

文章编号: 1000-0747(2022)05-0847-12

DOI: 10.11698/PED.20220133

用超级盆地思维挖掘四川盆地油气资源潜力的探讨

汪泽成¹, 施亦做¹, 文龙², 姜华¹, 江青春¹, 黄士鹏¹,
谢武仁¹, 黎荣¹, 金惠¹, 张志杰¹, 严增民¹

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油西南油气田分公司, 成都 610051)

基金项目: 国家科技重大专项“下古生界—前寒武系碳酸盐岩油气成藏规律、关键技术及目标评价”(2016ZX05004-001);
中国石油天然气集团有限公司科技项目“陆相深层超深层油气富集规律与勘探评价技术研究”(2021DJ02)

摘要: 基于超级盆地思维及油公司资源战略, 分析四川盆地含油气系统和剩余油气资源分布, 最大限度地挖掘四川盆地油气资源潜力, 探索该盆地的超级盆地发展模式。研究表明: ①四川盆地在陆内裂谷—海相克拉通—前陆盆地3阶段演化背景下, 形成了以天然气为主的复合含油气系统, 具备构成超级盆地的资源条件。盆地超深层存在南华纪裂谷潜在含气系统; 震旦系—中三叠统发育海相克拉通含气系统, 以常规天然气和页岩气为主; 上三叠统一侏罗系发育前陆盆地致密砂岩气和页岩油; 每套油气系统内常规和非常规油气资源的分布规律各不相同。②发展完善深层—超深层碳酸盐岩常规气、致密砂岩气、页岩油等领域先进实用勘探技术, 是支撑规模勘探开发的必要条件。③分层次制定勘探战略, 争取政府扶持与政策支持力度, 探索合作发展新模式, 有助于最大限度挖掘四川盆地油气资源。引入超级盆地研究思路挖掘四川盆地油气资源潜力, 对指导四川盆地及类似成熟盆地的勘探开发部署提供了新的研究思路。
关键词: 超级盆地; 海相碳酸盐岩; 致密气; 页岩油; 立体成藏; 复式聚集; 四川盆地

中图分类号: TE122

文献标识码: A

Exploring the potential of oil and gas resources in Sichuan Basin with Super Basin Thinking

WANG Zecheng¹, SHI Yizuo¹, WEN Long², JIANG Hua¹, JIANG Qingchun¹, HUANG Shipeng¹,
XIE Wuren¹, LI Rong¹, JIN Hui¹, ZHANG Zhijie¹, YAN Zengmin¹

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China;
2. PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu 610051, China)

Abstract: Based on the contemporary strategy of PetroChina and the “Super Basin Thinking” initiative, we analyze the petroleum system and remaining oil and gas resource distribution, the Super Basin development scheme in the Sichuan Basin with the aim of unlocking its full resource potential. We conclude that, (1) The three-stage evolution of the Sichuan Basin has resulted in the superimposed distribution of hydrocarbon systems dominated by natural gas. The prospecting Nanhua-rift stage gas system is potentially to be found in the ultra-deep part of the basin. The marine-cratonic stage gas system is distributed in the Sinian to Mid-Triassic formations, mainly conventional gas and shale gas resources. The foreland-basin stage tight sand gas and shale oil resources are found in the Upper Triassic–Jurassic formations. The distribution laws of conventional and unconventional resources are different in each system. (2) To ensure larger scale hydrocarbon exploration and production, technologies regarding deep to ultra-deep carbonate conventional gas, tight-sand gas, and shale oil are necessarily to be advanced. (3) In order to achieve the full hydrocarbon potential of the Sichuan Basin, pertinent exploration strategies are expected to be proposed with regard to each hydrocarbon system respectively, government and policy supports ought to be strengthened, and new cooperative pattern should be established. Introducing the “Super Basin Thinking” provides references and guidelines for further deployment of hydrocarbon exploration and production in the Sichuan Basin and other developed basins.

Key words: Super Basin Thinking; marine carbonate reservoir; tight sand gas; shale oil; total petroleum system; stacked hydrocarbon accumulation; Sichuan Basin

引用: 汪泽成, 施亦做, 文龙, 等. 用超级盆地思维挖掘四川盆地油气资源潜力的探讨[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(5): 847-858.

WANG Zecheng, SHI Yizuo, WEN Long, et al. Exploring the potential of oil and gas resources in Sichuan Basin with Super Basin Thinking[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(5): 847-858.

0 引言

近 15 年来, 伴随着技术的进步, 全球许多勘探程

度较高的成熟盆地重新焕发活力, 达到新的产量峰值^[1], 改变了世界油气“悲观论”^[2], 也促使地质学家重新审视并更深入地剖析世界上具有代表性的富油气

盆地。IHS Markit 公司 2016 年提出了“超级盆地”的概念^[3],随后美国石油地质学家协会(AAPG)举办了一系列会议并推出了专题刊物^[4],旨在通过对世界上超级盆地的研究,建立可供其他成熟盆地借鉴的资源战略与发展模式,最大限度地挖潜成熟盆地的巨大资源潜力^[5]。

四川盆地是中国最早开发利用天然气的地区,历经 80 余年的勘探开发历史,已建成中国重要的天然气工业基地^[6]。近年来,国内学者从资源规模(包括油气累计采出量及剩余可采资源量)的角度,通过与典型超级含油气盆地对比^[7-8],认为四川盆地属于超级盆地。戴金星等^[9]认为四川盆地属于超级天然气盆地,具有气源岩、资源量、大气田和总产量 4 个方面的优势。汪泽成等^[10]从地下油气资源、已有的先进技术、地面基础设施 3 个方面,进一步论述了四川盆地具备超级盆地的基本特征。为了最大限度地挖掘四川盆地油气资源潜力、制定科学合理的勘探部署策略,作者基于对超级盆地思维的理解,结合对四川盆地含油气系统和剩余油气资源分布的分析,探索出新的解决方案,并为类似的成熟富油气盆地勘探开发提供参考借鉴。

1 超级盆地勘探思维

超级盆地概念最早出自 IHS Markit 公司市场研究报告^[3],定义为:至少已产出油气 6.85×10^8 t 油当量并至少具有待产出油气 6.85×10^8 t 油当量;拥有两个或更多的含油气系统或烃源岩层系;发育多套叠置的储集层;具有较完善的基础设施、油田服务体系;拥有良好的市场前景^[1-5]。

“超级盆地”概念的提出代表着全球油气行业对当今勘探开发方向的导引,即:着眼于前沿勘探和新兴领域的同时,更要回归现有开发风险较低的成熟盆地和已知资源区^[11]。这就要求勘探家们利用“超级盆地思维”,重新审视富油气盆地(或凹陷)的勘探核心理念与资源构成。通过对全球超级盆地研究,探索可适用于多数含油气盆地、更经济高效的油气勘探开发技术方法,达到最大限度挖掘含油气盆地资源开发潜力的目的^[12-13]。Sternbach C A^[11]认为超级盆地思维可形成指导勘探部署的全新思维模式,并提出了超级盆地思维工具包,指出可通过解析盆地油气赋存规律、技术革新、商业管理模式转变及多学科团队合作等手段最大限度地挖掘超级盆地资源潜力。

笔者将超级盆地思维概括为 3 个方面。①客观把握地下油气资源赋存规律的地质思维。准确把握地下

油气资源赋存规律,客观评价油气资源潜力,明确资源分布有利区。研究思路上,要突破传统的“从烃源岩到圈闭”的思维方式,要从“全油气系统”的角度出发,从烃类生、排、运、聚全过程进行整体研究,搞清不同类型油气资源分布规律^[14]。研究表明,除储集层之外,富有机质泥页岩、煤系及油气运载层等同样蕴藏着丰富的油气资源潜力^[15],从而形成了油气连续聚集、多烃类相态共存、近源或源内成藏的新模式^[16-17]。勘探开发理念上,要突破以圈闭为对象、寻找大油气田为目标的勘探思维,树立油气富集区的勘探理念,强调以烃源岩为主体、常规与非常规油气有序共生,用油气资源的立体丰度评价有利区带;特别是非常规油气技术的飞跃,改变了对于储集层界限的传统认知,致密砂岩、致密碳酸盐岩、页岩、变质岩及花岗岩等岩石类型均可成为油气储集层。要树立浅一中—深多层系油气资源立体勘探开发理念,实现对常规—非常规油气最大限度的经济性采出。②推广成熟先进技术和研发特色新技术的技术思维。成熟的富油气盆地往往具备技术创新与应用所需的各种要素与基础条件,为勘探开发先进技术的形成提供了沃土^[1, 14]。同时,成熟的富油气盆地精细勘探与经济开发也受到技术瓶颈的制约,催生新技术和新方法以满足生产需求。因此,成熟的富油气盆地资源挖潜以及新领域新区块的勘探部署中,应积极推广应用成熟的先进技术,研发针对性强的新技术,实现成熟盆地难动用资源变为可动用资源,推动新领域新区块高效勘探开发;同时要充分利用大数据分析技术、人工智能技术等,大幅度降低勘探开发成本。③能够实现效益最大化的投资策略思维。国际油公司传统的投资策略往往以单一类型的油气资源作为对象,在多个盆地或地区进行组合投资,追求短期效益^[18]。超级盆地思维就是要将盆地视为一个生态系统,综合考虑地下资源、地上技术储备、地面基础设施、市场和环境风险,成立超级盆地的专业公司,鼓励勘探开发模式创新(如立体勘探开发),追求长期效益;同时,由于成熟的富油气盆地具有丰富的资料与技术储备以及成型的市场规模,可尝试在政府的驱动下,开放准入制度,并建立完善的合同条款、环保要求以及作业者合作机制。积极探索混合所有制的运作方式,加大民间资本的融资力度,并对油气勘探开发企业给予更多的政策法规支持^[1, 5]。通过资料共享和市场竞争机制的引入,有望促进技术进步、盘活储量存量,充分发挥成熟富油气盆地的地下(地质条件及资源)与地面(基础设施)优势,最

终实现合作共赢。

2 四川超级盆地演化与含油气系统

超级盆地的必要组成要素之一为多套烃源岩及储集层的叠置发育^[1]。四川盆地具备构成超级盆地的油气资源基础与地质条件^[9-10]，垂向发育多套全油气系统。受构造演化阶段的控制，每套含油气系统内均具有各自的油气赋存特征与规律。只有厘清资源特征、摸清赋存规律，才能在此基础上全面挖掘四川超级盆地的资源潜力。

作为在上扬子克拉通基础上发展起来的叠合盆地，四川盆地经历了 3 期成盆演化阶段，即：南华纪

裂谷盆地^[19]、震旦纪—中三叠世海相克拉通盆地、晚三叠世—白垩纪前陆盆地，发育多套烃源岩和储集层，形成了纵向上多含油气系统叠置、平面上满盆含油气的特征。油气资源类型多样，常规—非常规油气有序分布（见图 1）。常规天然气主要分布在深层—超深层的海相碳酸盐岩层系；致密砂岩气主要分布在中—浅层上三叠统一侏罗系；页岩气主要分布在下志留统龙马溪组、下寒武统筇竹寺组，在震旦系陡山沱组、上二叠统吴家坪组及下侏罗统大安寨组等层系也有分布；湖相致密油与页岩油主要分布在四川盆地中北部（简称川中北）的中下侏罗统（见图 1）。

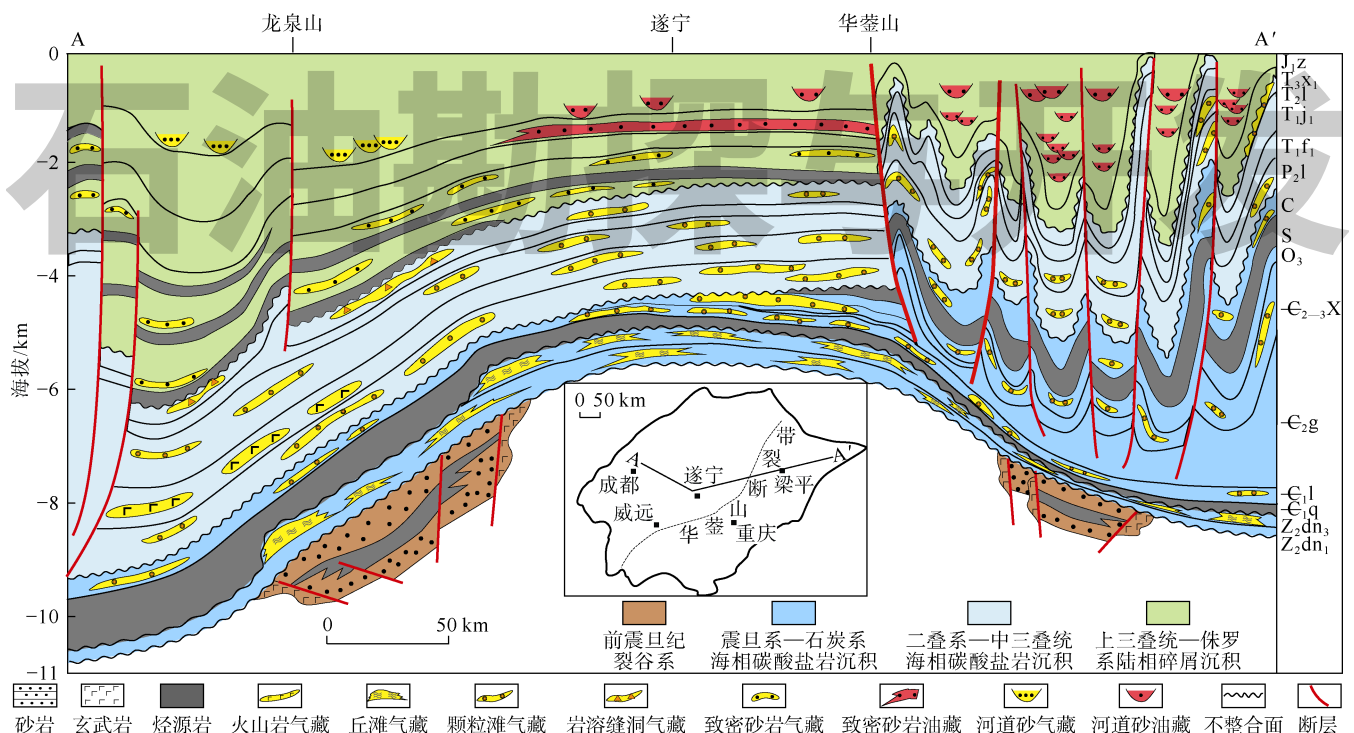


图 1 四川盆地油气藏纵向分布示意图 (J_1Z —珍珠冲组; T_3X_1 —须家河组一段; T_2L —雷口坡组; T_1J_1 —嘉陵江组一段; T_1f_1 —飞仙关组一段; P_2l —龙潭组; C —石炭系; S —志留系; O_3 —上奥陶系; $C_{2-3}X$ —洗象池组; C_2g —高台组; C_1l —龙王庙组; C_1q —筇竹寺组; Z_2dn_3 —灯影组三段; Z_2dn_1 —灯影组一段)

2.1 南华纪裂谷（裂陷）盆地与潜在的间冰期含气系统

扬子克拉通在晋宁运动形成统一基底之后，受罗迪尼亚超大陆裂解的影响，形成了北东向为主的坳-堑相间盆地结构^[20-21]。四川盆地外围发育川西—滇中裂谷、黔东—湘西裂陷、淑浦—三江裂陷、湘桂裂陷等^[20]。基于地球物理信息解译，四川盆地腹部可能存在北东向为主的陆内裂陷（见图 2），发育北东向和北西向两组断裂，向北可能与扬子克拉通北缘的大陆边缘盆地相接^[21]。四川盆地陆内裂陷的形成与原特提斯洋拉张活动有关，为大陆边缘盆地向扬子克拉通腹部延伸。

川西—滇中裂谷以充填厚达数千米的陆相碎屑岩和火山岩为特征，烃源岩不发育。扬子克拉通东侧南

华纪裂陷群，纵向上表现为地垒-地堑式结构，地堑沉积厚度可达千余米，为一套冰期—间冰期沉积。南华系古城组与南沱组为冰川堆积，厚层冰碛砾岩分布广泛。南华系大塘坡组为间冰期沉积，岩性以炭质页岩夹含锰或含铁岩层为特征，厚度为 0~100 m，是扬子克拉通发育的第 1 套优质烃源岩。松桃及秀山露头剖面 25 块样品分析， TOC 值为 0.25%~3.76%，平均值为 2.23%， R_o 值为 2.9%~3.1%。南沱组冰碛砾岩具备一定的储集条件，发育长石溶蚀孔隙、石英溶蚀孔隙及裂缝等类型的储集空间，孔隙度为 2.0%~5.5%，平均值为 3.5%。研究表明，大塘坡组烃源岩与南沱组储集层构成良好的源-储组合，奠定了南华系间冰期潜在

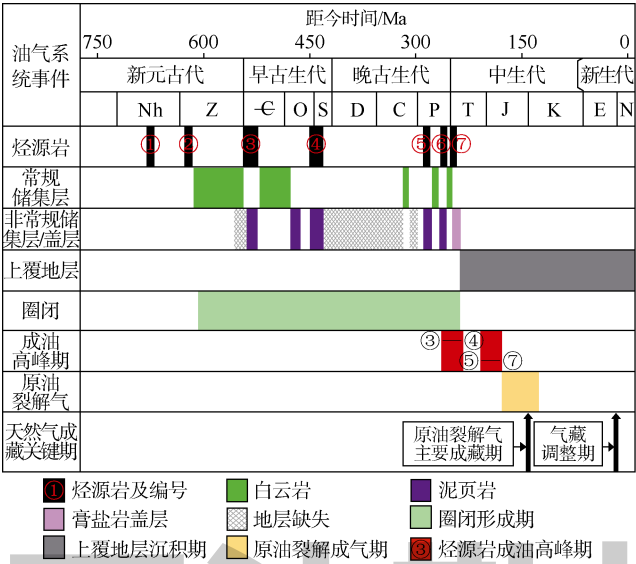


图 3 四川盆地海相克拉通复合含油气系统事件图

陡山沱组、下寒武统筇竹寺组、上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组、中二叠统栖霞组—茅口组、上二叠统龙潭组（吴家坪组）与大隆组。受克拉通内构造分异、古气候及海平面升降联合控制，四川盆地不同层系烃源岩空间分布存在差异性，表现为克拉通内裂陷及坳陷区烃源岩厚度大、初始海侵期有机质富集。

上述层系烃源岩分布广，多套烃源岩叠置分布。将 TOC 值大于 2.0% 的优质烃源岩分布区进行叠合，可以看出海相烃源岩存在东西两大优质烃源岩富集中心（见图 4）。西部中心主体位于德阳—安岳裂陷，发育 5 套主力烃源岩（Z₁ds、Є₁、S₁、P₂、P₃），TOC>2.0% 的烃源岩累计厚度 150~300 m，分布面积为（5~6）×10⁴ km²，累计生气强度（200~300）×10⁸ m³/km²。东部中心位于川东—蜀南一带，发育 3 套主力烃源岩（Є₁、S₁、P₂），TOC>2.0% 的烃源岩累计厚度为 100~250 m，分布面积为（3~4）×10⁴ km²，生气强度（150~200）×10⁸ m³/km²。

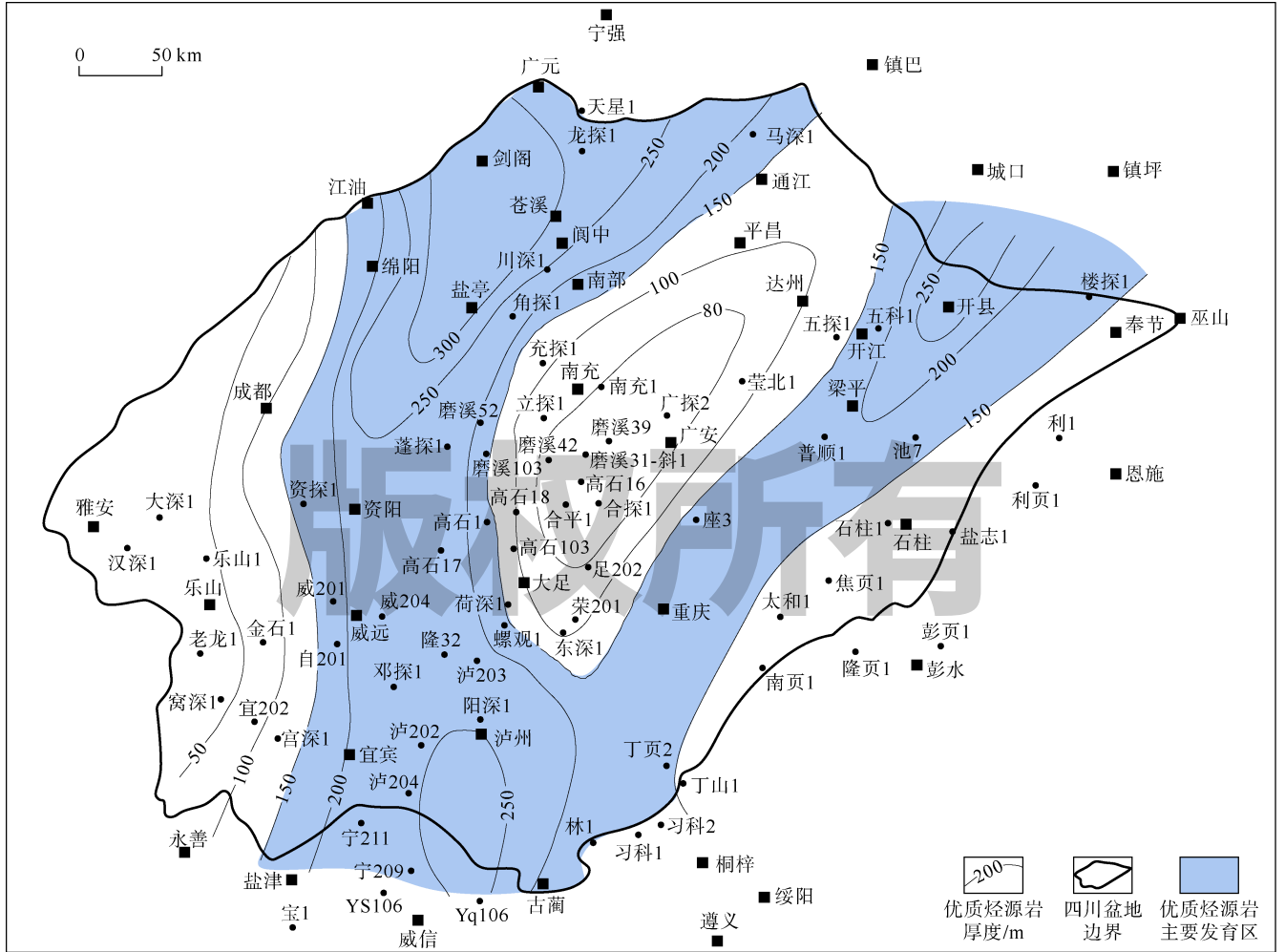


图 4 四川盆地海相优质烃源岩厚度等值线图

两大生烃中心控制了海相碳酸盐岩天然气富集范围。西部中心已发现了安岳、蓬莱、元坝、双鱼石、威远等大气田，川西北超深层以及裂陷南段勘探程度很低，是未来勘探的主攻方向。东部中心发现了川东石炭系构造型气藏群、川东北长兴—飞仙关组气藏群，但深层—超深层的震旦系—寒武系尚未突破，是下一步勘探的主攻方向。

2.2.2 同沉积期断裂和隆起控制储集层发育类型和规模

四川盆地海相碳酸盐岩发育多套层状或准层状分布的储集层，重点层系包括灯影组、沧浪铺组、龙王庙组、洗象池组、栖霞组、茅口组、长兴组、飞仙关组及雷口坡组等。规模储集层分布受沉积相带和建设性成岩作用共同控制，可分为台缘带和台内储集层两大类，前者厚度大、储集物性好；后者具有单层厚度薄、层数多及分布广等特征。

近期研究表明，同沉积构造活动对储集层规模分布的控制作用明显。同沉积断裂控制的台缘带是指伸展构造环境下，克拉通大陆边缘或克拉通裂陷边缘发育同沉积断裂，断块掀斜作用导致同一断块出现地貌

差，高部位水体能量强，有利于生物礁生长及颗粒滩发育，奠定了储集层发育的物质基础；断块低部位水体能量低，以富含泥质的泥质（晶）灰岩、泥质（晶）云岩为主，可形成侧向封堵的封隔层（见图 5）。理论研究和勘探实践证实，德阳—安岳裂陷北段灯影组沉积期发育多排同沉积断裂^[26]，断块高部位发育微生物丘滩体，如蓬探 1 井夹持在两条断层之间，距断层 0.5~1.6 km，灯二段发育凝块石、藻纹石等丘滩体，储集层厚度为 291 m，孔隙度为 4%~12%。紧靠断层的蓬探 101 井灯二段取心段可见大量的砾屑、砂屑，定向排列，为高能带破碎产物。通过地震资料分析，预测德阳—安岳裂陷北段梓潼—广元一带灯二段台缘厚度为 600~1 000 m，灯四段台缘厚度为 300~450 m，台缘宽度为 40~120 km，台缘丘滩体面积超 $1.5\times10^4\text{ km}^2$ 。台内相区整体属于陆表海沉积，水体较浅，有利于微生物丘滩体发育，如高石梯—磨溪地区台内相区，发育灯影组灯二段和灯四段共 2 套微生物丘滩体储集层^[27]，钻井取心资料证实，台内发育的微生物岩沉积序列与台缘带基本相似，只是单层规模较小。

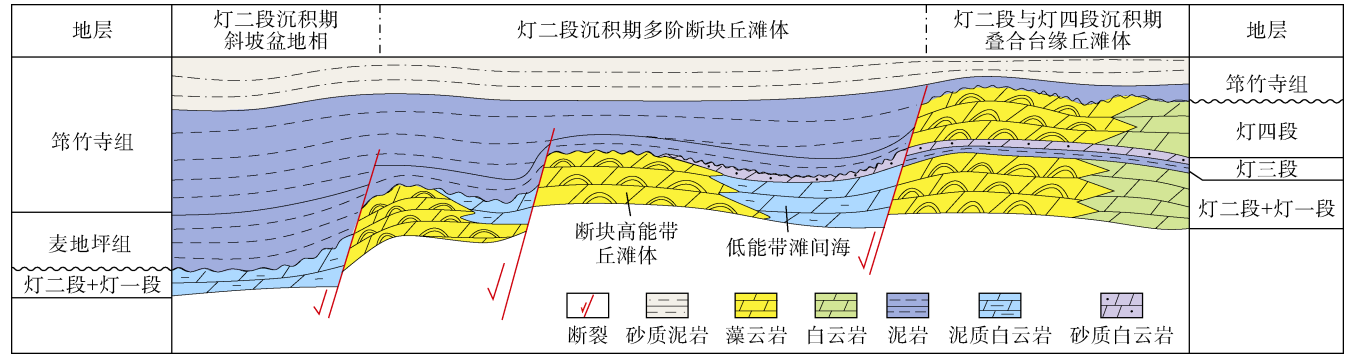


图 5 蓬莱—遂宁地区灯影组微生物丘滩体沉积模式图

同沉积隆起控制的颗粒滩是指受同沉积期隆起控制，环绕隆起高部位及斜坡区发育大面积颗粒滩，包括鲕滩、藻砂屑滩及砾（砂）屑滩。川中同沉积隆起发育时代为早寒武世沧浪铺组沉积期—志留纪，分布面积为 $(6\sim8)\times10^4\text{ km}^2$ ^[25]，具有 3 个典型特征（见图 6）：①川中隆起高部位及斜坡带颗粒滩体发育，且随着同沉积隆起不断上升，新层系颗粒滩向斜坡带迁移。沧浪铺组颗粒滩主要分布在遂宁—仪陇以西地区，龙王庙组颗粒滩向东扩展到南江—广安—合川一线，洗象池组颗粒滩向东扩张到宣汉—合川，下奥陶统颗粒滩向东迁移到重庆—泸州一线。②地层厚度由隆起区向斜坡区不断增厚。沧浪铺组隆起区厚度为 100~200 m，斜坡区厚度增至 200~400 m；龙王庙组隆起区为 70~120 m，斜坡区厚度增至 160~200 m；洗象池组隆起区

为 0~150 m，斜坡区厚度增至 200~600 m；奥陶系隆起区为 0~150 m，斜坡区厚度增至 200~500 m；志留系隆起区为 0~200 m，斜坡区厚度增至 1 000~1 200 m。③隆起高部位高频旋回侵蚀不整合面以及斜坡带超覆沉积发育，有利于层间岩溶及顺层岩溶储集层形成。川中隆起的寒武系—志留系至少存在 3 期侵蚀不整合面，即：沧浪铺组与龙王庙组之间侵蚀不整合、龙王庙组与洗象池组之间侵蚀不整合、奥陶系与志留系之间侵蚀不整合。同沉积隆起周缘发育颗粒滩，经准同生期及加里东运动之后的表生期岩溶作用改造，溶蚀孔隙型储集层发育。

2.2.3 走滑断裂与多层系颗粒滩配置利于立体成藏与复式聚集

高角度走滑断裂是油气运移的“高速公路”，有利

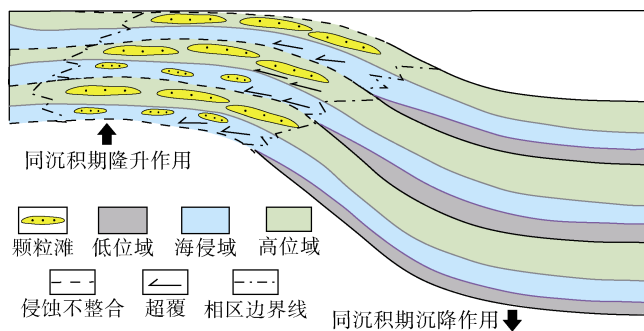


图 6 碳酸盐台地同沉积隆起沉积响应特征

于多层系立体成藏^[28]。地震资料解释表明华蓥山断裂以西的川中—川西地区在震旦系—二叠系普遍发育高角度的走滑断裂，以下三叠统嘉陵江组膏盐岩层滑脱层为界，深浅构造变形存在明显差异，表现为滑脱层之上构造变形受盆地周缘燕山期挤压应力作用影响，具有逆冲断层特征，断距小、断层延伸长度短，川中地区以北西、北西西向为主，川西地区以北东向为主。滑脱层之下发育高角度的走滑断层，存在北东向、北西向、近东西向多组断裂，形成期次至少有桐湾期、加里东期及海西期等 3 期^[29]。部分断层在燕山期活化，导致断层向上切割到中生界碎屑岩层系。

川中地区已发现气藏的气源对比研究表明，无论是栖霞组、茅口组还是灯影组、龙王庙组、沧浪铺组，均存在混源现象，显示出复合含油气系统特征。碳同位素组成特征显示高石梯—磨溪地区及北斜坡带栖霞组、茅口组气藏主要源自筇竹寺组，如磨溪 39、角探 1 等井茅口组天然气，高石 18、磨溪 42、磨溪 39 等井栖霞组天然气均可与高磨地区龙王庙组天然气对比。南充地区南充 1 井茅口组、磨溪 31-斜 1 井栖霞组气藏主要气源来自于二叠系烃源岩。川中古隆起北斜坡风险探井角探 1 井钻遇多个含气层，灯影组四段发育藻凝块云岩、藻砂屑白云岩储集层，厚度 166.6 m，孔隙度为 2.0%~7.1%，测井解释气层 8 层厚 101 m，含气性好（未测试）；寒武系沧浪铺组滩相白云岩储集层，厚度 25.9 m，埋深 6 972~7 026 m 井段测试产量为 $51.62 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ；茅口组滩相白云岩储集层，厚度 24.8 m、平均孔隙度为 3.8%，埋深 6 155~6 175 m 井段测试产量为 $112.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ，展示了该区多层系立体勘探的良好潜力。

2.2.4 海相碳酸盐岩往往多期成藏、原油裂解气主成藏期相近

四川盆地海相烃源岩普遍经历了早油—晚气的“双峰式”生烃演化历史，油气成藏经历了早期古油藏和晚期原油裂解气成藏过程^[30]。不同层系古油藏形

成时间差异明显，但古油藏裂解气的主成藏期相近，主体为早侏罗世—白垩纪。与燕山期断裂活动（尤其是早期走滑断层活化）相匹配，有利于多层系立体成藏与聚集。研究表明，蜀南地区茅口组古油藏主成藏期为距今 161~201 Ma，原油裂解气成藏期为距今 65~158 Ma^[31]；川东北飞仙关组古油藏主成藏期为晚三叠世—早侏罗世，原油裂解气成藏期为晚侏罗世—白垩纪^[32]。

为了确定安岳气田灯影组和龙王庙组油气成藏期次，对 18 口井系统采样，开展了沥青 Re-Os 定年分析、热液白云石超低浓度 U-Pb 定年分析及流体包裹体研究，综合厘定了灯影组和龙王庙组“两期油+3 期气”共 4 期的复杂成藏过程（见图 7）。灯影组第 1 期原油充注时间为距今 411~458.09 Ma；第 2 期原油充注时间为距今 242.8~259.3 Ma，同时伴生天然气充注；第 3 期只有天然气充注，时间为距今 196.0~220.5 Ma，气源来自原油裂解气；第 4 期只有天然气充注，时间为距今 78~127 Ma，代表了原油裂解气持续发生以及气藏调整。

导致海相碳酸盐岩天然气成藏时间相近的主因：

①海相地层经历了早期浅埋—后期快速深埋的埋藏演化历史，晚三叠世之前烃源岩地层温度为 90~110℃，处于生油窗，以生油为主。晚三叠世—白垩纪海相地层快速深埋，地层温度超过 120℃，有机质演化进入以生气为主的阶段。②液态烃裂解成气温度始于 160℃，完全裂解温度 240~300℃。四川盆地海相地层在中晚侏罗世地层温度达到 160℃，白垩纪末地层温度达到最高，是原油裂解气形成主要时期，也是天然气成藏的关键时期。

2.2.5 海相页岩气系统

晚奥陶世—早志留世，受华南都匀运动和全球海平面快速上升双重影响，在康滇—黔中古陆北侧的前陆拗陷区发育陆棚相沉积，岩性为大套暗色炭质泥页岩、炭质笔石泥页岩夹薄层泥质粉砂岩。其中，深水陆棚富有机质页岩，主要发育于五峰组—龙马溪组底部，厚度为 40~80 m，有机质主要由腐泥型和笔石体组成^[33]，总有机碳含量为 2.5%~8.5%，平均值达到 3.6%， R_o 值为 2.5%~3.8%，分布于川南—川东地区（见图 4），面积超过 $3.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。研究认为，五峰组—龙马溪组页岩气藏为大型连续聚集型气藏，主力含气层连续分布，地层压力高^[33]。“甜点段”优质页岩具备高有机碳含量、高脆性、高孔隙度及高含气性的特征^[34]。页岩气地质资源量超过 $2.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，其中埋深小于 4 500 m 的页岩气资源占比达 64%，页岩气勘探开发潜力巨大。

自 2010 年中国第 1 口页岩气井威 201 井在五峰组—

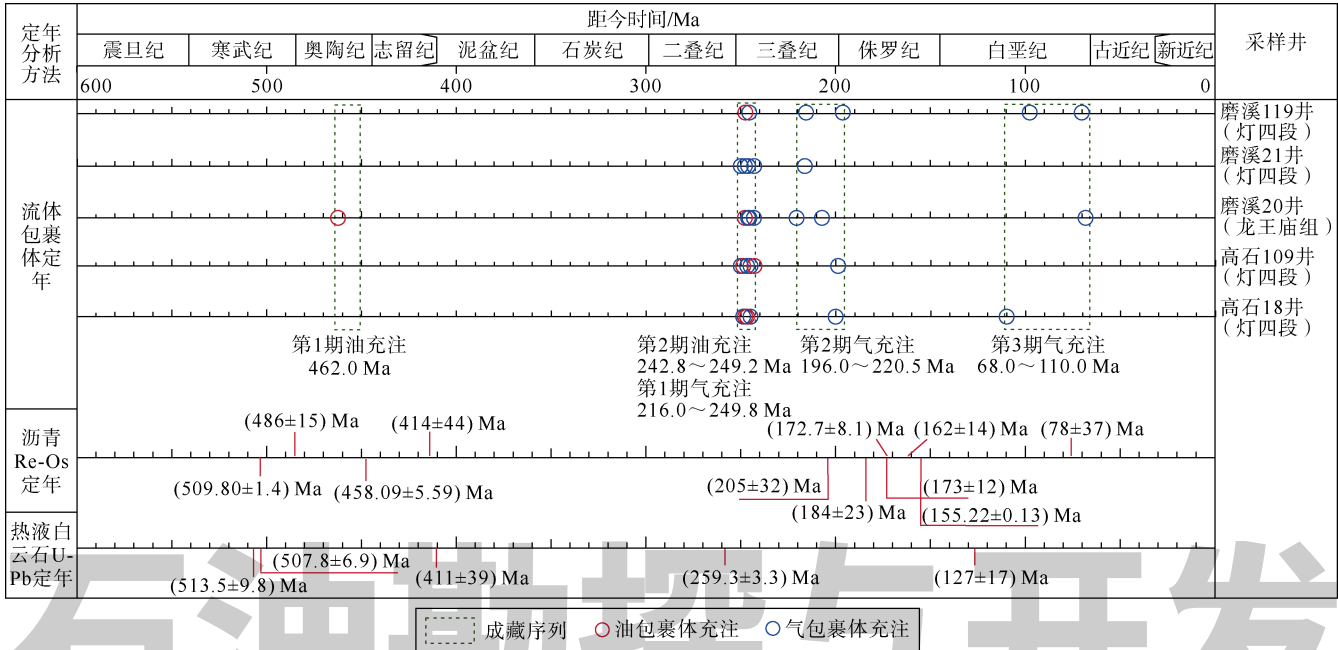


图7 安岳气田灯影组和龙王庙组成藏期次分析

龙马溪组获工业气流后，在四川盆地威远、长宁—昭通、富顺—永川、涪陵、泸州等地区发现海相页岩气富集区。截至 2021 年，累计探明页岩气地质储量超 $4.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，页岩气年产量超过 $210 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，成为世界上少数几个实现页岩气工业化开采的国家之一。通过勘探开发实践，逐步形成了“地质甜点”、“工程甜点”、“经济甜点”一体化评价方法与思路以及水平井体积压裂开发等关键技术^[34]；提出了页岩气甜点区“体积开发”的理念和核心技术，为长宁、涪陵等页岩气储量区立体开发提供了重要的理论依据和技术支持，应用前景广阔^[35]。

2.3 前陆盆地与致密气-页岩油系统

印支—燕山期受龙门山造山带及南秦岭造山带隆升影响，四川盆地发育两期前陆盆地。晚三叠世前陆盆地受龙门山造山带控制，沉降中心和沉积中心均位于川西坳陷区，须家河组厚度大，纵向上具有“三明治”式的烃源岩-储集层频繁互层等成藏组合特征。中晚侏罗世川北前陆盆地受南秦岭造山带隆升影响，沉降中心迁移到平昌—达州一带。盆地充填湖泊-三角洲沉积体系，富有机质泥页岩与三角洲-河道砂体频繁叠置，构成了良好的生储盖组合。受沉降中心迁移、烃源岩母质类型、有机质成熟度及储集层致密等因素控制，存在致密砂岩气与页岩油两类主要油气资源类型，形成了独特的致密气-页岩油系统。

2.3.1 沉降中心迁移、有机质热演化与油气类型的耦合程度高

上三叠统须家河组生烃中心位于川西—川中地

区，以煤系烃源岩为主，有机质成熟度高，以生气为主，是碎屑岩致密气的主要分布区。川西坳陷泥质烃源岩厚度为 300~850 m， R_o 值为 1.6%~2.5%，生气强度为 $(50 \sim 150) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ；川中斜坡—隆起区，泥质烃源岩厚度为 100~300 m， R_o 值为 1.2%~1.6%，生气强度为 $(10 \sim 50) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ；盆地其他地区烃源岩厚度小于 100 m，有机质热成熟度 R_o 值为 1.0%~1.2%，生气强度小于 $10 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。

侏罗系存在页岩油和致密气两类资源。中下侏罗统发育东岳庙组、大安寨组、凉高山组 3 套主力烃源岩^[36]，藻类发育，干酪根类型以 II 型为主，有利于生油， R_o 值为 0.8%~1.6%，处于成熟—高成熟阶段。以阆中—南充—营山一线为界，以北地区 R_o 值大于 1.3%，有机质热演化程度较高，处于生气阶段，是侏罗系致密气主要分布区；以南地区 R_o 值为 0.8%~1.3%，处于生油阶段，是页岩油主要分布区。

2.3.2 碎屑岩储集层致密化早于生气高峰期是致密气成藏的关键

碎屑岩致密气具连续性聚集、大面积成藏特征。与烃源岩互层的储集层致密化程度和时间是决定这类储集层能否规模成藏的关键。川西坳陷须家河组天然气生成与砂岩储集层致密化时间进行对比，川西坳陷须四段砂岩在中侏罗世末期进入致密化，须二段砂岩在中侏罗世早期进入致密化。须三段—须一段烃源岩在早侏罗世就进入成熟阶段，中晚侏罗世进入生气阶段，侏罗期末生气强度为 $20 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ，白垩纪末已进入生气高峰，生气强度达到 $100 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。可见，须

三一须一段烃源岩大量生油期早于须二段砂岩致密化时间,有利于石油的早期聚集,可从新场气田须二段产层岩石薄片见到较为丰富的沥青充填孔隙,沥青周围被高致密化的岩石封堵。砂岩储集层致密化后,有效地阻止了孔隙内的石油自由运移,使得孔隙中石油裂解生成的天然气被“冻结”而原位成藏,含气饱和度高、气藏压力大。这一成藏机理揭示紧邻烃源灶的储集层含气性越好。勘探证实,位于主力源灶区的秋林—八角场地区须家河组含气饱和度为 64.8%~71.4%,气藏压力系数为 1.6~2.2;而远离主力源灶区的安岳地区须家河组含气饱和度只有 50%~60%,气藏压力系数为 1.2~1.4。

3 四川超级盆地油气发展的思考

不同超级盆地有各自的发展模式,但对于勘探开发历史较长的超级盆地,则表现出可供参考借鉴的共性特征。基于超级盆地思维并对比美国二叠盆地等典型超级盆地的勘探开发历史,结合四川盆地勘探进程与剩余油气资源分布特征,可以提出四川盆地油气勘探的超级盆地发展模式。

3.1 美国二叠盆地油气发展模式

通常超级盆地的常规油气勘探开发历程可分为早期勘探、上升期、平台期和下降期 4 个阶段^[12]。早期勘探以发现油气为主;上升期表现为勘探投入与发现不断增多,储、产量快速增长;平台期表现为储、产量达到峰值并持续一段时间;下降期则表现为勘探发现越来越少,储、产量出现下降。一般在常规油气的下降期,积极拓展致密油气及页岩油气等非常规油气新领域,以扭转产量下降的被动局面。在这个历程中,油气产量也对应出现多个产量高峰的“黄金期”。

美国二叠盆地油气产量经历了两个黄金期,勘探发

现始于 1920 年,历经 50 余年勘探开发,产量在 1970—1980 年达到高峰,被称之为“黄金期 1.0”,油气主要来自白云岩、石灰岩与砂岩储集层。在接下来的 30 年中,常规油气产量逐渐下降,业内人士认为二叠盆地最好的时代已经结束,但在 2000—2015 年间,石油工业发生了多项重大技术革新,尤其是定向钻井和水力压裂技术的推广应用,使得以往被认为不具有商业价值的非常规致密油气资源的开发利用成为可能。到 2010 年二叠盆地油气产量止跌回升,2016 年以来油气产量快速攀升,被称之为“黄金期 2.0”^[37]。Fryklund B 认为,二叠盆地发展模式可供全球范围内很多成熟盆地借鉴^[3]。

3.2 四川盆地勘探历程与剩余油气资源分布

四川盆地油气勘探开发始于 20 世纪 40 年代,历经 4 个勘探阶段(见图 8)。^①第 1 阶段(1953—1977 年),构造圈闭勘探阶段,主探中浅层构造圈闭,累计探明天然气地质储量 $1\,511\times 10^8\text{ m}^3$,1977 年天然气产量突破 $50\times 10^8\text{ m}^3$ 。^②第 2 阶段(1978—2004 年),大中型气田勘探阶段,主探川东石炭系和川东北飞仙关组,累计探明天然气地质储量 $6\,250\times 10^8\text{ m}^3$,2004 年天然气产量突破 $100\times 10^8\text{ m}^3$ 。^③第 3 阶段(2005—2010 年),岩性油气藏勘探阶段,主探川中须家河组砂岩气藏和龙岗礁滩气藏,累计探明天然气地质储量 $6\,153\times 10^8\text{ m}^3$,2009 年天然气产量突破 $150\times 10^8\text{ m}^3$ 。^④第 4 阶段(2012 年至今),大气区勘探阶段,主探震旦系—寒武系碳酸盐岩常规气、川南页岩气、侏罗系致密砂岩气,累计探明天然气地质储量 $20\,541\times 10^8\text{ m}^3$,2021 年天然气产量突破 $300\times 10^8\text{ m}^3$ 。从勘探发现以及储产量情况看,目前进入储产量快速增长的黄金期^[6],这得益于长期以来形成的天然气产业一体化发展模式,是适应区域天然气产业发展特征与发展环境的一种独特经济发展战略与管理模式^[38]。

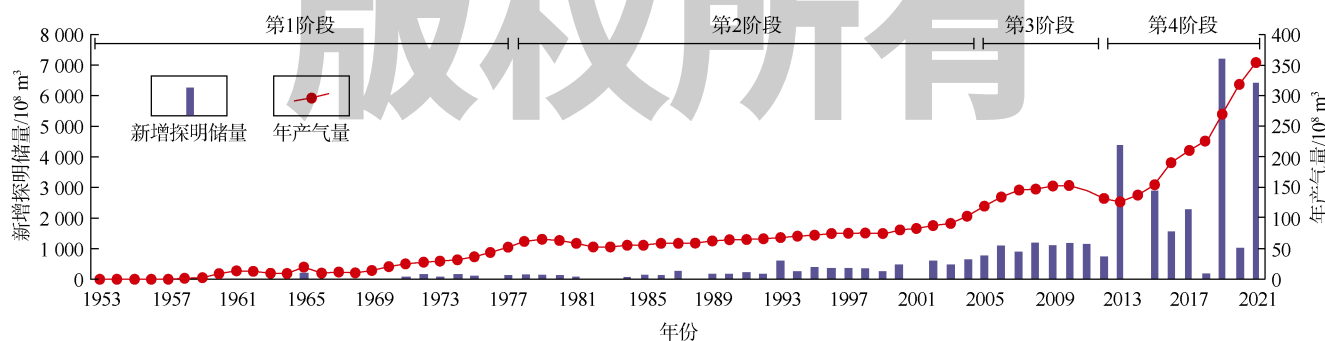


图 8 四川盆地勘探开发历程与储产量曲线

根据 2019 年完成的四川盆地油气资源评价结果,分析剩余可采油气资源分布特点(见图 9)。层系分布上,剩余可采资源超万亿立方米的层系有二叠系、寒

武系、震旦系、中下三叠统及上三叠统(不包括页岩气),层系资源探明率为 17%~30%。资源类型上,页岩气剩余可采天然气资源最多,占比高达 56.3%;其次

为海相碳酸盐岩常规气,占比为 38.2%;致密砂岩气占比为 5.5%。资源埋深上,中浅层(埋深 2 000~4 500 m)剩余可采资源占比 54%,深层(埋深 4 500~6 000 m)占比 35%,超深层(埋深 6 000~8 000 m)占比 7%。平面分布上,川中隆起带剩余资源量多达 $3.65 \times 10^{12} \text{ m}^3$,体积丰度达 $0.9 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,其次是川东高陡构造带,剩余资源量多达 $1.75 \times 10^{12} \text{ m}^3$,体积丰度达 $0.36 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。

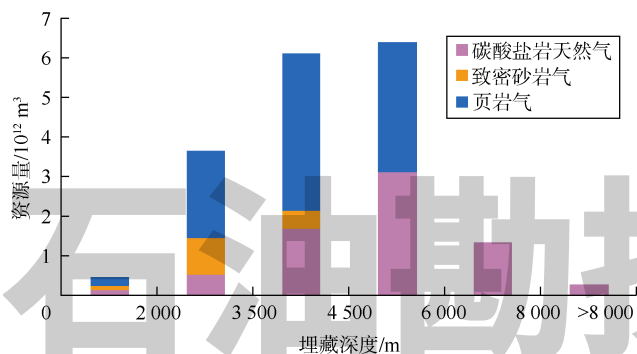


图9 四川盆地剩余可采天然气资源分布直方图

3.3 四川超级盆地油气勘探发展的思考

四川超级盆地剩余油气资源丰富,目前常规、非常规两种资源勘探开发形势良好,已进入油气快速发展的黄金期。如何拓宽黄金期持续时间、最大限度地挖掘各类油气资源潜力,是油气勘探发展的重大课题。本文基于剩余资源分布和含油气系统分析,从超级盆地思维角度,提出如下建议。

①针对四川超级盆地常规-非常规资源共生、多层系复合含油气特点,分层次确定勘探战略。深层—超深层海相碳酸盐岩是寻找常规天然气规模储量的重点领域。立足生烃中心近源成藏组合,以断控型台缘带、走滑断裂-颗粒滩叠合带为主攻对象,积极寻找大型—特大型气田,奠定大气区发展的资源基础。值得关注的重点区带有:扬子克拉通西北缘大陆边缘震旦系—三叠系、德阳—安岳裂陷中北段震旦系、川中古隆起北斜坡的震旦系—寒武系、川东高陡构造带寒武系盐下大构造等。对南华系裂谷潜在含气系统,加大烃源岩分布、资源评价、有利区优选等基础研究,积极探索超深层新领域。中—深层勘探程度较高的碳酸盐岩层系,包括川东地区石炭系—二叠系、川东北长兴组—飞仙关组、蜀南地区二叠系和三叠系等,需要创新认识、转变勘探理念,加大高陡构造下斜坡—向斜区天然气成藏富集规律研究,寻找新富集区块,推动老矿区再换新生。

中浅层碎屑岩致密气与页岩油领域,立足主力烃源灶区,寻找富集甜点区,落实规模效益储量区。要加大川西—川中烃源岩区致密气勘探力度,具备烃源岩与储集层频繁互层、地层压力高(压力系数大于 1.6)、相对高孔渗储集层发育(平均孔隙度为 4.0%,部分层段高达 11%)等有利条件的区域,是寻找富集高产致密气大气田的有利区。川北—川东北侏罗系是页岩油勘探有利区,存在有机碳含量高($\text{TOC} > 1.0\%$)、成熟度高($R_o > 1.2\%$)、地层压力高、油质轻及可动油含量高有利条件,积极探索纯页岩型及页岩-砂岩互层型页岩油。在海相页岩气领域,立足川南五峰组—龙马溪组页岩气富集区,加大深层页岩气开发的技术攻关力度,早日实现有规模的商业开发;要树立大四川盆地的理念,兼顾盆外相对稳定构造带的页岩气开发潜力。积极拓展页岩气新层系及新领域,加强陡山沱组、筇竹寺组、吴家坪组等新层系页岩气评价研究,同时要高度重视茅口组及雷口坡组泥灰岩等新领域的含气性与资源潜力评价研究。

②针对不同领域的技术瓶颈,加大技术攻关力度,形成满足不同领域不同资源类型的技术对策,推动超级盆地常规-非常规资源的立体勘探开发,为四川盆地油气发展的黄金期提供技术保障。近期,针对超深层地震成像技术与储集层预测技术、超深层钻完井技术与高温压测试技术、致密油气的甜点区评价技术、深层页岩气储集层改造提产技术等,加大攻关力度,满足生产需求。

③在投资策略方面,针对中浅层致密气,积极探索混合所有制合作方式,加大民间资本的融资力度,实现储产量归我、效益共享的“双赢”。比如,中浅层侏罗系河道砂“金豆子”岩性气藏,具有投资小、见效快的特点,可探索“1 区块-1 项目-1 方案”的合作模式,努力争取政府优惠新政。

4 结论

四川超级盆地具有多类型盆地叠合、多个含油气系统叠置、常规-非常规资源共生、天然气资源占主导等地质特征,目前已进入油气快速发展的黄金期。超级盆地思维在推动四川超级盆地发展模式可发挥重要作用。

基于剩余资源分布及新类型、新领域的认识,确定分层次的勘探战略。深层—超深层碳酸盐岩常规气、中浅层碎屑岩致密气及页岩气是寻找规模储量的勘探重要领域,要加强针对性的技术攻关和多层系立体勘探。

创新合作投资理念，积极探索混合所有制的投资方式，是利用社会资源推动油气快速发展的有益尝试。

致谢：本文在研究撰写过程中得到了中国石油西南油气田分公司杨雨教授、杨跃明教授等的大力支持，在此一并表示感谢！

参考文献：

- [1] STERNBACH C A. Super basin thinking: Methods to explore and revitalize the world's greatest petroleum basins[J]. AAPG Bulletin, 2020, 104(12): 2463-2506.
- [2] AHLBRANDT T S. From petroleum scarcity to abundance: Opportunities and implications for the U.S. and world[R]. Denver: AAPG Annual Convention and Exhibition, 2015.
- [3] FRYKLUND B. Super basins: The basins that keep on giving[R]. IHS Markit, 2016.
- [4] FRYKLUND B, STARK P P. Super basins: New paradigm for oil and gas supply[J]. AAPG Bulletin, 2020, 104(12): 2507-2519.
- [5] STERNBACH C A, BARTOLINI C. Super basins: Selected case studies of the world's greatest petroleum basins[J]. AAPG Bulletin, 2020, 104(12): 2461-2462.
- [6] 马新华. 四川盆地天然气发展进入黄金时代[J]. 天然气工业, 2017, 37(2): 1-10.
MA Xinhua. A golden era for natural gas development in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(2): 1-10.
- [7] 杨光, 朱华, 黄东, 等. 四川超级富气盆地特征及油气勘探潜力[J]. 天然气勘探与开发, 2020, 43(3): 1-7.
YANG Guang, ZHU Hua, HUANG Dong, et al. Characteristics and exploration potential of the super gas-rich Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2020, 43(3): 1-7.
- [8] 刘树根, 邓宾, 孙玮, 等. 四川盆地是“超级”的含油气盆地吗?[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2020, 39(5): 20-35.
LIU Shugen, DENG Bin, SUN Wei, et al. May Sichuan Basin be a super petroliferous basin?[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2020, 39(5): 20-35.
- [9] 戴金星, 倪云燕, 刘全有, 等. 四川超级气盆地[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(6): 1081-1088.
DAI Jinxing, NI Yunyan, LIU Quanyou, et al. Sichuan super gas basin in southwest China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(6): 1081-1088.
- [10] 汪泽成, 施亦做, 严增民, 等. 用“超级盆地”理念助推四川盆地天然气勘探提质增效的思考[N]. 石油商报, 2021-03-12(8).
WANG Zecheng, SHI Yizuo, YAN Zengmin, et al. Thoughts on boosting the quality and efficiency of natural gas exploration in the Sichuan Basin with the concept of super basin[N]. Petroleum Business News, 2021-03-12(8).
- [11] WHALEY J. Petroleum geology: What is a super basin?[J]. GeoExPro, 2019, 16(5): 60-64.
- [12] 吕建中, 刘嘉, 孙乃达, 等. “超级盆地模式”: 成熟盆地油气增储上产新思路[J]. 国际石油经济, 2019, 27(9): 40-48.
LYU Jianzhong, LIU Jia, SUN Naida, et al. The “super basin model”: A new idea of increasing reserves and production in mature basins[J]. International Petroleum Economics, 2019, 27(9): 40-48.
- [13] STERNBACH C A. Petroleum geology: Using super basins as analogues[J]. GeoExPro, 2020, 17(6): 20-24.
- [14] 贾承造. 论非常规油气对经典石油天然气地质学理论的突破及意义[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(1): 1-11.
JIA Chengzao. Breakthrough and significance of unconventional oil and gas to classical petroleum geological theory[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 1-11.
- [15] SONNENBERG S A. Carrier-bed plays in the Denver and Powder River basins[J]. AAPG Bulletin, 2021, 105(9): 1779-1796.
- [16] HOOD K C, YUREWICZ D A, STEFEN K J. Assessing continuous resources: Building the bridge between static and dynamic analyses[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2012, 60(3): 112-133.
- [17] 邹才能, 陶士振, 侯连华, 等. 非常规油气地质学[M]. 北京: 地质出版社, 2014.
ZOU Caineng, TAO Shizhen, HOU Lianhua, et al. Unconventional petroleum geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- [18] COLLINS J C. Good to Great: Why some companies make the leap and others don't[J]. Academy of Management Perspectives, 2006, 20(1): 120-122.
- [19] 李路顺, 汪泽成, 肖安成, 等. 扬子北缘南华纪裂谷系统: 基于重力异常及沉积学证据[J]. 地球科学, 2021, 46(10): 3496-3508.
LI Lushun, WANG Zecheng, XIAO Ancheng, et al. Rift system in northern Yangtze block during Nanhua period: Implications from gravity anomaly and sedimentology[J]. Earth Science, 2021, 46(10): 3496-3508.
- [20] 陆松年. 从罗迪尼亚到冈瓦纳超大陆: 对新元古代超大陆研究几个问题的思考[J]. 地学前缘, 2001, 8(4): 441-448.
LU Songnian. From Rodinia to Gondwanaland supercontinents: Thinking about problems of researching Neoproterozoic supercontinents[J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8(4): 441-448.
- [21] 王剑, 曾昭光, 陈文西, 等. 华南新元古代裂谷系沉积超覆作用及其开启年龄新证据[J]. 沉积与特提斯地质, 2006, 26(4): 1-7.
WANG Jian, ZENG Zhaoguang, CHEN Wenxi, et al. The Neoproterozoic rift systems in southern China: New evidence for the sedimentary onlap and its initial age[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2006, 26(4): 1-7.
- [22] 汪泽成, 姜华, 王铜山, 等. 上扬子地区新元古界含油气系统与油气勘探潜力[J]. 天然气工业, 2014, 34(4): 27-36.
WANG Zecheng, JIANG Hua, WANG Tongshan, et al. Hydrocarbon systems and exploration potentials of Neoproterozoic in the Upper Yangtze region[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(4): 27-36.
- [23] CRAIG J, THUROW J, THUSU B, et al. Global Neoproterozoic petroleum systems: The emerging potential in north Africa[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2009, 326(1): 1-25.
- [24] 吴福元, 万博, 赵亮, 等. 特提斯地球动力学[J]. 岩石学报, 2020, 36(6): 1627-1674.
WU Fuyuan, WAN Bo, ZHAO Liang, et al. Tethyan geodynamics[J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(6): 1627-1674.
- [25] 汪泽成, 赵文智, 胡素云, 等. 克拉通盆地构造分异对大油气田形成的控制作用: 以四川盆地震旦系—三叠系为例[J]. 天然气工业, 2017, 37(1): 9-23.
WANG Zecheng, ZHAO Wenzhi, HU Suyun, et al. Control of tectonic differentiation on the formation of large oil and gas fields in

- craton basins: A case study of Sinian-Triassic of the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(1): 9-23.
- [26] 赵路子, 汪泽成, 杨雨, 等. 四川盆地蓬探1井灯影组灯二段油气勘探重大发现及意义[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3): 1-12.
ZHAO Luzi, WANG Zecheng, YANG Yu, et al. Important discovery in the second member of Dengying Formation in Well Pengtan1 and its significance, Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3): 1-12.
- [27] 赵文智, 汪泽成, 姜华, 等. 从古老碳酸盐岩大油气田形成条件看四川盆地深层震旦系的勘探地位[J]. 天然气工业, 2020, 40(2): 1-10.
ZHAO Wenzhi, WANG Zecheng, JIANG Hua, et al. Exploration status of the deep Sinian strata in the Sichuan Basin: Formation conditions of old giant carbonate oil/gas fields[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(2): 1-10.
- [28] 焦方正, 杨雨, 冉崎, 等. 四川盆地中部地区走滑断层的分布与天然气勘探[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 92-101.
JIAO Fangzheng, YANG Yu, RAN Qi, et al. Distribution and gas exploration of the strike-slip faults in the central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 92-101.
- [29] 马德波, 汪泽成, 段书府, 等. 四川盆地高石梯—磨溪地区走滑断层构造特征与天然气成藏意义[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(5): 795-805.
MA Debo, WANG Zecheng, DUAN Shufu, et al. Strike-slip faults and their significance for hydrocarbon accumulation in Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(5): 795-805.
- [30] 赵文智, 王兆云, 王东良, 等. 分散液态烃的成藏地位与意义[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(4): 401-413.
ZHAO Wenzhi, WANG Zhaoyun, WANG Dongliang, et al. Contribution and significance of dispersed liquid hydrocarbons to reservoir formation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(4): 401-413.
- [31] 任梦怡, 江青春, 汪泽成, 等. 川南地区中二叠统茅口组成岩流体来源及演化过程[J]. 天然气工业, 2020, 40(4): 40-50.
REN Mengyi, JIANG Qingchun, WANG Zecheng, et al. Source and evolution of diagenetic fluid in the Middle Permian Maokou Formation in the southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(4): 40-50.
- [32] 马永生, 傅强, 郭彤楼, 等. 川东北地区普光气田长兴—飞仙关气藏成藏模式与成藏过程[J]. 石油实验地质, 2005, 27(5): 455-461.
MA Yongsheng, FU Qiang, GUO Tonglou, et al. Pool forming pattern and process of the Upper Permian-Lower Triassic, the Puguang gas field, northeast Sichuan Basin, China[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2005, 27(5): 455-461.
- [33] 董大忠, 王玉满, 李新景, 等. 中国页岩气勘探开发新突破及发展前景思考[J]. 天然气工业, 2016, 36(1): 19-32.
DOND Dazhong, WANG Yuman, LI Xinjing, et al. Breakthrough and prospect of shale gas exploration and development in China[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(1): 19-32.
- [34] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣. 中国页岩气勘探开发理论认识与实践[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 561-574.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong. China's shale gas exploration and development: Understanding and practice[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 561-574.
- [35] 焦方正. 页岩气“体积开发”理论认识、核心技术与实践[J]. 天然气工业, 2019, 39(5): 1-14.
JIAO Fangzheng. Theoretical insights, core technologies and practices concerning “volume development” of shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(5): 1-14.
- [36] 杨跃明, 黄东. 四川盆地侏罗系湖相页岩油气地质特征及勘探开发新认识[J]. 天然气工业, 2019, 39(6): 22-33.
YANG Yueming, HUANG Dong. Geological characteristics and new understandings of exploration and development of Jurassic lacustrine shale oil and gas in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(6): 22-33.
- [37] FAIRHURST B, EWING T, LINDSAY B. West Texas (Permian) Super Basin, United States: Tectonics, structural development, sedimentation, petroleum systems, and hydrocarbon reserves[J]. AAPG Bulletin, 2021, 105(6): 1099-1147.
- [38] 马新华, 胡勇, 王富平. 四川盆地天然气产业一体化发展创新与成效[J]. 天然气工业, 2019, 39(7): 1-8.
MA Xinhua, HU Yong, WANG Fuping. An integrated production-supply-storage-marketing system for natural gas development in the Sichuan Basin: Innovation and achievements[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(7): 1-8.
- 第一作者简介: 汪泽成 (1966-), 男, 安徽太湖人, 博士, 中国石油勘探开发研究院教授级高级工程师, 主要从事含油气盆地构造、油气地质综合研究与勘探选区评价工作。地址: 北京市海淀区学院路20号, 中国石油勘探开发研究院, 邮政编码: 100083。E-mail: wangzecheng@petrochina.com.cn
- 联系作者简介: 施亦做 (1990-), 男, 黑龙江大庆人, 博士, 中国石油勘探开发研究院工程师, 主要从事油气地质及地热研究。地址: 北京市海淀区学院路20号新能源研究中心, 邮政编码: 100083。E-mail: shiyz21@petrochina.com.cn
- 收稿日期: 2022-02-22 修回日期: 2022-08-27
- (编辑 衣英杰)