

DOI: 10.12474/cdlgzrxx.2026070103



四川盆地天然气工业的技术演化 及驱动机制

刘清友^{1,2*}, 孙宗元³, 陈水银⁴, 郎咸国^{1,3}, 吴雪峰⁴,
王 方⁵, 徐思源⁶, 陈雨雷³

1. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室(成都理工大学), 成都 610059;
2. 成都理工大学 能源学院(页岩气现代产业学院), 成都 610059;
3. 成都理工大学 沉积地质研究院, 成都 610059;
4. 中国石油西南油气田公司, 成都 610015;
5. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;
6. 中国石油规划总院, 北京 100083

[摘要] 天然气是保障国家能源安全与推动能源低碳转型的重要战略资源,而技术体系演化是支撑天然气工业高质量发展的核心动力。四川盆地作为中国天然气工业的发源地与核心,具有 2 000 多年天然气开采历史,也是国家油气生产基地建设的核心区域,为开展历史视角下的天然气技术演化研究提供了典型样本。本文系统梳理了四川盆地天然气技术从古代发现利用到现代跨越式发展的六个阶段的特征。研究表明:四川盆地天然气技术演化并非单项技术线性叠加,而表现为“时代需求与工程难题—牵引性技术突破—技术体系协同升级—工业规模化组织保障”的连续耦合过程。其技术演化主要受两类因素共同驱动:盆地复杂的地质条件与资源禀赋构成了技术演化的内生约束;国家能源战略与市场需求则提供了强有力的外部牵引。面向未来能源安全与复杂地质条件,应坚持以牵引性技术突破为核心,以配套技术协同升级为支撑,以工业化规模化组织为保障的自主创新路径,以期为中国天然气工业的高效开发与持续发展提供历史依据与机制参考。

[关键词] 四川盆地;天然气工业;技术演化史;牵引性技术;驱动机制

[分类号] TE1; TE3

[文献标志码] A

Technological evolution and driving mechanisms of the natural gas industry in the Sichuan Basin

LIU Qingyou^{1,2*}, SUN Zongyuan³, CHEN Shuiyin⁴, LANG Xianguo^{1,3}, WU Xuefeng⁴,
WANG Fang⁵, XU Siyuan⁶, CHEN Yulei³

1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of

收稿日期: 2026-07-01; **改回日期:** 2026-07-16。 **责任编辑:** 甘娟娟。

期刊主页: <https://xbzrxx.cdut.edu.cn/>

基金项目: 中国石油西南油气田公司院士工作站项目;四川省科技计划项目(2024NSFTD0004)。

***通信作者:** 刘清友(1965—),男,博士,教授,研究方向:油气井工程,E-mail: liuqy66@aliyun.com。

引用格式: 刘清友,孙宗元,陈水银,等,2026. 四川盆地天然气工业的技术演化及驱动机制[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 53(4): 774—790.

Liu Q Y, Sun Z Y, Chen S Y, et al., 2026. Technological evolution and driving mechanisms of the natural gas industry in the Sichuan Basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 53(4): 774—790.

Technology, Chengdu 610059, China;

2. *College of Energy (College of Modern Shale Gas Industry), Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;*

3. *Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;*

4. *PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu 610015, China;*

5. *Research Institute of Petroleum Exploration and Development (RIPE), Beijing 100083, China;*

6. *PetroChina Planning & Engineering Institute (CPPEI), Beijing 100083, China*

Abstract: Natural gas is a strategic resource crucial for safeguarding national energy security and promoting the low-carbon energy transition, while the evolution of technological systems serves as the core driving force underpinning the high-quality development of the natural gas industry. As the birthplace and heartland of China's natural gas industry, the Sichuan Basin—with a history of natural gas extraction spanning over 2 000 years and serving as a core area for the construction of national oil and gas production bases—provides a typical sample for investigating the technological evolution of natural gas from a historical perspective. This paper systematically reviews the characteristics of six stages of natural gas technology in the Sichuan Basin, from ancient discovery and utilization to modern leapfrog development. The study reveals that the technological evolution of natural gas in the Sichuan Basin is not a linear superposition of individual technologies, but rather manifests as a continuous coupling process of “era demands and engineering challenges—pivotal technological breakthroughs—synergistic upgrading of technological systems—organizational guarantees for large-scale industrialization.” This technological evolution is primarily co-driven by two categories of factors: the basin's complex geological conditions and resource endowment constitute the endogenous constraints, while national energy strategies and market demand provide a strong external pull. In the face of future energy security and complex geological conditions, it is essential to adhere to an independent innovation path that takes pivotal technological breakthroughs as the core, synergistic upgrading of supporting technologies as the support, and large-scale industrialized organization as the guarantee, so as to provide a historical basis and mechanistic reference for the efficient exploitation and sustainable development of China's natural gas industry.

Key words: Sichuan Basin; natural gas industry; history of technological evolution; pivotal technology; driving mechanisms

近年来,国际能源供需格局、地缘政治风险和能源转型进程交织演变,全球能源供应的不确定性显著增强。与此同时,中国能源消费总量仍处于高位,能源安全保障和现代能源体系建设面临长期需求(贾承造等, 2023; 唐大麟, 2023; 胡文瑞等, 2025)。在绿色低碳转型背景下,天然气作为相对清洁、灵活和高效的化石能源,在能源保供、结构优化和低碳转型中具有重要支撑作用(胡文瑞等, 2019, 2025; 邹才能等, 2025)。因此,持续提升国内天然气资源的供应保障能力,是降低外部能源供给不确定性冲击、保障社会经济稳定用能的核心途径。然而,这一战略目标的实现不仅取决于资源规模和资金投入,更取决于能否形成适应复杂地质条件和工业发展需求的技术体系。面向未来中国天然气工业基地建设与宏观战略布局,有必要从长时段的技术演化过程出发,梳理不同历史阶段天然气勘探、开发和利

用技术的发展脉络,揭示资源条件、工程难题、技术突破与工业发展之间的内在关系,并进一步提炼技术体系形成与演进的客观规律。四川盆地是中国天然气工业的发源地与核心产区,具有 2 000 多年天然气开采历史,也是国家油气生产基地建设的重要区域(四川油气区中国石化编纂委员会, 2022; 戴金星, 2024; 胡文瑞等, 2025)。因此,以四川盆地为研究对象,系统总结中国天然气工业技术体系形成、关键技术突破和体系协同升级的历史过程,不仅能够为认识中国天然气工业发展规律提供历史依据,也可对未来天然气工业基地建设和自主创新路径提供技术镜鉴与机制参考。四川盆地天然气资源丰富,具有“满盆含气、多层系富集”的显著特征,但资源赋存条件复杂,呈现出多层系、多类型、多深度和多风险对象并存的特点(图 1; 刘树根等, 2013; 戴金星等, 2018),纵向发育多套跨层系有效产气储层,

记录古代浅层传统采气历史与现代逐步向深部拓展的勘探开发实践;各主力产气层系勘探与投产时序差异,与地质认知迭代、工程技术进步驱

动的勘探开发模式演进相对应(图 1)。围绕海相碳酸盐岩气藏、高含硫气藏、有水气藏、深层—超深层常规气、页岩气和致密气等开发对象,四

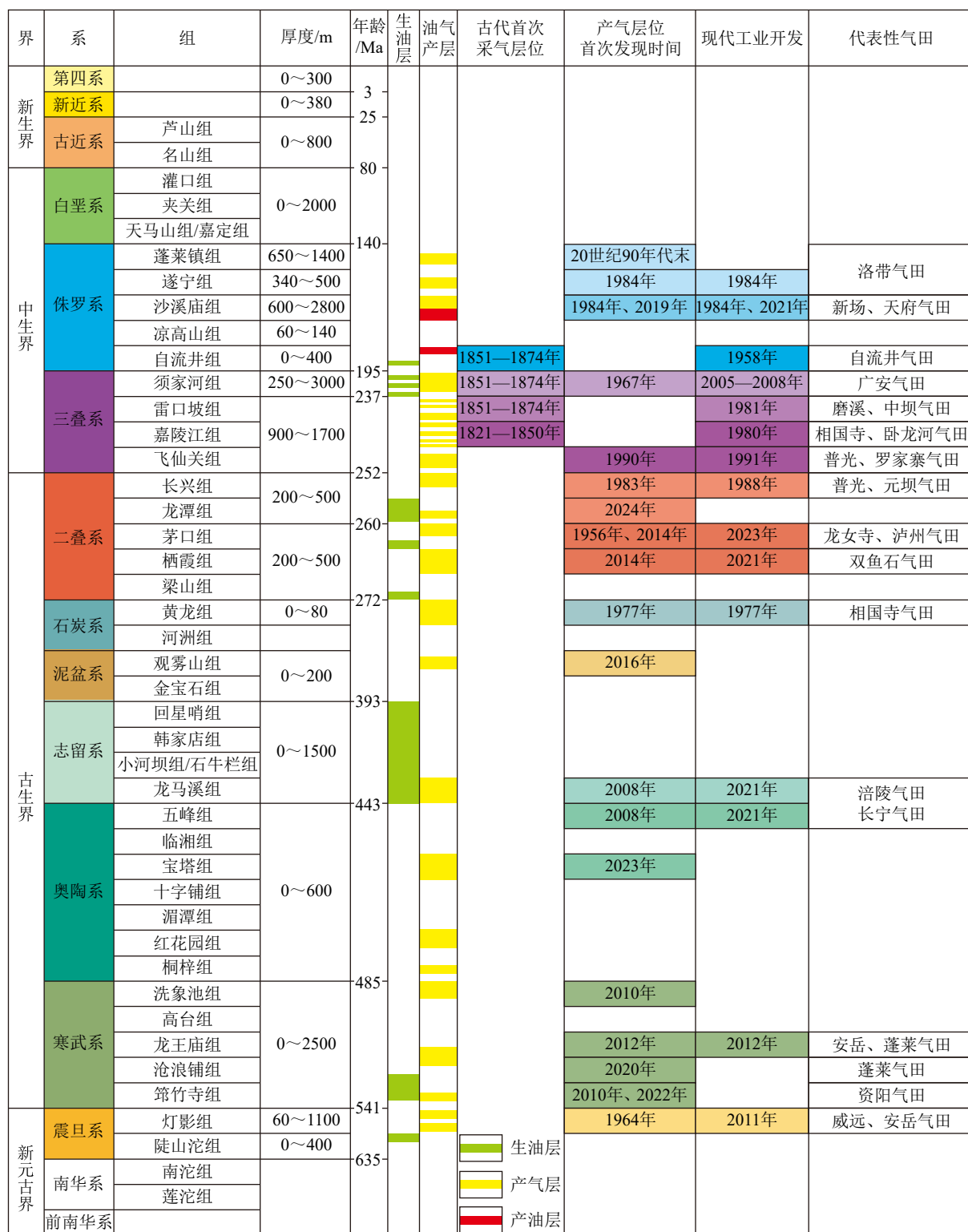


图 1 四川盆地纵向含气层系及代表性气田综合柱状图

Fig. 1 Composite stratigraphic column of vertical gas-bearing sequences and representative gas fields in the Sichuan Basin

(厚度、生油层、产油层、产气层修改自杨雨等, 2023a)

川盆地已形成一批具有区域特色的勘探开发技术体系,相关学术论著和基础资料也较为丰富(郭肖,2020;陈更生等,2021;马永生等,2022)。已有成果主要包括:一是地方志、企业志、油气田开发志和工业发展史等史志类综合性技术资料(四川油气区石油地质志编写组,1989;四川省地方志编纂委员会,1997);二是针对天然气地质、钻井工程、气藏开发、集输净化、输送储运和综合利用等专业技术成果(汤林等,2020;周淑慧等,2025);三是围绕资源评价、重大气田发现、理论技术突破和工业基地建设形成的专题研究、档案资料和专家咨询成果(李建忠等,2019;《中国天然气发展报告(2024)》编委会,2024)。在此基础上,依托中国石油西南油气田公司院士工作站相关研究任务,并结合行业技术专家长期积累的资料基础和专业认识,本文围绕关键事件、重要气田发现、技术进步和开发成效进行了系统梳理,为从历史视角分析四川盆地天然气工业技术演化过程提供重要的史料基础和技术资料支撑。

鉴于此,本文以四川盆地为研究对象,以技术演化为主线,按照“阶段特征—驱动机制—现实启示”的思路展开分析。本文所称“牵引性技术”,是指在特定历史阶段能够回应主要资源对象、时代需求和工程难题,并带动勘探、钻井、开发、集输、净化、利用等相关技术环节协同发展的关键技术或技术组合。其判断标准不在于单项技术是否最先进,而在于其是否能够推动技术体系协同升级,并支撑天然气工业阶段性跃升。在此概念框架下,通过系统刻画古代、近代和现代不同历史阶段牵引性技术的演化特征,剖析不同时期的资源对象、工程难题、牵引性技术、技术体系协同升级与工业发展结果之间的耦合关系,揭示技术演化驱动机制,以期为中国天然气工业建设的宏观战略布局提供历史依据与机制参考。

1 技术演化的阶段特征

在四川盆地天然气工业发展史研究中,阶段划分尚不存在统一方案。已有划分或以勘探发现为主线,偏重地质认识演变(张健和张奇,2002);或以产量增长为依据,对技术体系刻画不足(李鹭光,2021;张烈辉等,2021)。胡文瑞等(2025)

综合考量了开发领域拓展、储量、产量演变与关键技术突破等多重因素,将四川盆地天然气工业的演化历程划分为六个阶段。基于此,本文沿用其时间框架,并在胡文瑞院士等专家指导下,结合四川盆地技术演化特征,对六个阶段名称作进一步概括,分别为:古代天然气起源与发展(公元前202—公元1840年)、近代天然气工业发展(1840—1949年)、现代天然气工业体系建立(1949—1977年)、现代天然气工业改革发展(1978—1997年)、现代天然气工业稳定增长(1998—2011年)和现代天然气工业跨越式发展(2012年—现今)。上述各阶段的技术演化呈现出明显的阶段性特征,且均依次展现出“时代需求与工程难题—牵引性技术突破—技术体系协同升级—工业发展结果”的耦合演进路径(图2)。

1.1 古代天然气起源与发展(公元前202—公元1840年)

西汉初年,四川临邛一带在盐井开凿过程中发现浅层天然气逸出并燃烧,临邛火井由此成为古代天然气发现与利用的早期重要见证。古人将其用于熬煮盐卤,使天然气由自然燃烧现象进入井盐生产过程(彭久松,1977;鲁子健,1995)。公元219年前后,诸葛亮指导改进临邛火井(今邛崃地区)的利用方式,以竹管导气输送至盐灶,使天然气利用由井口燃烧发展为采、输、用结合的生产实践(刘广志,1998)。公元396年前后,为解决有害气体制约井下作业安全的难题,古人发明了“雨盘”,通过洒水搅动和稀释井内有害气体,体现出早期天然气井安全作业和有害气体处理的经验技术探索(刘广志,1998)。在持续向深层获取卤气资源的驱动下,四川盆地古代钻井技术经历了由大口径浅井、小口径井向小口径深井的演进。北宋庆历年间,卓筒井顿钻技术出现,显著提高了深层盐卤和伴生天然气的获取能力(林元雄,1988;刘广志,1998)。至明清时期,自流井地区天然气开发进一步走向成熟,窰盆采气、竹木管道输送、岩口簿记录、通天枰和亮筒子简易试井等技术逐渐出现,并与燊海井、磨子井等千米级深井钻凿实践共同推动天然气开发由早期火井利用,发展为采气、输气、用气、安全作业和经验评价相互配套的工程实践(四川油气区石油地质志编写组,1989;刘广志,1998;《中国油气田开



图 2 四川盆地天然气工业六阶段技术演化路径示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the six-stage technological evolution of the natural gas industry in the Sichuan Basin

发志》总编纂委员会, 2011a)。

在传统农耕社会和手工业生产条件下, 天然气尚未作为独立矿产资源被系统认识, 而是依托四川盆地井盐生产过程进入人类生产活动。盐卤煮制对持续稳定燃料的需求, 以及浅层天然气在盐井中逸出燃烧的现象, 使古人形成了对地下可燃气体的经验识别和利用意识(彭久松, 1977)。受当时科学认识和工程能力限制, 古代天然气开发的核心挑战主要集中在三个方面: 一是如何通过凿井获取深部卤气资源; 二是如何在井口采集、分离和控制天然气; 三是如何将井口天然气输送至盐灶并进入生产利用过程。因此, 古代天然气技术演进并不是围绕独立天然气工业展开, 而是围绕深井凿井取卤取气、井口采气控制和近距离输气用气逐步形成。

在上述需求牵引下, 深井顿钻、井口采气和竹管输气成为古代四川盆地天然气技术演进中最具牵引作用的技术突破。其中, 卓筒井及其后续深井顿钻技术解决了深部盐卤和伴生天然气获取问题, 并带动井位判断、井身结构、钻具组合、套管护井、提卤采气、修井完井等相关技术发展(林元雄, 1988); 窠盆采气和雨盘等井口及

井下作业方法, 实现了天然气由自然逸散和井口燃烧向可采集、可分离和可控制的生产对象转变; 竹管输气及后续管道输气方式进一步实现了井口向盐灶稳定输气, 促成了采、输、用生产体系的形成; 岩口簿、通天枳和亮筒子等经验方法, 为钻进地层、井口气压和产气能力的初步判断提供了依据。由此, 古代四川盆地逐步形成了“经验找气—深井钻凿—井口采气—管道输气—盐灶用气—简易评价”的原始技术链, 支撑了自流井地区盐气生产体系, 为自流井气田(通常被认为是世界上最早规模开发的天然气气田之一)奠定了技术基础。

1.2 近代天然气工业发展(1840—1949年)

近代前期, 四川盆地自流井、五通桥等地区仍延续卓筒井顿钻、窠盆采气、竹管输气等古代盐气生产方式, 天然气开发目标仍主要服务井盐生产, 找气和产量判断也多依赖井口现象、火焰高度、盐泉出露和地貌经验(刘广志, 1998; 《中国油气田开发志》总编纂委员会, 2011a)。19世纪后半叶以来, 随着近代地质学和石油地质理论传入, 李希霍芬等外国地质学家以及李四光、赵亚曾、黄汲清、谭锡畴、李春昱等中国地质学家

先后在四川盆地开展区域地质和石油地质调查,逐步厘清盆地地层序列、构造格局和含油气远景,使找气逻辑由经验判断转向地质理论指导(四川油气区石油地质志编写组,1989;四川省地方志编纂委员会,1997;四川油气区中国石化编纂委员会,2022)。至1936年国民政府资源委员会四川油矿探勘处成立后,四川盆地油气勘探进入有组织的调查与钻探阶段,并于1937年引入德式旋转钻机,在石油沟构造开钻巴1井,标志着天然气钻井由传统顿钻向机械化旋转钻探跨越(四川油气区石油地质志编写组,1989;《中国石油钻井》编辑委员会,2007;四川油气区中国石化编纂委员会,2022)。1939年,巴1井在三叠系嘉陵江组获得工业气流,并开展自然电位与视电阻率测井、单井集气站建设等配套实践,发现石油沟气田;随后,隆2井在圣灯山构造钻探获气并于1945年投产,推动圣灯山气田认识初步形成(四川省地方志编纂委员会,1997;《中国油气田开发志》总编纂委员会,2011b;四川油气区中国石化编纂委员会,2022)。

近代时期,四川盆地天然气开发的目标发生重要转变:天然气不再只是井盐生产的附属燃料,而逐步成为需要专门寻找、评价和开发的工业能源资源。抗战时期能源供应压力增加,天然气利用需求扩展至工业供气、交通动力和战时能源保障等领域(重庆市地方志编纂委员会,1999;《中国油气田开发志》总编纂委员会,2011a)。与此相对应,天然气开发面临的核心难题集中在三个方面:一是如何摆脱古代经验找气方式,建立基于地层、构造和含气层位认识的地质找气方法;二是如何突破传统顿钻在钻井效率、井深控制、井身质量和复杂地层适应性方面的局限,形成机械化钻井能力;三是如何改变依靠火焰高度和井口显示判断产量的传统方式,建立产层识别、压力测定、流量计量、气水关系判断和产能评价的仪器化方法。因此,本阶段技术演进的核心是围绕“地质找气、机械钻井、仪器测评”三个方向,将天然气由盐业附属性燃料逐步转化为可调查、可钻探、可测试和可开发的工业能源资源。

在上述需求牵引下,近代地质调查、旋转钻机、测井测试与计量技术成为本阶段最具牵引作用的技术突破。地质调查推动找气逻辑转向

以地层层序、构造形态和含气层位为依据,为石油沟、圣灯山、威远、海棠铺等构造的识别和井位部署提供了基础(四川油气区石油地质志编写组,1989;四川省地方志编纂委员会,1997;四川油气区中国石化编纂委员会,2022)。旋转钻机的引入则推动钻井由传统顿钻向机械化钻探转变,提高了机械破岩能力和复杂地层适应性,使工业气井钻探成为可能(刘广志,1998;《中国石油钻井》编辑委员会,2007)。测井测试、流量计量、井口装置和单井集气站等技术的应用,增强了层位识别、压力与流量测定、气液分离和单井生产组织能力,使天然气开发由经验估产转向仪器测评和工程化管理(四川省地方志编纂委员会,1997;《中国油气田开发志》总编纂委员会,2011a)。由此,近代四川盆地初步形成了“地质调查—构造部署—机械钻井—测井识别—试气计量—单井集输—工业供气”的技术链条,推动石油沟气田和圣灯山气田的发现,为四川盆地现代天然气工业奠定了地质认识、机械钻探、测井测试和单井生产基础。

1.3 现代天然气工业体系建立(1949—1977年)

1949年12月,西南军政委员会工业部接管原四川油矿探勘处和重庆营业所,开始恢复四川油气勘探开发工作;1950年第一次全国石油工业会议将四川盆地列为全国油气勘探重点地区之一,地质调查、油气钻探和专业队伍建设随之展开(四川省地方志编纂委员会,1997;中国石油天然气集团有限公司,2004)。20世纪50年代以来,四川盆地油气管理机构历经多次调整与更名,先后有中央燃料工业部石油管理总局重庆办事处、西南军政委员会工业部西南石油探勘处、中央燃料工业部石油管理总局西南石油探勘局以及石油工业部四川石油管理局等建制,石油工程第一师部分人员于1953年前后陆续南下入川,四川盆地逐步形成地质、物探、钻井、测井、试气和生产等专业队伍体系(四川省地方志编纂委员会,1997;中国石油天然气集团有限公司,2004)。1958—1965年间,通过川中石油大会战和红村“开气找油”会战,四川盆地油气勘探从“以油为主”转向“以气为主”,勘探认识由依赖地面现象转向地下构造、裂缝系统和多层系含气规律的综合研究(四川油气区石油地质志编写组,1989;四川省地方志编纂委员会,1997;四川石油

管理局和西南油气田分公司, 2003)。至 20 世纪 70 年代, 威远、卧龙河、中坝等重要气田相继发现, 川南、川东、川西南、川西北等气区逐步形成, 天然气净化装置、集输系统和长距离输气管线不断建设, 四川盆地由此初步建成中国第一个天然气工业生产基地(四川油气区石油地质志编写组, 1989; 四川省地方志编纂委员会, 1997; 四川石油管理局和西南油气田分公司, 2003)。

这一阶段的技术演进, 直接响应了国家能源工业建设和摆脱“贫油”认识约束的现实需求。中华人民共和国成立初期, 国内油气资源基础薄弱, 四川盆地虽有石油沟、圣灯山等早期气田发现, 但总体仍停留在少数气井、局部供气的起步阶段(四川油气区石油地质志编写组, 1989; 四川省地方志编纂委员会, 1997)。在此背景下, 四川盆地天然气工业需要解决的核心问题是如何把零散发现转化为可持续开发、稳定供应和综合利用的工业资源。具体可分述为四个核心难题: 一是如何从气苗、地面构造和局部钻探认识中系统识别含气层系与有利气区, 实现“找得准”; 二是如何应对产量递减、气水关系复杂、井间连通不清和含硫开发等问题, 实现“采得稳”; 三是如何突破井口就近利用和局部供气限制, 实现“送得出”; 四是如何拓展天然气在城市燃料、工业燃料、化工原料和战略资源中的应用, 实现“用得好”。因此, 本阶段技术发展的核心, 是推动四川盆地天然气由早期发现和局部利用, 转变为支撑国家工业化建设的现代工业体系。

针对上述瓶颈, 科学化天然气勘探技术、裂缝性气藏开发技术、天然气净化集输与长输管网技术及天然气综合利用技术等成为本阶段最具代表性的牵引性技术突破。以地面构造、地下构造和裂缝性气藏认识为核心的科学化勘探技术, 通过石油地质普查、重点构造详查、重磁电和地震勘探等工作, 将勘探目标由少数已知构造扩展到盆地尺度有利区评价, 运用构造曲率预测裂缝、“一占三沿”和“三占三沿”等方法, 有效解决了靶区精准预测的难题(四川石油管理局隆昌气矿, 1959, 1964; 四川油气区石油地质志编写组, 1989; 四川石油管理局编志办公室, 1998), 回答了“找得准”问题。以裂缝性气藏评价与稳产开发为核心的气田开发技术, 通过钻井、测井、试气、储量计算、多裂缝系统动态分析、控

水采气、酸化增产、防硫管材和采气树等技术逐步配套, 使天然气开发由单井获气和试采生产转向产层识别、产能评价、气水关系判断和气田动态调整相结合的开发方式(四川省地方志编纂委员会, 1997; 《中国油气田开发志》总编纂委员会, 2011a, 2011c; 乐宏等, 2011; 马辉运等, 2023), 回答了“采得稳”的问题。以净化处理、集输系统和长输管网为核心的天然气输送技术, 通过多井集气站、脱硫脱水装置、金属输气管道以及巴渝线、威成线、卧渝线等长距离输气工程的建设, 使天然气由井口资源转化为可跨区域调配和稳定供应的工业能源(四川省地方志编纂委员会, 1997; 宋德琦等, 2004; 《中国油气田开发志》总编纂委员会, 2011a), 回答了“送得出”的问题。天然气制炭黑、制合成油、提氮和化工利用等综合利用技术将天然气由单一燃料拓展为城市燃料、工业燃料、化工原料和战略资源(四川石油管理局天然气研究所志编纂委员会, 1995; 四川省地方志编纂委员会, 2014), 回答了“用得好”的问题。由此, 四川盆地初步形成“科学找气—气田开发—净化集输—管网供气—综合利用”的现代天然气工业技术链条, 标志着现代天然气工业体系的初步建立。

1.4 现代天然气工业改革发展(1978—1997 年)

1977 年, 相国寺构造相 18 井在石炭系获得高产工业气流, 开拓了川东天然气勘探开发的新局面。此后, 围绕川东石炭系高陡构造带开展持续探索和科研攻关, 石炭系勘探形成三次储量增长高峰, 相国寺、五百梯、大天池等一批大中型气田相继发现和开发(四川油气区石油地质志编写组, 1989)。1996 年, 川东北渡口河构造渡 1 井在飞仙关组获得高产工业气流, 开启了四川盆地飞仙关组鲕滩气藏大规模勘探的新领域(《中国油气田开发志》总编纂委员会, 2011c)。与此同时, 针对 20 世纪 70 年代初在中坝雷口坡组发现的高含硫气藏, 本阶段逐步实现了安全开发生产(四川省地方志编纂委员会, 1997); 针对川南老气区开发中后期地层出水、气井积液和产量递减等问题, 也逐步形成了系统的排水采气技术体系(四川省地方志编纂委员会, 1997)。

1978 年以后, 随着改革开放推进和能源需求增长, 四川盆地天然气工业的核心任务由初步建立工业体系转向持续增储上产和规模化发展。

70年代末,二叠系、三叠系裂缝性气藏经过长期开发,储量增长逐渐难以满足产量增长需要,储采矛盾显现,寻找接替层系和接替气区成为最迫切的问题(四川油气区石油地质志编写组,1989;《中国油气田开发志》总编纂委员会,2011c)。具体为四个核心难题:一是接替资源在哪里;二是复杂构造如何找得准;三是高含硫气藏如何安全开发;四是以川南为代表的老气区如何稳产增效。因此,本阶段技术发展的核心,是围绕“找接替、攻复杂、保安全、稳老区”,推动四川盆地天然气工业由体系初建后的稳定生产,转向改革发展阶段的规模突破。

针对上述难题,石炭系高陡构造气藏勘探开发技术、飞仙关组鲕滩气藏勘探技术、高含硫气藏安全开发与净化处理技术,以及老气区全生命周期管理与稳产技术,构成本阶段四个关键牵引性技术突破。石炭系高陡构造气藏勘探开发技术通过数字地震资料处理解释、高陡构造地质模式建立、碳酸盐岩薄储层预测和定向钻井中靶等技术,实现了从二叠系、三叠系裂缝性气藏向石炭系裂缝-孔隙型整装气藏的战略转移(谯抗逆,1992;四川石油管理局地质调查处,1995;胡光灿和谢姚祥,1997;四川石油管理局和西南油气田分公司,2003;四川省地方志编纂委员会,2014),回答了“找接替”的问题。飞仙关组鲕滩气藏勘探技术以渡1井突破为标志,通过鲕滩储层“亮点”预测技术和开江—梁平海槽认识的形成,将勘探对象由构造型气藏拓展到岩性-构造复合气藏(王一刚等,1998,2002;王罗兴等,2000;中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院,2002),回答了“攻复杂”的问题。高含硫气藏安全开发与净化处理技术围绕抗硫管材、防腐防护、脱硫净化、硫磺回收等技术形成配套能力,使安全开发和工业利用高含硫天然气资源具备了条件(刘祥康等,2004;雷振中等,2006;四川省地方志编纂委员会,2014),回答了“保安全”的问题。老气区全生命周期管理与稳产技术通过气藏数值模拟、现代试井、整体治水、系列排水采气等技术,支撑老气田由被动递减转向主动调整、稳产挖潜和生命周期延长(乐宏等,2011;马辉运等,2023),回答了“稳老区”的问题。由此,四川盆地逐步形成了“新层系突破-新类型气藏发现-高含硫气藏安全开发-老区稳产增效”的

技术链条,推动天然气工业进入改革发展阶段。

1.5 现代天然气工业稳定增长(1998—2011年)

继1996年渡1井突破后,围绕川东北地区开江—梁平海槽及其周缘礁滩相带持续勘探,相继发现渡口河、铁山坡、罗家寨、七里北等整装礁滩气田群,使飞仙关组鲕滩气藏成为石炭系之后的重要接替层系(《中国油气田开发志》总编纂委员会,2011c)。在此基础上,长兴组—飞仙关组海相礁滩气藏勘探进一步深化,龙岗、普光、元坝等气田相继取得重大突破,拓展了深层海相碳酸盐岩气藏的勘探空间(马永生等,2011)。随着普光、罗家寨、渡口河等高含硫气田陆续进入开发建设,四川盆地高含硫气田开始由勘探发现转向规模化安全开发(孔凡群等,2011;李鹭光,2011;葛枫等,2023)。2005年前后,川中地区须家河组陆相致密砂岩气藏实现规模突破,广安、合川、安岳、新场、蓬莱等气田相继取得重要进展,成为新的储量增长领域(赵文智等,2010)。伴随产量持续增长,四川盆地天然气年产量突破百亿立方米,忠武线、川气东送等跨区域输气工程相继建成投运,“川气出川”逐步实现,四川盆地由区域性气源基地进一步发展为支撑全国天然气供应格局的重要气源地(郭旭升等,2025)。

这一阶段的技术演进,紧密契合了国内天然气稳定增储、持续上产和跨区域供气能力提升的现实需求。所面临的核心问题是:如何在市场需求快速扩大、老气区递减压力持续存在和全国天然气供应格局逐步形成的背景下,实现天然气工业的稳定发展与向外拓展(《中国油气田开发志》总编纂委员会,2011c)。具体为四个核心难题:一是如何持续发现规模储量;二是如何安全开发高含硫大气田;三是如何将大规模岩性气藏储量转化为现实产量;四是如何实现跨区域稳定供气,推动“川气出川”。

针对上述难题,礁滩相控岩性气藏勘探评价技术、高含硫大气田安全清洁开发技术、须家河组致密砂岩气藏工程化开发技术,以及跨区域输气与管网调度技术,构成本阶段的四项关键牵引性技术突破。礁滩相岩性气藏勘探评价技术围绕开江—梁平海槽及其周缘礁滩相带,形成了从有利相带认识、储层预测到目标评价的勘探思路,推动礁滩气藏由局部发现走向成带勘探和规模评价(王一刚等,1998,2002;四川油气区中国

石化编纂委员会, 2022), 回答了“持续发现规模储量”的问题。高含硫大气田安全清洁开发技术围绕钻完井、井控安全、抗硫防腐、净化处理、硫磺回收和安全集输的开发体系, 使高含硫气田具备规模建产、稳定运行和清洁利用能力(刘祥康等, 2004; 徐双金等, 2004; 雷振中等, 2006; 《中国油气田开发志》总编纂委员会, 2011c; 四川省地方志编纂委员会, 2014), 回答了“安全开发高含硫大气田”的问题。须家河组致密砂岩气藏工程化开发技术通过岩性气藏识别、储层评价、水平井、气体钻井、分段压裂和大型加砂压裂等工程实践, 推动低孔低渗、强非均质气藏由规模探明转向有效动用和工程建产(居维清, 1999; 四川油气田发展简史编写组, 2008; 四川省地方志编纂委员会, 2014; 四川油气区中国石化编纂委员会, 2022), 回答了“岩性气藏储量转化为产量”的问题。跨区域输气与管网调度技术以忠武线、川气东送等工程为标志, 配合输气干线自动化调度, 使四川盆地天然气突破盆地内消纳限制, 实现向华中、华东等消费市场稳定外输(《中国油气田开发志》总编纂委员会, 2011a; 四川省地方志编纂委员会, 2014), 回答了“跨区域稳定供气”的问题。由此, 四川盆地逐步形成“礁滩增储—高含硫开发—致密气建产—川气出川”的技术链条, 支撑天然气工业进入稳定增长阶段。

1.6 现代天然气工业跨越式发展(2012年—现今)

2012年以来, 四川盆地天然气工业进入常规气、页岩气和致密气多类型资源协同开发的跨越式发展阶段。川中古隆起震旦系—寒武系深层海相碳酸盐岩气藏取得历史性突破: 高石1井发现后, 磨溪8井在龙王庙组获重大突破, 推动安岳特大型气田发现与快速建产, 龙王庙组和灯影组气藏成为四川盆地稳产上产的基础性气藏(杜金虎等, 2014)。此后, 川中古隆起北斜坡和川西—川北地区蓬探1井、角探1井、东坝1井以及双探1井等相继取得重要进展, 深层—超深层海相碳酸盐岩勘探向多层系、多区带扩展(杜金虎等, 2014; 张本健等, 2019)。与此同时, 页岩气实现从先导试验到规模开发的跨越, 继威201井、威201-H1井打通页岩气出气与水平井开发路径后, 2012年宁201-H1井和焦页1HF井分别推动长宁—威远和涪陵页岩气勘探开发取得重大突

破, 川南、涪陵、泸州、渝西等区块持续建产, 四川盆地逐步建成中国最大的页岩气生产基地(张成林等, 2019; 马新华等, 2020; 雍锐等, 2022; 郭旭升等, 2022)。同时, 陆相致密气也进入二次发展阶段, 2018年以来, 沙溪庙组致密砂岩气藏在天府、金秋、梓潼等地区实现规模增储和快速上产, 与须家河组共同构成四川盆地致密气接替领域(张道伟和杨雨, 2022)。伴随多类型资源协同推进, 四川盆地天然气产量连续跨越多个百亿立方米大关, 逐步形成支撑川渝千亿立方米国家油气生产基地建设的资源格局(杜金虎等, 2014; 雍锐等, 2022; 张道伟和杨雨, 2022)。

这一阶段的技术演进, 根本上服务于国家能源安全保障和川渝千亿立方米油气生产基地建设的现实需求。核心问题是: 在天然气消费持续扩大、对外依存度上升的背景下, 如何实现多类型天然气资源的协同开发与持续增储上产(郭威和潘继平, 2019)。具体面临四方面难题: 常规气如何实现深层—超深层稳产, 页岩气如何实现规模化上产, 致密气如何加快接替, 以及如何在多重约束下形成一体化工程组织能力。因此, 本阶段技术发展的核心, 是围绕“常规气稳产、页岩气上产、致密气接替、系统工程支撑”, 推动四川盆地天然气工业由稳定增长转向跨越式发展。

针对上述难题, 深层—超深层常规气勘探开发技术、页岩气规模化开发技术体系、致密气地质—工程一体化开发技术, 以及系统工程组织与产供储输销一体化技术, 构成本阶段的四个关键牵引性技术突破方向。深层—超深层常规气勘探开发技术围绕川中古隆起、德阳—安岳裂陷槽及其周缘有利区带, 形成多层系海相碳酸盐岩勘探开发体系, 支撑了安岳特大型气田、元坝超深层生物礁气田和蓬莱气田等重大勘探发现及开发实践(杜金虎等, 2014; 郭旭升和郭彤楼, 2014; 魏国齐等, 2025), 回答了“常规气如何稳产”的问题。页岩气规模化开发技术体系通过页岩气富集高产理论、有利区评价、水平井钻完井、分段压裂、工厂化作业等配套建设, 推动川南和涪陵等地区建成中国最重要的页岩气生产基地(张成林等, 2019; 胡文瑞等, 2019; 马新华等, 2020; 郭旭升等, 2022; 雍锐等, 2022; 郭彤楼等, 2025), 回答了“页岩气如何上产”的问题。致密气地质—

工程一体化开发技术围绕须家河组、沙溪庙组等陆相致密砂岩气藏,通过窄河道砂体精细刻画、储层评价、水平井部署、压裂改造和开发优化等综合实践,推动致密气由潜在资源转化为现实产量(杨加伟等, 2021; 郭贵安等, 2022; 张道伟和杨雨, 2022; 四川油气区中国石化编纂委员会, 2022; 杨雨等, 2023b),回答了“致密气如何接替”的问题。系统工程组织与产供储输销一体化技术通过多类型资源协同、储气库调峰、管网互联互通、智能化运行和高风险气藏安全环保管控,形成支撑高强度增储上产和稳定供气的系统工程能力(廖浩然等, 2020; 汤林等, 2020; 陈启兵, 2021; 罗金恒等, 2021; 魏东等, 2023),回答了“跨越式增长如何支撑”的问题。由此,四川盆地形成了“常规气稳产—页岩气上产—致密气接替—系统工程支撑”的技术链条,推动天然气工业进入多类型资源协同开发和系统工程化支撑的跨越式发展阶段。

2 技术演化的驱动机制

围绕“时代需求与工程难题—牵引性技术突破—技术体系协同升级—规模化组织保障—天然气工业跃升”这一主线,四川盆地天然气的技术演化呈现出明显的阶段性特点,且每个阶段均受到了两个因素的调控与驱动(图3)。首先,资源禀赋与复杂地质条件构成技术演化的内生约束,使不同时期的天然气开发不断面临新的资源对象和工程难题;其次,国家战略与能源需求构成技术演化

的外部牵引,推动关键技术问题上升为有组织的科技攻关和重大工程任务。

2.1 资源禀赋与复杂地质条件

截至2025年,四川盆地天然气资源量达 $86.34 \times 10^{12} \text{ m}^3$,具有“满盆含气、多层系富集”的显著特征,天然气资源在川南、川中、川北、川东等地区广泛分布,并在纵向上形成从震旦系—寒武系、志留系、二叠系、三叠系到侏罗系等多层系叠置的资源格局(四川油气区中国石化编纂委员会, 2022; 戴金星, 2024; 胡文瑞等, 2025)。这种得天独厚的资源禀赋,构成了四川盆地天然气早期发现与长时期开发的地质物质基础。古代临邛火井、自流井盐气共生和井盐生产中的天然气燃料利用,正是在浅层天然气显示和盐井伴生气被发现、采集和利用的条件下逐步形成的。由此,四川盆地形成了天然气发现、采集、输送和利用相衔接的早期生产实践,并奠定了其作为中国天然气工业发源地的资源基础和技术起点。

进入近代与现代以后,四川盆地天然气资源在长期勘探开发过程中不断向新层系、新类型和新领域拓展,其开发对象逐步扩展至多层系常规气、非常规气以及深层—超深层、高含硫—特高含硫等复杂赋存条件下的天然气资源(《中国油气田开发志》总编纂委员会, 2011a; 四川油气区中国石化编纂委员会, 2022; 戴金星, 2024; 胡文瑞等, 2025)。资源对象的持续拓展,也带来了新的地质认识难题和工程技术约束,使单一技术路线或外部技术简单移植难以适应新的开发对

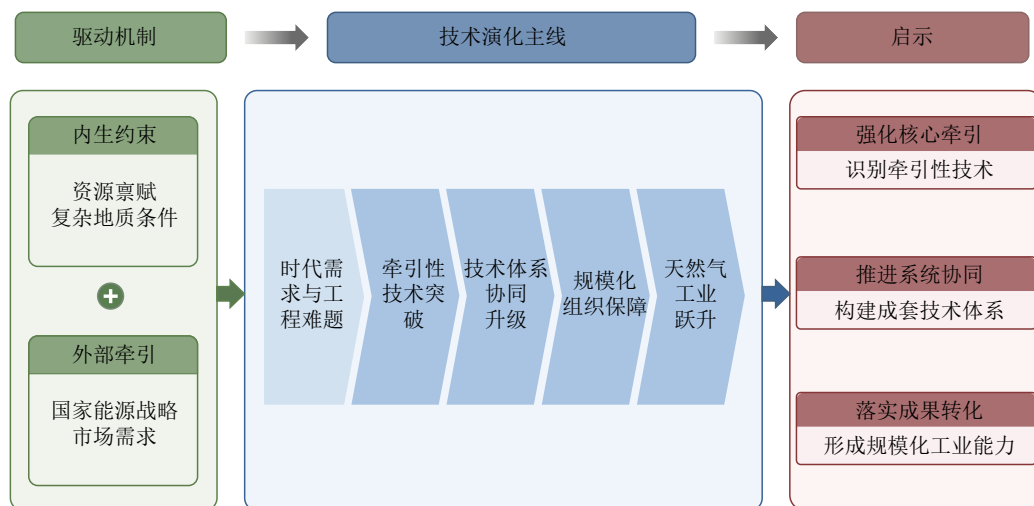


图3 四川盆地天然气技术演化驱动机制

Fig. 3 Driving mechanisms of natural gas technology evolution in the Sichuan Basin

象。正是在这一过程中,四川盆地天然气工业围绕新层系识别、新类型气藏评价、复杂气藏开发和系统供给能力建设,持续开展勘探、钻井、开发、改造、净化、输送与储运等技术研发和工程攻关。由此,资源对象持续拓展成为支撑四川盆地天然气技术持续演化的重要内生动力。

2.2 国家战略与能源需求

当能源供应、工业发展或国家能源安全面临新的需求时,天然气工业往往进入新的发展阶段,并催生相应的技术创新与工程突破。清咸丰年间,受太平天国运动影响,长江中下游淮盐运输受阻,清政府实施“川盐济楚”政策,大幅扩大自贡井盐生产规模(李榕, 1995; 四川省地方志编纂委员会, 1995; 丁宝桢, 2019)。在井盐增产需求带动下,钻井、采卤及天然气燃料利用技术同步发展,推动了早期天然气开发利用水平的提升(刘广志, 1998; 《中国石油钻井》编辑委员会, 2007)。中华人民共和国成立后,面对国家能源短缺和石油资源匮乏的局面,国家先后组织“四川石油会战”等重大勘探开发行动,发现威远气田后又提出“开气找油”战略,并推动天然气化工、炭黑和天然气合成油等利用技术的发展(四川油气区石油地质志编写组, 1989; 四川石油管理局天然气研究所志编纂委员会, 1995; 四川省地方志编纂委员会, 1997, 2014; 四川石油管理局和西南油气田分公司, 2003)。进入 21 世纪特别是 2012 年以来,随着中国能源消费持续增长以及国际能源格局变化,能源安全上升为国家战略需求。受能源资源禀赋“富煤贫油少气”的约束,中国的石油、天然气对外依存度长期居高不下,2023 年原油对外依存度达 72.91%(李泽等, 2025),天然气对外依存度达 40.61%~42.30%(段兆芳等, 2024)。加之大部分油气进口来自中东等地缘局势不稳定地区,进口通道多依赖马六甲海峡和霍尔木兹海峡,约 80% 的进口石油需经马六甲海峡运输(方雯等, 2016)。在全球地缘政治动荡的背景下,能源供应安全面临严峻挑战。2022 年俄乌冲突爆发后,西方国家对俄罗斯的多轮能源制裁推动全球天然气市场进入剧烈震荡周期,国际天然气价格大幅飙升、屡创历史新高(高珊珊, 2023),导致当年中国天然气进口量同比下降。能源供应链的保障逻辑从“效率优先”加速转向“安全优先”(姜洪殿等, 2023)。与此

同时,中美博弈持续升级,贸易摩擦对两国油气贸易产生深远影响(王庆瑜, 2020),进一步加大了能源供应链的外部不确定性。在此背景下,四川盆地承担起建设国家级天然气生产基地的重要任务(杜金虎等, 2014; 张成林等, 2019; 马新华等, 2020; 郭旭升等, 2022; 雍锐等, 2022; 张道伟和杨雨, 2022)。规模增储上产目标进一步牵引深层-超深层勘探开发、页岩气开发及长距离输送等关键技术持续突破,并推动天然气工业向更大规模、更高效率和更高保障能力方向发展。从“川盐济楚”时期的区域资源保障,到中华人民共和国成立后的工业化能源需求,再到新时代国家能源安全战略,外部需求始终是四川盆地天然气工业技术演化的重要牵引力量,并不断塑造技术突破的方向、节奏与强度。

国家战略与能源需求主导下的重大工程和市场应用场景,是外部需求转化为牵引性技术突破、技术体系协同升级和工业发展结果的重要载体。从微观层面看,市场应用场景进一步检验并推动技术向降本增效、稳定供给和自主可控方向发展。随着开发对象由常规气转向深层气、页岩气和致密气,城市燃气、工业燃料、化工原料、发电调峰和跨区域供气等需求,持续推动钻井提速、压裂改造、老井挖潜、国产装备替代、测井评价方法优化和生产运行智能化等技术改进。从宏观层面看,重大工程将能源安全、区域保供和清洁能源利用等外部需求,具体化为技术指标、工程约束和攻关任务。例如,“川盐济楚”将区域食盐供应和市场扩张需求转化为自贡井盐增产任务,推动钻井、采卤、天然气燃料利用、竹木管道输送以及井灶视号经营体系持续完善(四川省地方志编纂委员会, 1995; 刘广志, 1998; 《中国石油钻井》编辑委员会, 2007; 丁宝桢, 2019);“四川石油会战”“开气找油”战略转向和威远气田开发,将国家能源自主需求转化为天然气地质调查、深井钻探、测井测试、气田开发和净化集输等技术攻关任务(四川油气区石油地质志编写组, 1989; 四川石油管理局天然气研究所志编纂委员会, 1995; 四川省地方志编纂委员会, 1997; 四川石油管理局和西南油气田分公司, 2003);“川气出川”、川气东送、页岩气示范区和川渝千亿立方米国家油气生产基地建设,则将跨区域供气、非常规资源接替和规模增储

上产需求,转化为高含硫气田安全开发、天然气净化处理、长距离输送、水平井钻完井、分段压裂、工厂化作业和产供储输销协同等攻关方向(胡文瑞等, 2019; 马新华等, 2020; 雍锐等, 2022; 张道伟和杨雨, 2022; 四川油气区中国石化编纂委员会, 2022; 郭旭升等, 2025)。由此,重大工程和市场应用场景既是外部需求的承接载体,也是驱动和验证技术发展的平台,使国家战略与能源需求能够持续转化为四川盆地天然气技术演化的外部动力。

3 启示

3.1 现实问题引导形成牵引性技术突破

四川盆地天然气工业的技术演进表明,牵引性技术并非由单纯的技术积累自然产生,而是在时代能源需求提出新的工业目标、复杂资源条件形成关键制约的共同作用下出现。面向未来,国家能源安全、区域能源保供、能源结构优化和绿色低碳转型,将对天然气工业提出提高国内资源保障能力、增强稳定供给能力、降低开发成本、提升关键技术与装备自主可控水平等新的要求;与此同时,四川盆地天然气勘探开发正进一步向深层-超深层、页岩气和致密气、高含硫-特高含硫气藏、老气田稳产挖潜和储气调峰等复杂领域拓展,面临储层预测难、深井工程风险高、改造效果不确定、安全环保约束强和经济开发难度大等现实问题。因此,未来技术创新应从国家需求与复杂资源条件的结合部识别制约资源发现、规模建产、长期稳产和安全供给的核心瓶颈,集中优势科研力量、工程经验和产业资源开展系统攻关,形成能够率先突破关键难题并带动相关技术环节协同升级的牵引性技术。

3.2 牵引性技术突破带动技术板块协同升级

四川盆地天然气工业的发展经验表明,牵引性技术突破是技术体系协同升级的起点,但单项技术本身并不能直接形成稳定的工业生产能力。天然气资源开发涉及地质勘探、钻井技术、气田开发、矿场集输与处理、天然气输送与储运、天然气综合利用等六个技术板块,任何一个关键环节能力不足,都可能制约整体开发效果。因此,牵引性技术的真正作用,不仅在于解决某一局部难题,更在于围绕新的资源对象和工程目标,带动相关技术板块协同调整和同步升级。未

来技术创新应由单点突破转向体系化集成,在牵引性技术取得突破后,及时推进配套技术、装备、工艺和生产组织方式的适应性升级,形成与新资源对象相匹配、能够实现降本增效并持续迭代的成套技术体系。只有将牵引性技术嵌入完整技术链条,才能使单项技术优势转化为复杂资源开发的整体能力和稳定的工业生产能力。

3.3 技术成果的规模化工业应用

四川盆地天然气工业的发展历程表明,重大气田发现、规模建产和稳定供气,并非单纯依靠实验室成果或局部技术进步,而是在技术研发与工程实践相互促进、持续迭代的过程中实现的。重大工程和示范区建设不断提出新的技术需求,并为技术试验、评价和改进提供真实场景;技术突破及成套技术体系的形成,又反过来支撑工程扩大实施范围、提高建设效率和降低生产成本。因此,工程应用既是检验技术可靠性、适用性和经济性的关键环节,也是推动技术标准、装备配套化和生产组织优化的重要载体。

未来应进一步强化重大工程对技术创新、体系升级和成果转化的组织作用,依托深层-超深层天然气、页岩气、致密气、高含硫气田、老气田稳产和储气库建设等重大工程,形成“科研攻关—现场试验—评价改进—规模应用”的连续转化链条,并完善企业、高校、科研院所和装备制造单位之间的产学研用协同机制,推动技术标准、工程规范、国产装备、数字平台和专业队伍同步建设。通过示范区和规模化应用场景持续检验技术边界、经济性和安全性,促进技术成果由个别区块成功应用转化为可复制、可推广、可持续的工业模式,最终贯通“时代需求与工程难题—牵引性技术突破—技术体系协同升级—工业规模化组织保障”这一完整链条。

4 结论

(1)四川盆地天然气工业在古代、近代和现代六个发展阶段中,均呈现出由时代需求与工程难题催生牵引性技术,并进一步带动相关技术环节协同升级、支撑工业能力跃升的演化特征。本文通过对各阶段重要事件、牵引性技术突破、技术体系和工业成果的系统梳理,表明四川盆地天然气工业技术演化并非单项技术的线性叠加,而是“时代需求与工程难题—牵引性技术突破—

技术体系协同升级—工业规模化组织保障”连续耦合的结果。

(2)四川盆地天然气工业技术演化受到内外因素的共同驱动。其中,复杂地质条件与资源禀赋构成技术演化的内生约束,国家战略、能源需求和重大工程形成外部牵引,二者共同决定技术创新方向,并推动技术体系重构和工业发展阶段转换。

(3)四川盆地天然气工业的历史经验表明,面向国家能源安全和复杂资源开发,未来应从现实需求与关键瓶颈中识别具有全局带动作用的牵引性技术,集中优势资源开展系统攻关,并通过六大技术板块协同升级、重大工程组织实施和产学研用协同转化,推动技术成果形成可复制、可推广和可持续的规模化工业能力。

利益冲突声明: 本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

作者贡献声明: 刘清友负责论文选题提出、总体构思、研究框架设计和核心观点凝练,对论文重要学术内容进行指导、修改和最终审定,并作为通信作者负责稿件组织、学术协调与投稿沟通;孙宗元参与文献资料搜集、史料整理、论文初稿撰写、图件完善和稿件修改;陈水银参与文献资料搜集、史料整理;郎咸国参与论文构思、研究思路完善、技术演化框架讨论和全文修改;吴雪峰、王方、徐思源参与相关资料核对、工业发展史实梳理和稿件修改;陈雨雷参与正文撰写、修改及论文格式。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

[参 考 文 献]

- 陈更生, 杨雨, 杨洪志, 等, 2021. 页岩气地质综合评价技术[M]. 北京: 石油工业出版社.
- Chen G S, Yang Y, Yang H Z, et al., 2021. Geological comprehensive evaluation technology for shale gas[M]. Beijing: Petroleum Industry Press. (in Chinese)
- 陈启兵, 2021. 相国寺储气库[J]. 石油知识, (5): 22—23.
- 重庆市地方志编纂委员会, 1999. 重庆市志, 第四卷, 工业综述[M]. 重庆: 重庆出版社.
- 戴金星, 2024. 中国大气田及气源[M]. 北京: 石油工业出版社.
- Dai J X, 2024. Giant gas fields and gas sources in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press. (in Chinese)
- 戴金星, 倪云燕, 秦胜飞, 等, 2018. 四川盆地超深层天然气地球化学特征[J]. 石油勘探与开发, 45(4): 619—628.
- Dai J X, Ni Y Y, Qin S F, et al., 2018. Geochemical characteristics of ultra-deep natural gas in the Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 45(4): 619—628. (in Chinese)
- 丁宝桢, 2019. 《四川盐法志》整理校注[M]. 成都: 西南交通大学出版社.
- 杜金虎, 邹才能, 徐春春, 等, 2014. 川中古隆起龙王庙组特大型气田战略发现与理论技术创新[J]. 石油勘探与开发, 41(3): 268—277.
- Du J H, Zou C N, Xu C C, et al., 2014. Theoretical and technical innovations in strategic discovery of a giant gas field in Cambrian Longwangmiao Formation of central Sichuan paleo-uplift, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 41(3): 268—277. (in Chinese)
- 段兆芳, 张晓宇, 吴珉颀, 等, 2024. 2023 年国内外天然气市场回顾与 2024 年展望[J]. 国际石油经济, 32(3): 19—28.
- Duan Z F, Zhang X Y, Wu M J, et al., 2024. China's natural gas markets review in 2023 and outlook for 2024[J]. International Petroleum Economics, 32(3): 19—28. (in Chinese)
- 方雯, 程淑佳, 葛紫珩, 2016. 我国原油进口地域多元化存在的主要问题及优化策略[J]. 经济纵横, (9): 68—72.
- 高珊珊, 2023. 俄乌冲突对国际天然气市场的影响及形势研判[J]. 当代石油石化, 31(6): 14—18.
- Gao S S, 2023. Impact of Russia-Ukraine conflict on international natural gas market and subsequent trends prediction[J]. Petroleum & Petrochemical Today, 31(6): 14—18. (in Chinese)
- 葛枫, 贾长青, 李宏, 2023. 四川盆地罗家寨高含硫气田安全高效开发与长期稳产关键技术[J]. 天然气工业, 43(9): 85—92.
- Ge F, Jia C Q, Li H, 2023. Key technologies for safe and efficient development and long-term stable production of the Luo-jia-zhai high-sulfur gas field in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 43(9): 85—92. (in Chinese)
- 郭贵安, 关旭, 肖富森, 等, 2022. 四川盆地中部侏罗系沙溪庙组致密砂岩气藏地震一体化描述技术[J]. 天然气工业, 42(1): 40—50.
- Guo G A, Guan X, Xiao F S, et al., 2022. Integrated seismic description technology for tight sandstone gas reservoir of Jurassic Shaximiao Formation in the central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 42(1): 40—50. (in Chinese)
- 郭彤楼, 董晓霞, 魏力民, 等, 2025. 深层—超深层海相页岩气差异富集与高产机理[J]. 石油与天然气地质, 46(6): 1792—1806.
- Guo T L, Dong X X, Wei L M, et al., 2025. Mechanisms of the differential enrichment and high productivity of deep to ultra-deep marine shale gas reservoirs[J]. Oil & Gas Geol-

- ogy, 46(6): 1792—1806. (in Chinese)
- 郭威, 潘继平, 2019. “十三五”全国油气资源勘查开采规划执行情况中期评估与展望[J]. 天然气工业, 39(4): 111—117.
- Guo W, Pan J P, 2019. Mid-term evaluation and prospect of the implementation of the 13th Five-Year Plan for the national oil and gas resources exploration and mining plan[J]. Natural Gas Industry, 39(4): 111—117. (in Chinese)
- 郭肖, 2020. 高含硫有水气藏水侵动态与水平井产能评价[M]. 北京: 科学出版社.
- Guo X, 2020. Water invasion performance analysis and horizontal well deliverability evaluation of high sulfur gas reservoir with water bearing[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- 郭旭升, 郭彤楼, 2014. 四川盆地元坝超深层生物礁大气田高效勘探及关键技术[J]. 科技成果管理与研究, (12): 68—71.
- 郭旭升, 胡德高, 舒志国, 等, 2022. 重庆涪陵国家级页岩气示范区勘探开发建设进展与展望[J]. 天然气工业, 42(8): 14—23.
- Guo X S, Hu D G, Shu Z G, et al., 2022. Exploration, development and construction in the Fuling national shale gas demonstration area in Chongqing: progress and prospect[J]. Natural Gas Industry, 42(8): 14—23. (in Chinese)
- 郭旭升, 魏志红, 王威, 等, 2025. 四川盆地油气资源特征与天然气高质量上产展望[J]. 天然气工业, 45(12): 40—52.
- Guo X S, Wei Z H, Wang W, et al., 2025. Characteristics of oil and gas resources in the Sichuan Basin and prospects for high-quality gas production growth[J]. Natural Gas Industry, 45(12): 40—52. (in Chinese)
- 胡光灿, 谢姚祥, 1997. 中国四川东部高陡构造石炭系气田[M]. 北京: 石油工业出版社.
- Hu G C, Xie Y X, 1997. Carboniferous gas fields in high steep structures of Eastern Sichuan[M]. Beijing: Petroleum Industry Press. (in Chinese)
- 胡文瑞, 曹耀峰, 马新华, 2019. 中国页岩气开发概论[M]. 北京: 石油工业出版社.
- Hu W R, Cao Y F, Ma X H, 2019. Introduction to shale gas development in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press. (in Chinese)
- 胡文瑞, 季丽丹, 曹正林, 等, 2025. 中国天然气工业基地跨越式发展之路: 突破与创新[J]. 天然气工业, 45(12): 215—227.
- Hu W R, Ji L D, Cao Z L, et al., 2025. Leap-forward development of China's natural gas industrial base: breakthrough and innovation[J]. Natural Gas Industry, 45(12): 215—227. (in Chinese)
- 贾承造, 王祖纲, 姜林, 等, 2023. 中国油气勘探开发成就与未来潜力: 深层、深水与非常规油气——专访中国科学院院士、石油地质与构造地质学家贾承造[J]. 世界石油工业, 30(3): 1—8.
- Jia C Z, Wang Z G, Jiang L, et al., 2023. Achievements and future potential for oil & gas exploration and development in China: deep-formation, deep-water and unconventional reservoirs—interview with JIA Chengzao, Academician of the CAS, geologist in petroleum geology and structure[J]. World Petroleum Industry, 30(3): 1—8. (in Chinese)
- 姜洪殿, 任重远, 梁巧梅, 2023. 地缘政治动荡对中国能源环境的全局经济影响及其对策[J]. 中国人口·资源与环境, 33(9): 1—13.
- Jiang H D, Ren Z Y, Liang Q M, 2023. Economy-wide impacts of geopolitical turmoil on China's energy environment and its countermeasures[J]. China Population, Resources and Environment, 33(9): 1—13. (in Chinese)
- 居维清, 1999. 中美联合特大型加砂压裂在川中油气田获重大成功[J]. 天然气工业, 19(3): 39.
- 孔凡群, 王寿平, 曾大乾, 2011. 普光高含硫气田开发关键技术[J]. 天然气工业, 31(3): 1—4.
- Kong F Q, Wang S P, Zeng D Q, 2011. Key techniques for the development of the Puguang Gas Field with a high content of H₂S[J]. Natural Gas Industry, 31(3): 1—4. (in Chinese)
- 乐宏, 唐建荣, 葛有琰, 等, 2011. 排水采气工艺技术[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 雷振中, 孙万里, 唐光华, 等, 2006. 罗家寨飞仙关高含硫气藏水平井完井技术[J]. 钻采工艺, 29(1): 29—32.
- Lei Z Z, Sun W L, Tang G H, et al., 2006. The horizontal well completion technology in LuoJiazhai T₁^{f3-1} research with high concentration H₂S[J]. Drilling & Production Technology, 29(1): 29—32. (in Chinese)
- 李建忠, 郑民, 郭秋麟, 等, 2019. 第四次油气资源评价[M]. 北京: 石油工业出版社.
- Li J Z, Zheng M, Guo Q L, et al., 2019. Fourth assessment for oil and gas resource[M]. Beijing: Petroleum Industry Press. (in Chinese)
- 李鹭光, 2011. 四川盆地天然气勘探开发技术进展与发展方向[J]. 天然气工业, 31(1): 1—6.
- Li L G, 2011. Technical progress and developing orientation in natural gas exploration and development in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 31(1): 1—6. (in Chinese)
- 李鹭光, 2021. 中国天然气工业发展回顾与前景展望[J]. 天然气工业, 41(8): 1—11.
- Li L G, 2021. Development of natural gas industry in China: review and prospect[J]. Natural Gas Industry, 41(8): 1—11. (in Chinese)
- 李榕, 1995. 自流井记[M]// 王显春, 颜继录, 何兴明. 十三峰书屋全集. 成都: 巴蜀书社.
- 李泽, 方瑞瑞, 冯连勇, 2025. 中国油气进出口 30 年状况分析[J]. 天然气与石油, 43(1): 136—143.
- Li Z, Fang R R, Feng L Y, 2025. Analysis of China's oil and gas imports and exports over the past 30 years[J]. Natural Gas

- and Oil, 43(1): 136—143. (in Chinese)
- 廖浩然, 任科, 禹贵成, 等, 2020. 相国寺储气库智能化建设探索与实践[C]//第 32 届全国天然气学术年会(2020)论文集. 重庆: 中国石油学会天然气专业委员会: 3005—3014.
- 林元雄, 1988. 井盐凿井技术是中国第五大发明[J]. 盐业史研究, (2): 42—51.
- 刘广志, 1998. 中国钻探科学技术史[M]. 北京: 地质出版社.
- 刘树根, 孙玮, 王国芝, 等, 2013. 四川叠合盆地油气富集原因剖析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 40(5): 481—497.
- Liu S G, Sun W, Wang G Z, et al., 2013. Analysis of causes of oil and gas accumulation in superimposed Sichuan Basin of China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 40(5): 481—497. (in Chinese)
- 刘祥康, 谈锦锋, 李季, 2004. 罗家寨气田飞仙关气藏高酸性气井完井工艺技术实践[J]. 钻采工艺, 27(3): 20—22.
- Liu X K, Tan J F, Li J, 2004. Completion technique of high sour gas well in Feixianguan reservoir of Luoiazhai gas field[J]. Drilling & Production Technology, 27(3): 20—22. (in Chinese)
- 鲁子健, 1995. 临邛火井考[J]. 盐业史研究, (3): 12—18.
- 罗金恒, 李丽锋, 王建军, 等, 2021. 储气库完整性关键技术研究[R]. 西安: 中国石油集团工程材料研究院有限公司.
- 马辉运, 叶长青, 杨健, 等, 2023. 有水气藏排水采气工艺技术[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 马新华, 谢军, 雍锐, 等, 2020. 四川盆地南部龙马溪组页岩气储集层地质特征及高产控制因素[J]. 石油勘探与开发, 47(5): 841—855.
- Ma X H, Xie J, Yong R, et al., 2020. Geological characteristics and high production control factors of shale gas reservoirs in Silurian Longmaxi Formation, southern Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 47(5): 841—855. (in Chinese)
- 马永生, 等, 2022. 中国海相油气勘探[M]. 2 版. 北京: 地质出版社.
- 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 2011. 深层、超深层碳酸盐岩油气储层形成机理研究综述[J]. 地学前缘, 18(4): 181—192.
- Ma Y S, Cai X Y, Zhao P R, 2011. The research status and advances in porosity evolution and diagenesis of deep carbonate reservoir[J]. Earth Science Frontiers, 18(4): 181—192. (in Chinese)
- 彭久松, 1977. 试说临邛火井——我国古代天然气开发史探索之一[J]. 井矿盐技术, (4): 8—17.
- 譙抗逆, 1992. 发展高陡构造定向钻井工艺技术提高探井获气成功率[J]. 天然气工业, 12(6): 46—51.
- Qiao K N, 1992. Developing the technology and technique of directional drilling in high and steep structure to raise the success ratio of exploratory wells[J]. Natural Gas Industry, 12(6): 46—51. (in Chinese)
- 四川省地方志编纂委员会, 1995. 四川省志·盐业志[M]. 成都: 四川科学技术出版社.
- 四川省地方志编纂委员会, 1997. 四川省志·石油天然气工业志[M]. 成都: 四川人民出版社.
- 四川省地方志编纂委员会, 2014. 四川省志·石油天然气志(第五十五卷)[M]. 北京: 方志出版社.
- 四川石油管理局编志办公室, 1998. 石油勘探[M]. 成都: 四川石油管理局.(内部资料)
- 四川石油管理局地质调查处, 1995. 四川盆地相国寺构造地震详查总结报告[R]. 成都: 四川石油管理局地质调查处.(内部报告)
- 四川石油管理局隆昌气矿, 1959. 川南圣灯山气田裂缝研究报告[R]. 隆昌: 四川石油管理局隆昌气矿.(内部报告)
- 四川石油管理局隆昌气矿, 1964. 圣灯山气田地质研究报告[R]. 隆昌: 四川石油管理局隆昌气矿.(内部报告)
- 四川石油管理局天然气研究所志编纂委员会, 1995. 天然气研究所志[M]. 成都: 四川人民出版社.
- 四川石油管理局, 西南油气田分公司, 2003. 中国第一个天然气工业基地——四川气田[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 四川油气区石油地质志编写组, 1989. 中国石油地质志(卷十)·四川油气区[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 四川油气区中国石化编纂委员会, 2022. 中国石油地质志: 西南油气区上·卷十三[M]. 2 版. 北京: 石油工业出版社.
- 四川油气田发展简史编写组, 2008. 四川油气田发展简史[M]. 成都: 四川科学技术出版社.
- 宋德琦, 苏建华, 任启瑞, 等, 2004. 天然气输送与储存工程[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 唐大麟, 2023. 我国具备更快发展天然气的储量优势——访中国科学院院士、天然气地质与地球化学家戴金星[J]. 中国石油企业, (6): 21—26.
- 汤林, 宋彬, 唐馨, 等, 2020. 页岩气地面工程技术[M]. 北京: 石油工业出版社.
- Tang L, Song B, Tang X, et al., 2020. Surface engineering technology for shale gas[M]. Beijing: Petroleum Industry Press. (in Chinese)
- 王罗兴, 谢芳, 李油, 2000. 川东北飞仙关组鲕滩气藏地震响应特征及勘探展望[J]. 天然气工业, 20(5): 26—28.
- Wang L X, Xie F, Li Y, 2000. Seismic response characteristics and exploration prospects of the oolitic beach gas reservoirs in Feixianguan Formation in northeast Sichuan[J]. Natural Gas Industry, 20(5): 26—28. (in Chinese)
- 王庆瑜, 2020. 贸易摩擦升级对中美油气贸易的影响研究[J]. 对外经贸实务, (2): 26—29.
- 王一刚, 刘划一, 文应初, 等, 2002. 川东北飞仙关组鲕滩储层分布规律、勘探方法与远景预测[J]. 天然气工业, 22(增刊 1): 14—19.
- Wang Y G, Liu H Y, Wen Y C, et al., 2002. Distribution law, exploration method and prospectiveness prediction of the

- oolitic beach reservoirs in Feixianguan Formation in north-east Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 22(8): 14—19. (in Chinese)
- 王一刚, 文应初, 张帆, 等, 1998. 川东地区上二叠统长兴组生物礁分布规律[J]. 天然气工业, 18(6): 10—15.
- Wang Y G, Wen Y C, Zhang F, et al., 1998. Distribution law of the organic reefs in Changxing Formation of Upper Permian in east Sichuan[J]. Natural Gas Industry, 18(6): 10—15. (in Chinese)
- 魏东, 李长勇, 何国松, 等, 2023. 油气田公司重点产能建设项目驻场 HSE 监督模式探讨[J]. 石油化工安全环保技术, 39(5): 1—3.
- Wei D, Li C Y, He G S, et al., 2023. Discussion on on-site HSE supervision mode for key capacity construction projects of oil and gas field companies[J]. Petrochemical Safety and Environmental Protection Technology, 39(5): 1—3. (in Chinese)
- 魏国齐, 张本健, 谢增业, 等, 2025. 深层超深层碳酸盐岩特大型气田形成主控因素——以四川盆地安岳和蓬莱气田为例[J]. 中国石油勘探, 30(2): 1—15.
- Wei G Q, Zhang B J, Xie Z Y, et al., 2025. Main controlling factors for the formation of deep to ultra-deep carbonate giant gas fields: a case study of Anyue and Penglai gas fields in Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 30(2): 1—15. (in Chinese)
- 徐双金, 刘旭光, 李开, 等, 2004. LO-CAT 工艺技术在隆昌天然气净化厂的应用[J]. 石油与天然气化工, 33(1): 24—26.
- 杨加伟, 熊青山, 吴胜, 等, 2021. 页岩气水平井防塌水基钻井液体系研究[J]. 科学技术与工程, 21(12): 4891—4896.
- Yang J W, Xiong Q S, Wu S, et al., 2021. Anti-sloughing water based drilling fluid system for shale gas horizontal wells[J]. Science Technology and Engineering, 21(12): 4891—4896. (in Chinese)
- 杨雨, 文龙, 周刚, 等, 2023a. 四川盆地油气勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. 石油学报, 44(12): 2045—2069.
- Yang Y, Wen L, Zhou G, et al., 2023a. New fields, new types and resource potentials of hydrocarbon exploration in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 44(12): 2045—2069. (in Chinese)
- 杨雨, 谢继容, 曹正林, 等, 2023b. 四川盆地天府气田沙溪庙组大型致密砂岩气藏形成条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 44(6): 917—932.
- Yang Y, Xie J R, Cao Z L, et al., 2023b. Forming conditions and key technologies for exploration and development of large tight sandstone gas reservoirs in Shaximiao Formation, Tianfu gas field of Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 44(6): 917—932. (in Chinese)
- 雍锐, 陈更生, 杨学锋, 等, 2022. 四川长宁—威远国家级页岩气示范区效益开发技术与启示[J]. 天然气工业, 42(8): 136—147.
- Yong R, Chen G S, Yang X F, et al., 2022. Profitable development technology of the Changning-Weiyuan National Shale Gas Demonstration Area in the Sichuan Basin and its enlightenment[J]. Natural Gas Industry, 42(8): 136—147. (in Chinese)
- 张本健, 方进, 尹宏, 等, 2019. 高产水平井的突破与四川盆地深层常规气藏巨大的勘探开发潜力[J]. 天然气工业, 39(12): 1—9.
- Zhang B J, Fang J, Yin H, et al., 2019. A breakthrough in high-yield horizontal gas wells and great exploration and development potential in deep conventional gas reservoirs in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 39(12): 1—9. (in Chinese)
- 张成林, 张鉴, 李武广, 等, 2019. 渝西大足区块五峰组—龙马溪组深层页岩储层特征与勘探前景[J]. 天然气地球科学, 30(12): 1794—1804.
- Zhang C L, Zhang J, Li W G, et al., 2019. Deep shale reservoir characteristics and exploration potential of Wufeng-Longmaxi Formations in Dazu area, western Chongqing[J]. Natural Gas Geoscience, 30(12): 1794—1804. (in Chinese)
- 张道伟, 杨雨, 2022. 四川盆地陆相致密砂岩气勘探潜力与发展方向[J]. 天然气工业, 42(1): 1—11.
- Zhang D W, Yang Y, 2022. Exploration potential and development direction of continental tight sandstone gas in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 42(1): 1—11. (in Chinese)
- 张健, 张奇, 2002. 四川盆地油气勘探——历史回顾及展望[J]. 天然气工业, 22(增刊 1): 3—7.
- 张烈辉, 胡勇, 李小刚, 等, 2021. 四川盆地天然气开发历程与关键技术进展[J]. 天然气工业, 41(12): 60—72.
- Zhang L H, Hu Y, Li X G, et al., 2021. History and key technological progress of natural gas development in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 41(12): 60—72. (in Chinese)
- 赵文智, 王红军, 徐春春, 等, 2010. 川中地区须家河组天然气藏大范围成藏机理与富集条件[J]. 石油勘探与开发, 37(2): 146—157.
- Zhao W Z, Wang H J, Xu C C, et al., 2010. Reservoir-forming mechanism and enrichment conditions of the extensive Xujiahe Formation gas reservoirs, central Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 37(2): 146—157. (in Chinese)
- 中国石油天然气集团有限公司, 2004. 中国石油组织史资料: 第一卷[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院, 2002. 四川盆地东北部飞仙关组鲕滩储层分布规律研究及勘探目标选

- 择[R]. 成都: 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院.(内部报告)
- 《中国石油钻井》编辑委员会, 2007. 中国石油钻井[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 《中国天然气发展报告(2024)》编委会, 2024. 中国天然气发展报告(2024)[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 《中国油气田开发志》总编纂委员会, 2011a. 中国油气田开发志——西南(中国石油)油气区油气田卷[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 《中国油气田开发志》总编纂委员会, 2011b. 中国油气田开发志[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 《中国油气田开发志》总编纂委员会, 2011c. 中国油气田开发志·西南(中国石油)油气区卷(卷十三)[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 周淑慧, 沈鑫, 李广, 等, 2025. 中国“十四五”天然气产业发展回顾与“十五五”展望[J]. 天然气工业, 45(7): 24—39.
- Zhou S H, Shen X, Li G, et al., 2025. China's natural gas industry: review of the 14th Five-Year Plan and prospects of the 15th Five-Year Plan[J]. Natural Gas Industry, 45(7): 24—39. (in Chinese)
- 邹才能, 陶士振, 吴松涛, 等, 2025. 四川盆地“气大庆”建设成效及天然气千亿立方米产能基地发展战略[J]. 天然气工业, 45(12): 26—39.
- Zou C N, Tao S Z, Wu S T, et al., 2025. Construction achievements of “Gas Daqing” in the Sichuan Basin and development strategies for a natural gas productivity base with a capacity of 100 billion cubic meters[J]. Natural Gas Industry, 45(12): 26—39. (in Chinese)