doi.org/ 10.1007/s11430-017-9228-4
- Shi, L., Feng, Q. L, Shen, J., et al., 2016. Proliferation of Shallow - Water Radiolarians Coinciding with Enhanced Oceanic Productivity in Reducing Conditions during the Middle Permian, South China: Evidence from the Gufeng

Formation of Western Hubei Province. *Palaeogeography*, *Palaeoclimatology*, *Palaeoecology*, 444: 1–14. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.11.031

- Shi, W. Z., Zhai, G. Y., Du, X. B., et al., 2023. Atlas of Evaluation of Marine Shale Gas Selection Areas in Southern China. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Slatt, R. M., Rodriguez, N. D., 2012. Comparative Sequence Stratigraphy and Organic Geochemistry of Gas Shales: Commonality or Coincidence? *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 8: 68–84. https://doi.org/ 10.1016/j.jngse.2012.01.008
- Sloss, L. L., Krumbein, W. C., Dapples, E.C., 1949. Integrated Facies Analysis. In: Longwell, C.R. (Ed.), Sedimentary Facies in Geologic History, 39. Geological Society of America Memoir, 91–124. https://doi.org/10.1130/ MEM39-p91
- Su, J. H., 2021. Geochemical Characteristics and Paleo-Ocean Environment of Upper Permian Black Shale in Western Hunan-Hubei(Dissertation). China University of Petroleum, Beijing(in Chinese with English abstract).
- Sun, Z. M., Bian, C. R., Liu, G. X., 2023. Advances on the Understanding in the Emeishan Mantle Plume and Dynamic Mechanism of the Permian Sichuan Basin Formation. *Geoscience*, 37(5): 1089-1099 (in Chinese with English abstract).
- Taberner, C., Marshall, J. D., Hendry, J. P., et al., 2002.
 Celestite Formation, Bacterial Sulphate Reduction and Carbonate Cementation of Eocene Reefs and Basinal Sediments (Igualada, NE Spain). Sedimentology, 49: 171-190. https://doi.org/10.1046/j.1365-3091. 2002. 00437.x
- Wang, D., Leng, S. L., Chen, W., et al., 2021. Geological Conditions and Prospecting Area Delineation of Gufeng Formation Shale Gas in the Jingshan Area, Hubei Province. South China Geology, 37(2): 193-204 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. T., Xu, J. L., Shen, S. H., et al., 2022. Sedimentary Facies of the Middle Permian Gufeng Formation in the Region along the Yangtze River, Anhui Province. Acta Geologica Sichuan, 42(2): 187-193(in Chinese with English abstract).
- Wang, L. T., Lu, Y. B., Zhao, S. J., et al., 1994. The Editorial Broad for Collected Works of Lithofacies and Palaeogeography of South China. Geology Press, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Wang, M. F., Wen, H., Ni, K., et al., 2023. Geological Conditions and Exploration Potential of Shale Gas in

Dalong Formation in Northern Sichuan Basin. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 45(1): 13-23 (in Chinese with English abstract).

- Wang, Q. Y., 2014. The Maokou Formation Conodont and Its Biostratigraphy of the Middle Permian in West of Sichuan Basin(Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. X., Li, B., Yang, X. Y., et al., 2021. Characteristics of "Guangyuan-Wangcang" trough during Late Middle Permian and Its Petroleum Geological Significance in Northern Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 48(3): 562-574 (in Chinese with English abstract).
- Wei, G. Q., Chen, G. S., Yang, W., et al., 2006. Preliminary Study of The Boundary of Kaijiang-Liangping Trough in Northern Sichuan Basin and Its Characteristics. *Oil & Gas Geology*, 27(1): 99–105(in Chinese with English abstract).
- Wei, H. Y., Baima, Q. Z., Qiu, Z., et al., 2018. Carbon Isotope Perturbations and Faunal Changeovers During the Guadalupian Mass Extinction in the Middle Yangtze Platform, South China. *Geological Magazine*, 155(8): 1667–1683. https://doi.org/10.1017/S0016756817000462
- Wei, H. Y., Tang, Z. W., Yan, D. T., et al., 2019. Guadalupian (Middle Permian) Ocean Redox Evolution in South China and Its Implications for Mass Extinction. *Chemical Geology*, 530: 119318. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.119318
- Wei, H. Y., Wei, X. M., Qiu, Z., et al., 2016. Redox Conditions Across the G-L Boundary in South China: Evidence from Pyrite Morphology and Sulfur Isotopic Compositions. *Chemical Geology*, 440: 1–14. https://doi.org/10.1016/ j.chemgeo.2016.07.009
- Wei, X. M., Jiang, Z. G., Baima, Q. Z., et al., 2016. The Habitat Type and Is Sgnificance of Guadalupian-Lopingian (G-L) Bundary in Penglaitan Sction, Guangxi. *Journal of East China University of Technology(Natural Science)*, 39 (4): 331-340(in Chinese with English abstract).
- Wignall, P. B., Sun, Y., Bond, D. P., et al., 2009. Volcanism, mass extinction, and carbon isotope fluctuations in the Middle Permian of China. *Science*, 324: 1179–1182. https://doi.org/10.1126/science.1171956
- Wu, K., 2013. Geobiological Composition and Geological Characters of Shale Gas from the Middle Permian Gufeng Formation in the North Margin of Yangtze(Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan(in Chinese with English abstract).
- Xu, T., Wei, H. Y., Zhang, X., et al., 2020. Genesis of Hydrothermal Replaced Cherts in the Middle Permian

Maokou Formation: Evidences from Elements and Silicon Isotopes of Brecciated Cherts Insangshuwan Section, Guizhou Province. *Acta Petrolei Sinica*, 41: 446-456(in Chinese with English abstract).

- Yan, H., Pi, D. H., Jiang, S. Y., et al., 2020. New Constraints on the Onset Age of the Emeishan LIP Volcanism and Implications for the Guadalupian Mass Extinction. *Lithos*, 360: 105441. https://doi.org/10.1016/j. lithos.2020.105441
- Yan, J. X., Shi, C. H., Li, J. H., et al., 2001. Replacement of Chrysanthemum-Shaped Celestite in the Chihsia Formation of South China and Its Geological Implications. Acta Petrologica et Mineralogica, 20(1): 66-75(in Chinese with English abstract).
- Yang, J. H., Cawood, P. A., Du, Y. S., et al., 2018. Early Wuchiapingian Cooling Linked to Emeishan Basaltic Weathering? *Earth and Planetary Science Letters*, 492: 102-111. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.04.004
- Yang, Y., Wang, H., Xie, J. R., et al., 2023. Exploration Breakthrough and Prospect of Permian Marine Shale Gas in the Kaijiang-Liangping Trough, Sichuan Basin. *Natrual Gas Industry*, 43(11): 19-27 (in Chinese with English abstract).
- Yao, L. B., Gao, Z. M., Yang, Z. S., et al., 2002. Origin of Seleniferous Cherts in Yutangba Se Deposit, Southwest Enshi, Hubei Province. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 45(8): 741-754. https://doi. org/10.1007/ BF02878431
- Yao, S. P., Wu, Y. Y., Yu, W. D., et al., 2022. Outcrop Characteristic and Lithofacies Changes of Both Gufeng and Dalong Formations in Lower Yangtze Region. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 12(1): 215-232 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, B. L., Yao, S. P., Ma, A. L., et al., 2022. New Geochemical Constraints on the Development of Active Continental Margin in Southeast China During the Middle Permian and Its Tectonic Implications. *Gondwana Research*, 103: 458-472. https://doi. org/10.1016/j. gr.2021.11.001
- Zhang, B., Yao, S., Mills, B.J.W., et al., 2020. Middle Permian Organic Carbon Isotope Stratigraphy and the Origin of the Kamura Event. *Gondwana Research*, 79: 217-232. https://doi.org/10.1016/j.gr.2019.09.013
- Zhang, K. X., Liu, J. H., He, W. H., et al., 2022. Research on Outcrop Sequence Stratigraphy of Permian in the Middle-Lower Yangtze Region. *Earth Science*, 27(4): 357-366 (in Chinese with English abstract).

Zhang, K. Z., Wang, Y. S., Yang., Y. L, et al., 2019.

Characteristics of the Dolomite in Permian Maokou Formationin Puguang Area, Northeastern Sichuan Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 24(1): 20-26 (in Chinese with English abstract).

- Zhao, J. X., Li, F. J., Liu, Q., et al., 2008. Analysis on Permian Sedimentary Facies and Its Lithofacies Palaeogeographic Evolution, Northeast Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 19(4): 444-451 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Z., Bao, S. J., Chen, K., et al., 2018. Shale Gas Obtained in Permian strata by Well EJY 1 in Jianshi Area, Hubei province. *Geology in China*, 45(6): 1304-1305 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, J., Zhang, Z. C, Santosh, M., et al., 2021. Submarine Basaltic Eruptions Across the Guadalupian - Lopingian Transition in the Emeishan Large Igneous Province: Implication for End-Guadalupian Extinction of Marine Biota. *Gondwana Research*, 92: 228–238. https://doi.org/ 10.1016/j.gr.2020.12.025
- Zhuo, J. W., Wang, J., Wang, Z. J., et al., 2009. Sedimentary Characteristics of Late Permian in Western Hubei Province and Evolution of Inter-Platform Rift. *Xinjiang Petroleum Geology*, 30(3): 300-303 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Yang, Z., Dong, D. Z., et al, 2022. Formation, Distribution and Prospect of Unconventional Hydrocarbons in Source Rock Strata in China. *Earth Science*, 47(5): 1517-1533(in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Yang, Z., Zhang, G. S., et al, 2023. Theory, Technology and Practice of Unconventional Petroleum Geology. *Earth Science*, 48(6): 2376-2397(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹长群,章明圆,郑全锋,等,2013.湖南桑植仁村坪二叠纪 Capitanian 期沉积地层及环境.地层学杂志,37(4): 485-498.
- 陈文一, 刘家仁, 王中刚, 等, 2003. 贵州峨眉山玄武岩喷发期 的岩相古地理研究. 古地理学报, 5(1): 17-28.
- 杜小弟,黄志诚,陈智娜,等,1999.下扬子区二叠系层序地层 格架.地层学杂志,23(2):152-161.
- 冯增昭,何幼斌,吴胜和,1993.中下扬子地区二叠纪岩相古 地理.沉积学报,11(03):13-24.
- 付小东,陈娅娜,罗冰,等,2021.四川盆地北部中二叠统茅口 组孤峰段优质烃源岩特征及其油气地质意义.地质学报, 95(6):1903-1920.
- 耿梓傲,韦恒叶,2019.下扬子巢湖地区中二叠统孤峰组富有 机质硅质岩有机地球化学特征.高校地质学报,25(6):

747

823-837.

- 何斌,徐义刚,肖龙,等,2006.峨眉山地幔柱上升的沉积响应 及其地质意义.地质论评,52(1):30-37.
- 何冰辉, 刘瀚, 李雷, 2016. 峨眉山大火成岩省与二叠纪生物 灭绝事件. 四川地质学报, 36(4):553-557.
- 胡德高,周林,包汉勇,等,2023. 川东红星地区 HY1 井二叠 系页岩气勘探突破及意义. 石油学报,44(2):241-252.
- 胡东风,魏志红,王威,等,2023.四川盆地东北部雷页1井上 二叠统大隆组页岩气勘探突破及其启示.天然气工业, 43(11):28-39.
- 蒋廷学,卞晓冰,孙川翔,等,2023. 深层页岩气地质工程一体化 体积压裂关键技术及应用. 地球科学,48(1):1-13.
- 姜振学,梁志凯,申颍浩,等,2023. 川南泸州地区页岩气甜点地 质工程一体化关键要素耦合关系及攻关方向. 地球科学, 48(1):110-129.
- 匡立春,支东明,王小军,等,2021.新疆地区含油气盆地深层 一超深层成藏组合与勘探方向.中国石油勘探,26(4): 1-16.
- 李飞,刘珠江,陈斐然,等,2023. 川东北地区二叠系大隆组泥 岩硅质成因及对可压性影响. 天然气地球科学,34(2): 349-358.
- 李凤杰,陈荣林,2008.四川盆地东北地区中一下二叠统层序 地层特征研究.石油实验地质,30(5):472-477.
- 李浩涵, 杜江, 陈科, 等, 2020. 湖北五峰地区发现二叠系页岩 气. 中国地质, 47(6): 1932-1933.
- 李宏博,朱江,2013. 峨眉山玄武岩与茅口组灰岩的接触关系: 对峨眉山地幔柱动力学模型的指示意义.大地构造与成 矿学,37(4):571-579.
- 李明隆, 谭秀成, 杨雨, 等, 2022. 四川盆地及其邻区下二叠统 栖霞阶层序一岩相古地理特征及油气地质意义. 石油勘 探与开发, 49(6): 1119-1131.
- 李乾,徐胜林,陈洪德,等,2018. 川北旺苍地区茅口组地球化 学特征及古环境记录. 成都理工大学学报(自然科学版), 45(3):268-281.
- 刘昇,范存辉,张本健,等,2023.四川盆地东部中二叠统茅口 组孤峰段展布特征及其油气地质意义.石油与天然气地 质,44(4):993-1008.
- 柳祖汉,1986.湖南石门澧县一带茅口灰岩上覆硅质岩层的时 代、地层名称和沉积环境.湘潭矿业学院学报,1:19-22.
- 罗新民,徐桂荣,陈林洲,等,1997.安徽宿松、繁昌地区武穴 组沉积特征.岩相古地理,17(4):20-30.
- 罗志立,1989. 峨眉地裂运动的厘定及其意义. 四川地质学报, 9(1):1-17.
- 马永生,陈洪德,等,2023.中国西部盆地大型盆地海相碳酸 盐岩油气地质图集.北京:科学出版社.
- 马永生, 牟传龙, 谭钦银, 等, 2006. 关于开江—梁平海槽的认 识. 石油与天然气地质, 27(3): 326-331.

梅仕龙,朱自力,史晓颖,等,1999.广西中部二叠系乐平统层

序地层研究.现代地质,13(1):11-18.

- 彭金宁,杜崇娇,李龙龙,等,2023.四川盆地中二叠世岩相古 地理及其油气地质意义.石油实验地质,45(1):49-59.
- 邱威挺,古鸿信,1991. 试论川东北地区下二叠统孤峰组燧石 (硅质岩)的沉积环境. 岩相古地理,6:1-8.
- 邱振,王清晨,严德天,2011.广西来宾蓬莱滩剖面中上二叠 统硅质岩的地球化学特征及沉积背景.岩石学报,27(10): 3141-3155.
- 邱振,王清晨,2011. 广西来宾中上二叠统硅质岩海底热液成 因的地球化学证据. 中国科学:地球科学,41(5):725-737.
- 邱振,邹才能.2020.非常规油气沉积学:内涵与展望.沉积学 报,38(1):1-29.
- 邱振, 韦恒叶, 刘翰林, 等, 2021. 异常高有机质沉积富集过程 与元素地球化学特征. 石油与天然气地质, 42(4): 931-948.
- 申博恒, 沈树忠, 侯章帅, 2021. 中国二叠纪岩石地层划分和 对比. 地层学杂志, 45(3): 319-339.
- 沈树忠,张华,张以春,等,2019.中国二叠纪综合地层和时间 框架.中国科学:地球科学,49(1):160-193.
- 石万忠, 翟刚毅, 杜学斌, 等, 2023. 中国南方海相页岩气选区 评价图集. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 苏健辉,2021.湘鄂西上二叠统黑色页岩的地球化学特征与古 海洋环境(硕士毕业论文).北京:中国石油大学.
- 孙自明, 卞昌蓉, 刘光祥, 2023. 峨眉山地幔柱主要研究进展 及四川盆地二叠纪成盆动力学机制. 现代地质, 37(5): 1089-1099.
- 王登, 冷双梁, 陈威, 等, 2021. 湖北京山地区孤峰组页岩气地 质条件及远景区划分. 华南地质, 37 (2): 193-204.
- 王婧雅,2014. 川西地区二叠统茅口组牙形石及其生物地层(硕 士学位论文). 北京:中国地质大学.
- 王俊涛,徐锦龙,沈仕豪,等,2022.安徽沿江地区中二叠统孤 峰组沉积相分析.四川地质学报,42(2):187-193.
- 王立亭,陆彦帮,赵时久,等,1994.中国南方二叠纪岩相古地 理与成矿作用.北京:地质出版社.
- 王明筏,文虎,倪楷,等,2023.四川盆地北部大隆组页岩气地 质条件及勘探潜力.西南石油大学学报(自然科学版),45 (1):13-23.
- 王兴志,李博,杨西燕,等,2021.四川盆地北部中二叠世晚期 "广元一旺苍"海槽特征及其油气地质意义.石油勘探与 开发,48(3):562-574.
- 韦雪梅,江增光,白玛曲宗,等,2016.广西来宾蓬莱滩剖面瓜 德鲁普统一乐平统(G-L)界线生境型及其意义.东华理工 大学学报(自然科学版),39(4):331-340.
- 魏国齐,陈更生,杨威,等,2006.四川盆地北部开江-梁平海 槽边界及特征初探.石油与天然气地质,27(1):99-105.
- 吴勘,2013.扬子北缘中二叠统孤峰组地球生物学构成及页岩 气地质特征(博士学位论文).武汉:中国地质大学.
- 许涛, 韦恒叶, 张璇, 等, 2020. 中二叠统茅口组热液交代硅质 岩成因——来自贵州桑树湾剖面角砾状硅质岩元素及硅

同位素的证据.石油学报,41:446-456.

- 颜佳新,施春花,李军虹,等,2001.华南地区栖霞组菊花状天 青石的交代及其地质意义.岩石矿物学杂志,20(1):66-75.
- 杨雨, 汪华, 谢继容, 等, 2023. 页岩气勘探新领域: 四川盆地 开江-梁平海槽二叠系海相页岩气勘探突破及展望. 天 然气工业, 43(11): 19-27.
- 姚素平,吴聿元,余文端,等,2022.下扬子区孤峰组一大隆组 露头剖面特征与岩相变化.油气藏评价与开发,12(1): 215-232.
- 张克信,刘金华,何卫红,等,2002.中下扬子区二叠系露头层 序地层研究.地球科学,27(4):357-366.
- 张坤贞, 王舒, 杨永灵, 等, 2019. 川东北普光地区茅口组白云

岩发育特征.海相油气地质,24(1):20-26.

- 赵俊兴,李凤杰,刘琪,等,2008.四川盆地东北部二叠系沉积 相及其演化分析.天然气地球科学,19(4):444-451.
- 周志,包书景,陈科,等,2018.湖北建始地区二叠系鄂建业1 井钻获页岩气.中国地质,45(6):1304-1305.
- 卓皆文,王剑,汪正江,等,2009.鄂西地区晚二叠世沉积特征 与台内裂陷槽的演化.新疆石油地质,30(3):300-303.
- 邹才能,杨智,董大忠,等,2022.非常规源岩层系油气形成分布 与前景展望.地球科学,47(5):1517-1533.
- 邹才能,杨智,张国生,等,2023.非常规油气地质学理论技术及 实践.地球科学,48(6):2376-2397.