

文章编号: 1000-0747(2019)06-1037-10

DOI: 10.11698/PED.2019.06.03

新中国天然气勘探开发 70 年来的重大进展

戴金星, 秦胜飞, 胡国艺, 倪云燕, 甘利灯, 黄士鹏, 洪峰

(中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科技项目 (2013B-0601)

摘要: 新中国成立 70 年来天然气勘探开发取得重大进展, 从贫气国跃升为世界第 6 产气大国。1949 年中国年产气量为 $1.117 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、探明天然气储量为 $3.85 \times 10^8 \text{ m}^3$, 人均年用气量和储量分别为 0.0206 m^3 和 0.7107 m^3 。至 2018 年, 人均年国产气 114.8576 m^3 , 人均国内储量 12011.08 m^3 , 70 年内人均年国产气量和国内储量分别增加 5 575 倍和 16 900 倍。勘探开发大气田是快速发展天然气工业的主要途径。中国目前已发现大气田共 72 个, 主要分布在四川 (25 个)、鄂尔多斯 (13 个) 和塔里木 (10 个) 3 个盆地, 2018 年这 3 个盆地大气田共产气 $1039.26 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占中国总产气量 65%, 至 2018 年底 72 个大气田累计探明天然气储量 $124504 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占全国天然气储量 $16.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 的 75%。天然气新理论推动中国天然气工业更好更快发展, 1979 年以来煤成气新理论助力中国大批以煤系为主要烃源岩的气田的发现, 2018 年煤成气大气田产量分别占中国产气量和大气田产气量的 50.93% 和 75.47%。页岩气理论推动下, 本世纪发现涪陵、长宁、威远和威荣页岩气田, 2018 年已探明页岩气地质储量 $10455.67 \times 10^8 \text{ m}^3$, 年产气 $108.8 \times 10^8 \text{ m}^3$, 昭示了中国页岩气有较好前景。图 5 表 1 参 64

关键词: 中国; 天然气; 煤成气; 页岩气; 产量; 储量; 勘探开发进展

中图分类号: TE122

文献标识码: A

Major progress in the natural gas exploration and development in the past seven decades in China

DAI Jinxing, QIN Shengfei, HU Guoyi, NI Yunyan, GAN Lideng, HUANG Shipeng, HONG Feng

(PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China)

Abstract: China has made significant progress in the exploration and development of natural gas in the past 70 years, from the gas-poor country to the world's sixth largest gas production country. In 1949, the annual gas output in China was $1.117 \times 10^4 \text{ m}^3$, the proved gas reserves were $3.85 \times 10^8 \text{ m}^3$, and the average annual gas consumption and available reserves of per person were 0.0206 m^3 and 0.7107 m^3 , respectively. By 2018, the average domestic annual gas production per person was 114.8576 m^3 and the reserves were 12011.08 m^3 , and the average domestic annual gas production and reserves per person in the past 70 years increased by 5 575 times and 16 900 times, respectively. The exploration and development of large gas fields is the main way to rapidly develop the natural gas industry. 72 large gas fields have been discovered in China so far, mainly distributed in three basins, Sichuan (25), Ordos (13) and Tarim (10). In 2018, the total gas production of the large gas fields in these three basins was $1039.26 \times 10^8 \text{ m}^3$, accounting for 65% of the total gas production in China. By the end of 2018, the cumulative proved gas reserves of the 72 large gas fields had amounted to $124504 \times 10^8 \text{ m}^3$, accounting for 75% of the total national gas reserves ($16.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$). New theories of natural gas have promoted the development of China's natural gas industry faster. Since 1979, the new theory of coal-derived gas has boosted the discovery of gas fields mainly from coal-measure source rocks in China. In 2018, the gas production of large coal-derived gas fields in China accounted for 50.93% and 75.47% of the total national gas production and total gas production of large gas fields, respectively. Guided by shale gas theories, shale gas fields such as Fuling, Changning, Weiyuan and Weirong have been discovered. In 2018, the total proved geological reserves of shale gas were $10455.67 \times 10^8 \text{ m}^3$, and the annual gas production was $108.8 \times 10^8 \text{ m}^3$, demonstrating a good prospect of shale gas in China.

Key words: China; natural gas; coal-derived gas; shale gas; gas production; gas reserves; exploration and development progress

引用: 戴金星, 秦胜飞, 胡国艺, 等. 新中国天然气勘探开发 70 年来的重大进展[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(6): 1037-1046.

DAI Jinxing, QIN Shengfei, HU Guoyi, et al. Major progress in the natural gas exploration and development in the past seven decades in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(6): 1037-1046.

0 引言

新中国成立 70 年来, 中国天然气勘探开发取得了

重大进展, 从贫气国跃升为世界第 6 产气大国。从人均拥有气量和天然气储量呈量级陡升足以说明中国从贫气国到产气大国的历程。1949 年中国年产气

$1.117 \times 10^4 \text{ m}^{3[1-2]}$, 年人均用气 $0.020 6 \text{ m}^3$, 2018 年产气 $1.602.7 \times 10^8 \text{ m}^{3[3]}$, 年人均用气 (国产) $114.857 6 \text{ m}^3$, 70 年内人均年用气量增加 5 575 倍; 1949 年中国天然气探明地质储量为 $3.85 \times 10^8 \text{ m}^{3[4]}$, 人均天然气地质储量为 $0.710 7 \text{ m}^3$, 2018 年天然气累计探明地质储量 $167 600.24 \times 10^8 \text{ m}^3$, 人均天然气地质储量 $12 011.08 \text{ m}^3$, 70 年内人均享有天然气地质储量增加了 16 900 倍; 1949 年中国仅在四川盆地发现了自流井、石油沟和圣灯山气田, 台湾省发现锦水、竹东、牛山和六重溪等小气田^[5], 2018 年中国共计发现了 313 个气田 (包括页岩气田 5 个、煤层气田 24 个和二氧化碳气田 3 个), 其中储量超 $300 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的大气田 72 个, 苏里格气田和安岳气田地质储量均超 $1 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 这两大气田目前年产气量均超过 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

70 年来中国在产气量、储量和发现气田数量上的辉煌业绩, 主要与地震勘探和钻井技术飞速发展密切相关。1951 年中国组建了第 1 个地震队, 并在鄂尔多斯盆地延长矿区首次开展了中国石油地震勘探^[6-7], 至 2018 年中国有 191 个石油勘探地震队。中国地震勘探技术发展可划分为 4 个阶段: ①光点地震 (1964—1971 年), 应用“五一”型光点地震仪, 在感光纸上以光点照相记录地震波信息, 单点接收, 不可回放, 只能发现背斜圈闭和隆起, 且效率低、精度低; ②模拟地震 (1965—1981 年), 应用模拟磁带地震仪, 多次覆盖, 可回放记录解释, 主要用于构造解释, 尝试用速度谱资料识别特殊岩性体; ③数字地震 (1974—1997 年), 使用数字地震仪, 覆盖次数提高+全数字处理解释扩大应用领域, 用于构造、岩性、含油气性综合评价等研究; ④两宽一高 (2000 年至今), 两宽一高 (宽频带、宽方位、高密度) 增加方位地震信息, 解决裂缝和应

力等造成的各向异性问题, 应用领域从常规储集层到非常规储集层, 如烃源岩品质和工程品质预测, 水平井优化部署与现场跟踪。全数字三维可视化+虚拟现实, 实现所见即所得。

1949 年中国仅有 8 台浅、中型钻机^[5], 2018 年中国共有石油钻机 2 719 台, 以中、深型钻机为主, 还有超深型钻机。近年来通过深度达 6 000 m 的超深层钻探, 在塔里木盆地发现了克深、大北、塔中 1 号大气田, 在四川盆地发现元坝和龙岗大气田^[8], 在塔里木盆地完成了亚洲陆上第 1 深井轮探 1 井 (8 882 m)^[8-9]。钻井技术由直井发展至水平井及酸化压裂作业。水平井技术保障了页岩气产出, 使中国涪陵、长宁和威远页岩气田得以开发。

1 从贫气国到天然气大国

中国天然气工业从新中国建立初期的一穷二白, 经过漫长地艰苦探索, 走向快速发展的道路, 使中国天然气探明储量从微不足道到跻身于世界前列, 天然气产量也从微乎其微跃升为世界第 6 产气大国。

1.1 天然气资源大国的形成

1949 年中国天然气探明储量仅为 $3.85 \times 10^8 \text{ m}^{3[1]}$, 在之后的数十年里, 天然气储量增长缓慢, 但从 1979 年之后的 40 年增长明显, 特别是最近的 20 年增长迅速。从 1949 年到 1993 年历经 45 年, 中国天然气累计探明储量才上升到 $1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (不包括台湾省, 下同), 而储量增加到 $2 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 仅用了 6 年时间。2009 年, 天然气累计探明储量突破 $7 \times 10^{12} \text{ m}^{3[10]}$, 到 2014 年天然气探明储量突破了 $10 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 2018 年更是突破了 $15 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (不包括页岩气、煤层气等非常规气) (见图 1)。从图 1 还可以看出, 中国天然气储量的快速增

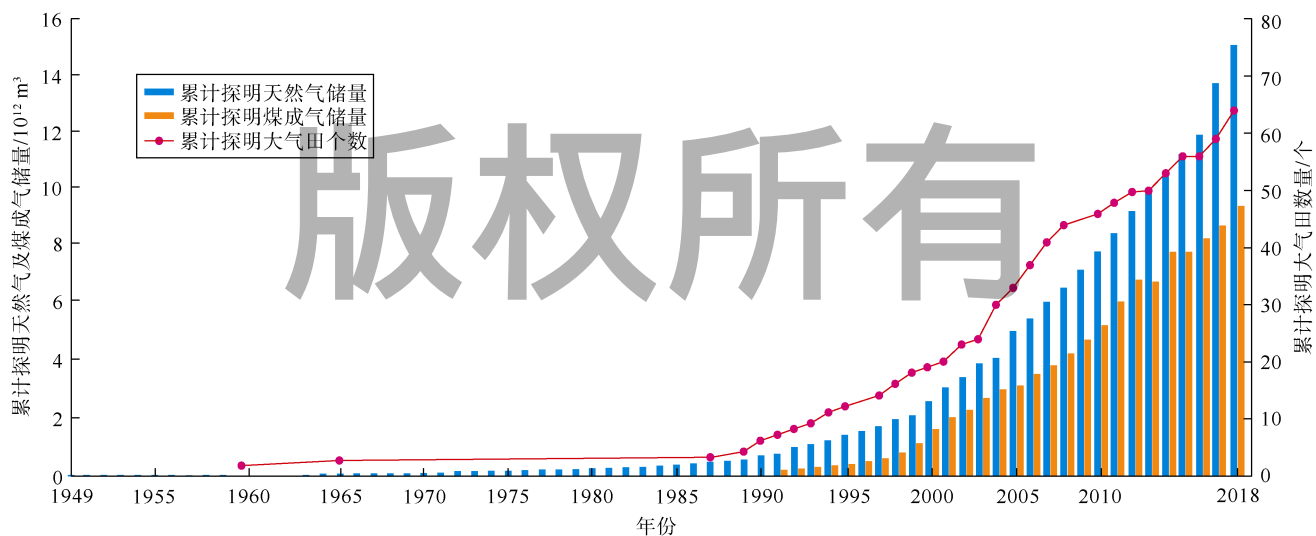


图 1 1949 年至 2018 年中国天然气和煤成气累计探明储量及与大气田关系

长与煤成气的储量增长息息相关,煤成气是中国天然气储量增长的主力军。煤成气在 1999 年累计探明储量突破 $1 \times 10^{12} \text{ m}^3$,仅过了两年,储量达到 $2 \times 10^{12} \text{ m}^3$,至 2018 年累计储量突破了 $9 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

全国发现煤成气田 188 个(包括煤层气田 24 个),煤成气田占全国气田 313 个的 60.1%。2018 年底全国煤成气田累计探明储量为 $92\,556 \times 10^8 \text{ m}^3$,占当年全国气层气累计探明储量 $150\,622.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的 61.4%,这与前人研究中国从气田个数上和探明储量上都以煤成气为主的结论一致^[11-18]。

1.2 天然气产量大国的形成

1949 年中国天然气产量只有 $1\,117 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[1-2],直至 1957 年中国天然气产量均在 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以下;1958 年产量达 $1.064\,3 \times 10^8 \text{ m}^3$,1976 年产量突破百亿立方米($100.950\,1 \times 10^8 \text{ m}^3$)。1998 年产量 $222.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,是年中国人均用气仅 17.9 m^3 ,为贫气国。产气大国标准是年产量达 $500 \times 10^8 \text{ m}^3$ 或更多的国家^[19]。1929 年美国产气 $541 \times 10^8 \text{ m}^3$ 成为世界上第 1 个产气大国;1960 年俄罗斯(前苏联)产气 $452.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,之后成为世界第 2 个产气大国。从 1929 年至 2003 年,世界年产量达 $500 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的产气大国只有 11 个。分析这些成为产气大国的基本条件主要有两项:①天然气可采资源量大于 $13 \times 10^{12} \text{ m}^3$;②剩余可采储量最低要达 $1.246\,2 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[19]。2003 年,中国天然气可采资源量为 $13.32 \times 10^{12} \sim 17.00 \times 10^{12} \text{ m}^3$,剩余可采储量为 $2.089\,4 \times 10^{12} \text{ m}^3$,据此,戴金星^[19-20]、贾文瑞等^[21]、张抗等^[22]和赵贤正等^[23]推断中国 2005 年可成为产气大国。果然 2005 年中国年产量 $499.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ (其中煤成气 $261.16 \times 10^8 \text{ m}^3$,占 52.3%),成为当年世界第 11 位产气大国(见图 2),该年全球有 12 个产气大国。分析图 2 得知,①2005 年成为产气大国之前中国各年天然气中煤成气产量占

比均低于 50%甚至更低,2005 年之后各年煤成气产量占比均高于 50%,年均为 56.5%,最多的 2008 年占 66.2%;②2005 年之后,年产量上升率变大。

从 1949 年至 2010 年历经 61 年,中国累计产气量达到 $1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ($1.017 \times 10^{12} \text{ m}^3$),之后历经 8 年至 2018 年累计产量就上升至 $2 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ($2.068 \times 10^{12} \text{ m}^3$),可见中国年产量日益增加。

2 勘探开发和研究大气田是快速发展天然气工业的主要途径

2.1 大气田是天然气工业的支柱

截至 2018 年底,中国共发现大气田 72 个(包含 4 个页岩气田和 4 个煤层气田),中国第 1 个大气田是发现于 1959 年的卧龙河气田,地质储量 $380 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[19],中国大气田的分布如图 3 所示。由图 3 可知,中国大气田主要分布在 3 大盆地:四川盆地共有 25 个(4 个页岩气田)、鄂尔多斯盆地 13 个(1 个煤层气田)、塔里木盆地 10 个,同时,这 3 个盆地也是中国主产区^[24]。2018 年,鄂尔多斯盆地大气田天然气产量为 $408.69 \times 10^8 \text{ m}^3$,四川盆地大气田产量为 $399.15 \times 10^8 \text{ m}^3$,塔里木盆地大气田产量为 $231.42 \times 10^8 \text{ m}^3$,大气田产量占各自盆地总产量的比例分别为 87.9%、92.9%和 85.4%。这 3 个盆地大气田产量共计 $1\,039.26 \times 10^8 \text{ m}^3$,占中国天然气总产量的 65%,因此这 3 个盆地大气田在中国天然气产量中占主体地位。

储量大于 $1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 的超大型气田对产气大国起重大作用,中国苏里格和安岳两个气田均属超大型气田,2018 年产量均超 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$,共产气 $302.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全国产气量的 18.9%。目前世界产气大国荷兰和俄罗斯均勘探开发大气田从贫气国变为产气大国。荷兰在 1958 年天然气可采储量不足 $740 \times 10^8 \text{ m}^3$,年产量仅 $2 \times 10^8 \text{ m}^3$,但 1959 年发现可采储量近 $3 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 格罗宁根超大型气田,1975 年产量 $828.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,由此向德国、法国和比利时出口天然气,成为产气大国^[19]。俄罗斯(前苏联)在 20 世纪 50 年代初天然气储量不足 $2\,230 \times 10^8 \text{ m}^3$,年产量仅 $57 \times 10^8 \text{ m}^3$,是个贫气国,1960—1990 年由于发现 40 多个大气田,使天然气储量达 $453\,069 \times 10^8 \text{ m}^3$,天然气年产量从 $453 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增长到 $8\,150 \times 10^8 \text{ m}^3$,使其由贫气国一跃成为当时世界第 1 天然气大国^[19]。

2.2 大气田发现高峰期也是中国储量和产量快速增长期

1949 年中国累计探明天然气地质储量和年产量都极低,直至 1990 年中国累计探明天然气储量仍仅有

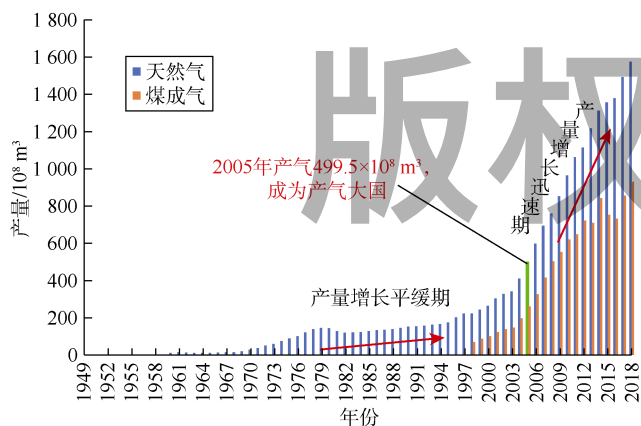
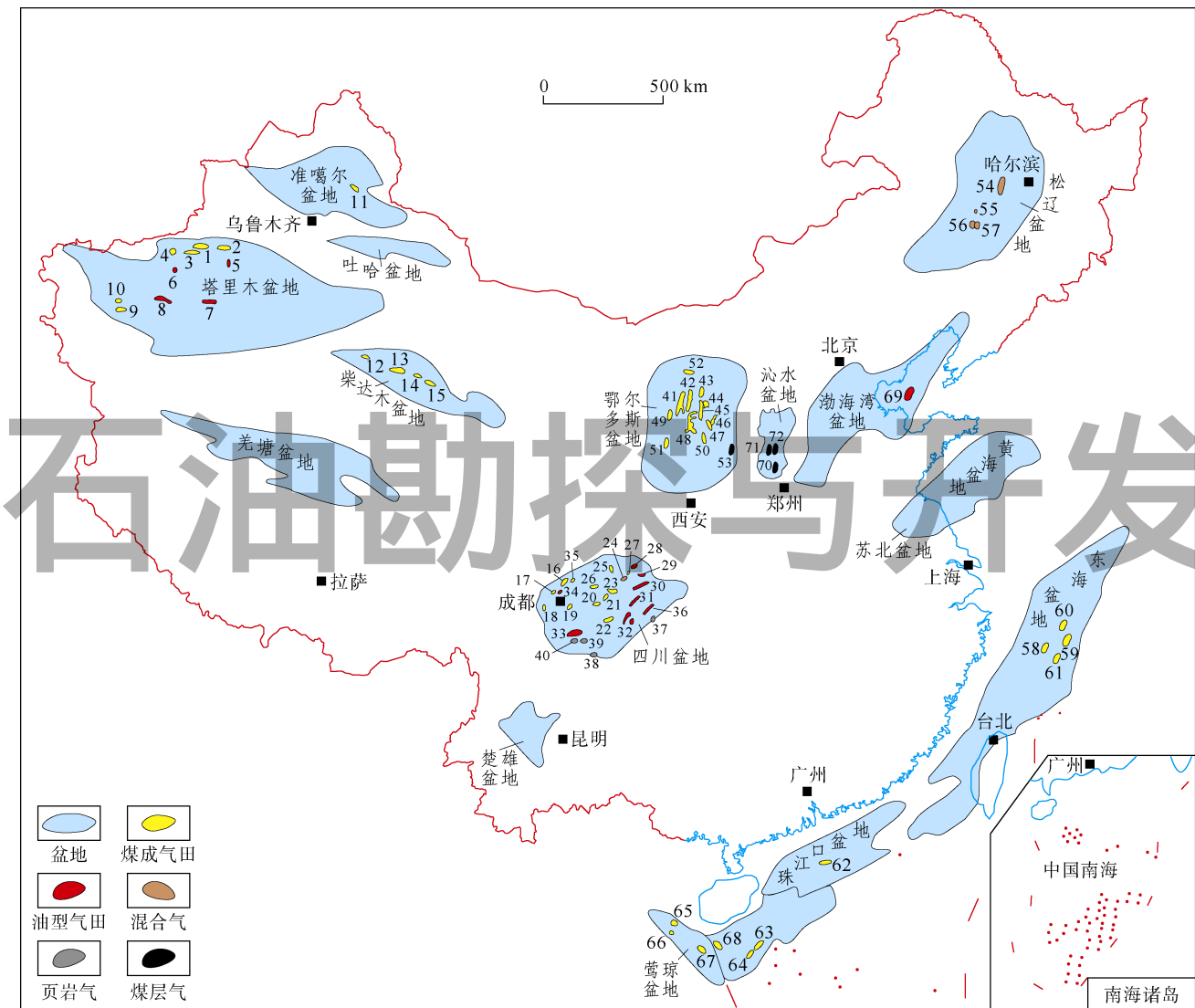


图2 1949年至2018年中国天然气(包括煤成气)年产量



塔里木盆地10个: 1. 克拉2; 2. 迪那2; 3. 克拉苏; 4. 大北; 5. 塔河; 6. 玉东; 7. 塔中1号; 8. 和田河; 9. 柯克亚; 10. 阿克莫木。准噶尔盆地1个: 11. 克拉美丽。柴达木盆地4个: 12. 东坪; 13. 台南; 14. 涩北1; 15. 涩北2。四川盆地25个: 16. 新场; 17. 成都; 18. 邛西; 19. 洛带; 20. 安岳; 21. 磨溪; 22. 合川; 23. 广安; 24. 龙岗; 25. 元坝; 26. 八角场; 27. 普光; 28. 铁山坡; 29. 渡口河; 30. 罗家寨; 31. 大天池; 32. 卧龙河; 33. 威远; 34. 川西; 35. 中江; 36. 大池干; 37. 涪陵; 38. 长宁; 39. 威远(页岩气); 40. 威荣。鄂尔多斯盆地13个: 41. 苏里格; 42. 乌审旗; 43. 大牛地; 44. 神木; 45. 榆林; 46. 米脂; 47. 子洲; 48. 靖边; 49. 柳杨堡; 50. 延安; 51. 庆阳; 52. 东胜; 53. 鄂东。松辽盆地4个: 54. 徐深; 55. 龙深; 56. 长岭1号; 57. 松南。东海盆地4个: 58. 春晓; 59. 宁波22-1; 60. 宁波17-1; 61. 太外天C。珠江口盆地1个: 62. 荔湾3-1。莺琼盆地6个: 63. 陵水17-2; 64. 陵水25-1; 65. 东方1-1; 66. 东方13-2; 67. 乐东22-1; 68. 崖13-1。渤海湾盆地1个: 69. 渤海。沁水盆地3个: 70. 沁水潘庄南区; 71. 沁水; 72. 沁水柿庄南区。

图3 中国大气田分布示意图

$7.045 \times 10^8 \text{ m}^3$, 年产量 $152 \times 10^8 \text{ m}^3$, 在这 40 多年的时间里, 中国天然气储量和产量增长缓慢, 主要原因是这期间发现的大气田数量很少, 全国仅探明 6 个大气田^[25], 而且没有一个大气田的储量超过 $1\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[26]。但从 1991 年至 2018 年 28 年间, 平均每年发现 2.4 个大气田, 而且单个大气田的储量规模也很大, 超过 $1\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的大气田 33 个, 苏里格和安岳大气田的储量规模超过 $10\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$, 这些大气田的发现促进了中国天然气储量和产量的快速增长(见图 1)。至 2018 年底中国 72 个大气田累计探明天然气地质储量达 $124\,504 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占全国探明天然气储量 16.7×10^{12}

m^3 的 75%。

从图 1 与图 2 对比可见, 从 1991 年至 2000 年大气田发现数与天然气储量增长率正相关性显著, 但同期大气田发现数与天然气年产量增加率正相关性不显著, 这是由于大气田开发和运输管线建设需要时间的缘故, 这种滞后性从 2001 年之后就消退了, 且显示大气田发现率与储量和天然气产量具有显著正相关性。

2.3 大气田主控因素和形成条件研究加速了大气田的发现

自从“六五”期间以来, 借助国家天然气科技攻关等项目, 中国学者持续开展大气田形成主控因素研

究^[27-34]，在大气田形成的众多影响因素中，总结出大气田形成的 7 项定量和半定量的主控因素^[32]，并预测中国大气田有利勘探领域，加速了一大批大气田的发现。概括形成大气田的定量和半定量主控因素主要包括^[32]：①生气中心及其周缘生气强度大于 $20\times 10^8\text{ m}^3/\text{km}^2$ 的区带，有利于大气田的形成；②大气田成藏期晚，主要在新世代，若多次成藏则指最后一次成藏期；③有效气源区存在古隆起圈闭；④大气田多形成于煤系或其上、下圈闭中；⑤大气田生气区内以孔隙型储集层为主；⑥低地势区是大气田聚集的有利地区；⑦异常压力封存箱外（间）或箱内有利于大气田形成。利用上述大气田形成的主控因素研究成果，成功地提前预测了中国大气田展布情况，为中国大气田发现和勘探提供了理论基础，加速了大气田的勘探开发。图 4 是“六五”以来天然气攻关专题所预测的鄂尔多斯盆地天然气有利区或气聚集带与其后不同时期探明大气田对比图。早期研究成果成功地预测了鄂尔多斯盆地

天然气有利地区，至 2018 年底鄂尔多斯盆地共发现大气田 12 个（煤层大气田除外），天然气探明地质储量达 $43\,461.89\times 10^8\text{ m}^3$ ，其中超过千亿立方米的大气田有 9 个，这些大气田均分布在早期预测的天然气有利勘探区范围内，并且基本上位于生气强度大于 $20\times 10^8\text{ m}^3/\text{km}^2$ 的区带内，生气强度控制着大气田的分布。

3 天然气新理论推动天然气工业更快发展

分类原则不同，可以划分出不同的天然气理论。根据气组分中分子来源于有机质或无机质，形成了天然气有机成因理论和无机成因理论；根据烷烃气来源于腐泥型干酪根或腐殖型干酪根，形成了油型气理论和煤成气理论；主要根据储源分离或储源共体，形成了常规天然气理论和非常规天然气理论，后者还包括储源分离如致密砂岩气。

油型气理论和煤成气理论，是以往至今指导天然

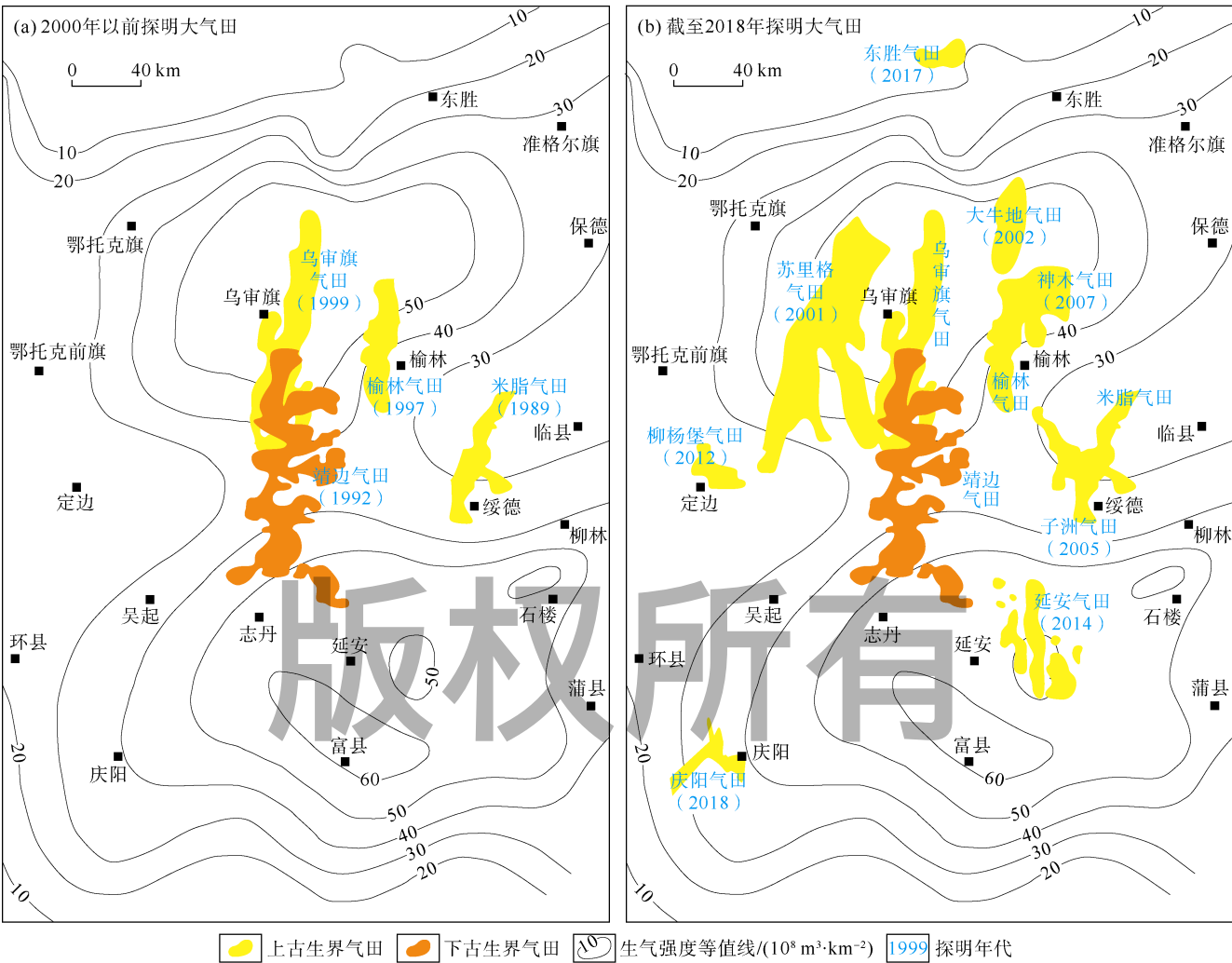


图 4 鄂尔多斯盆地不同年代探明大气田对比

气工业发展的功勋型理论。非常规气理论在“页岩气革命”推动下,对推动今后天然气工业更好发展显示强大潜力。

3.1 煤成气理论促进了中国从贫气国走向产气大国

世界上 19 世纪 70 年代开始形成海相生油理论萌芽,之后一直在发展和完善;20 世纪 20 年代以中国学者研究为主开始形成陆相生油理论^[35-36]。无论是海相生油理论或陆相生油理论均认为腐泥型泥页岩和碳酸盐岩是油气的源岩,区别是前者源岩为海相,后者源岩为陆相,故两者均在油型气理论范围之内。由此可见,指导世界天然气勘探最早的传统理论是油型气理论。

20 世纪 40 年代德国学者提出煤系能够形成大量天然气,并能聚集成工业性气田^[37],但未注意煤系可否成油而建立了纯朴的煤成气理论。此新理论的出现并首先在西欧指导天然气勘探而取得了丰硕成果:在德国西北盆地发现格罗宁根超大型气田等大批煤成气田^[17];在英荷盆地至少发现 455 个煤成气田^[38]。

中国近代石油工业从 1878 年开始,经过 100 年至 1978 年^[19],均以油型气理论即“一元论”指导天然气勘探,天然气工业极其薄弱,天然气储量和产量均很少。中国煤成气研究始于 20 世纪 70 年代末,1979 年《成煤作用形成的天然气与石油》^[39]指出煤系成烃的气油主次关系,煤成气核心理论是煤系为气源岩,煤系成烃以气为主油为辅^[17, 40]。煤成气新理论的出现,使指导中国天然气勘探的理论从油型气“一元论”发展成煤成气和油型气的“二元论”。煤成气理论开辟了中国天然气勘探新领域,促进了中国天然气工业大发展,由以下几方面足以可见:①煤成气促进了中国成为产气大国,2005 年中国成为世界第 11 位产气大国。众所周知:储量是产量的基础,在煤成气储量和产量在天然气中比例均超过 50%时,中国才成为产气大国;2005 年中国以上两者比例分别为 62.4%和 52.3%,这说明煤成气储量和产量是中国成为世界产气大国的基础。

②煤成大气田是产气大国的主力,截至 2018 年底中国共发现常规大气田 64 个(累计探明天然气储量 $109\,425.21 \times 10^8 \text{ m}^3$,不包括 4 个页岩和 4 个煤层气大气田),其中煤成大气田 45 个,累计探明天然气储量 $82\,912.42 \times 10^8 \text{ m}^3$,全国累计探明天然气储量 $167\,600.24 \times 10^8 \text{ m}^3$,故煤成大气田储量分别占全国天然气储量和大气田总储量的 49.47%和 75.77%。2018 年全国天然气产量为 $1\,602.7 \times 10^8 \text{ m}^3$,大气田产量为 $1\,081.56 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中煤成气大气田产量为 $816.27 \times 10^8 \text{ m}^3$,故煤成气大气田产量分别占全国产气量和大气田产气量的 50.93%和 75.47%。③煤成气新理论指导天然气勘探开发建成

中国最大产气区。鄂尔多斯盆地是中国最早用现代化钻机勘探油气的油田,从 1907 年延 1 井开始至 1970 年代末一直以海相和陆相生油理论指导勘探,不把石炭系—二叠系含煤地层作为气源岩进行勘探,天然气勘探未有进展,1980 年初尤其是“六五”“煤成气开发研究”天然气科技攻关开始,长庆油田和众多学者^[41-46]指出石炭系—二叠系煤系是良好气源岩,其至今仍是长庆油田天然气勘探重要目标。鄂尔多斯盆地勘探开发取得重大进展,成为中国第 1 个大气区。2018 年产气 $464.96 \times 10^8 \text{ m}^3$,是中国第 1 个年产气超 $400 \times 10^8 \text{ m}^3$ 盆地,占全国产气量的 29%。其中中国储量和产量最高的苏里格气田,2018 年累计探明天然气储量 $18\,598 \times 10^8 \text{ m}^3$,年产气量 $188.68 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全国产气量的 11.77%。全盆地共发现 12 个大气田(见图 4),除靖边气田是煤成气和油型气混源外其他均为煤成大气田,其中 9 个储量超 $1\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。鄂尔多斯大气区为京津冀和西北东部地区改善环境污染起了重大作用。④克拉 2 煤成大气田发现和开发,催生了西气东输管线建设和中国第 3 大气区塔里木气区的诞生。尽管当时一种意见认为要西气东输管线年输 $120 \times 10^8 \text{ m}^3$ 天然气,塔里木盆地储量保证还不足,储采比仅为 28,不宜建设该管线;但另一种意见认为可建该工程^[46],因为有天然气地质和开发优越的“三最”的克拉 2 大气田作基础:最大的储量丰度 ($59.05 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$)、最高的气柱高度 (468 m)、最大的单井(克拉 2-7 井)产量 ($495.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)。同时库车坳陷煤成气潜力大,还可找到更多储量。之后迪那 2、大北、克深等一批煤成气大气田发现,使西气东输的储量保证更充足,以及塔里木盆地现今已成为中国第 3 大气区,证明煤成气理论对中国天然气工业发展意义重大。

3.2 页岩气理论为中国天然气工业更快发展增添了新动力

页岩气是产自极低孔渗、暗色富有机质页岩地层系统中源储一体的天然气,以吸附或游离状态为主要聚集方式,本质上为连续生成的生物成因气、热成因气或两者的混合气^[47-49]。页岩气由于其分布广、储量大等特点,近 10 年来迅速崛起,受到越来越多国家的重视。美国自 1821 年钻探第 1 口井深仅 8 m 的页岩气井以来,经过了近 200 年的发展,主要经历了 4 个阶段^[50]:第 1 阶段(1821—1978 年),偶然发现阶段;第 2 阶段(1978—2003 年),认识创新与技术突破阶段;第 3 阶段(2003—2006 年),水平井与水力压裂技术推广应用阶段(大发展阶段);第 4 阶段(2007 年至今),全球化发展阶段。美国是世界上唯一实现页岩气大规

模商业开采的国家。1981 年被誉为 Barnett 页岩气之父的乔治·米歇尔对 C.W.Slay No.1 井页岩段实现大规模压裂导致 Barnett 页岩成为美国第 1 个大规模商业化开采的页岩气田，由此推动了美国页岩气勘探开发的蓬勃发展，在全球掀起了页岩气勘探开发的热潮^[51]。目前在美国、中国、加拿大和阿根廷已取得可喜的开发成果（见图 5）。2018 年，美国页岩气产量 $6\,072\times 10^8\text{ m}^3$ ^[52]，页岩气探明储量占天然气总探明储量的 66%^[53]，使美国从进口天然气的产气大国，跃变为出口天然气的产气大国。

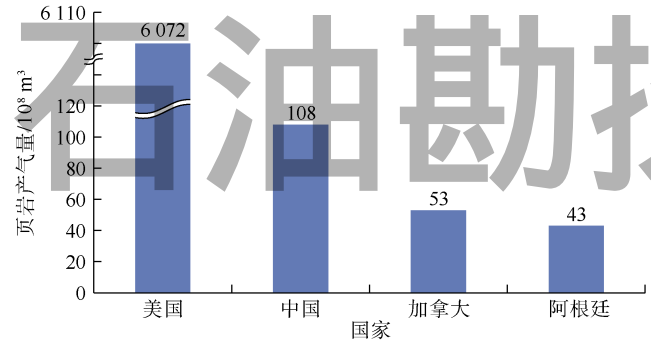


图 5 2018 年世界页岩气产气国的页岩气产量图^[52]

中国与北美都广泛发育海相页岩，但中国还发育海陆过渡相和陆相页岩。中国和北美海相页岩有机质类型都以 I 型或 II₁ 型为主^[54]，中国海相页岩时代老、埋深大（1 500~5 000 m），热成熟度高（ R_o 值为 2.0%~3.5%），成藏条件复杂，历经多期构造运动，保存条件差，勘探风险较大。中国陆相页岩埋藏深度大，但热成熟度低（ R_o 值为 0.4%~1.3%）^[55]。中国页岩储集层含有大量脆性矿物，脆性系数可达 46.15%^[56]，北美的储集层脆性系数为 38.27%^[57]，总体上中国页岩比美国页岩脆性更好。

中国页岩与美国页岩相比，由于埋深大，经历多期构造运动，保存条件差。海相页岩年代老，成熟度高；陆相页岩时代新，成熟度低，多数处于生油窗阶段，中国页岩气地质条件比美国差。美国 1980 年就启动了页岩气开发理论技术攻关项目，而中国则晚了约 30 年。中国页岩气勘探开发大致经历了 3 个阶段^[58]：①学习借鉴阶段（2003—2008 年）；②选区评价与探井实施阶段（2009—2012 年）；③规模建产阶段（2013 年至现今）。中国在 2008 年与国际合作完成第 1 口页岩气井——长芯 1 井，2009 年中国石油实施页岩气威 201 直井，2010 年发现了五峰组—龙马溪组和筇竹寺组两套页岩气目的层段，并获得工业性页岩气流，由此推动了四川盆地南部自 2013 年以来先后发现并开发了涪陵、威远、长宁、威荣等页岩气田。2018 年底中

国页岩气累计探明地质储量 $10\,455.67\times 10^8\text{ m}^3$ ，其中经济可采储量 $1\,313.29\times 10^8\text{ m}^3$ ，累计产气量 $335.24\times 10^8\text{ m}^3$ 。由于中国页岩气地质资源量为 $(83.3\sim 166.0)\times 10^{12}\text{ m}^3$ ，技术可采资源量为 $(10.0\sim 36.1)\times 10^{12}\text{ m}^3$ ，总体上页岩气资源量丰富，具有较好的发展前景^[59]，目前中国已成为世界第 2 页岩气产气大国，页岩气也是中国天然气工业发展的新动力。

3.3 煤层气

全球有 74 个国家有煤层气资源，其中 90% 的煤层气资源分布在 12 个主要产煤国家。煤层气产业发展相对较早的国家有美国、俄罗斯、德国、澳大利亚、英国、印度等，其中美国是煤层气开发最成功和采气量最大的国家^[60]。中国煤层气资源开发分为 3 个阶段：矿井抽放瓦斯阶段（1952—1989 年）、煤层气开发技术引进阶段（1989—1995 年）和煤层气产业形成阶段（1996 年至今）^[61]。1995 年以来，中国建立了国家煤层气开发利用工程研究中心和煤矿瓦斯治理研究中心，1997 年钻探了沁南枣园第 1 口煤层气井，到 2015 年，已经建成了沁水、鄂东、阳煤等 10 个煤层气产业示范工程项目基地。

中国煤层气资源丰富，2006 年国土资源部组织的“新一轮煤层气资源评价”结果显示，中国埋深 2 000 m 以浅煤层气地质资源总量为 $36.81\times 10^{12}\text{ m}^3$ ，可采资源量为 $10.87\times 10^{12}\text{ m}^3$ 。2015 年国土资源部油气战略研究中心组织的“煤层气资源动态评价”结果显示，中国埋深 2 000 m 以浅煤层气总资源量约为 $30\times 10^{12}\text{ m}^3$ ，可采资源量约为 $12.5\times 10^{12}\text{ m}^3$ ，居世界第 3 位（见表 1）。截至 2018 年底，全国累计探明煤层气地质储量 $6\,521.9\times 10^8\text{ m}^3$ ，技术可采储量超过 $3\,253\times 10^8\text{ m}^3$ ，经济可采储量超过 $2\,625\times 10^8\text{ m}^3$ 。

表 1 世界各国煤层气资源量与煤炭量^[62]

国家	煤层气资源量/10 ¹² m ³	煤炭量/10 ¹² t
俄罗斯	17.0~113.0	6.50
加拿大	6.0~76.0	7.00
中国	30.0~36.8	5.60
美国	21.0~28.0	3.95
澳大利亚	8.0~14.0	1.70

中国煤层气资源具有“多个煤阶、多个深度、多期生气、多源叠加、多期改造”的地质特征。煤阶煤质种类多、煤层埋深跨度大、成煤条件多样、成煤时代多期、煤变质作用叠加、构造变动多幕，导致煤层气成藏作用复杂和气藏类型多样^[63]。煤层气赋存总体特征可概括为“四低一高”，即含气饱和度低、渗透率低、资源丰度低、储集层压力低和变质程度高。与美国、澳大利亚等国的煤层气主力产区的储集层特征相比，中国

的煤层气储集层既有煤层厚度大、含气量高、埋藏深度适中有利特征,又有形成时代晚、构造复杂、压力系数低、渗透率低等不利因素^[64],故中国煤层气开发难度大,条件和产量不及美国,2018 年仅产 $51.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

4 结论

新中国 70 年来天然气勘探开发取得重大进展,从贫气国跃升为世界第 6 产气大国。1949 年中国年产气 $1.117 \times 10^4 \text{ m}^3$,探明天然气储量为 $3.85 \times 10^8 \text{ m}^3$,人年均国产气和储量分别为 0.020 m^3 和 0.710 m^3 。而至 2018 年人年均国产气 114.857 m^3 ,天然气储量为 $12.011.08 \text{ m}^3$,人均国产气量和储量分别增加 5 575 倍和 16 900 倍。

勘探开发和研究大气田是快速发展天然气工业的主要途径。截至 2018 年底,中国共发现大气田 72 个,其中苏里格和安岳两个大气田探明地质储量超 $1 \times 10^{12} \text{ m}^3$,也是年产气量超 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的大气田。大气田主要分布于四川(25 个)、鄂尔多斯(13 个)和塔里木(10 个)3 个盆地。2018 年此 3 盆地大气田共产气 $1.039.26 \times 10^8 \text{ m}^3$,占中国天然气总产量的 65%,可见大气田在中国产气量中占主体地位。至 2018 年底中国 72 个大气田累计探明天然气储量共 $124.504 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全国探明天然气储量 $16.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 的 75%,足以说明大气田在天然气工业中举足轻重的作用。

天然气新理论推动中国天然气工业更好更快发展。1979 年之前指导天然气勘探的是传统的油型气理论即“一元论”,1979 年以来煤成气成为指导天然气勘探新理论,指导中国天然气勘探理论从“一元论”发展为“二元论”(油型气和煤成气),使中国天然气工业获得快速发展。煤成气是中国成为产气大国的主力气。2018 年中国天然气产量为 $1.602.7 \times 10^8 \text{ m}^3$,大气田产气 $1.081.56 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中煤成大气田产量为 $816.27 \times 10^8 \text{ m}^3$,煤成气大气田产量分别占中国产气量和大气田的产气量的 50.93%和 75.47%;2018 年底中国煤成气田累计探明储量为 $92.556 \times 10^8 \text{ m}^3$,占当年全国累计探明储量 $150.622.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的 61.4%。页岩气理论 21 世纪初才在中国出现,但至 2018 年已取得重要进展,目前页岩气年产量达 $108.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,探明开发了涪陵、长宁、威远和威荣页岩气田,共计探明天然气地质储量 $10.455.67 \times 10^8 \text{ m}^3$,累计产气 $335.24 \times 10^8 \text{ m}^3$,在世界产气四国(美国、中国、加拿大和阿根廷)中年产量仅次于美国,显示了中国页岩气有较好的前景。

致谢:苏义脑院士、何治亮教授和张功成教授提供了有关钻井队和地震队数据,深表感谢。

参考文献:

- [1] 《百年石油》编写组. 百年石油(1878—2000)[M]. 北京: 当代中国出版社, 2002: 39-51.
Writing Group of 'Hundred Years of Oil'. Hundred years of oil (1878-2000)[M]. Beijing: Contemporary China Publishing House, 2002: 39-51.
- [2] 傅诚德. 石油科学技术发展对策与思考[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010: 54-87.
FU Chengde. Strategies & thoughts on petroleum science and technology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010: 54-87.
- [3] 国家统计局. 中华人民共和国 2018 国民经济和社会发展统计公报[N]. 光明日报, 2019-03-01(1).
National Statistical Office. Statistical communiqué of the 2018 national economic and social development of the People's Republic of China[N]. Guangming Daily, 2019-03-01(1).
- [4] 戴金星, 夏新宇, 洪峰. 天然气地质研究促进了中国天然气储量的大幅度增长[J]. 新疆石油地质, 2002, 23(5): 357-365.
DAI Jinxing, XIA Xinyu, HONG Feng. Natural gas geology accelerated the growth of natural gas reserve in large scale in China[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2002, 23(5): 357-365.
- [5] 戴金星, 黄士鹏, 刘岩, 等. 中国天然气勘探开发 60 年的重大进展[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 689-698.
DAI Jinxing, HUANG Shipeng, LIU Yan, et al. Significant advancement in natural gas exploration and development in China during the past sixty years[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 689-698.
- [6] 陆邦干. 石油工业地球物理勘探早期发展史大事记(1939—1952 年)[J]. 石油地球物理勘探, 1985, 20(4): 338-343.
LU Banggan. Notes on the early development history of geophysical exploration in petroleum industry(1939-1952)[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1985, 20(4): 338-343.
- [7] 张德忠. 陆上石油地球物理勘探技术进步 50 年[J]. 石油地球物理勘探, 2000, 35(5): 545-558.
ZHANG Dezhong. 50 years of technical progress in land petroleum seismic exploration[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2000, 35(5): 545-558.
- [8] 戴金星, 倪云燕, 秦胜飞, 等. 四川盆地超深层天然气地球化学特征[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 588-597.
DAI Jinxing, NI Yunyan, QIN Shengfei, et al. Geochemical characteristics of ultra-deep natural gas in the Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 588-597.
- [9] 李东, 高向东. 亚洲陆上第一深井在塔里木诞生[N]. 中国石油报, 2019-07-19(1).
LI Dong, GAO Xiangdong. The first deep well on land in Asia was born in Tarim[N]. China Petroleum Daily, 2019-07-19(1).
- [10] 戴金星. 中国煤成气研究 30 年来勘探的重大进展[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(3): 264-279.
DAI Jinxing. Major developments of coal-formed gas exploration in the last 30 years in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(3): 264-279.
- [11] QIN Shengfei, DAI Jinxing, LIU Xiawei. The controlling factors of oil and gas from coal in the Kuqa Depression of Tarim Basin, China[J]. International Journal of Coal Geology, 2007, 70(1/2/3): 255-263.
- [12] QIN Shengfei, LI Feng, LI Wei, et al. Formation mechanism of tight coal-derived-gas reservoirs with medium-low abundance in T_3x Formation[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 89(Part 1): 144-154.
- [13] QIN Shengfei, ZHANG Yihan, ZHAO Changyi, et al. Geochemical evidence for in situ accumulation of tight gas in the Xujiache Formation coal measures in the central Sichuan Basin, China[J]. International Journal of Coal Geology, 2018, 196: 173-184.
- [14] DAI Jinxing, ZOU Caineng, LI Jian, et al. Carbon isotopes of Middle-Lower Jurassic coal-derived alkane gases from the major basins of northwestern China[J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 80(2): 124-134.

- [15] DAI Jinxing, NI Yunyan, ZOU Caineng. Stable carbon and hydrogen isotopes of natural gases sourced from the Xujiahe Formation in the Sichuan Basin, China[J]. *Organic Geochemistry*, 2012, 43: 103-111.
- [16] DAI Jinxing, GONG Deyu, NI Yunyan, et al. Stable carbon isotopes of coal-derived gases sourced from the Mesozoic coal measures in China[J]. *Organic Geochemistry*, 2014, 74: 123-142.
- [17] 戴金星, 倪云燕, 廖凤蓉, 等. 煤成气在产气大国中的重大作用[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(3): 417-432.
- DAI Jinxing, NI Yunyan, LIAO Fengrong, et al. The significance of coal-derived gas in major gas producing countries[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(3): 417-432.
- [18] 杨计海, 黄保家. 莺歌海凹陷东斜坡 L 气田天然气成因及运移模式[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(3): 450-460.
- YANG Jihai, HUANG Baojia. Origin and migration model of natural gas in L gas field, eastern slope of Yinggehai Sag, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(3): 450-460.
- [19] 戴金星. 中国从贫气国正迈向产气大国[J]. *石油勘探与开发*, 2005, 32(1): 1-5.
- DAI Jinxing. Chinese great advance: From a gas-shortage country to a giant gas-Producer[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(1): 1-5.
- [20] 戴金星. 我国天然气资源及其前景[J]. *天然气工业*, 1999, 19(1): 3-6.
- DAI Jinxing. Natural gas resources and its prospect in China[J]. *Natural Gas Industry*, 1999, 19(1): 3-6.
- [21] 贾文瑞, 徐青, 王燕灵, 等. 1996—2010 年中国石油工业发展战略[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999: 77-314.
- JIA Wenrui, XU Qing, WANG Yanling, et al. Development strategy of China's petroleum industry from 1996 to 2010[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999: 77-314.
- [22] 张抗, 周总瑛, 周庆凡. 中国石油天然气发展战略[M]. 北京: 地质出版社, 石油工业出版社, 中国石化出版社, 2002: 327-332.
- ZHANG Kang, ZHOU Zongying, ZHOU Qingfan. Development strategy of petroleum and natural gas in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, Petroleum Industry Press, China Petrochemical Press, 2002: 327-332.
- [23] 赵贤正, 李景明, 李东旭, 等. 中国天然气资源潜力及供需趋势[J]. *天然气工业*, 2004, 24(3): 1-4.
- ZHAO Xianzheng, LI Jingming, LI Dongxu, et al. Resource potentials and supply-demand trend of natural gas in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2004, 24(3): 1-4.
- [24] 戴金星. 中国陆上天然气四大产气区[J]. *天然气与石油*, 2019, 37(2): 1-6.
- DAI Jinxing. The four major onshore gas provinces in China[J]. *Natural Gas and Oil*, 2019, 37(2): 1-6.
- [25] 戴金星, 陈踐发, 钟宁宁, 等. 中国大气田及其气源[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 83-93, 123-126, 136-163.
- DAI Jinxing, CHEN Jianfa, ZHONG Ningning, et al. Large gas fields and their gas sources in China[M]. Beijing: Science Press, 2003: 83-93, 123-126, 136-163.
- [26] 戴金星. 中国煤成气大气田及其气源[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 2-8.
- DAI Jinxing. Giant coal derived gas fields and their gas sources in China[M]. Beijing: Science Press, 2014: 2-8.
- [27] 石宝珩, 戚厚发, 戴金星, 等. 加速天然气勘探步伐努力寻找大中型气田[C]//天然气地质研究论文集. 北京: 石油工业出版社, 1989: 1-7.
- SHI Baoheng, QI Houfa, DAI Jinxing, et al. Strengthening the pace of natural gas exploration and trying to find large gas fields[C]// Symposium of natural gas geology. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989: 1-7.
- [28] 戴金星, 宋岩, 张厚福. 中国大中型气田形成的主要控制因素[J]. *中国科学: 地球科学*, 1996, 26(6): 481-487.
- DAI Jinxing, SONG Yan, ZHANG Houfu. Main controlling factors for the formation of large and medium-sized gas fields in China[J]. *SCIENCE CHINA Earth Sciences*, 1996, 26(6): 481-487.
- [29] 徐永昌, 傅家谟, 郑建京, 等. 天然气成因及大中型气田形成的地质基础[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 103-106.
- XU Yongchang, FU Jiamo, ZHENG Jianjing, et al. The genesis of natural gas and the geoscience basis of the formation of large and medium-sized Gas Field[M]. Beijing: Science Press, 2000: 103-106.
- [30] 王庭斌. 中国大中型气田分布的地质特征及主控因素[J]. *石油勘探与开发*, 2005, 32(4): 1-8.
- WANG Tingbin. Distribution of large-middle sized gas fields in China: Geological characteristics and key controlling factors[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(4): 1-8.
- [31] 戴金星, 邹才能, 陶士振, 等. 中国大气田形成条件和主控因素[J]. *天然气地球科学*, 2007, 18(4): 473-484.
- DAI Jinxing, ZOU Caineng, TAO Shizhen, et al. Formation conditions and main controlling factors of large gas fields in China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18(4): 473-484.
- [32] 李剑, 胡国艺, 谢增业, 等. 中国大中型气田天然气成藏物理化学模拟研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001: 20-36.
- LI Jian, HU Guoyi, XIE Zengye, et al. Physical and chemical simulation of natural gas accumulation in large and medium-sized gas fields in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001: 20-36.
- [33] 戴金星, 倪云燕, 周庆华, 等. 中国天然气地质与地球化学研究对天然气工业的重要意义[J]. *石油勘探与开发*, 2008, 35(5): 513-525.
- DAI Jinxing, NI Yunyan, ZHOU Qinghua, et al. Significances of studies on natural gas geology and geochemistry for natural gas industry in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, 35(5): 513-525.
- [34] 张水昌, 胡国艺, 柳少波. 中国天然气形成与分布[M]. 北京: 石油工业出版社, 2019: 303-416.
- ZHANG Shuichang, HU Guoyi, LIU Shaobo. Formation and distribution of natural gas in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019: 303-416.
- [35] 戴金星. 油气地质学的若干问题[J]. *地质科学进展*, 2001, 16(5): 710-718.
- DAI Jinxing. Some problems in the study of petroleum geology[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(5): 710-718.
- [36] 石宝珩, 张抗, 姜衍文. 中国石油地质学五十年[C]//王鸿祯. 中国地质科学五十年. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999: 220-230.
- SHI Baoheng, ZHANG Kang, JIANG Yanwen. Fifty years of petroleum geology in China[C]//WANG Hongzhen. Fifty years of geological science in China. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999: 220-230.
- [37] 史训知, 戴金星, 王则民, 等. 联邦德国煤成气的甲烷碳同位素研究和对我们的启示[J]. *天然气工业*, 1985, 5(2): 1-9.
- SHI Xunzhi, DAI Jinxing, WANG Zemin, et al. A study of methane carbon isotope of coal-formed gas in FRG and its inspiration to us[J]. *Natural Gas Industry*, 1985, 5(2): 1-9.
- [38] 朱伟林, 杨甲明, 杜栩. 欧洲含油气盆地[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 391-432.
- ZHU Weilin, YANG Jiaming, DU Xu. Petroliferous basin in Europe[M]. Beijing: Science Press, 2011: 391-432.
- [39] 戴金星. 成煤作用中形成的天然气和石油[J]. *石油勘探与开发*, 1979, 6(1): 10-17.
- DAI Jinxing. Petroleum and natural gas generation in coalification[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1979, 6(1): 10-17.
- [40] 戴金星. 煤成气及鉴别理论研究进展[J]. *科学通报*, 2018, 63(14): 1291-1305.
- DAI Jinxing. Coal-derived gas theory and its discrimination[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(14): 1291-1305.
- [41] 戴金星. 我国煤系地层含气性的初步研究[J]. *石油学报*, 1980, 2(1): 27-37.
- DAI Jinxing. Preliminary research on natural gas in coal series in

- China[J]. Acta Petrolei Sinica, 1980, 2(1): 27-37.
- [42] 田在艺, 戚厚发. 中国主要含煤盆地天然气资源评价[C]//中国石油学会石油地质专业委员会. 天然气勘探. 北京: 石油工业出版社, 1986: 1-14.
- TIAN Zaiyi, QI Houfa. Resource evaluation of natural gas in the main coal-bearing basins in China[C]//The Professional Committee on Petroleum Geology of China Petroleum Society. Natural gas exploration. Beijing: Petroleum Industry Press, 1986: 1-14.
- [43] 王少昌. 陕甘宁盆地上古生界煤成气资源远景[C]//中国石油学会石油地质专业委员会. 天然气勘探. 北京: 石油工业出版社, 1986: 125-136.
- WANG Shaoshang. Resource prospect of the Upper Paleozoic coal-derived gas in Shangannin Basin[C]//The Professional Committee on Petroleum Geology of China Petroleum Society. Natural gas exploration. Beijing: Petroleum Industry Press, 1986: 125-136.
- [44] 戚厚发, 张志伟, 付金华. 我国主要含煤盆地煤成气资源预测与勘探方向选择[C]//《煤成气地质研究》编委会. 煤成气地质研究. 北京: 石油工业出版社, 1987: 229-237.
- QI Houfa, ZHANG Zhiwei, FU Jinhua. Resource prediction and exploration direction selection of coal-derived gas in the main coal-bearing basins in China[C]//The Editorial Committee of <Geological Research of Coal-derived Gas>. Geological research of coal-derived gas. Beijing: Petroleum Industry Press, 1987: 229-237.
- [45] 裴锡古, 费安琦, 王少昌, 等. 鄂尔多斯地区上古生界煤成气藏形成条件及勘探方向[C]//《煤成气地质研究》编委会. 煤成气地质研究. 北京: 石油工业出版社, 1987: 9-20.
- PEI Xigu, FEI Anqi, WANG Shaoshang, et al. Reservoir formation condition and exploration direction of the Upper Paleozoic coal-derived gas in the Ordos area[C]//The Editorial Committee of <Geological Research of Coal-derived Gas>. Geological research of coal-derived gas. Beijing: Petroleum Industry Press, 1987: 9-20.
- [46] 戴金星, 夏新宇, 卫延召. 中国天然气资源及前景分析: 兼论“西气东输”的储量保证[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(1): 1-8.
- DAI Jinxing, XIA Xinyu, WEI Yanzhao. Estimation of natural gas resources and reserves in China: With concerning to reserves for West-East gas pipeline project[J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(1): 1-8.
- [47] CURTIS J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [48] 张金川, 薛会, 张德明, 等. 页岩气及其成藏机理[J]. 现代地质, 2003, 17(4): 466-470.
- ZHANG Jinchuan, XUE Hui, ZHANG Deming, et al. Shale gas and its reservoir formation mechanism[J]. Geoscience, 2003, 17(4): 466-470.
- [49] 董大忠, 邹才能, 李建忠, 等. 页岩气资源潜力与勘探开发前景[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3): 324-336.
- DONG Dazhong, ZOU Caineng, LI Jianzhong, et al. Resource potential exploration and development prospect of shale gas in the whole world[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2/3): 324-336.
- [50] 孙赞东, 贾承造, 李相方, 等. 非常规油气勘探与开发(下册)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011: 866-869.
- SUN Zandong, JIA Chengzao, LI Xiangfang, et al. Unconventional oil & gas exploration and development (Volume II)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011: 866-869.
- [51] MEHMET M. Shale gas: Analysis of its role in the global energy market[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 37: 460-468.
- [52] U.S. Energy Information Administration. Annual energy outlook 2019 with projections to 2050[EB/OL]. (2019-01-01)[2019-08-20]. <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/aeo2019.pdf>.
- [53] U.S. Energy Information Administration. U.S. crude oil and natural gas proved reserves, year-end 2018[R]. Washington: U.S. Energy Information Administration, 2019.
- [54] 李昌伟, 陶士振, 董大忠, 等. 国内外页岩气形成条件对比与有利区优选[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(5): 986-1000.
- LI Changwei, TAO Shizhen, DONG Dazhong, et al. Comparison of the formation condition of shale gas between domestic and abroad and favorable areas evaluation[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(5): 986-1000.
- [55] 邹才能, 董大忠, 王玉满, 等. 中国页岩气特征、挑战及前景(二)[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(2): 166-178.
- ZOU Caineng, DONG Dazhong, WANG Yuman, et al. Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects (II)[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(2): 166-178.
- [56] 唐颖, 邢云, 李乐忠, 等. 页岩储层可压裂性影响因素及评价方法[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 356-363.
- TANG Ying, XING Yun, LI Lezhong, et al. Influence factors and evaluation methods of the gas shale fracability[J]. Earth Science Frontier, 2012, 19(5): 356-363.
- [57] GALE J F W, REED R M, HOLDER J. Natural fractures in the Barnett Shale and their importance for hydraulic fracture treatments[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 603-622.
- [58] 金之钧, 白振瑞, 高波, 等. 中国迎来页岩油气革命了吗[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 451-458.
- JIN Zhijun, BAI Zhenrui, GAO Bo. Has China ushered in the shale oil and gas revolution?[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 451-458.
- [59] 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: 292-293.
- ZOU Caineng, TAO Shizhen, HOU Lianhua, et al. Unconventional petroleum geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014: 292-293.
- [60] 陈懿, 杨昌明. 国外煤层气开发利用的现状及对我国的启示[J]. 中国矿业, 2008, 17(4): 11-14.
- CHEN Yi, YANG Changming. The inspire of overseas coal-bed methane's exploitation and utilization[J]. China Mining Magazine, 2008, 17(4): 11-14.
- [61] 冯云飞, 李哲远. 中国煤层气开采现状分析[J]. 能源与节能, 2018(5): 26-27.
- FENG Yunfei, LI Zheyuan. Analysis of the status quo of coalbed methane exploitation in China[J]. Energy and Energy Conservation, 2018(5): 26-27.
- [62] 葛坤, 朱卫中, 张卫珂, 等. 煤层气开发利用现状及展望[J]. 内蒙古煤炭经济, 2016(24): 38-40.
- GE Kun, ZHU Weizhong, ZHANG Weike, et al. Present situation and prospect of coalbed methane development and utilization[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2016(24): 38-40.
- [63] 孙杰, 王佟, 赵欣, 等. 我国煤层气地质特征与研究方向思考[J]. 中国煤炭地质, 2018, 30(6): 30-40.
- SUN Jie, WANG Tong, ZHAO Xin, et al. Pondering on CBM geological features and research trend in China[J]. Coal Geology of China, 2018, 30(6): 30-40.
- [64] 熙时君. 煤层气能否逆袭成为“中国版页岩气”? [J]. 新能源经贸观察, 2019, 68: 30-34.
- XI Shijun. Whether the coal-bed methane can be reversed into the “Chinese shale gas”? [J]. Energy Outlook, 2019, 68: 30-34.

第一作者简介: 戴金星 (1935-), 男, 浙江温州人, 中国科学院院士, 中国石油勘探开发研究院教授级高级工程师, 从事天然气地质与地球化学研究工作。地址: 北京市海淀区学院路 20 号, 中国石油勘探开发研究院院部, 邮政编码: 100083。E-mail: djkx@petrochina.com.cn

联系作者简介: 倪云燕 (1977-), 女, 浙江乐清人, 博士, 中国石油勘探开发研究院高级工程师, 主要从事油气地球化学研究。地址: 北京市海淀区学院路 20 号, 中国石油勘探开发研究院石油地质实验研究中心, 邮政编码: 100083。E-mail: niyy@petrochina.com.cn

收稿日期: 2019-08-27 修回日期: 2019-09-30

(编辑 黄昌武)